



HAL
open science

Semer la biodiversité, Récolter la durabilité

Delphine Renard

► **To cite this version:**

Delphine Renard. Semer la biodiversité, Récolter la durabilité. Biodiversité et Ecologie. Université de Montpellier, 2025. <tel-05395983>

HAL Id: tel-05395983

<https://hal.science/tel-05395983v1>

Submitted on 3 Dec 2025

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons CC BY 4.0 - Attribution - International License



UNIVERSITE DE MONTPELLIER

Mémoire présenté en vue de l'obtention de
l'Habilitation à Diriger des Recherches

Présenté par
Delphine Renard



Ecole doctorale GAIA, Sciences du vivant



© E. Menguy

UNIVERSITE DE MONTPELLIER

Mémoire présenté en vue de l'obtention de
l'Habilitation à Diriger des Recherches

Semer la biodiversité Récolter la durabilité

Présenté par
Delphine Renard

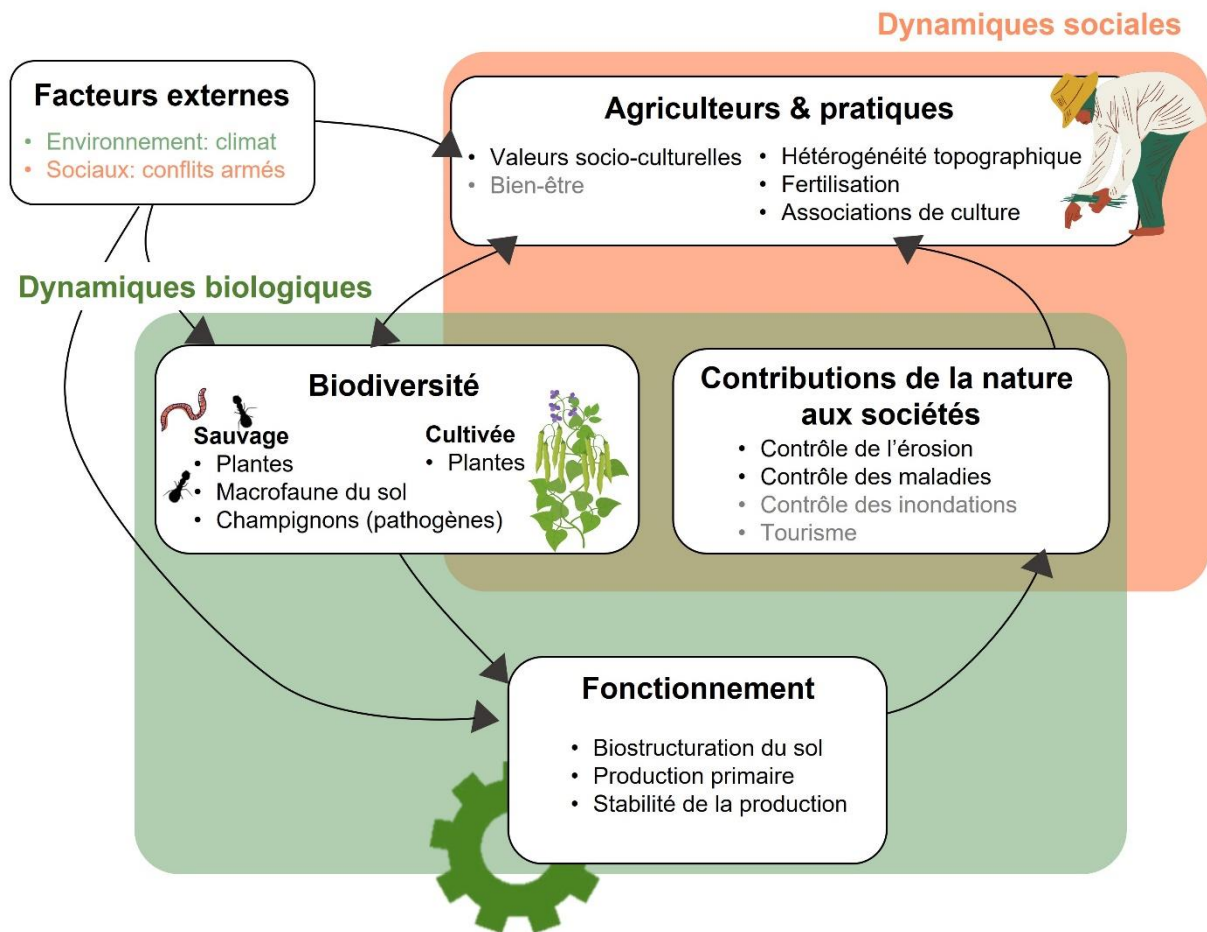


Ecole doctorale : GAIA, Sciences du vivant



Je déclare avoir respecté, dans la conception et la rédaction de ce mémoire d'HDR, les valeurs et principes d'intégrité scientifique destinés à garantir le caractère honnête et scientifiquement rigoureux de tout travail de recherche, visés à l'article L.211-2 du Code de la recherche et énoncés par la Charte nationale de déontologie des métiers de la recherche et la Charte d'intégrité scientifique de l'Université de Montpellier. Je m'engage à les promouvoir dans le cadre de mes activités futures d'encadrement de recherche.

Résumé graphique



Mots clés : agroécologie, biodiversité, stabilité, variabilité climatique, relations sociétés-environnement, multi-échelles, interdisciplinarité

Résumé

L'agriculture, la foresterie, l'aquaculture et les pêcheries font face à de nombreux défis : une demande alimentaire croissante, des malnutritions persistantes et une dégradation des ressources naturelles. Les changements climatiques rendent encore plus complexe la tâche d'assurer la sécurité alimentaire de 9.7 milliards de personnes d'ici 2050, tout en maintenant les moyens de subsistance des sociétés et en respectant l'environnement. Le rythme de ces changements et l'ampleur de leurs impacts et coûts humains rendent urgent la recherche de solutions pour renforcer la résilience des systèmes alimentaires. **Mes recherches évaluent le potentiel d'une solution basée sur la biodiversité, sauvage et cultivée.**

Dans ce cadre, mes travaux visent à **améliorer la compréhension des liens entre les activités agricoles, la biodiversité, le fonctionnement et les contributions de la nature aux sociétés par une approche interdisciplinaire, multi-échelles et dans une démarche finalisée en agroécologie.** Deux thématiques se dégagent :

1. Mes recherches évaluent les effets de la biodiversité sur le fonctionnement d'écosystèmes naturels et cultivés, anciens et actuels. Depuis 2016, je m'intéresse particulièrement à la diversité des plantes cultivées comme levier pour stabiliser les rendements agricoles face aux variations climatiques. Je contribue à avancer les connaissances sur les mécanismes des liens diversité-stabilité et les échelles spatiales—de l'exploitation au pays—auxquelles ces liens s'articulent. Cette recherche soutient une vision dynamique des agroécosystèmes (stabilité vs rendements annuels, variabilité climatique) et dépasse l'étude des espèces dominantes (riz, blé, maïs, soja) pour intégrer la diversité et composition en espèces et variétés cultivées par les agriculteurs-rices.

2. Fruit d'un rapprochement avec l'ethnoécologie, mes travaux s'appuient sur les savoirs locaux des agriculteurs-rices pour retracer les changements passés de la diversité cultivée et mettre en lumière l'articulation entre les valeurs des agriculteurs-rices à l'égard des plantes qu'ils cultivent et les facteurs externes (i.e., les changements climatiques) dans le processus de choix des plantes. Ces recherches soutiennent une meilleure reconnaissance du rôle central des agriculteurs-rices, de leurs perceptions, connaissances et valeurs multiples dans les décisions politiques pour l'adaptation, notamment aux changements climatiques.

Mon projet ambitionne d'identifier plus concrètement les échelles spatiales et les combinaisons d'espèces cultivées qui maximisent l'effet d'assurance biologique et stabilise ainsi la production alimentaire (axe1). Je souhaite ensuite dépasser les limites d'une approche monodisciplinaire et monofonctionnelle pour construire une vision plus holistique des multiples fonctions—agronomiques, écologiques et socio-culturelles—soutenues par l'agrobiodiversité. Je propose ainsi de (i) construire et caractériser la géométrie de l'espace multifonctionnel occupé par les espèces de plantes cultivées, (ii) suivre les dynamiques interannuelles et la stabilité de cet espace et (iii) évaluer sa vulnérabilité aux changements climatiques (axe 2).

Sommaire

Dossier administratif	1
Curriculum Vitae	2
Notes préliminaires.....	14
Synthèse des travaux	15
Introduction générale.....	16
Section 1 : Biodiversité et auto-organisation dans des paysages singuliers.....	19
1.1 <i>Surales</i> : une biodiversité bien cachée créée des paysages qui sautent aux yeux ..	23
1.2 Héritage écologique des pratiques agricoles précolombiennes	26
Conclusions et implications	27
Section 2 : Liens biodiversité-fonctionnement dans les agroécosystèmes actuels	28
2.1 Déterminants de la stabilité des rendements en agriculture.....	32
2.2 Contributions de la diversité des plantes cultivées face aux évènements climatiques extrêmes et aux maladies des plantes ?.....	37
2.2.1 Le climat.....	37
2.2.1 Les maladies des plantes.....	40
2.3 Mécanique des liens diversité-stabilité en agriculture	43
Conclusions et implications	45
Section 3 : Les défis du temps : suivre les dynamiques de l'agrobiodiversité et mesurer la stabilité	47
3.1 Retracer les dynamiques de l'agrobiodiversité	47
3.1.1 Les archives nous renseignent sur les dynamiques locales de la diversité des vignes	49
3.1.2 Vers une vision globale des dynamiques locales de l'agrobiodiversité	51
3.2 Tester les liens diversité-stabilité des rendements à l'échelle de l'exploitation.....	55
3.2.1 Observatoire dans le bassin arachidier du Sénégal	55
3.2.2 Observatoire de la diversité viticole à Gaillac en France	57
Section 4 : Les multiples valeurs associées à l'agrobiodiversité	60
4.1 Les agriculteurs rices accordent à leurs plantes des valeurs diverses et interconnectées.....	61
4.2 Evaluation des valeurs dans un système commercial.....	64
Conclusions et implications	66
Projet	67
Introduction générale	68
Axe 1 : Où et quelle diversité semer pour stabiliser la production agricole	71
Axe 2 : Multifonctionnalité des plantes cultivées, du présent au futur	74
Références	80
Articles choisis	94

DOSSIER ADMINISTRATIF



@Bastien Derives

Dr. Delphine RENARD

Née le 18-12-1984 | Française | mariée, deux enfants

Situation actuelle

2021- présent

Chargée de recherche en écologie des agroécosystèmes



Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS)

UMR 5175 - Centre d'Écologie Fonctionnelle et Évolutive (CEFE), Montpellier (France)

Responsabilités collectives

2023- présent

Co-directrice du département Interaction Ecologie Sociétés (Ines) du CEFE

Représentante élue des chargés de recherche au Conseil de laboratoire

Membre du comité parité du CEFE

Expériences professionnelles

2018 - 2020

Post-doctorat UMR 5175 CEFE, Montpellier, France

Relations diversité cultivée – fonctionnement des agroécosystèmes

Programme "Make Our Planet Great Again", PI: D.Renard

2016 - 2018

Post-doctorat Université de Californie à Santa Barbara, Etats-Unis

Relations diversité cultivée – stabilité de la production alimentaire

Supervision : Pr. David Tilman

2012 - 2015

Post-doctorat Université McGill, Montréal, Canada

Les multiples services écosystémiques fournis dans les milieux agricoles

Supervision : Pr. Elena Bennett, Dr. Jeanine Rhemtulla

2012

ATER AgroParisTech, Paris, France

Ingénierie écologique

2011

Assistante de recherche UMR 5175 CEFE, Montpellier, France

Agriculture précolombienne : source d'inspiration en agroécologie

Supervision : Pr. Doyle McKey

Titres universitaires

2007 - 2010

Doctorat en Biologie des Populations et Ecologie, Université de Montpellier

Intitulé: Héritage de l'agriculture précolombienne sur champs surélevés sur le fonctionnement actuel des écosystèmes

Directeur: Pr. Doyle McKey

2007

Master Biodiversité, Ecologie, Evolution, Université de Montpellier

2005

License Psychologie, Université de Besançon et Université Paris XIII

Financements obtenus

- 2023 **SAGHAS: *Sowing Agrobiodiversity to Harvest Sustainability***
Tremplin vers l'ERC, Université de Montpellier
98 000 €; Co-PI: D.Renard
- 2021 **Fields4Ever *Saw crop diversity, collect soil biodiversity and food security***
BiomeMaker, Analyse microbiologique de 230 échantillons; PI: D.Renard
- 2020 **Surales: from individual earthworms to landscape patterns in Colombian wetlands**
National Geographic Research & Exploration Grant, NGS-67876R-20
27 000 €; PI: D.Renard
- 2018 - 2024 **ASSET *AgrobiodiverSity for a food-Secure planET***
Programme Investissement d'Avenir, ANR17-MPGA-0004
850 000 €; PI: D.Renard

Projets en collaboration

- 2022 - 2026 **ClimOliveMed : *Diversity of varieties and farming systems as an asset of Mediterranean oleiculture in a global change setting***
Agropolis Fondation, 460 000 €; PIs: B. Khadari; S. Louafi; F. Lançon
- 2021 **FutureForOlive *Desirable futures for olive cultivation in Northern Morocco: operationalizing the science-society interface***
Agropolis Fondation, 30 000 €; PI: J. Blanco
- 2022-2027 **ARISER *Access to crop diversity and small farms' resilience to climate variability in African drylands : The role of seed and information networks.***
ERC Starting Grant, PI: V. Labeyrie
- 2018-2023 **LICCI *Local Indicators of Climate Change Impacts***
ERC Consolidator Grant No 771056 LICCI, PI: V. Reyes-Garcia

Evaluation de la recherche

- 2023 - 2024 **Evaluation des dossiers** de bourses post-doctorales du programme « Make Our Planet Great Again » de Campus France
- 2024 **Jury de thèse – Examinatrice**
Intitulé: *Crop diversity in a changing world: evidence from the Bassari farmers in south-eastern Senegal*
Candidate: Anna Porcuna Ferrer
Universitat Autònoma de Barcelona
- 2021 **Jury de thèse – Examinatrice**
Intitulé: Les populations travaillent avec la nature pour co-produire l'adaptation aux changements globaux dans les Alpes françaises
Candidate: Enora Bruley
Université Grenoble Alpes, Spécialité Biodiversité-Ecologie-Environnement
- Evaluation d'articles scientifiques pour les journaux: Nature, PNAS, Frontiers in Ecology and the Environment, PLOS ONE, Ecological Economics, Ecology and Society, Ecological Engineering, AMBIO, Insectes Sociaux

Enseignements, formations

2024	Enseignement « Agrobiodiversity and local knowledge » Etudiants de Master, école ISARA-Lyon
2023	Enseignement « Prise en compte de la biodiversité dans la transition agroécologique et l'adaptation au changement climatique traité du point de vue d'une écologue » Etudiants de Master de Supagro Montpellier
2019, 2020	Enseignement « agrobiodiversité & résilience » Etudiants de Master de l'Ecole Nationale Supérieure d'Agriculture de Thiès, Sénégal
2015	Formation aux méthodes d'analyses quantitatives sous R Etudiants de tous niveaux du Centre des Sciences de la Biodiversité du Québec (CSBQ)
2012	Enseignements aux élèves ingénieurs agronomes d'AgroParisTech Total: 59h éq. TD

Tableau 1. Détail des enseignements

Niveau	Lieu	Nom du module	Nature	Volume horaire (eqTD)
M1	UnivMontp	Diversité et biogéographie des écosystèmes	CM	5h
M1	AgroParis	Ecologie et génétique des populations	CM	4,5h
M1	ISARA	<i>Biodiversity management in agroecosystems</i>	CM	3h
M1	Sénégal	Agrobiodiversité et résilience	CM	2h
M1	Supagro	<i>Agroecology</i>	CM	2h
M2	AgroParis	Pratiques agricoles et conservation de la biodiversité	CM/jury	5h
1 ^{ère} année	AgroParis	Projets étudiants	Jury	1h
2 nd e année	AgroParis	Ecologie de la restauration & restauration écologique	CM/ TD	19h
3 ^{ème} année	AgroParis	Biodiversité et ingénierie écologique	CM/jury	3h
Mastère*	AgroParis	Ingénierie écologique	CM	13h
Tous niveaux	CSBQ	Introduction a R	TD	8h

*Formation spécialisée pour le Corps des ingénieurs des Ponts, Eaux et forêts. CM = cours magistral ; TD = travaux pratiques

Encadrements

Synthèse des encadrements et co-encadrements

Post-doctorant·e·s : 4

Doctorant·e·s : 4

Stages de Master et de Licence : 7

Ingénierie d'étude (IE) : 1

Tableau 2. Synthèse des articles co-publiés dans le cadre des encadrements réalisés

Niveau	Nom de l'étudiant	Nombre de co-publications	Références des articles
Post-doctorat	A. Doncieux	3 (soumises)	
	L. Mahaut	3	2023-6 ; 2022-13 ; 2021-16
	P-A. Précigout	1	2022-12
Doctorat	A. Doncieux	2	2022-11
	M. Demongeot	2	2024-3 ; 2022-9
	A. Cissé	2	2022-10 ; 2021-40
Master	J. Menesch	1	2023-7
IE	O. Cobelli	1	2023-7

Post-doctorant·e·s

- 2023 - 2024 **A. Doncieux (9 mois). Diversité-stabilité du rendement de la vigne**
Encadrement : D. Renard et S. Caillon (CNRS)
- 2023 - 2024 **M. Ariza (12 mois). Echelle-dépendance des relations diversité des plantes cultivée-stabilité des rendements agricoles**
Encadrement : D. Renard et T. Lamy (IRD)
- 2019 - 2021 **L. Mahaut (24 mois). Mécanismes des liens diversité-stabilité de la production alimentaire à l'échelle mondiale**
Encadrement : D. Renard et C. Violle (CNRS)
- 2019 - 2020 **P.A. Précigout (12 mois). Modélisation d'assemblages d'espèces de la parcelle au paysage pour réguler les pathogènes du blé**
Encadrement : D. Renard et C. Robert (INRAE)

Doctorant·e·s

- 2023 - **E. Menguy Gestion de l'agrobiodiversité et résilience des systèmes agricoles dans les zones semi-arides du Sénégal et de Madagascar**
Financement : ERC ARISER
Encadrement : V. Labeyrie (CIRAD), S. Carrière (IRD), D. Renard
Université de Montpellier, Ecole Doctorale Gaia
- 2019 - 2023 **M. Demongeot. Multiples valeurs de l'agrobiodiversité**
Financement : projet ASSET
Encadrement : D. Renard et Y. Aumerruddy-Thomas (CNRS)
Université de Montpellier, Ecole Doctorale Gaia
- 2019 - 2023 **A. Doncieux. Approche bioculturelle des dynamiques de l'agrobiodiversité**
Financement : projet ASSET
Encadrement : D. Renard et S. Caillon (CNRS)
Université de Montpellier, Ecole Doctorale Gaia
- 2018 - 2022 **A. Cissé. L'agrobiodiversité pour renforcer la résilience et réduire les risques faces aux changements climatiques**
Financement : obtention de bourses DAAD, SCAC et IRD
Encadrement : S.N. Sall (Gaston Berger), A. Barnaud & C. Berthouly (IRD) et D. Renard
Université Gaston Berger, St Louis, Sénégal

Etudiants de Licence et Master

Tableau 3. Synthèse des étudiants encadrés. Leur devenir est indiqué lorsqu'il est connu

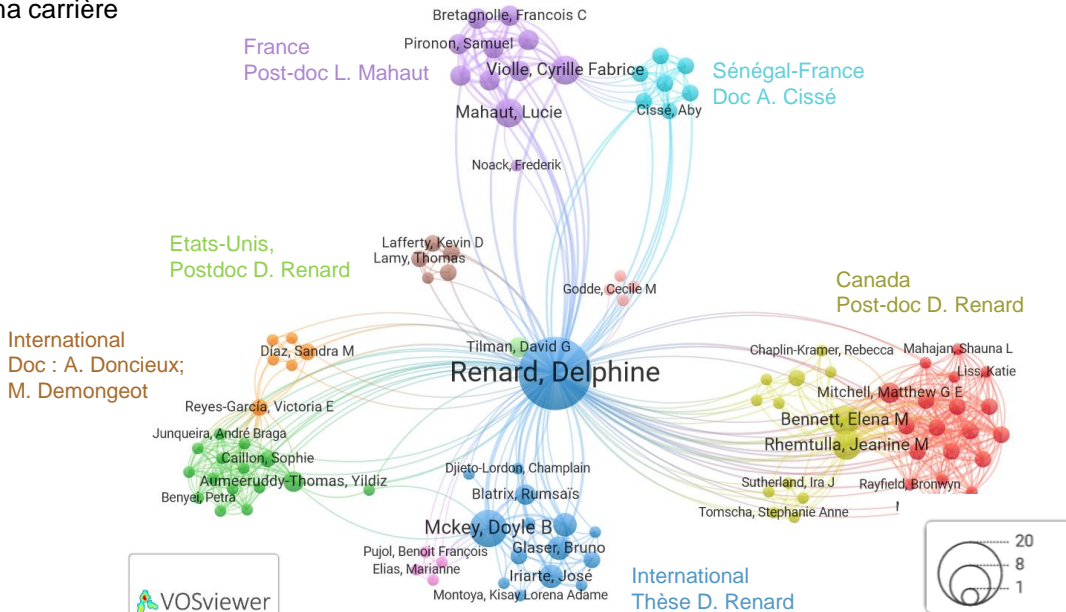
Année	Niveau	Durée (mois)	Noms	Thématiques	Université
2023	M2	7	J. Lafont	Savoirs et pratiques des oléiculteurs face aux contraintes climatiques dans le Nord du Maroc (Devenir: CDD CIRAD)	ISTOM
2023	M2	7	J. Menesch	Relations diversité-stabilité-climat	SCIRO
2020	M1	5	T. Guillerminet	Potentiel de l'agrobiodiversité pour l'adaptation au changement climatique en Afrique de l'ouest (Devenir: Master Supagro)	UM
2019	M2	5	M. Salameh	Biogéographie mondiale des savanes à termites	Univ. Bordeaux
2013	Master	24	E. Clark	Dynamique de multiples services écologiques	McGill
2009	M1	5	A. Grau	Bioturbation par la macrofaune et morphologie des sols	UM
2008	M1	5	E. Solier	Bioturbation conduit par les insectes sociaux	UM
2007	L3	3	G. Grisard	Etude de la myrmécochorie	UM

Nombre d'articles dans des journaux à comité de lecture : 38 10 en 1er auteur 8 en dernier
 Nombre de chapitres d'ouvrages : 6
 Nombre de citations : 2309 H-index : 21 (Google scholar, avril 2024)

Tableau 4. Synthèse des articles publiés. Ceux publiés avec des post-docs, doctorant·e·s etc sont soulignés

Nom de la revue	Impact factor (2021/2022)	Référence des articles
Nature	64.8	2020-21 ; 2019-23
Earth Science Reviews	12.1	2020-22
PNAS (Proceedings of the National Academy of Sciences USA)	11.1	2023-08 ; 2015-29 ; 2017-37
Frontiers in Ecology and the Environment	10.3	2020-14
BioScience	10.1	2016-27
Soil Biology and Biochemistry	9.7	2013-31
Current Biology	9.2	2021-18
Current Opinion in Environmental Sustainability	7.9	2021-17
Agronomy for Sustainable Development	7.3	2024-01
Environmental Research Letters	6.7	2023-05 ; 2016-26
Global Ecology and Biogeography	6.4	2023-06
People and Nature	6.1	2024-2 ; 2024-3
Journal of Applied Ecology	5.7	2018-25
Ecology and Society	5.3	2015-30
Landscape Ecology	5.2	2022-12
Plant and Soil	4.9	2011-35
Ecology	4.8	2019-24
Proceedings of the Royal Society B	4.7	2022-13
Scientific Reports	4.6	2021-16
Regional Environmental Change	4.2	2023-07
Basic and Applied Ecology	3.8	2022-10;
Ecological Engineering	3.8	2012-33
PloS One	3.7	2016-28
Oeno One	3	2022-11
Annals of Botany	2.9	2021-32
Journal of Archaeological Science	2.87	2010-38
Journal of Plant Ecology	2,7	2023-04
Global Food Security	2.5	2020-20
Ecoscience	1.4	2010-36
Revue d'Ethnoécologie	-	2012-34

Réseau de 100 co-auteurs. J'indique les pays, doctorant·e·s et postdoctorant·e·s impliqués ou les étapes de ma carrière



Liste des publications

Les publications proposées en fin de mémoire sont en bleu. Les étudiant·e·s et post-doctorant·e·s sont sous-lignés.

2024

- 1- Isaac ME, Lin T, Caillon S, Sebastien L, MacDonald K, Prudham S, Doncieux A, **Renard D**, Aumeeruddy-Thomas Y, Vincent L, Cobelli O, Locqueville J. Farmer well-being: what is the scope of multidimensional domains? A Review. *Agronomy for Sustainable Development*
- 2- Mattalia G, McAlvay A, Teixidor-Toneu I, Lukawiecki J, Moola F, Asfaw Z, Cámara-Leret R, Díaz S, Franco FM, Halpern BS, O'Hara C, **Renard D**, Uprety Y, Wall J, Zafra-Calvo N, Reyes-García V. Cultural keystone species as a tool for biocultural stewardship. A global review. *People and Nature*
- 3- Demongeot M, Hmimsa Y, McKey D, Aumeeruddy-Thomas Y, **Renard D**. Social strategies to access land influence crop diversity in northwestern Morocco. Revision for *People and Nature*. doi:[10.1002/pan3.10617](https://doi.org/10.1002/pan3.10617)

2023

- 4- Brooker R, Hawes C, Iannetta PPM, Karley AJ, **Renard D**. Plant diversity and Ecological Intensification in crop production systems. *Journal of Plant Ecology* 16 rtad015. doi:[10.1093/jpe/rtad015](https://doi.org/10.1093/jpe/rtad015)
- 5- **Renard D**, Mahaut L, Noack F. Crop diversity buffers the effect of droughts on food production. *Environmental Research Letters* 18, 045002. doi:[10.1088/1748-9326/acc2d6](https://doi.org/10.1088/1748-9326/acc2d6)
- 6- Mahaut L, Choler P, Denelle P, Garnier E, Thuiller W, Kattge J, Lemauviel-Lavenant S, Lavorel S, Munoz F, **Renard D**, Serra-Diaz JM, Viogy N, Violle C. Trade-offs and synergies between ecosystem productivity and stability in temperate grasslands. *Global Ecology and Biogeography* 32, 561-572. doi:[10.1111/geb.13645](https://doi.org/10.1111/geb.13645)
- 7- Menesch J, Godde C, Venables W, **Renard D**, Richardson A, Cobelli O, Waha K. Agricultural diversification for crop yield stability: a smallholder adaptation strategy to climate variability in Ethiopia. *Regional Environmental Change* 23, 34. doi:[10.1007/s10113-022-02021-y](https://doi.org/10.1007/s10113-022-02021-y)
- 8- Reyes-García V, Cámara-Leret R, Halpern BS, O'Hara C, **Renard D**, Zafra-Calvo N, Díaz S. Biocultural vulnerability exposes threats of culturally important species. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 120 (2) e2217303120. doi:[10.1073/pnas.2217303120](https://doi.org/10.1073/pnas.2217303120)

2022

- 9- Demongeot M, Chapling-Krammer B, Pascual U, Aumeeruddy-Thomas Y, Caillon S, Cardenas T, Doncieux A, Locqueville J, McKey D, Porcuna-Ferrer A, Reyes-García V, **Renard D**. IPBES VA Chapter 4 Literature review on values articulated in agrobiodiversity management / IPBES values assessment (4.8). doi:[10.5281/zenodo.4394547](https://doi.org/10.5281/zenodo.4394547)
- 10- Cissé A, Clermont-Dauphin C, Sall SN, Sakmi *G/E*, Groupement MP, Ndiaye A, Diouf M, Traore N, Ndir K, Kane NA, **Renard D**, Berthouly-Salazar C. Sahelian smallholders' varietal mixtures reconcile yield and agrobiodiversity conservation. *Basic and Applied Ecology* 67: 48-60. doi:[10.1016/j.baae.2022.12.006](https://doi.org/10.1016/j.baae.2022.12.006)

- 11- [Doncieux A](#), Yobrégat O, Prudham S, Caillon S, **Renard D**. Agrobiodiversity dynamics in a French wine-growing region. *Oeno One* 56-4. doi:[10.20870/oeno-one.2022.56.4.5557](https://doi.org/10.20870/oeno-one.2022.56.4.5557)
- 12- [Précigout PA](#), **Renard D**, Sanner J, Claessen D. & Robert C. Crop mixtures outperform rotations and landscape mosaics in regulation of wheat pathogens: a simulation study. *Landscape Ecology* 38, 77-97. doi:[10.1007/s10980-022-01545-2](https://doi.org/10.1007/s10980-022-01545-2)
- 13- [Mahaut L](#), Pironon S, Barnagaud JY, Bretagnolle F, Khoury CK, Mehrabi Z, Milla R, Phillips C, Rieseberg LH, Violle C, **Renard D**. Matches and mismatches between the global distribution of major food crops and climate suitability. *Proceedings of the Royal Society B* 289, 20221542. doi:[10.1098/rspb.2022.1542](https://doi.org/10.1098/rspb.2022.1542)
- 14- Isbell F, Balvanera P, Mori AS, He JS, Bullock JM, Regmi GR, ... **Renard D**, ... , Palmer M.S. (2022) Expert perspectives on global biodiversity loss and its drivers and impacts on people. *Frontiers in Ecology and the Environment* 21, 94-103. doi:[10.1002/fee.2536](https://doi.org/10.1002/fee.2536)

2021

- 15- Betley E, Sigouin A, Pascua P, Cheng SH, MacDonald K, Arengo F, Aumeeruddy- thomas Y, Caillon S, Isaac ME, Jupiter SD, Mawyer A, Mejia M, Moore AC, **Renard D**, Sébastien L, Gazit N, Sterling EJ. Assessing well-being constructs with environmental and equity aspects: A review of the landscape. *People and Nature* 00 1-18. doi:[10.1002/pan3.10293](https://doi.org/10.1002/pan3.10293)
- 16- [Mahaut L](#), [Violle C](#), & **Renard D**. [Complementary mechanisms stabilize national food production](#). *Scientific Reports* 11, 1-7. doi:[10.1038/s41598-021-84272-z](https://doi.org/10.1038/s41598-021-84272-z)
- 17- [Labeyrie V](#), **Renard D** et al. The role of crop diversity in climate change adaptation: insights from local observations to inform decision making in agriculture. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 51, 15-23. doi:[10.1016/j.cosust.2021.01.006](https://doi.org/10.1016/j.cosust.2021.01.006)
- 18- **Renard D**, Tilman D. Biodiversification of agriculture: Cultivate biodiversity to harvest food security and sustainability. *Current Biology* 31, R1154-R1158. doi:[10.1016/j.cub.2021.06.082](https://doi.org/10.1016/j.cub.2021.06.082)

2020

- 19- [Labeyrie V](#), **Renard D**, Junqueira AB, Li X, Porcher V, Porcuna-Ferrer A, Schlingmann A, Soleymani-Fard R, Reyes-García V. Monitoring crop diversity trends based on local knowledge: a protocol for data collection. *Figshare*. Book. doi:[10.6084/m9.figshare.11842566.v4](https://doi.org/10.6084/m9.figshare.11842566.v4)
- 20- Frei B, Queiroz C, Chapling-Kramer B, Andersson E, **Renard D**, Rhemtulla J.M., Bennett E.M. A brighter future: complementary goals of diversity and multifunctionality to build resilient agricultural landscapes. *Global Food Security* 26, 100407. doi:[10.1016/j.gfs.2020.100407](https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100407)
- 21- **Renard D**, Tilman D. MA: Reply to Egli and collaborators. *Nature* 588, E13. doi:[10.1038/s41586-020-2965-6](https://doi.org/10.1038/s41586-020-2965-6)
- 22- Trembley et al. Challenges for drought assessment in the Mediterranean region under future climate change scenarios. *Earth Science Reviews* 210, 103348. doi:[10.1016/j.earscirev.2020.103348](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103348)

2019

- 23- **Renard D**, Tilman D. National food production stabilized by crop diversity. *Nature* 571, 257-260. doi:[10.1038/s41586-019-1316-y](https://doi.org/10.1038/s41586-019-1316-y)

- 24- Lamy T, Wang S, **Renard D**, Lafferty KD, Reed DC, Miller RJ. Species insurance trumps spatial insurance in stabilizing biomass of a marine macroalgal metacommunity. *Ecology* 100, e02719. doi:doi.org/10.1002/ecy.2719

2018

- 25- Frei B, **Renard D**, Mitchell MGE, Seufert V, Chaplin-Kramer R, Rhemtulla J, Bennett E. Bright spots in agricultural landscapes: Identifying areas exceeding expectations for multifunctionality and biodiversity. *Journal of Applied Ecology* 55, 2741-2753. doi:[10.1111/1365-2664.13191](https://doi.org/10.1111/1365-2664.13191)

2016

- 26- **Renard D**, Rhemtulla J, Bennett E. Agro-biodiversity has increased over a 95-year period at sub-regional and regional scales in southern Quebec, Canada. *Environmental Research Letters* 11, 124024. doi:[10.1088/1748-9326/11/12/124024](https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/12/124024)
- 27- Tomscha S, Sutherland I, **Renard D**, Gergel S, Rhemtulla J, Bennett E, Lori D, Eddy I, Clark E. A guide to historical datasets for reconstructing ecosystem services over time. *BioScience* 66, 747-762. doi:[10.1093/biosci/biw086](https://doi.org/10.1093/biosci/biw086)
- 28- Zangerlé A, **Renard D**, Iriarte J, Jimenez LES, Montoya KLA, Juilleret J, McKey D. The Surales, self-organized earth-mound landscapes made by earthworm in a seasonal tropical wetlands. *PloS One* 11, e0154269. doi:[10.1371/journal.pone.0154269](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0154269)

2015

- 29- **Renard D**, Rhemtulla J, Bennett E. Historical dynamics in ecosystem service bundles. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 112, 13411-13416. doi:[10.1073/pnas.1502565112](https://doi.org/10.1073/pnas.1502565112) **Recommended by the "Faculty of 1000"**.
- 30- Mitchell M, Bennett EM, Gonzalez A, Lechowicz MJ, Rhemtulla JM, Cardille JA, Vanderheyden K, Poirier-Ghys G, **Renard D**, et al. The Montérégie connection project: Linking landscapes, biodiversity, ecosystem services, and stakeholders at multiple scales for decision-making. *Ecology and Society* 20, 15. doi:[10.5751/ES-07927-200415](https://doi.org/10.5751/ES-07927-200415)

2013

- 31- **Renard D**, Birk JJ, Zangerle A, Lavelle P, Glaser B, Blatrix R, McKey D. Ancient human agricultural practices can promote activities of contemporary non-human soil ecosystem engineers: A case study in coastal savannas of French Guiana. *Soil Biology and Biochemistry* 62, 46-56. doi:[10.1016/j.soilbio.2013.02.021](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.02.021)

2012

- 32- Blatrix R, **Renard D**, Djieto-Lordon C, McKey D. (2012) The cost of myrmecophytism: insights from allometry of stem secondary growth. *Annals of Botany* 110, 1-9. doi:[10.1093/aob/mcs164](https://doi.org/10.1093/aob/mcs164)
- 33- **Renard D**, Iriarte J, Birk JJ, Rostain S, Glaser B, McKey D. (2012) Ecological engineers ahead of their time: The functioning of pre-Columbian raised-field agriculture and its potential contributions to sustainability today. Invited paper, *Ecological Engineering* 45, 30-44. doi:[10.1016/j.ecoleng.2011.03.007](https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.03.007)
- 34- McKey D, Elias M, Pujol B, Duputié A, Delêtre M, **Renard D**. Maintien du potentiel adaptatif chez les plantes domestiquées à propagation clonale. Leçons de gestion par les cultivateurs de manioc amérindiens. *Revue d'Ethnoécologie* 1, 99-120. doi:[10.4000/ethnoecologie.741](https://doi.org/10.4000/ethnoecologie.741)

2011

- 35- **Renard D**, Birk JJ, Glaser B, Iriarte J, Grisard G, Karl J, McKey D. Origin of mound-field landscapes: a multi-proxy approach combining contemporary vegetation, carbon stable isotopes and phytoliths. *Plant and Soil* 351, 337-353. doi:[10.1007/s11104-011-0967-8](https://doi.org/10.1007/s11104-011-0967-8)

2010

- 36- **Renard D**, Schatz B, McKey D. Ant nest architecture and seed burial depth: implications for seed fate and germination success in a myrmecochorous savanna shrub. *Ecoscience* 17, 194-202. doi:[10.2980/17-2-3335](https://doi.org/10.2980/17-2-3335)
- 37- McKey D, Rostain S, Iriarte J, Glaser B, Birk JJ, Holst I, **Renard D**. Pre-Columbian agricultural landscapes, ecosystem engineers, and self-organized patchiness in Amazonia. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107, 7823-7828. doi:[10.1073/pnas.0908925107](https://doi.org/10.1073/pnas.0908925107)
- 38- Iriarte J, Glaser B, Watling J, Wainwright A, Birk JJ, **Renard D**, Rostain S, McKey D. Late Holocene Neotropical agricultural landscapes: Phytolith and stable isotope analysis of raised-fields from French Guianan coastal savannahs. *Journal of Archaeological Science* 37, 2984-2994. doi:[10.1016/j.jas.2010.06.016](https://doi.org/10.1016/j.jas.2010.06.016)

Contributions à des chapitres d'ouvrages

- 39- Thuillet AC, **Renard D**, Cubry P, Barnaud A, Berthouly-Salazar C. (2022) Biodiversity as a cornerstone of agrosystems sustainability in West Africa. In *Crop Adaptation and Improvement for Drought-Prone Environments*. Eds: Ndjido A. Kane, Daniel Foncéka, and Timothy J. Dalton. <https://agritrop.cirad.fr/604091/>
- 40- Cissé X, Berthouly-Salazar C, Sall SN, **Renard D**, Clermont-Dauphien C, Niaye A, Barnaud A, Kane NA. (2021) *Agrobiodiversité et transition agroécologique : Regards croisés chercheurs et paysans*. In *Biodiversité et développement durable*. Collection Synthèse de L'IRD. https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/2022-05/010084802.pdf
- 41- **Renard D**. (2016) *Global Soil Biodiversity Atlas*. Eds: A. Orgiazzi et al. European Commission, Brussels, 175 pp. <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/global-soil-biodiversity-atlas>
- 42- McKey D, **Renard D**, Zangerlé A, Iriarte J, Montoya KLA, Jimenez LES, Solibiéda A, Durécu M, Comptour M, Rostain S, Riamond C. (2014) *Ecologie historique des champs surélevés anciens et modernes d'Amérique et d'Afrique*. In *Pour une Ecologie Historique en Afrique Centrale*. Eds : G. de Saulieu, M. Elouga and B. Sonké. Agence Universitaire de la Francophonie, IRD and PALOC, Yaoundé, Cameroon, 212 pp
- 43- McKey D, **Renard D**, Zangerlé A, Iriarte J, Montoya KLA, Jimenez LES, Solibiéda A, Durécu M, Comptour M, Rostain S, Riamond C. (2014) New approaches to pre-Columbian raised-field agriculture: ecology of seasonally flooded savannas, and living raised fields in Africa, as windows on the past and the future. In: *Amazonía. Memorias de las Conferencias Magistrales del 3er Encuentro Internacional de Arqueología Amazónica*. Quito, Ecuador. pp 91-136 <http://doi.org/10.13140/RG.2.1.4539.0808>
- 44- Rostain S, McKey D, Iriarte J, Glaser B, **Renard D**, Birk JJ, Roux B (2010) *Les savanes anthropisées du littoral de Guyane*. In *Guyane Océane*. Eds: D. Guiral & R. Le Guen. IRD Editions/Le Guen, Garies, France, 472 pp

2023

Renard D. Des savoirs locaux aux interactions socio-écologiques. Cycle de conférence Regards Croisés sur le vivant en sociétés. Montpellier, France. **Conférence invitée.**

2021

Renard D. Saw crop diversity, harvest food stability. CLIMATALK 2021. <https://www.science-allemande.fr/environnement-et-energie/climatalk-2021-lusage-des-sols-face-au-changement-climatique/> **Visioconférence invitée**

2020

Labeyrie D, **Renard D**, Reyes-García V. Biodiversité agricole et changement climatique : quelle contribution des savoirs locaux. Séminaire CAPA-CITE, MSH-Sud, Montpellier, France. **Conférence invitée.**

Renard D, Tilman D. *Crop diversity stabilizes national food production*. World Biodiversity Forum, Davos, Suisse. **Conférence invitée**

Renard D, Tilman D. *Crop diversity stabilizes national food production*. US-UK Science Forum on Sustainable Agriculture, Washington, Etats-Unis. **Conférence invitée**

2019

Renard D, Changements climatiques et fondement écologique des sociétés humaines. « Climat, l'UM s'engage » : Semaine internationale pour le climat. Université Montpellier, France. **Conférence invitée**

2015

Renard D, Zangerle A, McKey D. *Ecological legacy of pre-Columbian agricultural activities*. International Landscape Ecology conference, Portland, Etats-Unis. **Conférence invitée**

Renard D, Zangerle A, McKey D. *Ecological legacy of pre-Columbian agricultural activities*. Conférence annuelle de la Society of American Archaeologists, San Francisco, Etats-Unis. **Conférence invitée**

2023

Renard D. Des savoirs locaux aux interactions socio-écologiques. Cycle de conférence Regards Croisés sur le vivant en sociétés. Montpellier, France. **Conférence invitée.**

2021

Renard D. Saw crop diversity, harvest food stability. CLIMATALK 2021. <https://www.science-allemande.fr/environnement-et-energie/climatalk-2021-lusage-des-sols-face-au-changement-climatique/> **Visioconférence invitée**

2020

Labeyrie D, **Renard D**, Reyes-García V. Biodiversité agricole et changement climatique : quelle contribution des savoirs locaux. Séminaire CAPA-CITE, MSH-Sud, Montpellier, France. **Conférence invitée.**

Renard D, Tilman D. *Crop diversity stabilizes national food production*. World Biodiversity Forum, Davos, Suisse. **Conférence invitée**

Renard D, Tilman D. *Crop diversity stabilizes national food production*. US-UK Science Forum on Sustainable Agriculture, Washington, Etats-Unis. **Conférence invitée**

2019

Renard D, Changements climatiques et fondement écologique des sociétés humaines. « Climat, l'UM s'engage » : Semaine internationale pour le climat. Université Montpellier, France. **Conférence invitée**

2015

Renard D, Zangerle A, McKey D. *Ecological legacy of pre-Columbian agricultural activities*. International Landscape Ecology conference, Portland, Etats-Unis. **Conférence invitée**

Renard D, Zangerle A, McKey D. *Ecological legacy of pre-Columbian agricultural activities*. Conférence annuelle de la Society of American Archaeologists, San Francisco, Etats-Unis. **Conférence invitée**

2014

Renard D, Rhemtulla J, Bennett E. *Emergence and spatial dynamics of ecosystem service interactions in southeastern Quebec from 1960 to 2006*. Ecological Society of America, Sacramento, Etats-Unis.

Renard D, Rhemtulla J, Bennett E. *Dynamics of ecosystem services in space and time*. *Genomes to Biomes*, Montréal, Canada.

2013

Renard D, Rhemtulla J, Bennett E. *Ecosystem services in space and time*. Conférence du Centre des Sciences de la Biodiversité du Québec, Montréal, Canada

2010

Renard D, Birk JJ, Glaser B, Iriarte J, Rostain S, McKey D. *Interactions between human and natural ecosystem engineers in ancient raised fields: implications in ecological engineering*. Ecologie 2010, Montpellier, France.

2009

Renard D, Birk JJ, Glaser B, McKey D. *Interactions of humans and natural ecosystem engineers: pre-Columbian raised-field complexes in Guianan coastal savannas*. Symposium "Ecological engineering: From concepts to applications", Paris, France.

McKey D, Rostain D, Glaser B, Iriarte J, Birk JJ, **Renard D**. *Landscapes co-constructed by man and nature: an interdisciplinary approach to pre-Columbian agricultural systems in Amazonia*. *Archéométrie Montpellier 2009, Ressources, Sociétés, Biodiversité*, Montpellier, France. **Conférence invitée**

Iriarte J, **Renard D**, Roux B, McKey D. *Agricultural productivity of pre-Hispanic raised-fields: an example from French Guiana*. *Archéométrie Montpellier 2009, Ressources, Sociétés, Biodiversité*, Montpellier, France.

2008

Renard D, McKey D, Rostain, S. *Ecologie et archéologie des savanes côtières de la Guyane: paysages co-construits par l'Homme et la nature*. Campus Agronomique, Kourou, Guyane française. **Conférence invitée**.

Renard D, McKey D. *Can spectral analysis of digitized images help us distinguish spatially periodic landscapes of natural and human origin? A case study of complexes of mounds in coastal savannas of French Guiana*. World Archaeological Congress 6, Dublin, Irlande.

Renard D, Schatz B, McKey D. *The importance of secondary transport within ant nests for mymecochorous seed: a case study in Manihot*. International Union for the Study of Social Insects (IUSSI), La Roche-en-Ardenne, Belgique.

2007

McKey D, **Renard D**, Rostain S. *L'écologie contemporaine des complexes de champs surélevés dans les savanes côtières de la Guyane française. Les Hommes, d'autres ingénieurs d'écosystème, et des paysages qui s'auto-organisent*. Symposium « *Conservation of nature: what role for the social sciences?* » Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris, France.

McKey D, **Renard D**, Rostain S. *Le fonctionnement contemporain d'un héritage des activités agricoles précolombiennes : les champs surélevés dans les savanes du littoral guyanais*. 5^{èmes} journées de l'Institut Français pour la Biodiversité, Tours, France.

Renard D, McKey D. *Ancient human landscape modifications affect contemporary ecosystem functioning: the ecology of an ant-plant seed dispersal mutualism in pre-Columbian raised-field complexes in seasonally flooded savannas of French Guiana*. Annual meeting ATBC (Association for Tropical Biology and Conservation), Morelia, Mexico.

Poster - 2010

Renard D, Birk JJ, Rostain S, Iriarte J, Glaser B, McKey D. *Self-organizing fallows that maintain resource concentration and ecosystem services in pre-Columbian raised fields of Guianan savannas*. Annual meeting of the Association for Tropical Biology and Conservation (ATBC), Bali, Indonesia.

Formations reçues et accréditations

2023 **Formation à l'encadrement doctorat (16 h)** Formateur: Adoc Métis

Télepilote professionnelle de drones, n°52389000, Certificat d'Aptitude délivré par la Direction Générale de l'Aviation Civile

Notes préliminaires

Approche de l'exercice de l'HDR

J'ai abordé l'exercice en me disant « je vais faire mon dossier tôt après le recrutement. De cette façon je pourrai réutiliser beaucoup de mes dossiers de candidatures, cela me permettra d'avancer rapidement » ... raté. Une fois lancée, le montage du dossier d'HDR c'est révélé très chronophage et source de stress. Perfectionniste de nature (transmis de père en fille), je dois bien avouer que j'ai éprouvé des difficultés à trouver « un compromis que je trouve acceptable » entre un travail pas assez / et très poussé. J'espère que le document fourni vous semblera, membres du jury, avoir abouti à un compromis qui est acceptable pour vous.

Écriture inclusive

L'écriture inclusive utilisée dans ce travail est mobilisée selon un compromis entre la fluidité de lecture et le parti de visibiliser le rôle des femmes et des minorités de genre, à la fois dans les savoirs et pratiques scientifiques et dans ceux liés aux activités agricoles. Il n'existe pas de convention unique et comme chaque forme a des avantages et des inconvénients, je souhaite encourager une pluralité d'écritures. J'utilise le point médian pour désigner des groupes sociaux comme « les agriculteur·ices ».

Usage de la première personne

Du fait de l'interdisciplinarité que je cultive dans ma recherche quotidienne, il m'a souvent été reproché d'être une chercheuse difficile à cerner en termes de discipline de rattachement. Je devais donc prêter, pour chaque dossier d'embauche, une attention particulière à la part du « je » et ainsi expliciter ce que j'avais personnellement effectué dans les recherches présentées, et ce qui relevait du travail de mes collaborateurs, une distinction pas toujours évidente. La pression de ce côté me semble relâchée pour l'HDR, la phase de recrutement étant derrière moi, il ne me semble plus nécessaire de rentrer dans une « boîte » disciplinaire bien définie. J'ai donc privilégié dans ce dossier l'usage du « nous » reflétant le travail collectif mené en encadrement ou co-encadrement d'étudiants·es de Master, de doctorants·es et de post-doctorants·es et avec mes collaborateurs·rices. Les références bibliographiques en bleu dans le texte sont celles dont je suis co-auteur.

SYNTHESE DES TRAVAUX

Introduction générale

Les champs et les pâturages représentent ~38% de la surface émergée du globe, représentant ainsi l'usage des terres le plus étendu (Zhou et al., 2021). Les capacités des sociétés humaines à transformer leur environnement, à domestiquer et à sélectionner les animaux et les végétaux, ainsi qu'à intensifier l'agriculture, leur ont permis d'améliorer les capacités des milieux à produire de la nourriture, des fibres et du bois (Foley et al., 2005 ; Kareiva et al., 2007 ; Monfreda et al., 2008).

Ces efforts ont remporté un grand succès, en particulier ces dernières décennies, en permettant de nourrir plusieurs milliards de personnes ainsi que d'améliorer la sécurité alimentaire et la situation économique dans certains pays (Kiers et al., 2008). Cependant, les malnutritions persistent avec le maintien de la pauvreté et des inégalités Nord-Sud. De plus, les évaluations scientifiques s'accordent : l'empreinte écologique de la production alimentaire, causée par la conversion des écosystèmes, l'utilisation massive d'intrants et la surexploitation, a été plus marquée au cours des 50 dernières années que dans toute l'histoire de l'humanité (Matson et al., 1997 ; Tilman et al., 2001). Cette empreinte se reflète notamment dans les changements climatiques, la pollution, les pertes et la fragmentation d'habitats (Tilman et al., 2017), causant un sévère déclin de la biodiversité. Il est estimé que 40% des espèces de 47 groupes taxonomiques ont déjà été perdues dans les agroécosystèmes les plus intensément cultivés (Newbold et al., 2015). La biodiversité sauvage n'est pas la seule à être impactée par les activités agricoles. Cependant, les trajectoires de changement de la biodiversité des plantes et animaux domestiqués est complexe à interpréter tant elles varient en fonction du niveau (espèce, variété/race, écosystémique) et de l'échelle spatiale considérée (Aguilar et al., 2015 ; Khoury et al., 2014, 2022).

En substituant les fonctions remplies par la biodiversité par l'apport massif d'intrants chimiques et mécaniques, les pratiques agricoles récentes ont séparé l'écologie de l'agriculture (Robertson & Swinton, 2005) et engendré des coûts environnementaux et sociaux qui n'avaient pas été anticipés (Bennett et al., 2009 ; Foley et al., 2005 ; Gordon et al., 2008). Les efforts déployés pour maximiser les rendements ont en effet ignoré que les agroécosystèmes assurent de nombreuses fonctions, et fournissent une diversité de bénéfices aux sociétés (e.g., les services écosystémiques [Assessment, 2005] ou *Nature Contributions to People* [Díaz et al., 2015]), qui interagissent de manière complexe (Chan et al., 2006 ; Rodríguez et al., 2006). La diversité des plantes et des animaux sauvages et domestiqués (i.e., l'agrobiodiversité, Fig. 1) est à la base de ces fonctions, services et contributions (Kremen, 2005 ; Swift et al., 2004 ; Zhang et al., 2007) et d'une alimentation diversifiée, indispensable pour subvenir aux apports caloriques et en micronutriments (Nicholson et al., 2021).

Aujourd'hui, l'agriculture fait face à des enjeux qui sont à la fois multiples et en interaction. L'agriculture doit fournir de la nourriture saine, en quantité suffisante et de manière équitable et stable pour 9.7 milliards de personnes d'ici 2050, soutenir l'emploi de 40% de la population mondiale, tout en assurant la qualité de vie des sociétés et en minimisant l'impact sur la biodiversité et l'environnement.

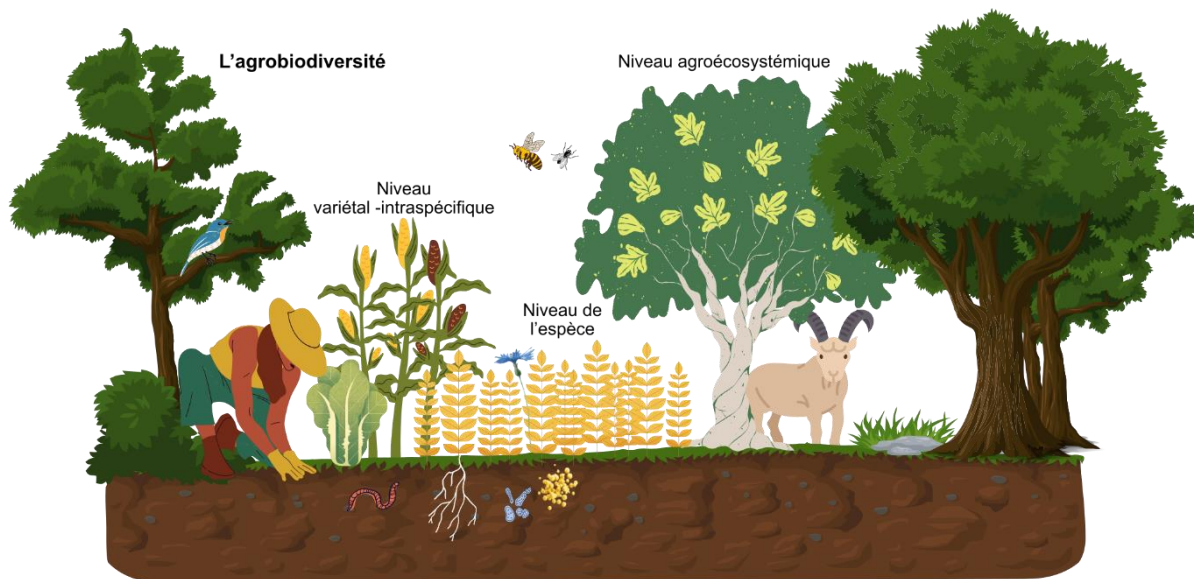


Fig. 1 Niveaux et composantes de l'agrobiodiversité. Cette part de la biodiversité désigne l'ensemble des organismes vivants, sauvages et domestiqués (e.g., animaux, plantes, insectes, microorganismes), ainsi que les savoirs et les pratiques associés, qui soutiennent le fonctionnement des agroécosystèmes (Qualset et al., 1995 ; Williams & Jackson, 2007). Cette diversité peut être considérée à différentes échelles spatiales, allant de la parcelle au paysage, de la nation à la planète. Elle peut être caractérisée suivant trois niveaux : 1) génétique (variabilité des gènes, représentée par les différentes couleurs de la plante sur le schéma), 2) spécifique et/ou 3) agroécosystémique (incluant les plantes et les animaux domestiqués et la composante sauvage). Elle peut aussi être définie comme une diversité bioculturelle relative aux systèmes agricoles (Argumedo et al., 2021) définie par Bridgewater & Rotherham (2019) comme « *des éléments dynamiques et situés de la nature qui résultent d'interactions et de rétroactions entre la diversité culturelle et la diversité biologique* ».

Questions de recherche

Pour répondre à ces enjeux, une grande part d'innovation est requise pour adapter, dessiner et gérer de nouveaux systèmes agricoles à la fois productifs et bénéfiques à la biodiversité, aux écosystèmes et aux sociétés (Scherr & McNeely, 2007). Dans ce cadre, un principe unit l'agroécologie, l'ingénierie écologique ou les « solutions fondées sur la nature ». Ce principe consiste à appliquer les théories et connaissances issues de l'écologie et d'y intégrer les aspects sociaux pour concevoir des agroécosystèmes durables (Altieri, 2018 ; Barot et al., 2012 ; Eggermont et al., 2015). Dans ce cadre, je place l'agrobiodiversité, et plus spécifiquement la diversité des plantes cultivées, au cœur de mes travaux pour contribuer à en faire un levier de la durabilité et de la résilience.

Pour cela, une bonne compréhension des liens entre les activités agricoles, la biodiversité (qu'elle soit sauvage ou cultivée), la structure et le fonctionnement des écosystèmes et les multiples services et valeurs qui en découlent est nécessaire. Mes travaux visent à améliorer la compréhension de ces liens à différentes échelles spatiales et de temporelles. Dans ce contexte, la majeure partie de mes travaux ont visé à :

Améliorer la compréhension des liens entre les activités agricoles, la biodiversité, le fonctionnement et les contributions de la nature aux sociétés par une approche interdisciplinaire, multi-échelles et dans une démarche finalisée en agroécologie.

J'ai organisé la présentation de mes travaux antérieurs suivant quatre sections

1. Biodiversité et auto-organisation dans des paysages singuliers
2. Liens biodiversité-fonctionnement dans les agroécosystèmes actuels
3. Les défis du temps : suivre les dynamiques de l'agrobiodiversité et mesurer la stabilité
4. Les valeurs sociales associées à l'agrobiodiversité

Je fais appel très fréquemment, dans mes recherches, et donc dans ce document, à la **notion de « panier »** d'espèces ou de variétés cultivées. Cette image renvoie au cortège de plantes cultivées à une échelle donnée, celle de l'exploitation ou du pays par exemple. Ce panier est caractérisé par sa diversité (quel qu'en soit la mesure, richesse, équitabilité etc) et sa composition (e.g., l'identité taxonomique et fonctionnelle des espèces ou des variétés).

Approches et interdisciplinarité

Mes recherches passées et actuelles sont basées sur l'utilisation d'une vaste gamme d'outils, de la télédétection aux relevés de terrain, en passant par la modélisation statistique et les démarches participatives auxquels je forme les étudiants·es que j'encadre. Ces outils nous permettent d'appréhender une large gamme **d'échelles spatiales locales, régionales et nationales et d'échelles temporelles de plusieurs décennies à plusieurs siècles.**

Répondre aux défis d'une agriculture durable et résiliente dans un monde en rapide transformation requiert un changement de pratique de la science (Pinto-Correia et al., 2014). Mon projet répond à ce besoin par une **recherche pleinement interdisciplinaire**, qui fait dialoguer les outils et concepts de l'écologie (dont je suis issue) avec ceux de l'agronomie et des sciences humaines et sociales (archéologique, éthnoécologie et économie). J'opère ce rapprochement par un travail en étroite collaboration avec des spécialistes de chaque domaine avec qui je co-encadre les étudiants·es et les doctorants·es. Malgré certaines difficultés, **la formation des jeunes générations à l'interdisciplinarité me paraît essentielle** pour éviter une recherche en silo qui est limitée dans la proposition de solutions à des problèmes qui touchent toutes les sphères de l'agriculture : agronomiques, environnementales et socio-culturelles. Enfin, répondre aux défis de l'agriculture **ne peut pas non plus être envisagé sans les agriculteurs·rices**. Dans ce sens, les travaux que je mène avec les étudiants·es et en collaboration sont fondés sur la complémentarité des systèmes de savoirs scientifiques et des agriculteurs·rices pour façonner une approche transdisciplinaire et participative de la durabilité et de la résilience des agroécosystèmes. Enfin, mon parcours en recherche est caractérisé par une **forte mobilité internationale**, autant dans mes affiliations (Canada, Etats-Unis) que dans mes **terrains en milieu tropical** (Guyane française, Colombie, Bolivie, Maroc, Sénégal) et tempéré (France).

Section 1 : Biodiversité et auto-organisation dans des paysages singuliers

Introduction

La possibilité croissante d'observer la Terre depuis le ciel révèle à quel point des motifs paysagers réguliers, des monticules de terre, des motifs linéaires, tigrés, striés ou labyrinthiques sont répandus et diversifiés (Fig. 2). Ces motifs paysagers ont attisé la curiosité d'écologues dont les recherches estiment leur étendue (Deblauwe et al., 2008), évaluent les processus qui régissent leurs formation, fonctionnement et propriétés émergentes (Bonachela et al., 2015 ; Martinez-Garcia et al., 2021 ; Meron, 2018 ; Pringle & Tarnita, 2017 ; Rietkerk et al., 2004).

Dans ce cadre, les formations végétales régulières (Fig. 2a-c) et les « savanes à termites » (Fig. 2 d,e) des environnements semi-arides ont reçu le plus d'attention. À leur origine : des organismes « ingénieurs de l'écosystème » qui modifient leur habitat en provoquant des changements dans les états physiques ou chimiques de l'environnement (Jones et al., 1994). Dans les milieux semi-arides où l'eau et les nutriments sont limitants, les nids de termites et la végétation concentrent les ressources, devenant ainsi des points chauds de biodiversité et de productivité (Pringle et al., 2010). Leur espacement régulier résulte de processus d'auto-organisation spatiale régité par le jeu de boucles de rétroactions positives (facilitation) à courte distance et négatives (compétitives) à plus longue distance entre les organismes et entre les organismes et leur environnement (Martinez-Garcia et al., 2021).

Comparativement, les patrons paysagers formés par des buttes de terres régulièrement espacées, très répandus dans les zones humides tropicales d'Amérique du Sud (Renard et al., 2012, Fig. 2e-h), ont reçu peu d'attention des écologues. Pourtant, dans ces zones humides très plates où la disponibilité en oxygène est très limitante en saison des pluies, la moindre hétérogénéité topographique peut avoir un effet important sur la biodiversité (Diamond et al., 2021) et conduire à des processus d'auto-organisation. Le rôle de tels processus dans le fonctionnement des paysages à buttes reste peu connu. **Dans la première partie, je présente les travaux que je mène sur la formation et le fonctionnement écologique d'un paysage à buttes totalement méconnu : les *Surales* en Colombie.**

Mes travaux sur les paysages à buttes des savanes tropicales ont débuté au cours de mon Master 2 (2007) et se sont poursuivis depuis. Ma passion pour ces paysages tient notamment au fait qu'ils illustrent la manière dont des processus naturels et anthropiques peuvent conduire à la formation de paysages très ressemblants (Fig. 2). En effet, outre les fourmis, termites, vers de terre et mammifères fouisseurs reconnus pour leur capacité à former des buttes de terre, les hommes en construisent aussi pour cultiver. De nombreux champs surélevés persistent sous forme de vestiges en Amérique du Sud (Bolivie, Guyane française, Suriname [Denevan, 2003 ; McKey et al., 2010]) et sont encore utilisés aujourd'hui en Afrique (McKey et al., 2022). Pour les écologues et les archéologues, la régularité marquée des paysages à

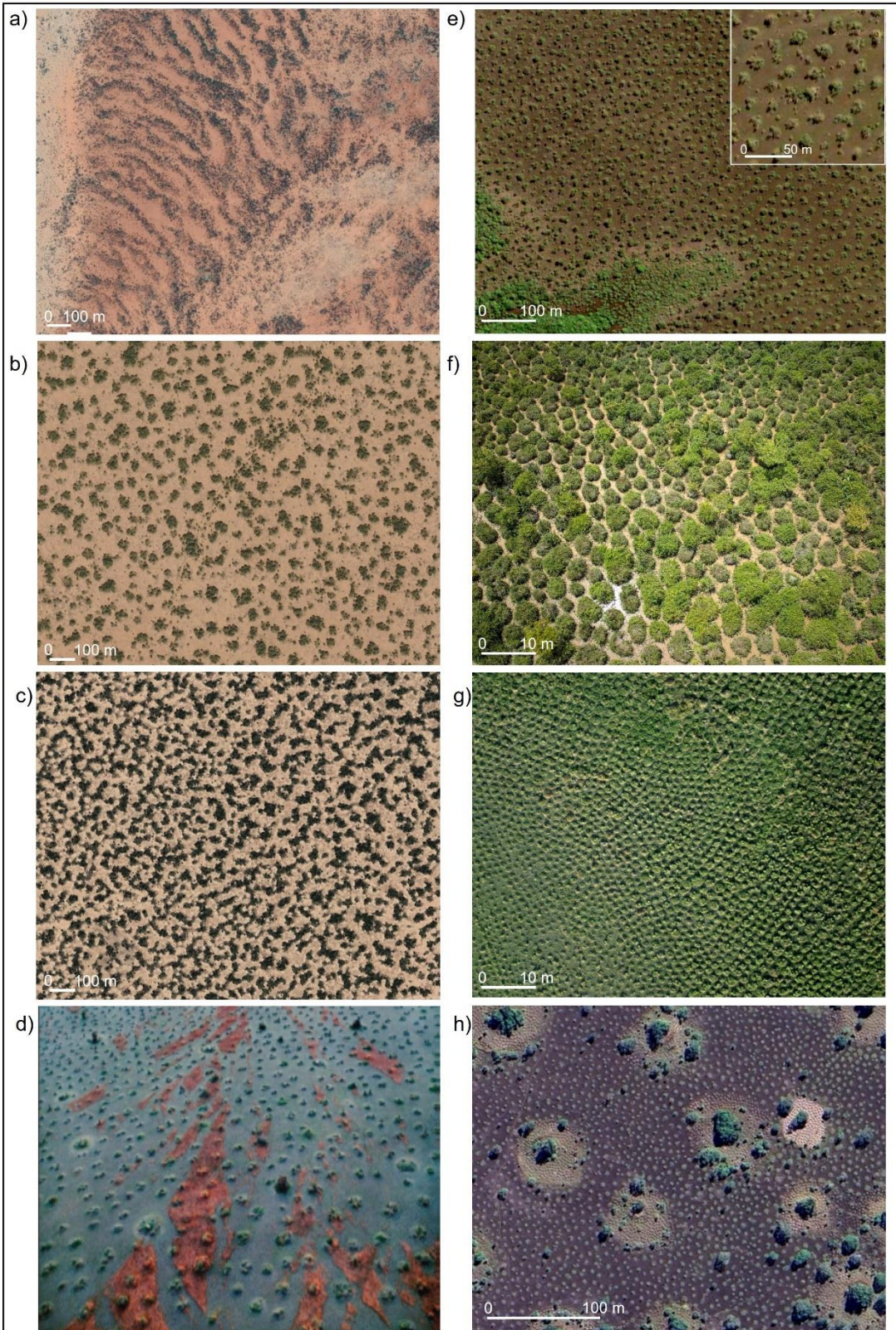


Fig. 2 Paysages naturels et anthropiques à motifs réguliers vus du ciel. Motifs créés par la végétation de types (a) tigrés (Somalie, 4°25'N 43°24' E), (b) en tâches (Soudan, 11°37' N, 27°57' E), (c) en labyrinthes (Soudan, 11°08' N, 27°50' E). Patrons créés par les termites (d) en Zambie, (e) en Bolivie (13°33' S, 61°0' O), (f) par les vers de terre dans les *Surales* de Colombie (5°3' N, -72°14' O). Patron d'origine anthropique dans (g) les champs surélevés de Guyane française (5°32'N, 53°25 O) et (h) superposition de buttes à termites (grosses et moyennes structures) et de champs surélevés (petites buttes autour des nids) (Zambie, 12°12 S, 30°5 E).
 Crédits photos : (a) Map data © 2017 Maxar Technologies, (b) Map data © 2020 CNES/Airbus, (c) Map data © 2019 Google, Maxar Technologie, (d) Frans Lanting, (e) Map data : © 2017 Airbus Maxar Technologies , (f, g) D. Renard, (h) Map data © 2023 Airbus.

buttes est utilisée comme un marqueur, respectivement, de processus d'auto-organisation ou d'agentivité humaine. **Dans la seconde partie de cette section, je présente mes travaux sur les paysages à buttes des savanes inondables côtières de Guyane française.** Il aura fallu le temps de mon Master 2 et doctorat (2007-2010) pour cumuler assez de preuves de l'origine anthropique de ces buttes (McKey et al., 2010) et ainsi convaincre les plus sceptiques de mon jury d'école doctorale. Je m'attacherai plutôt ici à montrer comment mes recherches illustrent les **limites d'une distinction tranchée entre les processus d'auto-organisation naturels et anthropiques dans la formation et le fonctionnement de ces vestiges de champs surélevés.** Je passerai brièvement sur ces travaux qui n'impliquent pas d'encadrement d'étudiants, mais qui ont initié une grande partie de mes recherches portant sur les liens biodiversité-fonctionnement dans les agroécosystèmes.

Approche générale. Les recherches présentées dans cette section ont nécessité un important travail de terrain en Colombie et en Guyane française, combinant des approches en télédétection, écologie du sol et végétale. Les deux projets ont aussi impliqué de nombreuses collaborations avec des collègues archéologues, archéobotanistes, pédologues et écologues à l'international.



« ... Well-developed sural country is difficult to traverse; if you are on foot, you have to decide whether to follow the endless twistings of the boggy ditches or to jump from mound to mound, both awkward expedients. If you are mounted, the animal has to make the same decision and generally ends up in complete frustration: I have heard stories of man and mule firmly stuck in a narrow, deep ditch between two sural mounds.» Bates 1984 pp566-568

Fig. 3 Photographie aérienne de surales en saison des pluies © D. Renard, R. Blatrix pour le CNRS

1.1 *Surales* : une biodiversité bien cachée créée des paysages qui sautent aux yeux

Projets : Mission exploratoire (2012), *National Geographic* (2023-2024)
Etudiants·es : K.L. Adame Montoya, V. Alfonso, A.M. Sandoval Mata, H. Gonzalez Morales, Y.A. Mendoz
Publications : Zangerlé et al. (2016) (#28)
Collaborations : L.E. Suarez Jimenez (Unitropico, Colombie), J. Bonachela (Univ. Rutgers, États-Unis), S. Barot (IRD, France), J. Iriarte (Univ. Exeter, Angleterre)

Les Llanos de l'Orénoque (Fig. 3, tracé vert sur la carte) s'étendent entre la Colombie et le Venezuela. Se sont les savanes inondables parmi les plus vastes d'Amérique du Sud (~570 000 km²). Les Llanos renferment l'un des cas les plus spectaculaires de patrons paysagers : les *surales* (Fig. 3). Les *surales* sont constitués de buttes de terre régulièrement espacées (Fig. 3, 4) dont la taille varie de quelques centimètres (de haut et de large) à 5 m de diamètre et 2 m de hauteur. Majoritairement composées et couvertes d'excréments de vers de terre (e.g., des turricules), les observations de terrain ont conduit à attribuer la formation des buttes à ces organismes discrets (Huber et al., 2006). Cependant, à l'exception de quelques mentions dans des articles en écologie végétale, les *surales* sont majoritairement passés sous le radar des chercheurs. Deux projets ont visé à mieux comprendre l'écologie de ces systèmes : un premier, exploratoire, mené par D. McKey et un second, financé par *National Geographic* que je coordonne et dans le cadre duquel je co-encadre quatre étudiants colombiens en partenariat avec l'Université locale du Casanare.

Objectifs. (1) **Estimer l'étendue et la distribution géographique** des paysages de *surales* dans les Llanos de L'Orénoque, (2) **identifier les vers de terre et les processus de formation des buttes** et (3) caractériser les **effets de l'hétérogénéité topographique sur les communautés végétales**. Le projet *National Geographic* remplit deux objectifs complémentaires : renforcer les capacités de recherche en écologie tropicale par la formation d'étudiants colombiens et sensibiliser les communautés locales en montrant les effets d'une biodiversité "moche et invisible"¹ du sol sur des paysages et des écosystèmes entiers.

Approches. Notre équipe combine des approches de télédétection (prise et traitement d'images aériennes par drone), de modélisation mathématique et de terrain en pédologie (analyses physico-chimiques des sols), écologie du sol et végétale. Nous avons formé les étudiants colombiens à toutes les méthodes de collecte (*Tropical Soil Biodiversity and Functioning*, Anderson & Ingram, 1994) et d'analyse de la biodiversité du sol (tri et identification des morpho-espèces d'insectes sociaux), d'analyse de la structure du sol en agrégats (turricules, agrégats racinaires, fragments de nid ou galeries d'insectes sociaux [(Velasquez et al., 2007)]) et des communautés végétales (transects, herbiers, identification). En complément, des collègues archéobotanistes ont entrepris l'analyse de microfossiles végétaux (e.g., phytolithes) pour retracer l'histoire de la végétation des *surales*. Nous avons étudié les buttes dans trois sites en 2012 et trois zones d'un quatrième site en 2023 caractérisé par un gradient de taille des buttes (diamètre 'petit' : 112 ± 47.1 cm Fig. 4a, 'moyen' : 160.6 ± 32.5 cm Fig. 4b et 'grand' : 373 ± 109 cm Fig. 4c).

¹ En anglais « ugly and invisible », qualificatifs choisis pour trancher avec les animaux charismatiques comme le panda ou le lion, stars des campagnes de conservation de la biodiversité. Le projet *National Geographic* ambitionne de rendre plus visible la biodiversité du sol et son rôle dans la formation de paysages extraordinaires.

Résultats. Dans la première description complète des *surales* que nous avons publié (Zangerlé et al., 2016), nous estimons que les *surales* couvrent plus de 75 000 km² des Llanos (surface supérieure à celle de l'Irlande). À mesure que les buttes s'élargissent et s'élèvent, nous montrons que les assemblages d'espèces végétales se diversifient et se différencient davantage entre les buttes et l'espace entre les buttes (e.g., la matrice) jusqu'à ce que quelques espèces d'arbres constituent la majeure partie de la végétation sur les plus grandes buttes. Le long de ce qui semble être une chronoséquence dans la formation des buttes, les communautés végétales suivent donc une dynamique de succession (Fig. 4a-c).

Parmi la diversité des vers de terre collectés (plus de six espèces, probablement toutes nouvelles pour la science), nos données suggèrent que les monticules résultent de l'activité de *Rhinodrilus* sp. (1 m de long ou plus, turricules de 5 cm en moyenne, Fig. 4d,e). La distribution de ces vers de terre, des turricules et des phytolithes tous indiquent que les vers se nourrissent dans le sol de la matrice et excrètent les turricules sur les buttes, à l'extrémité de galeries semi-permanentes. Les tours de turricules ainsi formées permettent aux vers de terre de respirer au-dessus du niveau de l'eau. Nous faisons l'hypothèse que l'accumulation locale de turricules de chaque ver de terre sur la microtopographie, répétée par des milliers d'individus, conduit aux spectaculaires motifs réguliers des *surales*. Le mouvement net de terre conduit par les vers de terre pourrait ainsi simultanément faire croître les buttes (qui concentrent l'oxygène) et s'approfondir la matrice, rendant plus difficile l'initiation d'un nouveau monticule à proximité.

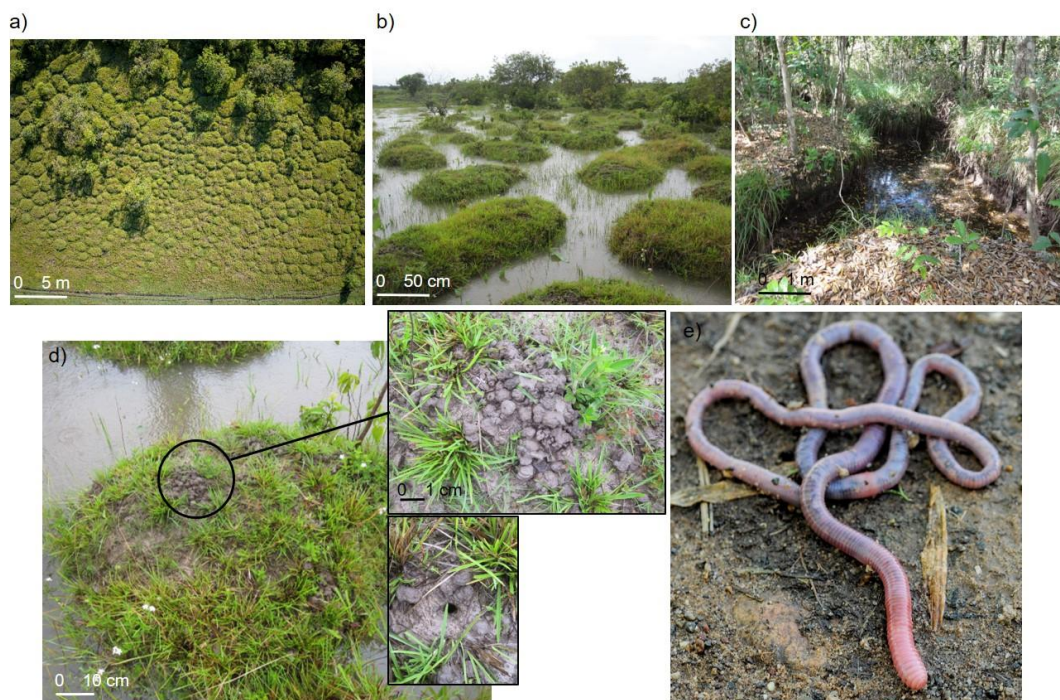


Fig. 4 Variation dans la taille des *surales*. a) Photographie aérienne illustrant un patron en « pétale » des buttes que nous expliquons par une coalescence de structures plus petites (© D. Renard, R. Blatrix pour le CNRS). b) Vue du sol de buttes de taille moyenne en saison des pluies (© A. Zangerlé pour le CNRS). c) Grandes buttes couvertes d'arbres pouvant atteindre 4.5 m de diamètre et 2 m du bas du bassin au sommet de la butte (© A. Zangerlé pour le CNRS). d) Détail d'une butte et des turricules du vers de terre *Rhinodrilus* sp. photographié sur la planche e) (© T. Decaëns pour le CNRS).

J'ai coordonné l'acquisition de données complémentaires de terrain en octobre 2023 (cinq chercheurs permanents, quatre étudiants, Fig. 5) en vue notamment d'alimenter un modèle mathématique qui permettra de tester cette hypothèse (travail en cours). L'une de ces données est la quantité de sol excrété par ver et par unité de temps. Pour les acquérir, nous avons défini un protocole de collecte et de pesées hebdomadaires des turricules produits sur 30 buttes (10 petites, moyennes et grandes buttes). Ce sont les étudiants colombiens qui sont en charge de réaliser ces suivis pendant une année.

Les images aériennes acquises par R. Blatrix et moi-même au cours de la dernière mission ont servi de support à une exposition photographique grand public à l'Université de Yopal (Fig. 5).



Fig. 5 Groupe de travail (étudiants-es, partenaires locaux, collègues français) sur les *surales* de Colombie lors du lancement, en octobre 2023, de l'exposition de photographies aériennes que nous avons, Rumsais Blatrix (CNRS) et moi-même prises dans le cadre du projet *National Geographic*. Les images ont été exposées dans la bibliothèque de l'Université de Yopal ouverte au public.

1.2 Héritage écologique des pratiques agricoles précolombiennes

Projets : Mission pour les Initiatives Transverses et Interdisciplinaires, CNRS 2007-2010
Publications : Renard et al., 2011 (#35), 2012 (#33), 2013 (#31)
Publications : McKey et al., 2010 (#37) ; Iriarte et al., 2010 (#38)
Collaborations : B. Glaser (Univ. Halle, Allemagne), J. Iriarte (Univ. Exeter, Angleterre),
S. Rostain (CNRS, France)

En thèse (2007-2010), j'ai travaillé sur une forme d'agriculture employée par les Amérindiens précolombiens pour cultiver dans les savanes d'Amazonie et du bassin péri-amazonien : la culture sur champs surélevés. Cette pratique consistait à construire des buttes de terre pour concentrer un sol bien drainé et la matière organique dans un sol autrement inondé saisonnièrement et pauvre en éléments minéraux. En Guyane française, ces champs ont été abandonnés depuis ~800 ans. Je ne présenterai pas ici les éléments ayant conduit à confirmer l'origine anthropique des buttes, détaillés dans l'article collectif de [McKey et al., \(2010\)](#). Le point de départ de mon doctorat était suivant : les vestiges de ces champs très anciens restent, de manière surprenante, visibles malgré l'abondance et le potentiel érosif des pluies tropicales. L'étude des vestiges de ces agroécosystèmes m'a offert une perspective temporelle unique pour évaluer les effets **des pratiques agricoles anciennes sur la biodiversité et le fonctionnement écologique actuel des savanes de Guyane française.**

Question. Les transformations paysagères anciennes ont-elles favorisé des mécanismes écologiques qui maintiennent aujourd'hui les anciens champs contre l'érosion en l'absence de l'homme ?

Approches. Répondre à cette question a nécessité un important travail de terrain impliquant des approches similaires à celles employées sur les *surales*. J'ai ainsi caractérisé les communautés de macroinvertébrés du sol par la collecte (TSBF), l'identification et le comptage exhaustif des fourmis, termites et vers de terre contenus dans 144 monolithes de sol (dans 70 buttes et 76 matrices) en saison sèche et en saison des pluies. J'avais caractérisé les communautés végétales sur le même terrain durant mon Master (2006-2007). J'ai aussi analysé la structure physique du sol par la séparation et la pesée des racines et des structures formées par différents organismes et d'origine physique suivant Velasquez et al., (2007). Ces mesures ont été complétées par des mesures de densité du sol et du taux d'infiltration de l'eau réalisées par mes collègues pédologues.

Résultats. Mes travaux montrent que la construction des champs par les agriculteurs·rices a créé des conditions favorables au maintien d'un sol vivant ([Renard et al., 2013](#)). Les buttes concentrent aujourd'hui une biodiversité élevée de plantes et de macroinvertébrés du sol (fourmis, termites et vers de terre) dont la densité moyenne dépasse largement celle relevée dans des savanes non impactées par l'homme (voir table 2 dans [Renard et al., 2013](#)). J'ai compté jusqu'à 10 787 ind.m⁻² en saison des pluies dans les buttes qui représentent 45% de la surface totale de la savane. Les agrégats d'origine biologique (e.g., créé par les insectes sociaux, les vers de terre et les racines) représentent en moyenne 60% de la masse du sol des buttes, contre seulement 25% du sol de la matrice. La complémentarité fonctionnelle entre

les organismes compacteurs (les vers de terre), et décompacteurs (insectes sociaux, plantes) augmente la stabilité structurale du sol et assure un taux d'infiltration de l'eau dix fois supérieur dans les buttes comparativement au sol de la matrice. Les activités des organismes « ingénieurs du sol », concentrées dans les buttes, régulent ainsi l'érosion des anciens champs qui s'auto-maintiennent.

Section 1 : conclusions et implications

Quelle que soit l'origine naturelle ou anthropique des buttes étudiées, mes résultats suggèrent que ces dernières soutiennent une importante biodiversité et que leur fonctionnement actuel est régi par des processus d'auto-organisation. Dans les anciens champs surélevés, la végétation et la macrofaune du sol maintiennent aujourd'hui, par leurs activités, la concentration d'un sol bien drainé dont les plantes cultivées par l'homme avaient initialement besoin pour survivre dans un environnement autrement anoxique. En suivant l'exemple des recherches menées récemment en milieu semi-arides (Bonachela et al., 2015 ; Meron, 2018), il serait intéressant d'évaluer le rôle des patrons paysagers des savanes tropicales dans la résilience des écosystèmes aux changements climatiques.

Alors que l'agriculture industrielle nivelle toute hétérogénéité environnementale pour faciliter la gestion de grandes surfaces cultivées, mes résultats montrent qu'en créant ou en maintenant de l'hétérogénéité, il est possible de concevoir des systèmes agricoles couplant l'ingénierie humaine et naturelle (Renard et al., 2012). Appliquer les connaissances liées à l'auto-organisation dans les patrons paysagers fait l'objet d'une nouvelle réflexion, notamment en agroforesterie (Tzuk et al., 2020). Une telle réflexion pourrait être particulièrement importante dans le cas des savanes et des écosystèmes prairiaux tropicaux où la conversion agricole menace la biodiversité de ces milieux et mène à la destruction des *surales* (Parr et al., 2014). Dans le Llanos de Colombie, le nivellement facilite la culture intensive du riz et l'élevage extensif de bovins.

Section 2 : Liens biodiversité-fonctionnement dans les agroécosystèmes actuels

Au cours de mon post-doctorat à l'Université de Californie à Santa Barbara (UCSB, 2016-2018), j'ai approfondi l'analyse des liens biodiversité-fonctionnement des écosystèmes (ci-après BFE). Dans un souci de synthèse et parce que peu d'étudiant·e·s étaient impliqués, je ne présenterai pas mes travaux de post-doctorat à l'Université McGill (Canada) sur les dynamiques spatio-temporelles de la provision de multiples services écosystémiques (Renard et al., 2015 [#29], Mitchell et al., (2015) [#30], Renard et al., 2016 [#26], Tomscha et al., 2016 [#27]).

Introduction

Rendre la production alimentaire plus sûre et plus stable, tout en réduisant son impact sur l'environnement et en favorisant le bien-être de l'homme, est l'un des plus grands défis scientifiques de notre époque. La complexité du problème tient aux multiples interactions entre les dimensions agronomiques, sociales et environnementales de l'agriculture. Historiquement, ces interactions ont été négligées, privilégiant des pratiques de gestion intensives axées uniquement sur l'augmentation des rendements des cultures principales (e.g., riz, maïs, blé, soja). Outre les effets négatifs inattendus de ces pratiques sur la santé humaine, la qualité de l'eau et des sols, le climat mondial et la biodiversité, leur efficacité est aujourd'hui questionnée (Grassini et al., 2013).

Répondre aux défis d'une **agriculture durable** qui réconcilie les besoins des sociétés et la conservation de l'environnement appelle à des actions audacieuses qui dépassent le seul recours à la technologie (i.e., recours aux variétés améliorées, produits phytosanitaires, agriculture de précision) qui perpétue un imaginaire de maîtrise de la nature. Le rythme des changements climatiques rend la nécessité de mettre en place de telles actions de manière urgente.

L'agrobiodiversité : un levier pour une agriculture durable et résiliente ?

De nombreuses recherches en écologie et en agronomie montrent que l'agrobiodiversité peut être un levier essentiel pour développer une agriculture caractérisée de FARE, e.g., *Food secure, Agrobiodiverse, Regenerative, Equitable and just* (Chaplin - Kramer et al., 2023). Favoriser une diversité d'organismes, sauvages (i.e., pollinisateurs, ennemis naturels des ravageurs, organismes du sol) et/ou domestiqués (i.e., plantes et animaux), permet de soutenir la biodiversité dans son ensemble (Priyadarshana et al., 2024) de multiples fonctions (Beillouin et al., 2021 ; Tamburini et al., 2020) parmi lesquels la production de biomasse (voir paragraphe suivant), la régulation des ravageurs et des maladies, la pollinisation et le recyclage des nutriments. La diversification agricole confère aussi des bénéfices économiques (Sánchez et al., 2022) et sur la santé humaine (via notamment la nutrition [Kerr et al., 2021; Nicholson et al., 2021]).

Conserver ou diversifier les systèmes agricoles peut prendre de multiples formes : ajouter des variétés, des espèces ou des groupes fonctionnels (i.e, céréales, légumineuses), favoriser les interactions mutualistes (Kiers et al., 2002) ou la complémentarité (Montazeaud et al., 2018) entre ces organismes dans le temps (rotations, 'relay cropping') et/ou dans l'espace (associations d'espèces et mélanges variétaux dans les parcelles, mosaïques paysagères). Conserver la diversité génétique est particulièrement important pour l'adaptation des plantes ou animaux à la base de notre alimentation aux conditions futures, inédites et incertaines. Cette diversité représente en effet la matière première des sélectionneurs pour développer des variétés végétales ou races animales aux rendements et qualité nutritionnelle supérieurs, plus résistantes aux ravageurs et aux maladies émergentes, ou pour assurer leur survie dans des conditions plus chaudes, plus fraîches, plus sèches ou plus humides.

Les instances internationales comme la FAO, l'IPBES, et l'UNESCO soutiennent une agriculture basée sur l'agrobiodiversité à travers le monde. Les mouvements paysans, des peuples indigènes, et des communautés locales font aussi de l'agrobiodiversité un des piliers de leurs modèles agricoles et de leurs revendications territoriales (<https://www.forestpeoples.org/fr>).

Augmenter l'agrobiodiversité : une stratégie d'adaptation aux risques climatiques

La diversification agricole est une approche proposée non seulement pour produire plus et de manière plus durable, mais aussi pour assurer une plus grande résilience des agroécosystèmes (Altieri et al., 2015; Frison et al., 2011; Lin, 2011; Zimmerer, 2010). La **stabilité des fonctions des écosystèmes** est l'un des aspects de la résilience auquel les écologues s'intéressent (Donohue et al., 2013, 2016). Cette stabilité est la capacité des écosystèmes à continuer à fonctionner malgré la variation des conditions environnementales et des perturbations (Tilman et al., 1998). Plusieurs décennies de recherches en écologie montrent qu'augmenter la diversité taxonomique (Gross et al., 2014; Isbell, 2015), fonctionnelle (Polley et al., 2013) et génétique (Prieto et al., 2015) dans les écosystèmes naturels mène à une plus grande stabilité de la productivité de ces écosystèmes dans le temps (Donohue et al., 2016), y compris face aux sécheresses (Isbell et al., 2015 ; Tilman & Downing, 1994).

Ces liens entre diversité et stabilité sont beaucoup moins bien connus dans les agroécosystèmes (Beillouin et al., 2019, 2021). Dans une étude globale, Beillouin et al., (2019) dénombrent 50 méta-analyses mesurant les bénéfices de la diversification agricole sur les rendements agricoles une année donnée, et seulement une méta-analyse sur la stabilité de ces rendements dans le temps. Cet important déficit d'attention a motivé mes travaux sur les liens diversité-stabilité dans les agroécosystèmes. Mon attention c'est plus spécifiquement porté sur la diversité des plantes cultivées (PC) aux niveaux des espèces, variétés et au niveau fonctionnel. Cette recherche me semble en effet critique dans un contexte où l'augmentation de la demande alimentaire mondiale, la faiblesse des réserves et les changements climatiques tous menacent la stabilité des systèmes alimentaires des échelles locales à globales.

Mes recherches dans cette section questionnent les apports de la diversité des PC à la résilience, en particulier face aux aléas climatiques, et se structurent autour de trois questions :

- 2.1 La diversité des PC a-t-elle un lien avec la stabilité des rendements dans les agroécosystèmes ? Relativement aux multiples facteurs pouvant influencer la stabilité (pratiques, facteurs sociaux, etc), le rôle de la diversité des PC reste-t-il inchangé de l'exploitation aux pays ? Je teste ici l'hypothèse suivant laquelle la diversité des espèces de PC a un rôle stabilisateur sur les rendements à de multiples échelles spatiales.
- 2.2 Face aux événements climatiques extrêmes et aux maladies des plantes, quelles sont les contributions de la diversité des PC en termes de résilience et de résistance ?
- 2.3 Quels sont les mécanismes qui sous-tendent les relations diversité–stabilité–climat ?

Contexte de travail. Mes travaux de post-doctorat à UCSB (section 2.1) ont servi de base à un projet ANR (programme Programme Investissement d'Avenir « Make Our Planet Great Again » de l'ANR) que je coordonne depuis 2018 (projet ASSET, encadré 1). Dans ce cadre, j'ai eu l'opportunité de co-encadrer **quatre doctorant·e·s** (trois thèses ont déjà été soutenues) et **trois post-doctorant·e·s** dont les résultats sont présentés dans les trois sous-sections suivantes (2.1, 2.2, 2.3). L'ensemble des thèses ont été **interdisciplinaires**, faisant dialoguer écologie et ethnoécologie (résultats présentés en sections 3 et 4). Leur encadrement reposait sur un binôme d'encadrants de chaque discipline.

Approche générale. Je combine à la fois des collectes de données de terrain répétées dans le temps et de modélisation statistique (basées sur des données agricoles, climatiques, socio-économiques existantes) et mathématique.

Encadré 1 : Systèmes d'étude du projet *Agrobiodiversity for a food-Secure planET - ASSET*

À l'échelle locale, les recherches au sein du projet ASSET ont porté sur trois systèmes d'études : un système viticole en France, agro-sylvo-pastoral traditionnel dans le nord du Maroc et un système basé sur les rotations et associations de céréales et de légumineuses au Sénégal. Les sites choisis partagent des contraintes liées aux changements climatiques : une augmentation des températures, un stress hydrique croissant et des événements extrêmes (Giorgi & Lionello, 2008 ; Sultan & Gaetani, 2016 ; Van der Linden & Mitchell, 2009). Ils sont aussi tous caractérisés par une diversité élevée de PC aux niveaux des espèces et variétés. Enfin, des relations partenariales antérieures au projet, portées par mes collaborateurs, ont facilité la mise en œuvre du projet sur chaque terrain. Outre ces points communs, chaque système d'étude connaît des enjeux différents. Je me concentrerai sur la France et le Sénégal, le terrain marocain ayant été abandonné suite à la fermeture prolongée des frontières pendant la pandémie du COVID-19.

Enjeux de la viticulture. La vigne représente 7,4 millions d'hectares cultivés en 2018 et représente actuellement la culture la plus rentable au monde après la pomme de terre et la tomate (Alston & Sambucci, 2019). En France, les vins et les spiritueux occupent le 2nd poste excédentaire dans la balance commerciale, derrière l'aéronautique (INSEE, 2019). En 2019, la viticulture française a généré environ 500 000 emplois directs et indirects et une exploitation sur cinq possède une activité viticole en France². Ses trois défis majeurs sont : l'usage des pesticides (3^{ème} secteur le plus consommateur [Urruty et al., 2016]), les changements climatiques qui influencent significativement le rendement et les qualités organoleptiques des vins (Santos et al., 2020 ; Van Leeuwen et al., 2019) et la baisse de la consommation de vin ([Organisation Internationale de la Vigne et du Vin](#) 2023). (© Photo de droite : Antoine Doncieux pour le



CNRS).

Enjeux de l'agriculture de subsistance au Sénégal.

La région du Sahel compte parmi les plus vulnérables aux changements climatiques : la population devrait doubler d'ici 2050, le secteur agricole emploie 70% de la population et produit 80% des céréales consommées en Afrique subsaharienne (Dingkuhn et al., 2006). Le Sénégal en particulier a déjà connu une variabilité climatique record au cours des dernières décennies. Cette variabilité devrait s'accroître d'ici 2050. Ces changements se



combinent à la dégradation des sols et au morcellement des terres, posant des défis majeurs pour cette agriculture pluviale, majoritairement de subsistance et à très bas niveau d'intrants (Sultan et al., 2017). (© Photo de droite : Julien Goldstein pour « Le Monde »).

² <https://www.intervin.fr/etudes-et-economie-de-la-filiere/chiffres-cles>

2.1 Déterminants de la stabilité des rendements en agriculture

Projets : Post-doctorat D. Renard ; ASSET (ANR, PI : D. Renard)

Etudiants : A. Doncieux ; J. Menesch

Publications : Renard & Tilman 2019, 2021 (#18,23) ; Menesch et al. 2023 (#7) ; Doncieux et al. En préparation

Collaborations : D. Tilman (UCSB, Univ. Minnesota, États-Unis) ; K. Waha (SCIRO, Australie) ; S. Caillon (CNRS, France)

Les recherches existantes soutiennent l'hypothèse qu'augmenter l'agrobiodiversité augmente la stabilité des rendements et des revenus agricoles dans le temps (Auffhammer & Carleton, 2018 ; Chavas & Di Falco, 2012 ; Falco & Chavas, 2008 ; Noack et al., 2019 ; Raseduzzaman & Jensen, 2017). Ces résultats sont issus principalement de manipulations expérimentales de la diversité spécifique (Gaudin et al., 2015), génétique (Zhu et al., 2000) ou de groupes fonctionnels (plantes annuelles vs. pérennes, herbacées vs. arborées, plantes fixatrices vs. non fixatrices d'azote [Raseduzzaman & Jensen, 2017]) à l'échelle de la parcelle. Cependant, cette échelle limite la prise en compte de la diversité des plantes gérée par les agriculteurs·rices entre leurs parcelles, au sein de leur exploitation. À l'exception de deux études (Abson et al., 2013 ; Falco & Chavas, 2008), peu de recherches avant mes travaux de post-doctorat avaient testé les liens entre la diversité des cultures et la stabilité temporelle des rendements à des échelles supérieures, notamment à celles de l'exploitation et du pays. L'échelle nationale est pertinente dans un monde interconnecté où l'instabilité de la production alimentaire d'un pays peut affecter la sécurité alimentaire d'autres pays, même éloignés (Bren d'Amour et al., 2016).

Questions. Quels sont les liens entre la diversité des espèces de plantes cultivées et la stabilité des rendements agricoles à de multiples échelles spatiales ? Cette question interroge la généralité des relations diversité-stabilité en agriculture.

Approche. La modélisation statistique est l'approche qui a été choisie pour répondre à cette question. Les données utilisées proviennent de multiples sources et dépendent de l'échelle spatiale étudiée : l'exploitation ou le pays (voir Tableau 5). Les modèles de régression utilisés permettent d'évaluer le sens et la force des relations diversité-stabilité, mais aussi d'estimer les rôles respectifs du climat, des pratiques agricoles (irrigation et fertilisation) et des conditions socio-politiques (instabilité politique et conflits armés) sur cette stabilité. J'estime la stabilité temporelle des rendements et des revenus agricoles sur un pas de temps de six à 10 ans dépendamment des données (Tableau 5) suivant Tilman (1999) et j'estime la diversité en espèces cultivées suivant Hill (1973). Une approche similaire a été utilisée dans la sous-section 2.2.

Résultats. À l'échelle nationale (n=91 pays), l'analyse de 50 ans de données agricoles annuelles sur 176 espèces de plantes révèle que la diversité des espèces cultivées et l'irrigation ont les plus forts effets stabilisateurs sur les rendements (Fig. 6b) et les revenus agricoles (Renard and Tilman 2019). Augmenter cette diversité à l'échelle nationale est associée à une réduction des variations interannuelles des rendements, réduisant ainsi la probabilité de pertes importantes des récoltes (Fig. 6a), sans pour autant réduire les rendements moyens annuels.

Type de données	Noms des bases de données	Plage temporelle	Pas de temps	Etendue spatiale	Résolution spatiale	Libre accès	Références de mes travaux (synthèse)	Limites
Agricoles	FAOSTAT	1961 – 2023	Annuel	Globale	Pays (n=158)	x	Renard et al., (#5) ; Mahaut et al., (#6); Renard, Tilman (#23)	<ul style="list-style-type: none"> Qualité des données transmises par les pays eux-mêmes Large échelle, masque la variabilité environnementale, sociale intra-pays
	Banque mondiale, LSMS-ISA	2008 – 2002*	Tous les 2 ans en moyenne	Pays (n=4 sélectionnés, 8 disponibles)	Exploitation*	x	Menesch et al., (#7) ; Projet	<ul style="list-style-type: none"> Unités locales non convertibles Non standardisées entre pays et dans le temps Données parfois incomplètes
	Cave Coopérative Vinovallée	2015 – 2020	Annuel	Régions (n=3)	Exploitation (n=134)	Non	Doncieux et al., (en cours)	<ul style="list-style-type: none"> Ne sont pas en accès libre Données déclaratives, peuvent être influencées par les limites de rendements imposées par les labels AOC, IGP etc
Climat	Climate Research Unit	1901 – 2022	Mensuel	Globale	Pixel 0,5°	x	Renard et al., (#5) ; Mahaut et al., (#6); Renard, Tilman (#23)	
	SPEI	1901 – 2022	Mensuel	Globale	Pixel 0,5°	x	Renard et al., (#5)	
Socio-économiques	Center for Systematic Peace	1946 – 2008	Annuel	Globale	Pays (n=182)	x	Renard, Tilman (#23)	

Tableau 5 Caractéristiques des bases de données agricoles, climatiques et socio-économiques utilisées pour soutenir une partie de nos travaux de recherche sur les liens diversité des plantes cultivées – stabilité des rendements dans le temps. Chaque source est accessible via l'hyperlien du nom de la base de donnée. Les chiffres après les références renvoient à la liste des publications dans le CV. * Indique que la donnée dépend du pays de collecte,

Ce travail indique que l'effet stabilisateur de la diversité dépend du nombre d'espèces qui occupent une proportion égale de la surface cultivée totale (e.g., diversité "effective") plutôt que de la simple richesse (e.g., nombre) des cultures. Les modèles statistiques ne révèlent aucun effet significatif des apports en azote et en phosphore, des surfaces cultivées totales et des conflits armés sur la stabilité des rendements à l'échelle nationale (Fig. 6b).

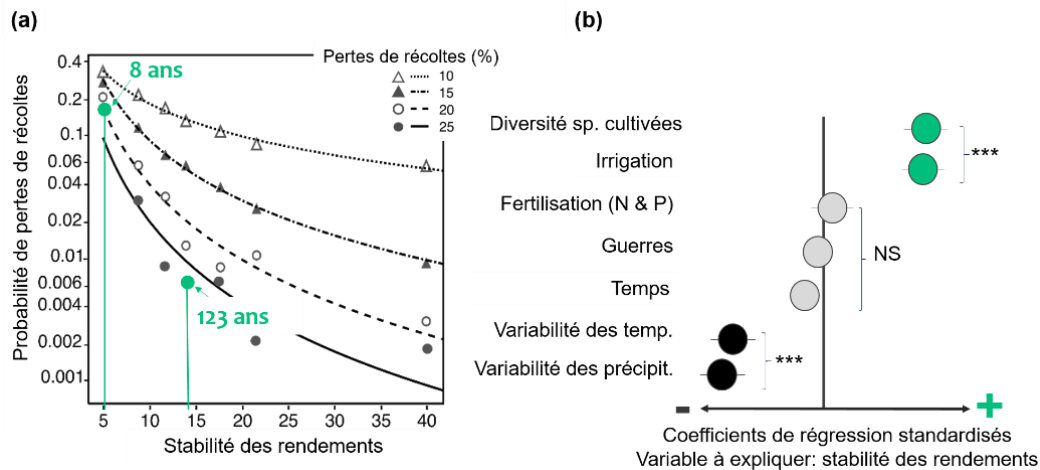


Fig. 6 Stabilité des rendements agricoles. a) Lien entre la mesure de stabilité des rendements, qui n'a pas d'unité (suivant Tilman 1999 et défini comme le rapport de la moyenne des rendements sur un temps t sur sa variation dans le temps t) et la probabilité des pertes de 10 à 25% des récoltes nationales. b) Résultat du modèle de régression montrant les principaux déterminants de la stabilité des rendements à l'échelle nationale. En vert les variables ayant un effet stabilisateur (la diversité et l'irrigation), en noir les variables ayant un effet déstabilisateur (les variations climatiques interannuelles).

À l'échelle des exploitations, les analyses menées par deux étudiants que j'ai co-encadré (A. Doncieux ; article en cours, [Menesch et al., 2023](#)) soutiennent l'importance de la diversité cultivée comme déterminant de la stabilité des rendements (Fig. 7). Ces analyses ont été réalisées sur des exploitations de systèmes contrastés : 134 exploitations de trois régions viticoles françaises (6 ans de données 2015-2020 [tableau 5]) et 1230 exploitations de systèmes agro-pastoraux en Ethiopie (4 années de données entre 2011-2018), impliquant des niveaux variés de diversité variétale (modèle vigne) et spécifique (plantes et animaux domestiques). Tout comme les résultats à l'échelle nationale, nous n'avons pas trouvé d'effet significatif de la fertilisation azotée sur la stabilité des rendements dans le temps. Seul le nombre de traitements fongicides a un effet significatif stabilisateur sur les rendements de la vigne.

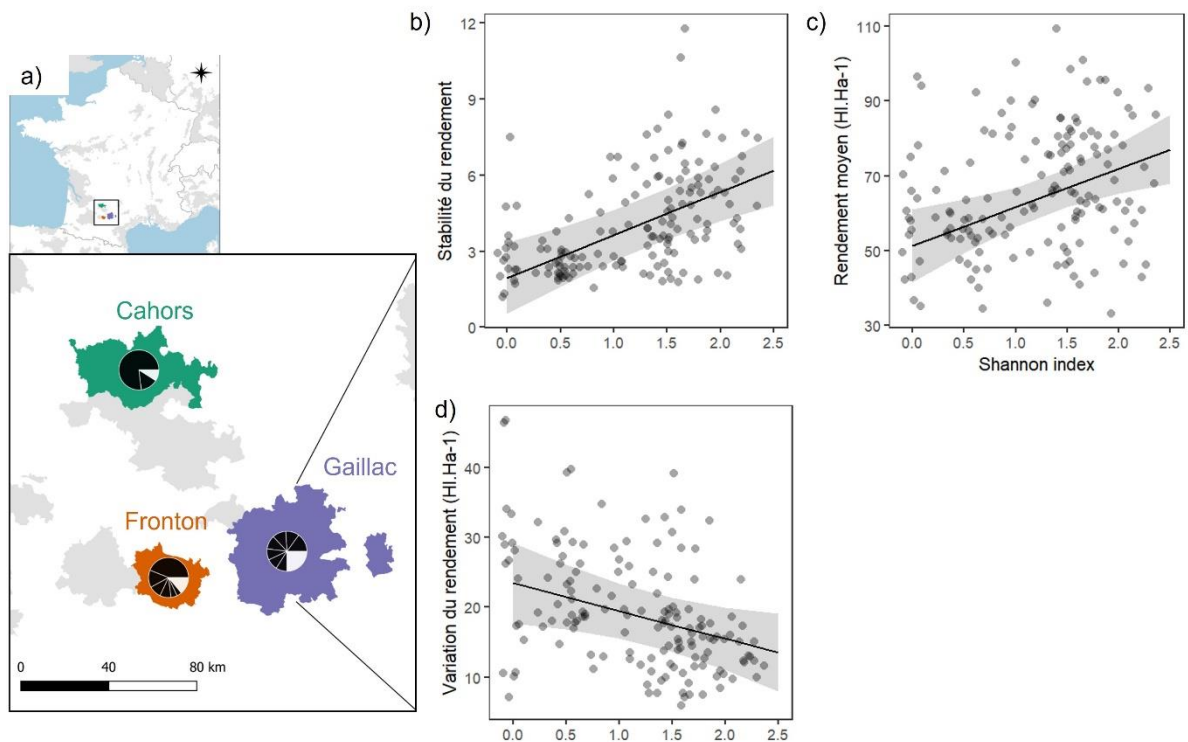


Fig. 7 (a) Carte des trois régions viticoles françaises analysées et répartition des surfaces cultivées entre cépages (camemberts). Liens entre la diversité des cépages cultivés dans chaque région et la stabilité des rendements en raisins (b), le rendement moyen annuel (c) et les variations interannuelles de ce rendement (d). Les droites et intervalles de confiance représentent les prédictions du modèle de régression.

Conclusion partielle. Nos résultats suggèrent qu'augmenter la diversité effective des cultures du niveau de l'exploitation au niveau national pourrait être un moyen complémentaire aux solutions technologiques telles que l'irrigation (lorsque les ressources en eau le permettent) pour relever les effets des changements climatiques destabilisateurs sur la sécurité alimentaire. De telles solutions « fondées sur la nature » méritent plus d'attention.



Une large part de la main-d'œuvre agricole dans les agricultures familiales est portée par les femmes. Elles sont davantage touchées et exposées aux changements climatiques (Nyantakyi-Frimpong, 2021) (© Oxfam International). Bien que mes recherches n'adressent pas encore la problématique du genre, j'y suis sensible et m'engage pour l'heure dans le comité parité du laboratoire.

2.2 Contributions de la diversité des plantes cultivées face aux événements climatiques extrêmes et aux maladies des plantes ?

2.2.1 Le climat

Projets : ASSET (ANR, PI : D. Renard)
Etudiants : J. Menesch (Master) ; L. Mahaut (post-doctorante)
Publications : Renard & Tilman 2019, 2021 (#18,23) ; Mahaut et al., 2021 (#16) ; Menesch et al., 2023 (#7) ; Renard et al., 2023 (#5)
Collaborations : D. Tilman (UCSB, Univ. Minnesota, États-Unis) ; K. Waha (SCIRO, Australie) ; F. Noack (Univ. British Columbia, Canada) ; C. Violle (CNRS, France)

Une importante part de mes travaux explore les contributions de l'agrobiodiversité au maintien de la production agricole en contexte de changements climatiques. Plus spécifiquement, la variabilité interannuelle des températures et des précipitations et les événements extrêmes représentent un facteur de risque majeur pour le secteur agricole (W. B. Anderson et al., 2019; Lesk et al., 2016; McLennan, 2021; Ray et al., 2015). Cottrell et al., (2019) estiment que les événements climatiques extrêmes, en particulier les sécheresses, ont causé ~50% des pertes de récoltes et 23% des pertes de bétail dans le monde depuis 1961. Ces phénomènes météorologiques devraient devenir plus intenses et plus fréquents à l'avenir (Pörtner et al., 2022) ce qui alimente les inquiétudes quant à la vulnérabilité des systèmes alimentaires (Thiault et al., 2019) et la capacité de l'humanité à lutter contre la faim (Objectifs 2, [UN General Assembly, 2015]).

Les stratégies d'adaptation de l'agriculture aux changements climatiques se sont principalement concentrées sur des solutions technologiques. Sur le terrain, l'utilisation accrue d'engrais et de variétés améliorées issues de la science n'a cependant pas permis de réduire la sensibilité des cultures aux extrêmes climatiques (Schlenker & Lobell, 2010 ; Zaveri & B. Lobell, 2019). De plus, les coûts économiques et environnementaux (émissions de gaz à effet de serre [Crippa et al., 2021]), épuisement des ressources et la pollution [Dubois 2011]) des solutions techno-centrées limitent leur potentiel pour construire, à elles seules, des systèmes agricoles robustes et durables.

Dans un article récent (Renard et al., 2023), j'interprète l'attention portée aux solutions technologiques par une tendance de la recherche en agriculture à se concentrer sur une poignée d'espèces globalement dominantes : maïs, blé, riz, soja, dont la gestion en monoculture facilite l'implémentation de technologies. Ces approches mono-spécifiques ont permis de mieux évaluer la variabilité, à fine échelle spatiale, des effets de la température et des précipitations sur le rendement des principales cultures (W. B. Anderson et al., 2019 ; Iizumi et al., 2014 ; Iizumi & Ramankutty, 2016 ; K. Li et al., 2022 ; D. B. Lobell et al., 2011 ; D. Lobell & Field, 2007 ; Osborne & Wheeler, 2013 ; Schlenker & Lobell, 2010). Toutefois, **se concentrer sur une espèce peut masquer la manière dont le panier de PC répond, de manière agrégée, aux variations météorologiques.**

Questions. La diversité des PC au sein des pays augmente-t-elle la **stabilité** et la **résistance** des rendements agricoles et des revenus économiques (toutes cultures confondues) face aux variations climatiques et aux extrêmes ?

Approche. Nous travaillons une nouvelle fois à l'échelle nationale, utilisant les données de la FAO and du *Climate Research Unit* détaillées dans le Tableau 5. La « résilience écologique » est définie comme la capacité d'un système à absorber les perturbations et se réorganiser tout en opérant des changements de manière à garder essentiellement les mêmes fonctions, structures, identités et rétroactions (Holling, 1973). La résistance est la capacité d'un système à résister à un changement en réponse à une perturbation. Elle est inversement reliée au degré de changement après une perturbation (Justus, 2007).

Résultats. Nos résultats concordent avec la littérature existante : la variabilité interannuelle des précipitations et des températures et leurs extrêmes, sécheresses et pics de chaleurs, sont des déterminants majeurs de l'instabilité de la production alimentaire de l'ensemble du panier d'espèces à l'échelle nationale (Renard & Tilman 2019 ; Mahaut et al., 2021).

L'ensemble de nos travaux à cette large échelle suggèrent qu'augmenter la diversité cultivée peut contrebalancer les effets déstabilisateurs des variations interannuelles du climat sur les récoltes et les revenus (Renard & Tilman 2019 ; Mahaut et al., 2021) et réduire l'impact des sécheresses et des pics de températures (Renard et al., 2023). Une analyse régionale des liens diversité-rendements-climat suggère que l'Afrique Subsaharienne pourrait être la région qui bénéficie le plus de la diversification pour réduire l'ampleur des effets des extrêmes climatiques sur les rendements et les revenus, augmentant ainsi la résistance des systèmes agricoles à ces aléas (Renard et al., 2023).

L'analyse des réponses individuelles de 176 espèces de PC aux aléas climatiques montre que les cultures relativement mineures (e.g., occupant un faible pourcentage des surfaces cultivées mondiales) et à forte valeur économique, sont plus tolérantes aux sécheresses et aux hautes températures que les céréales et oléagineuses dominantes (e.g., occupant une large portion des surfaces cultivées globales, Fig. 8a) et à faible valeur économique (Fig. 8b).

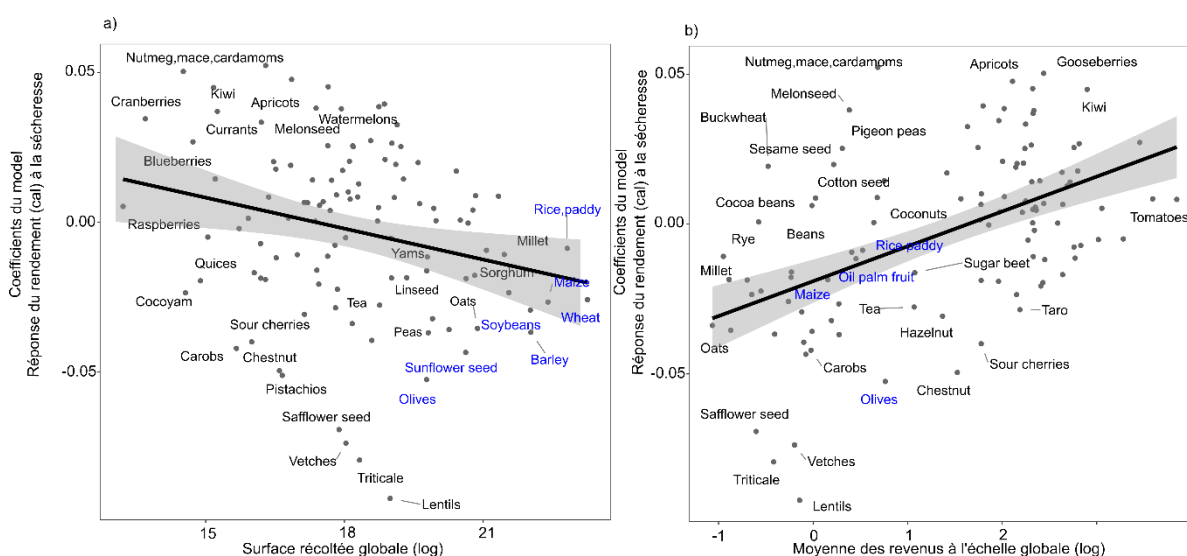


Fig. 8 Relations linéaires entre les réponses des plantes cultivées individuelles et a) la surface récoltée globale (transformée en log) et b) la moyenne globale des revenus générés par ces plantes (transformée en log). Les noms des plantes en bleu indiquent les céréales et oléagineuses dominantes (tournesol, colza, soja, blé, maïs, riz, orge, palmier à huile) à l'échelle globale.

À partir des calculs de sensibilité individuelle des plantes, nous avons calculé un indice de sensibilité moyen à l'échelle du panier d'espèces cultivées dans chaque pays. Nous montrons ainsi que les pays dont le panier d'espèces a une sensibilité moyenne faible sont ceux dont les cultures dominantes sont plus tolérantes aux aléas climatiques. En plus de cette sensibilité moyenne, nous montrons que la variation des sensibilités entre espèces au sein d'un même panier, a un effet positif significatif sur les rendements et les revenus totaux. Ainsi, pour une production et des revenus plus élevés et moins sensibles aux aléas, il ne s'agit pas nécessairement de changer tout le panier d'espèces mais de rééquilibrer les allocations de surfaces cultivées. Par exemple, en augmentant la part d'espèces à la fois résistantes à la sécheresse et à forte valeur ajoutée, décrites comme « mineures » ou « négligées ».

Conclusion partielle. Nos travaux montrent qu'une approche des liens agriculture-climat centrée sur les cultures dominantes n'offre qu'une image partielle des effets des événements climatiques extrêmes sur la production alimentaire et peut entraver l'évaluation de solutions basées l'agrobiodiversité.

2.2.2 Les maladies des plantes

Projets :	ASSET (ANR, PI : D. Renard)
Etudiants :	P-A. Précigout (postdoctorant)
Publications :	Précigout et al. 2022 (#12)
Collaborations :	C. Robert (INRAE, France)

Dans le cadre d'une collaboration avec l'INRAE, j'ai co-encadré le travail d'un postdoctorant sur les maladies des plantes, un autre facteur d'instabilité de la production agricole peu représenté dans mes recherches. Les ravageurs et les pathogènes impactent significativement la santé des plantes, et en cascade, toutes les composantes de la sécurité alimentaire : de la production à sa stabilité, disponibilité, accès, qualité et valeur nutritive des aliments (Savary et al., 2019). Avec la simplification des paysages agricoles (Rusch et al., 2016), l'homogénéité génétique des 'cultivars modernes', la mondialisation des échanges et les changements climatiques, la protection des plantes contre les pestes et les pathogènes prend une place de plus en plus importante (Deutsch et al., 2018 ; Savary et al., 2019). Dans le même temps, des politiques publiques (i.e., plans Ecophyto) visent à réduire l'usage des produits phytosanitaires (dont les fongicides et pesticides) par les agriculteurs rices et donc de réduire leurs effets sur la santé et l'environnement.

Une nouvelle fois, les recherches indiquent qu e favoriser l'agrobiodiversité est une stratégie prometteuse pour contrôler, par des processus naturels, les pestes et pathogènes des cultures. À l'échelle paysagère, la présence d'habitats semi-naturels (notamment forestiers) dans une matrice agricole soutient une diversité (Sirami et al., 2019)et densité d'ennemis naturels qui assurent le biocontrôle des pestes et des pathogènes (Soti et al., 2019 ; Tscharrntke et al., 2011). A l'échelle parcellaire, la synthèse de Snyder et al., (2020) montre que les mélanges variétaux confèrent simultanément une plus grande résistance aux pathogènes, productivité, gains économiques et diversité nutritionnelle que les monocultures. La plupart des travaux liant les pratiques de diversification agricole et la régulation des pestes et pathogènes s'attachent à tester les effets d'une seule pratique de diversification (i.e., mélanges ou associations de culture, plantes de couverture, rotations), sur un pathogène dans un environnement donné. **L'applicabilité de tels travaux peut être limitée par le manque de perspective comparative de l'efficacité de plusieurs pratiques, sur une diversité de pathogènes, et ce, pour différentes conditions environnementales.**

Question. Comment l'efficacité du biocontrôle de plusieurs pratiques de diversification varie-t-elle en fonction des pathogènes dont la biologie varie ? Les pratiques les plus efficaces pour le biocontrôle d'un pathogène donné changent-elles en fonction des conditions climatiques ?

Approche. Une approche expérimentale est difficilement envisageable pour tester les effets croisés de multiples pratiques x pathogènes x conditions environnementales. Nous avons donc choisi la modélisation mathématique, basée sur un modèle épidémiologique de type SEIR (*Susceptible-Exposed-Infectious-Removed* [Gilligan, 2008]). Dynamique, ce modèle est construit à l'échelle de la parcelle, mais intégré dans une matrice paysagère pour simuler des épidémies de deux pathogènes fongiques ; la rouille (*Puccinia recondita* f. sp. *tritici*) et la septoriose (*Zymoseptoria tritici*) auquel le blé est sensible (Fig. 9a,b). Les deux pathogènes considérés varient dans leurs traits (i.e., capacité de dispersion, durée de la période de latence, capacité de survie à l'interculture), et leurs réponses aux conditions climatiques (Garin et al., 2014 ; Robert et al., 2005). Les pratiques simulées sont (Fig. 9c) :

- La mosaïque paysagère. Dans cette mosaïque coexistent des champs en monoculture de blé (plante sensible aux pathogènes) et de plantes résistantes, qui sont soit du pois (totalement résistant) soit une autre variété de blé (partiellement résistante).
- Les rotations asynchrones sont une version dynamique, dans le temps, de la mosaïque paysagère dans laquelle les deux types de champs coexistent. Dans les rotations synchrones, tous les champs sont soit « sensibles » soit « résistants ».
- Les associations intra-parcellaires : tous les champs comportent à la fois des plantes sensibles et résistantes dont nous faisons varier la proportion.

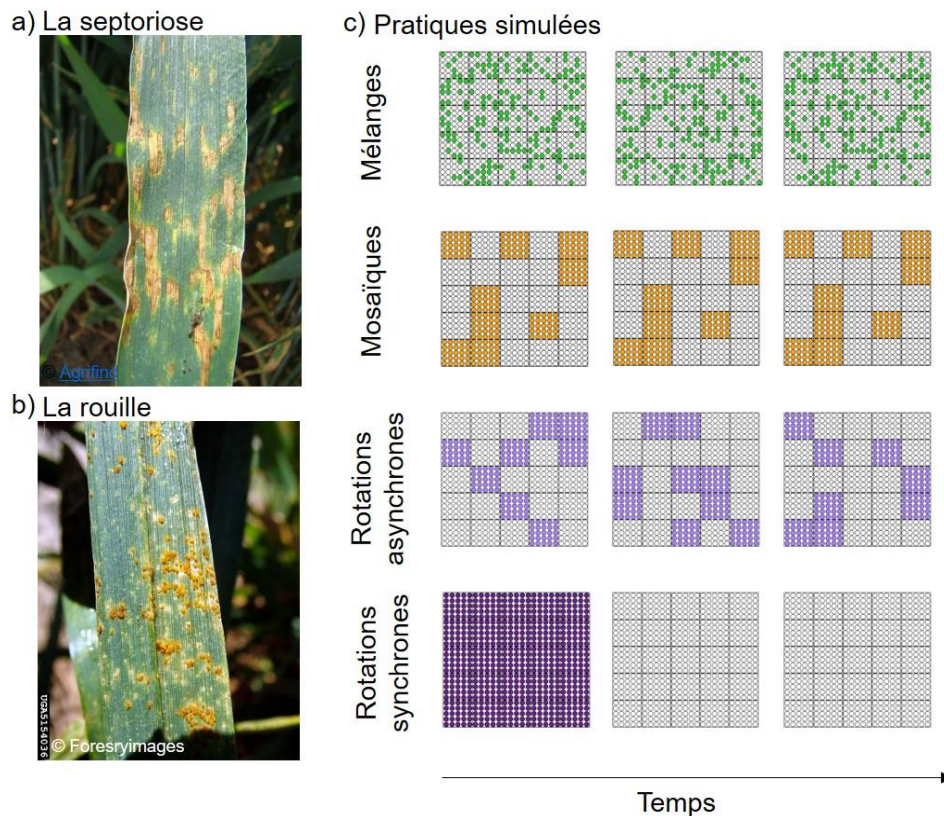


Fig. 9 Symptômes créés par deux maladies fongiques du blé, a) septoriose (*Zymoseptoria tritici*) et b) rouille (*Puccinia recondita* f. sp. *tritici*). c) Chaque carré représente un paysage dans lequel nous simulons des mélanges, des mosaïques et deux types de rotation. Les pixels colorés représentent le blé sensible, présent à 33% de l'ensemble du paysage.

Les épisodes épidémiques sont simulés pour des patrons de températures et d'humidité connus, sur la base de données empiriques, pour être favorables, moyennes et défavorables à chacun des pathogènes. Par exemple, les conditions favorables à une épidémie de septoriose sont un hiver pluvieux et des précipitations régulières au printemps. Une année caractérisée par peu de précipitations est au contraire défavorable à ce pathogène. Enfin, pour chaque type de pratique agricole, nous faisons varier la proportion de blé sensible et de la plante résistante à l'échelle paysagère. Le niveau épidémique est estimé pour chaque simulation par la surface totale de la plante qui est affectée par le champignon dans une parcelle et une saison donnée. Plus la valeur de cette surface est faible, meilleure est la biorégulation de la pratique de diversification considérée.

Résultats. Nos simulations révèlent que toutes les pratiques de diversification considérées limitent l'impact des épidémies de rouille et de septoriose sur le blé. Comparativement, la diversification intra-parcellaire (association blé-pois ou mélange variétal de blé) confère une meilleure protection, quel que soient le pathogène et les conditions climatiques simulées, devant les rotations puis les mosaïques. Passer de 100% (monoculture) à 60% de blé sensible dans un champ réduit l'épidémie de rouille de 85% et de septoriose de 98% dans des conditions climatiques moyennes. Nous montrons que lorsque les conditions climatiques deviennent favorables aux pathogènes, la proportion de plantes résistantes dans la parcelle doit augmenter. Nous n'avons pas trouvé de différences notables dans nos résultats selon qu'on utilise du blé ou du pois comme variété résistante. Cependant, nos résultats suggèrent qu'il faut porter une attention particulière aux traits de résistance des plantes associées pour maximiser un effet de dilution permettant de limiter la transmission des pathogènes.

Conclusions partielles. Il s'agit à notre connaissance de la première étude qui compare plus de deux stratégies de diversification agricole. Nos résultats indiquent qu'introduire plus de diversité des champs aux paysages devrait devenir de plus en plus important au regard des conditions climatiques qui s'annoncent plus favorables aux épidémies.

2.3 Mécanique des liens diversité-stabilité en agriculture

Projets : ASSET (ANR, PI : D. Renard)
Etudiante : L. Mahaut (post-doctorante)
Publications : Mahaut et al., 2021 (#16)
Collaborations : C. Violle (CNRS, France)

Plusieurs décennies de recherche en écologie suggèrent que la stabilité de la productivité d'un écosystème dans le temps résulte de deux mécanismes (Loreau and Hector 2001) : (1) la fonction (ici la productivité) remplie par chaque espèce individuelle est stable, (2) les variations dans la productivité des espèces sont asynchrones, permettant aux pertes et aux gains de productivité individuelle de se compenser à l'échelle de la communauté (Loreau & Mazancourt, 2008). Cet « effet d'assurance » est basé sur la complémentarité, c'est-à-dire les différences fonctionnelles entre phénotypes (ou génotypes) dans les réponses aux variations environnementales : climat, maladies et/ou ravageurs (Yachi & Loreau, 1999). La théorie et les expériences menées dans des écosystèmes naturels soutiennent qu'augmenter la biodiversité (des espèces végétales [Hector et al., 2010], de poissons [Braun et al., 2016 ; Sethi et al., 2014; [Lamy et al. 2019](#)], et de plancton [Downing et al., 2008]) soutient des dynamiques asynchrones expliquant les liens positifs entre diversité et stabilité (Loreau et al., 2021). Dans les systèmes agricoles, l'utilisation de fertilisants ou de l'irrigation est un moyen commun de compenser ou d'amortir les effets des perturbations environnementales et donc de stabiliser les rendements. **Les mécanismes qui sous-tendent la stabilité des rendements agricoles et les liens diversité des PC-stabilité dans les agroécosystèmes sont cependant peu testés.**

Questions. Quel est le rôle respectif de la stabilité individuelle des PC et de l'effet d'assurance sur la stabilité temporelle des rendements agricoles ? Par quels mécanismes la diversité des espèces de PC, les intrants agricoles et les variabilités du climat, affectent-ils la stabilité des rendements agricoles à l'échelle nationale ?

Approche. Dans le cadre de son post-doctorat, L. Mahaut a abordé ces questions en utilisant des modèles d'équations structurelles basés sur les données à l'échelle nationale décrites dans le tableau 5 et utilisées dans les sous-sections précédentes. Nous sommes conscients que travailler à cette échelle ne permet pas de prendre en compte les effets des interactions biotiques directes entre plantes qui peuvent être impliquées dans les dynamiques asynchrones décrites dans les écosystèmes naturels. Cependant, en accord avec la théorie, l'effet d'assurance de la diversité n'implique pas obligatoirement d'interactions interspécifiques directes et peut expliquer les liens diversité-stabilité à de larges échelles spatiales (Gonzalez et al., 2020).

Résultats. Les mécanismes impliquant des dynamiques individuelles et groupées sont tous les deux impliqués dans la stabilisation des rendements agricoles à l'échelle nationale ([Mahaut et al. 2021](#), Fig. 10a). Les deux mécanismes empruntent cependant des voies différentes : l'effet d'assurance repose sur la diversité du panier d'espèces de PC (Fig. 10b) et l'irrigation augmente la stabilité du rendement individuel des espèces dominantes (Fig. 10c), e.g., qui représentent une plus grande proportion de surface cultivée au niveau national. Quel que soit

le mécanisme impliqué, les fluctuations des rendements de ces cultures dominantes jouent un rôle majeur de la stabilité des rendements nationaux. Ce résultat implique que les espèces représentant une faible part de la surface cultivée ne peuvent pas compenser les pertes de rendements des espèces les plus abondantes, et donc représenter une assurance contre les chocs.

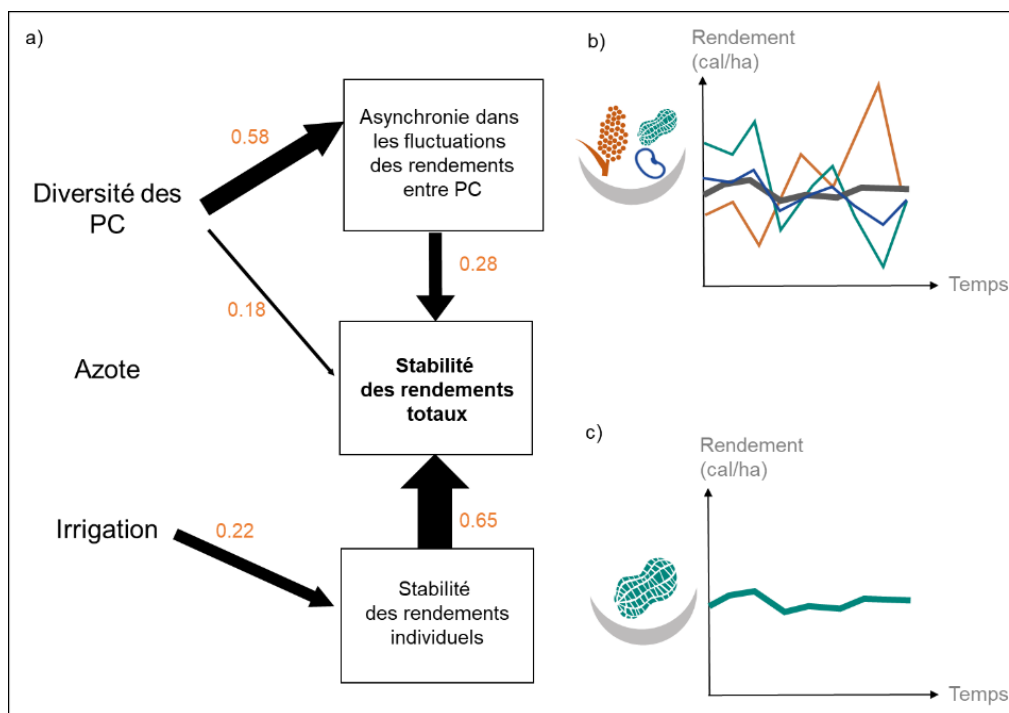


Fig. 10 a) Résultats simplifiés du modèle d'équation structurelle. La taille des flèches est proportionnelle à la force du lien entre les variables. Les chiffres en orange indiquent les coefficients du modèle. b) Schéma de l'effet de compensation des fluctuations des rendements, dans le temps, entre espèces différentes. c) Schéma montrant le rendement stable dans le temps d'une seule espèce.

Nous montrons un double effet des variations interannuelles du climat. Non seulement elles déstabilisent le rendement individuel des espèces dominantes, mais synchronise aussi les fluctuations des rendements de ces cultures entre elles, un effet que seul peut contrecarrer l'effet stabilisateur rendu par la diversité des espèces de PC.

Conclusions. Garantir la stabilité de la production alimentaire est un défi qui nécessitera probablement de multiples solutions. Nos résultats suggèrent que plusieurs mécanismes, qui agissent de manière complémentaire, peuvent être mobilisés pour répondre à ces défis. Nos résultats mettent en garde contre l'adoption de solutions visant à stabiliser uniquement et de manière individuelle les cultures dominantes. Les exigences de durabilité en matière d'exploitations des ressources (en eau notamment), combinées aux changements climatiques soulignent que mobiliser l'effet d'assurance de la diversité pourrait devenir de plus en plus important.

Section 2 : conclusions et implications

Promouvoir l'agrobiodiversité, des exploitations aux pays, des variétés et des espèces, peut contribuer à une plus grande résistance et résilience face aux aléas et extrêmes climatiques ainsi qu'aux maladies, facteurs représentant des menaces majeures pour l'approvisionnement alimentaire (McLennan, 2021). Nous contribuons en outre à identifier comment diversifier pour produire plus tout en réduisant ces risques. Nous attirons l'attention sur le fait que la diversification agricole mérite encore plus d'attention comme alternative ou complément aux solutions uniquement technologiques pour l'adaptation.

La portée de ces travaux est particulièrement importante dans les pays en développement les plus pauvres, 'hot spots' des changements climatiques (De Souza et al., 2015), susceptibles de souffrir de manière disproportionnée de leurs (Mertz et al., 2009) et qui pour lesquels les recherches sur les avantages de la biodiversification de l'agriculture restent sous-représentées (Beillouin et al, 2019).

Encadré 2 : Les liens biodiversité-fonctionnement des écosystèmes (BFE) entre échelles spatiales

Les recherches sur les liens BFE, dans les écosystèmes naturels et cultivés, présentent une limite commune : les échelles spatiales et temporelles considérées sont restreintes (Delsol et al., 2018). L'échelle de la parcelle qui est privilégiée couvre une surface ~1 à 100 m² et la répétition temporelle des mesures excède rarement une décennie (Gonzalez et al., 2020). Les recherches agronomiques à la parcelle ont permis d'avancer de nombreuses connaissances sur les interactions et rétroactions plantes-sol-plantes dans des cultures en mélanges ou en rotation, les mécanismes sous-jacents (Montazeaud et al., 2018) et leurs impacts sur le fonctionnement des agroécosystèmes (cycles des nutriments, productivité, stabilité), dans différentes conditions de gestion (labour, fertilisation).

Cette échelle limite cependant la prise en compte de la diversité des espèces, variétés, et groupes fonctionnels qui ne sont pas cultivés dans une seule parcelle, ou encore de l'hétérogénéité des conditions environnementales gérées par les agriculteurs-rices au sein d'une exploitation. Pourtant, ces diversités (biologiques et édaphiques) au sein et entre exploitations dans un territoire, entre territoires et jusqu'au pays peuvent jouer un rôle important (Loreau et al., 2003) dans la gestion des risques climatiques qui eux-mêmes se jouent à différentes échelles (i.e., locales pour les fortes pluies, la grêle ; régionales pour les vagues de chaleur et les sécheresses, Lange et al., 2020).

Comment les liens BFE et les mécanismes sous-jacents dépendent-ils des échelles de temps et d'espace ? Répondre à cette question est un front de recherche dans l'étude des écosystèmes naturels et cultivés (Delsol et al., 2018 ; Wang et al., 2017). Sur la base des travaux menés dans les écosystèmes naturels, je fais les hypothèses suivantes sur les liens agrobiodiversité-stabilité des agroécosystèmes :

H1 : les effets de l'agrobiodiversité sur le fonctionnement des agroécosystèmes se renforcent avec le temps. Plusieurs études dans les écosystèmes naturels suggèrent un tel effet (Cardinale et al., 2007 ; Reich et al., 2012 ; Thakur et al., 2021).

H2 : le rôle de l'agrobiodiversité dans la résilience et l'adaptation des systèmes agricoles pourrait donc s'accroître avec l'échelle spatiale. Swift et al., (2004) suggèrent qu'à mesure que l'échelle spatiale s'agrandit, les perturbations naturelles et anthropiques deviennent plus fréquentes et plus intenses, et plus difficiles et plus coûteuses à gérer.

H3 : à l'échelle de la parcelle et de l'exploitation, les pratiques de fertilisation ou d'irrigation ont autant, sinon plus d'impact que l'agrobiodiversité sur le rendement et sa stabilité. Aux échelles spatiales supérieures, l'hétérogénéité environnementale (i.e., sol, climat) augmente, offrant deux opportunités pour les effets d'assurance : (i) une assurance basée sur la diversité des réponses des PC aux aléas, et (ii) une assurance spatiale basée sur une diversité de conditions environnementales qui soumet un panier de PC donné à des contraintes différentes (Wang et al., 2017 ; Wang & Loreau, 2014).

L'une des difficultés à surmonter pour tester ces hypothèses tient aux données disponibles. Les travaux menés avec O. Cobelli (Ingénieure d'étude) me permettront de lever en partie de telles difficultés (voir Projet).

Section 3 : Les défis du temps : suivre les dynamiques de l'agrobiodiversité et mesurer la stabilité

Je présente dans cette section mes recherches visant à retracer les dynamiques passées de l'agrobiodiversité à l'échelle locale et de suivre les changements en cours. Cette démarche permet de mieux comprendre les liens entre la gestion de l'agrobiodiversité et les facteurs externes (i.e., le marché et les changements climatiques) et d'évaluer les conséquences de trajectoires de diversification ou d'érosion de la diversité des PC sur la stabilité des rendements agricoles. Pour répondre à ces objectifs, je combine des approches en écologie, agronomie et en ethnoécologie pour interroger les savoirs et observations des agriculteurs-rices et mettre en œuvre des observatoires des agroécosystèmes qui, je l'espère, pourront être maintenus sur le long terme.

3.1 Retracer les dynamiques de l'agrobiodiversité

Depuis le début du siècle dernier, sur fond de mondialisation, de changements des pratiques agricoles et de démographie, des inquiétudes ont été soulevées quant à une perte de diversité des PC (Baur, 1914 ; Harlan, 1936). Dans les années 1990, la FAO relaie ces inquiétudes qui n'ont cessé et utilise un narratif fort du type « 75% de la diversité génétique des plantes cultivées a été perdue ». En dépit du mystère qui entoure encore les fondements empiriques de ces chiffres (voir Encadré 1 dans Khoury et al., 2022), ce « narratif des 75% » c'est révélé un puissant outil de communication (y compris dans la sphère scientifique) pour sensibiliser aux besoins de conserver de cette part de la diversité qui nous nourrit. De son côté, la communauté scientifique met en garde sur la durabilité de systèmes agricoles appauvris aux niveaux des espèces, variétés, paysages et dépendants des intrants de synthèse (Matson et al., 1997 ; Swift et al., 2004). Cependant, **les trajectoires d'érosion de la diversité des PC ou de diversification, l'ampleur de ces changements et leurs moteurs restent insuffisamment compris. Cette compréhension est nécessaire pour appréhender les implications sociales, économiques et environnementales des trajectoires empruntées et ainsi éclairer les politiques agricoles pour l'adaptation.**

Ce n'est que récemment qu'une image synthétique et empiriquement ancrée des trajectoires et ampleur des changements de la diversité des PC se dégage. Khoury et al., (2022) montrent que ~ 80% des 288 articles analysés font état de pertes de la diversité génétique des PC touchant en particulier des variétés locales (ou *landraces*, remplacées par des variétés issues de la science) et de leurs parents sauvages. Au niveau des espèces, l'analyse de données historiques à l'échelle de 152 pays montre qu'entre 1961 et 2009, la diversité spécifique des PC a augmenté en moyenne dans chaque pays, mais que cette diversification c'est accompagnée d'une homogénéisation de la composition du panier d'espèces à l'échelle globale (Khoury et al., 2014). Aux États-Unis, Aguilar et al., (2015) révèlent un déclin de la diversité des espèces cultivées à l'échelle nationale entre 1978 et 2012 qui masque des trajectoires à la fois de diminution, mais aussi de diversification aux échelles régionales et administratives plus fines (e.g., les comtés). En dépit de ces avancées, **les trajectoires prises par la diversité des espèces de PC à l'échelle locale restent peu documentées.**

Les connaissances de la dynamique des écosystèmes sur des temps longs se sont rapidement développées grâce à l'utilisation innovante de divers types de données historiques (Tomscha et al. 2016). Mes travaux antérieurs en écologie historique se sont notamment appuyés sur des données statistiques issues des recensements ou d'enquêtes démographiques et agricoles. Alors que la qualité des données collectées par les pays industrialisés permet de reconstruire les dynamiques de l'agrobiodiversité et des écosystèmes sur plusieurs décennies (Renard et al. 2015), voir siècles (Renard et al. 2016, voir illustration ci-contre), les capacités institutionnelles des pays des Suds limitent la collecte de telles données. Le manque de données climatiques historiques à l'échelle locale restreint aussi la possibilité de relier les changements d'agrobiodiversité et les changements climatiques.



Affiche de 1944 pour le recensement agricole des États-Unis. Le 1^{er} recensement remonte à 1820. © [National Archives](#)

Les contributions des savoirs locaux

Les sous-sections 3.1.1 et 3.1.2 illustrent comment les savoirs locaux sont une source d'information complémentaire aux données quantitatives sectorielles pour améliorer notre compréhension des trajectoires de l'agrobiodiversité à l'échelle locale. Les savoirs locaux (*Local Ecological Knowledge* ou *Traditional Ecological Knowledge* [Berkes et al., 1994]) regroupent les connaissances, pratiques, croyances holistiques et valeurs (i.e. principes, préférences ou mesures [(Pascual et al., 2017)]) relatives aux relations interpersonnelles et aux relations entre les individus et leur environnement. Ces savoirs sont ancrés à l'échelle des territoires et se traduisent le plus souvent dans des paysages complexes comprenant divers espaces d'interactions entre les sociétés et leur milieu (espaces agricoles, forestiers, etc.). Dynamiques, les savoirs locaux évoluent continuellement à travers les interactions sociales, l'expérience et la transmission (Brondizio et al., 2016). Les savoirs locaux bénéficient désormais d'une reconnaissance par la Convention pour la Diversité Biologique et par la Plateforme Intergouvernementale sur la Biodiversité et les Services Ecosystémiques, IPBES (Díaz et al., 2015, 2018).

3.1.1 Les archives nous renseignent sur les dynamiques locales de la diversité viticole

Projets : ASSET (ANR, PI : D. Renard)
Etudiant : A. Doncieux (doctorant)
Publications : Doncieux et al., 2022 (#11) ; autres publications : Renard et al. 2016 (#26)
Collaborations : S. Caillon (CNRS, France)

Dans les systèmes viticoles, les réglementations relatives à l'encépagement et la pression commerciale restreignent l'agrobiodiversité viticole. Si les facteurs de diminution de la diversité variétale de la vigne sont bien compris à des échelles nationales et mondiales (Wolkovich et al., 2018), nous avons peu de connaissances sur les trajectoires passées ou futures pressenties de l'encépagement à l'échelle d'un vignoble.

Question : Comment la diversité variétale de la vigne et la composition en cépages ont-elles changé au sein du vignoble de Gaillac ? Quels sont les moteurs de tels changements ?

Approche. Suivant une approche développée au cours de mes travaux de post-doctorat à l'Université McGill (Canada), A. Doncieux a utilisé des données quantitatives provenant de recensements agricoles historiques (tableau complet des sources dans Doncieux et al. 2022) pour caractériser les changements de cépages à l'échelle des communes de Gaillac, entre 1960 et 2020. Des informations sur chaque cépage (couleur, usage, phénologie) ont été extraites de la base de données PI@ntgrape. En complément, une approche qualitative, basée sur l'analyse de documents d'archives (syndicats AOC & IGP) et d'entretiens semi-directifs (38 producteurs-rices), Antoine a décrypté les facteurs qui ont conduit aux dynamiques historiques de l'encépagement mesurées sur les soixante dernières années, et a collecté le ressenti des producteur-rices en matière d'encépagement pour les trente prochaines années.

Résultats. En soixante ans, la superficie du vignoble de Gaillac a été divisée par trois, le nombre de producteurs-rices par 22, et le nombre de cépages par 3,4. De nombreux cépages ont été abandonnés (n=174), dont 77.6% de cépages hybrides développés suite à l'épidémie de phylloxera qui a dévasté les vignobles français à la fin du 19^{ème} siècle. En dépit de cette perte de richesse variétale aux échelles du vignoble et des communes, la diversité reste élevée (62 cépages en 2020 dont 6 hybrides) et l'équitabilité dans la distribution des surfaces cultivées entre cépages a augmenté à toutes les échelles spatiales au cours du temps.

Cette érosion de la diversité variétale s'est accompagnée d'un changement de composition reflété dans la distribution des groupes phénologiques. Ces groupes sont définis en fonction des dates de maturation calculées en référence au cépage Chasselas, mature le 14 août, soit le 226^{ème} jour de l'année (en moyenne, sur les 50 dernières années). La proportion de cépages arrivant à maturation à mi-saison (entre le 238-247^{ème} jour de l'année) a augmenté (de 42% en 1960 à 59% en 2020) et celle des cépages tardifs ($\geq 248^{\text{ème}}$ jour) a diminué au cours du temps (de 46% à 30%). La proportion des cépages précoces ($\leq 237^{\text{ème}}$ jour) n'a pas changé (11%).

Les entretiens mettent en évidence que les dynamiques d'encépagement sont encouragées par la volonté d'expérimenter de nouveaux couples cépage-terroir, et freinées soit par la

réticence à adopter des cépages inconnus ou par les habitudes/connaissances accumulées à l'égard de certains cépages (Tableau 6).

Les documents d'archives illustrent l'influence des réglementations (*i.e.*, obligation de planter du Braucool à partir de 1990 pour bénéficier de l'AOC), ou des politiques agricoles autorisant l'utilisation de pesticides plus efficaces, faisant ainsi perdre les avantages aux plants hybrides (voir Tableau 6 pour une vision plus complète des déterminants).

Types de changement	Déterminants	Exemples	Directions
Marché économique	Consommation de vin	Consommation occasionnelle de vin de haut qualité vs. consommation quotidienne de vin de table	A, P
	Globalisation	Cépage réputés du grand public	A, P
	Se différencier des autres	Cépages particuliers vs standardisation du marché	A, P, M
Politiques	Régulations	Indications géographiques incitent à la spécialisation	A, P, M
Utilisation des terres	Urbanisation	Réduction des surfaces cultivées	P
	Remplacement de la vigne	Shift pour la céréaliculture	P
Technologies agricoles	Mécanisation	Pentes raides rend difficile le passage des tracteurs	P
	Oenologie	Augmentation de la qualité des vins par les analyses œnologiques	A, M
	Institutions & connaissances	Expérimentations de clones, associations cépage et le porte-greffe etc	A, P, M
	Usage des pesticides	Sensibilité des cépages aux maladies n'est pas un obstacle à la sélection	A, M
Démographie	Déclin du nombre de producteurs-rices	Pas de successeur	P
	Migration	L'immigration des pied-noirs a encouragé la production de vin rouge et ouvert de nouveaux marchés	A
Environnement	Terroir	Introduction de nouveaux cépages adaptés au sol et au climat	A
	Maladies	Disparition des cépages sensibles à la flavescence dorée	A, P
	Diversification	Effet d'assurance	A, M
	Aléas climatiques	Gels tardifs répétés	A, P

Tableau 6 Déterminants des changements de cépages entre 1960-2020 cités par les agriculteurs-rices (Adaptée de Doncieux et al., 2022)

Pour les producteurs-rices, la diversité variétale est une assurance permettant de répartir les risques face aux variations du climat et la volatilité du marché. Cet effet est expliqué par un-e viticulteur-rice :

“Déjà au niveau de la récolte, c'est comme de ne pas mettre tous ses œufs dans le même panier. On est dans une culture, mais à l'intérieur de cette culture on a quand même une diversité, de précocité, de réaction aux maladies, de réactions différentes au climat. Car ici, le climat est à 70% océanique et 30% méditerranéens et il y a aussi des années avec plus ou moins de vent d'Autant. Les années humide, se sont les cépages précoces qui marchent le mieux, car les cépages tardifs ne mûrissent pas et peuvent pourrir. Les années chaudes, les cépages tardifs arrivent à maturité. Certaines années, ceux sont les cépages précoces qui marchent. Ça permet de jouer sur les maladies, car les cépages n'ont pas la même sensibilité aux maladies. Quand un cépage échoue à la fleur, un autre peut compenser. S'il fait mauvais à la fleur quand le Braucool fleurit, on a plus de Braucool, il est sensible à la coulure. 14/04/2021 Viticulteur-rice 7

Malgré une vision pessimiste de l'avenir du vignoble, notamment à cause des départs en retraites qui conduiront, sans doute, à l'arrachage de vignes ces prochaines années, le choix des cépages est amené à encore changer pour s'adapter aux changements climatiques et pour réduire l'usage des pesticides.

Conclusions. En dépit d'une perte historique importante de diversité variétale de la vigne à Gaillac, ce vignoble est l'un des vignobles les plus diversifiés de France. Plus que les cépages individuels, les producteurs-rices de raisins et de vin valorisent la diversité *per se* qui pourrait se maintenir, mais changer en composition avec l'ajout de nouveaux cépages au catalogue national.

3.1.2 Vers une vision globale des dynamiques locales de l'agrobiodiversité

Projets :	ASSET (ANR, PI : D. Renard), LICCI (ERC)
Etudiants :	M. Demongeot (doctorante)
Publications :	Labeyrie et al. 2021 (# 17)
Collaborations :	V. Labeyrie (CIRAD, France), V. Reyes-Garcia (ICREA, Espagne)

La diversification ou le remplacement d'espèces et/ou des variétés de PC comptent parmi le panel de stratégies d'adaptation locale les plus citées pour faire face aux variations climatiques (Kassie et al., 2013 ; Lalou et al., 2019). Il n'existe cependant pas de vision globale des liens entre les événements climatiques perçus par les communautés locales et les décisions de gestion de l'agrobiodiversité qui répondent à de multiples facteurs.

Question. De l'érosion ou de la diversification, y a-t-il une trajectoire que les agriculteurs-rices à travers le monde ont privilégié en réponse aux changements du climat qu'ils perçoivent ? Quels sont les facteurs climatiques ayant motivé de tels choix ? Quelles sont les implications de l'adoption/abandon des PC en termes de nutrition ?

Approche. Nous avons mené une revue de la littérature rapportant les perspectives des agriculteurs-rices sur les changements des PC liés au climat. Dans les 95 articles retenus, nous avons collecté les informations suivantes : les espèces et les variétés pour lesquelles une « augmentation d'abondance ou d'adoption » (ci-après : adoption) et/ou une « réduction d'abondance ou abandon » (ci-après : abandon) a été rapportée, et les caractéristiques climatiques perçues comme étant les moteurs de ces événements. Nous avons harmonisé les facteurs climatiques cités par les agriculteurs-rices suivant la classification de Reyes-García et al., (2020). L'analyse couplée de données nutritionnelles (*USDA Food and Nutrient database for raw crops*) nous a permis de comparer les contenus en calories, macro- et micronutriments des plantes adoptées/abandonnées.

Résultats. La synthèse des travaux menés dans 34 pays révèle que les agriculteurs-rices rapportent plus fréquemment des cas d'adoptions d'espèces et de variétés que d'abandon (Fig. 11a). Les changements dans le régime des pluies et le facteur climatique le plus fréquemment cité comme moteur de changement dans l'agrobiodiversité (86% des observations).

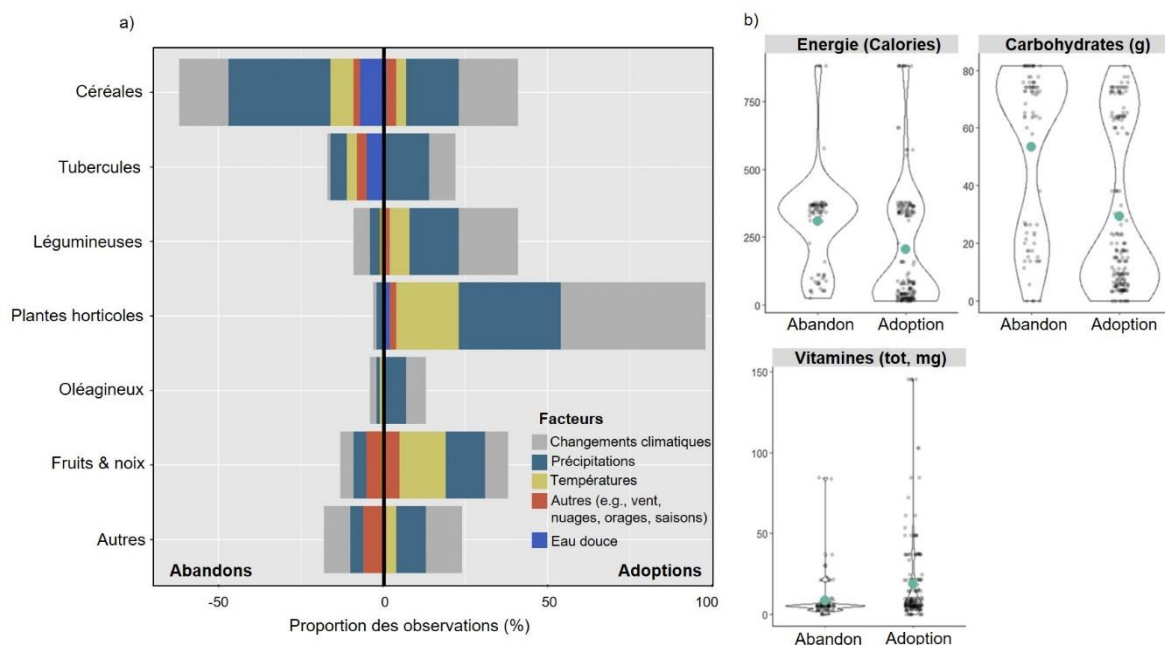


Fig. 11 Synthèse des dynamiques locales de l'agrobiodiversité. a) Proportions des évènements d'adoptions (valeurs positives) et d'abandons (valeurs négatives) d'espèces présentées par catégories et déterminants climatiques. b) Contenus nutritionnels des espèces abandonnées et adoptées par les communautés locales. Les points verts représentent les valeurs moyennes par trajectoire de changement. Adapté de [Labeyrie et al., \(2021\)](#).

Notre étude soulève plusieurs inquiétudes.

- Tout d'abord, les adoptions concernent majoritairement des variétés modernes issues de la science alors que les abandons concernent les variétés locales.
- Ensuite, l'adoption de plantes particulièrement exigeantes en eau (e.g., maïs, pastèque, tomate) est préoccupante dans des régions où les modèles climatiques prévoient une diminution des précipitations (Fig. 11a).
- Enfin, les plantes horticoles adoptées sont plus pauvres en calories et carbohydrates que les céréales abandonnées (Fig. 11b), questionnant les conséquences en termes de sécurité et souveraineté alimentaire des petites agricultures qui assurent une part importante de la subsistance des sociétés dans les pays des Suds. Plus riches en vitamines, les fruits et légumes à forte valeur économique sont destinés majoritairement au marché et ne bénéficient pas ou peu à la diversité nutritionnelle de ceux qui les cultivent.

La généralisation de nos résultats est limitée par la concentration géographique des études dans un petit nombre de régions d'Afrique et d'Asie et la surreprésentation des systèmes d'agriculture familiale. Les futures études devront veiller à une meilleure représentativité des conditions climatiques et des systèmes agricoles existants à l'échelle mondiale.

Conclusions. Les agriculteurs·rices du monde entier réagissent aux effets combinés des changements climatiques et économiques notamment en ajustant leurs paniers de PC. Ces ajustements impliquent à la fois des adoptions et des abandons d'espèces et de variétés.

Cependant, nous identifions une tendance générale vers l'adoption de plantes horticoles demandeuses en eau et à faible valeur énergétique. De telles trajectoires pourraient menacer la résilience des agroécosystèmes et des moyens de subsistance locaux. Des recherches interdisciplinaires et coordonnées sont nécessaires pour combler les lacunes méthodologiques et géographiques qui limitent l'analyse approfondie des réponses des agriculteurs-rices aux changements climatiques. Une partie de ces lacunes pourra être comblée par le travail d'un postdoctorant (bourse IRD) que je co-encadre avec V. Labeyrie (CIRAD). Les informations relatives aux changements d'agrobiodiversité liés au climat pourraient contribuer à prévenir les potentiels impacts de changements maladaptatifs et soutenir des réorientations vers des PC plus adaptées aux contraintes et besoins locaux.

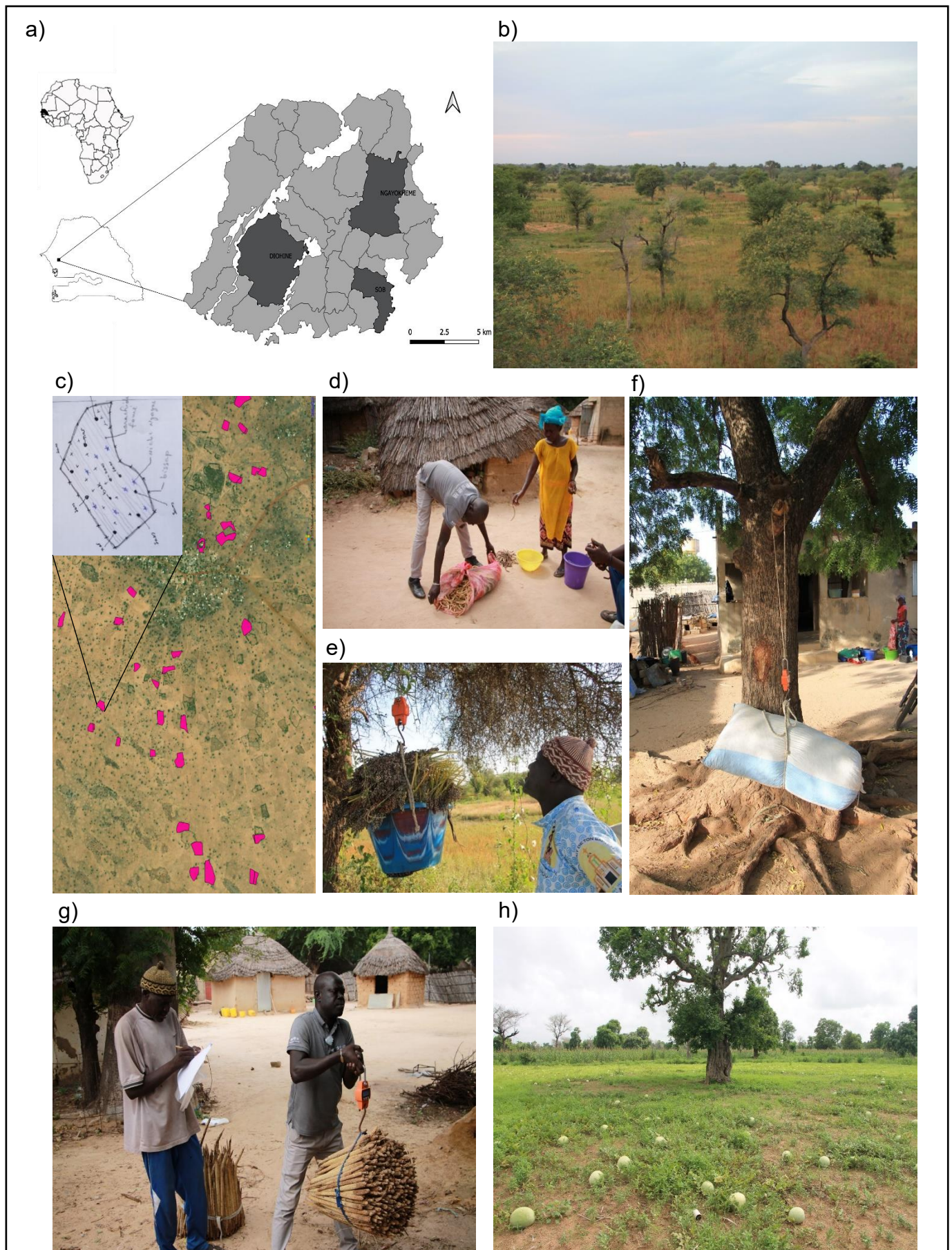


Fig. 12 a) Carte du Sénégal montrant la localisation des trois villages d'étude (en gris foncé). b) Photographie montrant l'agroécosystème en fin de saison de culture (fin novembre). c) Parcelle (en rose) d'un village sur fond de photographie satellite. Un croquis de chaque parcelle est réalisé au cours des enquêtes. Mesures de rendement d) du niébé, récolté frais, e) du sorgho, f) de l'arachide, g) du mil. h) Champ de pastèque. © Ewen Menguy pour l'IRD.

3.2 Tester les liens diversité des PC – stabilité des rendements à l'échelle des exploitations

Projets : ASSET (ANR, PI : D. Renard)
Etudiants·es : A. Cissé (doctorante) ; A. Doncieux (doctorant)
Publications : Cissé et al. (2023) (#10)
Collaborations : A. Barnaud (IRD, France) ; C. Berthouly (IRD, France); S. Sall (Université Gaston Berger, Sénégal)

Lorsqu'elles sont collectées, les données de statistiques agricoles sont soumises au secret statistique, obligeant à agréger les données des exploitations individuelles à une échelle spatiale administrative plus large (i.e., municipalité, comté). Pourtant, l'échelle de l'exploitation est importante : elle est le siège des prises de décision sur la diversité des PC et leur gestion et là où les effets de cette gestion sur les fonctions des agroécosystèmes sont ressentis directement. Le manque d'information à cette échelle m'a motivé à mettre en place deux observatoires des agroécosystèmes en France et au Sénégal que je décris ci-dessous.

3.2.1 Observatoire dans le bassin arachidier du Sénégal

Nous avons initié en 2019 le suivi d'un réseau de 157 parcelles cultivées par 36 exploitations de trois villages situés dans le bassin arachidier au Sénégal (Fig. 12a,b). Le suivi se poursuivra pour la 6^{ème} année en 2024, mais sa pérennité dépendra des financements. En effet trois enquêteurs locaux sont contractualisés chaque année pendant quatre mois pour effectuer les mesures et enquêtes. Les suivis annuels consistent à mesurer les rendements des 13 variétés des six espèces principales (mil, sorgho, niébé, arachide, bissap et pastèque) à l'échelle de l'exploitation (Fig. 12d-h). Chaque parcelle est aussi visitée annuellement pour identifier et cartographier chaque espèce/variété cultivée et pour collecter des informations sur les pratiques de fertilisation (Fig. 12c). Des données sur l'histoire de la parcelle, le type de sol et les conditions socio-économiques des exploitations ont été collectées la première année. Un site expérimental mis en place sur le même site ([Faidherbia-Flux](#)) enregistre des données météorologiques journalières auxquelles nous avons accès.

Les données acquises sont utilisées pour :

Analyser les relations diversité-stabilité. L'échantillonnage a été effectué pour assurer un contraste entre exploitations peu diversifiées (e.g., 1-2 espèces) et diversifiées (e.g., 4-6 espèces). Les données de rendement annuel et les données météorologiques nous permettront d'identifier les espèces, les variétés et les combinaisons : (i) qui sont localement les plus productives et ayant les rendements les plus stables ; (ii) qui sont les moins/les plus affectées par les moyennes et variations des précipitations et températures intra- et intersaisons. Enfin, nous souhaitons identifier quelles propriétés du sol et quelles pratiques de fertilisation améliorent les performances des combinaisons d'espèces/variétés identifiées face aux différentes variables climatiques. Ces analyses seront réalisées par E. Menguy (financement ERC, PI : V. Labeyrie) dans le cadre de son doctorat, que je co-encadre avec S. Carrière (IRD) et V. Labeyrie (CIRAD).

Mieux décrire et comprendre les pratiques locales d'associations. La cartographie annuelle des espèces et variétés semées dans chaque parcelle a déjà mené à des résultats intéressants (en cours de valorisation). Les analyses ont été conduites par A. Cissé, doctorante sénégalaise que j'ai co-encadré. En dépit d'un regain d'intérêt pour les pratiques d'associations (C. Li et al., 2020) et de mélanges variétaux intra-parcellaires (Barot et al., 2017 ; Kopp et al., 2023), relativement peu d'attention est portée aux pratiques paysannes, leur diversité et aux connaissances associées. En effet, les expérimentations conduites en agronomie se sont principalement concentrées sur des modèles d'associations spécifiques (i.e., céréales-légumineuses) dans des conditions contrôlées souvent éloignées des conditions rencontrées en champs paysans.



Fig. 17 Les pratiques d'associations et mélanges au Sénégal. a) Champ où des lignes semées avec du mil alternent avec des lignes en mélange de plusieurs variétés d'arachides et de cornille (© Ewen Menguy pour l'IRD). b) Semis des variétés de mil pour les expérimentations en champs (© Julien Goldstein pour « Le Monde »). c) Mil perlé dans une parcelle expérimentale arrivant à maturité (© Aby Cissé pour l'IRD).

Question : Quelle est la diversité des formes d'associations d'espèces et de variétés dans les champs paysans ? Quels sont les avantages et les contraintes perçus par les agriculteurs-rices comme étant associés à ces pratiques ? Quels sont les avantages agronomiques de ces mélanges paysans comparés aux monocultures en condition réelle ?

Approche. Nous avons combiné des enquêtes ethnoécologiques auprès de 36 exploitations avec les données cartographiques des 157 champs suivis. Une expérimentation en champs paysans (impliquant un très faible niveau de fertilisation et en condition pluviale) et conduite avec les agriculteurs-rices eux-mêmes, nous a permis de tester les différences de rendement (grain et paille) et de biocontrôle (adventices et parasites) d'un mélange de deux variétés de mil perlé à floraison précoce et tardive couramment utilisé dans la région, par rapport aux monocultures de ces deux variétés (Fig. 18c).

Résultats. Nous avons décrit 12 modalités différentes d'associations d'espèces cultivées au champ et 39 modalités d'associations de 1 à 3 espèces, où une espèce peut être représentée par 1 à 3 variétés (Fig. 18a). Les monocultures (43% des champs) sont pratiquées presque uniquement pour le mil et la pastèque. Au contraire, l'arachide, le niébé et l'hibiscus sont toujours semés en association. La plupart des modalités d'associations sont spécifiques à chaque village (Fig. 18a). L'obtention de multiples produits au sein d'une seule parcelle est l'avantage le plus souvent cité par les agriculteurs-rices pour expliquer leurs pratiques d'association (63% des réponses), suivi par la gestion des risques (24%, contre le climat, les

et poids des grappes) par pied de vigne ($n_{\text{tot}}=512$, Fig. 19d). Nous avons estimé visuellement le pourcentage de dégradation de chaque grappe de raisin pour estimer leur état sanitaire. Des mesures visant à caractériser les sols (structure, propriétés physico-chimiques et diversité microbienne et fongique) ainsi que des analyses des composés chimiques des baies ont été réalisées par des collègues de l'Université de Toulouse (P. Oliva, M. Roy). Ces collègues reprendront la gestion du réseau ainsi mise en place dès 2024.

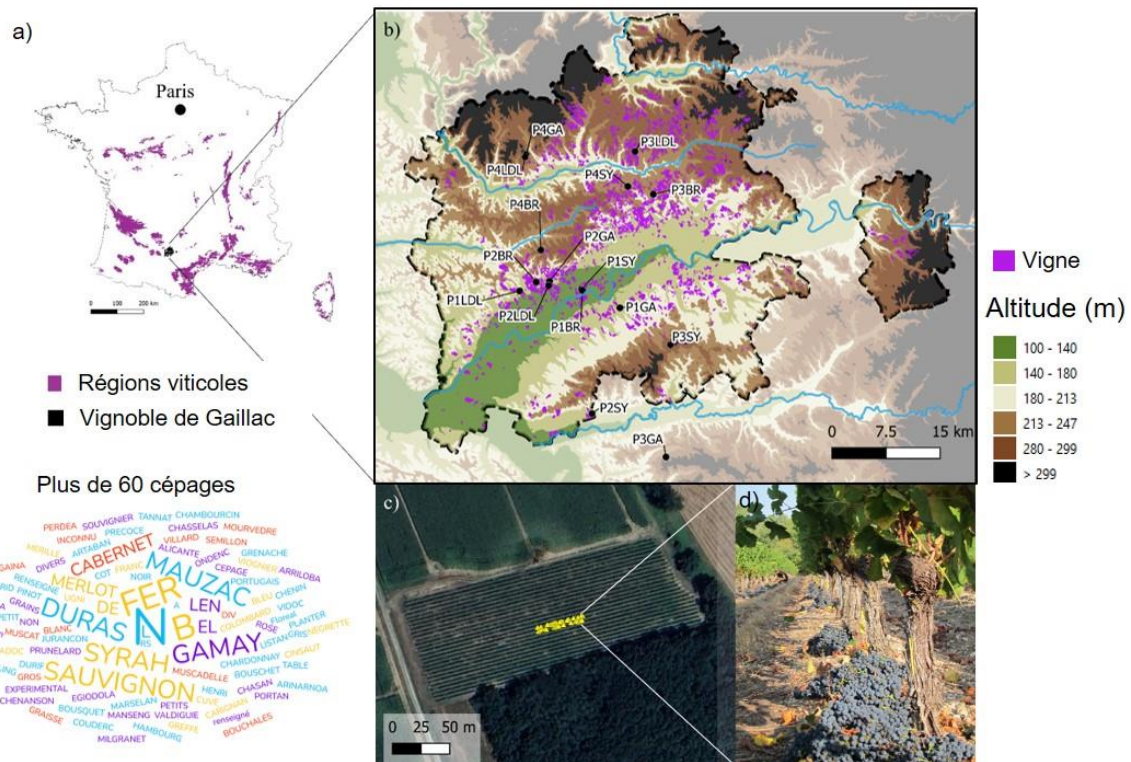


Fig. 19 a) Distribution française des régions viticoles françaises indiquant le vignoble étudié et nuage de mot illustrant la diversité des cépages de vigne cultivés dans cette région. b) Cartographie des 16 parcelles (codes P2LDL, P3GA etc) du réseau de l'observatoire. c) Représentation schématique de la distribution des pieds de vigne suivis au sein d'une parcelle. d) Récolte du raisin (© Antoine Doncieux pour ASSET)

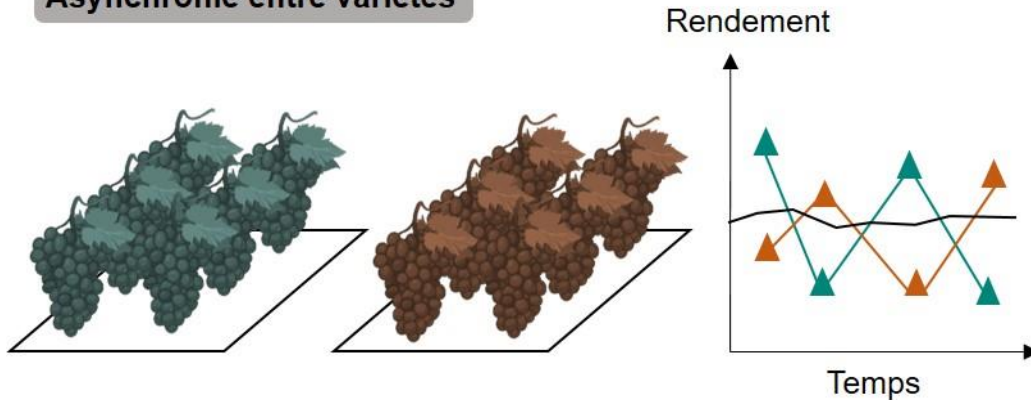
Les données acquises sont utilisées pour :

Comprendre comment maximiser l'effet d'assurance des diversités. L'échantillonnage des parcelles a été effectué pour assurer un contraste de conditions topographiques (huit parcelles d'altitude < 175 m et huit parcelles > 225 m, Fig. 19b) pour quatre cépages variant dans leur phénologie. Du cépage le plus précoce au plus tardif (~2 semaines de différence dans les dates de vendange) : le Gamay, le Len de l'El, la Syrah et le Fer. Sur la base des données de rendement annuelles, nous simulons des encépagements fictifs reflétant toutes les combinaisons possibles des 16 parcelles et 4 cépages suivis (approches similaires récemment utilisées (Hautier et al., 2018 ; Pasari et al., 2013). L'objectif est d'identifier les combinaisons de cépages et de conditions topographiques qui stabilisent les rendements totaux en maximisant :

L'asynchronie entre cépages (Schéma ci-dessous) : un encépagement constitué de cépages dont les périodes de débourrement, floraison et maturation varient pourrait fournir un rendement plus stable qu'un encépagement monovariétal, ou pour lequel les cépages ont une

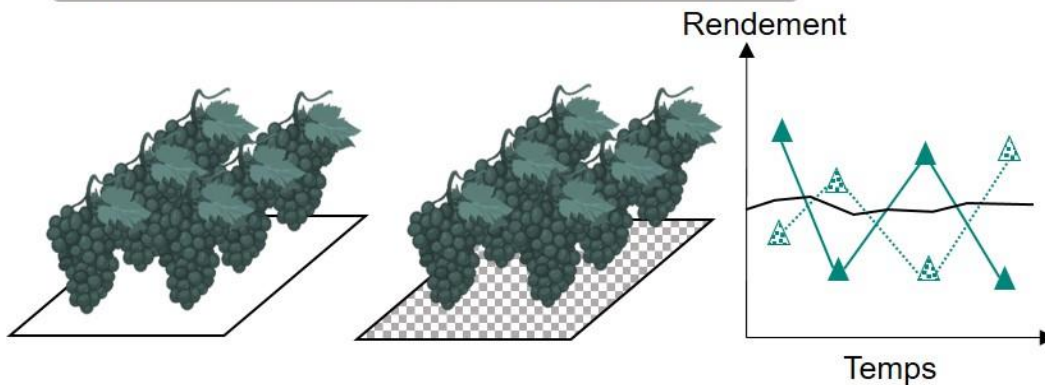
phénologie identique. Le principe sous-jacent est celui de l'étalement des risques notamment climatiques, dans le temps, les cépages n'étant pas affectés par un évènement de gel, par exemple, tous aux mêmes moments de leur cycle phénologique.

Asynchronie entre variétés



L'asynchronie spatiale (Schéma ci-dessous) : la position des parcelles dans le paysage module, par exemple, la quantité de précipitations reçue, le risque gélif et de grêle. Diversifier les conditions environnementales (ici la topographie) dans lesquelles la vigne est cultivée est donc susceptible d'accroître la stabilité temporelle des rendements (tous cépages confondus) en étalant, dans l'espace, les risques climatiques sur les différentes parcelles (Loreau et al., 2003).

Asynchronie entre conditions topographiques



Résultats. L'analyse est en cours dans le cadre du postdoctorat d'A Doncieux que j'encadre.

Section 4 : Les multiples valeurs associées à l'agrobiodiversité

“A seed is a choice that cannot be taken back. As seeds grow, farmers care for them, continuing to make choices that they hope will lead to yields, profits and a good life”
(Flachs 2019)

Le choix dont parle (Flachs, (2019) résulte des valeurs portées par les agriculteurs·rices à leurs plantes, leurs préférences, besoins et contraintes (i.e., terres disponibles, liquidités et disponibilité en main-d'œuvre), et de leurs interactions avec des facteurs externes (i.e., prix du marché, politiques publiques, climat). Cette section du document met en avant cette notion de 'valeurs', définie de manière générale comme ce qui est important pour les personnes (Rawluk et al., 2017). Elle est le fruit d'un rapprochement entre l'écologie et l'ethnoécologie que je mène en collaboration avec des collègues chercheuses françaises et catalanes depuis 2018.

Introduction

Maintenir ou améliorer la qualité de vie sur terre dans un contexte de dégradation environnementale, social et politique général interroge les relations qu'entretiennent les sociétés humaines avec les non-humains ou autres composantes de la nature. Le concept de « contributions de la nature aux sociétés » (NCP) reconnaît que la nature est perçue et valorisée d'une diversité de manières par les sociétés humaines suivant les contextes culturels et institutionnels (Díaz et al., 2015 ; Pascual et al., 2017). Il souligne que les contributions socio-culturelles, spirituelles et religieuses de la nature peuvent être aussi importantes que l'approvisionnement en nourriture ou que la régulation du climat. La Plateforme Intergouvernementale sur la Biodiversité et les Services Écosystémiques (IPBES) a mené un travail colossal de synthèse et de promotion des connaissances sur les NCP auprès des décideurs politiques. **Cependant, les efforts ont été principalement orientés vers l'évaluation des contributions de la biodiversité sauvage et des écosystèmes naturels. En comparaison, les NCP impliquant l'agrobiodiversité sont peu connus.**

Le terme de 'valeur', promulgué par le rapport de l'IPBES sur les multiples valeurs de la nature (Pascual et al., 2022), est polysémique et son usage dans le langage courant est souvent flou (Rawluk et al., 2019). Ce rapport définit les valeurs comme les divers « objectifs de vie, croyances et principes généraux », e.g., elles regroupent ce à quoi tiennent les groupes humains dans leurs interactions aux autres composantes de la nature. Elles sont ainsi classées suivant l'utilité de la nature pour les sociétés humaines (valeurs instrumentales), les parties de la nature ayant une valeur propre (valeurs intrinsèques) et d'autres parties de la nature appréciées en fonction des relations que les gens entretiennent avec elles (valeurs relationnelles) (Chan et al., 2018 ; Himes & Muraca, 2018).

Les connaissances actuelles sur les valeurs portées par les agriculteurs·rices aux plantes qu'ils cultivent proviennent d'une littérature fragmentée et disciplinaire illustrant indépendamment l'existence de valeurs environnementales (Perreault, 2005 ; Wood et al.,

2015), économiques (Krotoleon et al., 2008), sanitaires (Willett et al., 2019), culturelles (Perreault et al. 2005) et sociales (Leclerc & Coppens d'Eeckenbrugge, 2011).

Les travaux de deux doctorants que j'ai co-encadré ont permis de combler deux lacunes dans l'étude des valeurs. Tout d'abord, l'absence de synthèse globale sur les valeurs attribuées par les agriculteurs·rices aux plantes cultivées et leur diversité (section 4.1). Ensuite, le manque prononcé d'analyse de ces valeurs dans l'hémisphère nord, où les systèmes agricoles se déploient à plus grande échelle spatiale et reposent (tout ou en partie) sur l'utilisation d'intrants (section 4.2).

4.1 Les agriculteurs·rices accordent à leurs plantes des valeurs diverses et interconnectées

Projets : ASSET (ANR, PI : D. Renard)
Etudiants·es : M. Demongeot (doctorante) ; A. Doncieux (post-doctorant)
Publications : Demongeot et al., 2022 (#9) ; Demongeot et al., En préparation pour PNAS
Collaborations : Y. Aumerruddy-Thomas (CNRS, France), S. Caillon (CNRS, France),
V. Reyes-García (ICREA, Espagne)

Questions. Quelle est la diversité des valeurs exprimées par les agriculteurs·rices, à l'échelle globale, à l'égard des plantes qu'ils cultivent ? Ces valeurs sont-elles interconnectées ou considérées indépendamment les unes des autres ? Les approches scientifiques des valeurs introduisent-elles des biais dans notre manière d'aborder les relations entre les agriculteurs·rices et l'agrobiodiversité ?

Approche. Marilou Demongeot a mené une revue de la littérature publiée entre 2010 et 2022 en se concentrant sur des travaux qui illustrent la perspective des agriculteurs·rices par des méthodes d'entretiens, questionnaires, ateliers collectifs, ou un mix de ces méthodes, excluant ainsi les approches purement expérimentales ou de modélisation. Les termes "valeur" ou "évaluation" n'étant pas des concepts systématiquement utilisés dans la littérature, l'équipe d'experts impliquée dans ce travail a établi une liste d'indicateurs reflétant les dimensions rationnelles et émotionnelles en jeu dans le choix des plantes par les agriculteurs·rices : i.e., préférences, motivation, choix, soin, perception, point de vue. Nous avons relevé, pour chacun des 125 articles retenus, des informations générales (i.e., auteurs, année, journal, domaine de recherche définis par *Web Of Science*), le système d'étude (i.e., géolocalisation, degré d'intégration au marché, échelle spatiale des exploitations), les espèces, variétés cultivées ou agroécosystèmes considérés (i.e., nom commun et scientifique, variétés améliorées ou paysannes, culture de rente ou de subsistance) et enfin les valeurs associées.

Résultats. Le premier résultat de ce travail a fait l'objet d'une contribution dans le dernier rapport de l'IPBES (Demongeot et al., 2022). Nous détaillons la manière dont, à partir des citations de valeurs rapportées dans la littérature, nous avons construit une classification hiérarchique (un arbre des valeurs) permettant d'harmoniser le vocabulaire employé dans diverses études.

L'analyse des 125 articles de la littérature illustre la diversité et l'interconnexion des valeurs ($n_{\text{tot}} = 1729$ valeurs codées, 140 espèces et variétés évaluées) exprimées par les agriculteurs·rices à l'égard des plantes qu'ils cultivent. Ces valeurs couvrent les dimensions économiques, agronomiques, écologiques et socio-culturelles de l'agriculture que nous avons classée en six grands domaines (niveau le plus large de l'arbre) (Fig. 20a). Les domaines liés à l'économie rurale (i.e., contributions matérielles des PC) et aux traits agroécosystémiques totalisent les plus grandes fréquences de citations (34% chacun). Au sein de ces domaines, les rendements et les revenus sont les plus fréquemment cités mais ne sont considérées comme « importantes » ou « les plus importantes » que dans la moitié des études.

Dans le domaine de l'économie rurale, les usages des plantes représentent la deuxième raison la plus fréquemment citée par les agriculteurs (26% des citations). A titre d'exemple, les communautés locales du sud du Burkina Faso apprécient les espèces d'arbres telles que le caroubier africain (*Parkia biglobosa*) ou le tamarinier (*Tamarindus indica*) pour la diversité des aliments fournis (fruits, noix, légumes à feuilles, condiments), leurs propriétés médicinales et en tant que source de revenus (Bayala et al. 2018, autres exemples : Dimobe et al., 2018 ; Agúndez et al., 2020). Les cultures polyvalentes étaient particulièrement appréciées dans les systèmes agricoles mixtes culture-élevage (Waldman et al., 2017 ; Snapp et al., 2019) et dans les systèmes agroforestiers (Singh et al. 2014 ; Iiyama et al. 2017 ; Krishnamurthy et al. 2019). Atteindre la sécurité alimentaire et soutenir l'autoconsommation est apparu comme une valeur importante pour les agriculteurs (25 % des rapports dans le domaine économique rural), en particulier en ce qui concerne les cultures céréalières. D'autres valeurs dans ce domaine concernent le travail agricole (11 %), les systèmes de semences (3 %), l'accès à la terre (2 %) et d'autres dimensions des moyens de subsistance (2 %).

Le domaine des traits agroécosystémiques se concentre sur les caractéristiques morphologiques et agronomiques des plantes cultivées. Les valeurs les plus fréquentes dans ce domaine concernent l'adaptation des cultures aux conditions locales (37 % des citations dans ce domaine) et leur rendement (22 %). L'adaptation apparaît particulièrement importante dans des conditions environnementales drastiques (par exemple, Adigoun-Akotegnon et al. 2019, Agre et al. 2015, Drabo et al. 2018, Syria Bishaw et Struik 2011). Dans plusieurs études, les agriculteurs ont exprimé une valorisation plus importante des variétés traditionnelles par rapport aux variétés modernes en raison de leur meilleure performance face aux changements climatiques, aux risques divers (Bishaw et Struik 2011, Li et al. 2011, Gebretsadik et al. 2014.) et aux attaques de ravageurs et de maladies (Jin et al. 2020).

Les valeurs relevant des quatre autres grands domaines, symbolique, préférences culturelles, interactions écologiques et maintien des options, ont été beaucoup moins souvent citées (Fig. 20a). Les évaluations dans le domaine symbolique social (11 %) reflètent les contributions immatérielles des cultures, en se référant aux liens moraux ou émotionnels entre les humains et leurs cultures. Le riz (*Oryza sativa*) est la culture la plus valorisée dans ce domaine, les évaluations liées à l'identité (individuelle ou collective) représentant 22 % du total des valeurs rapportées pour le riz. Les travaux de Fujisawa (2019) montrent qu'une communauté d'agriculteurs au Panama se définit comme "arroceros", ou "cultivateurs de riz", pour exprimer la place centrale de cette culture dans leur mode de vie et la manière dont ils s'identifient. Le domaine des préférences culturelles (11%) regroupe les valeurs liées aux propriétés culinaires, organoleptiques, de stockage et de guérison des plantes cultivées. Nous avons constaté que le manioc (*Manihot esculenta*) était l'espèce la plus fréquemment citée par les

agriculteurs-rices car particulièrement appréciée pour ses qualités culinaires (15% du total des évaluations pour le manioc, $n_{tot}=142$) et de transformation (15%). Les valeurs liées aux interactions entre les cultures, et entre les cultures et d'autres formes de vie (comme les pollinisateurs [par exemple, Clay et al. 2020], les plantes compagnes [par exemple, Wagner et al. 2019]) et l'environnement pédoclimatique ont été regroupées dans le domaine de l'interaction écologique (10 %). Le dernier domaine, le moins cité, comprend les valeurs liées au maintien des options (0,3 %), qui se réfère à la capacité des plantes cultivées à répondre aux besoins des agriculteurs-rices et à soutenir la production face à un environnement changeant et souvent imprévisible (par exemple, Nordhagen et al. 2021).

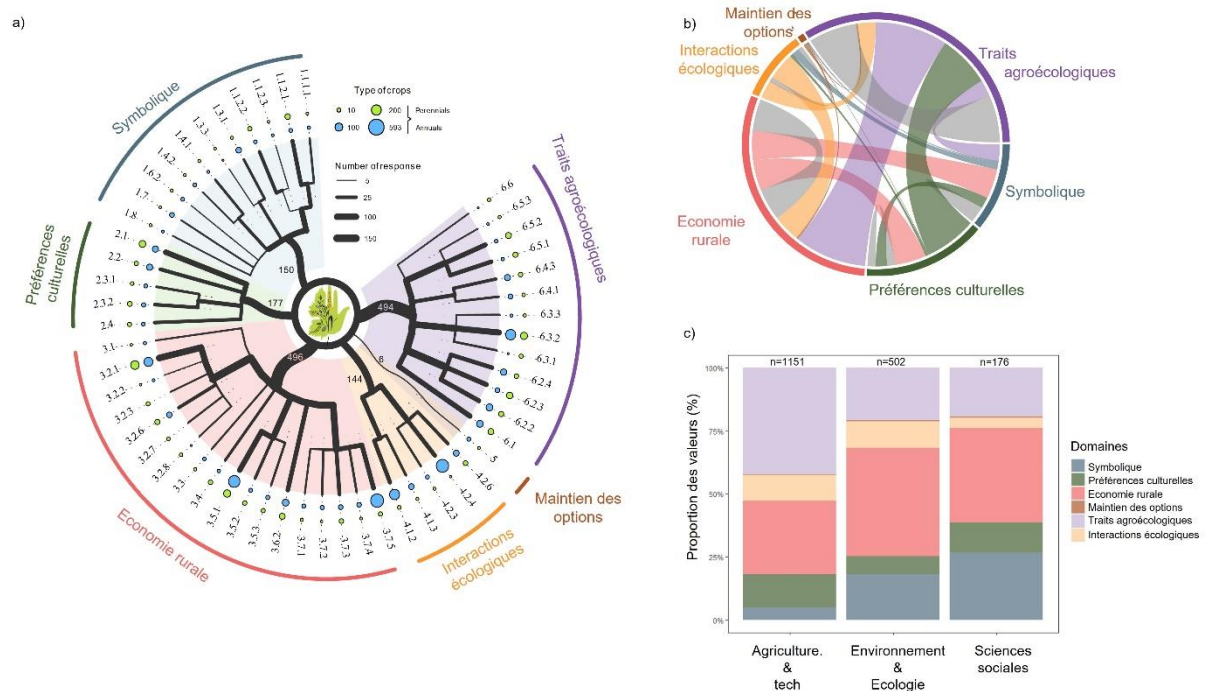


Fig. 20 Multiples valeurs bioculturelles portées par les agriculteur-rices. a) Classification hiérarchique des valeurs en trois grands niveaux, le plus large correspondant à six domaines représentés par des couleurs différentes : Symbolique, Préférences culturelles, économiques, Interactions écologiques, Maintien des options pour le futur et Traits agroécologiques. L'épaisseur des branches est proportionnelle au nombre de citations totales. La taille des cercles bleus et verts est proportionnelle au nombre de citations, par valeur, pour les plantes cultivées annuelles et pérennes, respectivement. b) Fréquence de co-citations, par article, représentant les connexions entre domaines de valeurs. c) Pour les trois domaines de recherches auxquels appartiennent les articles analysés (selon *Web of Science*) ; *Agriculture, Science and Technology*, *Environment and Ecology*, *Social sciences*, nous représentons les proportions de chaque domaine de valeur cité.

De manière plus générale, les valeurs sont priorisées différemment en fonction des types de systèmes agricoles (agriculture familiale vs. agriculture à large échelle intégrée au marché) et les types de plantes. À titre illustratif, les plantes pérennes des systèmes agroforestiers sont appréciées pour leurs interactions biotiques, leur effet positif sur la fertilité des sols et leurs usages multiples, tandis que les cultures annuelles (céréales et tubercules) sont associées aux revenus, au rendement, aux qualités culinaires et à la résistance aux stress biotiques et abiotiques.

L'analyse des patrons de co-citations des valeurs illustre les nombreuses connexions entre les sphères agronomiques, économiques et culturelles que représentent les plantes. Les valeurs symboliques, qui reflètent les liens moraux et émotionnels qui lient les agriculteurs-rices, sont centrales dans le réseau de valeurs (i.e., celles qui totalisent le plus grand nombre de connexions avec d'autres valeurs). Au contraire, dans les domaines des traits agroécosystémiques et de l'économie rurale, environ un quart de toutes les connexions (23 % et 24 %, respectivement) impliquent des valeurs du même domaine (Fig. 20b, liens gris). Plusieurs études fournissent une longue liste détaillée de caractéristiques morphologiques, besoins environnementaux et de traits de résistance des cultures sans aucune valeur d'autres domaines.

Nous identifions trois grandes limites des recherches actuelles sur les valeurs. Tout d'abord, concentrée dans les zones tropicales (50% en Afrique), l'analyse des valeurs est représentative principalement des agricultures familiales et sous-évalue les systèmes agricoles des pays industrialisés (n=6 études en Europe, n=3 en Amérique du Nord). Ensuite, les domaines de recherche influencent la diversité des valeurs citées (suivant *Web Of Science*, Fig. 20c). Les articles publiés dans des journaux du domaine *Agricultural Science and Technology* rapportent une plus grande proportion de valeurs liées aux traits agronomiques (42.2 %) et très peu de valeurs symboliques (4.9 %) (Fig. 20c). Ces valeurs sont explicitées davantage dans les articles des sciences sociales (26.7 %). Enfin, parmi les 140 plantes évaluées, les céréales sont les modèles d'étude les plus fréquents (41.6 %) et les recherches ne se focalisent que sur une espèce (56.8 % des études contre 15.2 % sur l'agroécosystème dans son ensemble).

Conclusions. Cette première synthèse montre sans ambiguïté la diversité des valeurs que les agriculteurs-rices, de divers systèmes agricoles, portent à l'égard des PC. Ces valeurs couvrent toutes les dimensions économiques, agronomiques, écologiques, sociales et culturelles de l'agriculture. Nous montrons que les valeurs économiques instrumentales, qui sont encore principalement ciblées par les politiques, offrent une compréhension très partielle de l'interaction agriculteur-rice-agrobiodiversité (Allen et al., 2018 ; Ellis et al., 2019). Notre travail illustre qu'une recherche plus interdisciplinaire aux interfaces entre agroécologie et sciences humaines et sociales pourrait contribuer à faire des valeurs un levier dans le processus de transformation des agroécosystèmes vers la durabilité (Horcea-Milcu, 2022).

4.2 Évaluation des valeurs dans un système commercial

Projets :	ASSET (ANR, PI : D. Renard)
Etudiant :	A Doncieux (doctorant)
Publications :	Doncieux et al., 2022 (#11) ; Doncieux et al., (en révision pour <i>Agriculture and Human Value</i>)
Collaborations :	S. Caillon (CNRS, France)

L'étude présentée en 4.1 montre que les valeurs attachées aux PC ont fait l'objet de plus d'attention dans les agricultures familiales des Suds, caractérisés par un niveau élevé de diversité des PC (Ricciardi et al., 2021). En comparaison, la diversité des valeurs qui sous-tendent la prise de décision des agriculteurs-rices dans les systèmes commerciaux, plus caractéristiques de l'hémisphère nord, reste très peu documentée. Cette lacune peut refléter

l'héritage de politiques basées uniquement sur les valeurs instrumentales de rendement et de revenu, soutenant la mise en œuvre d'une agriculture industrielle à grande échelle. Mais le manque d'études dans les agricultures du nord invisibilise non seulement l'agrobiodiversité qui subsiste dans de nombreux systèmes de culture (exemple illustrant la diversité variétale de la tomate : Aistara, 2014), mais aussi la complexité des relations entre humains et non-humains qui se jouent aussi dans ces systèmes (Barton et al., 2022 ; Doncieux et al., 2022 ; Kreitzman et al., 2022 ; Mahon et al., 2016). La littérature souligne en effet que les agriculteurs-rices européens ne valorisent pas uniquement les rendements et les revenus (Bartkowski & Bartke, 2018) mais prennent soin de la vie des sols en Angleterre (Krzywoszynska, 2019), des pieds de vigne en France (Alarcon et al., 2020) et des animaux de ferme en Suisse (Chapman & Deplazes-Zemp, 2023).

Questions. Quelle est la diversité des valeurs individuelles qui sous-tendent le choix des cépages de la vigne ?

Approche. A. Doncieux a conduit une approche ethnographique basée sur neuf mois d'observation participante dans le vignoble de Gaillac (Tarn, France) et 35 entretiens semi-structurés avec des producteurs-rices. À partir de ses données d'enquête, il a construit un arbre hiérarchique qui permet (comme dans la section 4.1) de classer les valeurs. Des analyses de réseau (*Latent Block Model*) ont permis d'identifier des groupes de producteur-rices et de cépages partageant des valeurs similaires.

Résultats. Au cours des entretiens, A. Doncieux a enregistré un total de 962 expressions de valeurs pour 50 cépages cultivés au total. Les motivations sont partagées de manière équitable entre les trois aspects de l'activité des producteurs-rices viticoles (e.g., la culture de la vigne, la fabrication du vin et la vente du vin, ~21.5% des citations totales, respectivement) et des valeurs sensibles (e.g., affectives, 24%) qui ont trait à l'attachement au lieu et aux relations émotionnelles entre les personnes et entre elles et les plantes et le vin. Les valeurs liées à la réglementation du secteur vitivinicole ont été moins fréquemment citées (12%). Nous avons identifié quatre groupes de cépages et trois groupes de producteurs-rices sur la base des valeurs exprimées. Alors que certains cépages (i.e., Len de l'El et Mauzac dans le Bloc A,) reflètent un attachement particulier au vignoble local, d'autres (i.e., Merlot et Cabernet-Franc, Fig. 21Bloc A,) sont cultivés pour leur réputation commerciale (Bloc B). Les valeurs des producteurs-rices (Blocs 1 à 3) s'articulent autour de la stratégie commerciale de l'exploitation (Bloc 1), alors que d'autres s'attachent à cultiver des cépages selon leur propre goût et le terroir (Bloc 2).

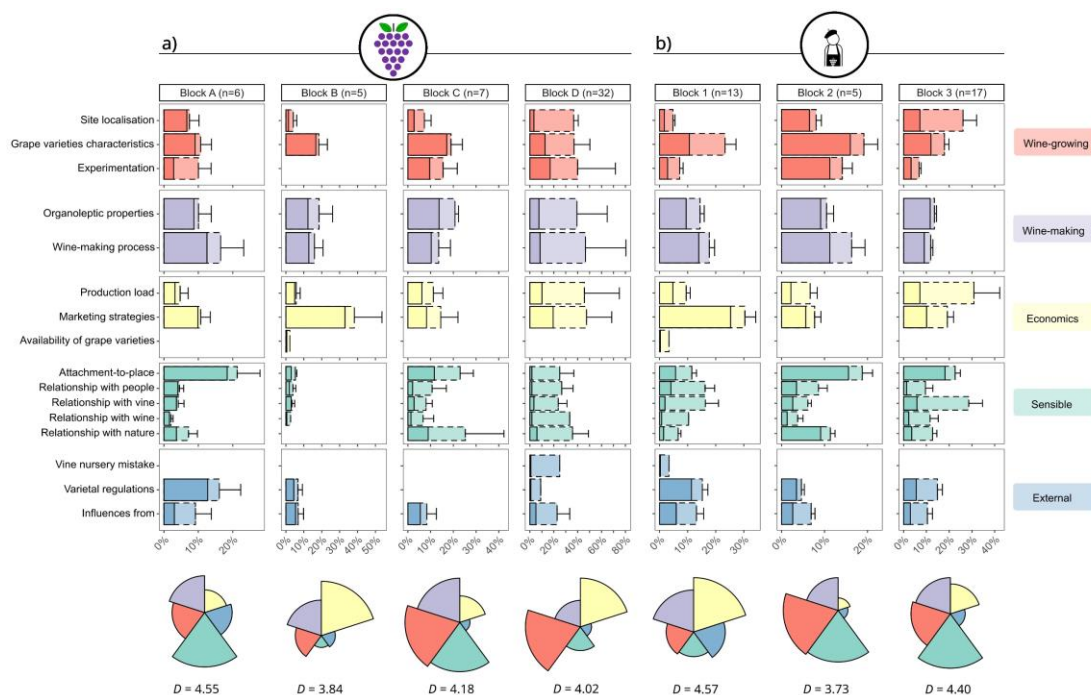


Fig. 21 Résultat de la classification des cépages (blocs A à D, a) et des agriculteurs-rices (bloc 1 à 3, b) sur la base des valeurs exprimées dans les cinq grands domaines (facteurs externes, sensible, économique, fabrication et vente du vin) auxquelles correspondent le code couleur. Les camemberts représentent la proportion de chaque domaine de valeur par bloc, D est la valeur de diversité (indice de Simpson) des valeurs par block (Adapté de [Doncieux et al.](#), en cours de révision)

Conclusions. Nos résultats illustrent plusieurs formes de diversités : celles des valeurs qui sous-tendent celle des cépages du vignoble de Gaillac ([Doncieux et al., 2022](#)) et enfin, la variation dans le cortège de valeurs portés par différents groupes agriculteurs-rices. Si notre cas d'étude illustre que les agriculteurs-rices ne forment pas une communauté homogène, la perspective globale (4.1) montre aussi indépendamment du type de plante (annuelle ou pérenne), du type de système agricole (familial ou commercial) et du contexte socio-culturel, les agriculteurs-trices partagent non seulement des valeurs liées à la productivité (Elias et al., 2000 ; Mahon et al., 2016), à l'adaptation de la plante à son environnement (i.e., Fenzi et al., 2017), mais portent aussi une attention particulière à l'esthétique (Elias et al., 2000), aux préférences culinaires (i.e., Thant et al., 2020), à l'identité culturelle, l'héritage et la transmission (i.e., Mahon et al., 2016) dans leurs choix du matériel végétal. Nos travaux contribuent à une meilleure connaissance de ces valeurs multiples - en particulier celles du domaine *sensible* souvent sous-documentées, en particulier dans des systèmes agricoles commerciaux (Wezel et al., 2020).

Section 4 : conclusions et implications

En adoptant la perspective des agriculteurs-rices à l'égard de leurs plantes cultivées, nos recherches contribuent à une meilleure reconnaissance et intégration des perceptions, connaissances et valeurs dans les sphères politiques. Une telle reconnaissance de ces valeurs fondamentales permet aux agriculteurs-rices de devenir des agents du changement, en donnant de l'espace à leurs connaissances et vision du monde qui ont pu être effacés ou invisibilisés au cours du processus de modernisation et par des approches scientifiques *top-down* (Coolsaet, 2015).

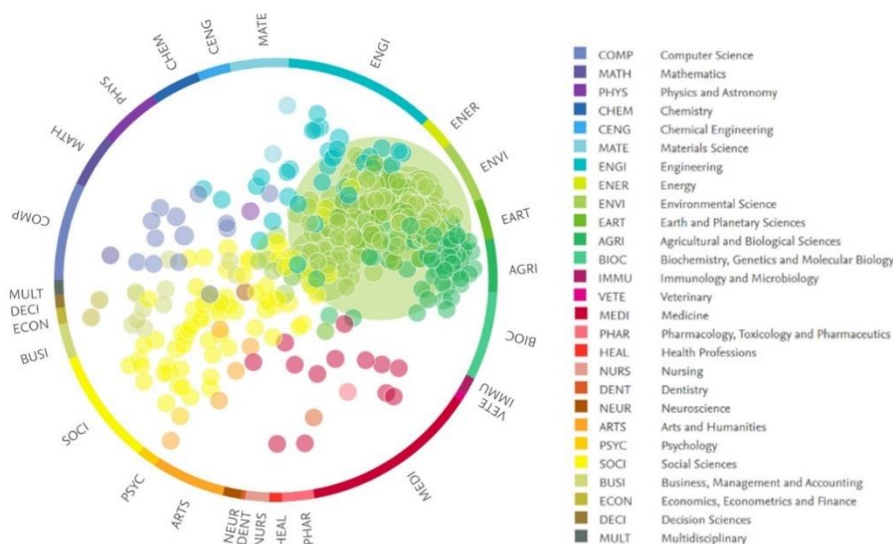
PROJET DE RECHERCHE

Introduction

Les changements climatiques, la crise de la biodiversité et l'insécurité alimentaire sont trois menaces dont les interactions exacerbent les défis auxquels font face les systèmes alimentaires. « **More of the same will result in more of the same** » écrivent Herforth et al., (2019 , pp 185, chap 9). Cette phrase illustre bien, à mon sens, les risques encourus sans changement des approches scientifiques et des priorités politiques. Ces risques incluent la domination d'un paradigme productiviste qui favorise la production d'un petit nombre de plantes cultivées riches en calories, conduit à l'homogénéisation de l'agriculture et de la nutrition à l'échelle globale, et invisibilise les problèmes de durabilité environnementale, santé humaine et justice sociale.

La recherche présentée dans la synthèse de ce document rejoint un constat général de la communauté scientifique : il est temps d'actionner le potentiel de la biodiversité—cultivée et sauvage, à de multiples niveaux, des champs aux pays—pour concevoir des agroécosystèmes durables, résilients et justes pour relever les défis actuels. En dépit de l'accumulation de preuves empiriques sur les multiples bénéfices de la diversification agricole, il est surprenant que les solutions 'basées sur la nature' soient aussi rarement utilisées par les agriculteurs·rices ou encouragées par les décideurs politiques dans la plupart des pays. Il existe cependant de nombreux freins à la diversification des systèmes agricoles ([Brooker et al. 2023](#)). Mon projet de recherche ambitionne de lever certains de ces freins.

À court terme, je souhaite apporter des informations plus concrètes sur les combinaisons d'espèces et l'agencement spatial permettant d'utiliser l'agrobiodiversité pour stabiliser la production alimentaire. **À plus long terme**, ce sont deux limites, en partie interdépendantes, des recherches en agroécologie que je souhaite contribuer à relever. La première est la concentration des efforts sur la mesure, ou l'optimisation, d'une seule fonction agroécosystémique (le rendement étant la principale). J'aborderai ainsi le concept de multifonctionnalité, e.g., la capacité d'un écosystème de fournir simultanément plusieurs fonctions et services (pour une définition très large [Byrnes et al., 2014]), qui c'est développé, comme l'indique Manning et al., (2018) , en marge des recherches sur les liens biodiversité-fonctionnement des écosystèmes. La seconde limite est le manque de dialogue interdisciplinaire (Fig. 22), indispensable à une meilleure intégration de la composante sociale et culturelle de l'agriculture et sans laquelle il est difficile de concevoir des systèmes agricoles durables et acceptables pour les sociétés. En effet, un nombre croissant d'études montrent que les stratégies qui ne tiennent pas compte des valeurs socio-culturelles, des besoins alimentaires et des dépendances à l'égard des marchés (Ouedraogo et al., 2017), ont tendance à être inefficaces et se traduisent par de faibles taux d'adoption (Yokamo, 2020).



Source : AllEnviSolutions 2023 - Sabine Riou et Stéphane Ledoux

Fig. 22 Les recherches sur les ‘solutions fondées sur la nature’ représentent une approche dominée par les Sciences de la Vie et ont peu de connexions avec d’autres disciplines.

Mon projet s’articule autour de deux axes :

Axe 1 : Où et quelle diversité semer pour stabiliser les rendements agricoles ?

Axe 2 : Quelles sont les multiples fonctions écologiques, agronomiques et socio-culturelles fournies par l’agrobiodiversité aujourd’hui ? Quelle est la vulnérabilité des espèces et de leurs fonctions aux changements climatiques futurs ?

Zone d’étude envisagée et positionnement

Je propose de mener mon projet principalement dans les pays des Suds, plus spécifiquement en Afrique subsaharienne (ASS) pour les raisons suivantes. Basée sur la subsistance avec une ouverture sur un marché local, l’agriculture familiale représente 83% des exploitations à l’échelle mondiale et produit 30-53% des calories de la planète (Herrero et al., 2017 ; Ricciardi et al., 2021 ; Samberg et al., 2016). Pourtant, **plus de 95% des travaux en agriculture ne proposent pas de solutions appropriées aux besoins de ces petits agriculteurs·rices** (Laborde et al., 2020). Face aux contraintes économiques (e.g., liquidités, surfaces en terres cultivées, main-d’œuvre) et environnementales (e.g., fertilité des sols, ressource en eau, climat) auxquels les agroécosystèmes tropicaux des Suds font souvent face, les **solutions techno-centrées ne sont pas transposables et adaptées** à ces systèmes de culture. **L’agrobiodiversité peut, dans ce contexte, être un allié précieux.** Elle est déjà à la base de cette agriculture (Herrero et al., 2017 ; Ricciardi et al., 2021, Fig. 23) et mes travaux soulignent qu’elle peut soutenir une plus grande stabilité des rendements et des revenus au sein des exploitations (Menesch et al., 2023) et des pays (Renard et al., 2023). Faire de l’agrobiodiversité un levier de l’adaptation aux changements climatiques me semble particulièrement important car l’instabilité de la production alimentaire risque de frapper le plus durement les pays des Suds, où les conséquences, notamment en termes d’insécurité

alimentaire, de pauvreté, la malnutrition et de troubles sociaux, devraient être les plus graves (Carleton, 2017 ; Harvey et al., 2014 ; Patz et al., 2005 ; Puma et al., 2015).

Je pourrai ainsi m'appuyer sur les dispositifs et partenariats déjà mis en place au Sénégal, à Madagascar (dans le cadre de la thèse de E. Menguy) et en cours de montage en Tanzanie (avec le *Nelson Mandela African Institution of Science and Technology* (NM-AIST), TARI-Selian). Mes collaborations avec l'IRD sont aussi une force pour travailler dans ces pays.

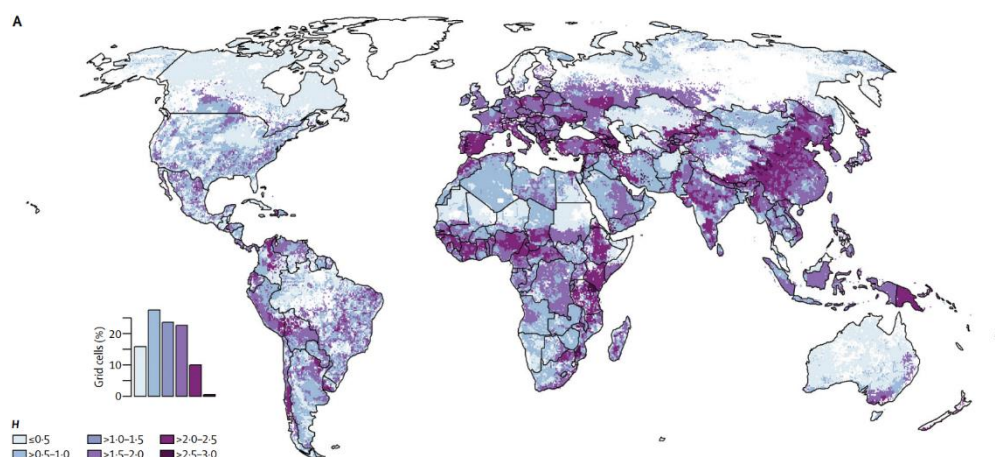


Fig. 23 Répartition mondiale de la diversité des commodités alimentaires, mesurée selon l'indice de Shannon (H). Un indice élevé représente un nombre de commodités élevé, réparti de manière équitable au sein d'un pixel (Carte adaptée de Herrero et al., 2017).

Je suis consciente que travailler sur la diversification agricole serait tout aussi pertinent dans le contexte de l'agriculture française par exemple. Mes travaux illustrent certains biais géographiques à la défaveur des systèmes agricoles des pays industrialisés (Labeyrie et al. 2021 ; section 3.1.2).

Aux vues de la complexité des situations que j'ai pu rencontrer personnellement en Afrique, le fait de travailler dans les pays des Suds est aussi un choix personnel. Je pense que même de modestes changements ont plus de capacité à améliorer la vie quotidienne des populations en Afrique qu'ici.

Je souhaite aussi poursuivre et étendre mon engagement vis-à-vis de l'enseignement aux Suds. Il me semble indispensable de contribuer à une montée en compétences des étudiants, futurs chercheurs en agroécologie de ces pays. Je travaille quotidiennement avec des collègues IRDien·nes qui connaissent notamment les sources de financement permettant d'initier des projets de thèse avec les pays des Suds. Mon positionnement vis-à-vis des Suds se place aussi dans le cadre d'une réflexion entreprise par les instituts de recherche sur l'éco-responsabilité de notre propre recherche. Les missions aux Suds étant particulièrement coûteuses en termes d'émissions de gaz à effet de serre, le travail en partenariat est central pour mener des travaux de manière durable dans des situations d'éloignement géographiques.

Axe 1 : Où et quelle diversité semer pour stabiliser la production agricole ?

Dans la continuité des résultats obtenus dans le cadre du projet ASSET, je souhaite identifier des éléments plus concrets pour que l'agrobiodiversité devienne un levier de la résilience des agroécosystèmes. À court terme, je chercherai à identifier les échelles spatiales – en reliant les échelles de la ferme au pays – et les combinaisons d'espèces cultivées qui maximisent la stabilité des rendements agricoles face aux variations climatiques.

En reliant les échelles de l'exploitation à celle du pays, il s'agira d'évaluer s'il faut promouvoir la diversité des PC au niveau local ou d'encourager la différenciation des espèces cultivées entre différentes régions. La question peut être ainsi résumée : où favoriser l'asynchronie entre espèces pour bénéficier d'un effet d'assurance de la diversité, stabilisateur des rendements totaux ? Évaluer comment les relations biodiversité-fonctionnement changent entre échelles spatiales reste un défi scientifique, notamment expliqué par la rareté de données permettant leur agrégation à des échelles emboîtées, de plus en plus grandes.

Ensuite, cultiver de la diversité ne signifie pas penser la diversification agricole comme un foisonnement d'espèces. Le simple fait d'augmenter le nombre de PC n'améliorera pas nécessairement la stabilité de la production alimentaire globale. En effet, les relations biodiversité-fonctionnement ne sont pas linéaires (Cardinale et al., 2006) : à partir d'un certain seuil, augmenter le nombre d'espèces n'apporte plus de bénéfice supplémentaire. L'identité des espèces est aussi importante. En effet, si la diversification utilise des espèces ayant la même sensibilité aux températures extrêmes (par exemple), les effets de complémentarité ne peuvent pas se jouer. La clé réside donc dans l'identification de combinaisons de PC qui, par un effet de complémentarité, peuvent soutenir un effet d'assurance face aux variations climatiques tout en préservant le rendement moyen.

Je privilégierai une approche fonctionnelle, par les traits, qui est de plus en plus encouragée dans l'étude des liens entre agrobiodiversité et fonctionnement (de Bello et al., 2021 ; Martin & Isaac, 2018 ; Porcuna-Ferrer et al., 2023) et utilisée pour identifier des combinaisons de plantes à l'échelle intra-parcellaire (Barot et al., 2017; Dubs et al., 2023; Louarn et al., 2020). Les traits sont les caractéristiques morphologiques, écophysiologicals et phénologiques mesurables à l'échelle d'un individu (Violle et al., 2007). La diversité fonctionnelle des traits représente la valeur, la gamme, la distribution et l'abondance relative de traits des organismes d'un écosystème donné. Les combinaisons de traits reflètent les stratégies des organismes en termes de démographie, de fonction ou d'acquisition de ressources, et donc le fonctionnement de l'écosystème. C'est pourquoi les traits et leur diversité dans les écosystèmes naturels et cultivés sont considérés comme de meilleurs prédicteurs du fonctionnement des écosystèmes—dont la productivité et les cycles des nutriments—et de la réponse des organismes aux changements environnementaux, comparativement à l'identité taxonomique et la richesse spécifique (Cadotte et al., 2011). Des efforts actuels visent à combler le manque de données sur les traits des PC, ce qui soutiendra sans doute l'application d'une approche par les traits en agroécologie. Dans le cadre de mon projet, l'analyse des traits fonctionnels des plantes qui sous-tendent les effets d'assurance répond à un double objectif : se rapprocher d'une approche mécaniste des relations diversité-stabilité dans les agroécosystèmes et se détacher d'une vision « espèce-centrée » qui limite la généralisation des principes qui gouvernent ces relations (Martin & Isaac, 2018).

- **Mise en œuvre**

Données. Ma recherche sera basée sur l'analyse de données agricoles coordonnées par la Banque Mondiale (BM, Tableau 5) : *Living Standards Measurement Study - Integrated Surveys on Agriculture* (LSMS-ISA). Ces données sont en libre accès pour huit pays d'Afrique subsaharienne. Elles sont issues d'enquêtes auprès d'un échantillon d'exploitations, fournissant pour chaque pays des informations répétées par « vagues » temporelles, sur les espèces cultivées annuelles et pérennes, leurs usages, surfaces et productions respectives, événements de pertes des récoltes et causes associées (climat, pestes, etc), durée de la saison de culture et pratiques de gestion (associations au champs, fertilisation, irrigation). Ces données restent sous-utilisées par les chercheurs du fait, notamment, de la complexité de leur structure et de leur hétérogénéité entre vagues pour un pays donné, et entre pays, les questionnaires n'ayant pas été standardisés. J'ai travaillé avec un ingénieur d'étude, O. Cobelli pendant une année pour compiler ces données pour **quatre pays d'Afrique de l'Est** (Éthiopie, Malawi, Ouganda et Tanzanie, Fig. 24) choisis car offrant une profondeur temporelle suffisante pour évaluer la stabilité temporelle des rendements.

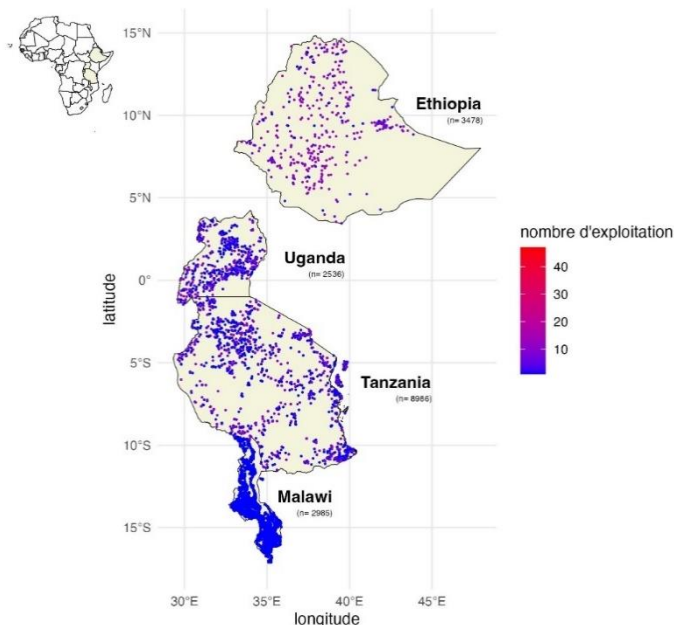


Fig. 24 Distribution spatiale des exploitations rurales provenant des données de LSMS-ISA de la Banque Mondiale pour les quatre pays d'Afrique de l'Est ciblés par mon projet. Seuls les ménages produisant des cultures annuelles sont représentés. La couleur des points indique le nombre de ménages associés à une coordonnée. Le nombre total de ménages (n) enquêtés à chaque vague de 2011 à 2020 est indiqué pour chaque pays.

Ces données offrent une opportunité unique d'explorer les relations diversité-stabilité entre échelles spatiales car les données aux échelles des exploitations peuvent être agrégées à au moins **trois échelles imbriquées (de la plus fine à la plus large) : municipalité (ou équivalent), région et pays**. Pour approximer la **diversité fonctionnelle** des espèces cultivées, j'utiliserai les indices développés par Villéger et al., (2008) calculés sur la durée du cycle de vie des cultures individuelles (e.g., intervalle de temps entre le semis et la récolte). Les **données climatiques** historiques de CHELSA disponibles à une résolution de ~1 km, pourront être utilisées pour calculer des moyennes, fluctuations intra et interannuelles et indices de sécheresse (SPEI [Vicente-Serrano et al., 2010]) à chaque échelle spatiale des données agricoles.

Analyses. Je propose de partitionner la diversité des PC et la synchronie des fluctuations de rendements entre ces plantes, à différentes échelles spatiales suivant Wang et al., (2019). Des modèles statistiques de régression me permettront d'évaluer (i) si la diversité spécifique

et fonctionnelle des PC a des effets stabilisateurs à toutes les échelles spatiales, de la municipalité (α) à la région (γ) et au pays (τ) ? (ii) si les facteurs climatiques (i.e., précipitations, températures, sécheresse) et les modes de gestion (i.e., fertilisation) affectent la diversité et la stabilité à travers les échelles spatiales ? et enfin (iii) si la nature et l'ampleur des liens diversité-stabilité changent entre échelles spatiales et conditions climatiques ?

Sur la base des données de rendement des plantes individuelles disponibles dans ce jeu de données, j'utiliserai l'approche par permutation développée par A. Doncieux au cours de son post-doctorat pour identifier les combinaisons de PC et leur localisation dans l'espace qui maximisent les dynamiques asynchrones entre plantes et échelles spatiales. En plus de combiner différentes espèces, je combinerai des cultures dont la durée du cycle de vie est contrastée.

Contexte partenarial. Je conduirai cette recherche en partenariat avec Dr. K Waha (Institut de Géographie, Université d'Augsbourg IGUA) spécialiste de l'agrobiodiversité à l'échelle des exploitations en d'Afrique subsaharienne et avec Dr. Thomas Lamy (IRD, UMR MARBEC) spécialiste de la modélisation spatiale des liens biodiversité-stabilité dans les écosystèmes.

Axe 2 : Multifonctionnalité des plantes cultivées, du présent au futur

“Decisions based on narrow set of market values of nature underpin the global biodiversity crisis”
IPBES 2022, *media release*.

Les rendements et profits économiques sont les deux indicateurs de performance des systèmes agricoles qui dominent les travaux scientifiques sur l'agriculture (Chaplin-Kramer et al., 2023), y compris ceux sur la diversification agricole (Beillouin et al., 2021). L'attention portée aux valeurs instrumentales par la science et les politiques publiques ne semblent pas avoir mené à des solutions qui améliorent les problèmes de malnutritions, de *yield and poverty gaps* (Tittonell & Giller, 2013), d'inégalités sociales et qui freinent l'érosion de la biodiversité.

Des efforts récents visent à une meilleure prise en compte de la multifonctionnalité des éco- et agroécosystèmes, soutenue par la biodiversité (voir Suter et al., 2021) des systèmes agricoles. Les fonctions socio-culturelles liées aux valeurs patrimoniales, esthétiques, culinaires, d'attachement aux lieux et à la diversité des plantes et des animaux, dont nous avons contribué à montrer la diversité (Synthèse, section 4), sont évaluées de manière isolée. Une pratique monodisciplinaire de la science contribue à entretenir une séparation entre l'agrobiodiversité et les sociétés, malgré une coévolution vieille de 12 000 ans. Le risque de ne pas reconnaître et intégrer les multiples valeurs qui sous-tendent les décisions des agriculteurs-rices est de formuler des politiques inefficaces pour atteindre les objectifs de durabilité (Islar et al., 2022). Pour illustrer l'importance de mieux intégrer les valeurs socio-culturelles, vous pouvez vous-même faire l'expérience de pensée suivante : seriez-vous prêts à remplacer votre vin par une bière de mil ?

Dans cet axe de mon projet de recherche, je souhaite contribuer à dépasser les limites d'une approche monodisciplinaire et monofonctionnelle pour construire une vision plus holistique des multiples fonctions—agronomiques, écologiques et socio-culturelles—soutenues par l'agrobiodiversité.

La notion d'hypervolume

Une notion clé dans mon approche de la multifonctionnalité est celle de l'hypervolume. Suivant la description de la niche écologique des espèces de Hutchinson (1957), un 'hypervolume' est un objet géométrique à n dimensions. Les limites de l'hypervolume définissent les conditions de survie et de reproduction de l'espèce. Les écologues analysent les hypervolumes pour inférer des processus d'assemblage ou de coexistence des communautés (compétition, complémentarité), ou encore expliquer ou prédire les invasions biologiques (Blonder, 2018). Appliquée à l'écologie fonctionnelle, cette notion a permis le passage de l'étude des traits individuels (Mason et al., 2005) à l'analyse de communautés distribuées dans un espace multidimensionnel à n traits (Villéger et al., 2008). La position des plantes dans ces multiples dimensions permet de dégager des grands axes décrivant des variations dans les stratégies

des plantes (Diaz et al., 2016). Peu d'analyses de ce type ont été menées sur les plantes cultivées (voir Milla et al., 2015). Je souhaite ici étendre cette approche par hypervolume pour décrire la multifonctionnalité supportée par les plantes cultivées et en intégrant des fonctions non seulement agronomiques et écologiques, mais aussi socio-culturelles.

Mes objectifs sont les suivants : (O1) construire et caractériser le ou les hypervolume(s) des multiples fonctions remplies par les espèces de plantes cultivées (O2) suivre les dynamiques interannuelles et la stabilité de ces hypervolumes et (O3) évaluer la vulnérabilité aux changements climatiques des paniers d'espèces cultivées et de leurs fonctions associées.

Cet axe de mon projet est le fruit d'une réflexion menée à quatre cerveaux. Nous avons obtenu un projet Tremplin ERC de l'Université de Montpellier pour nous soutenir dans le montage d'un projet européen. En cours de réflexion, je présente ici les grandes lignes de la mise en œuvre du projet que nous développons. Nous envisageons de déployer ce projet dans quatre pays, Équateur, Sénégal, Tanzanie et Cambodge, avec un échantillonnage de minimum 30 sites par pays, pouvant représenter la diversité des types d'agroécosystèmes et la variabilité dans les paniers d'espèces de PC.

O1 Construire un hypervolume « agro-éco-socio ».

La première étape est de mesurer les fonctions agronomiques, écologiques et socio-culturelles qui constitueront les n axes, sur lesquels les valeurs des fonctions fournies à l'échelle de chaque PC seront reportées. Le nuage de points dans cet espace à n axes formera l'hypervolume des paniers de PC qui pourra être représenté pour chaque site ou pour tous les sites d'étude ensemble. Les questions que nous souhaitons adresser sont les suivantes : quelles sont les caractéristiques géométriques des hypervolumes occupés par les PC ? Dans un agroécosystème, les plantes occupent-elles la même partie de l'espace, e.g., sont-elles redondantes fonctionnellement ? Quelles sont les similarités et différences entre les hypervolumes de PC dans différents agroécosystèmes ? Quels sont les facteurs qui expliquent l'occupation de ces espaces multifonctionnels (i.e., gradients environnementaux, groupes ethniques, pratiques) ?

- **Mise en œuvre**

Données. Quelles soient socio-culturelles, agronomiques ou écologiques, deux approches sont envisagées. La première est une évaluation 'directe' par des mesures de terrain. La seconde utilise les traits fonctionnels comme indicateurs des fonctions fournies par les PC. L'objectif étant de prendre en compte la plus grande diversité des plantes au sein des paniers cultivés dans chaque site, travailler à l'échelle de l'espèce nous semble le meilleur compromis. Si la diversité variétale reste encore largement sous-évaluée, travailler à ce niveau serait pour le moment trop coûteux en ressources (temps, argent, main-d'œuvre).

Fonctions agro-écologiques. Des mesures et analyses d'échantillons prélevés sur le terrain permettraient de quantifier la production de biomasse (pesée des grains, paille ou fourrage), la stabilité temporelle de cette production, la sensibilité aux maladies (i.e., étendue des dommages causés par les insectes herbivores), la capacité de fixation de l'azote (i.e., degré

de mycorhization des racines) et les valeurs nutritives pour chaque espèce de PC (i.e., contenu en calories, macro et micro-nutriments). Cette approche implique, sur chaque site d'étude, la mise en place de parcelles expérimentales d'espèces semées en monoculture suivant les mêmes modes de gestion.

L'alternative basée sur traits fonctionnels pourrait reposer sur des bases de données existantes (*Plant Trait Dataset TRY* [Kattge et al., 2011], *crop trait database* de C. Violle, CEFE, CNRS) et des recherches sur les liens traits-fonctions et services. Par exemple, suivant Hanisch et al., (2020), la production de biomasse est liée positivement au contenu en azote des feuilles, à la hauteur totale de la plante et à la surface spécifique des feuilles. La solidité des feuilles est liée au biocontrôle (De Bello et al., 2010 ; Schrod et al., 2015). La fertilité du sol est liée positivement au rapport carbone/azote des feuilles et à la capacité de fixation de l'azote. L'objectif n'étant pas d'évaluer les variations inter-sites dans les valeurs de traits d'une espèce de PC donnée, nous pourrions donc envisager d'utiliser ces bases de données mondiales, avec des valeurs moyennes par espèces et des données manquantes gérées par des approches bayésiennes (Schrod et al., 2015).

Fonctions/valeurs socio-culturelles. Du fait de la nature locale et contextuelle de ces fonctions ou valeurs, seule une approche en sciences humaines et sociales (ici en ethnoécologie) sur les différents sites permettra d'identifier les valeurs associées aux PC. Nous combinerons des ateliers collectifs, des entretiens semi-directifs et enfin des questionnaires pour (i) identifier les valeurs associées aux PC alimentaires, (ii) déterminer si ces valeurs sont de nature positives ou négatives (i.e., le mil est apprécié pour son goût vs. le mil n'est pas apprécié pour son goût) et (iii) leur importance relative selon les différents groupes d'agriculteurs·rices (e.g., femmes, hommes, personnes âgés, jeunes). Les valeurs relevées dans les discours des agriculteurs·rices seront homogénéisées suivant l'arborescence hiérarchique issue du doctorat de M. Demongeot (voir Synthèse, section 4). L'approche en ethnoécologie proposée ici sera menée en collaboration avec des spécialistes du domaine que nous sommes en train d'identifier. Il semble cependant inenvisageable de pouvoir déployer une approche en ethnoécologie qui puisse collecter des données de qualité sur les valeurs socio-culturelles sur tous les sites envisagés. L'analyse des valeurs prend du temps du temps et nécessite une expertise qui permette d'élucider des valeurs qui dépassent celles citées lors d'entretiens superficiels.

Des travaux récents utilisent une approche par les traits comme indicateur des valeurs socio-culturelles (Porcuna-Ferrer et al., 2023 ; Quétier et al., 2007). Mon projet pourrait contribuer à étendre cette démarche pour contribuer à une meilleure intégration des fonctions socio-culturelles dans les recherches en agroécologie. L'utilisation de la photographie (Sherren & Verstraten, 2013 pour un exemple) ou du dessin (Porcher et al., 2023) seront des outils envisagés pour illustrer les perceptions individuelles des traits des espèces en lien avec les valeurs socio-culturelles identifiées.

Construire un espace multidimensionnel et analyser la géométrie de's hypervolume's des PC. Pour cette partie de mon projet, je développe une nouvelle interface avec le champ des mathématiques fondamentales (H. Queffelec, CNRS, IMPAG Montpellier). Notre objectif est d'identifier comment intégrer dans un même espace des données qui pourraient être de natures multiples (i.e., quantitatives continues et discrètes, qualitatives) et de trouver des

alternatives aux approches multivariées qui réduisent la dimensionnalité et donc la complexité des formes géométriques. Dans ce cadre et sur des données fictives, nous évaluons présentement avec H. Queffelec le potentiel des outils d'analyse des données topologiques (TDA) et des calculs d'homologie de persistance qui sont une manière d'évaluer les caractéristiques de l'hypervolume occupé par les PC dans un espace multidimensionnel. Pour comparer la structure de plusieurs hypervolumes, nous évaluons cette fois-ci les apports de mesures de distance de distance de Gromov-Hausdorff (Mémoli, 2008).

Caractériser et comparer les hypervolumes de PC, pour et entre chaque site, nous permettra de tester les hypothèses suivantes : (H1) Dans la nature, toutes les combinaisons de traits fonctionnels possibles ne sont pas représentées. Díaz et al., (2016) estiment que les plantes vasculaires actuelles occupent moins de 23% de l'espace potentiel des traits. Cette limite s'explique par des compromis physiologiques entre les traits ainsi que par des contraintes évolutives et écologiques. Dans les systèmes cultivés, les agriculteurs·rices exercent un filtre supplémentaire sur les combinaisons de traits représentés, occupant donc un spectre plus restreint encore que celui de toutes les plantes réunies. (H2) Je fais l'hypothèse que les PC semées par les agriculteurs·rices des agroécosystèmes familiaux remplissent des fonctions complémentaires. Une seule espèce ne peut en effet pas soutenir à elle seule tous les besoins et préférences des agriculteurs·rices. L'agriculture familiale de subsistance est justement basée sur la complémentarité des fonctions remplies par l'agrobiodiversité. (H3) Cette complémentarité est doublée d'un certain degré de redondance fonctionnelle (e.g., espèces qui remplissent les mêmes fonctions), en particulier pour les fonctions jugées les plus importantes pour les agriculteurs·rices. Cette redondance peut ainsi soutenir un effet d'assurance en cas d'aléas climatiques par exemple. (H4) Il existe peu de différence dans les caractéristiques des hypervolumes occupés par les PC entre sites. Quelle que soit l'identité taxonomique des plantes, leur diversité remplit les mêmes grandes fonctions : nourrir (fonctions liées à la productivité, qualité culinaire), produire des revenus, s'adapter à l'environnement, remplir des fonctions patrimoniales, identitaires et d'attachement (fonctions principales identifiées par M. Demongeot). Je fais l'hypothèse que les variations autour de ce « cœur » seront expliquées par des différences entre des groupes ethniques et des valeurs socio-culturelles très spécifiques (i.e., valeur cérémoniale).

O2 Suivre les dynamiques interannuelles des hypervolumes

Chaque année, les agriculteurs·rices choisissent quelles espèces planter, dans quelles parcelles et en quelles proportions. Cette « réalisation » résulte d'un processus décisionnel qui s'ajuste au cours du temps en fonction des indices perçus de l'environnement climatique, que j'identifierai. Je fais l'hypothèse que pour prendre des décisions, les agriculteurs·rices utilisent des indicateurs climatiques "individuels", issus de l'histoire de vie et des liens propres que chaque individu construit avec son environnement, et des indicateurs "collectifs", échangés au sein de la communauté.

- **Mise en œuvre**

Je mettrai ici à profit les approches d'observatoire que j'ai mis en place au cours du projet ASSET. Sur la base des protocoles d'enquêtes et de mesures annuelles des rendements, nous pourrons, sur chaque site, évaluer comment les choix des agriculteurs·rices, année par

année influencent l'agrobiodiversité, l'hypervolume des fonctions remplies (sur la base des données de O1) et de sa stabilité dans le temps. Ce suivi interannuel permettra de quantifier des changements dans les paniers d'espèces et de variétés, des pratiques associées et ainsi de suivre plus étroitement les processus décisionnels. Je décrirai ainsi les réalisations au temps t en m'appuyant sur une analyse d'enquêtes ethnographiques. Toujours menés en collaboration, les entretiens semi-structurés individuels se feront à la fin de la saison de culture. Nous demanderons aux d'agriculteurs·rices (i) d'énumérer toutes les espèces/variétés qu'ils ont cultivées cette année (ii) dans combien de parcelles et (iii) de décrire les pratiques associées (dates de semis, association, fertilisation). Des questions complémentaires viseront à caractériser ce que ces mêmes agriculteurs·rices projettent de faire l'année suivante et pourquoi. Je m'attacherai en particulier à identifier quels indicateurs du climat sont utilisés (type et source) pour anticiper la saison d'après, et comment la perception des multiples risques dans le processus décisionnel.

Analyses. Les informations pluriannuelles permettront tout d'abord d'évaluer si les agriculteurs·rices ajustent leurs paniers d'espèces et de pratiques en fonction des indicateurs perçus du climat et d'autres facteurs, ou s'ils répètent les mêmes patrons de culture (associations, mêmes espèces, etc.) pour bénéficier d'un effet d'assurance. L'intégration des données dans un Système d'Information Géographique (SIG) permettra (i) de calculer le degré de concordance entre la réalisation et le projet, (ii) d'évaluer comment la variation des décisions prises par les agriculteurs·rices affectent l'agrobiodiversité à l'échelle paysagère par des mesures d'indices de diversité qui reflètent des différences de composition en espèces entre parcelles (beta diversité, Magurran, 2021). Au lieu de comparer les hypervolumes entre sites comme dans O1, je proposerai ici de comparer les hypervolumes des fonctions remplies par la diversité, pour un même site, mais dans le temps afin d'évaluer la stabilité des multifonctions.

O3 Évaluer la vulnérabilité aux changements climatiques futurs du panier et des fonctions associées.

Dans les conditions climatiques futures, comment et quelle agrobiodiversité maintenir ? Sera-t-elle identique à celle cultivée aujourd'hui ? Pour prédire l'impact des changements climatiques sur la production agricole, il est nécessaire de modéliser comment les plantes cultivées répondront à ces nouvelles conditions, c'est-à-dire, de modéliser les changements de leur niche écologique (Hutchinson, 1957). Pour cela, des études récentes utilisent les mêmes méthodes appliquées à la biodiversité « sauvage » (de Sousa et al., 2019 ; Estes et al., 2013 ; Parker & Abatzoglou, 2017). Ces modèles infèrent la combinaison des conditions dans lesquelles une espèce peut se maintenir à partir des liens statistiques entre la répartition actuelle d'une espèce et les conditions environnementales de cette aire (climat, sol, topographie, etc.). Ces relations servent ensuite à prédire où est-ce que les conditions nécessaires à l'espèce seront distribuées dans des conditions climatiques futures. Ainsi, Pironon et al., (2019) estiment que la niche climatique de 29 espèces de plantes devrait changer drastiquement à l'horizon 2070 pour deux scénarii d'émission de gaz à effet de serre du GIEC (RCP4.5 et RCP8.5). Pour l'igname, par exemple, c'est plus de 50% de sa surface cultivée actuelle qui devrait connaître de nouvelles conditions climatiques, non favorables à sa production. Les recherches comme celles de Pironon et al., (2019), ou celle que j'ai encadrée de L. Mahaut (post-doctorante, [Mahaut et al., 2021](#)), adoptent une approche espèce par

espèce (Challinor et al., 2010 ; Kassie et al., 2013 ; D. B. Lobell et al., 2011 ; Ray et al., 2015), sans considérer comment le panier d'espèces dans son ensemble peut changer et comment la redondance, complémentarité entre les multiples fonctions de l'agrobiodiversité peuvent assurer la résilience des changements climatiques.

Dans le cadre du stage de Master 2 de Théo Guillerminet que j'ai co-encadré, nous avons commencé à réfléchir à la manière d'estimer la vulnérabilité des paniers d'espèces cultivées à l'échelle de l'Afrique de l'Ouest face aux changements climatiques. Ce travail a été effectué en collaboration avec de S. Pironon (Kew Garden, Angleterre). En plein confinement et crise COVID-19, nous n'avons pas pu finaliser les travaux de Théo. Cependant, ils serviront de base solide au développement de cette thématique de recherche. Évaluer la vulnérabilité des paniers de PC nous permettra d'estimer les conséquences de changements climatiques sur l'hypervolume des fonctions remplies actuellement. Nous évaluerons la possibilité de remplacer des espèces ou augmenter l'importance locale de certaines autres moins vulnérables pour conserver le volume actuel.

Je propose d'adopter une approche délibérative (Wilson & Howarth, 2002) telle que proposée par Pascual et al., (2018) pour identifier les fonctions que les agriculteurs·rices souhaitent que leur panier d'espèces remplisse dans le futur. Des données issues des analyses de niche climatique seront présentées par les anthropologues et ethnologues avec qui je travaille comme point de départ des discussions. L'approche délibérative, basée sur des discussions de groupe, devrait permettre de dégager un consensus, une vision collective, de ces scénarii futurs.

Références

- Abson, D. J., Fraser, E. D., & Benton, T. G. (2013). Landscape diversity and the resilience of agricultural returns: a portfolio analysis of land-use patterns and economic returns from lowland agriculture. *Agriculture & Food Security*, 2, 2. <https://doi.org/10.1186/2048-7010-2-2>
- Aguilar, J., Gramig, G. G., Hendrickson, J. R., Archer, D. W., Forcella, F., & Liebig, M. a. (2015). Crop species diversity changes in the United States: 1978-2012. *PLoS ONE*, 10, 1–14. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0136580>
- Aistara, G. A. (2014). Latvia's tomato rebellion: nested environmental justice and returning eco-sociality in the post-socialist EU countryside. *Journal of Baltic Studies*, 45(1), 105–130.
- Alarcon, M., Marty, P., & Prévot, A.-C. (2020). Caring for vineyards: Transforming farmer-vine relations and practices in viticulture French farms. *Journal of Rural Studies*, 80, 160–170.
- Allen, K. E., Quinn, C. E., English, C., & Quinn, J. E. (2018). Relational values in agroecosystem governance. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 35, 108–115.
- Alston, J. M., & Sambucci, O. (2019). Grapes in the world economy. *The Grape Genome*, 1–24.
- Altieri, M. A. (2018). *Agroecology: the science of sustainable agriculture*. CRC Press.
- Altieri, M. A., Nicholls, C. I., Henao, A., & Lana, M. A. (2015). Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(3), 869–890. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0285-2>
- Anderson, J. M., & Ingram, J. S. I. (1994). Tropical soil biology and fertility: a handbook of methods. *Soil Science*, 157(4), 265.
- Anderson, W. B., Seager, R., Baethgen, W., Cane, M., & You, L. (2019). *Synchronous crop failures and climate-forced production variability*. July, 1–10.
- Argumedo, A., Song, Y., Khoury, C. K., Hunter, D., Dempewolf, H., Guarino, L., & de Haan, S. (2021). Biocultural diversity for food system transformation under global environmental change. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 685299.
- Auffhammer, M., & Carleton, T. A. (2018). Regional crop diversity and weather shocks in India. *Asian Development Review*, 35(2), 113–130.
- Barot, S., Allard, V., Cantarel, A., Enjalbert, J., Gauffreteau, A., Goldringer, I., Lata, J.-C., Le Roux, X., Niboyet, A., & Porcher, E. (2017). Designing mixtures of varieties for multifunctional agriculture with the help of ecology. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 37, 1–20.
- Barot, S., Lata, J.-C., & Lacroix, G. (2012). Meeting the relational challenge of ecological engineering within ecological sciences. *Ecological Engineering*, 45, 13–23.
- Bartkowski, B., & Bartke, S. (2018). Leverage points for governing agricultural soils: A review of empirical studies of European farmers' decision-making. *Sustainability*, 10(9), 3179.
- Baur, E. (1914). Die Bedeutung der primitiven Kulturrassen und der wilden Verwandten unserer Kulturpflanzen fuer die Pflanzenzuechtung; Jahrbuch Deutsche Landwirt. *Gesell.(Saatzuchtteilung)*, 145–154.
- Beillouin, D., Ben-Ari, T., & Makowski, D. (2019). A global dataset of meta-analyses on crop diversification at the global scale. *Data in Brief*, 103898.
- Beillouin, D., Ben-Ari, T., Malézieux, E., Seufert, V., & Makowski, D. (2021). Positive but variable effects of crop diversification on biodiversity and ecosystem services. *Global Change Biology*, 27(19), 4697–4710.
- Bennett, E. M., Peterson, G. D., & Gordon, L. J. (2009). Understanding relationships among multiple ecosystem services. *Ecology Letters*, 12, 1394–1404. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2009.01387.x>
- Berkes, F., Folke, C., & Gadgil, M. (1994). Traditional ecological knowledge, biodiversity, resilience and sustainability. In *Biodiversity conservation: Problems and policies*. Papers

- from the Biodiversity Programme Beijer International Institute of Ecological Economics Royal Swedish Academy of Sciences (pp. 269–287). Springer.
- Blonder, B. (2018). Hypervolume concepts in niche-and trait-based ecology. *Ecography*, *41*(9), 1441–1455.
- Bonachela, J. A., Pringle, R. M., Sheffer, E., Coverdale, T. C., Guyton, J. A., Caylor, K. K., Levin, S. A., & Tarnita, C. E. (2015). Termite mounds can increase the robustness of dryland ecosystems to climatic change. *Science*, *347*(6222), 651–655.
- Braun, D. C., Moore, J. W., Candy, J., & Bailey, R. E. (2016). Population diversity in salmon: linkages among response, genetic and life history diversity. *Ecography*, *39*(3), 317–328.
- Bren d'Amour, C., Wenz, L., Kalkuhl, M., Christoph Steckel, J., & Creutzig, F. (2016). Teleconnected food supply shocks. *Environmental Research Letters*, *11*(3), 035007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/3/035007>
- Bridgewater, P., & Rotherham, I. D. (2019). A critical perspective on the concept of biocultural diversity and its emerging role in nature and heritage conservation. *People and Nature*, *1*(3), 291–304.
- Brondizio, E. S., O'Brien, K., Bai, X., Biermann, F., Steffen, W., Berkhout, F., Cudennec, C., Lemos, M. C., Wolfe, A., & Palma-Oliveira, J. (2016). Re-conceptualizing the Anthropocene: A call for collaboration. *Global Environmental Change*, *39*, 318–327.
- Byrnes, J. E. K., Gamfeldt, L., Isbell, F., Lefcheck, J. S., Griffin, J. N., Hector, A., Cardinale, B. J., Hooper, D. U., Dee, L. E., & Emmett Duffy, J. (2014). Investigating the relationship between biodiversity and ecosystem multifunctionality: challenges and solutions. *Methods in Ecology and Evolution*, *5*(2), 111–124.
- Cadotte, M. W., Carscadden, K., & Mirotnick, N. (2011). Beyond species: Functional diversity and the maintenance of ecological processes and services. In *Journal of Applied Ecology*. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2011.02048.x>
- Cardinale, B. J., Srivastava, D. S., Emmett Duffy, J., Wright, J. P., Downing, A. L., Sankaran, M., & Jouseau, C. (2006). Effects of biodiversity on the functioning of trophic groups and ecosystems. *Nature*, *443*(7114), 989–992. <http://dx.doi.org/10.1038/nature05202>
- Cardinale, B. J., Wright, J. P., Cadotte, M. W., Carroll, I. T., Hector, A., Srivastava, D. S., Loreau, M., & Weis, J. J. (2007). Impacts of plant diversity on biomass production increase through time because of species complementarity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *104*(46), 18123–18128.
- Carleton, T. A. (2017). Crop-damaging temperatures increase suicide rates in India. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *114*(33), 8746–8751. <https://doi.org/10.1073/pnas.1701354114>
- Challinor, A. J., Simelton, E. S., Fraser, E. D. G., Hemming, D., & Collins, M. (2010). Increased crop failure due to climate change: Assessing adaptation options using models and socio-economic data for wheat in China. *Environmental Research Letters*, *5*, 034012. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/5/3/034012>
- Chan, K. M. A., Gould, R. K., & Pascual, U. (2018). Editorial overview: relational values: what are they, and what's the fuss about? In *Current opinion in environmental sustainability* (Vol. 35, pp. A1–A7). Elsevier.
- Chan, K. M. a, Shaw, M. R., Cameron, D. R., Underwood, E. C., & Daily, G. C. (2006). Conservation planning for ecosystem services. *PLoS Biology*, *4*(11), 2138–2152. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0040379>
- Chaplin-Kramer, R., Chappell, M. J., & Bennett, E. M. (2023). Un-yielding: Evidence for the agriculture transformation we need. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1520*(1), 89–104.
- Chapman, M., & Deplazes-Zemp, A. (2023). 'I owe it to the animals': The bidirectionality of Swiss alpine farmers' relational values. *People and Nature*, *5*(1), 147–161.
- Chavas, J.-P., & Di Falco, S. (2012). On the productive value of crop biodiversity: evidence from the highlands of Ethiopia. *Land Economics*, *88*(1), 58–74.
- Coolsaet, B. (2015). Transformative participation in agrobiodiversity governance: making the case for an environmental justice approach. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, *28*(6), 1089–1104.

- Cottrell, R. S., Nash, K. L., Halpern, B. S., Remenyi, T. A., Corney, S. P., Fleming, A., Fulton, E. A., Hornborg, S., Johne, A., Watson, R. A., & Blanchard, J. L. (2019). *Food production shocks across land and sea*. 2(February). <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0210-1>
- Crippa, M., Solazzo, E., Guizzardi, D., Monforti-Ferrario, F., Tubiello, F. N., & Leip, A. (2021). Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions. *Nature Food*, 2(3), 198–209.
- De Bello, F., Lavorel, S., Díaz, S., Harrington, R., Cornelissen, J. H. C., Bardgett, R. D., Berg, M. P., Cipriotti, P., Feld, C. K., & Hering, D. (2010). Towards an assessment of multiple ecosystem processes and services via functional traits. *Biodiversity and Conservation*, 19, 2873–2893.
- de Bello, F., Lavorel, S., Hallett, L. M., Valencia, E., Garnier, E., Roscher, C., Conti, L., Galland, T., Goberna, M., & Májeková, M. (2021). Functional trait effects on ecosystem stability: assembling the jigsaw puzzle. *Trends in Ecology & Evolution*, 36(9), 822–836.
- Deblauwe, V., Barbier, N., Couteron, P., Lejeune, O., & Bogaert, J. (2008). The global biogeography of semi-arid periodic vegetation patterns. *Global Ecology and Biogeography*, 17(6), 715–723.
- Delsol, R., Loreau, M., & Haegeman, B. (2018). The relationship between the spatial scaling of biodiversity and ecosystem stability. *Global Ecology and Biogeography*, 27(4), 439–449.
- Denevan, W. M. (2003). *Cultivated landscapes of native Amazonia and the Andes*. Oxford University Press on Demand.
- de Sousa, K., van Zonneveld, M., Holmgren, M., Kindt, R., & Ordoñez, J. C. (2019). The future of coffee and cocoa agroforestry in a warmer Mesoamerica. *Scientific Reports*, 9(1), 8828.
- De Souza, K., Kituyi, E., Harvey, B., Leone, M., Murali, K. S., & Ford, J. D. (2015). Vulnerability to climate change in three hot spots in Africa and Asia: key issues for policy-relevant adaptation and resilience-building research. In *Regional Environmental Change* (Vol. 15, pp. 747–753). Springer.
- Deutsch, C. A., Tewksbury, J. J., Tigchelaar, M., Battisti, D. S., Merrill, S. C., Huey, R. B., & Naylor, R. L. (2018). Increase in crop losses to insect pests in a warming climate. *Science*, 361(6405), 916–919.
- Diamond, J. S., Epstein, J. M., Cohen, M. J., McLaughlin, D. L., Hsueh, Y., Keim, R. F., & Duberstein, J. A. (2021). A little relief: Ecological functions and autogenesis of wetland microtopography. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 8(1), e1493.
- Díaz, S., Demissew, S., Carabias, J., Joly, C., Lonsdale, M., Ash, N., Larigauderie, A., Adhikari, J. R., Arico, S., & Báldi, A. (2015). The IPBES Conceptual Framework—connecting nature and people. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 14, 1–16.
- Díaz, S., Pascual, U., Stenseke, M., Martín-López, B., Watson, R. T., Molnár, Z., Hill, R., Chan, K. M. A., Baste, I. A., & Brauman, K. A. (2018). Assessing nature's contributions to people. *Science*, 359(6373), 270–272.
- Dingkuhn, M., Singh, B. B., Clerget, B., Chantreau, J., & Sultan, B. (2006). Past, present and future criteria to breed crops for water-limited environments in West Africa. *Agricultural Water Management*, 80(1–3), 241–261.
- Donohue, I., Hillebrand, H., Montoya, J. M., Petchey, O. L., Pimm, S. L., Fowler, M. S., Healy, K., Jackson, A. L., Lurgi, M., & McClean, D. (2016). Navigating the complexity of ecological stability. *Ecology Letters*, 19(9), 1172–1185.
- Donohue, I., Petchey, O. L., Montoya, J. M., Jackson, A. L., McNally, L., Viana, M., Healy, K., Lurgi, M., O'Connor, N. E., & Emmerson, M. C. (2013). On the dimensionality of ecological stability. *Ecology Letters*, 16(4), 421–429.
- Downing, A. L., Brown, B. L., Perrin, E. M., Keitt, T. H., & Leibold, M. A. (2008). Environmental fluctuations induce scale-dependent compensation and increase stability in plankton ecosystems. *Ecology*, 89(11), 3204–3214.
- Dubs, F., Enjalbert, J., Barot, S., Porcher, E., Allard, V., Pope, C., Gauffreteau, A., Niboyet, A., Pommier, T., & Saint-Jean, S. (2023). Unfolding the link between multiple ecosystem services and bundles of functional traits to design multifunctional crop variety mixtures. *Agronomy for Sustainable Development*, 43(6), 71.

- Eggermont, H., Balian, E., Azevedo, J. M. N., Beumer, V., Brodin, T., Claudet, J., Fady, B., Grube, M., Keune, H., & Lamarque, P. (2015). Nature-based solutions: new influence for environmental management and research in Europe. *GAIA-Ecological Perspectives for Science and Society*, 24(4), 243–248.
- Elias, M., Rival, L., & McKey, D. (2000). Perception and management of cassava (*Manihot esculenta* Crantz) diversity among Makushi Amerindians of Guyana (South America). *Journal of Ethnobiology*, 20(2), 239–265.
- Ellis, E. C., Pascual, U., & Mertz, O. (2019). Ecosystem services and nature's contribution to people: negotiating diverse values and trade-offs in land systems. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 38, 86–94.
- Estes, L. D., Bradley, B. A., Beukes, H., Hole, D. G., Lau, M., Oppenheimer, M. G., Schulze, R., Tadross, M. A., & Turner, W. R. (2013). Comparing mechanistic and empirical model projections of crop suitability and productivity: implications for ecological forecasting. *Global Ecology and Biogeography*, 22(8), 1007–1018.
- Falco, S. Di, & Chavas, J. (2008). Rainfall shocks, resilience, and the effects of crop biodiversity on agroecosystem productivity. *Land Economics*, 84(1), 83–96.
- Fenzi, M., Jarvis, D. I., Reyes, L. M. A., Moreno, L. L., & Tuxill, J. (2017). Longitudinal analysis of maize diversity in Yucatan, Mexico: influence of agro-ecological factors on landraces conservation and modern variety introduction. *Plant Genetic Resources*, 15(1), 51–63.
- Flachs, A. (2019). Planting and performing: Anxiety, aspiration, and “scripts” in Telangana cotton farming. *American Anthropologist*, 121(1), 48–61.
- Foley, J. a, Defries, R., Asner, G. P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S. R., Chapin, F. S., Coe, M. T., Daily, G. C., Gibbs, H. K., Helkowski, J. H., Holloway, T., Howard, E. a, Kucharik, C. J., Monfreda, C., Patz, J. a, Prentice, I. C., Ramankutty, N., & Snyder, P. K. (2005). Global consequences of land use. *Science (New York, N.Y.)*, 309(2005), 570–574. <https://doi.org/10.1126/science.1111772>
- Frison, E. A., Cherfas, J., & Hodgkin, T. (2011). Agricultural biodiversity is essential for a sustainable improvement in food and nutrition security. *Sustainability*, 3, 238–253. <https://doi.org/10.3390/su3010238>
- Garin, G., Fournier, C., Andrieu, B., Houlès, V., Robert, C., & Pradal, C. (2014). A modelling framework to simulate foliar fungal epidemics using functional–structural plant models. *Annals of Botany*, 114(4), 795–812.
- Gaudin, A. C. M., Tolhurst, T. N., Ker, A. P., Janovicek, K., Tortora, C., Martin, R. C., & Deen, W. (2015). Increasing crop diversity mitigates weather variations and improves yield stability. *PLoS ONE*, 10, 1–20. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0113261>
- Gilligan, C. A. (2008). Sustainable agriculture and plant diseases: an epidemiological perspective. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1492), 741–759.
- Giorgi, F., & Lionello, P. (2008). Climate change projections for the Mediterranean region. *Global and Planetary Change*, 63(2), 90–104.
- Gonzalez, A., Germain, R. M., Srivastava, D. S., Filotas, E., Dee, L. E., Gravel, D., Thompson, P. L., Isbell, F., Wang, S., & Kéfi, S. (2020). Scaling-up biodiversity-ecosystem functioning research. *Ecology Letters*, 23(4), 757–776.
- Gordon, L. J., Peterson, G. D., & Bennett, E. M. (2008). Agricultural modifications of hydrological flows create ecological surprises. *Trends in Ecology & Evolution*, 23(4), 211–219.
- Grassini, P., Eskridge, K. M., & Cassman, K. G. (2013). Distinguishing between yield advances and yield plateaus in historical crop production trends. *Nature Communications*, 4(1), 2918.
- Gross, K., Cardinale, B. J., Fox, J. W., Gonzalez, A., Loreau, M., Polley, H. W., Reich, P. B., & Ruijven, J. Van. (2014). Species richness and the temporal stability of biomass production: A new analysis of recent biodiversity experiments. *The American Naturalist*, 183(1), 1–12. <https://doi.org/10.1086/673915>

- Hanisch, M., Schweiger, O., Cord, A. F., Volk, M., & Knapp, S. (2020). Plant functional traits shape multiple ecosystem services, their trade-offs and synergies in grasslands. *Journal of Applied Ecology*, *57*(8), 1535–1550.
- Harlan, H. V. (1936). Problems and results in barley breeding. *US Dept. Agri. Yearbook*, 303–346.
- Harvey, C. A., Rakotobe, Z. L., Rao, N. S., Dave, R., Razafimahatratra, H., Rabarijohn, R. H., Rajaofara, H., & MacKinnon, J. L. (2014). Extreme vulnerability of smallholder farmers to agricultural risks and climate change in Madagascar. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, *369*(1639), 20130089–20130089. <https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0089>
- Hautier, Y., Isbell, F., Borer, E. T., Seabloom, E. W., Harpole, W. S., Lind, E. M., MacDougall, A. S., Stevens, C. J., Adler, P. B., & Alberti, J. (2018). Local loss and spatial homogenization of plant diversity reduce ecosystem multifunctionality. *Nature Ecology & Evolution*, *2*(1), 50–56.
- Hector, A., Hautier, Y., Saner, P., Wacker, L., Bagchi, R., Joshi, J., Scherer-Lorenzen, M., Spehn, E. M., Bazeley-White, E., & Weilenmann, M. (2010). General stabilizing effects of plant diversity on grassland productivity through population asynchrony and overyielding. *Ecology*, *91*(8), 2213–2220.
- Herforth, A., Johns, T., Creed-Kanashiro, H. M., Jones, A. D., Khoury, C. K., Lang, T., Maundu, P., Powell, B., & Reyes-García, V. (2019). *Agrobiodiversity and feeding the world: More of the same will result in more of the same*.
- Herrero, M., Thornton, P. K., Power, B., Bogard, J. R., Remans, R., Fritz, S., Gerber, J. S., Nelson, G., See, L., & Waha, K. (2017). Farming and the geography of nutrient production for human use: a transdisciplinary analysis. *The Lancet Planetary Health*, *1*(1), e33–e42.
- Hill, M. O. (1973). Diversity and evenness: a unifying notation and its consequences. *Ecology*, *54*(2), 427–432.
- Himes, A., & Muraca, B. (2018). Relational values: the key to pluralistic valuation of ecosystem services. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, *35*, 1–7.
- Holling, C. S. (1973). Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, *4*(1), 1–23.
- Horcea-Milcu, A.-I. (2022). Values as leverage points for sustainability transformation: Two pathways for transformation research. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, *57*, 101205.
- Huber, O., de Stefano, R. D., Aymard, G., & Riina, R. (2006). Flora and vegetation of the Venezuelan Llanos: a review. *Neotropical Savannas and Seasonally Dry Forests*, 95–120.
- Iizumi, T., & Ramankutty, N. (2016). Changes in yield variability of major crops for 1981–2010 explained by climate change. *Environmental Research Letters*, *11*(3), 034003.
- Iizumi, T., Yokozawa, M., Sakurai, G., Travasso, M. I., Romanenkov, V., Oettli, P., Newby, T., Ishigooka, Y., & Furuya, J. (2014). Historical changes in global yields: major cereal and legume crops from 1982 to 2006. *Global Ecology and Biogeography*, *23*(3), 346–357.
- Isbell, F. (2015). Agroecology: Agroecosystem diversification. *Nature Plants*, *1*(4), 15041. <https://doi.org/10.1038/nplants.2015.41>
- Isbell, F., Craven, D., Connolly, J., Loreau, M., Schmid, B., Beierkuhnlein, C., Bezemer, T. M., Bonin, C., Bruelheide, H., Luca, E. De, Ebeling, A., Griffin, J. N., Guo, Q., Hautier, Y., Hector, A., Jentsch, A., Kreyling, J., Lanta, V., Manning, P., ... Eisenhauer, N. (2015). Biodiversity increases the resistance of ecosystem productivity to climate extremes. *Nature*, *526*, 574–577. <https://doi.org/10.1038/nature15374>
- Islar, M., Balvanera, P., Kelemen, E., Pascaul, U., Subramanian, S. M., Nakangu, B., Kosmus, M., Nuesiri, E., de Vos, A., & Porter-Bolland, L. (2022). *Methodological Assessment Report on the Diverse Values and Valuation of Nature of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services.: Chapter 6: Policy options and capacity development to operationalize the inclusion of diverse values of nature in decision-making*.

- Jones, C. G., Lawton, J. H., & Shachak, M. (1994). Organisms as ecosystem engineers. In *Ecosystem management* (pp. 130–147). Springer.
- Justus, J. (2007). *Complexity, diversity, and stability*.
- Kareiva, P., Watts, S., McDonald, R., & Boucher, T. (2007). Domesticated nature: shaping landscapes and ecosystems for human welfare. *Science*, 316(5833), 1866–1869.
- Kassie, B. T., Hengsdijk, H., Rötter, R., Kahiluoto, H., Asseng, S., & Van Ittersum, M. (2013). Adapting to climate variability and change: experiences from cereal-based farming in the Central Rift and Kobo Valleys, Ethiopia. *Environmental Management*, 52, 1115–1131.
- Kattge, J., Diaz, S., Lavorel, S., Prentice, I. C., Leadley, P., Bönisch, G., Garnier, E., Westoby, M., Reich, P. B., & Wright, I. J. (2011). TRY—a global database of plant traits. *Global Change Biology*, 17(9), 2905–2935.
- Kerr, R. B., Madsen, S., Stüber, M., Liebert, J., Enloe, S., Borghino, N., Parros, P., Mutyambai, D. M., Prudhon, M., & Wezel, A. (2021). Can agroecology improve food security and nutrition? A review. *Global Food Security*, 29, 100540.
- Khoury, C. K., Bjorkman, A. D., Dempewolf, H., Ramirez-Villegas, J., Guarino, L., Jarvis, A., Rieseberg, L. H., & Struik, P. C. (2014). Increasing homogeneity in global food supplies and the implications for food security. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(11), 4001–4006. <https://doi.org/10.1073/pnas.1313490111>
- Khoury, C. K., Brush, S., Costich, D. E., Curry, H. A., De Haan, S., Engels, J. M. M., Guarino, L., Hoban, S., Mercer, K. L., & Miller, A. J. (2022). Crop genetic erosion: understanding and responding to loss of crop diversity. *New Phytologist*, 233(1), 84–118.
- Kiers, E. T., Leakey, R. R. B., Izac, A.-M., Heinemann, J. A., Rosenthal, E., Nathan, D., & Jiggins, J. (2008). Agriculture at a crossroads. *Science*, 320.
- Kiers, E. T., West, S. A., & Denison, R. F. (2002). Mediating mutualisms: Farm management practices and evolutionary changes in symbiont co-operation. *Journal of Applied Ecology*, 39(5), 745–754.
- Kopp, E. B., Niklaus, P. A., & Wuest, S. E. (2023). Ecological principles to guide the development of crop variety mixtures. *Journal of Plant Ecology*, 16(6), rtad017.
- Kremen, C. (2005). Managing ecosystem services: what do we need to know about their ecology? *Ecology Letters*, 8(5), 468–479.
- Krzywoszynska, A. (2019). Caring for soil life in the Anthropocene: the role of attentiveness in more-than-human ethics. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 44(4), 661–675.
- Laborde, D., Murphy, S., Parent, M., Porciello, J., & Smaller, C. (2020). Ceres2030: Sustainable Solutions to End Hunger—Summary Report. *Cornell University, IFPRI and IISD*.
- Lalou, R., Sultan, B., Muller, B., & Ndonky, A. (2019). *farmers' adaptive capacity in the Sahel?* <https://doi.org/10.1057/s41599-019-0288-8>
- Lange, S., Volkholtz, J., Geiger, T., Zhao, F., Vega, I., Veldkamp, T., Reyer, C. P. O., Warszawski, L., Huber, V., & Jägermeyr, J. (2020). Projecting exposure to extreme climate impact events across six event categories and three spatial scales. *Earth's Future*, 8(12), e2020EF001616.
- Leclerc, C., & Coppens d'Eeckenbrugge, G. (2011). Social organization of crop genetic diversity. The Gx Ex S interaction model. *Diversity*, 4(1), 1–32.
- Lesk, C., Rowhani, P., & Ramankutty, N. (2016). Influence of extreme weather disasters on global crop production. *Nature*, 529(January), 84–88. <https://doi.org/10.1038/nature16467>
- Li, C., Hoffland, E., Kuyper, T. W., Yu, Y., Zhang, C., Li, H., Zhang, F., & van der Werf, W. (2020). Syndromes of production in intercropping impact yield gains. *Nature Plants*, 6(6), 653–660.
- Li, K., Pan, J., Xiong, W., Xie, W., & Ali, T. (2022). The impact of 1.5 C and 2.0 C global warming on global maize production and trade. *Scientific Reports*, 12(1), 17268.
- Lin, B. B. (2011). Resilience in Agriculture through Crop Diversification: Adaptive Management for Environmental Change. *BioScience*, 61(3), 183–193. <https://doi.org/10.1525/bio.2011.61.3.4>

- Lobell, D. B., Schlenker, W., & Costa-Roberts, J. (2011). Climate Trends and Global Crop Production Since 1980. *Science*, 333(6042), 616 LP – 620. <http://science.sciencemag.org/content/333/6042/616.abstract>
- Lobell, D., & Field, C. B. (2007). Global scale climate – crop yield relationships and the impacts of recent warming. *Environmental Research Letters*, 2(1). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/2/1/014002>
- Loreau, M., Barbier, M., Filotas, E., Gravel, D., Isbell, F., Miller, S. J., Montoya, J. M., Wang, S., Aussenac, R., & Germain, R. (2021). Biodiversity as insurance: from concept to measurement and application. *Biological Reviews*, 96(5), 2333–2354.
- Loreau, M., & Mazancourt, C. De. (2008). Species asynchrony and its drivers: neutral and nonneutral. *The American Naturalist*, 172(2), E48–E66. <https://doi.org/10.1086/589746>
- Loreau, M., Mouquet, N., & Gonzalez, A. (2003). Biodiversity as spatial insurance in heterogeneous landscapes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. <https://doi.org/10.1007/s11229-006-9156-3>
- Louarn, G., Barillot, R., Combes, D., & Escobar-Gutiérrez, A. (2020). Towards intercrop ideotypes: non-random trait assembly can promote overyielding and stability of species proportion in simulated legume-based mixtures. *Annals of Botany*, 126(4), 671–685.
- Magurran, A. E. (2021). Measuring biological diversity. *Current Biology*, 31(19), R1174–R1177.
- Mahon, N., McGuire, S., & Islam, M. M. (2016). Why bother with Bere? An investigation into the drivers behind the cultivation of a landrace barley. *Journal of Rural Studies*, 45, 54–65.
- Manning, P., Van Der Plas, F., Soliveres, S., Allan, E., Maestre, F. T., Mace, G., Whittingham, M. J., & Fischer, M. (2018). Redefining ecosystem multifunctionality. *Nature Ecology & Evolution*, 2(3), 427–436.
- Martin, A. R., & Isaac, M. E. (2018). Functional traits in agroecology: Advancing description and prediction in agroecosystems. *Journal of Applied Ecology*. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13039>
- Martinez-Garcia, R., Cabal, C., Bonachela, J. A., Calabrese, J., Hernández-García, E., López, C., & Tarnita, C. E. (2021). *Spatial self-organization of vegetation in water-limited systems: mechanistic causes, empirical tests, and ecosystem-level consequences*.
- Matson, P. a, Parton, W. J., Power, a G., & Swift, M. J. (1997). Agricultural intensification and ecosystem properties. *Science (New York, N.Y.)*, 277(1997), 504–509. <https://doi.org/10.1126/science.277.5325.504>
- McKey, D., Rodrigues, L., Ruiz-Pérez, J., Blatrix, R., & Rostain, S. (2022). Thinking Outside the Continent and Outside the Box: Cross-Continental Comparative Studies Can Enrich Studies of Pre-Columbian Raised-Field Agriculture. *Journal of Ethnobiology*, 42(2), 152–179.
- McKey, D., Rostain, S., Iriarte, J., Glaser, B., Birk, J. J., Holst, I., & Renard, D. (2010). Pre-Columbian agricultural landscapes, ecosystem engineers, and self-organized patchiness in Amazonia. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 200908925.
- McLennan, M. (2021). *The Global Risks Report 2021 16th Edition*.
- Mémoli, F. (2008). Gromov-Hausdorff distances in Euclidean spaces. *2008 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, 1–8.
- Meron, E. (2018). From patterns to function in living systems: dryland ecosystems as a case study. *Annual Review of Condensed Matter Physics*, 9, 79–103.
- Mertz, O., Mbow, C., Reenberg, A., & Diouf, A. (2009). Farmers' perceptions of climate change and agricultural adaptation strategies in rural sahel. *Environmental Management*. <https://doi.org/10.1007/s00267-008-9197-0>
- Milla, R., Osborne, C. P., Turcotte, M. M., & Violle, C. (2015). Plant domestication through an ecological lens. *Trends in Ecology & Evolution*, 30(8), 463–469.
- Monfreda, C., Ramankutty, N., & Foley, J. A. (2008). Farming the planet: 2. Geographic distribution of crop areas, yields, physiological types, and net primary production in the year 2000. *Global Biogeochemical Cycles*, 22(1).

- Montazeaud, G., Violle, C., Fréville, H., Luquet, D., Ahmadi, N., Courtois, B., Bouhaba, I., & Fort, F. (2018). Crop mixtures: does niche complementarity hold for belowground resources? An experimental test using rice genotypic pairs. *Plant and Soil*, 424(1–2), 187–202.
- Newbold, T., Hudson, L. N., Hill, S. L. L., Contu, S., Lysenko, I., Senior, R. A., Börger, L., Bennett, D. J., Choimes, A., & Collen, B. (2015). Global effects of land use on local terrestrial biodiversity. *Nature*, 520(7545), 45.
- Nicholson, C. C., Emery, B. F., & Niles, M. T. (2021). Global relationships between crop diversity and nutritional stability. *Nature Communications*, 12(1), 5310.
- Noack, F., Riekhof, M.-C., & Di Falco, S. (2019). Droughts, biodiversity, and rural incomes in the tropics. *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 6(4), 823–852.
- Nyantakyi-Frimpong, H. (2021). Climate change, women’s workload in smallholder agriculture, and embodied political ecologies of undernutrition in northern Ghana. *Health & Place*, 68, 102536.
- Osborne, T., & Wheeler, T. (2013). Evidence for a climate signal in trends of global crop yield variability over the past 50 years. *Environmental Research Letters*, 8(2), 24001. <http://stacks.iop.org/1748-9326/8/i=2/a=024001>
- Ouédraogo, M., Zougmore, R., Moussa, A. S., Partey, S. T., Thornton, P. K., Kristjanson, P., Ndour, N. Y. B., Somé, L., Naab, J., & Boureima, M. (2017). Markets and climate are driving rapid change in farming practices in Savannah West Africa. *Regional Environmental Change*, 17, 437–449.
- Parker, L. E., & Abatzoglou, J. T. (2017). Comparing mechanistic and empirical approaches to modeling the thermal niche of almond. *International Journal of Biometeorology*, 61, 1593–1606.
- Parr, C. L., Lehmann, C. E. R., Bond, W. J., Hoffmann, W. A., & Andersen, A. N. (2014). Tropical grassy biomes: misunderstood, neglected, and under threat. *Trends in Ecology & Evolution*, 29(4), 205–213.
- Pasari, J. R., Levi, T., Zavaleta, E. S., & Tilman, D. (2013). Several scales of biodiversity affect ecosystem multifunctionality. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(25), 10219–10222.
- Pascual, U., Balvanera, P., Díaz, S., Pataki, G., Roth, E., Stenseke, M., Watson, R. T., Dessane, E. B., Islar, M., & Kelemen, E. (2017). Valuing nature’s contributions to people: the IPBES approach. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 26, 7–16.
- Pascual, U., Levy, P. B., Christie, M., & Baptiste, B. (2022). *Summary for policymakers of the methodological assessment of the diverse values and valuation of nature of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES)*.
- Patz, J. A., Campbell-Lendrum, D., Holloway, T., & Foley, J. A. (2005). Impact of regional climate change on human health. *Nature*, 438(7066), 310.
- Perreault, T. (2005). Why chacras (swidden gardens) persist: agrobiodiversity, food security, and cultural identity in the Ecuadorian Amazon. *Human Organization*, 64(4), 327–339.
- Pinto-Correia, T., McKee, A., & Guimarães, H. (2014). Transdisciplinarity in deriving sustainability pathways for agriculture. *Transition Pathways Towards Sustainability in European Agriculture*. Edited by: LA. Sutherland, I. Darnhofer, G. Wilson and L. Zagata, 171–188.
- Pironon, S., Etherington, T. R., Borrell, J. S., Kühn, N., Macias-Fauria, M., Ondo, I., Tovar, C., Wilkin, P., & Willis, K. J. (2019). Potential adaptive strategies for 29 sub-Saharan crops under future climate change. *Nature Climate Change*, 9(10), 758–763.
- Polley, H. W., Isbell, F. I., & Wilsey, B. J. (2013). Plant functional traits improve diversity-based predictions of temporal stability of grassland productivity. *Oikos*, 122(9), 1275–1282.
- Porcher, V., Li, X., Carrière, S. M., Alvarez-Fernandez, S., Cresson, D., Reyes-García, V., & Gallois, S. (2023). *As proficient as adults: Distribution of children’s knowledge of wild edible plants in the arid Mahafaly region, Madagascar*.

- Porcuna-Ferrer, A., Labeyrie, V., Alvarez-Fernandez, S., Calvet-Mir, L., Faye, N. F., Ouadah, S., & Reyes-García, V. (2023). Crop biocultural traits shape seed networks: Implications for social-ecological resilience in south eastern Senegal. *Agricultural Systems*, 211, 103750.
- Pörtner, H. O., Roberts, D. C., Adams, H., Adler, C., Aldunce, P., Ali, E., Begum, R. A., Betts, R., Kerr, R. B., & Biesbroek, R. (2022). *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability*. IPCC.
- Prieto, I., Violle, C., Barre, P., Durand, J.-L., Ghesquiere, M., & Litrico, I. (2015). Complementary effects of species and genetic diversity on productivity and stability of sown grasslands. *Nature Plants*, 1(4), 15033. <https://doi.org/10.1038/nplants.2015.33>
- Pringle, R. M., Doak, D. F., Brody, A. K., Jocqué, R., & Palmer, T. M. (2010). Spatial pattern enhances ecosystem functioning in an African savanna. *PLoS Biology*, 8(5), e1000377.
- Pringle, R. M., & Tarnita, C. E. (2017). Spatial self-organization of ecosystems: integrating multiple mechanisms of regular-pattern formation. *Annual Review of Entomology*, 62, 359–377.
- Priyadarshana, T. S., Martin, E. A., Sirami, C., Woodcock, B. A., Goodale, E., Martínez-Núñez, C., Lee, M., Pagani-Núñez, E., Raderschall, C. A., & Brotons, L. (2024). Crop and landscape heterogeneity increase biodiversity in agricultural landscapes: A global review and meta-analysis. *Ecology Letters*, 27(3), e14412.
- Puma, M. J., Bose, S., Chon, S. Y., & Cook, B. I. (2015). Assessing the evolving fragility of the global food system. *Environmental Management*, 10, 024007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/2/024007>
- Qualset, C., McGuire, P., & Warburton, M. (1995). In California: 'Agrobiodiversity' key to agricultural productivity. *California Agriculture*, 49(6), 45–49.
- Quétier, F., Lavorel, S., Thuiller, W., & Davies, I. (2007). Plant-trait-based modeling assessment of ecosystem-service sensitivity to land-use change. *Ecological Applications*, 17(8), 2377–2386.
- Raseduzzaman, M., & Jensen, E. S. (2017). Does intercropping enhance yield stability in arable crop production? A meta-analysis. *European Journal of Agronomy*, 91, 25–33.
- Rawluk, A., Ford, R., Anderson, N., & Williams, K. (2019). Exploring multiple dimensions of values and valuing: a conceptual framework for mapping and translating values for social-ecological research and practice. *Sustainability Science*, 14(5), 1187–1200. <https://doi.org/10.1007/s11625-018-0639-1>
- Rawluk, A., Ford, R. M., Neolaka, F. L., & Williams, K. J. (2017). Public values for integration in natural disaster management and planning: A case study from Victoria, Australia. *Journal of Environmental Management*, 185, 11–20.
- Ray, D. K., Gerber, J. S., Macdonald, G. K., & West, P. C. (2015). Climate variation explains a third of global crop yield variability. *Nature Communications*, 6, 1–9. <https://doi.org/10.1038/ncomms6989>
- Reich, P. B., Tilman, D., Isbell, F., Mueller, K., Hobbie, S. E., Flynn, D. F. B., & Eisenhauer, N. (2012). Impacts of biodiversity loss escalate through time as redundancy fades. *Science*, 336(6081), 589–592.
- Renard, D., Iriarte, J., Birk, J. J., Rostain, S., Glaser, B., & McKey, D. (2012). Ecological engineers ahead of their time: The functioning of pre-Columbian raised-field agriculture and its potential contributions to sustainability today. *Ecological Engineering*, 45, 30–44. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.03.007>
- Reyes-García, V., Fernández-Llamazares, Á., García-del-Amo, D., & Cabeza, M. (2020). Operationalizing local ecological knowledge in climate change research: Challenges and opportunities of citizen science. *Changing Climate, Changing Worlds: Local Knowledge and the Challenges of Social and Ecological Change*, 183–197.
- Ricciardi, V., Mehrabi, Z., Wittman, H., James, D., & Ramankutty, N. (2021). Higher yields and more biodiversity on smaller farms. *Nature Sustainability*, 4(7), 651–657.
- Rietkerk, M., Dekker, S. C., De Ruiter, P. C., & van de Koppel, J. (2004). Self-organized patchiness and catastrophic shifts in ecosystems. *Science*, 305(5692), 1926–1929.

- Robert, C., Bancal, M., Ney, B., & Lannou, C. (2005). Wheat leaf photosynthesis loss due to leaf rust, with respect to lesion development and leaf nitrogen status. *New Phytologist*, *165*(1), 227–241.
- Rodríguez, J. P., Beard, T. D., Bennett, E. M., Cumming, G. S., Cork, S. J., Agard, J., Dobson, A. P., & Peterson, G. D. (2006). Trade-offs across space, time, and ecosystem services. *Ecology and Society*, *11*(1), 28. <https://doi.org/10.2307/2390206>
- Rotz, S., & Fraser, E. D. G. (2015). Resilience and the industrial food system: analyzing the impacts of agricultural industrialization on food system vulnerability. *Journal of Environmental Studies and Sciences*, *5*, 459–473. <https://doi.org/10.1007/s13412-015-0277-1>
- Rusch, A., Chaplin-Kramer, R., Gardiner, M. M., Hawro, V., Holland, J., Landis, D., Thies, C., Tscharnke, T., Weisser, W. W., & Winqvist, C. (2016). Agricultural landscape simplification reduces natural pest control: A quantitative synthesis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *221*, 198–204.
- Samberg, L. H., Gerber, J. S., Ramankutty, N., Herrero, M., & West, P. C. (2016). *Subnational distribution of average farm size and smallholder contributions to global food production*. *Subnational distribution of average farm size and smallholder contributions to global food production*.
- Sánchez, A. C., Kamau, H. N., Grazioli, F., & Jones, S. K. (2022). Financial profitability of diversified farming systems: A global meta-analysis. *Ecological Economics*, *201*, 107595.
- Santos, J. A., Fraga, H., Malheiro, A. C., Moutinho-Pereira, J., Dinis, L.-T., Correia, C., Moriondo, M., Leolini, L., Dibari, C., & Costafreda-Aumedes, S. (2020). A review of the potential climate change impacts and adaptation options for European viticulture. *Applied Sciences*, *10*(9), 3092.
- Savary, S., Willcoquet, L., Pethybridge, S. J., Esker, P., McRoberts, N., & Nelson, A. (2019). The global burden of pathogens and pests on major food crops. *Nature Ecology & Evolution*, *3*(3), 430–439.
- Scherr, S. J., & McNeely, J. A. (2007). Biodiversity conservation and agricultural sustainability: towards a new paradigm of 'ecoagriculture' landscapes. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, *363*(1491), 477–494.
- Schlenker, W., & Lobell, D. B. (2010). Robust negative impacts of climate change on African agriculture. *Environmental Research Letters*, *5*(1), 014010. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/5/1/014010>
- Schrodte, F., Kattge, J., Shan, H., Fazayeli, F., Joswig, J., Banerjee, A., Reichstein, M., Bönisch, G., Díaz, S., & Dickie, J. (2015). BHPMF—a hierarchical Bayesian approach to gap-filling and trait prediction for macroecology and functional biogeography. *Global Ecology and Biogeography*, *24*(12), 1510–1521.
- Scurlock, J. M. O., Johnson, K., & Olson, R. J. (2002). Estimating net primary productivity from grassland biomass dynamics measurements. *Global Change Biology*, *8*(8), 736–753.
- Sethi, S. A., Reimer, M., & Knapp, G. (2014). Alaskan fishing community revenues and the stabilizing role of fishing portfolios. *Marine Policy*, *48*, 134–141.
- Sherren, K., & Verstraten, C. (2013). What can photo-elicitation tell us about how maritime farmers perceive wetlands as climate changes? *Wetlands*, *33*, 65–81.
- Sirami, C., Gross, N., Baillod, A. B., Bertrand, C., Carrié, R., Hass, A., Henckel, L., Miguet, P., Vuillot, C., & Alignier, A. (2019). Increasing crop heterogeneity enhances multitrophic diversity across agricultural regions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *116*(33), 16442–16447.
- Soti, V., Thiaw, I., Debaly, Z. M., Sow, A., Diaw, M., Fofana, S., Diakhate, M., Thiaw, C., & Brévault, T. (2019). Effect of landscape diversity and crop management on the control of the millet head miner, *Heliocheilus albipunctella* (Lepidoptera: Noctuidae) by natural enemies. *Biological Control*, *129*, 115–122.
- Sultan, B., & Gaetani, M. (2016). Agriculture in West Africa in the Twenty-first Century: climate change and impacts scenarios, and potential for adaptation. *Frontiers in Plant Science*, *7*.

- Sultan, B., Lalou, R., Oumarou, A., Soumaré, M. A., & Sanni, A. M. (2017). *Les sociétés rurales face aux changements climatiques et environnementaux en Afrique de l'Ouest*. IRD éditions.
- Suter, M., Huguenin-Elie, O., & Lüscher, A. (2021). Multispecies for multifunctions: combining four complementary species enhances multifunctionality of sown grassland. *Scientific Reports*, *11*(1), 3835.
- Swift, M. J., Izac, A.-M., & van Noordwijk, M. (2004). Biodiversity and ecosystem services in agricultural landscapes—are we asking the right questions? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *104*(1), 113–134.
- Tamburini, G., Bommarco, R., Wanger, T. C., Kremen, C., Van Der Heijden, M. G. A., Liebman, M., & Hallin, S. (2020a). Agricultural diversification promotes multiple ecosystem services without compromising yield. *Science Advances*, *6*(45), eaba1715.
- Tamburini, G., Bommarco, R., Wanger, T. C., Kremen, C., Van Der Heijden, M. G. A., Liebman, M., & Hallin, S. (2020b). Agricultural diversification promotes multiple ecosystem services without compromising yield. *Science Advances*, *6*(45), eaba1715.
- Thakur, M. P., van der Putten, W. H., Wilschut, R. A., Veen, G. F. C., Kardol, P., van Ruijven, J., Allan, E., Roscher, C., van Kleunen, M., & Bezemer, T. M. (2021). Plant–soil feedbacks and temporal dynamics of plant diversity–productivity relationships. *Trends in Ecology & Evolution*, *36*(7), 651–661.
- Thant, A. A., Teutscherova, N., Vazquez, E., Kalousova, M., Phyto, A., Singh, R. K., & Lojka, B. (2020). On-farm rice diversity and farmers' preferences for varietal attributes in Ayeyarwady Delta, Myanmar. *Journal of Crop Improvement*, *34*(4), 549–570.
- Thiault, L., Mora, C., Cinner, J. E., Cheung, W. W. L., Graham, N. A. J., Januchowski-Hartley, F. A., Mouillot, D., Sumaila, U. R., & Claudet, J. (2019). Escaping the perfect storm of simultaneous climate change impacts on agriculture and marine fisheries. *Science Advances*, *5*(11), eaaw9976.
- Tilman, D. (1999). The ecological consequences of changes in biodiversity: a search for general principles. *Ecology*, *80*(5), 1455–1474.
- Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R., & Polasky, S. (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, *418*, 671–677.
- Tilman, D., & Downing, J. A. (1994). Biodiversity and stability in grasslands. *Nature*, *367*, 363–365.
- Tilman, D., Fargione, J., Wolff, B., D'antonio, C., Dobson, A., Howarth, R., Schindler, D., Schlesinger, W. H., Simberloff, D., & Swackhamer, D. (2001). Forecasting agriculturally driven global environmental change. *Science*, *292*(5515), 281–284.
- Tilman, D., Lehman, C. L., Bristow, C. E., Tilman, D., Lehman, C. L., & Bristow, C. E. (1998). Diversity-stability relationships: Statistical inevitability or ecological consequence? *The American Naturalist*, *151*(3), 277–282.
- Tittonell, P., & Giller, K. E. (2013). When yield gaps are poverty traps: The paradigm of ecological intensification in African smallholder agriculture. *Field Crops Research*, *143*, 76–90.
- Tscharntke, T., Clough, Y., Bhagwat, S. A., Buchori, D., Faust, H., Hertel, D., Hölscher, D., Jührbandt, J., Kessler, M., & Perfecto, I. (2011). Multifunctional shade-tree management in tropical agroforestry landscapes—a review. *Journal of Applied Ecology*, *48*(3), 619–629.
- Tzuk, O., Uecker, H., & Meron, E. (2020). The role of spatial self-organization in the design of agroforestry systems. *Plos One*, *15*(7), e0236325.
- UN General Assembly. (2015). Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. *New York: United Nations*, 1.
- Urruty, N., Deveaud, T., Guyomard, H., & Boiffin, J. (2016). Impacts of agricultural land use changes on pesticide use in French agriculture. *European Journal of Agronomy*, *80*, 113–123.
- Van der Linden, P., & Mitchell editors, J. F. B. (2009). *ENSEMBLES: Climate change and its impacts-Summary of research and results from the ENSEMBLES project*.

- Van Leeuwen, C., Destrac-Irvine, A., Dubernet, M., Duchêne, E., Gowdy, M., Marguerit, E., Pieri, P., Parker, A., De Resseguier, L., & Ollat, N. (2019). An update on the impact of climate change in viticulture and potential adaptations. *Agronomy*, 9(9), 514.
- Velasquez, E., Pelosi, C., Brunet, D., Grimaldi, M., Martins, M., Rendeiro, A. C., Barrios, E., & Lavelle, P. (2007). This ped is my ped: visual separation and near infrared spectra allow determination of the origins of soil macroaggregates. *Pedobiologia*, 51(1), 75–87.
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., López-Moreno, J. I., Angulo, M., & El Kenawy, A. (2010). A new global 0.5 gridded dataset (1901–2006) of a multiscalar drought index: comparison with current drought index datasets based on the Palmer Drought Severity Index. *Journal of Hydrometeorology*, 11(4), 1033–1043.
- Villéger, S., Mason, N. W. H., & Moullot, D. (2008). New multidimensional functional diversity indices for a multifaceted framework in functional ecology. *Ecology*, 89(8), 2290–2301.
- Violle, C., Navas, M., Vile, D., Kazakou, E., Fortunel, C., Hummel, I., & Garnier, E. (2007). Let the concept of trait be functional! *Oikos*, 116(5), 882–892.
- Wang, S., Lamy, T., Hallett, L. M., & Loreau, M. (2019). Stability and synchrony across ecological hierarchies in heterogeneous metacommunities: linking theory to data. *Ecography*, 42(6), 1200–1211.
- Wang, S., & Loreau, M. (2014). Ecosystem stability in space: α , β and γ variability. *Ecology Letters*. <https://doi.org/10.1111/ele.12292>
- Wang, S., Loreau, M., Arnoldi, J.-F., Fang, J., Rahman, K. A., Tao, S., & de Mazancourt, C. (2017). An invariability-area relationship sheds new light on the spatial scaling of ecological stability. *Nature Communications*, 8(1), 15211.
- Wezel, A., Herren, B. G., Kerr, R. B., Barrios, E., Gonçalves, A. L. R., & Sinclair, F. (2020). Agroecological principles and elements and their implications for transitioning to sustainable food systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 40, 1–13.
- Willett, W., Rockström, J., Loken, B., Springmann, M., Lang, T., Vermeulen, S., Garnett, T., Tilman, D., DeClerck, F., & Wood, A. (2019). Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. *The Lancet*, 393(10170), 447–492.
- Williams, J. W., & Jackson, S. T. (2007). Novel climates, no-analog communities, and ecological surprises. *Frontiers in Ecology and the Environment* 2007 5:9, 475-482. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5: 9, 475–482. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2007\)5\[475:NCNCAE\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2007)5[475:NCNCAE]2.0.CO;2)
- Wilson, M. A., & Howarth, R. B. (2002). Discourse-based valuation of ecosystem services: establishing fair outcomes through group deliberation. *Ecological Economics*, 41(3), 431–443.
- Wolkovich, E. M., García de Cortázar-Atauri, I., Morales-Castilla, I., Nicholas, K. A., & Lacombe, T. (2018). From Pinot to Xinomavro in the world's future wine-growing regions. *Nature Climate Change*, 8(1), 29–37.
- Wood, S. A., Karp, D. S., DeClerck, F., Kremen, C., Naeem, S., & Palm, C. A. (2015). Functional traits in agriculture: agrobiodiversity and ecosystem services. *Trends in Ecology & Evolution*, 30(9), 531–539.
- Yachi, S., & Loreau, M. (1999). Biodiversity and ecosystem productivity in a fluctuating environment: The insurance hypothesis. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 96(4), 1463–1468. <https://doi.org/10.1073/pnas.96.4.1463>
- Yokamo, S. (2020). Adoption of improved agricultural technologies in developing countries: literature review. *Int. J. Food Sci. Agric*, 4(2), 183–190.
- Zaveri, E., & Lobell, D. (2019). The role of irrigation in changing wheat yields and heat sensitivity in India. *Nature Communications*, 10(1), 4144.
- Zhang, W., Ricketts, T. H., Kremen, C., Carney, K., & Swinton, S. M. (2007). Ecosystem services and dis-services to agriculture. *Ecological Economics*, 64(2), 253–260.
- Zhou, D., Xiao, J., Frohling, S., Liu, S., Zhang, L., Cui, Y., & Zhou, G. (2021). Croplands intensify regional and global warming according to satellite observations. *Remote Sensing of Environment*, 264, 112585.

Zhu, Y., Chen, H., Fan, J., Wang, Y., Li, Y., Chen, J., Fan, J., Yang, S., Hu, L., Leung, H., Mew, T. W., Teng, P. S., Wang, Z., & Mundt, C. C. (2000). Genetic diversity and disease control in rice. *Nature*, *406*(6797), 718–722. <http://dx.doi.org/10.1038/35021046>

Zimmerer, K. S. (2010). Biological diversity in agriculture and global change. *Annual Review of Environment and Resources*, *35*, 137–166.

ARTICLES CHOISIS

National food production stabilized by crop diversity

Delphine Renard^{1,2*} & David Tilman^{1,3}

Increasing global food demand, low grain reserves and climate change threaten the stability of food systems on national to global scales^{1–5}. Policies to increase yields, irrigation and tolerance of crops to drought have been proposed as stability-enhancing solutions^{1,6,7}. Here we evaluate a complementary possibility—that greater diversity of crops at the national level may increase the year-to-year stability of the total national harvest of all crops combined. We test this crop diversity–stability hypothesis using 5 decades of data on annual yields of 176 crop species in 91 nations. We find that greater effective diversity of crops at the national level is associated with increased temporal stability of total national harvest. Crop diversity has stabilizing effects that are similar in magnitude to the observed destabilizing effects of variability in precipitation. This greater stability reflects markedly lower frequencies of years with sharp harvest losses. Diversity effects remained robust after statistically controlling for irrigation, fertilization, precipitation, temperature and other variables, and are consistent with the variance-scaling characteristics of individual crops required by theory^{8,9} for diversity to lead to stability. Ensuring stable food supplies is a challenge that will probably require multiple solutions. Our results suggest that increasing national effective crop diversity may be an additional way to address this challenge.

During the last decade, drought and extreme heat have caused grain yields to decline in some of the world's major agricultural regions, including Australia (2006–2007)¹⁰, Russia (2010)¹¹ and the United States (2012)¹². Resultant increases in global grain prices⁴ have worsened access to food, especially for the world's poorest people^{11,13,14}. Increasing global crop demand, biofuel mandates and weather-related crop failures can lower grain reserves and increase their annual variability, which increases the sensitivity of food prices to shocks^{4,15}. For instance, during the 2008 food crisis—which contributed to political instability in some nations^{14,16,17}—global grain stocks fell to just 18% of annual global demand². Because future climatic conditions¹⁸ may cause crop production to become less stable¹, policies and actions are needed to better assure the stability of food supplies on national to global scales.

Different types of policies could increase stability and lessen spikes in food prices; these include using international trade^{7,19} and food subsidies¹⁹ to compensate for national crop failures; increasing national yields and reserves; and decreasing national yield fluctuations through the expansion of irrigation or development of drought-resistant crop varieties^{1,6,7}. Here, we evaluate a potentially complementary strategy: that growing a more diverse suite of crop species and/or crop groups within each nation might increase the year-to-year stability of national total annual harvest. We term this the crop diversity–stability hypothesis.

Although ecological field experiments have shown that greater plant diversity leads to greater ecosystem productivity and stability^{9,20,21}, those experiments used non-agricultural perennial plants grown in intermingled mixtures designed to mimic natural ecosystems. By contrast, most crops are annual plants grown in monocultures, calling

into question the hypothesis that increased crop diversity might lead to greater year-to-year stability of what we term 'national yield' (defined as the summed annual kilocalorie (kcal) harvest of all edible crops in a nation, divided by the total hectares of cropland). The diversity–stability hypothesis is based on the portfolio effect^{8,9}, a mathematical theory that predicts the conditions for which the mean (or sum) of random and independent variables would be progressively more stable as more variables are averaged (or summed). When applied to the mix of crops harvested in a nation, this theory gives the conditions for which greater crop diversity would be expected to lead to greater year-to-year temporal stability of the national yield.

We test the crop diversity–stability hypothesis using 50 years (1961–2010) of annual harvest data on 176 crop species for each of 91 populous nations from the FAOSTAT database (Extended Data Table 1). Consultation with the FAO (Food and Agriculture Organization)²² led to exclusion of five nations with low-quality data (Methods). Temporal stability, S , of national yield is defined as $S = \mu/\sigma$, in which μ is mean national yield (kcal ha⁻¹) for a period of years and σ the year-to-year temporal standard deviation for this period⁸. We calculate S for each of five consecutive ten-year intervals. We use the Shannon information index (H' ; see Methods) to quantify crop species diversity and crop group diversity. For crop group diversity, we combined crops into seven crop groups (cereals, vegetables, fruits, pulses, oil crops, sugar crops, stimulants and spices). H' weights each crop species or each crop group in a nation by the proportion of total cropland each occupies. Converting the data from log to linear form—by taking the exponential of H' —gives 'effective' crop species or group diversity, which is the number of equally abundant crop species or groups that are required to obtain the observed H' value. Effective diversity is higher when more crop species, or groups, are grown and when they are more evenly abundant (Extended Data Fig. 1).

We use linear regression to analyse the dependence of national yield stability, mean yield and its temporal standard deviation on effective crop group diversity or, in separate analyses, on effective crop species diversity. We statistically control for mean growing-season precipitation and temperature, or for the year-to-year temporal instability of growing season precipitation and temperature (derived from Climate Research Unit data), as well as for rates of fertilization and irrigation (from FAOSTAT) and warfare (Center for Systematic Peace, Extended Data Table 1).

In all analyses, including many variants (Methods), temporal stability of national yield strongly increases with effective crop group and species diversity, and with irrigation (Fig. 1a, b, Extended Data Fig. 2 and Extended Data Table 2 a, b). Small increases in stability lead to greatly decreased probabilities of years with major declines in national yield (Fig. 2). On average, a nation with a mean stability of 5 experiences a national yield decline of more than 25% once every 8 years (probability of 0.16; Fig. 2), whereas nations with stabilities of 7.5, 10 or 15 have yield declines of more than 25% only once every 21, 54 or 123 years, respectively (probabilities of 0.048, 0.0215 and 0.0081, respectively; Fig. 2).

¹Bren School of Environmental Science and Management, University of California Santa Barbara, Santa Barbara, CA, USA. ²CEFE, CNRS, University of Montpellier, University Paul Valéry Montpellier 3, EPHE, IRD, Montpellier, France. ³Department of Ecology, Evolution and Behavior, University of Minnesota, St Paul, MN, USA. *e-mail: delphinerenard@hotmail.fr

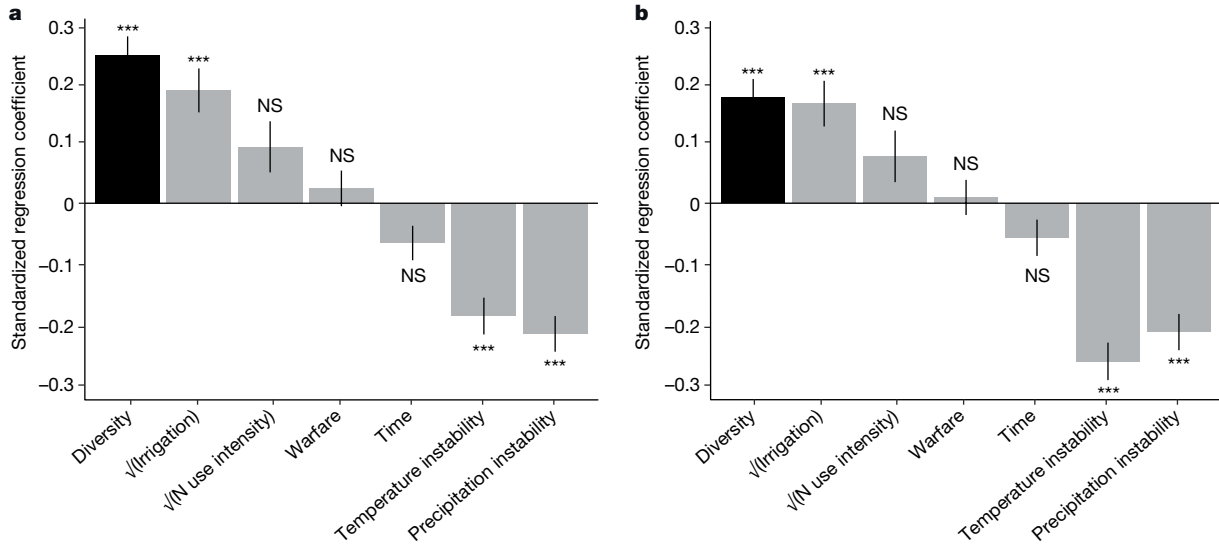


Fig. 1 | Determinants of national caloric yield stability. Regression coefficients (\pm s.e.) show the magnitude of the effect of each variable in a multiple regression of $\log_e(\text{national yield stability})$. **a**, Regression coefficients using effective crop group diversity ($n = 437$). **b**, Regression coefficients using effective crop species diversity ($n = 437$). Each predictor

variable was standardized to zero mean and unique variance across all nations and time periods (Methods) to enable the comparison of effects with a change of 1σ in each predictor on the $\log(\text{stability})$ values. Asterisks indicate the significance of each predictor. *** $P < 0.001$; NS, not significant ($P > 0.05$).

Both effective crop diversity and irrigation have significant stabilizing effects that are opposite in direction and about equal in magnitude to those of observed precipitation instability and temperature instability (Fig. 1a, b and Extended Data Fig. 2). The effects of crop diversity on national yield stability remained positive and significant when our analyses included only effective species or group diversity (Extended Data Table 3a, b), and when they also included seven other variables in addition to those included in Fig. 1 (Extended Data Table 3c, d). The area of each nation, organic carbon content of the soil and trade were weakly significantly related to national yield stability. Additional analyses support the robustness of these results (Extended Data Tables 4–7), including mixed-effect models with nations as a random effect and with additional controls for data quality (Extended Data Table 4).

Both effective crop group and species diversity stabilized national yield by decreasing σ , its year-to-year variation (Fig. 3a, c). This greater stability is consistent with the portfolio effect⁹, which requires that $z > 1$, in which z is the empirically observed scaling coefficient for the dependence of year-to-year variances (σ_i^2) in national yields of each individual crop (i) on m_i , the decadal mean yield of each crop⁹ (with data for all crops, i , fit to $\sigma_i^2 = c\mu_i^z$; Methods). For crop species, $1.98 < z < 2.23$ and for crop groups $1.58 < z < 1.97$, which are consistent with the portfolio effect's criterion of $z > 1$ for diversity to lead to stability.

Yield stability is also greater as mean precipitation increases (Extended Data Table 5a, b). Conversely, the stability of national yield is lower in nations with higher year-to-year temporal instability of growing-season precipitation and temperature (Fig. 1a, b), supporting a recent study³. Because stability is $S = \mu/\sigma$, higher stability may arise from a lower temporal standard deviation and/or a higher mean yield. Notably, mean national yield is statistically independent of effective crop species diversity (Fig. 3d and Extended Data Table 2a, b). However, national yield is positively dependent on crop group diversity (Fig. 3c and Extended Data Table 2a), perhaps because crop rotations (for example, cereals and legumes²³) increase yields. This yield effect may explain why crop group diversity has a greater stabilizing effect than crop species diversity (Fig. 1). The stabilizing effects of irrigation reflect both higher mean yields (Fig. 3c, d) and lower temporal standard deviations (Fig. 3a, b). By contrast, nitrogen fertilization increases the temporal standard deviation by approximately the same amount as it increases mean yield (Fig. 3) and therefore does not significantly stabilize yield (Fig. 1a, b and Extended Data Table 2a, b). Nonetheless,

higher yields from irrigation and fertilization could be used to increase crop reserves and to therefore buffer national food supplies.

Our analyses provide robust, albeit correlational, support for the hypothesis²⁴ that greater effective national crop diversity leads to greater year-to-year stability of national yield. Most empirical evidence of the stabilizing effects of crop diversity on total yield has come from field-scale^{23,25,26} and landscape-scale studies²⁷. When we aggregated national data into each of seven FAO-derived geographical regions (Methods), we found that regions with greater effective crop diversity had greater stability of their regional food supply (Extended Data Table 6a, b). Finally, in analyses using the total national annual

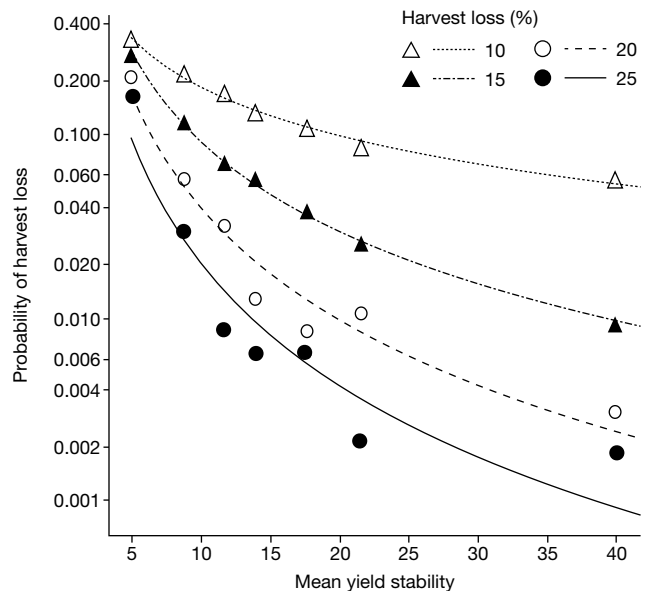


Fig. 2 | National yield stability and probabilities of crop harvest losses. Observed probabilities (logarithmic scale) of national annual yield being more than 10, 15, 20 or 25% less than the decadal mean of that nation. Decadal probabilities were calculated after assigning decadal results for each nation ($n = 437$) to one of seven decadal stability bins (Methods). Curves show the observed probability of a given level of harvest loss, fitted using a log-log model, against the mean stability of each bin.

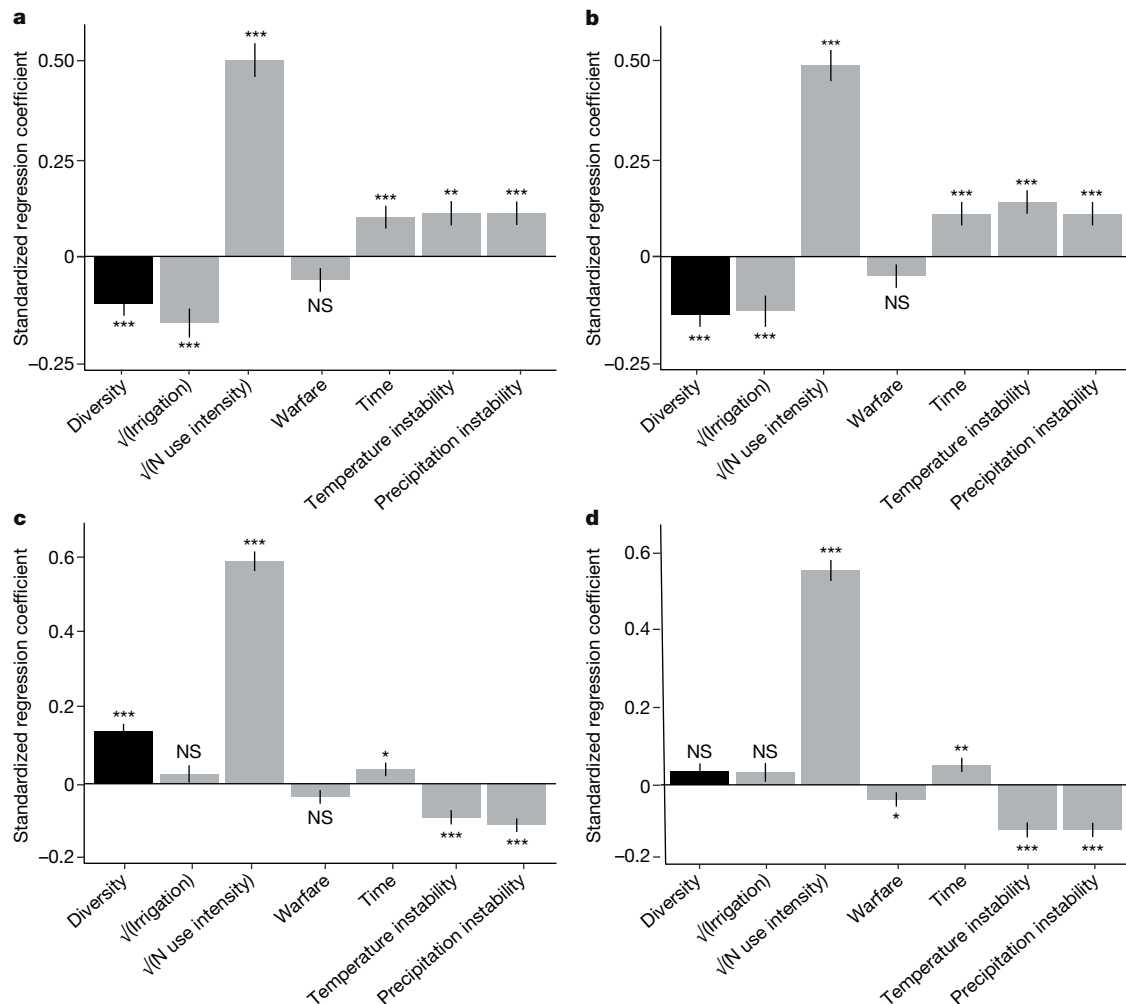


Fig. 3 | Determinants of temporal variation and mean national caloric yield. **a–d**, Regression coefficients (\pm s.e.) for all variables in multiple regressions of \log_e -transformed temporal standard deviation of national yield (**a**, **b**) and \log_e -transformed mean national yield (**c**, **d**), for regressions

using effective crop group diversity (**a**, **c**; $n = 437$) or effective crop species diversity (**b**, **d**; $n = 437$). Each predictor variable was standardized to zero mean and unique variance across all nations and time periods. * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$.

economic value of all crops (Methods), we found that national agricultural economic yield is also significantly more stable in nations with higher effective crop diversity (Extended Data Table 7a, b). Future studies should also explore how crop choice and diversity may be related to nutrition, affordability and sufficiency.

If, as forecasted, climate change increases the frequency of water-limited yields¹⁸, nations that increase effective crop diversity might decrease the yield instability that could otherwise occur. Such efforts could complement the benefits of new drought-tolerant crop varieties²⁸, increased irrigation, intercropping²⁹ and greater and more transparent trade⁷. Greater crop diversity may be particularly useful in nations with water-limited yields³⁰ where irrigation is unaffordable or water is insufficient for increased irrigation, and where farmers might stabilize family income and food supply through higher crop diversity. Our analysis at the national scale did not reveal that particular crop groups contributed more to yield stability (Methods and Extended Data Fig. 3). Rather, attaining the benefits of higher crop diversity may require identifying those combinations of crops or crop groups that optimize yield stability in each nation.

Ensuring stable food supplies during an era of rapid population growth and climate change is a challenge that will require multiple solutions. Our results suggest that increasing national effective crop diversity merits deeper exploration and consideration as an additional, but currently overlooked, way to stabilize national food supplies and reduce the risk of crop failures.

Online content

Any methods, additional references, Nature Research reporting summaries, source data, extended data, supplementary information, acknowledgements, peer review information; details of author contributions and competing interests; and statements of data and code availability are available at <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1316-y>.

Received: 5 April 2018; Accepted: 23 May 2019;

Published online 19 June 2019.

- Rosenzweig, C. & Parry, M. L. Potential impact of climate change on world food supply. *Nature* **367**, 133–138 (1994).
- Fraser, E. D. G., Legwegoh, A. & Krishna, K. C. Food stocks and grain reserves: evaluating whether storing food creates resilient food systems. *J. Environ. Stud. Sci.* **5**, 445–458 (2015).
- Ray, D. K., Gerber, J. S., MacDonald, G. K. & West, P. C. Climate variation explains a third of global crop yield variability. *Nat. Commun.* **6**, 5989 (2015).
- Marchand, P. et al. Reserves and trade jointly determine exposure to food supply shocks. *Environ. Res. Lett.* **11**, 095009 (2016).
- Challinor, A. J. et al. Transmission of climate risks across sectors and borders. *Phil. Trans. R. Soc. A* **376**, 20170301 (2018).
- Lobell, D. B. et al. Prioritizing climate change adaptation needs for food security in 2030. *Science* **319**, 607–610 (2008).
- Bailey, R. et al. *Extreme Weather and Resilience of the Global Food System. Final Project Report from the UK-US Taskforce on Extreme Weather and Global Food System Resilience* <https://www.foodsecurity.ac.uk/publications/archive/page/4/> (The Global Food Security Programme, 2015).
- Doak, D. F. et al. The statistical inevitability of stability–diversity relationships in community ecology. *Am. Nat.* **151**, 264–276 (1998).

9. Tilman, D. The ecological consequences of changes in biodiversity: a search for general principles. *Ecology* **80**, 1455–1474 (1999).
 10. Huai, J. Dynamics of resilience of wheat to drought in Australia from 1991–2010. *Sci. Rep.* **7**, 9532 (2017).
 11. Bren d'Amour, C., Wenz, L., Kalkuhl, M., Steckel, J. C. & Creutzig, F. Teleconnected food supply shocks. *Environ. Res. Lett.* **11**, 035007 (2016).
 12. Rippey, B. R. The US drought of 2012. *Weather Clim. Extrem.* **10**, 57–64 (2015).
 13. Harvey, C. A. et al. Extreme vulnerability of smallholder farmers to agricultural risks and climate change in Madagascar. *Phil. Trans. R. Soc. B* **369**, 20130089 (2014).
 14. Sternberg, T. Chinese drought, bread and the Arab Spring. *Appl. Geogr.* **34**, 519–524 (2012).
 15. Rosset, P. Food sovereignty and the contemporary food crisis. *Development* **51**, 460–463 (2008).
 16. Fader, M., Gerten, D., Krause, M., Lucht, W. & Cramer, W. Spatial decoupling of agricultural production and consumption: quantifying dependences of countries on food imports due to domestic land and water constraints. *Environ. Res. Lett.* **8**, 014046 (2013).
 17. Puma, M. J., Bose, S., Chon, S. Y. & Cook, B. I. Assessing the evolving fragility of the global food system. *Environ. Manage.* **10**, 024007 (2015).
 18. IPCC. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis* (eds Solomon, S. et al.) (Cambridge Univ. Press, 2007).
 19. FAO. *Soaring Food Prices: Guide for Policy and Programmatic Actions at Country Level to address High Food Prices*. http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/ISFP/reviseISFP_guide_web.pdf (2011).
 20. Cardinale, B. J. et al. Impacts of plant diversity on biomass production increase through time because of species complementarity. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **104**, 18123–18128 (2007).
 21. Gross, K. et al. Species richness and the temporal stability of biomass production: a new analysis of recent biodiversity experiments. *Am. Nat.* **183**, 1–12 (2014).
 22. Tubiello, F. N. Make better use of UN food and agriculture stats. *Nature* **563**, 35 (2018).
 23. Davis, A. S., Hill, J. D., Chase, C. A., Johanns, A. M. & Liebman, M. Increasing cropping system diversity balances productivity, profitability and environmental health. *PLoS ONE* **7**, e47149 (2012).
 24. Lin, B. B. Resilience in agriculture through crop diversification: adaptive management for environmental change. *Bioscience* **61**, 183–193 (2011).
 25. Snapp, S. S., Blackie, M. J., Gilbert, R. A., Bezner-Kerr, R. & Kanyama-Phiri, G. Y. Biodiversity can support a greener revolution in Africa. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **107**, 20840–20845 (2010).
 26. Gaudin, A. C. M. et al. Increasing crop diversity mitigates weather variations and improves yield stability. *PLoS ONE* **10**, e0113261 (2015).
 27. Abson, D. J., Fraser, E. D. & Benton, T. G. Landscape diversity and the resilience of agricultural returns: a portfolio analysis of land-use patterns and economic returns from lowland agriculture. *Agric. Food Secur.* **2**, 2 (2013).
 28. Challinor, A. J., Koehler, A.-K., Ramirez-Villegas, J., Whitfield, S. & Das, B. Current warming will reduce yields unless maize breeding and seed systems adapt immediately. *Nat. Clim. Change* **6**, 954–958 (2016).
 29. Raseduzzaman, M. & Jensen, E. S. Does intercropping enhance yield stability in arable crop production? A meta-analysis. *Eur. J. Agron.* **91**, 25–33 (2017).
 30. Lesk, C., Rowhani, P. & Ramankutty, N. Influence of extreme weather disasters on global crop production. *Nature* **529**, 84–87 (2016).
- Publisher's note:** Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.
- © The Author(s), under exclusive licence to Springer Nature Limited 2019

METHODS

Agricultural dataset. We obtained national annual crop area harvested (in hectares), crop production (in tonnes) and gross market value (in constant 2004–2006 international dollars) from 1961 to 2010 for each of 176 crops in each of 100 populous nations (representing 89% of the global 2010 population and 91% of the global crop production) from the FAOSTAT database (URLs to each database are included in Extended Data Table 1). On the recommendation of staff at the FAO, we accounted for differences among nations in data quality, which led us to remove five nations for which at least 20% of the data on area harvested or production had to be estimated by the FAO. To identify those nations with high rates of estimated data (rather than data communicated directly by nations), we calculated the weighted proportion of species-specific data corresponding to each type of flag used by the FAO to indicate how the data were obtained, with the weight being the proportion of total production that each crop species represents for a nation in a given decade. When the proportion of estimated data per decade and nation was added as a variable in our analyses of stability, it was significant with the entire dataset, and not significant in all but a few analyses once the five nations were removed. The excluded nations were North Korea, Guinea, Kenya, Mozambique and Zambia. Because some countries had one or more decadal time periods in which more than 20% of weighted yield data were estimated, we did an additional set of analyses in which all 68 of such decadal results were excluded from analyses. Because Ireland, New Zealand and Netherlands use much of their fertilizer on pastures rather than for croplands, and because we could not find data on the amounts used in this manner, they were excluded from the models. Egypt, which has 100% of cropland equipped with irrigation for the 5 decades, was also removed from the models. For all other nations, for each year, we calculated the total annual caloric yield (millions of kcal ha⁻¹) of each nation by (1) multiplying the production of each of its crops by commodity-specific kcal conversion factors from the USDA Nutrient Database³¹ to get the kcal production of each crop; (2) summing these kcal harvests across all crops; and (3) dividing this sum by the sum of all harvested land for all crops. In doing this, we used the full set of 176 plant crop species reported by FAO. We calculated the total annual economic yield (in constant 2004–2006 1,000 international dollars per ha) of each nation for each year by multiplying amounts harvested by their market prices, then summing these values and finally by dividing this sum by the sum of all of its harvested land for all these crops.

National crop yield stability and effective crop species and group diversity. We quantified national crop yield stability (for caloric and economic yield), S , as the ratio of mean national yield (μ) over its temporal standard deviation (σ); $S = \mu/\sigma$. S , in essence, is the inverse of the coefficient of variation. To do this, we divided the 50-year time period covered by the data into 5 non-overlapping intervals of 10 years each. We next removed national yield variation attributable to a temporal trend of increasing crop yield by regressing annual crop yields on year squared for each decade and nation. For each of such decadal regression, the σ of the residuals provided the measure of detrended variation of national yield that was used to calculate the temporal stability of national yield. We then used the μ for each ten-year interval for each nation, and its associated detrended σ to calculate yield stability for each nation and decade. To identify crop groups that contributed the most to stabilizing national yield, we calculated national yield stability when dropping each crop group, one at a time, over the entire time period. Let S'_i be the value of national yield stability when crop group i is deleted, and let S be the national yield stability with all crop groups are included. The $\log(\text{response ratio})$, $-\ln(S'_i/S)$, is positive if removing crop group i has a stabilizing effect and is negative if removing crop group i has a destabilizing effect (Extended Data Fig. 3).

For each nation and year, we used the proportion of the total harvested area occupied by each crop species (or each crop group: cereals, vegetables, fruits, pulses, oil crops, sugar crops, stimulants and spices, as defined by the FAO) to calculate the Shannon diversity index (H') and thus the effective diversity³² of crop species or crop groups as $\exp(H')$. If p_i is the proportion of total national cropland dedicated to crop i (or to crop group i), and N is the total number of crop species (or crop groups), $H' = -\sum_{i=1}^N (p_i \ln p_i)$. To align measures of stability with diversity, we calculated mean effective crop species diversity and mean effective crop group diversity for each nation for each of the five decadal time periods.

Agricultural management, social, economic, political and weather data. For each nation studied, we compiled annual national-level data on the rate of agricultural inputs (mineral fertilizers and irrigation), warfare and weather. Because of major disparities in the availability of data on the use of modern seed varieties among nations and time periods, data on seed varieties were not included in our analyses. We used data from the FAOSTAT database on the annual total national application of nitrogen, and the total cropland area irrigated. We calculated the rate of application per hectare of each of these inputs by dividing their use by the total area harvested for all crops. The Center for Systematic Peace provided data on the summed magnitude of all the major episodes of political violence (MEPV, referred to as 'warfare' in the main text) that include seven categories of armed

conflicts that resulted in deaths³³. We obtained global gridded climatic data from the Climate Research Unit of the University of Anglia (CRU TS v.3.23)³⁴. From these data, we derived monthly precipitation (mm) and temperatures (degrees Celsius) for the cropland area in each nation by taking the monthly precipitation and temperature values of each grid cell in a nation, weighted by the proportion of cropland in each grid cell³⁵. Then, we calculated national precipitation and temperature across annual growing seasons by averaging monthly weather values over months of nation-specific crop-growing-season calendars³⁶. We calculated the mean magnitude of all MEPV, rate of fertilizer use and irrigation over each of the five ten-year time periods. For weather, we calculated the μ , σ and instability ($-(\mu/\sigma)$) of cropland-based growing-season-specific temperature and precipitation for each nation and for each of our five ten-year time periods.

Observed probabilities of national harvests below decadal means. To quantify how national yield stability is related to the probability of a national yield loss, we calculated the probability, for each decade, that the observed yield of a nation in a given year is at least a specified percentage less than the mean yield for that nation in that decade. To do this, we first sorted and grouped all nations and all decades into seven bins according to their decadal stability values. The first six bins (1–6) each contain 470 national decadal observations, with these bins having stability means of 4.84, 8.71, 11.64, 13.88, 17.64 and 21.58, respectively. The seventh bin, with a mean stability of 40.05, is deliberately larger to better reveal the tail of this stability value distribution, and contains 1,880 observations. We then standardized the annual yield of each nation per decade so that the mean yield of all observations in each bin was equal to one. Finally, for each bin, we determined the number of observations with a standardized annual yield below 0.90, 0.85, 0.80 or 0.75. Each of these numbers was divided by the total number of observations in that bin to obtain the observed probability of yield loss of more than 10% (for the yield less than 0.9), 15%, 20% or 25%, respectively (Fig. 2).

Data aggregation at the scale of geographical regions. We aggregated caloric and economic yield, crop diversity and data on agricultural management, social and weather across the six geographical regions defined by the FAO. To do this, for each year, we summed the area harvested, food production and crop market value (in constant 2004–2006 1,000 international dollars) across all crop species and across nations in each geographical region. Area equipped for irrigation and the use of nitrogen were summed across nations in each region and divided by the summed area harvested. We derived monthly regional precipitation (mm) and temperatures (degrees Celsius) by (1) multiplying the monthly precipitation and temperature values of each grid cell in each nation in each region and (2) obtained a weighted average at the regional scale by summing the values obtained in (1) and divided this value by the total proportion of cropland across all the cells in a region. Because warfare (MEPV) is a magnitude score, it does not sum up across nations. Instead, we calculated an annual average of the MEPV score across nations in each geographical region and then a temporal average of these annual values across ten years.

Statistical analyses. We used linear regression models to test whether national crop yield stability (either caloric or economic yield) depended on effective crop species diversity or effective crop group diversity, respectively, across nations and time periods. To normalize residuals, we log-transformed national yield stability, μ and σ . In addition to either effective crop species diversity or effective crop group diversity, each regression model included time (five decadal time periods as a continuous variable), rate of nitrogen application and percentage of cropland irrigated (both square-root-transformed), warfare, temperature and precipitation instability. Each of the predictor variables in our model had a variance inflation factor value lower than two, which indicates that collinearity among variables was not an issue. We ran a separate set of regressions that was identical to these but used mean temperature and precipitation instead of their instability. Because predictors used in our models were measured in different units and have various ranges of values, we standardized each predictor, across all nations and over the full 50-year time period, to have zero mean but its own unique variance. This transformation, performed before analyses, enabled quantitative comparisons of the resulting model coefficients for the variables. To determine whether stability effects resulted from an increase in mean yield, a decrease in detrended temporal yield σ or both, we performed additional regressions (Extended Data Tables 2, 4–7).

To test the robustness of our results, we performed several additional analyses. First, we included country as a random effect in the analyses discussed above and obtained similar effective crop diversity effects (Extended Data Table 4b). Second, we used the simplest possible model, with the only predictor being effective crop species or group diversity (Extended Data Table 3a, b). We also simplified our model by accounting only for the predictors of yield stability that were significant in the complete model (that is, effective crop species and group diversity, weather instability, irrigation and time). Fourth, we considered additional predictors that might influence national yield stability (Extended Data Table 3). Specifically, we added to the model of Fig. 1: geographical regions, elevation range calculated from the USGS global data³⁷, the diversity of soil types in cropland within each nation

calculated from the FAO/UNESCO digital soil map of the world³⁸, the soil organic content, language diversity index³⁹ as a measure of cultural diversity, the country area from FAOSTAT database³⁹ and the engagement of each nation in trade⁴⁰. In all cases, we found that both adding all these variables, and deleting most or all but effective diversity, did not change the highly significant dependence of stability on effective crop group and species diversity (Extended Data Table 3c, d). We next tested the crop diversity–stability relationship across geographical regions, including regions in the model (Extended Data Table 6). All of the statistical analyses were performed using JMP Pro⁴¹ and geostatistical treatment with QGIS⁴². Additionally, we used the highly conservative dataset from which the 68 decadal periods with estimated values greater than 20% were also excluded. Analyses found that stability was similarly significantly dependent on effective crop species diversity, irrigation, precipitation instability and temperature instability in a regression, and that the weighted proportion of estimated values was not significant (Extended Data Table 4a). We found similar results when regression models included nation as a random effect (Extended Data Table 4b). Finally, we repeated the above analyses using the full original dataset from which no data had been excluded, and consistently found significant positive effects of effective crop diversity on stability. **Test of the portfolio effect.** To test whether greater national yield stability at higher effective crop species or group diversity is consistent with the portfolio effect, we quantified how the inter-annual variance (σ_i^2) in the yield of each individual crop species, i , depended on its mean yield (μ_i), as $\sigma_i^2 = c\mu_i^z$ thus calculating the scaling coefficient⁹ z . Such scaling leads to the prediction that the temporal stability, S_N , of a system with an effective crop species diversity of N would be $S_N = S_1 N^{(z-1)/2}$, in which S_1 is the average stability of a single crop species⁴³. Theory states that diversity leads to stability when $z > 1$.

Reporting summary. Further information on research design is available in the Nature Research Reporting Summary linked to this paper.

Data availability

The sources of all data used in this study are referenced in the Methods and all raw data are freely accessible at the URLs provided in Extended Data Table 1. The dataset used for the analyses is available from the corresponding author upon request.

31. United States Department of Agriculture. *National Nutrient Database*. <https://ndb.nal.usda.gov/> (2013).
32. Hill, M. O. Diversity and evenness: a unifying notation and its consequences. *Ecology* **54**, 427–432 (1973).
33. Marshall, M. G. *Codebook: Major Episodes of Political Violence (MEPV) and Conflict Regions, 1946–2015*. <http://www.systemicpeace.org/inscr/MEPVcodebook2015.pdf> (2016).

34. Harris, I., Jones, P. D., Osborn, T. J. & Lister, D. H. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations - the CRU TS3.10 dataset. *Int. J. Climatol.* **34**, 623–642 (2014).
35. Monfreda, C., Ramankutty, N. & Foley, J. A. Farming the planet: 2. Geographic distribution of crop areas, yields, physiological types, and net primary production in the year 2000. *Glob. Biogeochem. Cycles* **22**, GB1022 (2008).
36. Sacks, W. J., Deryng, D., Foley, J. A. & Ramankutty, N. Crop planting dates: an analysis of global patterns. *Glob. Ecol. Biogeogr.* **19**, 607–620 (2010).
37. Danielson, J. J. & Gesch, D. B. *Global Multi-Resolution Terrain Elevation Data 2010 (GMTED2010)*. <https://pubs.usgs.gov/of/2011/1073/pdf/of2011-1073.pdf> (US Geological Survey, 2011).
38. FAO-UNESCO. *Soil Map of the World: Revised Legend (with Corrections and Updates)*. *World Soil Resources Report 60* <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-databases/faunesco-soil-map-of-the-world/en/> (FAO, 1988).
39. Simons, G. F. & Fennig, C. D. *Ethnologue: Languages of the World* 21st edn (SIL International, 2017).
40. MacDonald, G. K. et al. Rethinking agricultural trade relationships in an era of globalization. *Bioscience* **65**, 275–289 (2015).
41. JMP v.12.0.1 (SAS Institute, 2007).
42. Quantum GIS Development Team. *Quantum GIS Geographic Information. version 2.13* (2016).
43. Tilman, D. Global environmental impacts of agricultural expansion: the need for sustainable and efficient practices. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **96**, 5995–6000 (1999).

Acknowledgements We thank the Bren School of Environment Science and Management of the University of California Santa Barbara for support. This work was also supported by a grant overseen by the French National Research Agency (ANR) as part of the ‘Make Our Planet Great Again’ program (17-MPGA-0004) and by a National Science Foundation grant (LTER-1831944). We thank the FAO and its member countries, the University of East Anglia and the Center for Systematic Peace for data collection, dissemination and guidance on data use.

Author contributions D.R. and D.T. conceived the project; D.R. assembled and analysed the data; D.R. and D.T. wrote the paper.

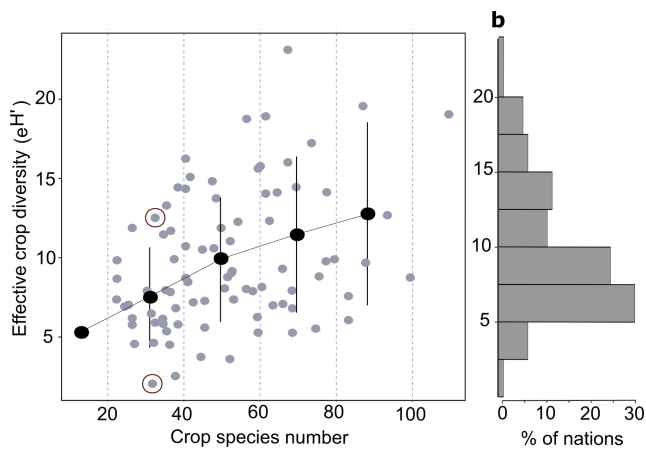
Competing interests The authors declare no competing interests.

Additional information

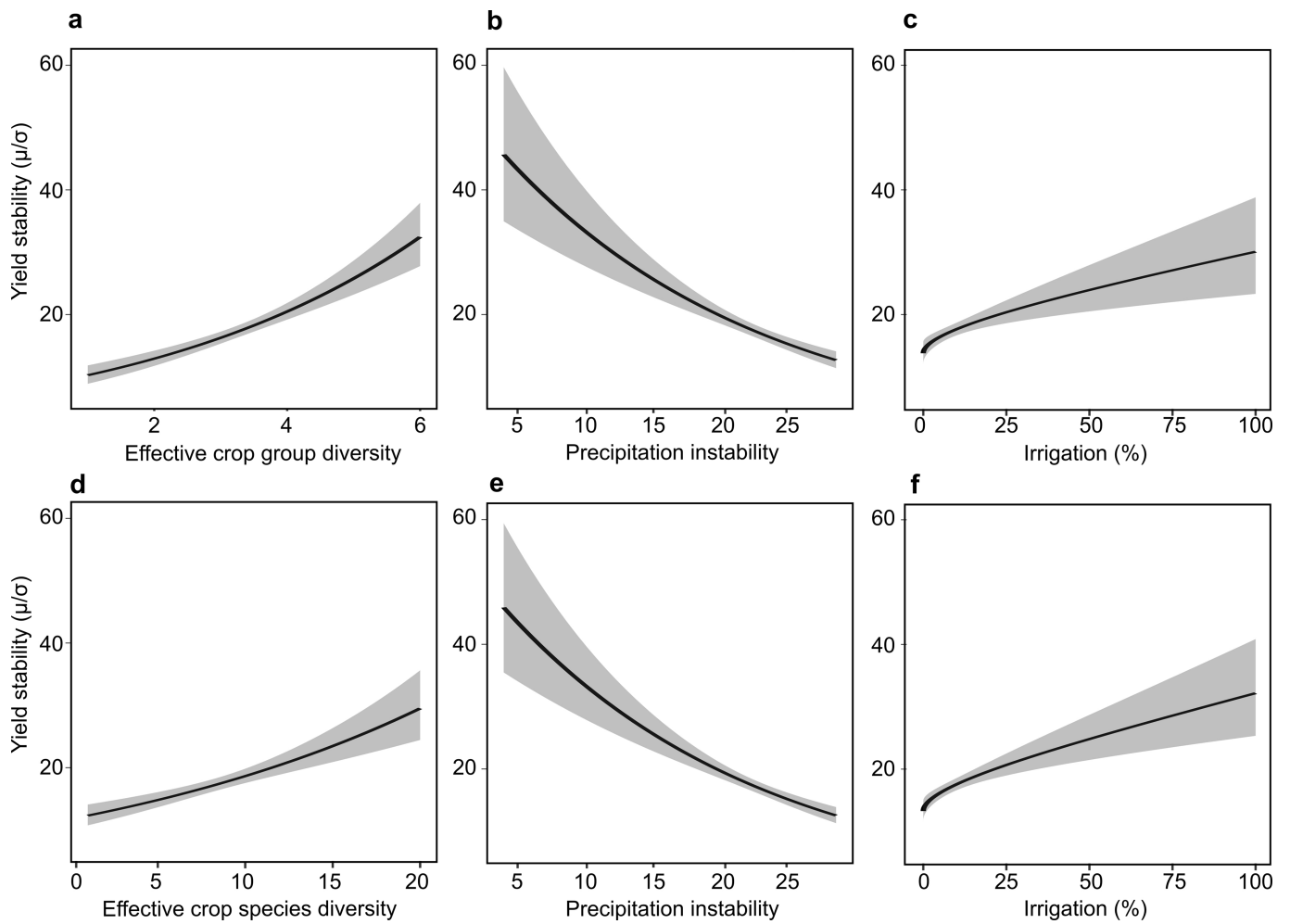
Supplementary information. is available for this paper at <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1316-y>.

Correspondence and requests for materials should be addressed to D.R.

Reprints and permissions information is available at <http://www.nature.com/reprints>.

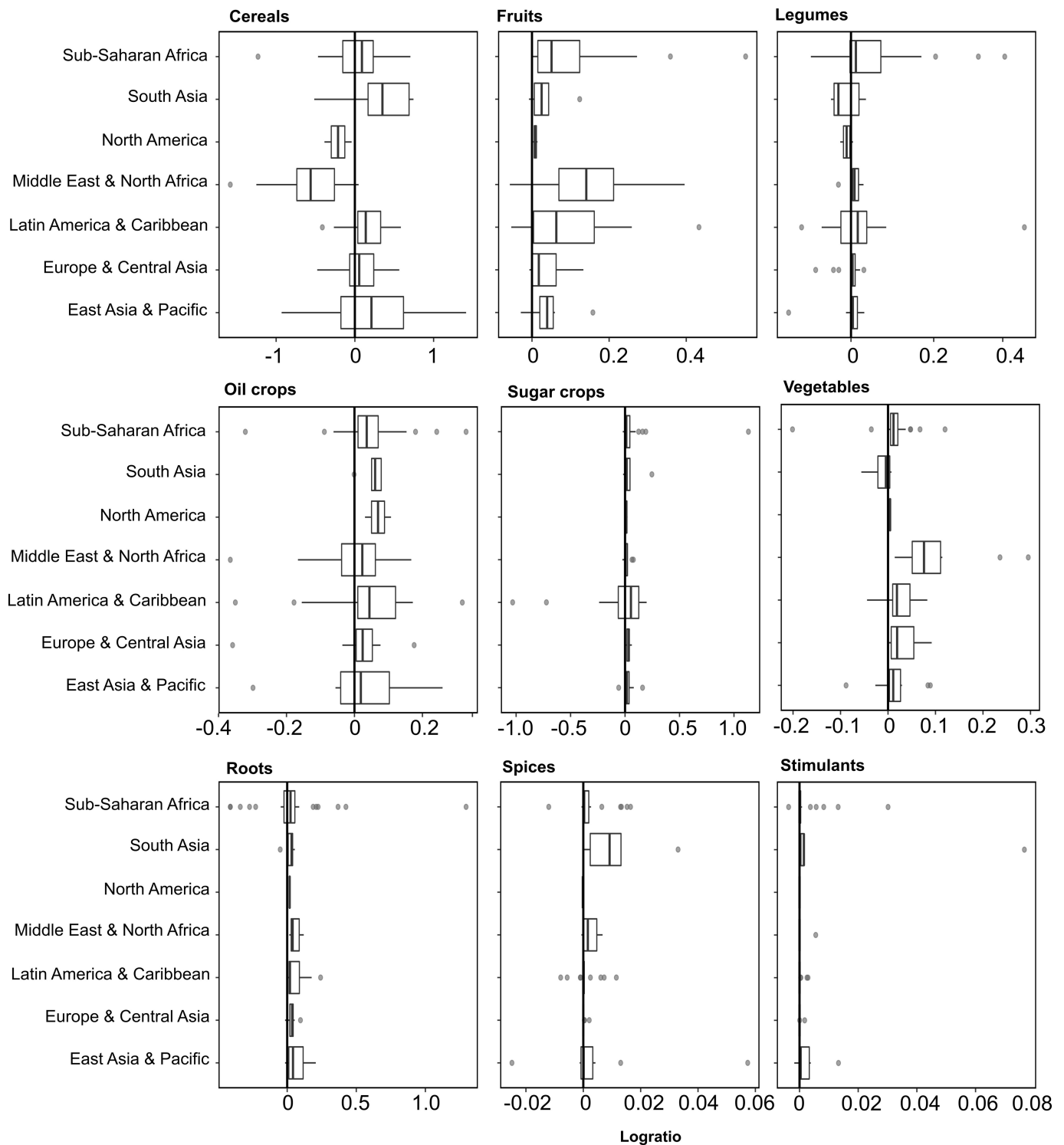


Extended Data Fig. 1 | Relationship between effective crop species diversity and crop species number per nation. **a**, Black dots are mean effective crop species diversities and bars show the σ for nations grouped as planting 1–20, 20–40, 40–60, 60–80 or 80–100 crop species during 2001–2010 ($n = 91$). Data for each nation are shown as grey dots. Note that for a given number of crop species, there is a wide range in their effective crop species diversity caused by some nations having only a few dominant crops (and thus having a low effective diversity) and other nations having many crops of more similar abundances (and thus a high effective diversity). The two circled dots highlight 2 such nations, both growing 30 crop species but either very unevenly (that is, the dot with low effective diversity) or more evenly (that is, the dot high effective diversity). **b**, The frequency distribution of the effective crop species diversity values for this same time period.



Extended Data Fig. 2 | Main determinants of national caloric yield stability. **a–f,** Magnitude of the change in national yield stability as dependent on effective crop group diversity (**a**) and effective species diversity (**d**), precipitation instability (**b, e**) and irrigation (**c, f**). **a–c,** Values of national yield stability are predictions from the multiple regression model using effective crop group diversity (Extended Data Table 2a).

d–f, Values of national yield stability are predictions from the multiple regression model using effective crop species diversity (Extended Data Table 2b). Predicted values were back-transformed from log-transformation, calculated using the observed range of the three predictors and keeping all the other predictors at their mean values. The grey bands represent the regression 95% confidence interval.



Extended Data Fig. 3 | Contribution of crop groups to national caloric yield stability for each of six geographical regions. A positive value of the log-transformed response ratio of yield stability for a crop group indicates that the presence of that crop group has a stabilizing effect.

A negative value indicates a destabilizing effect. National log response ratios are represented per geographical region. In most regions, the presence of a given crop group is associated with increased national yield stability ($n = 819$).

Extended Data Table 1 | Sources of data supporting findings

Data	References	Name of the data set	URL
Agricultural data set			
Area harvested	[31]	Crops	http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC
Crop production	[31]	Crops	http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC
Crop market value	[31]	Value of agricultural production	http://www.fao.org/faostat/en/#data/QV
Kcal conversion factors	[32]	USDA Food Composition Databases	https://ndb.nal.usda.gov/ndb/
Agricultural management			
Mineral fertilizers (N, P)	[31]	Fertilizer archives; Fertilizers	http://www.fao.org/faostat/en/#data/RA ; http://www.fao.org/faostat/en/#data/EF
Area equipped for irrigation	[31]	Land use	http://www.fao.org/faostat/en/#data/RL
Social economic politic and environmental data			
Warfare	[34]	Armed Conflict and Intervention (ACI) datasets	http://www.systemicpeace.org/inscrdata.html
Weather	[35]	CRU TS v.3.23	https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/
Proportion of cropland	[36]	Cropland and Pasture Area in 2000	http://www.earthstat.org/data-download/
Terrain elevation	[38]	Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010	https://lta.cr.usgs.gov/GMTED2010
Soil map	[39]	FAO/UNESCO Soil Map of the World	http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-databases/faounesco-soil-map-of-the-world/en/
Language diversity index	[40]	Ethnologue Language of the World	https://www.ethnologue.com/statistics/country

Extended Data Table 2 | Determinants of national caloric yield stability, mean and temporal variation

a

	Log caloric yield stability (μ/σ)			Log caloric yield SD (σ)			Log caloric mean yield (μ)		
	Estimate (SE)	F	P-value	Estimate (SE)	F	P-value	Estimate (SE)	F	P-value
AIC	781			789			363		
R2	0.37			0.42			0.65		
Group diversity	0.23 (0.028)	66.46	<.0001***	-0.11 (0.028)	13.91	0.0002***	0.12 (0.017)	50.17	<.0001***
sqrt(Irrigation)	0.088 (0.017)	27.04	<.0001***	-0.077 (0.017)	19.88	<.0001***	0.012 (0.011)	1.28	0.26
Precipitation instab.	-0.054 (0.0072)	56.94	<.0001***	0.026 (0.0072)	13.36	0.0003***	-0.028 (0.0044)	38.74	<.0001***
Temperature instab.	-0.0043 (0.00070)	38.21	<.0001***	0.0024 (0.00071)	11.07	0.001**	-0.0020 (0.00044)	20.77	<.0001***
Time	-0.047 (0.021)	5.13	0.024*	0.074 (0.021)	12.38	0.0005***	0.027 (0.013)	4.31	0.039*
sqrt(N use intensity)	0.019 (0.0085)	4.99	0.026*	0.099 (0.0086)	133.54	<.0001***	0.12 (0.0053)	503.07	<.0001***
Warfare	0.015 (0.018)	0.72	0.40	-0.036 (0.018)	4.03	0.05	-0.021 (0.011)	3.62	0.058

b

	Log caloric yield stability (μ/σ)			Log caloric yield SD (σ)			Log caloric mean yield (μ)		
	Estimate (SE)	F	P-value	Estimate (SE)	F	P-value	Estimate (SE)	F	P-value
AIC	812			781			408		
R2	0.32			0.43			0.61		
Species diversity	0.045 (0.0079)	32.60	<.0001***	-0.036 (0.0077)	22.42	<.0001***	0.0091 (0.0050)	3.28	0.071
sqrt(Irrigation)	0.078 (0.018)	18.46	<.0001***	-0.063 (0.018)	12.74	0.0004***	0.015 (0.011)	1.83	0.18
Precipitation instab.	-0.053 (0.0074)	51.68	<.0001***	0.025 (0.0072)	12.47	0.0005***	-0.028 (0.0047)	36.08	<.0001***
Temperature instab.	-0.0059 (0.00071)	69.41	<.0001***	0.0032 (0.00069)	21.86	<.0001***	-0.0027 (0.00045)	36.80	<.0001***
Time	-0.042 (0.022)	3.76	0.053	0.080 (0.021)	14.57	0.0002***	0.038 (0.014)	7.67	0.0059**
sqrt(N use intensity)	0.016 (0.015)	3.14	0.077	0.098 (0.0085)	134.92	<.0001***	0.11 (0.0055)	424.90	<.0001***
Warfare	0.0059 (0.018)	0.10	0.75	-0.030 (0.018)	2.80	0.095	-0.024 (0.011)	4.23	0.04*

a, b. Results for multiple linear regression models using non-standardized predictor variables. **a.** Results of a regression using effective crop group diversity ($n = 437$). **b.** Results of a regression using effective crop species diversity ($n = 437$). AIC, Akaike information criterion; R2, Spearman correlation coefficient; SE, standard error. Yield stability, μ and σ were log-transformed and the rate of nitrogen fertilization and irrigation were square-root (sqrt)-transformed. * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$.

Extended Data Table 3 | Robustness checks of models testing the crop diversity–stability relationship

a

	Log caloric yield stability (μ/σ)			Log caloric yield SD (σ)			Log caloric mean yield (μ)		
	Estimate (SE)	F	P-value	Estimate (SE)	F	P-value	Estimate (SE)	F	P-value
AIC	907			1022			840		
R ²	0.17			0.09			0.009		
Group diversity	0.28 (0.030)	91.83	<.0001***	-0.22 (0.034)	43.43	<.0001***	0.06 (0.028)	4.99	0.03*

b

	Log caloric yield stability (μ/σ)			Log caloric yield SD (σ)			Log caloric mean yield (μ)		
	Estimate (SE)	F	P-value	Estimate (SE)	F	P-value	Estimate (SE)	F	P-value
AIC	955			1046			843		
R ²	0.07			0.04			0.003		
Species diversity	0.051 (0.0085)	36.74	<.0001***	-0.040 (0.0094)	17.66	<.0001***	0.012 (0.0075)	2.53	0.11

c

	Log caloric yield stability (μ/σ)		
	Estimate (SE)	F	P-value
AIC	703		
R ²	0.47		
Group diversity	0.27 (0.034)	64.44	<.0001***
sqrt(Irrigation)	0.093 (0.023)	15.96	<.0001***
Precipitation instab.	-0.039 (0.0079)	24.22	<.0001***
Temperature instab.	-0.0034 (0.00085)	16.06	<.0001***
Time	-0.040 (0.021)	3.73	0.054
sqrt(N use intensity)	0.0048 (0.012)	0.17	0.68
Warfare	0.0012 (0.018)	0.004	0.95
Geographic regions		5.70	<.0001***
Trade involvement		2.94	0.033*
Elevation range	-0.000013 (0.000025)	0.26	0.63
Soil diversity	-0.12 (0.061)	3.63	0.057
Cultural diversity	0.27 (0.15)	3.51	0.062
SOC	0.042 (0.024)	2.98	0.085
log(Country area)	0.27 (0.034)	5.62	0.018*

d

	Log caloric yield stability (μ/σ)		
	Estimate (SE)	F	P-value
AIC	737		
R ²	0.42		
Species diversity	0.051 (0.0097)	27.99	<.0001***
sqrt(Irrigation)	0.089 (0.025)	12.89	0.0004***
Precipitation instab.	-0.046 (0.0081)	31.78	<.0001***
Temperature instab.	-0.0045 (0.00087)	27.14	<.0001***
Time	-0.030 (0.022)	1.94	0.16
sqrt(N use intensity)	-0.0030 (0.012)	0.061	0.81
Warfare	0.0025 (0.0019)	0.017	0.90
Geographic regions		5.37	<.0001***
Trade involvement		1.92	0.13
Elevation range	-0.000014 (0.000027)	0.27	0.61
Soil diversity	-0.13 (0.065)	4.04	0.05
Cultural diversity	0.17 (0.115)	1.19	0.28
SOC	0.058 (0.025)	5.27	0.02*
log(Country area)	0.040 (0.031)	1.67	0.20

a, b, Results for simple linear regression models using only non-standardized effective crop group diversity ($n = 437$) (**a**) and effective crop species diversity (**b**). **c, d**, Results show a complete model including the most important predictors of national yield stability as well as additional predictors. Yield stability was log-transformed and the rate of nitrogen fertilization, irrigation and country area were square-root-transformed. * $P < 0.05$; *** $P < 0.001$.

Extended Data Table 4 | Robustness checks for data quality

a

	Log caloric yield stability (μ/σ)			Log caloric yield SD (σ)			Log caloric mean yield (μ)		
	Estimate (SE)	F	P-value	Estimate (SE)	F	P-value	Estimate (SE)	F	P-value
AIC	702			675			339		
R2	0,33			0,42			0,61		
Species diversity	0.043 (0.0087)	24,57	<.0001***	-0.032 (0.0084)	14,29	0.0002***	0.011 (0.0054)	4,37	0.037*
sqrt(Irrigation)	0.071 (0.019)	14,28	0.0002***	-0.071 (0.018)	15,14	0.0001***	0.00042 (0.012)	0,00	0.97
Precipitation instab.	-0.057 (0.0081)	48,99	<.0001***	0.027 (0.0078)	11,87	0.0006***	-0.030 (0.0050)	34,49	<.0001***
Temperature instab.	-0.0061 (0.00074)	67,90	<.0001***	0.0035 (0.00071)	23,67	<.0001***	-0.0026 (0.00046)	32,09	<.0001***
Time	-0.023 (0.023)	1,03	0.31	0.066 (0.022)	8,98	0.0029**	0.043 (0.014)	9,04	0.0028**
sqrt(N use intensity)	0.019 (0.0091)	4,33	0.04*	0.092 (0.0088)	109,68	<.0001***	0.11 (0.0057)	380,14	<.0001***
Warfare	0.011 (0.019)	0,34	0.56	-0.034 (0.019)	3,27	0,071	-0.023 (0.012)	3,47	0.063
Proportion of estimated production data	-0.023 (0.74)	1,89	0.17	0.21 (0.72)	0,09	0,77	-0.81 (0.47)	3,01	0,084

b

	Log caloric yield stability (μ/σ)			Log caloric yield SD (σ)			Log caloric mean yield (μ)		
	Estimate (SE)	F	P-value	Estimate (SE)	F	P-value	Estimate (SE)	F	P-value
AIC	654			635			-34		
R2	0,73			0,75			0,96		
Fixed effects									
Species diversity	0.042 (0.013)	10,66	0.001**	-0.037 (0.012)	9,38	0.0026**	0.0010 (0.0062)	0,03	0.87
sqrt(Irrigation)	0.079 (0.029)	7,36	0.0075**	-0.058 (0.027)	4,41	0.038*	0.050 (0.015)	10,47	0.0013**
Precipitation instab.	-0.038 (0.0089)	17,77	<.0001***	0.025 (0.0087)	8,03	0.0048**	-0.0049 (0.0034)	2,10	0.15
Temperature instab.	-0.0032 (0.00076)	16,76	<.0001***	0.0021 (0.00077)	7,31	0.0072**	-0.00083 (0.00029)	8,25	0.0043**
Time	-0.012 (0.019)	0,42	0.52	0.076 (0.018)	17,20	<.0001***	0.077 (0.0075)	104,59	<.0001***
sqrt(N use intensity)	0.0087 (0.012)	0,51	0.48	0.079 (0.012)	45,41	<.0001***	0.061 (0.0051)	141,99	<.0001***
Warfare	-0.022 (0.019)	1,35	0.25	0.0099 (0.018)	0,29	0,59	-0.0061 (0.0066)	0,85	0.36
Proportion of estimated production data	-1.11 (0.71)	2,40	0.12	0.89 (0.70)	1,61	0,2	0.0057 (0.26)	0,0005	0,98
Variance component									
Country	0.22 (0.046)			0.18 (0.039)			0.17 (0.028)		

Robustness checks performed after exclusion of 68 decadal national stability results for which FAO-estimated harvest data were greater than 20% (Methods, $n = 437$). a, b, Results for simple linear regression models (a) and mixed-effect models using country as a random effect (b) and using only non-standardized variables. * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$.

Extended Data Table 5 | Influence of crop diversity and mean weather on national caloric yield stability, mean and temporal variation

a

	Log caloric yield stability (μ/σ)			Log caloric yield SD (σ)			Log caloric mean yield (μ)		
	Estimate (SE)	F	P-value	Estimate (SE)	F	P-value	Estimate (SE)	F	P-value
AIC	811			802			280		
R2	0.33			0.4			0.71		
Group diversity	0.18 (0.031)	32.21	<.0001***	-0.099 (0.031)	10.43	0.0013**	0.077 (0.017)	20.6	<.0001***
sqrt(Irrigation)	0.093 (0.018)	27.37	<.0001***	-0.097 (0.018)	14.7	0.0001***	0.025 (0.0097)	6.9	0.0089**
Mean precipitation	0.0057 (0.00071)	63.13	<.0001***	-0.00050 (0.00071)	0.5	0.48	0.0052 (0.00039)	176.76	<.0001***
Mean precipitation^2	-0.000025 (0.0000057)	19.98	<.0001***	0.0000036 (0.0000056)	0.4	0.53	0.000022 (0.0000031)	49.78	<.0001***
Mean temperature	0.0015 (0.0070)	0.046	0.83	-0.023 (0.0069)	10.85	0.0011**	-0.021 (0.0038)	31.33	<.0001***
Time	-0.029 (0.022)	1.76	0.19	0.079 (0.022)	13.2	0.0003***	0.050 (0.012)	17.4	<.0001***
sqrt(N use intensity)	0.0045 (0.010)	0.19	0.66	0.098 (0.010)	78.12	<.0001***	0.094 (0.0056)	285.05	<.0001***
Warfare	0.021 (0.019)	1.24	0.27	-0.042 (0.018)	5.26	0.022	-0.022 (0.010)	4.54	0.03*

b

	Log caloric yield stability (μ/σ)			Log caloric yield SD (σ)			Log caloric mean yield (μ)		
	Estimate (SE)	F	P-value	Estimate (SE)	F	P-value	Estimate (SE)	F	P-value
AIC	814			790			299		
R2	0.32			0.42			0.7		
Species diversity	0.044 (0.0082)	29.14	<.0001***	-0.039 (0.0080)	23.63	<.0001***	0.0055 (0.0045)	1.44	0.23
sqrt(Irrigation)	0.084 (0.018)	21.11	<.0001***	-0.054 (0.018)	9.17	0.0026**	0.030 (0.010)	8.79	0.0032*
Mean precipitation	0.0068 (0.00068)	100.25	<.0001***	-0.0011 (0.00066)	2.65	0.10	0.0057 (0.00038)	230.4	<.0001***
Mean precipitation^2	-0.000028 (0.0000056)	25.23	<.0001***	0.0000030 (0.00066)	0.3	0.58	0.000025 (0.0000031)	65.35	<.0001***
Mean temperature	0.0068 (0.0070)	0.96	0.35	-0.026 (0.0068)	15.11	0.0001***	-0.020 (0.0039)	25.55	<.0001***
Time	-0.031 (0.022)	1.98	0.16	0.087 (0.021)	16.45	<.0001***	0.056 (0.012)	20.94	<.0001***
sqrt(N use intensity)	0.0038 (0.010)	0.14	0.71	0.088 (0.0099)	78.08	<.0001***	0.091 (0.0057)	261.06	<.0001***
Warfare	0.0084 (0.019)	0.2	0.65	-0.032 (0.018)	3.15	0.077	-0.024 (0.010)	5.3	0.02*

Results for multiple linear regression models using non-standardized predictor variables ($n = 437$). **a**, A regression using effective crop group diversity. **b**, A regression using effective crop species diversity. Yield stability, μ and σ were log-transformed and the rate of nitrogen fertilization and irrigation were square-root-transformed. * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$.

Extended Data Table 6 | Determinants of caloric yield stability, mean and temporal variation of geographical regions

a

	Log caloric yield stability (μ/σ)			Log caloric yield SD (σ)			Log caloric mean yield (μ)		
	Estimate (SE)	F	P-value	Estimate (SE)	F	P-value	Estimate (SE)	F	P-value
AIC	63			65			-50		
R2	0.81			0.82			0.99		
Group diversity	1.14 (0.51)	5.03	0.039*	-1.15 (0.52)	9.55	0.04*	-0.016 (0.076)	0.043	0.84
Irrigation	0.063 (0.059)	1.12	0.30	-0.049 (0.061)	8.22	0.43	0.014 (0.0089)	2.42	0.14
Precipitation instab.	-0.0026 (0.019)	0.019	0.89	-0.0020 (0.019)	13.45	0.92	-0.0046 (0.0028)	2.68	0.12
Temperature instab.	0.0033 (0.0040)	0.68	0.42	-0.0028 (0.0041)	8.48	0.50	0.00047 (0.00060)	0.63	0.44
Time	-0.019 (0.10)	3.15	0.09	0.28 (0.11)	9.44	0.02*	0.099 (0.016)	39.74	<.0001***
N use intensity	-6.99 (7.019)	0.99	0.33	9.41 (7.23)	84.48	0.21	2.42 (1.05)	5.26	0.034*
Warfare	0.090 (0.17)	0.27	0.61	-0.068 (0.18)	2.13	0.71	0.023 (0.026)	0.76	0.29
Geographic regions		0.53	0.75		2.14	0.85		49.87	<.0001***
Africa	-0.57 (0.062)			0.19 (0.64)			-0.38 (0.0093)	17.87	
Asia	-0.50 (1.17)			0.21 (1.20)			-0.29 (0.18)		
Europe	0.16 (0.50)			0.08 (0.52)			0.24 (0.075)		
Latin America/Caribbean	-0.41 (0.59)			0.60 (0.61)			0.18 (0.089)		
North America	0.67 (0.55)			-0.30 (0.56)			0.37 (0.082)		

b

	Log caloric yield stability (μ/σ)			Log caloric yield SD (σ)			Log caloric mean yield (μ)		
	Estimate (SE)	F	P-value	Estimate (SE)	F	P-value	Estimate (SE)	F	P-value
AIC	50			49			-55		
R2	0.87			0.90			0.99		
Species diversity	0.29 (0.071)	16.98	0.0007***	-0.031 (0.069)	20.61	0.0003***	-0.0022 (0.012)	3.25	0.09
Irrigation	-0.022 (0.052)	0.17	0.68	0.042 (0.051)	0.68	0.42	0.0020 (0.0089)	5.17	0.04*
Precipitation instab.	-0.023 (0.016)	2.27	0.15	0.020 (0.014)	1.79	0.20	-0.0031 (0.0027)	1.36	0.26
Temperature instab.	0.00092 (0.00031)	0.08	0.77	-0.00036 (0.0031)	0.014	0.91	0.00055 (0.00054)	1.05	0.32
Time	-0.098 (0.067)	2.09	0.17	0.20 (0.066)	9.10	0.0078**	0.10 (0.011)	76.53	<.0001***
N use intensity	-1.72 (5.63)	0.093	0.76	3.87 (5.49)	0.50	0.49	2.17 (0.96)	5.06	0.04*
Warfare	0.071 (0.14)	0.26	0.62	-0.047 (0.14)	0.12	0.73	0.024 (0.024)	1.0033	0.33
Geographic regions		5.054	0.0051**		3.62	0.02*		29.45	<.0001***
Africa	-2.92 (0.88)			2.78 (0.86)			-0.15 (0.15)		
Asia	-0.063 (0.094)			-0.24 (0.91)			-0.31 (0.16)		
Europe	0.25 (0.40)			-0.015 (0.39)			0.24 (0.069)		
Latin America/Caribbean	0.34 (0.29)			-0.15 (0.28)			0.19 (0.049)		
North America	1.15 (0.44)			-0.86 (0.43)			0.28 (0.076)		

Results for multiple linear regression models using non-standardized predictor variables aggregated across six world geographical regions ($n = 30$). **a**, A regression using effective crop group diversity. **b**, A regression using effective crop species diversity. Stability, μ and σ of caloric yield were log-transformed. Oceania is the reference region to which results for every other region is compared. * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$.

Extended Data Table 7 | Determinants of national economic yield stability, mean and temporal variation

a

	Log economic yield stability (μ/σ)			Log economic yield SD (σ)			Log economic mean yield (μ)		
	Estimate (SE)	F	P-value	Estimate (SE)	F	P-value	Estimate (SE)	F	P-value
AIC	753			877			310		
R2	0.29			0.44			0.78		
Group diversity	0.12 (0.027)	19.12	<.0001***	0.19 (0.031)	37.06	<.0001***	0.30 (0.016)	348.61	<.0001***
sqrt(Irrigation)	0.11 (0.016)	49.5	<.0001***	-0.015 (0.019)	0.65	0.42	0.099 (0.0098)	100.88	<.0001***
Precipitation instab.	-0.052 (0.0068)	59.73	<.0001***	0.047 (0.0078)	35.83	<.0001***	-0.0057 (0.0041)	1.89	0.17
Temperature instab.	-0.0027 (0.00067)	15.85	<.0001***	0.0026 (0.00077)	11.38	0.0008***	-0.000073 (0.00041)	0.033	0.86
Time	-0.031 (0.020)	2.54	0.11	0.032 (0.023)	1.97	0.16	0.00083 (0.012)	0.0048	0.94
sqrt(N use intensity)	0.0048 (0.0080)	0.36	0.55	0.11 (0.0092)	133.56	<.0001***	0.11 (0.0049)	520.1	<.0001***
Warfare	0.031 (0.016)	3.66	0.056	-0.066 (0.018)	12.77	0.0004***	-0.035 (0.0098)	12.88	0.0004***

b

	Log economic yield stability (μ/σ)			Log economic yield SD (σ)			Log economic mean yield (μ)		
	Estimate (SE)	F	P-value	Estimate (SE)	F	P-value	Estimate (SE)	F	P-value
AIC	761			896			451		
R2	0.28			0.41			0.69		
Species diversity	0.025 (0.0073)	12.21	0.0005***	0.034 (0.0085)	16.46	<.0001***	0.060 (0.0051)	135.26	<.0001***
sqrt(Irrigation)	0.11 (0.017)	41.64	<.0001***	-0.021 (0.019)	1.16	0.28	0.087 (0.012)	54.00	<.0001***
Precipitation instab.	-0.052 (0.0068)	57.79	<.0001***	0.047 (0.0080)	34.44	<.0001***	-0.0051 (0.0048)	1.11	0.29
Temperature instab.	-0.0035 (0.00066)	28.59	<.0001***	0.0013 (0.00077)	2.74	0.099	-0.0022 (0.00046)	23.38	<.0001***
Time	-0.030 (0.029)	2.23	0.14	0.038 (0.023)	2.63	0.11	0.0083 (0.014)	0.34	0.56
sqrt(N use intensity)	0.0036 (0.0081)	0.20	0.65	0.10 (0.0094)	121.70	<.0001***	0.11 (0.0057)	354.19	<.0001***
Warfare	0.024 (0.00166)	2.23	0.14	-0.076 (0.019)	16.12	<.0001***	-0.051 (0.011)	20.19	<.0001***

Results for multiple linear regression models using non-standardized predictor variables ($n = 437$). **a**, A regression using effective crop group diversity. **b**, A regression using effective crop species diversity. Stability, μ and σ of economic yield were log-transformed and the rate of nitrogen fertilization and irrigation were square-root-transformed. *** $P < 0.001$.

Reporting Summary

Nature Research wishes to improve the reproducibility of the work that we publish. This form provides structure for consistency and transparency in reporting. For further information on Nature Research policies, see [Authors & Referees](#) and the [Editorial Policy Checklist](#).

Statistical parameters

When statistical analyses are reported, confirm that the following items are present in the relevant location (e.g. figure legend, table legend, main text, or Methods section).

n/a Confirmed

- The exact sample size (n) for each experimental group/condition, given as a discrete number and unit of measurement
- An indication of whether measurements were taken from distinct samples or whether the same sample was measured repeatedly
- The statistical test(s) used AND whether they are one- or two-sided
Only common tests should be described solely by name; describe more complex techniques in the Methods section.
- A description of all covariates tested
- A description of any assumptions or corrections, such as tests of normality and adjustment for multiple comparisons
- A full description of the statistics including central tendency (e.g. means) or other basic estimates (e.g. regression coefficient) AND variation (e.g. standard deviation) or associated estimates of uncertainty (e.g. confidence intervals)
- For null hypothesis testing, the test statistic (e.g. F , t , r) with confidence intervals, effect sizes, degrees of freedom and P value noted
Give P values as exact values whenever suitable.
- For Bayesian analysis, information on the choice of priors and Markov chain Monte Carlo settings
- For hierarchical and complex designs, identification of the appropriate level for tests and full reporting of outcomes
- Estimates of effect sizes (e.g. Cohen's d , Pearson's r), indicating how they were calculated
- Clearly defined error bars
State explicitly what error bars represent (e.g. SD, SE, CI)

Our web collection on [statistics for biologists](#) may be useful.

Software and code

Policy information about [availability of computer code](#)

Data collection

Provide a description of all commercial, open source and custom code used to collect the data in this study, specifying the version used OR state that no software was used.

Data analysis

JMP Pro version 12.0.1 (statistical software used for modeling) ; QGIS 2.18 (open source software for geostatistical treatment)

For manuscripts utilizing custom algorithms or software that are central to the research but not yet described in published literature, software must be made available to editors/reviewers upon request. We strongly encourage code deposition in a community repository (e.g. GitHub). See the Nature Research [guidelines for submitting code & software](#) for further information.

Data

Policy information about [availability of data](#)

All manuscripts must include a [data availability statement](#). This statement should provide the following information, where applicable:

- Accession codes, unique identifiers, or web links for publicly available datasets
- A list of figures that have associated raw data
- A description of any restrictions on data availability

The sources of all data used in this study appear in the main text, are referenced in the Methods section and all data are accessible at the URL's provided in the Extended Data Table 1

Field-specific reporting

Please select the best fit for your research. If you are not sure, read the appropriate sections before making your selection.

Life sciences Behavioural & social sciences Ecological, evolutionary & environmental sciences

For a reference copy of the document with all sections, see [nature.com/authors/policies/ReportingSummary-flat.pdf](https://www.nature.com/authors/policies/ReportingSummary-flat.pdf)

Ecological, evolutionary & environmental sciences study design

All studies must disclose on these points even when the disclosure is negative.

Study description	We test the crop diversity-stability relationship using 50 years (1961-2010) of annual harvest data on 176 crop species for each of 91 populous nations by analyzing the dependence of the temporal stability of crop yield on effective crop species and group diversity. To do this, we divided the 50-year data record into 5 decade-long intervals, and calculated yield stability for each interval and nation. We used linear regression models to test for this dependence. Models include time, growing season precipitation and temperature or their temporal stability, rates of fertilization and irrigation and warfare as covariates. We performed additional analyses including an index of data quality as an additional variable in our analyses.
Research sample	The 91 nations analyzed are the globally most populous nations for which temporally complete and high-quality data sets are available. All the data used in our study are accessible online, the source appear in the main text and URL are provided in the Methods section of the manuscript and in a table in the Extended Data Table 1. For each nation and each year, agricultural data (area harvested and production for 176 individual crop species, rate of mineral fertilization, area fitted with irrigation equipment) were obtained from the FAOSTAT database. We also used a dataset from the Center for Systematic Peace: the magnitude of Major Episodes of Political Violence, from which we derived an indicator of warfare. We obtained global gridded climatic data from the Climate Research Unit of the University of Anglia (CRU TS v.3.23).
Sampling strategy	We used the 91 most populous nations because, as mentioned above, these nations are highly representative of global trends, have better data availability, quality and because use of small nations would undue weight to them.
Data collection	Dr. Delphine Renard searched for, downloaded, assembled and verified all data used in our analyses. Dr. David Tilman reviewed and double-checked the data, and independently repeated statistical analyses, including doing additional analyses to assure that reported results were highly robust.
Timing and spatial scale	Data collection for each of the 91 nations studied started in 2016. Updated data on fertilizers, irrigation and warfare were downloaded in January 2018.
Data exclusions	From an initial sample of 100 nations, we removed five nations for which at least 20% of their data on area harvested or production had to be estimated by the FAO. Because Ireland, New Zealand and Netherlands use much of their fertilizer on pastures rather than croplands, and because we could not find annual quantitative data on the amounts so used, they were also excluded from the models. Egypt, which has 100% of cropland equipped with irrigation for the five decades was also removed from the models.
Reproducibility	Not applicable to our study
Randomization	Not applicable to our study as it is not experimental
Blinding	Not applicable to our study
Did the study involve field work?	<input type="checkbox"/> Yes <input checked="" type="checkbox"/> No

Reporting for specific materials, systems and methods

Materials & experimental systems

- | n/a | Involved in the study |
|-------------------------------------|--|
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> Unique biological materials |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> Antibodies |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> Eukaryotic cell lines |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> Palaeontology |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> Animals and other organisms |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> Human research participants |

Methods

- | n/a | Involved in the study |
|-------------------------------------|---|
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> ChIP-seq |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> Flow cytometry |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> MRI-based neuroimaging |

Essay

Cultivate biodiversity to harvest food security and sustainability

Delphine Renard^{1,*} and David Tilman^{2,3}

A confluence of discoveries in ecology and agriculture suggests that biodiversity can help address the sustainability problems facing modern intensive agriculture. Here we explore several questions related to this possibility. Can increases in national crop diversity help increase the stability and security of national food systems? Can practices based on greater crop biodiversity produce yields that compete with those obtained through the long-standing, high-input monoculture model? What are the appropriate levels and combinations of crops to be used? We highlight recent research that suggests it is time to begin unlocking the agricultural potential of biodiversity — from the level of crop genetic diversity to species diversity — and to do so on spatial scales from individual fields to nations. Recent research suggests that the biodiversification of agriculture may lead to greater and more stable yields, decrease land clearing, and lower the use of harmful agrochemicals.

Evolution led to the formation of ~380,000 species of vascular plants on Earth¹. This diversity is not surprising given the global heterogeneity of Earth's soils, climate and topography, and the different plant traits needed to deal with various aspects of this heterogeneity. Of these species, ~6,000 have been used as sources of human food², but just 4 species — wheat, rice, maize and soybeans — provide more than 60% of the calories we consume. It seems ironic that, on a planet where natural selection led to such amazing plant diversity, human selection has favored so few crop species and has cultivated them ubiquitously³.

Perhaps because modern agriculture relies so heavily on a few crop species, the success of these crops is highly dependent on their genetic biodiversity⁴. Consider some 'Green Revolution' crops, such as rice. Continual breeding efforts have become necessary to retain its high yields in the face of rapidly evolving fungal, viral and bacterial diseases and unfavorable climate conditions⁵. Genetic biodiversity is the basic raw material needed when breeding a new variety of a crop, whether it is developed to increase yield or nutritional quality, to make it more resistant to emerging pests and diseases, or to allow it to grow in warmer, cooler, drier or wetter

conditions⁶. Maintaining this within-species biodiversity is so important that special facilities like seed banks and botanical gardens are dedicated to the conservation of a large number of distinct varieties of all of the major crops and their wild ancestors. For instance, more than 125,000 varieties of wheat in total are held in various collections, such as the United States Department of Agriculture National Plant Germplasm System. The Biodiversity Convention also gave a clear mandate for on-farm conservation of crop landraces, a key to subsistence farming systems that provide 30–34% of the world's food⁷.

As the global human population grows from 8 to over 10 billion people, and as more people shift their diets towards higher consumption of meats and calories⁸, agriculture faces immense challenges. It will need to double global crop production to meet food demand and overcome persistent malnutrition, and at the same time greatly decrease its global greenhouse gas emissions (currently over 30% of the global total⁹), water and air pollution, land degradation, and destruction of natural ecosystems.

Against this agricultural backdrop, evidence suggests that some of these challenges could be addressed by an appropriate use of agricultural biodiversity, including greater

genetic and species diversity. Consider the results of the past quarter century of ecological and agricultural research. Studies have demonstrated that Earth's natural and managed ecosystems are more productive and sustainable, and less susceptible to climate hazards and to disease outbreaks, when they have greater plant biodiversity^{10–16}. Although these may seem like bold assertions, they are based on hundreds of field experiments in both the ecological and agricultural realms and a multitude of peer-reviewed publications.

Below we suggest three major ways that increases in crop biodiversity could help make food production more secure and stable, lower environmental harm, and support human health.

National crop diversity for food stability and security

Climate change poses a major threat to food security. Climate events, especially droughts, have caused 50% of the observed sudden drops in national food production since the

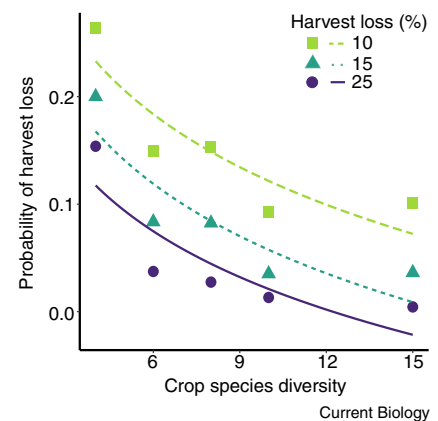


Figure 1. Crop species diversity and probabilities of crop harvest losses.

Relationship between the national effective crop species diversity and the probability of losing 10%, 15% and up to 25% of national harvest. Using FAOSTAT data, the 91 nations studied in Renard and Tilman¹⁹ were equally divided into five classes of crop diversity (average diversity of each class: 4, 6, 8, 10, 15). For all nations in each diversity class, we calculated the probability of harvest loss using the method described¹⁹. Crop species diversity is not a mere count of crop species, but depends on their abundances. It is measured using H' , the Shannon diversity index, and is expressed as $e^{H'}$.



1960s¹⁷. Crop failures destabilize national and global agricultural markets and cause food prices to rapidly rise, harming access to food, especially for the world's poorest people. Because droughts, heat waves and other climate extremes are expected to become more frequent and intense in the future, the frequency of shocks to the global food-supply system may increase. Nations could somewhat address this issue with sufficient water resources and adequate irrigation infrastructure, or with access and adoption of crops that are more resistant to drought and higher temperatures. However, the increasing scarcity of usable water and the difficulty of breeding for higher yields under an erratic climate¹⁸ call for complementary solutions to build more robust agricultural systems.

The use of greater crop diversity within a country has the potential to markedly increase the year-to-year stability, security, and reliability of its food supply. Analyzing 50 years of data across 91 nations, Renard and Tilman¹⁹ found, for instance, that countries with an effective crop diversity of 4 had severe crop harvest declines about once every 7 years, whereas those countries with an effective crop diversity of 10 had such declines only about once every 60 years (Figure 1). This stabilizing effect of crop species diversity is explained by what is called the portfolio or insurance effect^{19,20}. Because different crop species exhibit different responses to hot, cold, wet, or dry weather, and to pests or diseases, greater crop diversity is better at buffering out the impact of environmental variation on the total harvest of all crops in a country.

In the study by Renard and Tilman¹⁹, crop species diversity had the greatest stabilizing effect of all factors examined (Figure 2). Irrigation was of next greatest importance, whereas fertilization showed no significant effect on stability. As would be expected, greater year-to-year variation in rainfall and growing season temperature decreased the stability of total national crop harvests. These results suggest that for many countries, increases in national crop species diversity could

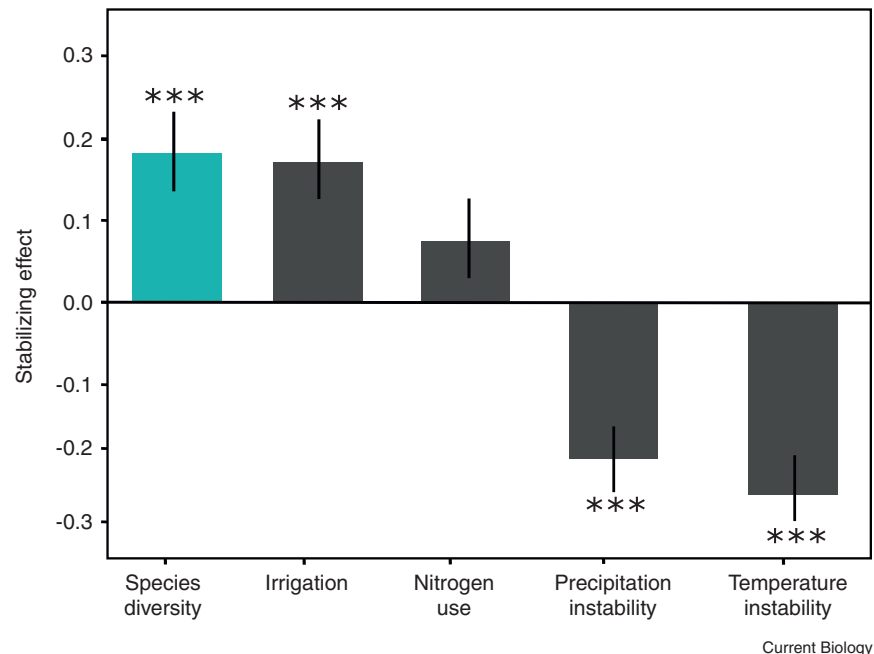


Figure 2. Main determinants of national, caloric-yield stability.

Bars with a positive value correspond to a stabilizing effect (crop species diversity in blue has the largest stabilizing effect, followed by irrigation and fertilization), and bars with negative values reflect a destabilizing effect (temporal instability of precipitation and temperature). Stars indicate factors that significantly affect yield stability. In all cases, *** means $p < 0.001$; where no * is shown means $p > 0.05$. Figure produced using results from Renard and Tilman¹⁹.

significantly promote the year-to-year stability of the total food harvest in a nation in the face of current and likely increasing climatic variability, without a cost to mean yield^{19,20}.

Importantly, merely planting more rare crops offers little if any stabilizing benefits. To attain the benefits of higher crop diversity, the additional crops utilized must each contribute importantly and about equally to national food production. Future research will need to identify those crops that maximize the portfolio effect under a changing climate for particular nations and their climatic and soil conditions. If those crops could also be nutritionally diverse, appropriate diversification within nations could also better fulfill dietary needs²¹. Minor or underutilized crops worldwide represent a still untapped source of diversity to meet both ends. Consider quinoa: this traditional Andean crop was cultivated by only three nations in the 1960s. Thanks to the promotion of its nutritional and flavorful culinary qualities, along with its robustness to climate, 95 nations worldwide are now cultivating or

testing their ability to grow quinoa, including the UK, Denmark, Tibet, India, The Netherlands, China, Brazil and Cuba²².

Crop diversity within fields for higher yields and lower environmental harm

In some of the world's breadbaskets, the maximal yields of major crops, like wheat and rice, have reached plateaus that crop geneticists and agronomists have not been able to exceed for a decade or longer²³. In such cases, it might seem that the only way to increase food production would be to clear more land. Yet land clearing already releases globally significant amounts of carbon dioxide and is the major cause of biodiversity extinction risks globally²⁴. However, a modern twist on an ancient agricultural technology, intercropping, may provide an environmentally and economically beneficial alternative to additional land clearing.

Intercropping entails the cultivation of two or more spatially intermingled crop species on the same piece of land. Numerous well-controlled

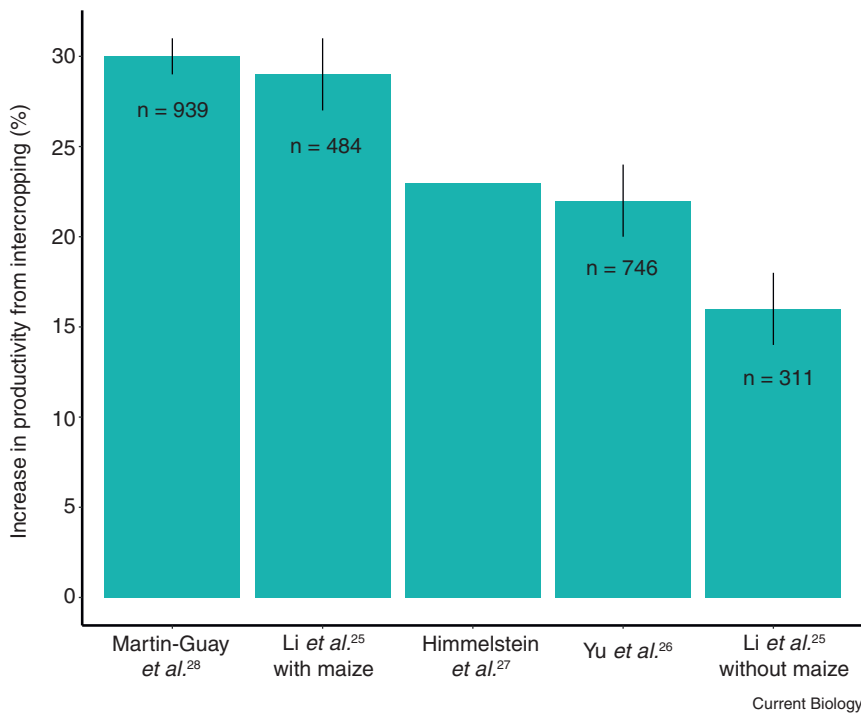


Figure 3. Increase in agricultural yields from intercropping compared with monocultures of the same two crop species.

Magnitude of increase in yield values (in %) are derived from average (\pm standard error) Land Equivalent Ratio (LER) values calculated in four meta-analyses of the existing literature on intercropping. LER corresponds to the amount of land needed under monoculture to produce the same yield reached under intercropping. For instance, Martin-Guay *et al.*²⁸ found that one hectare under intercropping produces on average as much as 1.30 ha (LER) under monoculture. In other words, intercropping produces 30% more than could monocultures of the two species. Himmelstein *et al.*²⁷ did not provide standard error values for LER. Li *et al.*²⁵ provided two LER values, the higher corresponding to intercropping systems in which maize was one of the two crop species, and the lower that did not include maize. The number of data records, *n*, used in each meta-analysis.

and well-replicated experiments conducted worldwide show that intercropping produces from about 16% to 30% greater yields on a given piece of land than do each crop species cultivated in monoculture (Figure 3)^{25–28}. This yield increase was often thought to occur only in low input, subsistence farming systems because poor soils are made more fertile by the presence of a nitrogen-fixing legume crop²⁹. Improved soil fertility would then boost the productivity of the other crop, often a grain. With the high rates of fertilization used in modern intensive agriculture, it was considered unlikely that soil fertility enhancement from intercropping would offer a competitive alternative to monocultures.

A meta-analysis of over 200 agricultural field experiments

challenged this assumption by showing that an intensive version of intercropping, often called strip intercropping, can lead to surprising yield increases for appropriate pairs of crop species^{25–30}. In this modern version of intercropping, the usual high rates of fertilization of intensive agriculture are still used. Each crop is grown in a narrow strip of land of about 1–2 m wide that contains several rows of the same crop species. The adjacent strip has several rows of the other crop, and strips of the two crops alternate (Figure 4). The yields achieved by this intensive form of strip intercropping were on average 29% greater than from monocultures of the same crops, and did so while using 36% less nitrogen fertilizer²⁵. These benefits occur mainly because of seasonal differences in the growth,

maturation and height of the two crops grown^{25,26,30}. Consider a cool-season crop, such as wheat or some legumes (like pea or soybean), grown with maize or another crop that grows best during the heat of summer and early autumn. Because the early season crop has stopped growing and been harvested by the time that the late-season crop is reaching its highest growth rate, there is minimal competition between the two crops. In this ‘relay design’ (Figure 4A,B) each crop can exploit, during its growth period, greater amounts of soil nutrients, water and light than it could in a monoculture, thus giving a greater total harvest than could either monoculture by itself.

To appreciate the difficulty of increasing yields 20% without intercropping, consider that the current year-to-year yield increases for major crops average 1% or less per year. Thus, about 20 years of crop breeding and improvements in agricultural practices would be needed to obtain the same yields in monocultures as intercropping could immediately achieve. Put differently, 20% less land would have to be cleared if modern intensive intercropping were adopted.

Beyond greater yields, there is much more that agriculture could gain by better exploiting ecological complementarity between or within crops. Consistently across studies, the yield benefits from intercropping occur even when 19% to 33% less fertilizer is used²⁵, thus decreasing the pollution that occurs when unused nitrogen and phosphorus enters groundwater, streams, rivers, lakes, and oceans. Intermingling species and varieties also can improve natural control of crop pests such as insects, diseases, or weeds^{28,31,32}. A multi-year experiment in China found that strip intercropping of two rice varieties yielded 89% more than monocultures, mainly by controlling a fungal disease that attacked one of the rice varieties³³. This natural control of disease was so effective that fungicide application was no longer necessary after a few years, alleviating further harm to human health and to biodiversity. Intercropping and variety mixtures

can also help stabilize yields³⁴, increase farmers' incomes²⁷, and promote human health through increased dietary diversity²¹.

Breeding for biodiversity-based agricultural practices

Traditionally, the goal of crop breeding has been to select plant characteristics (traits) that maximize yield in monoculture. This approach can lead to low genetic variability within a crop genome and to individuals that are progressively more alike. However, such crops can be more susceptible to variable weather conditions and to pests and diseases that spread rapidly over homogeneous stands. Breeders know how to use long-standing genetic principles like hybrid vigor to reverse the tide of homogeneity and reintroduce genetic diversity within individuals. Indeed, crossing parent plants with as many genetic differences as possible can produce hybrid progeny that grow faster, produce more seed and fruits, and better resist stresses than either of the parents³⁵.

Similarly, breeding efforts can be undertaken to promote intercropping. Special varieties of a pair of crop species could be developed to maximize yields when grown together via intercropping. The same principle applies for the development of several varieties of single crop species to be grown in mixtures³⁶. Thus far, breeding crops in isolation from other genotypes or species and interactions among them may have deprived crops from the forces promoting species coexistence in nature. In natural communities, each organism develops a unique combination of traits and, like different human professions, exploits different aspects of the environment. Because these very differences among species underlie yield gains and pest control³⁷, past human selection for monoculture performance may have reduced the capacity of crops to perform better when co-occurring with other species.

This possibility was tested in a recent small-scale experiment that compared the gain in plant biomass from crops (including tomatoes, millet, oats, wheat, peas, etc.) versus

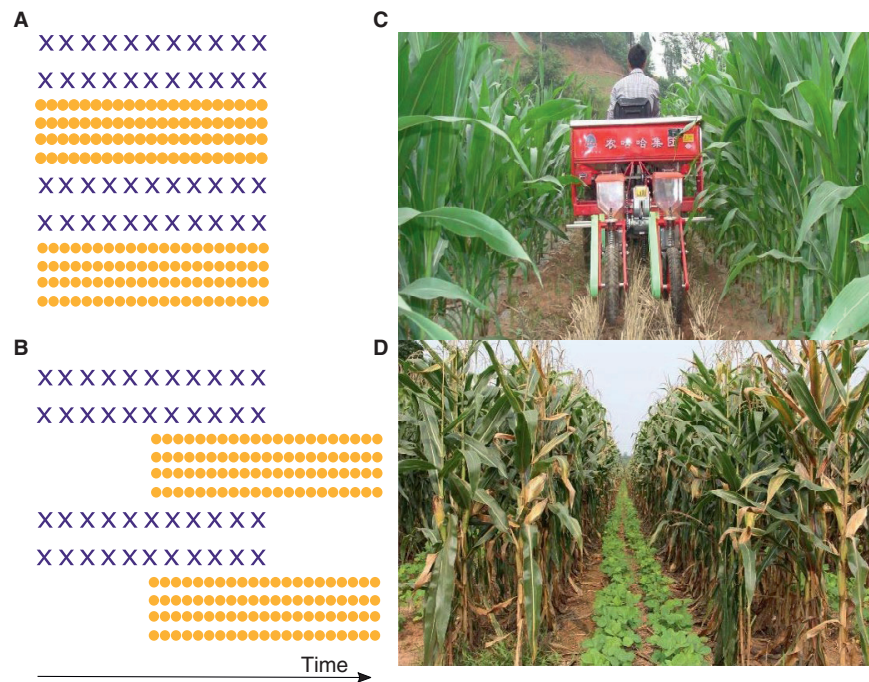


Figure 4. Illustration of relay intercropping.

Schematic illustration of (A) strip intercropping of two crop species (cross and circle, respectively) grown at the same time and (B) relay intercropping with one species (cross) sown and harvested earlier than the other species (circle). Photographs show a mechanized maize/soybean relay intercropping with (C) a tractor of low stature sowing and (D) harvesting soybean in-between strips of already grown maize. (Reprinted by permission from Springer Nature from Li *et al.*²⁵ © 2020.)

their wild relatives as the number of species grown together in pots was increased³⁸. As expected, biomass production was greater in mixtures of crops and wild relatives compared to monocultures. However, the magnitude of this diversity effect was 12% higher in mixtures of wild plants. This difference was attributed to the greater leaf area of crop wild relatives, a competitive trait.

These results and others³⁹ suggest that breeding for uniformity within a crop may miss yield advances that might be obtained by breeding for greater genetic variation, or by planting genotypic mixtures of the same crop species; two strategies that exploit trait variability to minimize disease incidence and intraspecific competition, or that select for differences in competitive abilities.

Conclusions

A fuller use of all levels of biodiversity in agriculture, deployed on spatial scales ranging from within-field to

national levels, seems to have the as-yet untapped potential to increase agricultural productivity and its year-to-year reliability while decreasing its environmental impacts and supporting nutritious diets. We have focused on three ways to increase biodiversity, but there are numerous other possibilities. One well-known approach is to increase crop diversity by alternating crops through time in rotations. Other possible methods of diversification include the use of cover crops, pest-trap and pest-repellent crops, and diversifying agricultural landscapes, all of which merit exploration to determine if, how, and when they simultaneously benefit agriculture, the environment, and society⁴⁰.

Given the potentially large contributions that biodiversity-based practices could make for agricultural sustainability, it is surprising that they are seldom used by farmers or encouraged by policy makers in most countries. Just as wind power and solar power required governmental

aid before becoming profitable on their own, a shift toward global adoption of intercropping and other diversification-based agricultural practices will require government investment in research and farmer education. This research should seek to find the best combinations of crop species and varieties, as well as the spatial and temporal patterns for each region. Efforts should also be made to underwrite the cost of developing the new agricultural machinery required (see Figure 4B,C, for example) to plant, cultivate and harvest adjacent strips of different crops. Pending more efforts to bring diversified cropping systems into the mainstream, the accelerating global demand for food will continue to be met by increasing cropland areas, agricultural greenhouse gas emissions, and environmental pollution from agricultural fertilizer and pesticides. The biodiversification of agriculture has the potential to provide numerous environmental and health benefits.

ACKNOWLEDGEMENTS

Research leading to this contribution was supported by the French National Research Agency (ANR) under the 'Programme d'Investissements d'Avenir' (reference 17-MPGA-0004).

REFERENCES

- Kew Royal Botanic Gardens (2016). State of the World's Plants (London: Kew Royal Botanic Gardens).
- re3data.org (2019). Mansfeld's World Database of Agriculture and Horticultural Crops; editing status 2019-05-17, <http://doi.org/10.17616/R32P4T>. Accessed 7 July 2021.
- Khoury, C.K., Bjorkman, A.D., Dempewolf, H., Ramirez-Villegas, J., Guarino, L., Jarvis, A., Rieseberg, L.H., and Striuk, P.C. (2014). Increasing homogeneity in global food supplies and the implications for food security. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* *111*, 4001–4006.
- Duvick, D.N. (1984). Genetic diversity in major farm crops on the farm and in reserve. *Econ. Bot.* *38*, 161–178.
- Peng, S., Huang, J., Cassman, K.G., Laza, R.C., Visperas, R.M., and Khush, G.S. (2010). The importance of maintenance breeding: A case study of the first miracle rice variety-IR8. *Field Crops Res.* *119*, 342–347.
- Fehr, W.R., ed. (1984). Genetic Contributions to Yield Gains of Five Major Crop Plants, Volume 7 (Madison, WI: CropScience Society of America).
- Ricciardi, V., Ramankutty, N., Mehrabi, Z., Jarvis, L., and Chookalingo, B. (2018). How much of the world's food do smallholders produce? *Glob. Food Secur.* *17*, 64–72.
- Tilman, D., and Clark, M. (2014). Global diets link environmental sustainability and human health. *Nature* *515*, 518–522.
- Crippa, M., Solazzo, E., Guizzardi, D., Monforti-Ferrario, F., Tubiello, F.N., and Leip, A. (2021). Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions. *Nat. Food* *2*, 198–209.
- Tilman, D., Wedin, D., and Knops, J. (1996). Productivity and sustainability influenced by biodiversity in grassland ecosystems. *Nature* *379*, 718–720.
- Tilman, D., Reich, P.B., Knops, J., Wedin, D., Mielke, T., and Lehman, C. (2001). Diversity and productivity in a long-term grassland experiment. *Science* *294*, 843–845.
- Tilman, D., Reich, P.B., and Knops, J.M.H. (2006). Biodiversity and ecosystem stability in a decade-long grassland experiment. *Nature* *441*, 629–632.
- Loreau, M., Naeem, S., Inchausti, P., Bengtsson, J., Grime, J.P., Hector, A., Hooper, D.U., Huston, M.A., Raffaelli, D., Schmid, B., et al. (2001). Biodiversity and ecosystem functioning: Current knowledge and future challenges. *Science* *294*, 804–809.
- Swift, M.J., and Anderson, J.M. (1994). Biodiversity and ecosystem function in agricultural systems. In *Biodiversity and Ecosystem Function*, E.-D. Schulze and H.A. Mooney, eds. (Berlin: Springer), pp. 15–41.
- Altieri, M.A. (1999). The ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Agr. Ecosyst. Environ.* *74*, 19–31.
- Frison, E.A., Cherfas, J., and Hodgkin, T. (2011). Agricultural biodiversity is essential for a sustainable improvement in food and nutrition security. *Sustainability* *3*, 238–253.
- Cottrell, R.S., Nash, K.L., Halpern, B.S., Remenyi, T.A., Corney, S.P., Fleming, A., Fulton, E.A., Hornborg, S., John, A., Watson, R.A., et al. (2019). Food production shocks across land and sea. *Nat. Sust.* *2*, 130–137.
- Tester, M., and Langridge, P. (2010). Breeding technologies to increase crop production in a changing world. *Science* *327*, 818–822.
- Renard, D., and Tilman, D. (2019). National food production stabilized by crop diversity. *Nature* *571*, 257–260.
- Mahaut, L., Violle, C., and Renard, D. (2021). Complementary mechanisms stabilize national food production. *Sci. Rep.* *11*, 4922.
- Heywood, V.H., Fanzo, J., and Hunter, D. (2013). Overview of agricultural biodiversity and its contribution to nutrition and health. In *Diversifying Food and Diets: Using Agricultural Biodiversity to Improve Nutrition and Health*, J. Fanzo, D. Hunter, T. Borelli, and F. Mattei, eds. (London: Earthscan), pp. 35–67.
- Bazile, D., Jacobsen, S.-E., and Verniau, A. (2016). The global expansion of quinoa: Trends and limits. *Front. Plant Sci.* *7*, 622.
- Grassini, P., Eskridge, K.M., and Cassman, K.G. (2013). Distinguishing between yield advances and yield plateaus in historical crop production trends. *Nat. Commun.* *4*, 2918.
- Newbold, T., Hudson, L.N., Hill, S.L.L., Contu, S., Lysenko, I., Senior, R.A., Börger, L., Bennett, D.J., Choimes, A., and Collen, B. (2015). Global effects of land use on local terrestrial biodiversity. *Nature* *520*, 45–50.
- Li, C., Hoffland, E., Kuyper, T.W., Yu, Y., Zhang, C., Li, H., Zhang, F., and van der Werf, W. (2020). Syndromes of production in intercropping impact yield gains. *Nat. Plants* *6*, 653–660.
- Yu, Y., Stomph, T.-J., Makowski, D., and van der Werf, W. (2015). Temporal niche differentiation increases the land equivalent ratio of annual intercrops: A meta-analysis. *Field Crop. Res.* *184*, 133–144.
- Himmelstein, J., Ares, A., Gallagher, D., and Myers, J.A. (2017). A meta-analysis of intercropping in Africa: Impacts on crop yield, farmer income, and integrated pest management effects. *Int. J. Agric. Sustain.* *15*, 1–10.
- Martin-Guay, M.-O., Paquette, A., Dupras, J., and Rivest, D. (2018). The new green revolution: Sustainable intensification of agriculture by intercropping. *Sci. Total Environ.* *615*, 767–772.
- Brooker, R.W., Bennett, A.E., Cong, W., Daniell, T.J., George, T.S., Hallett, P.D., Hawes, C., Iannetta, P.P.M., Jones, H.G., and Karley, A.J. (2015). Improving intercropping: A synthesis of research in agronomy, plant physiology and ecology. *New Phytol.* *206*, 107–117.
- Yu, Y., Stomph, T.-J., Makowski, D., Zhang, L., and van der Werf, W.A. (2016). Meta-analysis of relative crop yields in cereal/legume mixtures suggests options for management. *Field Crop. Res.* *198*, 269–279.
- Letourneau, D.K., Armbrecht, I., Rivera, B.S., Lerma, J., Carmona, E.J., Daza, M.C., Escobar, S., Galindo, V., Gutiérrez, C., López, S.D., et al. (2011). Does plant diversity benefit agroecosystems? A synthetic review. *Ecol. Appl.* *21*, 9–21.
- Iverson, A.L., Marín, L.E., Ennis, K.K., Gonthier, D.J., Connor-Barrie, B.T., Remfert, J.L., Cardinale, B.J., and Perfecto, I. (2014). Do polycultures promote win-wins or trade-offs in agricultural ecosystem services? A meta-analysis. *J. Appl. Ecol.* *51*, 1593–1602.
- Zhu, Y., Chen, H., Fan, J., Wang, Y., Li, Y., Chen, J., Fan, J., Yang, S., Hu, L., Leung, H., et al. (2000). Genetic diversity and disease control in rice. *Nature* *406*, 718–722.
- Raseduzzaman, M., and Jensen, E.S. (2017). Does intercropping enhance yield stability in arable crop production? A meta-analysis. *Eur. J. Agron.* *91*, 25–33.
- East, E.M. (1936). Heterosis. *Genetics* *21*, 375–397.
- Litrico, I., and Violle, C. (2015). Diversity in plant breeding: A new conceptual framework. *Trends Plant Sci.* *20*, 604–613.
- Cardinale, B.J., Matulich, K.L., Hooper, D.U., Byrnes, J.E., Duffy, E., Gamfeldt, L., Balvanera, P., Connor, M.I.O., and Gonzalez, A. (2011). The functional role of producer diversity in ecosystems. *Am. J. Bot.* *98*, 572–592.
- Chacón-Labela, J., Garcia Palacios, P., Matesanz, S., Schöb, C., and Milla, R. (2019). Plant domestication disrupts biodiversity effects across major crop types. *Ecol. Lett.* *22*, 1472–1482.
- Montazeaud, G., Violle, C., Fréville, H., Luquet, D., Ahmadi, N., Courtois, B., Bouhaba, I., and Fort, F. (2018). Crop mixtures: Does niche complementarity hold for belowground resources? An experimental test using rice genotypic pairs. *Plant Soil* *424*, 187–202.
- Gaba, S., Lescouret, F., Boudsocq, S., Enjalbert, J., Hinsinger, P., Journet, E.-P., Navas, M.-L., Wery, J., Louarn, G., and Malézieux, E. (2015). Multiple cropping systems as drivers for providing multiple ecosystem services: From concepts to design. *Agron. Sustain. Dev.* *35*, 607–623.

¹CEFE, Université Montpellier, CNRS, EPHE, IRD, Montpellier 34293, France.

²Bren School of Environmental Science and Management, University of California Santa Barbara, Santa Barbara, CA 93106, USA. ³Department of Ecology, Evolution and Behavior, University of Minnesota, St. Paul, MN 55108, USA.

*E-mail: delphinerenard@hotmail.fr



OPEN

Complementary mechanisms stabilize national food production

Lucie Mahaut[✉], Cyrille Violle & Delphine Renard

Ensuring the temporal stability of national food production is crucial for avoiding sharp drops in domestic food availability. The average stability of individual crop yields and asynchrony among crop yield fluctuations are two candidate mechanisms to stabilize national food production. However, the quantification of their respective influence on the stability of national food production is lacking, as is the identification of the factors regulating both mechanisms. Using yield data for 138 crops and 115 countries over a 50-year period, we first show that the stability of total national yield mostly relies on the fluctuations of the yield of crops covering the largest share of cropland. The average yield stability of these crops exert a stabilizing effect on national food production that is twice as important as the one of the asynchronous yield fluctuations among them. Climate variability reduces the stability of national food production by synchronizing yield fluctuations among crops and destabilizing the yield of individual crops. However, our results suggest that increasing crop diversity can counteract the synchronizing effects of climate variability by enhancing asynchronous dynamics among crops. Irrigation can promote the average stability of individual crop yields but cannot compensate for the destabilizing effect of climate variability. Considering both the response of each crop to climatic variations and the dynamics emerging from crop baskets will help agricultural policies to ensure stable food supply at the national level.

Maintaining the year-to-year stability of national food supply is a critical target for agricultural policies to support food security worldwide. The increasing frequency of extreme climate events such as drought led to strong fluctuations in food production at the national (e.g.¹) and global^{2–4} scales. Such fluctuations in crop production can adversely affect the stability of food supply and impeded food security⁵. Increasing domestic grain reserves⁶ and importing food through international trade^{7–9} can compensate for sharp drops in domestic food availability. However, grain reserves are declining worldwide⁸ and international trade could be source of instability and threaten food sovereignty and security in low-income nations¹⁰. Moreover, with increasing synchronization of major crop failures at the global scale⁴, relying on food imports to ensure food supply seems a limited solution in the long term. In this context, increasing the stability of national food production is a promising, alternative solution to safeguard society against food shortages. Achieving this goal requires the investigation of the different levers of action and of the mechanisms leading to greater stability of national food production.

Decades of research in ecology show that the year-to-year stability of ecosystem productivity results from two distinct mechanisms: the stability of each individual species and the asynchronous variation among species that allows for losses and gains in productivity to compensate each other (i.e. asynchronous dynamics¹¹). In cropping systems, the use of agricultural inputs such as irrigation water and fertilizers is one way to buffer the effect of environmental fluctuations and stabilize individual crop yields (e.g.^{3,12}). However, ecological experiments in grasslands show that nutrient enrichment reduces the stability of ecosystem productivity by synchronizing the fluctuations among plant species (e.g.^{13–15}). Investigating whether and how agricultural inputs affect asynchronous dynamics among crops is therefore a critical issue to understand the overall effects of agricultural inputs on the stability of national food production.

Another promising strategy to stabilize total national yield is to increase the diversity of crop species or crop groups grown within a country¹⁶. However, the mechanism underlying the crop diversity-national yield stability relationship remains to be elucidated. Theories and experiments in biodiversity-ecosystem functioning research (BEF) show that increasing plant diversity enhances asynchronous dynamics (reviewed in^{17,18}). While the role of species diversity in asynchrony has been extensively studied at the local scale, where species interact (e.g.¹⁹), recent theoretical developments predict that these dynamics can also play out across larger spatial scales^{20,21}. Importantly, attaining greater yield stability through higher crop diversity will also require identifying crops with asynchronous dynamics. Renard and Tilman¹⁶ provide evidences that the stabilizing effect of crop diversity on national food production depends on the number of crops representing an equal share of harvested area

UMR 5175 Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive, Univ Montpellier, CNRS, EPHE, IRD, Univ Paul Valéry Montpellier 3, Montpellier, France. ✉email: lucie.mahaut@cefe.cnrs.fr

(‘effective’ diversity) and not simply on the total number of crops grown in a country. This suggests that fluctuations in the yield of crops covering a large share of national cropland area have a greater impact on the stability of total national yield than fluctuations in the yield of crops occupying only small areas²².

In this study, we quantify the respective role of the average stability of individual crop yields and asynchrony among crop yield fluctuations on national yield stability. Following Renard and Tilman¹⁶, we compute total national yield stability as the ratio between the mean national yield (i.e. the summed annual kilocalories harvested across all edible crops in a nation, divided by the total area [ha] harvested) and the year-to-year standard deviation of this ratio. Although calories are not the most limiting nutrients in terms of nutrition at the global scale²³, using caloric yields allow us to compare the production of the different crops grown within each nation. We further test whether fluctuations of the yield of the most abundant crops have a greater impact on the stability of total national yield. To do so, we calculate the average stability of yields of individual crops and asynchrony among crop yield fluctuations using two measures of crop yield, one non-weighted, and the other for which the yield is weighted by the proportion of total cropland it occupies (see Methods). Similarly, we quantify crop diversity by both crop richness and the exponential of the Shannon diversity index (H') that is a measure of the effective diversity²⁴. H' weights each crop in a nation by the proportion of total cropland it occupies so that the crops that are most produced in a country count more than the minor crops in the calculation of diversity (see Methods). Finally, we assess by which of these mechanisms climate variability, crop diversity and agricultural inputs affect the stability of national food production.

Results and discussion

We used structural equation models (SEMs) to disentangle the role of two stabilizing mechanisms (i.e. the average stability of individual crop yields and asynchrony) and three factors (i.e. climate variability, crop diversity and agricultural inputs) on national yield stability. We built two separate models, one based on crop richness, individual crop yield stability and asynchrony and the other based on these same indices weighted by the crop's share of total area harvested.

Our results reveal that the stability of national food production mainly depends on yield fluctuations of crops that cover a large proportion of the national harvested area. The model including the area-weighted measure of national crop yield explains 87% of the variance of national yield stability versus 48% for the model that does not account for differences in area planted for different crops (Fig. 1). This echoes recent findings showing that the fluctuations of the most largely produced crops have a larger weight on the stability of the total national food production²². Although crops with a lower share of cropland weight less in the process, their cultivation deliver other critical services for food security, for example by providing higher economic incomes or nutritional intakes^{23,25}.

Both the average stability of individual crop yield and yield asynchrony have significant, stabilizing effects on total national yield when yields are weighted by the proportion of area harvested (Figs. 1, 2). Importantly, this finding indicates that both fluctuations in the yield of a single crop and the dynamics that occur between crop yield fluctuations must be considered to ensure stable food production. However, the influence of the average stability of individual crop yields was twice as important as the one of asynchrony (Fig. 1). Conversely, when crop's abundance is not accounted for, asynchrony has no significant effect on the stability of national yield (Fig. 1), suggesting that yield gains in crops representing low share of area harvested cannot compensate for yield losses in the most abundant crops at the national scale.

Climate variability has been identified as a main determinant of national food production instability¹⁶. Our results show that this destabilizing effect arises not only from a negative effect of precipitation and temperature variability on the average stability of individual crop yields, as previously observed¹, but also from a synchronization of individual crop yield fluctuations (Fig. 1). This brings novel evidence that climate is a main driver of the synchronization of the global production of major commodities⁴.

Previous studies have revealed the potential of crop diversity to increase the stability of crop production at the national scale^{16,22}. Accordingly, we find a strong, positive effect of crop diversity on asynchrony (Fig. 3) that can largely counteract the synchronizing effect of climate variability (Fig. 1). This result indicates that asynchrony among the most abundant crops is the main process by which crop diversity stabilizes national food production¹⁶, confirming that the mechanisms invoked in BEF studies, classically conducted at local scales, can be extended to larger spatial scales^{20,21}. However, whereas local-scale BEF studies often involve direct biotic interactions in driving asynchronous dynamics among species (e.g., ref.¹⁹), our dataset at national scale does not allow considerations of the effects of crop-crop interactions. Further research will be needed to go beyond our correlative approach to better understand the links between crop diversity, asynchrony and yield stability at such a large scale. In particular, the role of spatial heterogeneity in environmental conditions in shaping the distribution of crops and in generating spatial asynchronous dynamics among different crops merits deeper exploration^{20,21}.

Investigating the role of agricultural inputs shows that greater use of irrigation stabilizes total national food production by increasing the average stability of crops that occupy the largest proportion of the national harvested area (Figs. 1, 4). This probably reflects the fact that the most important crops for food consumption and trade (e.g. rice, cereals, maize) are also the most irrigated²⁶. However, the stabilizing effect of irrigation on the yields of these crops is by far lower than the destabilizing one of climate variability (Fig. 1). The selection of varieties that are less reliant on irrigation and more resistant to climate variability will consequently be important to ensure a higher stability of crop yields^{27–29}. Finally, we find that nitrogen fertilisation weakly affects the stability of the total, national yield although it is negatively associated with the average stability of individual crop yields when crop's abundance is not accounted for (Fig. 1).

Ensuring the stability of food production at national level is becoming an increasingly important challenge for agricultural policies. Overall, our study reveals that both the average stability of individual crop yields and

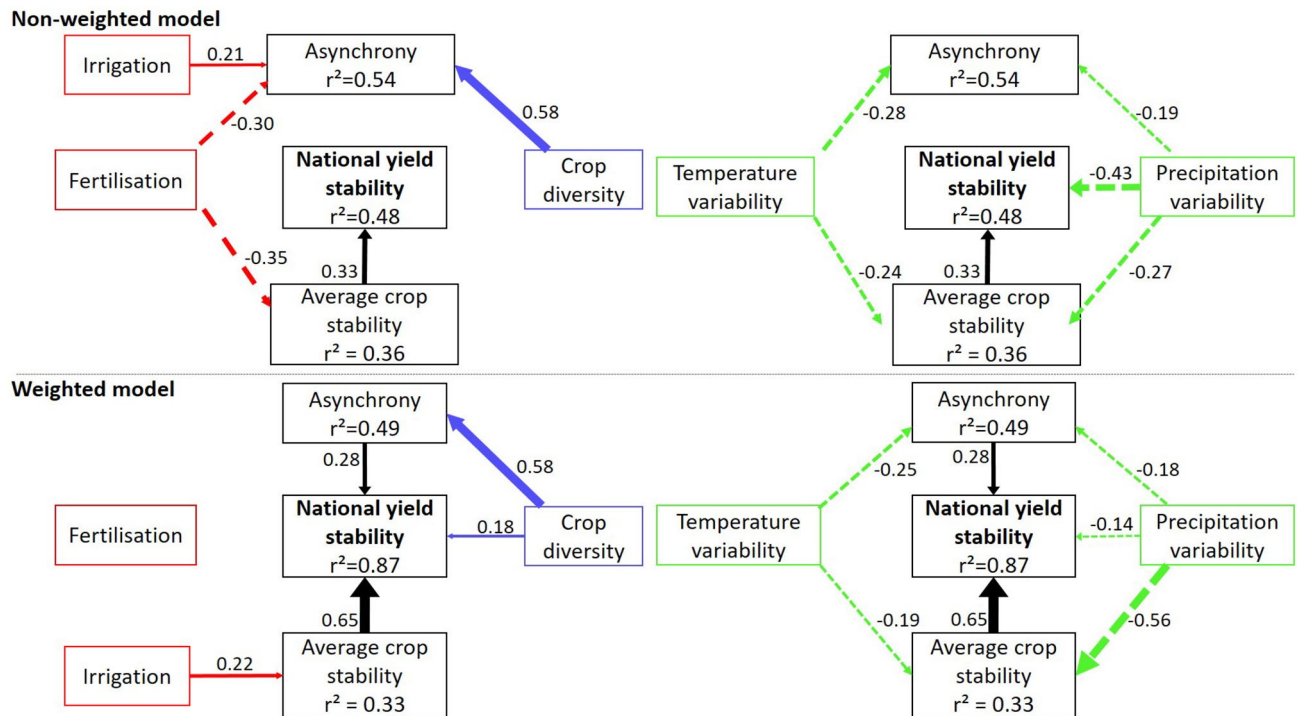


Figure 1. Structural equation model representing the drivers of the stability of national food production. For a seek of clarity, the contribution of agricultural inputs (red path) and crop diversity (blue path) to the stability of national food production are represented separately from the ones of climate variability (green path) [left and right panels, respectively]. Top: Non-weighted model. Crop diversity is quantified by crop richness. Down: Abundance weighted-model. Crop diversity is quantified by the exponential of Shannon diversity index. Asynchrony and average stability are weighted by the proportion of total cropland each crop occupied. The thickness of the arrows indicates the relative contribution of each variable. Plain arrows represent positive relationships while dotted arrows represent negative relationships between two boxes. Only relationships supported by the data ($P > 0.05$) are shown. Standardized regressions weights (along arrows) and squared coefficient of regressions (r^2) for the fitting model are shown. Test indicates close model-data fit (Fisher's $C = 0.16$, $P = 0.92$ and Fisher's $C = 0.46$, $P = 0.79$ for non-weighted and weighed models, respectively). National yield stability, nitrogen use intensity and the percentage of land equipped for irrigation are log-transformed.

asynchrony in yield fluctuations among crops are important mechanisms to stabilize national food production in the face of climate variability. Promoting crop diversity at the national level might be a solution to promote multiple benefits, including greater stability of food production^{16,22}, a diversified diet³⁰ and the reduction of the use of agricultural inputs³¹. However, not all baskets of crops can provide all of these services, and our results suggest that it is important to design crop diversification strategies in a way that promotes asynchronous yield fluctuations between crops, for example by selecting species with different responses to environmental fluctuations. Finally, while the national level is the one at which agricultural policies are made, working at such a large scale does not allow to fully capturing determinants of food supply at finer scales. Transposing our approach to smaller scales will provide a better understanding of the determinants of stable food production worldwide.

Materials and methods

National yield stability. We used the FAOSTAT database (<http://www.fao.org/faostat>, visited in September 2019) to obtain data on annual crop production (in tons) and area harvested (in hectares) from 1961 to 2010 for 138 crops in 91 populous nations. Following Renard and Tilman¹⁶, we accounted for differences among nations in data quality and excluded five nations, namely North Korea, Guinea, Kenya, Mozambique and Zambia, for which at least 20% of the data on area harvested or production were extrapolated by the FAO (see details in¹⁶). We calculated for each nation and each year the total annual caloric yield (millions of kcal ha⁻¹). To do so, we first calculated the kcal production of each crop by multiplying the production of each crop by its commodity-specific kilocalorie conversion factor from the USDA Nutrient Database³². In doing so, we were able to compare the production of different crops. Then, we summed these kcal harvests across all crops and divided this value by the sum of harvested area for all crops. We calculated national yield stability (S) as the ratio of mean total annual caloric yield (μ_T) over its time-detrended standard deviation (σ_T) for fifty consecutive years (1961–2010). We accounted for a temporal trend of increasing total annual crop yield by implementing a loess regression between annual crop yield and years. σ_T corresponds to the standard deviation of the residuals of this regression. Finally, we compared this stability index (largely used in the biodiversity-ecological functioning research, e.g.^{14,16–18}) with the resilience index used by Zampieri et al.²². Both indices were strongly correlated ($r = 0.992$), strengthening our findings.

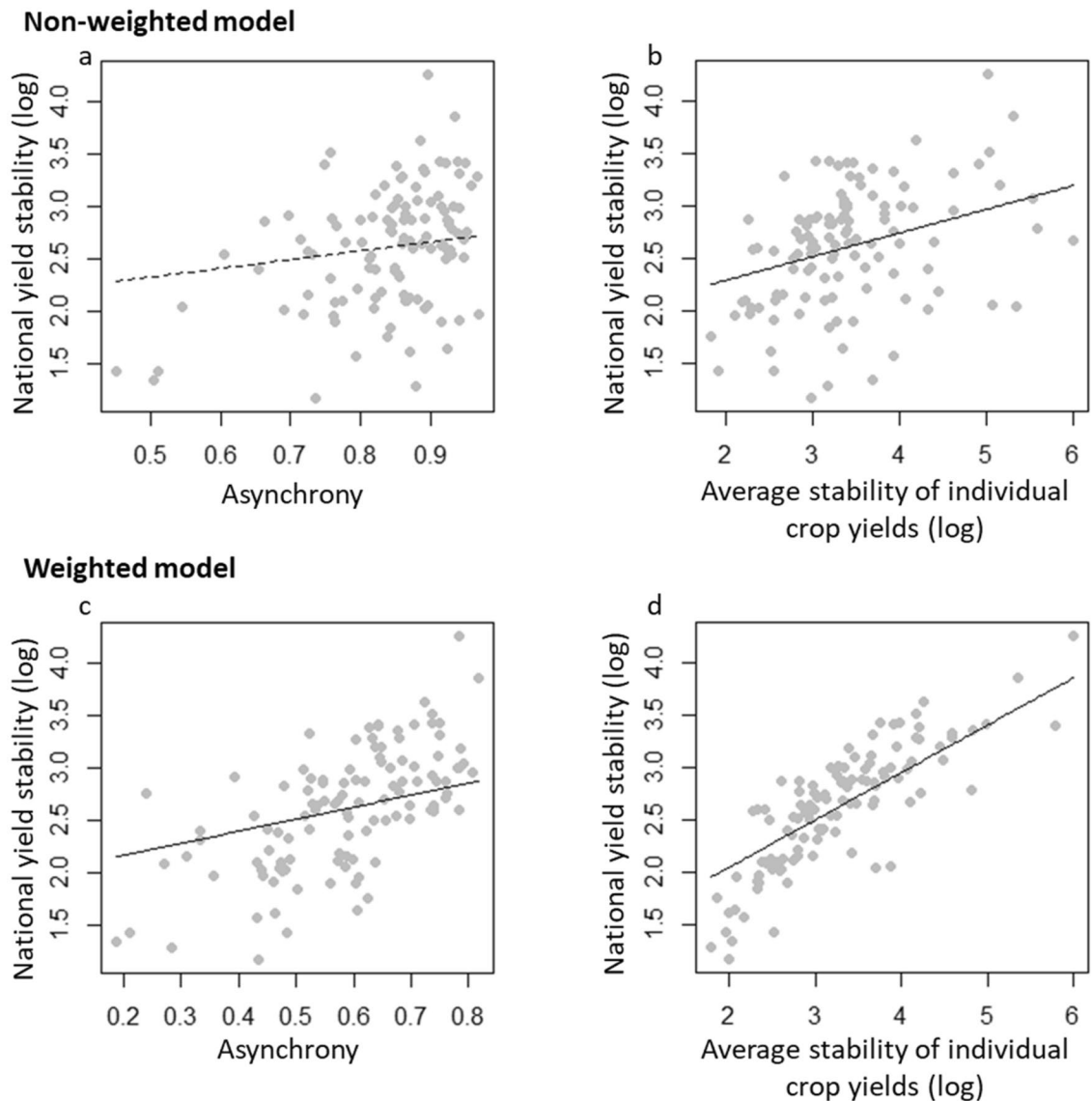


Figure 2. Effects of the average stability of individual crop yield and asynchrony on total, national yield stability. Black lines show the relationships estimated by the structural equation model when the crop yields are non-weighted (a, b) and weighted (c, d) by the proportion of cropland occupied by each crop within a country. Dashed lines represents non significant relationship.

Individual crop yield stability and yield asynchrony. For each country, we quantified the average stability of yields of individual crops as the mean of the inverse of the coefficient of variation of yield of each crop:

$$\left(\sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{\sigma_i} \right) / N \quad (1)$$

where μ_i is the temporal mean of crop's annual kcal yield and σ_i its time-detrended standard deviation. Time-detrended crop yield was computed through a loess regression between individual, annual crop yield and years.

We computed the asynchrony between crop yield fluctuations following the index developed by Loreau and De Mazancourt¹¹:

$$\Phi = 1 - \frac{\sigma_T^2}{\left(\sum_{i=1}^N \sigma_i \right)^2} \quad (2)$$

where Φ is the asynchrony of crop species based on annual caloric yield (millions of kcal ha⁻¹) with σ_T^2 the temporal variance of the time-detrended national yield and σ_i the time-detrended standard deviation of each crop's annual kcal yield. The value of asynchrony varies between zero (perfect synchrony) and one (perfect asynchronous temporal fluctuations).

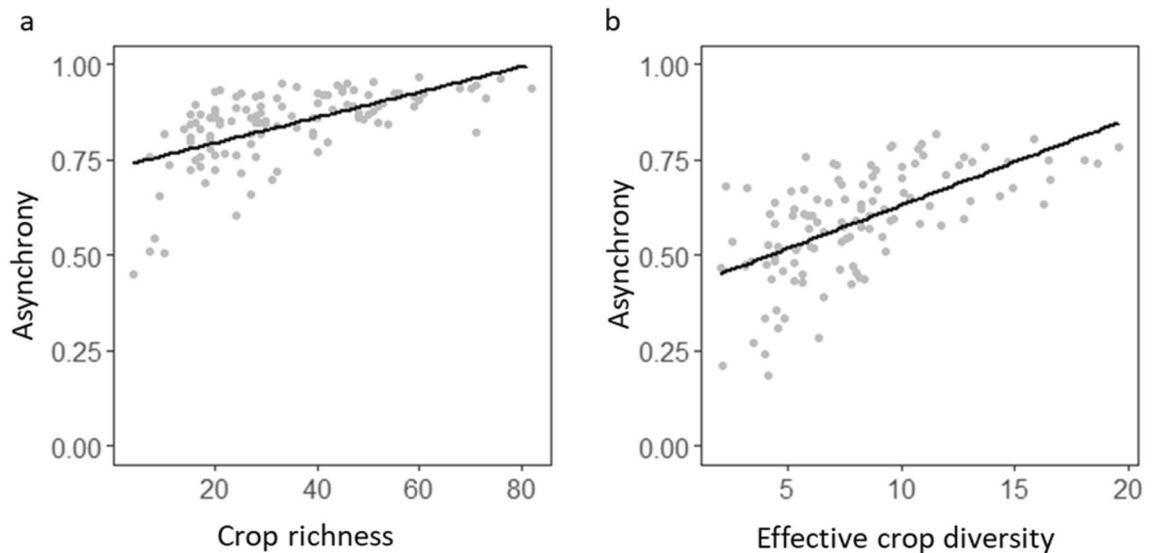


Figure 3. Effects of crop diversity on asynchronous dynamics among crop yield fluctuations. Black lines show the relationships estimated by the structural equation model when the crop yields are non-weighted (a) and weighted (b) by the proportion of cropland occupied by each crop within a country.

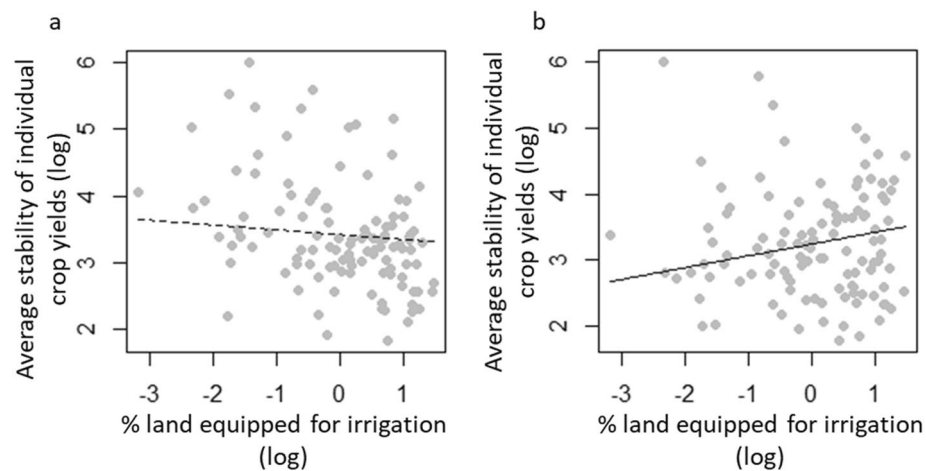


Figure 4. Effects of the percentage of land equipped for irrigation on the average stability of individual crop yields. Black lines show the relationships estimated by the structural equation model when the crop yields are non-weighted (a) and weighted (b) by the proportion of cropland occupied by each crop within a country.

To test whether yield fluctuations of the most abundant crops have a greater impact on the stability of national food production, we weighted the annual yield of each crop by the proportion of total harvested area occupied by that crop. Average stability of yields of individual crops and yield asynchrony were computed on both the non-weighted and abundance-weighted yields.

Crop diversity. For each country and year, we used both the total number of crop commodities (i.e. crop richness) and the Shannon information index (H') to quantify crop diversity. H' weights each crop in a nation by the proportion of total cropland it occupies (p_i):

$$H' = - \sum_{i=1}^N (p_i \ln[p_i]) \quad (3)$$

with N being the total number of crops grown in a country each year.

The exponential form of the Shannon diversity index gives the effective crop diversity that is the number of crops representing an equal share of harvested area²⁴. In other words, the exponential of the Shannon diversity index weighs all species by their frequency, without favouring either common or rare species²⁴. We averaged

the annual effective diversity of crop across the fifty years studied to test the effect of crop diversity on national yield stability.

Agricultural inputs. We extracted the annual national application of nitrogen and the annual cropland area equipped for irrigation from the FAOSTAT database. Because Ireland, New Zealand and Netherlands use much of their fertilizers on pastures rather than croplands, we excluded these nations from our analysis. Similarly, we excluded Egypt because it has 100% of cropland equipped for irrigation. We calculated the annual rates of nitrogen application and irrigation per hectare by dividing their use by the total annual cropland area.

Climate variability. We used global gridded climatic data from the Climate Research Unit of the University of East Anglia³³ to compute the year-to-year variability of growing season precipitation and temperature for each country, both strongly affecting the stability of national food production¹⁶. From these data, we derived annual precipitation and temperature for each grid cell in a country by taking the sum of monthly precipitation and the mean of monthly temperature values weighted by the proportion of cropland in each grid cell³⁴. We then computed the year-to-year coefficient of variation of cropland-based temperature and precipitation for each country.

Statistical analysis. We used structural equation models (SEMs) to evaluate how irrigation, intensity of use of nitrogen fertilizers and crop diversity affected national yield stability through changes in the average stability of yields of individual crops and asynchrony of yields. SEMs represent a powerful way to disentangle complex mechanisms controlling crop diversity-stability relationships, as previously done in natural ecosystems (e.g.^{14,15,35,36}). We set up two different structural equation models, one based on non-weighted indices of stability of individual crops and asynchrony, the other based on the same indices weighted by the proportion of total harvested area accounted for by each crop. We firstly considered the effects of agricultural inputs and crop diversity on the stability of national food production via the path of average yield stability. The second path quantified the indirect effects of agricultural inputs and crop diversity on national stability via their impacts on crop yield asynchrony. We also accounted for the direct effects of agricultural inputs and crop diversity on national yield stability. Finally, we controlled for the effects of climate variability on total, national yield stability, individual crop yield stability and yield asynchrony. SEMs were run with the lavaan R library³⁷. We used the standardized estimates to compare the relative importance of the different paths. The model fit was evaluated using the Fisher C'score and its associated *p* values. Because the structural equation model assumes linear relationships between predictors and the dependent variable, we also plotted the relationships between total national yield stability and both asynchrony and average stability of individual crop yield to control for linearity (Fig. 2). Similarly, we investigated the relationships between crop diversity and asynchrony (Fig. 3), as well as between irrigation rate and the average stability of individual crop yield (Fig. 4).

Data availability

The sources of all data used in this study are referenced in the "Materials and methods" section and all raw data are freely accessible at the URLs provided. The datasets used for the analyses are available from the corresponding author upon request.

Received: 16 October 2020; Accepted: 10 February 2021

Published online: 01 March 2021

References

1. Brown, J. K. M. *et al.* Yield instability of winter oilseed rape modulated by early winter temperature. *Sci. Rep.* **9**, 6953 (2019).
2. Lesk, C. *et al.* Influence of extreme weather disasters on global crop production. *Nature* **529**, 84 (2016).
3. Ray, D. K. *et al.* Climate variation explains a third of global crop yield variability. *Nat. Commun.* **6**, 5989 (2015).
4. Mehrabi, Z. & Ramankutty, N. Synchronized failure of global crop production. *Nat. Ecol. Evol.* **3**, 780–786 (2019).
5. Schmidhuber, J. & Tubiello, F. N. Global food security under climate change. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **104**, 19703–19708 (2007).
6. Laio, F. *et al.* The past and future of food stocks. *Environ. Res. Lett.* **11**, 035010 (2016).
7. D'Odorico, P. *et al.* Feeding humanity through global food trade. *Earths Future* **2**, 458–469 (2014).
8. Marchand, P. *et al.* Reserves and trade jointly determine exposure to food supply shocks. *Environ. Res. Lett.* **11**, 095009 (2016).
9. Puma, M. J. *et al.* Assessing the evolving fragility of the global food system. *Environ. Res. Lett.* **10**, 024007 (2015).
10. d'Amour, C. B. & Anderson, W. International trade and the stability of food supplies in the Global South. *Environ. Res. Lett.* <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab832f> (2020).
11. Loreau, M. & de Mazancourt, C. Species synchrony and its drivers: neutral and nonneutral community dynamics in fluctuating environments. *Am. Nat.* **172**, E48–66 (2008).
12. Herrera, J. M. *et al.* Lessons from 20 years of studies of wheat genotypes in multiple environments and under contrasting production systems. *Front. Plant Sci.* **10**, 1745 (2020).
13. Liu, J. *et al.* Nitrogen addition reduced ecosystem stability regardless of its impacts on plant diversity. *J. Ecol.* **107**, 2427–2435 (2019).
14. Zhang, Y. *et al.* Nitrogen enrichment weakens ecosystem stability through decreased species asynchrony and population stability in a temperate grassland. *Glob. Change Biol.* **22**, 1445–1455 (2016).
15. Song, M.-H. *et al.* Nutrient-induced shifts of dominant species reduce ecosystem stability via increases in species synchrony and population variability. *Sci. Total Environ.* **692**, 441–449 (2019).
16. Renard, D. & Tilman, D. National food production stabilized by crop diversity. *Nature* <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1316-y> (2019).
17. Loreau, M. & de Mazancourt, C. Biodiversity and ecosystem stability: a synthesis of underlying mechanisms. *Ecol. Lett.* **16**, 106–115 (2013).
18. Thibaut, L. M. & Connolly, S. R. Understanding diversity-stability relationships: towards a unified model of portfolio effects. *Ecol. Lett.* **16**, 140–150 (2013).

19. Tilman, D. *et al.* Biodiversity and ecosystem stability in a decade-long grassland experiment. *Nature* **441**, 629–632 (2006).
20. Gonzalez, A. *et al.* Scaling-up biodiversity-ecosystem functioning research. *Ecol. Lett.* **23**, 757–776 (2020).
21. Wang, S. & Loreau, M. Biodiversity and ecosystem stability across scales in metacommunities. *Ecol. Lett.* **19**, 510–518 (2016).
22. Zampieri, M. *et al.* Estimating resilience of crop production systems: From theory to practice. *Sci. Total Environ.* **735**, 139378 (2020).
23. Kc, K. B. *et al.* When too much isn't enough: Does current food production meet global nutritional needs? *PLoS One* **13**, e0205683 (2018).
24. Jost, L. Entropy and diversity. *Oikos* **113**, 363–375 (2006).
25. Cheng, A. *et al.* Diversifying crops for food and nutrition security—a case of teff. *Biol. Rev.* **92**, 188–198 (2017).
26. FAO Aquastat. <http://www.fao.org/aquastat/en/geospatial-information/global-maps-irrigated-areas>.
27. Harfouche, A. L. *et al.* Accelerating climate resilient plant breeding by applying next-generation artificial intelligence. *Trends Biotechnol.* **37**, 1217–1235 (2019).
28. Kahiluoto, H. *et al.* Decline in climate resilience of European wheat. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **116**, 123–128 (2019).
29. Zhang, H. *et al.* Developing naturally stress-resistant crops for a sustainable agriculture. *Nat. Plants* **4**, 989–996 (2018).
30. Herrero, M. *et al.* Farming and the geography of nutrient production for human use: a transdisciplinary analysis. *Lancet Planet. Health* **1**, e33–e42 (2017).
31. Isbell, F. *et al.* Benefits of increasing plant diversity in sustainable agroecosystems. *J. Ecol.* **105**, 871–879 (2017).
32. FoodData Central. [Online]. Available: <https://fdc.nal.usda.gov/>. Accessed: 27-May-2020.
33. Harris, I. *et al.* Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Sci. Data* **7**, 109 (2020).
34. Ramankutty, N., Evan, A. T., Monfreda, C. & Foley, J. A. Farming the planet: 1. Geographic distribution of global agricultural lands in the year 2000. *Glob. Biogeochem. Cycle* **22**, GB1003 (2008).
35. Bluethgen, N. *et al.* Land use imperils plant and animal community stability through changes in asynchrony rather than diversity. *Nat. Commun.* **7**, 10697 (2016).
36. Shi, Z. *et al.* Dual mechanisms regulate ecosystem stability under decade-long warming and hay harvest. *Nat. Commun.* **7**, 11973 (2016).
37. Rosseel, Y. *et al.* *lavaan: Latent Variable Analysis* (2020).

Acknowledgements

This work was funded by the French National Research Agency under the Programme “Investissements d’Avenir” under the reference ANR 17 MPG A 0004. CV was supported by the European Research Council (ERC) Starting Grant Project ‘ecophysiological and biophysical constraints on domestication in crop plants’ (Grant ERC-StG-2014-639706-CONSTRAINTS). We thank Doyle McKey for helpful comments during the preparation of the manuscript and English proofreading.

Author contributions

L.M., C.V. and D.R. designed the research question; L.M. analysed the data, prepared Fig. 1 and wrote the manuscript. All authors reviewed the manuscript.

Competing interests

The authors declare no competing interests.

Additional information

Correspondence and requests for materials should be addressed to L.M.

Reprints and permissions information is available at www.nature.com/reprints.

Publisher’s note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Open Access This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article’s Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article’s Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

© The Author(s) 2021

Literature review on values articulated in agrobiodiversity management

The multiple values of crop biodiversity

Authors:

Marilou Demongeot [1], Yildiz Aumeeruddy-Thomas [1], Sophie Caillon [1], Tatiana Cardenas [1], Antoine Doncieux [1], Jonathan Locqueville [1], Doyle McKey [1], Anna Porcuna-Ferrer [2], Victoria Reyes-García [3], Delphine Renard [1]

1 CEFE, Univ Montpellier, CNRS, EPHE, IRD, Univ Paul Valéry Montpellier 3, Montpellier, France

2 Institute of Environmental Science and Technology, Universitat Autònoma de Barcelona (ICTA-UAB), Barcelona, Spain Barcelona, Spain

3 a. Institució Catalana de Recerca i Estudis Avançats (ICREA), Barcelona, Spain b. Institute of Environmental Science and Technology, Universitat Autònoma de Barcelona (ICTA-UAB), Barcelona, Spain c. Dept Antropologia Social i Cultural, Universitat Autònoma de Barcelona, Barcelona, Spain

1. Objectives

Numerous studies point out that biodiversity can be key to meeting challenges that modern agriculture is facing. The reasons why farmers use and maintain a diversity of seeds and crops and how they manage this biodiversity in their fields are strongly linked to farmers' values. Synthesizing the multiplicity of these values could contribute to help better target and adapt biodiversity conservation actions to local contexts, and support sustainable practices that benefit farmers, society and the environment. Here, we assess the multiple values at stake in farmers' decisions related to crop biodiversity and build a classification system of values based on farmers' local knowledge, visions, and value systems. We discuss how these values interact with local and global drivers to shape on-farm crop diversity.

2. Methods

Crops and their diversity are associated with values that have been approached in a variety of ways in the literature. As the articles do not systematically use the concept of value, we proposed to look at proxies indicating values (what people care for) and the associated valuations (the process of developing values through experience and choices made). The proxies are a set of indicators allowing to assume the existence of values and correspond to our articles search keywords (see Appendix 3). These proxies correspond to various registers of valuation (practical, rational or emotional), including preference, decision, choice, motivation, justification, attachment, utilization, judgment, consideration, effective valuation, care, perception, point of view, action, management, concern, and rationale. Valuations are the elements or qualities sought or appreciated by farmers synthesized in results 3.1.

Based on a set of 12 case studies selected from the literature, we extracted these proxies and organized them thematically in a tree of valuation processes (Appendices 1 and 2). We also extracted information about the drivers shaping local decision-making regarding crop diversity and related governance challenges.

3. Results

3.1. Valuation tree

We assessed farmers' valuations of crops and their diversity in various agricultural regions across the world (e.g. Corn Belt in the US, orchards in France, Potato Park¹ in Peru, paddy fields in Iran and Myanmar, etc.) and multiple crops (cassava, rice, walnut, wheat, etc.). The resulting valuation tree is organized in four domains. (1) The *socio-cultural domain* includes the social significance and cultural role of crops and crop diversity among various social groups. In particular, this domain encompasses the intangible dimension – that is to say the moral, spiritual and emotional aspects -- of the relationship between individual or communities and cultivated plants. For example, Angé et al. (2018) show that the concept of *respeto*, an affective and moral attitude, is central in the relationship between the Peruvian farmers of the Potato Park and the potatoes. (2) The *crop characteristics* domain relates to the morphological, physiological or phenological characteristics sought by farmers in their crops. Thant et al. (2020) showed that not only yield but resistance to harsh environmental conditions, along with cooking time, taste, aroma, and stickiness of the cooked grain, are all important values conveyed by farmers. (3) The *economic domain* refers to the financial and non-financial valuations related to the means of subsistence. These valuations are related to the needs and functioning of the rural household, including income, workload and uses of crops. For example, Nordhagen et al. (2017) show that self-sufficiency is a major value for a group of farmers in Papua New Guinea, and Mary et al. (1999) show that workload and multifunctionality are determinant in the choice of growing dual-purpose (fruits and wood) walnuts in the Dauphiné region in France. (4) The *ecological domain* includes all the ecological processes by which the crops interact with the surrounding environment (other crops, soil, pollinators, wild fauna and flora). Such interactions include the reduction of soil erosion (Mellon-Bedi et al. 2020), prevention of natural hazards (Nordhagen et al. 2017), habitat provision for wildlife (Bardsley et al. 2019) or contribution to a healthy environment (Marzban et al., 2016). This tree can be used as a tool to guide further scientific evaluations of the multiple values associated with crop diversity.

3.2. Interrelation between valuation processes in farmers' decision-making

The articles reviewed show the importance of the multiple socio-cultural, ecological, economic and agronomic valuations at stake in the decisions made by farmers regarding various levels of crop diversity, from landraces to species, and their management. Even in industrialized, low-diversity systems, farmers recognize a plurality of values in diversification (Cutforth et al. 2001). In addition, all articles reviewed point out at the various links between the domains of valuations (often all domains involved) of crops and their diversity. A visualization of the tree in the form of a Venn diagram illustrates how domains are interconnected spheres (Appendix 2). For example, in Myanmar (Thant et al., 2020), local varieties of rice are preferred not only because they have appreciated culinary qualities, but also because they are adapted to local environmental constraints such as salinity and are resistant to climatic stresses such as heavy rain. They are appreciated because of their competitiveness (high-tillering), and they are less likely to shatter or lodge; they also give high straws that are used as animal fodder. These findings highlight the need to consider values as intricate elements of a system and not as juxtapositions of individual motivations. While policies may

¹ A biocultural park dedicated to the conservation of Andean agrobiodiversity in Písaq, near Cusco

consider farmers through the prism of economic agents, our results show that multiple levers of actions may be needed to support crop diversity.

3.3. Governance issues in crop diversity decisions: the nexus between values, power relations and global processes

Besides farmers' values, various drivers acting at different scales can influence trends in crop biodiversity. These factors can constrain the choices made by farmers beyond their own value system, but can also renew or activate existing values. The evolution of political and socio-economic contexts can indeed favor the expression of new values that become socially acceptable and admissible. It is thus important to evaluate how farmers' values interact with the evolution of economic, environmental and institutional contexts.

Global processes such as market integration are one of the factors driving a decline in the number of farmers and a homogenization of the crops grown globally (Khoury et al., 2016) but do not have the same effect at all scales (Box 2). In some systems, the promotion of improved varieties or cash crops, producing high yields under intensive and mechanized practices, have even led to sharp declines in local crop and wildlife diversity. Such promotion has led, for example, to the erosion of traditional crop diversity in the Central Himalaya -- where up to 40 species and various landraces were grown in traditional systems -- in favor of cash crops such as rice or wheat (Maikhuri et al. 1997). Other studies in the Andes (Helling and Hignman 2005) or Nepal (Upreti and Upreti 2002) show historical trends of native crop diversity erosion linked to market transformation. However, interactions between global and local forces can lead to different outcomes in farmers' fields. In particular, the mobilization of indigenous and non-indigenous knowledge, the multiple uses of crops, and organizational knowledge can all be important guarantors of maintenance of crop diversity (Zimmerer et al. 2013). For example, Brown (2013) has shown that, in the context of loss of maize genetic diversity in Mexico, local initiatives of Chiapas communities of resistance against GMOs allowed *in situ* conservation of local landraces, thanks to indigenous and scientific expertise. These initiatives organized exchanges between local farmers and set up local seed banks but also sent their seeds to other initiatives around the world. The existence of local resilience movements and institutions is essential to ensure community empowerment (Zimmerer et al., 2019, Box 1).

Labeyrie et al. (2021) reported abandonment of subsistence cereals in response to climate change and market demand; and adoption of mainly irrigated horticultural cash-crops, notably in Africa. However, changes in nutritional inputs and mismatch between climate change and crop demands may undermine future food security and farmers' capacity to adapt to climate change.

National and regional policies may also either lead to crop diversity loss, through encouraging cultivation of cash crops for exportation, as did many colonial policies (e.g. the promotion of peanut in the groundnut basin in Senegal (Lericollais 1987)) and the post-colonial "green revolution" (e.g. the promotion of agrochemical intensification of monocultures in Asia (Snapp et al. 2010)) or to the maintenance or increase in crop diversity (Zimmerer, 2013; see Box 2 for an example).

At the community scale, the articles reviewed show that decision-making is influenced by individual characteristics such as gender, education or age and thus knowledge and power relations (Mellon-Bedi et al. 2020; Mary et al. 1999). Thus, while women are at the heart of the production of certain crops, such as groundnut in Burkina Faso, they have more complex and limited access to land, tools and knowledge (Sinare et al. 2021). Crop diversity conservation is thus strongly linked to gender issues (Kerr, 2014). Household characteristics such as socio-economic status is another important local driver. For instance, Nordhagen et

al. (2018) show a diversity of profiles existing among the farmers of Papua New Guinea with, in particular, the affirmation of power linked to the possession of a great diversity of plants.

<p>Box 1. Beneficial synergies between cultural values, local organizations and national policies (Moore, 2013)</p>	<p>Box 2. Market drivers leading to the diversification of agroforestry (Michon et al. 2000)</p>
<p>Japan has experienced a considerable decrease in soybean production due to the liberalization of the market and the importation of cheaper American soybean. However, the diversity of food preparations requiring various qualities of soybeans has effectively contributed to maintain the cultivation of 59 local landraces. The production of local, diverse soybean was then supported by the confluence of two movements: (i) a growing concern of consumers for the traceability of products, which promoted the organization of direct local supply chains and labels and (ii) a support from the government for the environmental benefits linked to the national production of soybeans.</p>	<p>In a context of a lack of recognition of local communities' lands and resources by the state in Indonesia and lack of clear policy support to shifting cultivation the development of a national and international market for natural resin of a non- domesticated forest tree (<i>Shorea javanica</i>, locally damar) led to sharp changes in agroecosystems. From shifting cultivation of rainfed rice and coffee, farmers reconstituted complex agroforests through the plantation of 40 species of trees gardens becoming progressively perennial agroecosystems sustaining the existence of a large diversity of cultivated and wild species. Finally, this diversification trend allowed farmers to reclaim forest resources.</p>

4. Appendix

4.1. Appendix 1 Tree of crop / crop diversity valuation

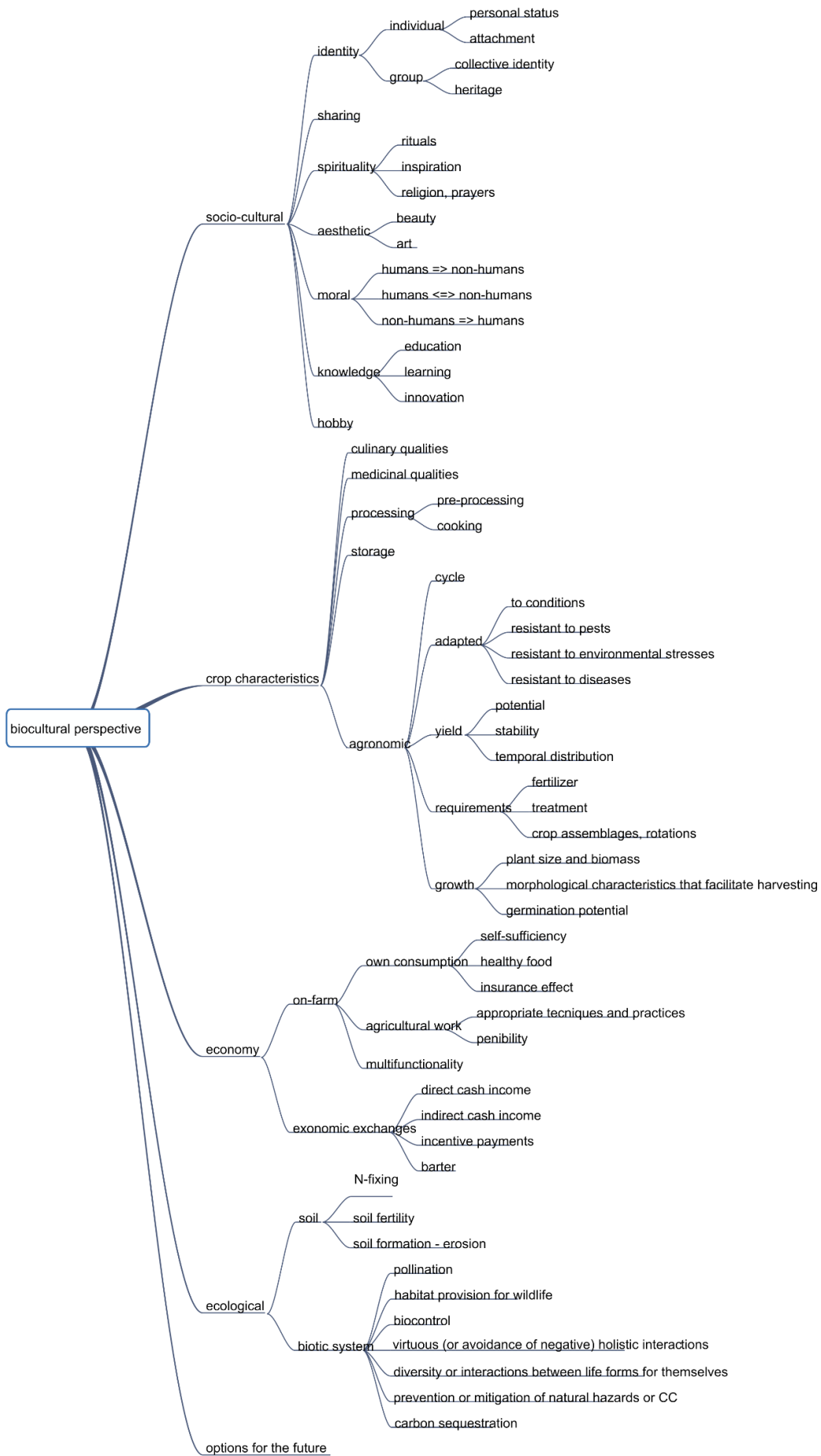
Table of the tree of valuation. To each domain correspond one to three levels of valuation. These levels are a thematic organization of the different results from the literature. The table is read from right to left from the most general (domain) to the particular (the more precise levels of valuation). For each level one or more examples are provided.

Domain	Level 1	Level 2	Level 3	Examples of valuation of landraces / crops / crop diversity
1. Socio-cultural (non-material)	1.1 identity	1.1.1 individual	1.1.1.1. personal status	power, responsibility, pride, social distinction by growing rare or different crops
			1.1.1.2. attachment	
		1.1.2. group	1.1.2.1. collective identity	belonging to a group, a place, adherence to collective standards, common good (in accordance with principles), against a common opponent
			1.1.2.2. heritage	heritage, patrimony, legacy, transmission to the next generation
	1.2. sharing			cultivate for the purpose of sharing (goods or virtues) with others

	1.3. spirituality	1.3.1. rituals, ceremonial food		crops grown for special cultural events, crops with magical uses
		1.3.2. inspiration		crop that gives new sensations, fertile imagination and increased perceptions
		1.3.3. religion, prayers, intangible forces		prayers in tribute to certain crops or using certain crops for offerings / sacrifices
	1.4. aesthetic	1.4.1. beauty		visual aspect, good smell, color, shape
		1.4.2. art		seed art, leaf baskets or mats
	1.5. moral	1.5.1. humans towards non-humans		moral duty, respect, care, responsibility, stewardship, biophilia, recognition of non-humans' autonomy
		1.5.2. between humans and non-humans		interspecific reciprocity, communication, community, companionship, affect, friendship, love, kinship; biocultural wellbeing
		1.5.3. non-humans towards humans		Charisma and agency of non-humans
	1.6. knowledge	1.6.1. education, instructional tool		transmission of agricultural knowledge
		1.6.2. learning, experimental		knowledge acquired through experimentation, trial and error
1.6.3. innovation			testing new crops, discovering practices	
1.7. hobby			recreation, being outside	
2. Crop characteristics	2.1. culinary qualities / organoleptic			good taste, aroma, flavor, texture
	2.2. medicinal qualities			curing or preventing disease, active compounds, properties
	2.3. processing qualities	2.3.1. pre-processing		transformation: detoxification, milling productivity, hulling
		2.3.2. cooking		difficulty, time, techniques (steamed, boiled, baked)
	2.4. storage qualities			seed storage, post-harvest storage, in-soil storage
	2.5. agronomic	2.5.1. cycle		precocity, long cycle, short cycle
		2.5.2. adapted to local conditions	2.5.1.1. adapted to environmental	salinity, rusticity

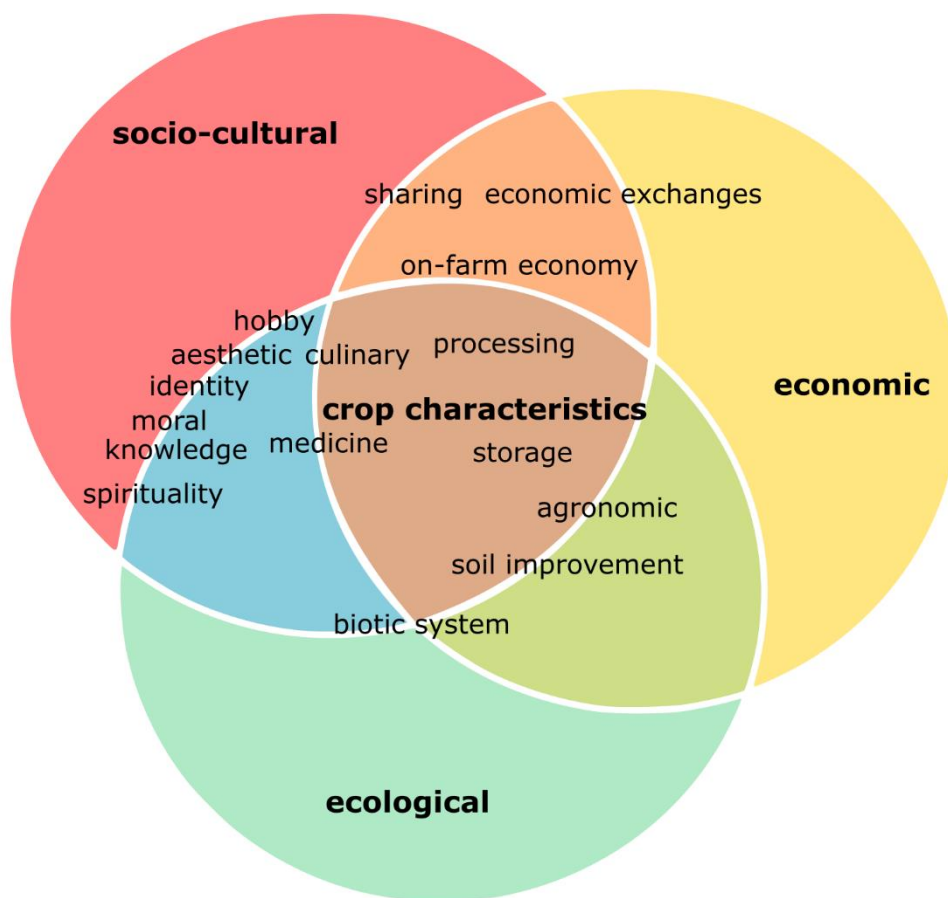
			conditions (e.g. soils)	
			2.5.1.2. resistant to pests	resistant to insects, competitive with weeds
			2.5.1.3. resistant to stresses or extreme events	drought
			2.5.1.4. resistant to diseases	
		2.5.3. yields	2.5.3.1. stability	
			2.5.3.2. potential yield	high yield
			2.5.3.3. temporal distribution	
		2.5.4. requirements	2.5.4.1 fertilizer	
			2.5.4.2. treatment (preventive or curative)	pesticides, herbicides, fungicides
			2.5.4.3 crop assemblages, virtuous associations, rotation	
		2.5.5. growth	2.5.5.1. plant size and biomass production	tallness, branching, tillering, leaf production
			2.5.5.2. morphological characteristics that facilitate harvesting	resistance to lodging, shattering
			2.5.5.3. germination potential	
3. Economic	3.1. on-farm	3.1.1. own consumption	3.1.1.1 food self-sufficiency, food security	
			3.1.1.2. healthy food, nutrition	
			3.1.1.3. insurance effect	spread the risks
		3.1.2. agricultural work	3.1.2.1. appropriate techniques and practices	
			3.1.2.2. workload, working risks	

		3.1.3. multifunctionality		several uses: attracting game, fodder, health, medicine, shelter, arcraft, energy
	3.2. economic exchanges	3.2.1. direct cash income		selling prices, fit to market demand, production costs
		3.2.2. indirect cash income		tourism
		3.2.3. incentive policies		payments for environmental services, NGO or State crop subsidies
		3.2.4. barter		
4. Ecological	4.1. soil	4.1.1 N-fixing		
		4.1.2. nutrient retention/soil fertility		
		4.1.3. soil formation/erosion		
	4.2. biotic system	4.2.1. pollination		
		4.2.2. habitat provision for wildlife		
		4.2.3. biocontrol		biological control of insects / weeds
		4.2.4. holistic interactions, (virtuous or avoidance of negative) interactions between life forms		
		4.2.5. diversity / interactions between non-humans		
		4.2.6. prevention or mitigation of natural hazards / climate change resilience		
		4.2.7. carbon sequestration		
5. Options for the future				



Tree of valuation without examples. Visualization in the form of a tree structure.

4.2. Appendix 2 Venn diagram of crop / crop diversity valuation



Domains are in bold and each domain has its own color. Crop characteristics are material valuations that are in interaction with the other domains. The different valuations (in regular writing) are distributed according to their proximity and from the most immaterial outside the figure to the most material inside the figure.

5. References

- Angé, O., Chipa, A., Condori, P., Ccoyo, A.C., Mamani, L., Pacco, R., Quispe, N., Quispe, W., Sutta, M., 2018. Interspecies respect and potato conservation in the Peruvian cradle of domestication. *Conservation and Society* 16, 30–40.
- Bardsley, D.K., Palazzo, E., Stringer, R., 2019. What should we conserve? Farmer narratives on biodiversity values in the McLaren Vale, South Australia. *Land Use Policy* 83, 594–605. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.02.036>
- Brown, P., 2013. Maya mother seed in resistance of highland Chiapas in defense of native corn, in: Nazarea, V.D., Rhoades, R.E., Andrews-Swann, J. (Eds.), *Seeds of Resistance, Seeds of Hope: Place and Agency in the Conservation of Biodiversity*. University of Arizona Press, Tucson.
- Cutforth, L.B., Francis, C.A., Lynne, G.D., Mortensen, D.A., Eskridge, K.M., 2001. Factors affecting farmers' crop diversity decisions: An integrated approach. *American Journal of Alternative Agriculture* 16, 168–176. <https://doi.org/10.1017/S0889189300009164>
- Hellin, J., Higman, S., 2005. Crop Diversity and Livelihood Security in the Andes. *Development in Practice* 15,

- Kerr, R.B., 2014. Lost and found crops: Agrobiodiversity, indigenous knowledge, and a feminist political ecology of sorghum and finger millet in northern Malawi. *Annals of the Association of American Geographers*.
- Labeyrie, V., Renard, D., Aumeeruddy-Thomas, Y., Benyei, P., Caillon, S., Calvet-Mir, L., M. Carrière, S., Demongeot, M., Descamps, E., Braga Junqueira, A., Li, X., Locqueville, J., Mattalia, G., Miñarro, S., Morel, A., Porcuna-Ferrer, A., Schlingmann, A., Vieira da Cunha Avila, J., Reyes-García, V., 2021. The role of crop diversity in climate change adaptation: insights from local observations to inform decision making in agriculture. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 51, 15–23. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2021.01.006>
- Lericollais, A., 1987. Analyse du changement dans les systèmes agraires Serer au Sénégal.
- Maikhuri, R.K., Semwal, R.L., Rao, K.S., Nautiyal, S., Saxena, K.G., 1997. Eroding traditional crop diversity imperils the sustainability of agricultural systems in central Himalaya. *Current Science* 73, 777–782.
- Mary, F., Dupraz, C., Delannoy, E., Liagre, F., 1999. Incorporating agroforestry practices in the management of walnut plantations in Dauphiné, France: an analysis of farmers' motivations, in: Auclair, D., Dupraz, Christian (Eds.), *Agroforestry for Sustainable Land-Use Fundamental Research and Modelling with Emphasis on Temperate and Mediterranean Applications*, Forestry Sciences. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 243–256. https://doi.org/10.1007/978-94-017-0679-7_15
- Marzban, S., Allahyari, M.S., Damalas, C.A., 2016. Exploring farmers' orientation towards multifunctional agriculture: Insights from northern Iran. *Land Use Policy* 59, 121–129. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.08.020>
- Mellon-Bedi, S., Descheemaeker, K., Hundie-Kotu, B., Frimpong, S., Groot, J.C.J., 2020. Motivational factors influencing farming practices in northern Ghana. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences* 92, 100326. <https://doi.org/10.1016/j.njas.2020.100326>
- Michon, G., de Foresta, H., Kusworo, Levang, P., 2000. The Damar agroforests of Krui, Indonesia: Justice for forest farmers, in: Zerner, C. (Ed.), *People, Plants, and Justice: The Politics of Nature Conservation*. Columbia University Press, New York.
- Moore, R., 2013. Preserving soybean diversity in Japan, in: Nazarea, V.D., Rhoades, R.E., Andrews-Swann, J. (Eds.), *Seeds of Resistance, Seeds of Hope: Place and Agency in the Conservation of Biodiversity*. University of Arizona Press, Tucson.
- Nordhagen, S., Pascual, U., Drucker, A.G., 2017. Feeding the household, growing the gusiness, or just showing off? Farmers' motivations for crop diversity choices in Papua New Guinea. *Ecological Economics* 137, 99–109. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.02.025>
- Sinare, B., Miningou, A., Nebié, B., Eleblu, J., Kwadwo, O., Traoré, A., Zagre, B., Desmae, H., 2021. Participatory analysis of groundnut (*Arachis hypogaea* L.) cropping system and production constraints in Burkina Faso. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine* 17. <https://doi.org/10.1186/s13002-020-00429-6>

- Thant, A.A., Teutschero, N., Vazquez, E., Kalousova, M., Phyo, A., Singh, R.K., Lojka, B., 2020. On-farm rice diversity and farmers' preferences for varietal attributes in Ayeyarwady Delta, Myanmar. *Journal of Crop Improvement* 34, 549–570. <https://doi.org/10.1080/15427528.2020.1746457>
- Upreti, B.R., Upreti, Y.G., 2002. Factors leading to agro-biodiversity loss in developing countries: the case of Nepal. *Biodiversity and Conservation* 11, 1607–1621. <https://doi.org/10.1023/A:1016862200156>
- Zimmerer, K.S., 2013. The compatibility of agricultural intensification in a global hotspot of smallholder agrobiodiversity (Bolivia). *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110, 2769–2774. <https://doi.org/10.1073/pnas.1216294110>
- Zimmerer, K.S., de Haan, S., Jones, A.D., Creed-Kanashiro, H., Tello, M., Carrasco, M., Meza, K., Plasencia Amaya, F., Cruz-Garcia, G.S., Tubbeh, R., Jiménez Olivencia, Y., 2019. The biodiversity of food and agriculture (Agrobiodiversity) in the anthropocene: Research advances and conceptual framework. *Anthropocene* 25, 100192. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2019.100192>

The role of crop diversity in climate change adaptation: insights from local observations to inform decision making in agriculture

Vanesse Labeyrie^{1,2,9}, Delphine Renard^{3,9},
Yildiz Aumeeruddy-Thomas³, Petra Benyei⁴, Sophie Caillon³, Laura Calvet-Mir⁴, Stéphanie M. Carrière⁵, Marilou Demongeot³, Elsa Descamps⁵, André Braga Junqueira⁴, Xiaoyue Li⁴, Jonathan Locqueville³, Giulia Mattalia^{4,6}, Sara Miñarro⁴, Antoine Morel^{1,2}, Anna Porcuna-Ferrer⁴, Anna Schlingmann⁴, Julia Vieira da Cunha Avila⁷ and Victoria Reyes-García^{4,8}



Homogenization of crop portfolios from the field to the global scale is raising concerns about agricultural adaptation to climate change. Assessing whether such trends threaten farmers' long-term adaptive capacity requires a thorough understanding of changes in their crop portfolios, identification of the drivers of change, and the implications such changes have for local nutrition and food production. We reviewed the available literature on farmers' reports of climate-driven crop changes. Small-scale farmers tend to adopt water-demanding crops, even in areas where models predict that reduced rainfall will reduce yields. The adoption of horticultural cash-crops combined with the abandonment of subsistence cereals modifies farmers' nutritional inputs in terms of calories and nutrients, potentially undermining their food security. Farmers' knowledge contributes to understand trends in crop diversity and support the design of strategies for adaptation to climate change.

Addresses

¹ CIRAD, UMR SENS, F-34398, Montpellier, France

² SENS, Univ Montpellier, CIRAD, IRD, UPVM, Montpellier, France

³ CEFÉ, CNRS, Univ Montpellier, University Paul Valéry Montpellier 3, EPHE, IRD, Montpellier, France

⁴ Institut de Ciència i Tecnologia Ambientals, Universitat Autònoma de Barcelona, 08193 Bellaterra, Barcelona, Spain

⁵ IRD-Montpellier, UMR Governance, Risk, Environment and Development (GRED) Université Paul-Valéry Montpellier, Cedex 5 France

⁶ Department of Environmental Sciences, Informatics, and Statistics, Ca' Foscari University of Venice, Via Torino 155, Mestre, Venezia, I-30172, Italy

⁷ Graduate Program in Botany, National Institute of Amazonian Research, Manaus, AM, 69067-375, Brazil

⁸ Institut Catalana de Recerca i Estudis Avançats (ICREA), 08010 Barcelona, Spain

Corresponding author: Labeyrie, Vanesse (vanesse.labeyrie@cirad.fr)

⁹ Vanesse Labeyrie and Delphine Renard are first authors.

Current Opinion in Environmental Sustainability 2021, **51/52**:xx-yy

This review comes from a themed issue on **Climate decision-making**

Edited by **Diana Reckien, Cathy Vaughan and Rachael Shwom**

Received: 17 September 2020; Accepted: 27 January 2021

<https://doi.org/10.1016/j.cosust.2021.01.006>

1877-3435/© 2021 Elsevier B.V. All rights reserved.

Introduction

Diversification and modification of crop species and variety portfolios are widespread strategies used by farmers to cope with environmental and socio-economic variability and to adapt to change [1] including climate change [2]. Despite the significance of crop diversity for the ability of agroecosystems to adapt to climate change, existing public policies and development interventions provide limited support for crop diversification [3]. Rather, development policies combined with market demand over the last forty years have led to the general homogenization of crop species and varieties across regions [4], as well as of national and global food supplies [5]. Now, in the face of climate change, crop homogenization is jeopardizing global food security [5] and weakening farmers' adaptive capacity [2]. The impacts of climate change on agriculture are expected to be particularly strong in Africa, Southeast Asia, Central America, the Pacific, and the Caribbean [6], where small-scale farmers are already facing pressure due to increasing market globalization, urbanization, and

population shifts, all of which impact farmers' crop portfolios [7–9] and household nutrition [10].

Several studies report a global reduction in crop diversity [4,5], but a thorough understanding is needed of how changes in farmers' crop portfolios are linked to global trends and of the combined effects of climatic and socio-economic factors on these changes. Understanding changes in farmers' crop portfolios, the interplay between climate and other drivers of change, and the implications for farmers' food security, nutrition, and income is crucial to inform agricultural decision making, particularly to design viable strategies for long-term adaptation in a rapidly changing world.

Local knowledge is a relatively untapped source of information on the impacts of climate change on local communities and their adaptation strategies [11]. Here, drawing on farmers' reports of observed changes in crop abundance and/or diversity at the level of the species or variety, we describe patterns of climate-related changes in crop diversity and the potential impacts of such changes on farmer's nutrition. Finally, we discuss how studies on local farmers' knowledge contribute to crop diversity research and agricultural decision-making in the face of climate change.

Methods

We searched scientific literature databases covering the semantic fields of local knowledge and observations, crops, and climate change. We selected 95 articles published in English up to and including 2019, that documented changes in crop diversity reported by farmers and explicitly linked to medium-term to long-term climate change (see SI 1 for details). For each reported change, we (i) recorded the geographical location, the corresponding climate zone according to the Köppen–Geiger classification [12,13], and the predominant farming system (i.e. small-scale or large-scale system) in the area concerned, (ii) coded the trajectory of change at the species or variety level as 'an increase in abundance or adoption' (hereafter 'adoption') or 'a decrease in abundance or abandonment' (hereafter 'abandonment'), (iii) coded climate-related drivers of crop changes based on a classification proposed by [14], and (iv) recorded additional non-climate related drivers of crop change, classifying them in economic, ecological, institutional, and socio-cultural categories.

We then classified the documented crops in eight categories: cereals, legumes, tubers, horticultural crops, oilseed, fruit and nuts, service crops (e.g. shade trees), and others (e.g. spices, fodder, and fibers; see SI 2 for details). We calculated the most frequent trajectories of change in each crop category and species and the distribution of perceived drivers of change. Finally, to explore the potential

nutritional impacts of the documented crop changes (in terms of total energy, macronutrients and micronutrients [see SI 1 for the complete list]), we performed two-way ANOVA to compare the nutritional values of adopted and abandoned crop species, using the crop-specific USDA Food and Nutrient database for raw crops [15].

Results

Geographic and climatic distribution of observations

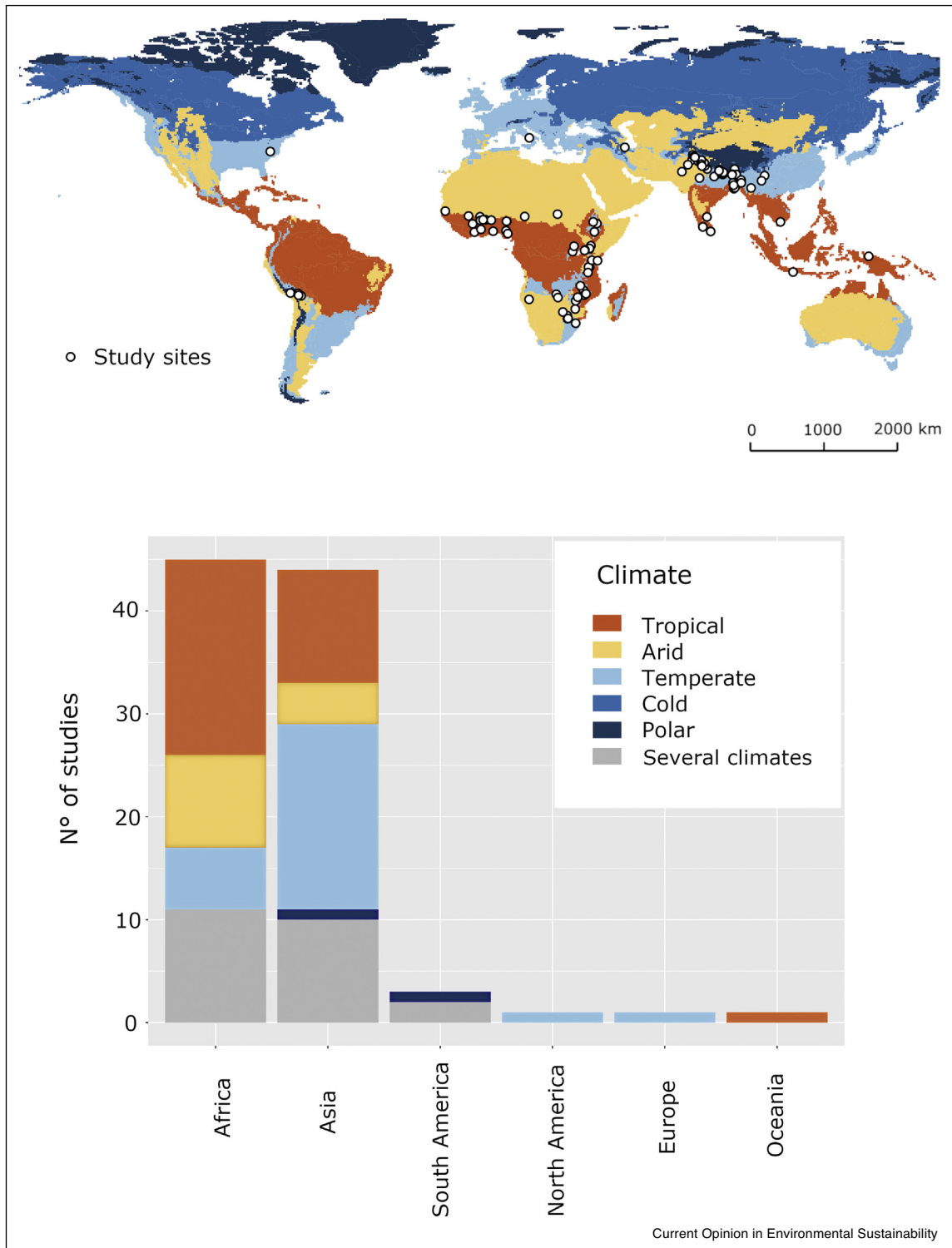
The 95 studies reporting farmers' observations of climate-related changes in crops we reviewed were conducted in 34 countries, 87% of which were in small-scale farming systems. Only 14% of the studies focused specifically on the impacts of climate change on crops, while the majority (86%) mentioned impacts on crops among other elements affected by climate change (e.g. water availability, natural ecosystems, forests). Our results reveal very uneven geographic and climatic distribution of research aimed at documenting climate-related local observations of changes in crops (Figure 1). Forty-seven percent of the studies were conducted in 20 African countries and 46 in 10 countries in Asia. Europe, North America, Oceania, and Latin America were poorly represented (7%, 4 countries). Furthermore, studies were clustered in specific areas, especially in Southern Asia, where most studies focused on India and Nepal, and in southern, eastern, and western Africa. In terms of climate zones, 33% of the studies were conducted in tropical climates, 27% in temperate climates, and 14% in arid climates, and only two studies in polar climates, where agriculture is a minor activity. Twenty-four percent ($n = 23$) of the studies reported data from more than one site located in different climate zones.

From local to global patterns of changes in crop diversity

Out of 428 observations of changes in crop abundance, reports of adoption of species (54%) and varieties (18%) in response to climate change were more common than reports of abandonment of species (23%) or of varieties (5%). Overall, we found reports of changes in the abundance of 113 different species, although 16 species (6 horticultural, 5 cereal, 3 tuber, 1 oilseed, and 1 fruit species) accounted for half the observations that mentioned changes in species.

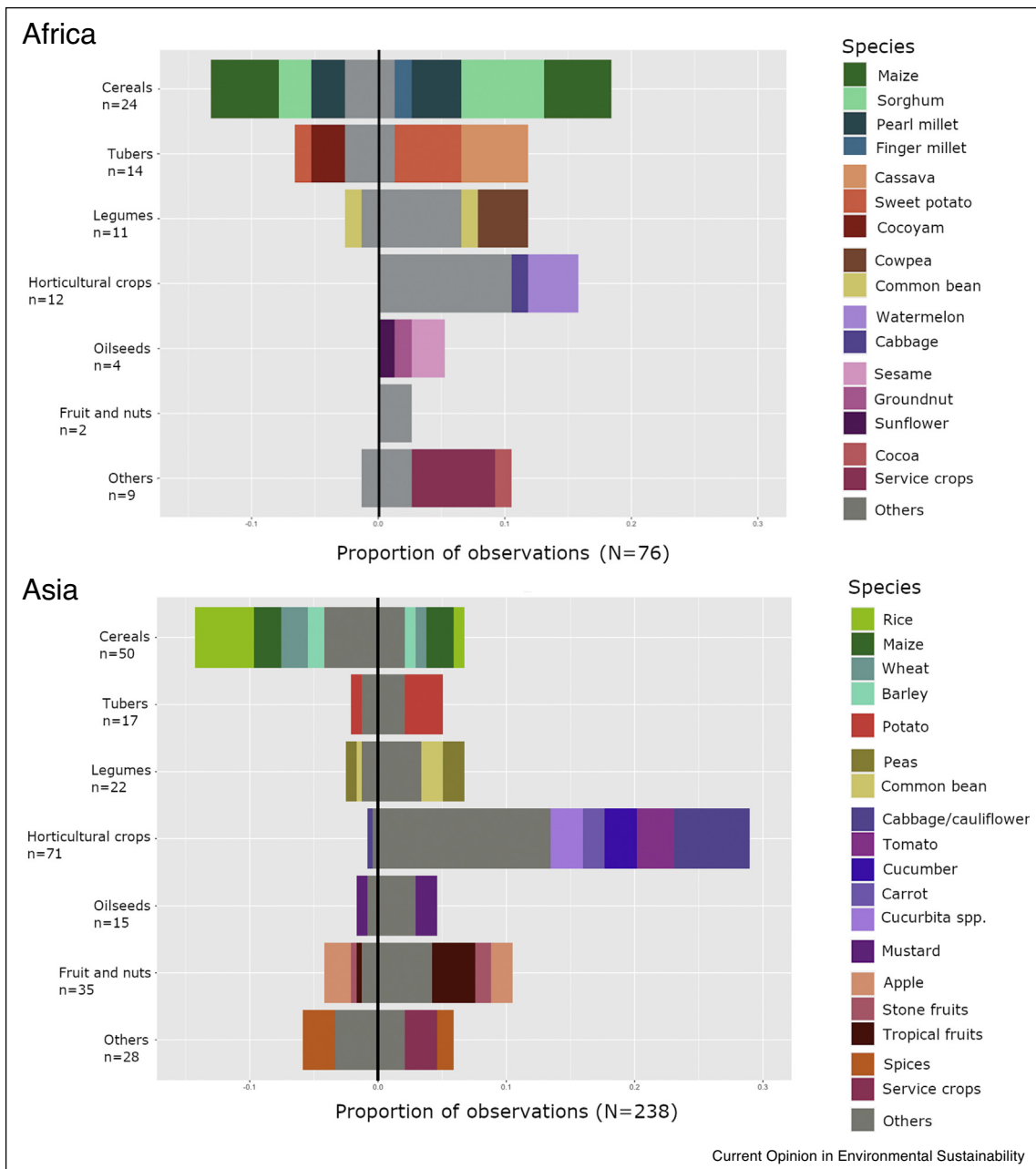
At the species level, 38% of the reports of species adoption ($n = 231$) referred to horticultural crops, followed by cereals (14%), legumes (12%) and fruit and nuts (12%). Most reports of species abandonment ($n = 97$) referred to cereals (47%). While studies in Africa reported more cereal adoption than abandonment, the opposite was observed in Asia (Figure 2). In Africa, both species abandonment (56%) and adoption (24%) mainly concerned cereals (especially sorghum, maize and pearl millet). Horticultural crops (especially watermelon) also represented a large share of species adoption in Africa (21%), followed by tubers (16%, mainly cassava and sweet

Figure 1



Top: Geographic and climatic distribution of the case studies analyzed. Bottom: Number of studies per continent and climate zone according to the Köppen-Geiger classification [12,13].

Figure 2



Relative proportion of crop species adopted (right) and abandoned (left) per continent. The x axis shows the number of observations of change in a given species out of the total number of observations for that continent. The main species are displayed in color (i.e. representing more than 3% of the observations at the continent level) and the remaining species are grouped as 'others'.

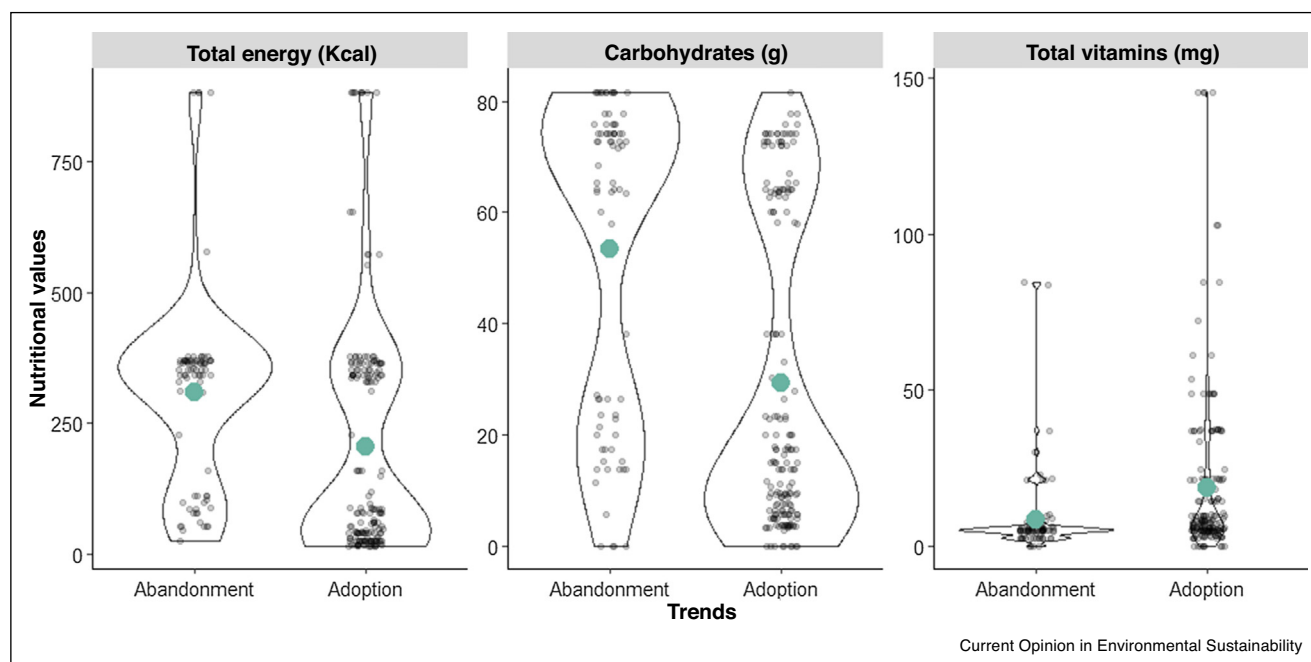
potato), and legumes (16 %, especially cowpea). In Asia, abandonment mainly concerned cereals (45%, mainly rice, wheat and maize), and adoption mainly concerned horticultural crops (43%, mainly tomato, cabbage and cauliflower).

The crops that have been adopted have, on average, fewer calories ($F = 12.1$; $P = 0.001$) and carbohydrates

($F = 39.4$; $P < 0.001$) and higher total vitamin ($F = 9.8$; $P = 0.02$) contents than crops that have been abandoned (Figure 3, see SI 3 for details).

At the infraspecific level, 150 observations reporting changes in the abundance of varieties were found in 66 studies. More adoptions (79%) than abandonment (21%) of varieties were reported. Cereals were the most

Figure 3



Caloric and nutritional content of abandoned crop species (left) and adopted species (right). The violin plot and the dots show the distribution of the crop-specific caloric values, macronutrients, total vitamin and mineral contents, while the green dots represent the average value per trend of crop change.

frequently reported category (65% of adoptions and 58% of abandonments). The adoption of varieties mainly concerned rice in Asia and maize in Africa. Most of the varieties that were adopted were modern varieties (74% of the observations), whereas most of the varieties that were abandoned were landraces, that is, local 'heirloom' varieties (74%).

The relative role of climate change as a driver of changes in farmers' crop portfolios

The literature refers to climate change as a driver of changes in crop portfolios both in broad and specific terms. In 43% ($n = 185$) of all the observations, researchers broadly reported that farmers attribute changes in their crop portfolio to 'climate change' (Figure 4). Among the observations in which climate was mentioned as a specific driver ($n = 251$), changes in precipitation, particularly increased variability, was the most frequently cited climate driver, and appeared in 86% of the reports. Changes in precipitation itself (mean and variability) were reported to drive 36% of the cases in which horticultural crops were adopted, 67% of the cases in which cereals were abandoned, and 50% of the adoption of cereals. Changing temperatures were also reported to drive the adoption of horticultural crops (22%). Cascading effects of climate changes affecting freshwater

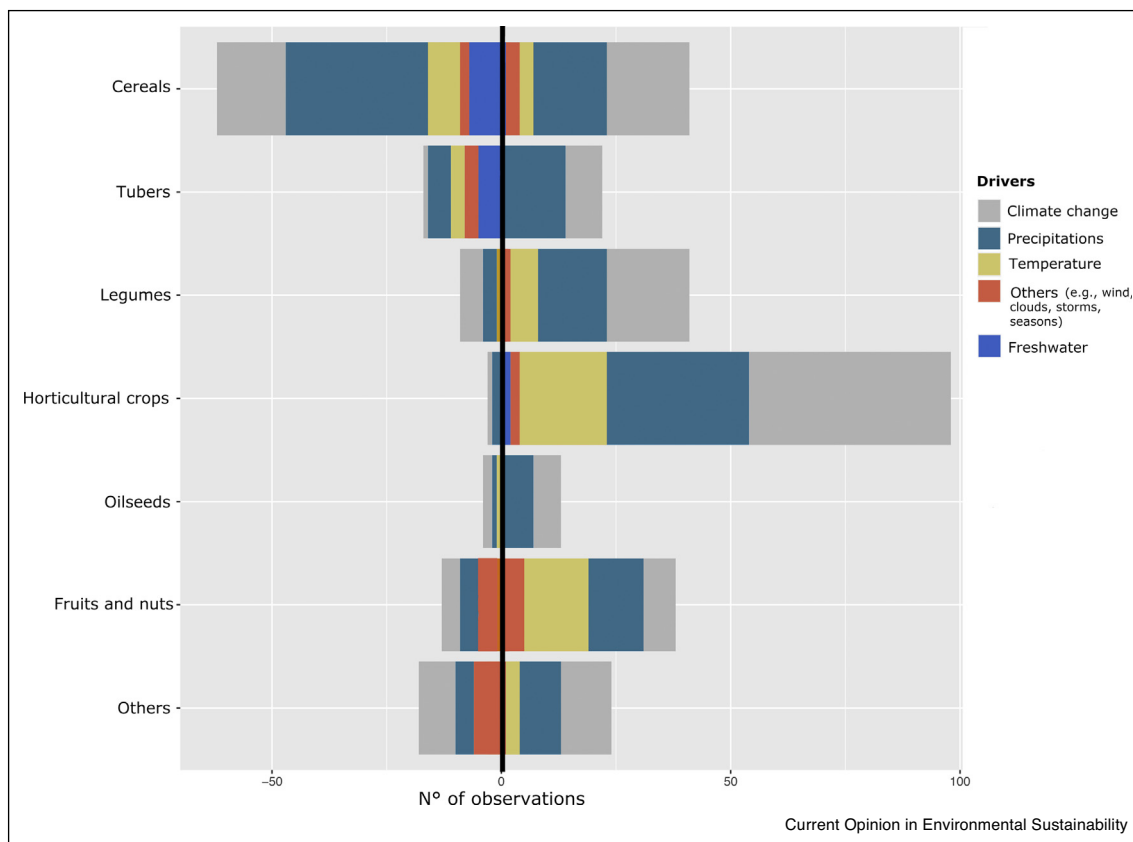
availability were only reported as a driver in 5% of the observations of changes in crop portfolios reported.

While our search focused on the role of climate as a driver of changes in crop portfolios, we noted that climate change was often interlinked with other important drivers of change, sometimes acting in synergetic and sometimes in antagonistic ways. Thus, 32% ($n = 139$) of the reports of changes in crop portfolios were also associated with non-climatic drivers. Economic drivers (55%), and particularly increased access to market opportunities, were the most frequently cited co-drivers of changes in crop portfolios. For example, farmers reported that adopting cash crops (e.g. vegetables) helped offset the lower yields of food crops (e.g. cereals), with the pressure of the two drivers acting to change cropping systems (see SI 4 for further details). Some studies also reported that farmers mentioned other environmental changes, such as declining soil fertility and increasing cases of disease, increasing damage caused by pests or predators as co-drivers of changes in crop portfolios (32%). In a few cases (8%) development programs or NGO projects were also mentioned as drivers of changes in crop portfolios.

Discussion

Our findings suggest that farmers' observations are a valuable source of information on climate-related

Figure 4



Share of observations of changes in crop portfolios at the species level per crop category and climate-related indicators of change. The x axis represents the number of observations of change in crop species associated with each category of climate-related drivers. Positive and negative values along the x axis indicate crop adoption and abandonment, respectively.

changes in local crop diversity. However, to understand global trends, research should aim to fill two important gaps, namely the strong geographical clustering of studies and the strong focus on small-scale farming systems. Our review showed that available literature is focused on a small number of regions in Asia and Africa where climate change is particularly obvious (e.g. in the Himalayas), and that research on farmers' knowledge is circumstantial in regions where large-scale farming predominates (e.g. Europe, USA, Australia). Further, our results suggest that in some regions (e.g. Latin America or North Africa), studies focused on local knowledge are probably published in other languages than English. The body of knowledge on climate-related changes in crop diversity would benefit from including areas that are particularly threatened by climate change and where a drastic decrease in crop yield is expected [16] (including arid regions: the Sahel, North Africa and the Middle East), and those where climate change may open up new farming opportunities (Northern Europe) [17,18].

Our results also suggest that an approach based on farmers' knowledge could provide a complementary perspective to current agricultural research on adaptation to climate change in two important ways. First, current research largely neglects the Southern Hemisphere [19,20]. Second, our review reports on changes to a wide range of crop species, including neglected ones, that is, species that have been the subject of less research despite their potential for adaptation to climate change [21]. Further study of farmers' knowledge would complement the limited scope of current agricultural research on the impacts of climate change that is focused on a small number of crops, maize, wheat, rice and soy [19].

The patterns of changes in crop portfolios reviewed here raise concerns for small-scale farmers' capacity for adaptation to climate change in the long term. We documented the adoption of water-demanding crops (e.g. maize, tomato, watermelon), even in areas where models based on IPCC scenarios predict a decrease in their yield, driven by reduced rainfall [22]. This is particularly the case in

Africa [6,23]. The high proportion of reports on non-climate drivers of crop change (i.e. market incentives, development programs) in our search (that itself focused on climate change) suggests that other factors also drive shifts in crop portfolios. In particular, several articles reported that farmers consider the adoption of high-value cash crops, mainly irrigated horticultural crops, as an opportunity to cope with the impacts of climate change on rainfed food crops (e.g. Refs. [24,25]). Strategies to cope with the impacts of climate change are supported by technological improvements in local agricultural systems (e.g. access to irrigation) and better access to markets. However, they may also threaten farmers' adaptive capacity in the long term, as opportunities to cultivate more water-demanding and high-market value crops are likely to shrink under future climatic conditions [26,27*].

Our review revealed that species' adoption concerns a wide range of crop species and categories (i.e. horticultural crops, tubers, legumes). However, these results call for further investigation to assess if changes to local crop portfolios would lead to homogenization at the regional or global scale that would also pose a threat to the resilience of food systems [4*,5]. Furthermore, despite this apparent gain in diversity at the species level, we also noted that most of the crops that are adopted are modern varieties and that abandoned crops are local landraces. This trend could reduce intraspecific diversity and shrink the diversity reservoir that is critical for adaptation to climate change [28].

The cropping trends we identified also raise concerns for food security. The crop species that have been adopted (i.e. fruit and vegetables) have lower energy and carbohydrate contents than abandoned crop species (i.e. cereals), but are richer in vitamins that are essential for human health. On the other hand, the fruit and vegetables that are being adopted are often geared towards markets, and these new sources of vitamins may not necessarily benefit smallholders' nutrition [29*]. Conversely, the decline in the cultivation of staple cereals, widely reported for major African cereals like millet or sorghum, could increase farmers' food and nutrition insecurity by increasing their dependence on imported crops (e.g. rice) of low nutritional quality [30] and that are also subject to market fluctuations [31]. The benefits of commercial horticulture and associated global food trade for smallholder remains highly controversial, and is strongly scale-dependent and context-based [32–34].

Our review identified important issues for agricultural decision making, especially for development initiatives aimed at strengthening the capacity of small-scale farmers to adapt to climate change. Rural development actors including national and international development agencies and NGOs promote the development of horticulture in small-scale agriculture (e.g. Ref. [35]), but we argue

that such recommendations should not be made without prior evaluation of their medium to long term consequences for small-scale farmers food security and adaptive capacity. The dramatic expansion of horticulture is already causing groundwater depletion in some places (e.g. Ref. [36]). Rural development actors should consider supporting agricultural water uses that are suited to predicted climate change, and need to be sure that expanding commercial horticulture will benefit smallholders' livelihoods without jeopardizing their capacity to adapt in the long term.

Conclusion

Farmers across the world are reacting to the combined effects of climate and non-climate drivers of change by adjusting their crop portfolios. While such adjustments involve both the adoption and the abandonment of certain crops or landraces, we identified a general trend involving the adoption of water-demanding horticultural crops with little energy content. We argue that this trend may threaten the resilience of local cultivation systems and livelihoods. Our review calls for coordinated interdisciplinary research to fill methodological and geographical gaps that currently limit a thorough understanding of farmers' responses to climate change [37]. Such collective efforts are urgent, and could represent a unique opportunity to monitor the dynamics of underresearched crops and trends in regions where long-term research is a challenge. Information concerning climate-related changes in crop diversity at the local scale and their co-drivers could help reorient agricultural policies and development programs toward long-term adaptation to climate change.

Conflict of interest statement

Nothing declared.

CRedit authorship contribution statement

Vanesse Labeyrie: Conceptualization, Funding acquisition, Data curation, Methodology, Formal analysis, Visualization, Writing - original draft, Writing - review & editing. **Delphine Renard:** Conceptualization, Funding acquisition, Data curation, Methodology, Formal analysis, Visualization, Writing - original draft, Writing - review & editing. **Yildiz Aumeeruddy-Thomas:** Methodology, Writing - review & editing. **Petra Benyei:** Data curation, Methodology, Writing - review & editing. **Sophie Caillon:** Methodology, Writing - review & editing. **Laura Calvet-Mir:** Data curation, Methodology, Writing - review & editing. **Stéphanie M. Carrière:** Methodology, Writing - review & editing. **Marilou Demongeot:** Data curation, Methodology, Formal analysis, Writing - review & editing. **Elsa Descamps:** Data curation, Methodology, Formal analysis, Writing - review & editing. **André Braga Junqueira:** Data curation, Methodology, Writing - review & editing. **Xiaoyue Li:** Data curation, Methodology, Writing - review & editing. **Jonathan Locqueville:** Data curation,

Methodology, Writing - review & editing. **Giulia Mattalia:** Data curation, Methodology, Writing - review & editing. **Sara Miñarro:** Data curation, Methodology, Writing - review & editing. **Antoine Morel:** Data curation, Methodology, Formal analysis, Writing - review & editing. **Anna Porcuna-Ferrer:** Data curation, Methodology, Writing - review & editing. **Anna Schlingmann:** Data curation, Methodology, Writing - review & editing. **Julia Vieira da Cunha Avila:** Data curation, Methodology, Writing - review & editing. **Victoria Reyes-García:** Conceptualization, Funding acquisition, Methodology, Writing - original draft, Writing - review & editing.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary material related to this article can be found, in the online version, at doi:<https://doi.org/10.1016/j.cosust.2021.01.006>.

Acknowledgements

This work was conducted in the framework of NetDivA project (ID 1702-022), which was publicly funded through ANR (the French National Research Agency) under the ‘Programme d’Investissements d’Avenir’ reference ANR-10-LABX-001-01 Labex Agro and coordinated by *Agropolis Fondation* in the frame of I-SITE MUSE (ANR-16-IDEX-0006). Research leading to this paper has also received funding from the European Research Council under an ERC Consolidator Grant (FP7-771056-LICCI) and from another ‘Programme d’Investissements d’Avenir’ grant (17-MPGA-0004). This work contributes to the ‘María de Maeztu Unit of Excellence’ (CEX2019-000940-M). We thank Marina Sabaté Miró, David García del Amo, and Faustine Ruggieri for assistance with coding the climatic zones, Ramin Soleymani-Fard for help in designing the database, and Antoine Doncieux and Vincent Porcher for recommending useful references. We acknowledge the comments of two anonymous reviewers, who helped us considerably improve our manuscript.

References and recommended reading

Papers of particular interest, published within the period of review, have been highlighted as:

- of special interest
 - 1. Lin BB: **Resilience in agriculture through crop diversification: adaptive management for environmental change.** *BioScience* 2011, **61**:183-193 <http://dx.doi.org/10.1525/bio.2011.61.3.4>.
 - 2. Altieri MA, Nicholls CI: **The adaptation and mitigation potential of traditional agriculture in a changing climate.** *Clim Change* 2017, **140**:33-45 <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-013-0909-y>.
 - 3. Pimbert MP, Moeller NI: **Absent agroecology aid: on UK agricultural development assistance since 2010.** *Sustainability* 2018, **10**:505 <http://dx.doi.org/10.3390/su10020505>.
 - 4. Martin AR, Cadotte MW, Isaac ME, Milla R, Vile D, Violle C: **Regional and global shifts in crop diversity through the anthropocene.** *PLoS One* 2019, **14**:2 <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0209788> e0209788
- Using national scale agricultural data (FAO), the authors found a global trend toward crop diversification during the 1970s–80s period. Although timing and duration of major changes in crop diversity vary across regions, authors found evidence of increased similarity in crop pool grown globally.
- 5. Khoury CK, Bjorkman AD, Dempewolf H, Ramirez-Villegas J, Guarino L, Jarvis A, Rieseberg LH, Struik PC: **Increasing homogeneity in global food supplies and the implications for food security.** *Proc Natl Acad Sci U S A* 2014, **111**:4001-4006 <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1313490111>.
 - 6. Porter JR, Xie L, Challinor AJ, Cochrane K, Howden SM, Iqbal MM, Lobell DB, Travasso MI *et al.*: **Food security and food production systems.** In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Edited by Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC. Cambridge University Press; 2014:485-533.
 - 7. Van Vliet N *et al.*: **Trends, drivers and impacts of changes in swidden cultivation in tropical forest-agriculture frontiers: a global assessment.** *Global Environ Change* 2012, **22**:418-429 <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2011.10.009>.
 - 8. Zimmerer KS: **Biological diversity in agriculture and global change.** *Annu Rev Environ Resour* 2010, **35**:137-166 <http://dx.doi.org/10.1146/annurev-environ-040309-113840>.
 - 9. Aguiar S, Texeira M, Garibaldi LA, Jobbágy EG: **Global changes in crop diversity: trade rather than production enriches supply.** *Global Food Secur* 2020, **26** <http://dx.doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100385> 100385.
 - 10. Tilman D, Clark M: **Global diets link environmental sustainability and human health.** *Nature* 2014, **515**:518-522 <http://dx.doi.org/10.1038/nature13959>.
 - 11. Reyes-García V, Fernández-Llamazares Á, Guèze M, Garcés A, Mallo M, Vila-Gómez M, Vilaseca M: **Local indicators of climate change: the potential contribution of local knowledge to climate research.** *Clim Change* 2016, **2**:109-124 <http://dx.doi.org/10.1002/wcc.374>
- This analysis highlights the complementarity of fine-grained local knowledge and scientific knowledge on climate change, pleading for bridging both knowledge systems to develop effective adaptation strategies.
- 12. Peel MC, Finlayson BL, McMahon TA: **Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification.** *Hydrol Earth Syst Sci Discuss* 2007, **11**:1633-1644 <http://dx.doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>.
 - 13. Kottek M, Grieser J, Beck C, Rudolf B, Rubel F: **World map of the Köppen-Geiger climate classification updated.** *Meteorol Z* 2006, **15**:259-263 <http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>.
 - 14. Reyes-García V *et al.*: **Local indicators of climate change impacts. Data collection protocol.** *Figshare* 2020:124 <http://dx.doi.org/10.6084/m9.figshare.11513511.v3>.
 - 15. United States Department of Agriculture: *National Nutrient Database.* 2013 <https://ndb.nal.usda.gov/>.
 - 16. World Bank: *World Bank Development Report 2010: Development and Climate Change.* 2010.
 - 17. Bindi M, Olesen JE: **The responses of agriculture in Europe to climate change.** *Reg Environ Change* 2011, **11**:151-158 <http://dx.doi.org/10.1007/s10113-010-0173-x>.
 - 18. Ergon Å, Seddaiu G, Korhonen P, Virkajärvi P, Bellocchi G, Jørgensen M, Østrem L, Reheul D, Volaire F: **How can forage production in Nordic and Mediterranean Europe adapt to the challenges and opportunities arising from climate change?** *Eur J Agron* 2018, **92**:97-106 <http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2017.09.016>.
 - 19. White JW, Hoogenboom G, Kimball BA, Wall GW: **Methodologies for simulating impacts of climate change on crop production.** *Field Crops Res* 2011, **124**:357-368 <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2011.07.001>.
 - 20. Beillouin D, Ben-Ari T, Makowski D: **Evidence map of crop diversification strategies at the global scale.** *Environ Res Lett* 2019, **14** <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/ab4449> 123001.
 - 21. Chivenge P, Mabhaudhi T, Modi A, Mafongoya P: **The potential role of neglected and underutilised crop species as future crops under water scarce conditions in Sub-Saharan Africa.** *Int J Environ Res Public Health* 2015, **12**:5685-5711 <http://dx.doi.org/10.3390/ijerph120605685>.
 - 22. Tripathi A, Tripathi DK, Chauhan DK, Kumar N, Singh GS: **Paradigms of climate change impacts on some major food sources of the world: a review on current knowledge and future prospects.** *Agric Ecosyst Environ* 2016, **216**:356-373 <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2015.09.034>.

23. Pironon S, Etherington TR, Borrell JS, Kühn N, Macias-Fauria M, Ondo I, Tovar C, Wilkin P, Willis KJ: **Potential adaptive strategies for 29 sub-Saharan crops under future climate change.** *Nat Clim Change* 2019, **9**:758-763 <http://dx.doi.org/10.1038/s41558-019-0585-7>.
24. Akinyemi FO: **Climate change and variability in Semiarid Palapye, Eastern Botswana: an assessment from smallholder farmers' perspective.** *Weather Clim Soc* 2017, **9**:349-365 <http://dx.doi.org/10.1175/WCAS-D-16-0040.1>.
25. Shrestha RP, Nepal N: **An assessment by subsistence farmers of the risks to food security attributable to climate change in Makwanpur, Nepal.** *Food Sec* 2016, **8**:415-425 <http://dx.doi.org/10.1007/s12571-016-0554-1>.
26. Schewe J et al.: **Multimodel assessment of water scarcity under climate change.** *Proc Natl Acad Sci U S A* 2014, **111**:3245-3250 <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1222460110>.
27. Guodaar L, Asante F, Eshun G, Abass K, Afriyie K, Appiah DO, Gyasi R, Atampugre G, Addai P, Kpenekuu F: **How do climate change adaptation strategies result in unintended maladaptive outcomes? Perspectives of tomato farmers.** *Int J Veg Sci* 2020, **26**:15-31 <http://dx.doi.org/10.1080/19315260.2019.1573393>
- An ethnographic approach with tomato farmers in Ghana shows that farmers (i) perceive maladaptive impacts of climate variability on tomato production and (ii) report negative outcomes of irrigation as an adaptive strategy. This study interestingly highlights the need to check not only positive but also negative outcomes of adaptation strategies.
28. Gepts P: **Plant genetic resources conservation and utilization.** *Crop Sci* 2006, **46**:2278-2292.
29. Sibhatu KT, Qaim M: **Meta-analysis of the association between production diversity, diets, and nutrition in smallholder farm households.** *Food Policy* 2018, **77**:1-18 <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodpol.2018.04.013>
- This meta-analysis revealed that only 20% of studies reviewed showed a consistent positive association between farm-level production diversity and household and individual level dietary diversity. This study interestingly questions the assumption that farm diversification is an effective strategy to improve diets and nutrition for smallholder farmers.
30. Ka A, Boëtsch G, Macia E: **L'alimentation des pasteurs peuls du Sahel. Entre globalisation, désir de «modernité» et risques sanitaires.** *Cah Nutr Diététique* 2020, **55**:47-52 <http://dx.doi.org/10.1016/j.cnd.2019.11.001>.
31. D'Amour CB, Anderson W: **International trade and the stability of food supplies in the Global South.** *Environ Res Lett* 2020, **15** <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/ab832f> 074005.
32. Fader M, Gerten D, Krause M, Lucht W, Cramer W: **Spatial decoupling of agricultural production and consumption: quantifying dependences of countries on food imports due to domestic land and water constraints.** *Environ Res Lett* 2013, **8** <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/8/1/014046> 014046.
33. Clapp J: **Food self-sufficiency: making sense of it, and when it makes sense.** *Food Policy* 2017, **66**:88-96 <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodpol.2016.12.001>.
34. Kummu M, Kinnunen P, Lehikoinen E, Porkka M, Queiroz C, Röös E, Troell M, Weil C: **Interplay of trade and food system resilience: gains on supply diversity over time at the cost of trade independency.** *Global Food Sec* 2020, **24** <http://dx.doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100360> 100360.
35. Talukder A, Kiess L, Huq N, de Pee S, Darnton-Hill I, Bloem MW: **Increasing the production and consumption of vitamin A-rich fruits and vegetables: lessons learned in taking the Bangladesh homestead gardening programme to a national scale.** *Food Nutr Bull* 2000, **21**:165-172 <http://dx.doi.org/10.1177/156482650002100210>.
36. Shiferaw B, Reddy VR, Wani SP: **Watershed externalities, shifting cropping patterns and groundwater depletion in Indian semi-arid villages: the effect of alternative water pricing policies.** *Ecol Econ* 2008, **67**:327-340 <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.05.011>.
37. Labeyrie V, Renard D, Benyei P, Junqueira AB, Li X, Porcher V, Porcuna-Ferrer A, Schlingmann A, Soleymani-Fard R, Reyes-García V: **Monitoring crop diversity trends based on local knowledge: a protocol for data collection.** *Figshare* 2020:17 <http://dx.doi.org/10.6084/m9.figshare.11842566.v4>.