



HAL
open science

Caractérisation agronomique et des protéines du gluten de trois espèces de blés vêtus en région lyonnaise par une approche de recherche participative

Sofía Correa Delgado

► **To cite this version:**

Sofía Correa Delgado. Caractérisation agronomique et des protéines du gluten de trois espèces de blés vêtus en région lyonnaise par une approche de recherche participative. Sciences agricoles. Ecole normale supérieure de lyon - ENS LYON, 2023. Français. NNT : 2023ENSL0108 . tel-04955633

HAL Id: tel-04955633

<https://theses.hal.science/tel-04955633v1>

Submitted on 19 Feb 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.



THÈSE

en vue de l'obtention du grade de Docteur, délivré par
l'ÉCOLE NORMALE SUPERIEURE DE LYON

École Doctorale N° 340
Biologie Moléculaire, Intégrative et Cellulaire (BMIC)

Discipline : Sciences de la vie et de la santé

Soutenue publiquement le 18/12/2023, par :

Sofia CORREA DELGADO

Caractérisation agronomique et des protéines du gluten de trois espèces de blés vêtus en région lyonnaise par une approche de recherche participative

Devant le jury composé de :

CHABLE, Véronique	Ingénieure de Recherche HDR BAGAP, INRAE Rennes	Rapporteure
SICARD, Delphine	Directrice de Recherche SPO, INRAE Montpellier	Rapporteure
FIRMAT, Cyril	Chargé de Recherche AGIR, INRAE Toulouse	Examinateur
VINCENT, Stéphane	Maître de Conférence LBMC, ENS de Lyon	Examinateur
CHARREYRE, Marie-Thérèse	Directrice de Recherche IMP, CNRS Lyon	Directrice de thèse
HAMANT, Olivier	Directeur de Recherche RDP, ENS de Lyon	Directeur de thèse

Ce travail a bénéficié d'une aide de l'Etat gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du Programme d'Investissement d'Avenir portant la référence ANR-17-CONV-0004.



Cette thèse a également été financée par le Conseil Européen de la Recherche (ERC-2021-AdG-101019515 « Musix »).

Avant-propos

Cette thèse est le fruit d'un processus de recherche participative. Elle est destinée à toutes les personnes avec lesquelles j'ai pu collaborer ou simplement échanger au cours de ces trois années. Au-delà de sa valeur académique, j'ai souhaité créer un document exhaustif qui retrace le travail accompli et puisse servir de base pour une possible suite au projet. Ainsi, par moments, cette thèse rentre dans des détails qui ne sont pas strictement nécessaires du point de vue académique.

Cette thèse revendique un engagement [politique] de la recherche, et interroge les liens entre sciences et société. L'utilisation de l'écriture inclusive est pour moi un choix cohérent avec ces revendications. C'est un moyen de reconnaître la contribution aussi bien d'hommes que de femmes au travail réalisé et présenté dans ce manuscrit. Ce choix reflète un engagement à promouvoir l'égalité des sexes, en particulier dans le milieu paysan et dans le domaine de la recherche.

Remerciements

Ces trois années de thèse ont été très intenses en émotions. Je suis contente et soulagée d'en être venue à bout. Ce manuscrit est aussi l'occasion de remercier toutes les personnes sans lesquelles je n'aurais jamais pu finaliser ce projet, et elles sont nombreuses !

D'abord, merci à **Olivier**. Merci pour ton optimisme, ton ouverture d'esprit et ton soutien lorsqu'il s'est agi de prendre des décisions difficiles, comme celle de déménager à Montpellier.

Un immense merci également à **Mathieu**. Merci d'avoir accepté, malgré un emploi du temps [beaucoup trop] chargé, de rejoindre mon encadrement en milieu de thèse. Merci pour tes précieux retours scientifiques et pour ta bienveillance. Enfin, merci pour ton encadrement lors de mon stage de M2. Sans cette expérience, je ne serais jamais venue à bout de ma première année de thèse.

Je voudrais aussi remercier les deux équipes au sein desquelles j'ai effectué ma thèse. Un grand merci à tou.te.s les membres de l'**équipe Mechanodevo**. Merci pour votre dynamisme et enthousiasme. Malgré mes passages éclair au RDP, je me suis toujours sentie pleinement intégrée à l'équipe. Un grand merci aussi pour votre aide lors des séances de semis ! Merci aussi à celles et ceux dont j'ai squatté le bureau : **Alice, Antoine, Zoe**.

Merci aussi à l'**équipe DDSE**, dans laquelle j'ai été accueillie en milieu de thèse. Merci à tou.te.s celles et ceux qui ont suivi les multiples rebondissements de ma thèse : **Alice, Andrea, Aude, Baye, Christophe, Jef, Margot**. Il faut dire qu'ils ont bien animé les repas à la cantine.



Chantier participatif pour les semis au CRBA.

Merci en particulier à **Christian**, pour avoir permis que l'accueil se concrétise et pour avoir

fait en sorte que je sois dans « les conditions pour terminer cette thèse ». Merci aussi pour ton sens de l’humour. Un grand merci à **Thomas**, pour les pauses en tout genre et les petits cafés amenés au bureau. Merci de m’avoir écoutée et soutenue pendant la troisième année de thèse. Merci également à **Soukeye**, pour avoir débarqué complètement à l’improviste. Merci pour les échanges de confidences et les moments de fou rire qui m’ont aidée à tenir lors de la dernière ligne droite. Merci à **Abdoulaye**, pour m’avoir incitée à écrire ma thèse sous LaTeX, puis m’avoir royalement abandonnée dans cette tâche. Et donc un grand merci à tou.te.s celles et ceux qui m’ont réellement aidée sur LaTeX : mon petit frère **Miguel**, **Iris**, **Witold**, **Amaël**. Merci de vous être arraché les cheveux sur mes tableaux :) Enfin, merci à **Alex** pour avoir décrypté l’utilisation de mon thermos à maté.

Merci également à tou.te.s les **technicien.ne.s**, **ingénieur.e.s** et **chercheur.euse.s d’AR-CAD** qui m’ont aidée sur plein d’aspects techniques : **Aline**, **Fabienne**, **Fred**, **Martin**, **Patrick**, **Paule**, **Pierre**. Et à tou.te.s celles et ceux qui m’ont aidée à décortiquer des graines ! Merci aussi à **Begüm** et aux doctorant.e.s de GE2pop : **Mathilde**, **Clément**, **Michel**. Merci pour la raclette à la bougie, les séances de tractions et les livres de Harry Potter.

Un très grand merci au **personnel administratif de l’IMP, du RDP, du CIRAD, de l’ENS de Lyon, de l’UdL et de l’EUL**. Merci en particulier à **Stéphanie**, **Nelly**, **Julie**, **Cindy** et **Laureen** du RDP, pour m’avoir aidée à gérer toute une série de demandes complètement atypiques, et à y voir un peu plus clair dans le chaos administratif de ma thèse. Merci pour votre efficacité, votre patience et votre gentillesse.

Merci aussi à tou.te.s ces personnes qui nous permettent d’avoir un environnement de travail propre et chaleureux. Merci notamment à **Natacha** pour ses encouragements quotidiens.

Je voudrais également remercier les étudiant.e.s que j’ai pu encadrer au cours de ces trois années. Merci à **Lise**, **Aubin** et **Justine**. Un merci tout particulier à **Justine** pour ton implication et ta rigueur qui ont permis l’aboutissement du chapitre 5 de cette thèse.

Merci aussi à tou.te.s les autres chercheur.euse.s avec qui j’ai échangé au cours de ces trois années. Merci à **Michel Turbet-Delof**, **Camille Vindras**, **Pierre Rivière**, **Nathalie Bernoud-Hubac**, **Fabien Dutertre** (désolée, je n’ai toujours pas compris ce qu’est le couple), **Alexander Erban**, **Joachim Kopka** et **Raphaëlle Leclerc**. Mais surtout, un très grand merci à **Marie-Françoise Samson**, avec qui ça a été un réel plaisir de collaborer pour les analyses des protéines du gluten.

Un grand merci également aux membres de mon comité de suivi de thèse : **Isabelle, Jean-François** et **Yann**. Merci d'avoir fait en sorte de recentrer ma thèse à la fin de la première année. Merci également pour votre écoute, bienveillance et réactivité lorsque j'en ai eu besoin. Un énorme merci aussi à **Mathias Faure** et **Muriel Grammont**. Merci de m'avoir prise au sérieux. Merci pour votre réactivité et votre aide, surtout en fin de thèse, lorsqu'il s'est agi de trouver une solution de date pour l'envoi du manuscrit.

Aux **membres de mon jury**, merci d'avoir accepté d'évaluer mon travail. En particulier, merci à **Delphine** et **Véronique**, d'avoir été d'accord pour relire mon manuscrit en un temps record ! Merci aussi à **Cyril** et **Stéphane** pour votre disponibilité lors de ma soutenance.

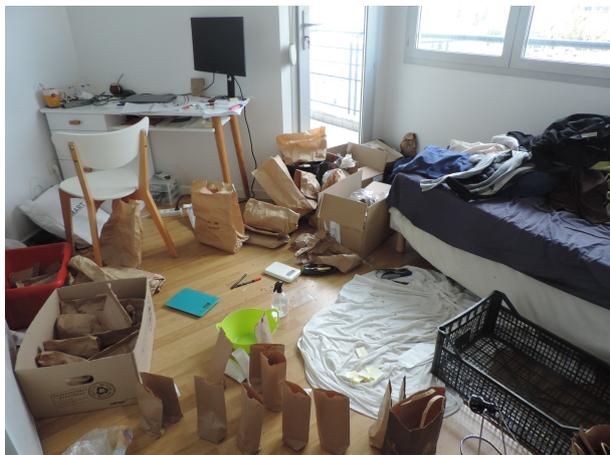
Pour sortir un peu de la sphère académique, je voudrais remercier toutes les autres personnes avec lesquelles j'ai pu interagir au cours de cette thèse. Tout d'abord, un énorme merci aux paysan.ne.s qui ont fait partie du collectif de recherche de ma thèse : **Cédric, Christian, Denis, Honorine, Jean-Philippe** du collectif **Graines de l'Ain, Marie-Pierre, Pierre** et **Stéphane**. Merci pour votre implication, votre confiance, et pour tous les échanges extrêmement riches. Un grand merci aussi pour votre accueil lors des visites à la ferme, pour les repas partagés et les tablettes de chocolat :)

A **Léa**, merci d'avoir suivi le projet, et de nous avoir convié.e.s à tous les événements organisés par l'ARDEAR AURA autour des blés. Merci également à toute l'**équipe du CRBA** : **Charlotte, Domitille, Franck, Johan, Sabrina, Stéphane**. Mais surtout, un très grand merci à l'**équipe de terrain** : **Clem, Thierry, Seb, Yannick**. Merci pour tous les moments de souffrance et de rigolade au milieu des parcelles de blé. Enfin, merci à **Laurence Mayaud** pour les réflexions sur le volet nutritionnel du projet.

Merci également à tou.te.s les autres paysan.ne.s, associations et structures diverses qui nous ont fourni des lots de semences : **Graines de Noé** (notamment **Hélène Montaz**), le **CRB de Clermont-Ferrand, Maud Montagard, Anne de Formigny, Jean-Marie Gonet** ...

En dehors du cadre professionnel, je voudrais remercier tou.te.s mes **ami.e.s**, sans lequel.le.s je n'aurais jamais survécu à cette thèse. Merci à tou.te.s celles et ceux qui sont venu.e.s semer, resemer, récolter, décortiquer. Merci aussi à tou.te.s celles et ceux chez qui j'ai squatté : évidemment **Carole**, mais aussi **Juan, Marianne, Jefa**. Merci tout particulièrement à **Flo**, pour les séances de grimpe et pour les apéros suite aux réunions tendues. Merci d'avoir fait 45 min de voiture pour m'emmener au métro et sauver mes échantillons de l'orage. Et merci de me prêter

ta cuisine pour la préparation du pot de thèse. Un énorme merci aussi à **Lucile** pour les longues soirées à discuter des conditions de thèse. Merci à **Samson** et **Yohan** pour m'avoir laissé squatter la colocation à Montpellier, le temps de trouver un appartement. Enfin, un très, très grand merci à **Carole**, pour cette année de colocation en début de thèse. Merci pour tout. Merci à toi et à **Lamia** pour m'avoir permis de transformer l'appartement en grenier, faute d'autre espace de stockage.



Le grenier Chedid.

Merci également à tou.te.s celles et ceux qui m'ont soutenue dans les moments difficiles de cette thèse : **Alice, Amaël, Bastien, Emma, Fanny B, Fanny L, Gab, Iris, Julia, Léo, Marie, Nico, Seba, Val, Windy, Witold**. Merci pour votre écoute, pour vos conseils précieux. Et pour m'avoir permis d'en rigoler. **Alice**, merci de toujours trouver un bon prétexte pour manger une glace.

Merci aussi à tou.te.s celles et ceux qui m'ont permis de déconnecter. A tou.te.s les « **petit.e.s diabolin.e.s** » qui m'ont poussée à abandonner mon manuscrit pour aller grimper. Aux **grimpeur.euse.s d'Alti** et à l'incroyable « **Salsa Crew** » de Montpellier. Un merci tout particulier à **Lamine**, pour ces soirées dansantes qui m'ont presque fait sentir en Amérique Latine.

Merci à celles et ceux sur lesquelles je compte depuis maintenant 22 ans : **Estefi, Gaby, María, François, Samia**. ¡ Les quiero tanto ! Merci d'être venu.e.s depuis la Belgique et l'Espagne pour assister à ma soutenance. La perspective de vous voir m'a fait attendre ce moment avec plus de joie et d'impatience que d'appréhension.

Merci aussi à tou.te.s celles et ceux (**ami.e.s et famille**) qui nous ont offert un moment magique lors de notre mariage en plein milieu de la troisième année de thèse. Merci de nous avoir fait vivre un moment hors du temps, avant d'attaquer la rédaction.

A **Jérôme, Cyrille et Man**, merci pour votre bienveillance et compréhension. Merci de ne m'avoir mis aucune pression par rapport à mon investissement au Villard. Merci pour les tonnes de salade, les popcorns à l'apéro, les bières à volonté, pour l'accueil des doctorant.e.s en détresse, et de toujours nous garder un peu de compost à retourner.

Je voudrais également remercier ma famille. Un grand merci à **mes parents** pour votre soutien tout au long de mon parcours académique et dans mes choix de vie, pas toujours très conventionnels. **Nique** et **Miguel**, merci pour votre soutien et complicité. Merci d’être toujours disponibles pour s’appeler quand ça ne va pas fort. Merci aussi à **Bapt**, et bon courage pour ta thèse à toi! Enfin, un tout grand merci à **mes grand-parents**. Merci d’avoir pris le rôle de seconds parents, et de m’avoir accompagnée tout au long de mes études.

Merci également à **ma belle famille**. Merci pour ce séjour cévenol qui m’a permis de changer d’air à dix jours d’envoyer mon manuscrit. Merci pour la Fête de la Soupe et désolée pour la descente de la coulée de Rochefort.

J’arrive à la fin, et pour finir, je voudrais remercier mon meilleur ami, amoureux et maintenant mari. Un grand merci à **Gus** pour ton soutien ces huit années, et en particulier pendant la thèse. Merci d’être venu à Lyon et d’avoir pris en charge le deuxième chantier de semis suite aux dégâts d’oiseaux. Merci d’avoir été là pour constater les dégâts de la grêle avec moi, pour ton aide pendant les récoltes, et d’être venu sur le terrain pour t’assurer que je ne m’endors pas au volant. Merci aussi pour tes conseils scientifiques, ton aide sur R, et tes suggestions de mise en page. Mais surtout merci de m’avoir soutenue moralement, et de toujours être à mes côtés. Cette thèse, je te la dois.

Résumé

Dans un contexte de crise socio-écologique remettant en question la capacité du système agricole industriel à garantir la sécurité alimentaire et une alimentation de qualité, l'agroécologie émerge comme une alternative de plus en plus crédible. Un des majeurs fondements réside dans la réintroduction de biodiversité cultivée dans les systèmes agro-alimentaires.

Cette thèse s'intéresse à trois espèces de blés marginales, appelées « blés vêtus » : l'engrain, l'amidonnier et le grand épeautre. Elle vise à évaluer leur viabilité agronomique, ainsi que leur qualité nutritionnelle, en particulier la composition en protéines du gluten. Située en région lyonnaise, cette recherche adopte une approche participative. Elle répond ainsi à deux autres principes de l'agroécologie : la relocalisation des systèmes alimentaires et le décloisonnement de la recherche en dehors de la sphère académique.

Au cours de la thèse, nous avons évalué 23 variétés de blés vêtus en comparaison à huit variétés de blé tendre, en collaboration avec un centre de ressources botaniques, une association paysanne et six paysan.ne.s. Il en résulte que l'engrain se distingue des trois autres espèces sur le plan agronomique et sur la composition du gluten. Cette espèce est notamment caractérisée par un potentiel de tallage et une teneur en protéines élevées, et par de faibles proportions de gluténines. L'étude révèle également une forte variabilité intra-spécifique, en particulier pour les variétés d'amidonnier, soulignant l'intérêt de ces espèces comme sources de diversité. Enfin, l'évaluation réalisée au cours de la thèse a permis d'identifier des variétés présentant des caractéristiques notables, tant au niveau agronomique que concernant la composition des protéines du gluten.

Au-delà des résultats d'évaluation des variétés, cette thèse propose une analyse réflexive du processus de recherche participatif. Elle identifie les forces et les limites de l'approche menée, et suggère des pistes d'amélioration.

En conclusion, cette thèse pose les bases pour la poursuite du projet d'évaluation des blés vêtus, tant du point de vue de la méthodologie d'évaluation que de l'approche participative.

Abstract

Amidst a backdrop of socio-ecological crisis that raises questions about the capacity of industrial agriculture to ensure food security and quality food, agroecology has emerged as an increasingly credible alternative. A pivotal aspect of agroecology is the reintroduction of cultivated biodiversity into agri-food systems.

This thesis focuses on three marginal wheat species, known as "hulled wheats" : einkorn, emmer, and spelt. It aims to assess their agronomic viability, as well as their nutritional quality, with a specific focus on the composition of gluten proteins. Situated in the Lyon region, this research embraces a participatory approach, aligning with two core principles of agroecology : the relocalization of food systems and the breaking down of barriers between research and the wider community.

During this thesis, we evaluated 23 hulled wheat varieties, in comparison with eight common wheat varieties. This work was done in collaboration with a botanical resource center, a farmers' association, and six farmers. The results show that einkorn clearly differs from the other three species, in terms of agronomic features and gluten composition. In particular, einkorn is characterized by an elevated tillering potential, a high protein content, and a notably low proportion of glutenins. The study also revealed high levels of intra-specific variability, particularly within the set of emmer varieties, which highlights the value of these species as a source of diversity. Finally, the evaluation undertaken during this thesis enabled us to identify varieties with noteworthy characteristics, either agronomically or in relation to gluten protein composition.

Beyond the results of the variety evaluation, this thesis provides a reflective analysis of the participatory research process, identifying its strengths and limitations, and presenting recommendations for its improvement.

In conclusion, this thesis lays the groundwork for the continuation of the hulled wheat evaluation project, encompassing both the evaluation methodology and the participatory approach.

Liste des acronymes

ACP : Analyse en composantes principales	CO2 : Dioxyde de carbone
ADDEAR : Association Départementale pour le Développement de l'Emploi Agricole et Rural	CP : Composante principale
AGAP : Amélioration Génétique et Adaptation des Plantes méditerranéennes et tropicales	CRB : Centre de Ressources Biologiques
ALB : Albumines	CRBA : Centre de Ressources de Botanique Appliquée
Am : Amidonnier	CTPS : Comité Technique Paritaire des Semences
ANS : Agriculture-Nutrition-Santé	CUMA : Coopérative d'utilisation de matériel agricole
ANTP : Analyses nutritionnelles et technologiques préliminaires	CW : Common wheat
ARDEAR AURA : Association Régionale pour le Développement de l'Emploi Agricole et Rural Auvergne-Rhône-Alpes	db : Dry basis
ATIs : Amylase/trypsin inhibitors	DE : Dispositif exploratoire
AURA : Auvergne-Rhône-Alpes	DEAP : Diversité, Evolution et Adaptation des Populations
BD : Blé dur	DHS : Distinction, homogénéité, stabilité
BF3 : Trifluorure de bore	D21-22 : Dispositif expérimental 2021-2022
BHT : Hydroxytoluène butylé	Ei : Einkorn
BP : Blé poulard	Em : Emmer
BSTFA : N,O-Bis(trimethylsilyl)trifluoroacetamide	En : Engrain
BT : Blé tendre	EtOH : Ethanol
CBD : Convention on Biological Diversity	FAO : Food and Agriculture Organization of the United Nations
CD : Ferme CD (voir figure 3.8, chapitre 3)	Fi : Fraction insoluble
CDD : Contrat à durée déterminée	FODMAPs : Fermentable oligosaccharides, disaccharides, monosaccharides, and polyols
CHCl3 : Chloroforme	GC-FID : Chromatographie gazeuse couplée à un détecteur à ionisation de flamme
CM : Ferme CM (voir figure 3.8, chapitre 3)	GE : Grand épeautre
COV : Certificat d'obtention variétale	GIEC : Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat

GIRAF : Groupe Interdisciplinaire de Recherche en Agroécologie du Fonds de la Recherche Scientifique belge	Services Ecosystémiques
GLIA : Gliadines	ISARA : Institut Supérieur d'Agriculture Rhône-Alpes
GLOB : Globulines	JD-CRBA : Jeux de données - CRBA
GLUT : Gluténines	JD-MS : Jeux de données - multi-sites
GNIS : Groupement National Interprofessionnel des Semences	JPC : Ferme JPC (voir figure 3.8, chapitre 3)
GQE : Génétique Quantitative et Évolution-Le Moulon	KH ₂ PO ₄ : Phosphate de monopotassium
HODE : lipides oxydés	K ₂ CO ₃ : Carbonate de potassium
HPLC : High-performance liquid chromatography	LLSD : Last leaf distance to spike
HPLC/DAD : High-performance liquid chromatography with diode-array detection	LMW-GS : Sous-unités de gluténines de faible masse molaire
HPLC/FD : High-performance liquid chromatography with fluorescence detection	mh : Matière humide
HP&DM : Ferme HP&DM (voir figure 3.8, chapitre 3)	MPR&PB : Ferme MPR&PB (voir figure 3.8, chapitre 3)
HMW-GS : Sous-unités de gluténines de haute masse molaire	ms : Matière sèche
HW : Hulled wheats	N : Azote
IATE : Ingénierie des Agropolymères et Technologies Émergentes	NaCl : Chlorure de sodium
IMP : Ingénierie des Matériaux Polymères	Na ₂ HPO ₄ : Hydrogénophosphate de sodium
IMS : Institut Michel Serres	NCP : Nature's contributions to people
INRAE : Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement	NUS : Neglected and underutilized species
INSA : Institut National des Sciences Appliquées	OGM : Organisme génétiquement modifié
IPBES : Plateforme Intergouvernementale Scientifique et Politique sur la Biodiversité et les	PC : Principal component
	PCA : Principal component analysis
	PMG : Poids de mille grains
	PPB : Participatory plant breeding
	PVS : Participatory variety selection
	ratio LW : Length/width ratio
	RDP : Reproduction et Développement des Plantes
	RP : Reverse phase
	RSP : Réseau Semences Paysannes
	RT : Room temperature

SADAPT : Science Action Développement -
Activités Produits Territoires
SAU : Surface agricole utile
SDS : Sodium dodecyl sulfate
SE : Size exclusion
SI : Standards internes
SO : Sous-optimalité
Sp : Spelt
SPE : Solid phase extraction
SPN : Science post-normale
SR : Ferme SR (voir figure 3.8, chapitre 3)
TFA : Acide trifluoroacétique
TKM : Thousand kernel mass
TMCS : Trimethylchlorosilane
Tris-HCl : Tris-hydrochloride
UMR : Unité mixte de recherche
UPOV : Union internationale pour la Protec-
tion des Obtentions Végétale
UPP : Unextractable polymeric protein
UTH : Unité de travail humain
VAT : Valeur agronomique et technologique
wb : Wet basis
 α/β -GLIA : Alpha/bêta-gliadines
 γ -GLIA : Gamma-gliadines
 ω -GLIA : Oméga-gliadines

Table des matières

1	Introduction générale	1
1.1	L'agroécologie dans un monde incertain	2
1.2	La biodiversité cultivée	11
1.3	La recherche participative	27
1.4	La sélection participative	37
1.5	Contexte de la thèse et questions de recherche	42
1.6	Bibliographie	46
2	Les blés vêtus	55
2.1	Introduction	56
2.2	Définition	56
2.3	Génétique et phylogénie	58
2.4	Morphologie	60
2.5	Histoire et culture actuelle	61
2.6	Caractéristiques agronomiques	66
2.7	Caractéristiques nutritionnelles	70
2.8	Le cas du gluten	73
2.9	Conclusion	77
2.10	Bibliographie	79
3	Démarche de recherche	85
3.1	Introduction	86
3.2	Le montage du projet de thèse	87
3.3	L'enquête de terrain	90

3.4	Le collectif multi-acteur.trice.s	111
3.5	Le dispositif expérimental 2021-2022	130
3.6	Bibliographie	150
4	Caractérisation agronomique et de la morphométrie des grains	151
4.1	Introduction	152
4.2	Caractérisation des quatre espèces et estimation de la variabilité intra-spécifique .	154
4.3	Effet de l'environnement	196
4.4	Conclusion	221
4.5	Bibliographie	223
5	Caractérisation des compositions en protéines du gluten	225
5.1	Introduction	226
5.2	Caractérisation des quatre espèces et estimation de la variabilité intra-spécifique .	227
5.3	Effet de l'environnement	267
5.4	Conclusion	271
5.5	Bibliographie	273
6	Analyse réflexive de la démarche de recherche	275
6.1	Introduction	276
6.2	Le concept de sous-optimalité	277
6.3	La définition de l'optimum théorique et les questions posées	280
6.4	Analyse réflexive de la démarche de recherche	283
6.5	Conclusion	312
6.6	Bibliographie	315
7	Conclusion générale	319
7.1	Récapitulatif des résultats de la thèse	320
7.2	Récapitulatif des perspectives de la thèse	321
	Annexes	325

Introduction générale

Contenu

1.1	L'agroécologie dans un monde incertain	2
1.2	La biodiversité cultivée	11
1.3	La recherche participative	27
1.4	La sélection participative	37
1.5	Contexte de la thèse et questions de recherche	42
1.6	Bibliographie	46



Engrain en fleur (mélange de 5 variétés).

1.1 L'agroécologie dans un monde incertain

1.1.1 Un monde incertain

1.1.1.1 L'altération des écosystèmes, les changements climatiques et les sociétés

Depuis l'ère préindustrielle, les activités humaines ont eu un impact sur les écosystèmes, entraînant leur détérioration progressive. Cette incidence s'est grandement intensifiée avec l'arrivée de la révolution industrielle, marquant le début de la « grande accélération ». Ce phénomène révélateur est caractérisé par une augmentation sans précédent des activités socio-économiques à partir des années 1950, conjuguée à une hausse inédite d'une série d'indicateurs relatifs à l'état des écosystèmes (STEFFEN et al. 2015).

Les grandes instances internationales, parmi lesquelles la Plateforme Intergouvernementale Scientifique et Politique sur la Biodiversité et les Services Ecosystémiques (IPBES) rapportent également un déclin significatif de l'état des écosystèmes et de la biodiversité (IPBES 2019). Par exemple, l'IPBES met en lumière l'altération de 75% de la surface terrestre ou encore la disparition de plus de 85% des zones humides. De plus, l'IPBES identifie le changement d'utilisation des terres, amplement lié à l'expansion des zones agricoles (FOLEY et al. 2011 ; TILMAN et al. 2011), comme le principal facteur direct à l'origine des impacts sur les écosystèmes terrestres et d'eau douce depuis les années 1970. Ces causes directes sont étroitement liées à des facteurs indirects tels que la croissance démographique, les valeurs et les comportements sociétaux, notamment les modes de production et de consommation (IPBES 2019).

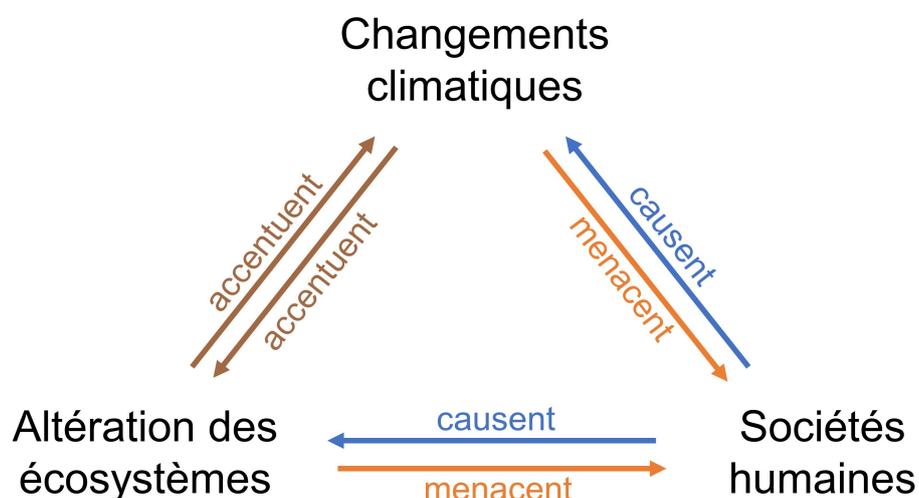


FIGURE 1.1 – Liens entre dégradation des écosystèmes, changements climatiques et sociétés.

Si les activités humaines sont la principale cause de l'altération des écosystèmes et des changements climatiques, les sociétés humaines dépendent des ressources naturelles (SCHUMACHER 1973), et sont donc aussi amplement menacées par ces bouleversements (figure 1.1). L'importante dégradation des contributions de la nature aux populations (« nature's contributions to people » ; NCP en anglais)¹ mise en évidence par l'IPBES en est la preuve. Dans son dernier rapport, le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) souligne également que l'effondrement de la biodiversité, la diminution de la résilience² des écosystèmes, et la détérioration des services écosystémiques, sont parmi les principales conséquences des changements climatiques (GIEC 2021).

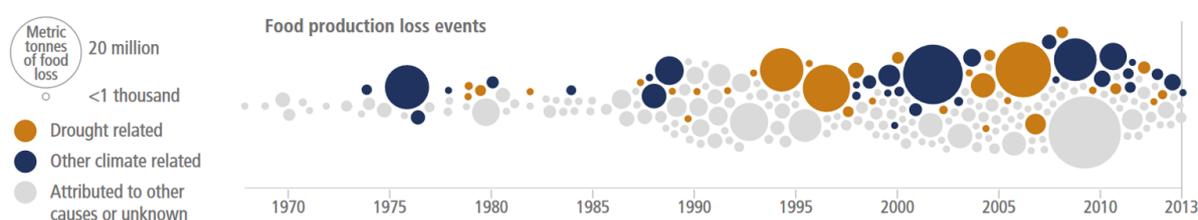


FIGURE 1.2 – Augmentation des pertes de récoltes causées par des facteurs climatiques. Les cultures, l'élevage, la pêche et l'aquaculture sont considérées. Source : GIEC 2021.

D'ores et déjà, nous assistons à des impacts des changements climatiques et de l'altération des écosystèmes sur les sociétés humaines. Le dernier rapport du GIEC évoque notamment des conséquences sur la sécurité alimentaire et la malnutrition, l'accès à l'eau douce, la santé physique et mentale, les migrations et les déplacements, les infrastructures et le secteur économique. Certains chiffres sont très alarmants. Par exemple, chaque année, la moitié de la population humaine fait face à des pénuries d'eau d'une durée d'un mois (GIEC 2021).

Concernant la production agricole, bien que la teneur atmosphérique accrue en CO_2 stimule le rendement de la photosynthèse, la qualité de l'air (notamment les concentrations en ozone), de l'eau et du sol a un impact négatif sur les rendements finaux en biomasse (GIEC 2021). Les perturbations dans la phénologie des cultures, l'effondrement des populations de pollinisateurs, les désynchronisations entre la présence des pollinisateurs et la floraison, l'émergence ou la propagation d'espèces exotiques et invasives sont des exemples parmi tant d'autres de facteurs de risques

1. Tout comme les services écosystémiques, les NCP reposent sur la décomposition des écosystèmes en services distincts, permettant ainsi d'évaluer les bénéfices apportés par la biodiversité et les écosystèmes aux sociétés humaines (GÓMEZ-BAGGETHUN et al. 2010). Néanmoins, les NCP marquent une évolution par rapport aux services écosystémiques en reconnaissant davantage l'importance de l'aspect culturel dans la définition des liens entre nature et culture, ainsi que le rôle des populations indigènes et des savoirs locaux dans la compréhension des bénéfices fournis par la nature aux populations (DÍAZ et al. 2018).

2. Dans le rapport du GIEC, la résilience est décrite comme « la capacité des systèmes sociaux, économiques et environnementaux à faire face à un événement, une tendance ou une perturbation dangereuse, en réagissant ou en se réorganisant de manière à maintenir leur fonction, leur identité et leur structure essentielles, tout en conservant une capacité d'adaptation, d'apprentissage et de transformation » (GIEC 2021).

pouvant affecter les niveaux de production, leur stabilité et la qualité des récoltes (GIEC 2021 ; IPBES 2019). A ces instabilités, s'ajoutent des événements climatiques extrêmes qui entraînent des pertes (figure 1.2), menaçant la sécurité alimentaire et les moyens de subsistance des producteurs.trice.s (GIEC 2021). Enfin, le GIEC évoque des répercussions sur la sûreté alimentaire, avec notamment l'augmentation des toxines d'origine fongiques dans plusieurs cultures, due à une augmentation de la température et de l'humidité (GIEC 2021).

En outre, il convient de noter que les risques liés à la détérioration des écosystèmes et aux fluctuations du climat peuvent entraîner une augmentation des conflits sociaux, un risque qui est exacerbé par l'interconnexion des différentes régions du globe (IPBES 2019). En raison de la mondialisation et de sa dépendance aux marchés, l'instabilité du secteur agro-alimentaire est particulièrement influencée par des facteurs socio-économiques et géopolitiques (BOINON 2015).

1.1.1.2 L'augmentation des risques et de l'incertitude

Il est désormais évident que les fluctuations associées aux changements climatiques et à la dégradation des écosystèmes vont s'intensifier au cours des prochaines années, entraînant une augmentation des risques pour les sociétés humaines (GIEC 2021 ; IPBES 2019). De plus, l'anticipation de ces évolutions et des dangers qui en découlent étant extrêmement complexe, les sociétés humaines devront faire face à une situation de forte incertitude.

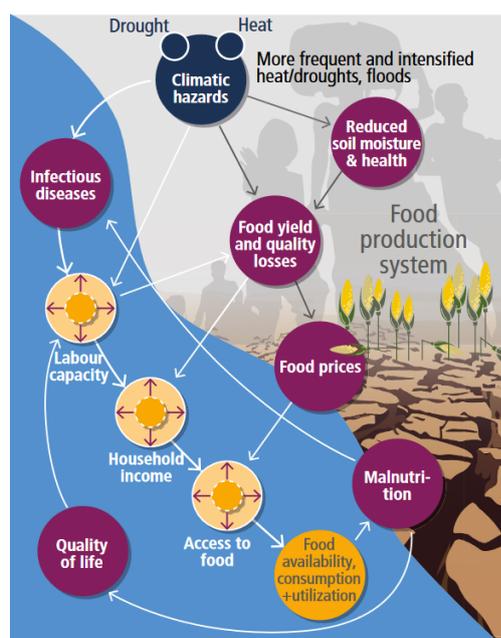


FIGURE 1.3 – Exemple d'effets en cascade sur le système alimentaire. Source : GIEC 2021.

En effet, l'existence de points de bascule incertains et de boucles de rétroaction entraînant des changements irréversibles compliquent les tentatives de modélisation et de prédiction de l'évolution du climat (STEFFEN et al. 2018) et de la biosphère (BARNOSKY et al. 2012). A titre d'exemple, STEFFEN et al. 2018 suggèrent qu'une hausse de température d'environ 2°C par rapport à la moyenne préindustrielle pourrait déclencher un emballement irréversible, entraînant la planète dans une trajectoire de réchauffement inéluctable avec de multiples conséquences sur les sociétés humaines. Les études menées par ROCKSTRÖM et al. 2009, PERSSON et al. 2022 et WANG-ERLANDSSON et al.

2022 font référence au dépassement déjà observé de sept « frontières planétaires », qui représentent des seuils au-delà desquels des changements non linéaires et abrupts peuvent se déclencher et avoir des répercussions à l'échelle de la planète.

Les innombrables connexions entre climat, écosystèmes et facteurs sociaux compliquent encore plus l'anticipation des risques. Par exemple, ces interrelations peuvent engendrer des effets cascade impossibles à prédire (figure 1.3). De plus, au-delà de l'augmentation de la fréquence, de l'intensité et/ou de la durée d'événements climatiques extrêmes, tels que les sécheresses, incendies, vagues de chaleurs, tempêtes, cyclones et inondations, le dernier rapport du GIEC (GIEC 2021), tout comme un travail de revue réalisé par des chercheur.euse.s de l'Université d'Hawaï (MORA et al. 2018), alertent sur l'intensification des événements composites (« combined hazard » en anglais). Ces risques, qui résultent de la convergence de plusieurs stress environnementaux et/ou sociétaux en un court laps de temps, sont difficiles à prévoir et ont des impacts plus complexes et sévères que les événements isolés.

1.1.2 L'agroécologie, une stratégie d'adaptation

Même en considérant les scénarios les plus optimistes, des bouleversements majeurs auront lieu dans les prochaines décennies, affectant la stabilité du monde que nous habitons. Les expert.e.s affirment désormais que la seule atténuation des hausses de la température ne suffira pas à faire face aux perturbations en cours. En particulier, le GIEC souligne que la capacité du système agro-alimentaire actuel à garantir la sécurité alimentaire, ainsi qu'une alimentation de qualité, est grandement menacée (GIEC 2021). Il apparaît donc essentiel d'élaborer des stratégies d'adaptation pour réduire la vulnérabilité des (socio)-écosystèmes face à ces modifications. Dans cette sous-section, je mets en avant l'agroécologie comme une option d'adaptation pour le secteur agro-alimentaire. Je commence par présenter les différentes interprétations du concept d'agroécologie. Ensuite, je propose la définition de l'« agroécologie forte » telle que proposée par CALAME 2016 pour contextualiser ma thèse.

1.1.2.1 L'agroécologie, un concept flou

Concernant le secteur agro-alimentaire, l'agroécologie est fréquemment évoquée comme une voie d'adaptation. Malgré son utilisation de plus en plus répandue, notamment dans le monde politique (DE SCHUTTER 2014) et dans les instituts de recherche tel que l'Institut National de

Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement (INRAE) (STASSART et al. 2012 ; NORDER et al. 2016), le concept d'agroécologie demeure flou. La coexistence de définitions très variées dans la littérature, telles que la « résistance à la progression du capitalisme » (GUZMÁN 2006), une trajectoire de « re-paysannisation » (VAN DER PLOEG 2008), ou encore « la science de l'application de principes de l'écologie au design et à la gestion de systèmes alimentaires durables » (GLIESSMAN 2007) illustre l'ambiguïté existante autour du concept.

Si les premiers usages historiques du terme faisaient référence à l'application de principes de l'écologie à la recherche en agronomie (BENSIN 1928 ; ALTIERI et al. 1983), le concept d'agroécologie est actuellement employé dans des domaines très variés. Selon WEZEL et al. 2009, l'agroécologie peut faire référence à une discipline scientifique, à un mouvement social et à des pratiques agronomiques. NORDER et al. 2016 identifient deux secteurs supplémentaires au sein desquels le terme d'agroécologie est employé : la politique et l'éducation. A titre plus anecdotique, les auteur.e.s documentent l'usage du concept pour évoquer « un nouveau métier et pour certain.e.s, un mode de vie, une idéologie et une utopie » (NORDER et al. 2016). De plus, au sein de chaque secteur, une diversité de définitions persiste. Par exemple, dans le domaine scientifique, l'agroécologie peut faire référence à l'application de principes de l'écologie à l'agronomie à l'échelle de la parcelle (WEZEL et al. 2009), mais aussi à des échelles beaucoup plus larges, allant jusqu'à l'ensemble du système agro-alimentaire (FRANCIS et al. 2003 ; GLIESSMAN 2007). Ainsi, les définitions du mot agroécologie varient amplement, en fonction du domaine au sein duquel il est employé, de la région géographique et de la période historique.

Toutefois, les auteur.e.s qui ont travaillé sur les définitions du mot « agroécologie » s'accordent généralement sur l'existence d'une convergence des usages au sein des différents secteurs. WEZEL et al. 2009 parlent d'un « entrecroisement » des définitions, entre science, mouvement social et pratiques, tandis que SEVILLA GUZMÁN et WOODGATE 2013 évoquent l'« indivisibilité de la science, des mouvements sociaux et des pratiques ». Selon GLIESSMAN 2018, une intégration des divers domaines de l'agroécologie est nécessaire à la mise en place d'un cadre favorable à la transformation des systèmes alimentaires. Ainsi, l'auteur définit l'agroécologie comme « l'intégration de la recherche, de l'éducation, de l'action et du changement qui permet la durabilité de toutes les composantes du système alimentaire : écologique, économique et sociale. Elle est transdisciplinaire dans la mesure où elle valorise toutes les formes de connaissances et d'expériences. Elle est inclusive, car elle requiert l'implication de toutes les parties prenantes, de la ferme au consommateur.trice.s et de tous les acteur.trice.s intermédiaires. Et elle est orientée vers l'action, car elle

confronte les structures de pouvoir économiques et politiques du système alimentaire industriel actuel avec des structures sociales et des actions politiques alternatives. L'approche est fondée sur la pensée écologique, qui exige une compréhension holistique et systémique de la durabilité du système alimentaire. »

Selon divers auteur.e.s, les significations plurielles du terme d'agroécologie peuvent mener à la marginalisation du concept, paraissant trop vague, confus et inefficace (WEZEL et al. 2009). Toutefois, cette forte polysémie peut aussi être vue comme une richesse (WEZEL et al. 2009 ; NORDER et al. 2016). Elle peut permettre de reconnaître la diversité d'acteur.trice.s qui se mobilisent derrière ce concept, de favoriser son adaptation à diverses disciplines scientifiques, à des domaines d'application et contextes variés, de mettre en évidence des controverses et de stimuler le débat. Néanmoins, WEZEL et al. 2009 soulignent l'importance, en particulier dans le contexte scientifique, de définir précisément le terme « agroécologie » avant de l'employer.

TABLEAU 1.1 – Principes de l'agroécologie selon le Groupe Interdisciplinaire de Recherche en Agroécologie du Fonds de la Recherche Scientifique belge (GIRAF). **1.** Principes mentionnés par ALTIERI 1995, citant REIJNTJES et al. 1992. **2.** Principes du département Science Action Développement - Activités Produits Territoires (SADAPT) de l'INRAE (TICHIT et al. 2010). **3.** Principes du groupe GIRAF. Modifié de STASSART et al. 2012.

1	Principes « agronomiques » historiques
	1. Permettre le recyclage de la biomasse (favoriser et équilibrer les flux de nutriments.)
	2. Favoriser la fertilité des sols (réduction de l'usage d'intrants chimiques, réduction du travail du sol et de l'érosion.)
	3. Minimiser les pertes de ressources naturelles (en particulier l'eau) par le biais de la gestion microclimatique.
	4. Favoriser la diversification génétique et des espèces dans l'espace et dans le temps.
2	5. Permettre les interactions et les synergies biologiques bénéfiques entre composantes de l'agroécosystème (promouvoir les processus et services écologiques).
	Principe plus systémique
	6. Valoriser l'agro-biodiversité (point d'entrée de la re-conception de systèmes assurant l'autonomie des producteur.trice.s et la souveraineté alimentaire).
	Principes méthodologiques
	7. Favoriser le pilotage multi-critère des agroécosystèmes pour une transition sur le long-terme (propriétés de résilience et d'adaptabilité).
3	8. Valoriser la variabilité spatio-temporelle des ressources locales.
	9. Stimuler l'exploration de situations éloignées des optima locaux déjà connus.
	10. Favoriser la construction de dispositifs de recherche participatifs (recherche « finalisée »).
	Principes socio-économiques
	11. Créer des connaissances et des capacités collectives d'adaptation (réseaux multi-acteur.trice.s).
12. Favoriser l'autonomie par rapport aux marchés globaux (gouvernance démocratique, systèmes territorialisés à haute intensité en main d'œuvre, systèmes co-gérés par producteur.trice.s et consommateur.trice.s).	
13. Valoriser la diversité des savoirs (locaux, traditionnels, ordinaires).	

Une proposition émise par STASSART et al. 2012 pour conserver à la fois une polysémie et garantir une cohérence autour de l'agroécologie est de considérer ce concept comme une orientation, et d'en définir des principes fondamentaux. Les auteur.e.s listent treize principes, concernant des pratiques agronomiques, une approche méthodologique et des principes socio-économiques (tableau 1.1). Parmi les principes agronomiques, les cinq premiers correspondent aux principes fondateurs évoqués par ALTIERI 1995. Tous les autres ont été proposés ultérieurement par le département Sciences et Action (SAD) de l'INRAE et par le Groupe Interdisciplinaire de Recherche en Agroécologie du Fonds de la Recherche Scientifique belge (GIRAF).

1.1.2.2 L'« agroécologie forte » selon Calame

Cette thèse ne s'ancre pas dans la discipline scientifique d'agroécologie à proprement parler : elle ne s'intéresse pas à l'application de principes de l'écologie, quelle que soit l'échelle d'étude. Toutefois, elle s'inscrit dans la vision de l'agroécologie comme trajectoire holistique (STASSART et al. 2012). Afin de clarifier le sens donné au concept d'agroécologie, cette sous-section présente l'« agroécologie forte » décrite par CALAME 2016, que je propose d'utiliser pour contextualiser mes travaux de thèse.

Le concept d'« agroécologie forte » selon CALAME 2016 est holistique et systémique : il s'intéresse à l'intégralité du système alimentaire, ainsi qu'à ses liens avec les sociétés, en intégrant des dimensions sociales, politiques et économiques. Il s'inscrit également dans un paradigme post-industriel, au sein duquel il est admis que la technique et le marché ne pourront pas résoudre les impasses socio-écologiques actuelles. Enfin, sans renoncer à une approche globale permettant de fixer des orientations, Calame soutient que l'agroécologie doit se réfléchir principalement à une échelle territoriale. Il s'agit de mobiliser au mieux les ressources du territoire, afin d'apporter des réponses adaptées et contextualisées. L'agroécologie forte de CALAME 2016 s'inscrit entièrement dans la définition proposée par GLIESSMAN 2018 citée ci-dessus³. Si l'on se réfère à l'agriculture biologique telle qu'elle est définie par les quatre principes de l'Organisation Internationale des Mouvements de l'Agriculture biologique (IFOAM 2023), il est pertinent d'inclure ce mouvement dans l'« agroécologie forte ».

3. GLIESSMAN 2018 définit l'agroécologie comme « l'intégration de la recherche, de l'éducation, de l'action et du changement qui permet la durabilité de toutes les composantes du système alimentaire : écologique, économique et sociale. Elle est transdisciplinaire dans la mesure où elle valorise toutes les formes de connaissances et d'expériences. Elle est ou inclusive car elle requiert l'implication de toutes les parties prenantes, de la ferme au consommateur.trice.s et de tous les acteur.trice.s intermédiaires. Et elle est orientée vers l'action car elle confronte les structures de pouvoir économiques et politiques du système alimentaire industriel actuel avec des structures sociales et des actions politiques alternatives. L'approche est fondée sur la pensée écologique, qui exige une compréhension holistique et systémique de la durabilité du système alimentaire. »

Concrètement, le modèle d'agroécologie forte proposé par CALAME 2016 s'appuie sur une liste de pratiques techniques qui rejoignent celles citées par ALTIERI 1995 : recyclage de la biomasse, diversification, renforcement des synergies entre composantes du système, minimisation de l'usage des ressources, entre autres. Il rajoute à ces pratiques des caractéristiques socio-économiques tels qu'un niveau d'emploi élevé, une faible production par actif, un lien étroit entre producteur.trices et citoyen.ne.s-consommateur.trice.s. Sur l'aspect politique, Calame propose une relocalisation forte des politiques publiques. Pour instaurer un cadre favorable au développement d'un modèle agroécologique, il évoque la nécessité d'une régulation par des systèmes de prix et de taxes, ainsi que d'autres mesures fortes (telle que l'interdiction de publicité pour certains produits). En l'absence de telles mesures, il cite des caractéristiques récurrentes à l'agroécologie forte : un haut niveau de qualification des producteur.trice.s et un faible niveau d'endettement permis par une mutualisation du capital. Enfin, Calame aborde le rôle de la recherche dans cette trajectoire agroécologique. Il s'agit également d'opter pour une approche territoriale, afin de générer des connaissances propres à un lieu. L'auteur souligne aussi l'importance d'intégrer des savoirs vernaculaires et de rendre la recherche participative pour qu'elle soit mieux « adaptée et adoptée ». En somme, Calame propose une vision de l'agroécologie basée sur un ensemble de pratiques, un renforcement des relations entre acteur.trice.s (du système alimentaire et extérieur.e.s à ce système), en insistant sur l'échelle territoriale et sur le rôle des politiques publiques (figure 1.4).

Ainsi, l'« agroécologie forte » de CALAME 2016 pourrait être considérée comme un projet politique ambitieux ou comme un mouvement social au sens très large (WEZEL et al. 2009), visant à réfléchir l'autonomie des systèmes agro-alimentaires à une échelle territoriale. Son objectif ultime pourrait être d'atteindre la « souveraineté alimentaire », telle que proposée par le mouvement international Via Campesina au Sommet mondial de l'Alimentation en 1996. La « souveraineté alimentaire » est définie comme le « droit des peuples à une alimentation saine et culturellement appropriée produite avec des méthodes durables, et le droit des peuples de définir leurs propres systèmes agricoles et alimentaires ». Elle défend la mise en place de systèmes agro-alimentaires locaux qui favorisent les communautés et préservent leur environnement (LA VIA CAMPESINA 2023).

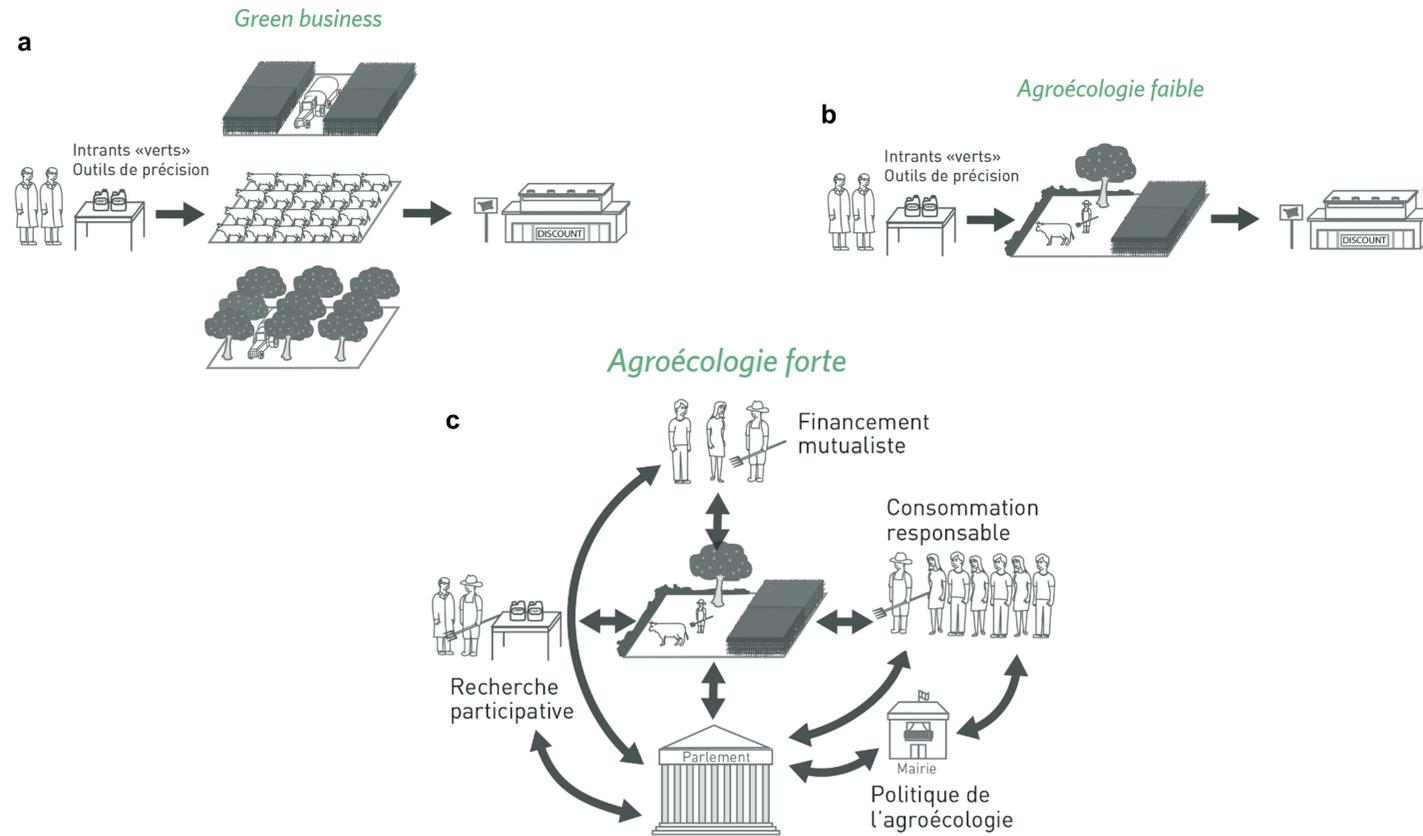


FIGURE 1.4 – Différents modèles d’agriculture pour l’avenir selon CALAME 2016. **a.** Le modèle « Green business » repose sur une agriculture industrielle. Il s’appuie néanmoins sur l’innovation technique et sur des outils du marché pour rendre le secteur à la fois économiquement compétitif et écologiquement vertueux. **b.** Le modèle « Agroécologie faible » reconnaît le besoin de relocaliser les agrosystèmes à l’échelle des fermes, pour boucler les cycles biologiques et réduire l’usage de pesticides. Ce modèle ne propose pas de modifications au niveau de la recherche scientifique ni de l’organisation du marché. **c.** Le modèle « Agroécologie forte » propose de construire des agroécosystèmes équilibrés, basés sur le recyclage de la biomasse et sur le renforcement des synergies biologiques. Elle intègre également des dimensions socio-économiques : réorganisation collective, recherche participative, mesures politiques fortes favorables à sa mise en place. Dans son ouvrage, CALAME 2016 présente également les modèles d’« Agroécologie spirituelle » et d’« Ecologie profonde ». L’« Agroécologie spirituelle » partage les mêmes réformes que l’« Agroécologie forte », mais insiste aussi sur la nécessité d’une transformation culturelle profonde des sociétés pour le concrétiser. L’« Ecologie profonde » constate l’impasse écologique actuelle et l’absence de solutions dans le cadre de pensée existant. Elle se trouve donc dans l’incapacité de proposer des modifications concrètes. Source : CALAME 2016.

1.2 La biodiversité cultivée

Dans la section précédente, j'ai présenté l'agroécologie comme stratégie d'adaptation à un monde fluctuant. Dans cette section, je me penche sur un élément fondamental de l'agroécologie : la biodiversité cultivée. Selon le principe 6 du groupe GIRAF, celle-ci constitue un point d'entrée pour la reconception de systèmes garantissant l'autonomie des producteur.trices et la souveraineté alimentaire (tableau 1.1).

Je commence cette section par définir les concepts d'agrobiodiversité et de biodiversité cultivée. Dans un second temps, j'évoque le processus de standardisation auquel elles ont été soumises lors de l'industrialisation de l'agriculture, en mettant l'accent sur le cas de la France. Je décris ensuite les conséquences de ce phénomène sur les niveaux de diversité parmi les plantes cultivées, et sur la vulnérabilité induite à plusieurs niveaux des systèmes agro-alimentaires. Enfin, je mentionne les principales stratégies de conservation de la biodiversité cultivée mises en place face à son érosion.

1.2.1 Définitions

La « biodiversité » est définie par l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (« Food and Agriculture Organization of the United Nations » ; FAO en anglais) comme la « variabilité de la vie aux échelles du gène, de l'espèce et de l'écosystème » (FAO 2019). L'« agrobiodiversité » constitue un sous-ensemble de cette biodiversité (figure 1.5), englobant la diversité des plantes, des animaux et des micro-organismes utilisés directement ou indirectement dans l'alimentation et l'agriculture. De façon plus large, elle comprend la diversité des agro-écosystèmes dont cette production dépend. De plus, la FAO intègre les savoirs locaux et culturels associés à cette agrobiodiversité comme une composante du concept (FAO 1999). Ainsi, dans ses définitions les plus récentes, l'« agrobiodiversité » est considérée comme le résultat d'une interaction entre des ressources génétiques, l'environnement et des pratiques culturelles et culturelles.

Le concept d'« agrobiodiversité » est aujourd'hui très large et ses frontières (notamment avec la « biodiversité sauvage ») sont parfois floues. Dans cette thèse, je n'aborderai qu'une composante de cette diversité, celle des plantes cultivées pour l'alimentation humaine. Par simplicité, j'y ferai référence en utilisant le terme « biodiversité cultivée ». Les dimensions sociales et systémiques associées à ces plantes sont malgré tout considérées au sein du projet, par l'association de divers

acteur.trice.s non académiques à la recherche, par la transdisciplinarité de la démarche et par le positionnement du projet dans un contexte d'agroécologie.

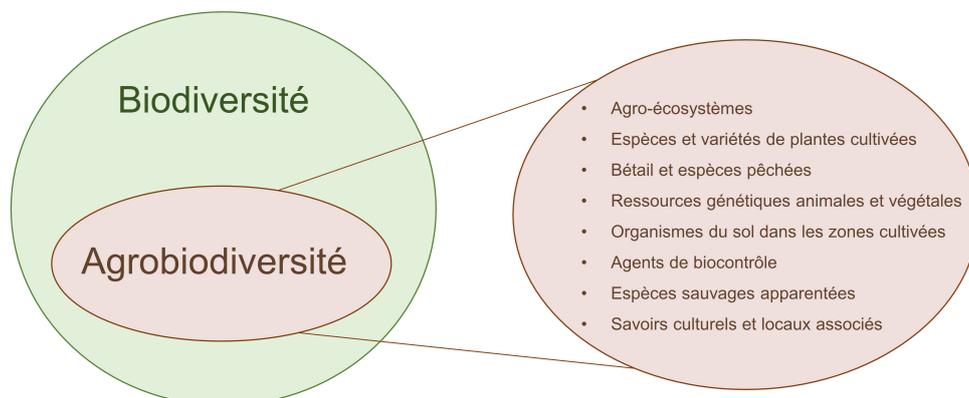


FIGURE 1.5 – Le concept d'agrobiodiversité. Source : FAO 2023.

1.2.2 La standardisation de la biodiversité cultivée

Depuis les débuts de l'agriculture, les paysan.ne.s ont sélectionné leurs propres variétés⁴ de plantes et produit leurs propres semences en pratiquant une sélection dite « massale ». Cette pratique consiste à sélectionner les graines issues des meilleures plantes pour les semer en mélange l'année suivante. Les variétés issues de ce processus sont des « populations hétérogènes », caractérisées par un niveau d'hétérogénéité génétique important, bien que variable (BONNEUIL et THOMAS 2012). En outre, les échanges fréquents de semences entre cultivateur.trice.s contribuaient à maintenir la diversité génétique globale au sein d'une espèce (THOMAS et al. 2011). Ces variétés issues d'une sélection à la ferme résultent donc d'une co-évolution entre ressources génétiques, environnement et humains. On peut les concevoir comme un concept « bioculturel » (BONNEUIL et FENZI 2011), caractérisé par son hétérogénéité et sa perpétuelle évolution. Aujourd'hui, ces variétés sont connues sous les noms de variétés « paysannes », « traditionnelles », « locales », « anciennes » ou « landraces » en anglais (tableau 1.2).

L'industrialisation des systèmes agroalimentaires qui a débuté à la fin du XIX^e siècle, et s'est intensifiée après la Seconde Guerre mondiale (au cours de la « grande accélération ») représente un tournant majeur pour la biodiversité cultivée. En Europe, dans un contexte d'après-guerre, le relancement de l'agriculture apparaît primordial. La logique est alors de rationaliser la production, pour augmenter et sécuriser les rendements, notamment de céréales. Une vision fordiste est adoptée dans l'agriculture, reposant sur une production et une consommation de masse, sur la

4. Chaque espèce végétale est constituée de sous-groupes, communément appelés « variétés ».

standardisation des procédés et de l'offre, ainsi que sur des économies d'échelle (BONNEUIL et THOMAS 2012).

TABLEAU 1.2 – Trois grands types de variétés selon leur histoire de sélection. La structure génétique à un temps donné d'une variété dépend également de son mode de conservation. Enfin, il est de plus en plus courant de trouver des mélanges de variétés. Sources : KHAN et al. 2020 ; KHOURY et al. 2022.

Nom français	Nom anglais	Définition et caractéristiques	Autres noms français	Autres noms anglais
Variété paysanne	Landrace	Variété génétiquement hétérogène, généralement issue d'une sélection à la ferme. Il est souvent considéré que ces variétés sont adaptées à des conditions environnementales et à des pratiques culturelles locales.	Variété population Variété traditionnelle Variété locale Variété ancienne	Population variety Traditional variety Local variety
Variété historique	Historical variety	Variété issue d'une sélection professionnelle entre 1850 et 1960. Sa structure génétique est hautement homogène, mais moins que celle des variétés modernes.	Variété ancienne	Ancient variety
Variété moderne	Modern variety	Variété issue d'une sélection professionnelle après 1960. Sa structure génétique est fortement, le plus souvent complètement, homogène. Ces variétés sont caractérisées par des rendements très élevés en conditions de culture optimales.	Variété commerciale	Commercial variety

La biodiversité cultivée est au cœur de ces changements. Les nouvelles techniques d'obtention variétale et de sélection, la professionnalisation de ces activités et l'instauration d'un cadre juridique contraignant contribuent à soumettre les plantes domestiquées à un processus de standardisation. Ainsi, la semence devient un « facteur de production à standardiser et à optimiser pour mieux adapter le végétal aux besoins de l'appareil de production national » (BONNEUIL et THOMAS 2012), et le produit final de l'agriculture devient une marchandise. Un regard fixiste est porté sur la biodiversité cultivée, la réduisant à un ensemble de ressources génétiques (BONNEUIL et al. 2006). Ces dernières sont perçues comme une ressource naturelle, pouvant être exploitée par l'industrie semencière et justifiant la nécessité d'un cadre légal pour en réguler l'utilisation (CHABLE et al. 2020).

1.2.3 Le cas de la France

Dans la sous-section suivante, je reviens sur la réorganisation de la sélection variétale, moteur de la standardisation de la biodiversité cultivée. En prenant l'exemple de la France, je décris comment la professionnalisation du secteur semencier et l'instauration d'un cadre réglementaire ont contribué à transformer la place et la vision de la biodiversité cultivée. Je me réfère principalement au livre de BONNEUIL et THOMAS 2012 : « *Semences, une histoire politique* ».

1.2.3.1 La professionnalisation de la sélection variétale

En France, des entreprises privées de création variétale, comme Vilmorin-Andrieux, existent depuis la fin du XVIII^e siècle. Elles travaillent sur l'obtention variétale, la recherche scientifique liée à la création de variétés et sont les premières à commercialiser des semences. A la fin du XIX^e siècle, Vilmorin domine le marché des semences de blé en France (BONNEUIL et THOMAS 2012).

Au début du XX^e siècle, les connaissances sur l'hérédité issues de la génétique mendélienne commencent à être intégrées dans l'amélioration des plantes. Ces connaissances permettent d'accélérer le processus de sélection et d'assurer une meilleure prévisibilité, en ciblant des gènes associés à des traits précis. Ceci conduit à l'émergence du concept de « lignée pure », qui fait référence à des variétés comprenant des individus génétiquement identiques (homozygotes) pour une caractéristique donnée. Cette période voit également le début du lobbying pour l'obtention de droits intellectuels sur les variétés (BONNEUIL et THOMAS 2012).

Les variétés développées par les professionnels de l'industrie semencière sont caractérisées par un haut niveau d'homogénéité génétique, notamment pour les traits ciblés par la sélection. Parmi ces variétés, deux grands types sont couramment distingués. Les variétés dites « historiques » résultent d'une sélection professionnelle préalable aux années 1960, tandis que les variétés qualifiées de « modernes » ou « commerciales » ont été développées après les années 1960 (KHAN et al. 2020). Ces dernières se caractérisent par une structure génétique encore plus homogène que les variétés « historiques » (tableau 1.2). Dans le cas du blé, il est couramment admis, notamment par les collectifs paysans, que l'introgession de gènes de nanisme (GALE et al. 1985), marque la transition entre les variétés « historiques » et « modernes ».

1.2.3.2 Un cadre législatif contraignant

A la fin du XIX^e siècle en France, les institutions et les techniques nécessaires à la standardisation de la biodiversité cultivée sont donc en place. Néanmoins, la sélection « traditionnelle » (figure 1.6), réalisée par les paysan.ne.s reste très importante. C'est seulement après la Seconde guerre, dans un contexte d'industrialisation agricole et à l'aide d'un cadre politique et juridique favorable, que la sélection professionnelle prend véritablement son essor.

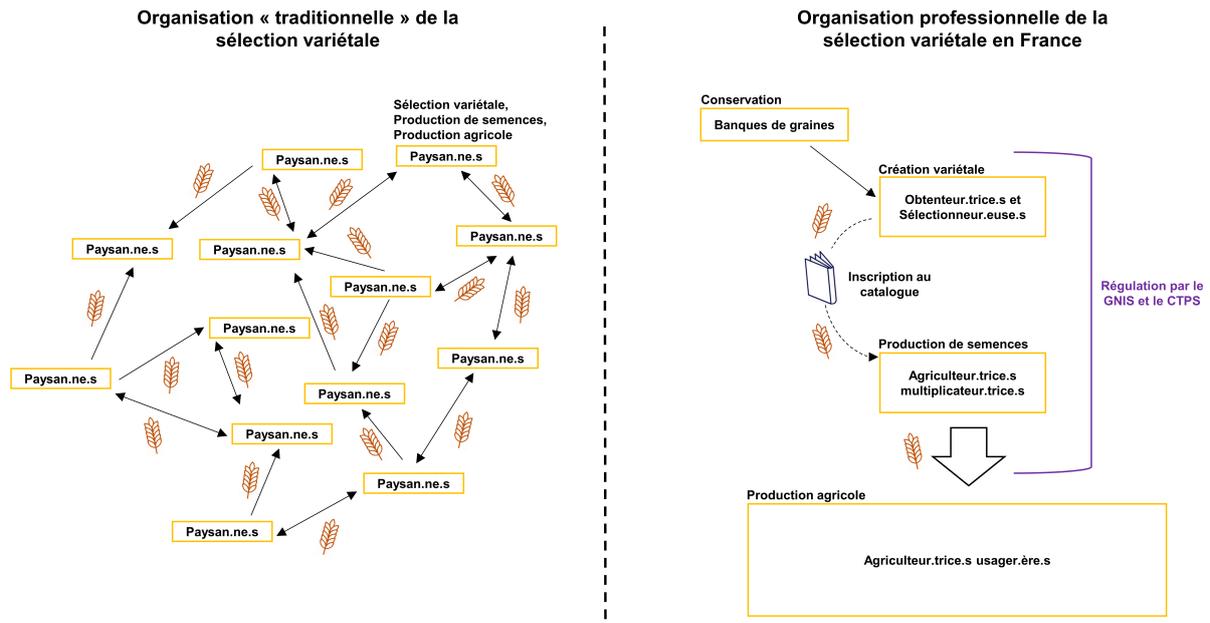


FIGURE 1.6 – Organisation « traditionnelle » de la sélection variétale (gauche), dominante en France jusqu’à la Seconde Guerre mondiale et organisation professionnelle (droite), dominante en France depuis la Seconde Guerre mondiale. Dans le système traditionnel, les paysan.ne.s exercent les activités de sélection, de multiplication et de production agricole. En contraste, le système professionnel est caractérisé par une division du travail : les obtenteur.trice.s homologué.e.s pour la création des nouvelles variétés, les coopératives pour les multiplier et les vendre, et les agriculteur.trice.s pour les cultiver, le tout encadré par le Groupement National Interprofessionnel des Semences (GNIS) et le Comité Technique Paritaire des Semences (CTPS). Modifié de RIVIÈRE 2014.

En effet, avec la création en 1946 de l’INRAE, dont la principale mission est la création variétale, le secteur public rejoint les entreprises privées dans l’obtention de variétés modernes. L’après-guerre voit également l’instauration d’un système réglementaire, qui favorise l’adoption de ces variétés par les cultivateur.trice.s. En France, ce système est organisé autour d’un catalogue national officiel qui répertorie les espèces et les variétés cultivées. En 1949, l’inscription d’une variété au catalogue devient obligatoire pour pouvoir échanger ou vendre des semences en quantités suffisantes à des fins de production (BONNEUIL et THOMAS 2012). Or, dès 1952, pour inscrire une variété, elle doit respecter les conditions « distinction, homogénéité, stabilité » (DHS), garantissant son uniformité, sa prévisibilité et sa différence par rapport à d’autres variétés, et « valeur agronomique et technologique » (VAT), caution du « progrès » génétique représenté par cette variété. En outre, l’inscription d’une variété représente un coût considérable⁵. Ainsi, selon BONNEUIL et THOMAS 2012, le catalogue devient un outil de « contrôle du marché des semences, d’évaluation variétale et de triage génétique ». En 1960, plus aucune variété de blé tendre « de pays » n’est inscrite au catalogue national (BONNEUIL et THOMAS 2012). Entre 1946 et 1980, la

5. Environ 12 000 € avec l’examen technique selon l’Interprofession Française des Semences et Plants (SEMÆ 2023).

proportion d'utilisation de semences issues d'une obtention professionnelle est passée de 3 à 50% pour le blé tendre et de 0 à près de 100% pour le maïs et le colza (BONNEUIL et THOMAS 2012).

Un système de régulation de l'activité semencière est également mis en place, avec la création sous le régime de Vichy des deux principales institutions de coordination et de contrôle : le Groupement National Interprofessionnel des Semences (GNIS) et le Comité Technique Paritaire des Semences (CTPS) (BONNEUIL et THOMAS 2012). Le GNIS rassemble sélectionneur.euse.s, multiplicateur.trice.s, négociant.e.s et agriculteur.trice.s et a pour mission d'organiser l'interprofession semencière. De son côté, le CTPS réunit des représentant.e.s d'agriculteur.trice.s, des sélectionneur.euse.s, et des scientifiques. Il encadre l'intégralité de l'activité semencière : la création variétale, l'inscription au catalogue et les filières de multiplication. Aujourd'hui, une carte professionnelle délivrée par l'une de ces deux institutions est obligatoire pour exercer en tant que sélectionneur.euse ou multiplicateur.trice. En 1961, le certificat d'obtention variétale (COV), accordant à l'obteneur.trice le monopole de commercialisation de sa variété est instauré. A partir de 1961, les droits des obtenteur.trice.s sont protégés par l'Union internationale pour la Protection des Obtentions Végétales (UPOV).

Encadré 1.2.1 - La sélection professionnelle du blé

Les principaux critères de sélection du blé ont porté sur l'augmentation des rendements, notamment en réponse aux engrais azotés, sur la réduction de la taille des pieds via l'introgession de gènes de nanisme (GALE et al. 1985), pour limiter la verse et faciliter le passage des machines agricoles, sur l'amélioration de la valeur technologique (BONNEUIL et THOMAS 2012), et sur la résistance à des stress biotiques (BONJEAN 2001). Pour le blé tendre (*T. aestivum* L. ssp *aestivum*), l'amélioration de la valeur technologique a principalement consisté à augmenter la « valeur boulangère », qui combine travail ou « force boulangère » (mesure de la déformation de la pâte et de sa résistance aux gaz produits par la fermentation), tolérance au pétrissage, machinabilité et rendement en pâte.

BONNEUIL et THOMAS 2012 citent l'augmentation des rendements de 20 à 50 quintaux par hectare entre 1950 et 1970 pour le blé tendre en France, la diminution de la hauteur moyenne des pieds de 1,5 m à 60 cm en cinquante ans et l'augmentation du travail de 100-120 à 180-250 entre 1950 et 1990 pour les variétés de blé tendre inscrites au catalogue français.

En résumé, la restructuration de l'activité semencière a conduit à une centralisation des activités de création et de sélection variétale, confiées à un nombre restreint de professionnel.le.s (figure 1.6). Ces dernier.ère.s se sont focalisé.e.s sur un petit nombre d'espèces d'intérêt commercial, négligeant ainsi une multitude d'espèces pourtant importantes à une échelle plus locale. De

plus, les critères de sélection ont été uniformisés, les échanges entre producteur.trice.s ont été réduits, et les variétés génétiquement hétérogènes ont été remplacées par des variétés homogènes.

1.2.4 La diminution de la biodiversité cultivée

Il est communément avancé que la biodiversité cultivée a connu une diminution importante au cours du dernier siècle, tant à l'échelle des espèces (réduction du nombre d'espèces cultivées) que de la diversité génétique au sein de chaque espèce (FAO 1997). La FAO cite l'industrialisation et la mondialisation des systèmes agroalimentaires comme les principales causes de cette érosion (FAO 2019). Cependant, il peut s'avérer difficile de trouver des preuves tangibles de la réduction de la biodiversité cultivée, en raison de l'absence de documentation ou d'indicateurs pertinents, en particulier pour la diversité génétique au sein d'une espèce (KHOURY et al. 2022). Dans cette section, j'essaie de dresser un état de la biodiversité cultivée en utilisant les références disponibles, principalement celles de la FAO.

1.2.4.1 Diminution de la diversité spécifique

En ce qui concerne la diversité spécifique, alors que plus de 6000 espèces végétales ont été historiquement cultivées ou cueillies par l'humain (GATERSLEBEN 2018), la FAO estime qu'en 2014 moins de 200 espèces atteignaient des niveaux de production importants (FAO 2019). Parmi celles-ci, seulement neuf d'entre elles (canne à sucre, maïs, riz, blé, patate, soja, palme, betterave sucrière et manioc) représentaient 66% de la production mondiale en termes de masse. Dans son premier rapport sur l'état des ressources phytogénétiques publié en 1997, la FAO faisait déjà référence à neuf espèces (maïs, riz, blé, canne à sucre, patate, patate douce, sorgho, mil et soja) fournissant 75% des calories et protéines issues de plantes, avec les trois premières à elles seules (riz, maïs et blé) représentant plus de 50% de cet apport (FAO 1997).

Cette réduction du nombre d'espèces cultivées sur des surfaces importantes peut être en grande partie expliquée par l'intérêt de la sélection professionnelle, axé sur un nombre limité d'espèces d'intérêt commercial.

1.2.4.2 Diminution de la diversité génétique

Pour caractériser la diversité génétique d'une espèce au champ, il est nécessaire de prendre en compte le nombre de variétés existant pour cette espèce, la diversité au sein de chaque variété, la diversité entre les variétés (leur apparentement) et la répartition spatiale des diverses variétés (BONNIN et al. 2014). En génétique, on parle de « richesse » allélique et de « répartition » des allèles (FAO 1997). L'étude de cette diversité au champ nécessite de données moléculaires (génétiques) ou d'informations sur le pedigree des variétés, ainsi que de données sur leur répartition spatiale sur une période de temps suffisamment longue (FAO 1997; BONNIN et al. 2014). En raison de la complexité de cette approche, il est difficile et donc peu courant d'estimer l'état et l'évolution de la biodiversité cultivée à l'échelle génétique sur le terrain.

Toutefois, des tendances sont constatées pour chacune des composantes de la diversité génétique, qui suggèrent une diminution au cours du dernier siècle, et peuvent engendrer une érosion génétique⁶. Ces tendances comprennent une diminution du nombre de variétés cultivées pour une espèce donnée, une réduction de la diversité génétique intra-variétale, un fort apparentement entre les variétés et une répartition spatiale dominée par un nombre restreint de variétés. Par exemple, en Chine, le nombre de variétés cultivées de blé est passé d'environ 10 000 à seulement 1000 entre 1949 et 1970. Aux États-Unis, on estime que 80 à 95% des variétés de chou, de maïs, de pois et de tomate qui existaient au XIX^e siècle ont été perdues (FAO 1997). Pour les principales cultures, notamment le riz et le blé tendre, les moyens consacrés à l'obtention variétale au cours du dernier siècle conduisent aujourd'hui à un nombre de variétés très élevé (par exemple, la FAO parle de plus de 100 000 variétés de riz). Néanmoins, même pour ces espèces, très peu de variétés sont cultivées sur des surfaces considérables. Ainsi, en 1982, une seule variété de riz (« IR36 ») recouvrait 11 millions d'hectares en Asie (FAO 1997). De plus, un fort remplacement de variétés hétérogènes par des variétés homogènes a eu lieu au cours du XX^e siècle. Par exemple, en Chine 81% des variétés de blé étaient des variétés « paysannes » hétérogènes en 1949, alors que dans les années 1970, 91% des variétés étaient des variétés « améliorées », fortement homogènes (FAO 1997). Enfin, certaines études témoignent d'un apparentement important entre les variétés « modernes ». Des cultivars portant des noms différents peuvent être très proches du point de vue génétique, car les mêmes parents sont utilisés pour créer de nombreuses variétés, ou le même gène est utilisé pour obtenir un trait en particulier. C'est notamment le cas des hybrides F1 de

6. On appelle « érosion génétique » la perte de diversité au sein d'une espèce, et plus précisément, la « perte de certains allèles ou de certaines combinaisons d'allèles, comme celles maintenues dans les variétés paysannes localement adaptées » (FAO 1997).

riz qui partagent le même gène de stérilité mâle (FISCHBECK 1981).

A nouveau, cette réduction de la diversité génétique peut être en grande partie attribuée à la transformation de l'activité de sélection qui liée à l'industrialisation des systèmes agricoles. Dans son rapport de 1997, la FAO identifiait d'ailleurs le remplacement de variétés paysannes par des variétés modernes comme la première cause de diminution de la diversité (FAO 1997).

1.2.4.3 Incertitudes autour de la diminution de la biodiversité cultivée

Bien que la diminution de la biodiversité cultivée soit largement reconnue, sa véritable ampleur demeure incertaine (KHOURY et al. 2022). Dans leur review, KHOURY et al. 2022 soulignent la variabilité de ce phénomène, en fonction de plusieurs facteurs tels que l'espèce, le type de variétés (paysannes, historiques ou modernes), l'échelle géographique considérée, et la méthodologie d'évaluation de la diversité. Parmi les études incluses dans l'analyse, 80% signalent des preuves de déclin de la diversité, mais certaines témoignent également de son maintien, voire de son accroissement.

Pour les cultures d'intérêt primordial, FU 2006 conclut que la diversité génétique totale n'a pas diminué avec la sélection moderne. Toutefois, des changements ont eu lieu au sein de la diversité, avec des disparitions et des apparitions d'allèles. Plusieurs études révèlent également une augmentation de la diversité parmi les variétés modernes à partir des années 1960, ce qui peut être expliqué par la diversification des critères de sélection, un meilleur accès au matériel génétique initial, et l'essor de nouvelles techniques d'obtention, notamment l'introgession de gènes d'autres espèces (KHOURY et al. 2022; BONNIN et al. 2014).

En ce qui concerne le blé tendre, l'évolution de sa diversité génétique est controversée. Certaines études observent une érosion génétique au cours du XX^e siècle (REIF et al. 2005; HAMMER et LAGHETTI 2005; ROUSSEL et al. 2004; ROUSSEL et al. 2005), tandis que d'autres ne constatent pas d'évolution (VAN DER PLOEG 2008), ou même une récente augmentation de la diversité (CHRISTIANSEN et al. 2002). Cependant, si la diversité totale au sein du blé tendre n'a pas forcément diminué au cours du dernier siècle, la sélection moderne a bien affecté la diversité des allèles à certains loci (FU 2006; BALFOURIER et al. 2019).

Enfin, il est important de noter que la plupart des études qui s'intéressent à la diversité s'appuient sur des analyses génétiques de variétés issues de collections, ou sur l'étude des noms de variétés présentes dans divers registres (KHOURY et al. 2022). Ainsi, elles ne témoignent pas

de la réalité sur le terrain, où des pratiques non documentées peuvent influencer la diversité réellement utilisée.

Encadré 1.2.2 - Evolution de la diversité génétique du blé tendre au champ, en France, entre 1910 et 2010

Une étude réalisée par GOFFAUX et al. 2011 s'est intéressée à l'évolution de la diversité génétique du blé tendre en France, au champ, sur une période s'étendant de 1910 à 2010. Pour cela, les auteur.e.s ont utilisé un indicateur développé par BONNEUIL et al. 2012 qui prend en compte le nombre de variétés, leur répartition spatiale, ainsi que la diversité génétique inter et intra-variétés (indicateur H_t^*). Les auteur.e.s constatent une forte augmentation du nombre de variétés, qui passe d'environ 50 dans les années 1910 à autour de 350 dans les années 2000. Cette hausse est attribuable à la multitude de variétés créées et diffusées par les obtenteur.trice.s tout au long du XX^e siècle. Toutefois, les auteur.e.s observent une diminution conséquente de la diversité génétique totale au cours du XX^e siècle. D'autres indices indiquent que cette baisse est liée à une répartition spatiale déséquilibrée, avec un petit nombre de variétés occupant de très grandes surfaces, à un fort degré d'apparentement entre les variétés et à un remplacement de variétés hétérogènes par des lignées pures (homogénéisation génétique intravariétale). Cette étude a également été publiée sous forme d'un article scientifique par BONNIN et al. 2014.

1.2.5 La vulnérabilité, conséquence de la diminution de la biodiversité cultivée

En Europe, l'industrialisation de l'agriculture a été efficace pour relancer rapidement le secteur agroalimentaire dans l'après-guerre. En France, elle a permis d'atteindre l'autosuffisance alimentaire et de transformer le pays en un important exportateur de céréales et de semences. Le modèle instauré a notamment conduit à des gains de rendements considérables (BONNEUIL et THOMAS 2012). Selon FAO 1997, la moitié de ces gains de rendements est attribuable à la création variétale, tandis que le reste est lié aux changements dans les pratiques culturales (fertilisation, application de fongicides, entre autres). Cependant, cette transformation de l'agriculture ne s'est pas fait sans contreparties. Elle a entraîné une dégradation de la biodiversité cultivée, qui est aujourd'hui à l'origine de situations de vulnérabilité à différentes échelles. Dans cette section, j'explore les liens entre le déclin de la biodiversité cultivée et la vulnérabilité des systèmes agro-alimentaires aux niveaux de la production et de la consommation. En ce qui concerne la consommation, je m'intéresse uniquement aux questions de malnutrition.

1.2.5.1 La vulnérabilité au niveau de la production

1.2.5.1.1 La vulnérabilité des espèces cultivées L'érosion génétique peut conduire à des situations de « vulnérabilité génétique », où une culture largement répandue est uniformément sensible à un bioagresseur ou à un risque environnemental en raison de sa constitution génétique, entraînant un risque de perte de récolte sur une grande échelle (FAO 2019). Cet état de vulnérabilité peut conduire à des problèmes de sécurité alimentaire.

L'exemple le plus célèbre de crise liée à la vulnérabilité génétique d'une espèce est celui de la famine irlandaise en 1845, causée par la destruction des cultures de pommes de terre en Europe et en Amérique du Nord par une infestation de mildiou (*Phytophthora infestans*). Les variétés de pommes de terre cultivées dans ces régions descendaient toutes des deux à quatre variétés introduites en Europe depuis l'Amérique du Sud. En 1970, l'Inde a connu d'importants ravages sur les cultures de blé, par la mouche *Atherigona spp.* et le champignon *Tilletia indica*, en raison de la présence des mêmes gènes de résistance dans les variétés modernes. Plus récemment, il a été constaté que la plupart des variétés modernes de blé sont susceptibles à la race « Ug99 » de rouille (FAO 2019).

Sans évoquer le terme de vulnérabilité génétique, des recherches récentes ont mis en évidence la faible « résilience »⁷ des principales cultures de subsistance, dont le blé, notamment par rapport à des variations de température et de précipitations. Par exemple, RAY et al. 2015 montrent que, en Europe occidentale, entre 31 et 51% des variations des rendements du blé tendre sont déjà attribuables au climat. Par une approche de modélisation, ASSENG et al. 2015 prédisent des baisses de 6% des rendements de blé avec chaque degré supplémentaire. CHALLINOR et al. 2014 prévoient également des baisses de rendements si aucune mesure d'adaptation n'est adoptée, en particulier à partir de la deuxième moitié du siècle. Ces recherches anticipent également une augmentation de la variabilité des rendements, spatiale et temporelle. Enfin, l'étude de KAHILUOTO et al. 2019 avance qu'une diversité de réponses est sous-jacente à la résilience d'une culture par rapport à un stress donné. Cette notion est illustrée par l'idée qu'une combinaison de génotypes permet de fournir une réponse mieux adaptée à des fluctuations de climat qu'un seul génotype. Or les auteurs constatent une nette diminution de cette diversité de réponses dans neuf pays européens dès le début des années 2000.

7. Dans ces études, la résilience est associée à la stabilité des rendements.

1.2.5.1.2 La vulnérabilité socio-économique De nombreuses études mentionnent la baisse de diversité génétique ou de résilience à l'échelle d'une espèce donnée. Or la vulnérabilité est aussi constatée au niveau des systèmes socio-économiques. Ici, je n'évoque que la vulnérabilité directement liée à la biodiversité cultivée.

A l'échelle des fermes et des cultivateur.trice.s, l'agriculture industrielle se caractérise par une forte spécialisation, ce qui rend les fermes peu résistantes aux aléas biologiques, climatiques et économiques. L'utilisation de variétés modernes, dont les rendements élevés dépendent de la mise en place d'un itinéraire technique optimal, contribue à cette vulnérabilité. En effet, ces variétés nécessitent souvent une quantité importante d'intrants, que ce soit pour la fertilisation ou la protection des cultures. Ainsi, les cultivateur.rice.s sont dépendant.e.s du marché des semences, mais aussi de l'approvisionnement en intrants. Cette dépendance est particulièrement problématique pour les agriculteur.rice.s des pays moins développés, qui n'ont pas toujours accès aux variétés modernes ni les moyens de mettre en place l'itinéraire technique optimal pour atteindre des rendements élevés (FAO 1997).

Dans les pays plus développés, les variétés disponibles sur le marché, ainsi que les pratiques culturales qui leur sont associées peuvent aussi s'avérer inadaptées aux terroirs ou aux agriculteur.trice.s. Cette inadéquation se manifeste fréquemment chez les cultivateur.rice.s travaillant dans des environnements marginaux ou mettant en œuvre des pratiques agroécologiques. Pour ces dernier.ère.s, le maintien d'une diversité, comprenant des variétés adaptées aux terroirs et aux pratiques locales est crucial (CHABLE et al. 2020). Or l'exclusion des agriculteur.trice.s de l'activité de sélection entraîne non seulement la perte des ressources génétiques adaptées à leurs contextes de production, mais également la disparition des savoirs traditionnels associés à ces variétés. Ce phénomène est accentué par la réduction drastique du nombre de cultivateur.trice.s depuis les années 1950, qualifiée par MENDRAS 1984 de « fin des paysans ».

Aux échelles nationale et régionale, des recherches établissent des liens entre diversité des espèces et stabilité de la production (RENARD et TILMAN 2019). En appliquant un indicateur pour mesurer la résilience de la production agricole annuelle à des données de production en France, ZAMPIERI et al. 2020 ont montré que la diversification des cultures favorise la résilience de la production à l'échelle nationale. De plus, KHOURY et al. 2014 mettent en évidence la très forte interdépendance entre pays, notamment en ce qui concerne la disponibilité et l'accès aux ressources alimentaires, ainsi que l'accès aux ressources génétiques nécessaires à leur production.

1.2.5.2 La vulnérabilité au niveau de la consommation

Si la capacité du système agro-alimentaire industriel à assurer la sécurité alimentaire est grandement questionnée face aux bouleversements en cours, son aptitude à garantir une alimentation de qualité est également en péril (FAO et al. 2017). En 2017, la FAO alertait sur le « fardeau multiple » de la malnutrition, une situation globale de malnutrition chronique comprenant la sous-alimentation, la suralimentation, les maladies chroniques et les carences en micronutriments (FAO et al. 2017). En France, par exemple, l'alimentation est identifiée comme le premier facteur de risque de mauvaise santé (CARTRON et FICHET 2020). Ci-dessous, j'aborde les sources de vulnérabilité directement liées à la biodiversité cultivée au niveau de la nutrition.

Une des principales causes des différents types de malnutrition est l'uniformisation des régimes alimentaires, liée à la baisse de diversité à l'échelle globale (KHOURY et al. 2014). En particulier dans les pays à plus faibles revenus, la Révolution dite verte a favorisé l'accès des populations à des cultures dominantes et peu coûteuses, au détriment de la diversité nutritionnelle (KHOURY et al. 2014; NEGIN et al. 2009). Selon HAWKESWORTH et al. 2010, cette homogénéisation a provoqué une transition en cinquante ans de régimes riches en fibres et pauvres en sucres vers des régimes « occidentaux » riches en céréales, en sucres et en matières grasses. Par ailleurs, certain.e.s auteur.e.s associent l'augmentation de la consommation d'aliments de plus en plus transformés à une diminution des apports en micronutriments (MARRÓN-PONCE et al. 2022) et au développement de maladies chroniques (MONTEIRO 2009).

Plusieurs études évoquent aussi une baisse des teneurs en nutriments dans certaines cultures (notamment dans des espèces potagères), qui résulterait de la sélection de variétés modernes. Des déclin.s en teneurs de certains nutriments ont été trouvés au cours du dernier siècle pour des espèces potagères au Royaume-Uni (MAYER 1997), aux Etats-Unis (DAVIS et al. 2004), dans certains légumes et légumineuses en Australie (EBERL et al. 2022), et dans le blé aux Etat-Unis (MURPHY et al. 2008). Ces multiples travaux suggèrent l'existence d'un compromis entre les gains de rendement résultant de la sélection moderne et les teneurs en micro-nutriments. Cependant, de telles corrélations ne sont pas observées pour toutes les espèces (EBERL et al. 2022; DAVIS et al. 2004; MAYER 1997), pour tous les micronutriments (EBERL et al. 2022; DAVIS et al. 2004), et les incertitudes des estimations sont très élevées (MAYER 1997; DAVIS et al. 2004). Ainsi, le potentiel impact de la sélection moderne sur les teneurs en micronutriments des cultures reste très débattu.

1.2.6 Stratégies de gestion de la biodiversité cultivée

Face au constat du déclin de la biodiversité cultivée et de son importance pour l'obtention variétale, des stratégies de gestion⁸ ont été mises en place dès le début du XX^e siècle. Pendant de nombreuses années, l'accent a surtout été mis sur la gestion *ex-situ*. Néanmoins, aujourd'hui, la gestion *in-situ* gagne en importance. Dans cette sous-section, je décris ces deux principales stratégies de gestion.

1.2.6.1 La gestion *ex-situ*

Dès le XX^e siècle, des missions de collecte de matériel végétal reproductif (« ressources génétiques »), ont été organisées à l'échelle mondiale. Leur objectif est de préserver ces ressources dans des banques de gènes, assurant ainsi un accès aux obtenteur.trice.s et aux chercheur.euse.s. Ainsi, différents types de banques de gènes ont vu le jour, principalement des banques de semences (90%), mais aussi des banques de gènes « au champ » et des collections *in-vitro* (FAO 1997).

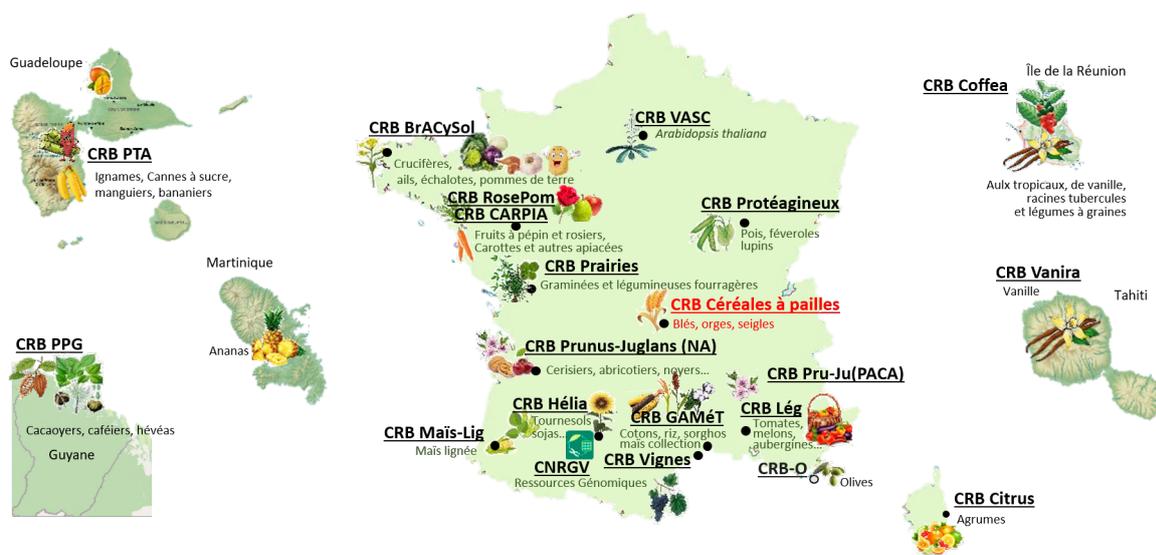


FIGURE 1.7 – Localisation des Centres de Ressources Biologiques (CRB) de l'INRAE. Le CRB de Clermont-Ferrand (en rouge), spécialisé dans les céréales à paille, recense 14 000 accessions de blé tendre et espèces apparentées et 2800 accessions de blé dur et espèces apparentées (DEBITON 2021). Figure adaptée de BERGHEAUD et al. 2023.

L'une des premières et des plus célèbres missions de collecte de ressources génétiques remonte aux années 1920 avec l'agronome soviétique Nikolai Vavilov. Cette initiative a abouti à la création d'une des plus grandes banques de gènes située à St-Petersbourg (ENGELS 2002). D'importantes campagnes de collecte ont ensuite eu lieu dans les années 1970 et 1980. En 1997, la FAO esti-

8. J'ai choisi de parler de « gestion » et non de « conservation », car les différentes stratégies impliquent une évolution des ressources génétiques. Il s'agit donc de processus dynamiques et non statiques.

maît que l'ensemble des collections *ex-situ* à travers le monde comprenaient environ six millions d'accessions⁹. Néanmoins, il convient de relativiser ce chiffre en raison de la duplication des accessions dans les collections (FAO 1997). De plus, seules 33 à 50% des accessions se trouvent dans des collections dites « actives », et peuvent donc être distribuées (FAO 1997).

Il est estimé que les céréales représentent environ 40% des accessions conservées dans les banques de gènes. A lui seul, le blé compterait pour un demi-million d'accessions, soit 14% des accessions du total des collections. En revanche, les cultures mineures sont peu représentées (LOUAFI et al. 2021). Selon la FAO, environ la moitié des accessions conservées mondialement seraient des cultivars (lignées modernes), un tiers des variétés de pays ou des lignées anciennes et 15% des espèces sauvages apparentées (FAO 1997).

Aujourd'hui, de nombreuses banques de gènes font face à des difficultés au niveau de la régénération des lots de semences et du stockage sur du long-terme, entraînant des pertes de ressources (ENGELS 2002). Ceci est grandement dû au fait que lors de leur création, les questions de la gestion et de l'utilisation des ressources conservées ont été négligées (LOUAFI et al. 2021).

1.2.6.2 La gestion *in-situ*

La gestion *ex-situ* a permis de conserver de nombreuses ressources génétiques dans un contexte de diminution de la biodiversité cultivée. Cependant, ce mode de gestion, axé uniquement sur la composante génétique de la biodiversité cultivée, présente plusieurs limites. Premièrement, la diversité génétique des plantes conservées peut évoluer, notamment diminuer, au cours de la gestion. De plus, ces ressources, sorties de leurs environnements de culture, peuvent s'avérer inadaptées à ces derniers après le stade de gestion. En outre, la difficulté d'accès aux ressources, en particulier pour les cultivateur.trice.s des pays moins développés, est fréquemment questionnée (LOUAFI et al. 2021). Ainsi, dès les années 1990, les instances internationales, dont la FAO, citent la gestion *in-situ* comme essentielle et complémentaire de la gestion *ex-situ* (FAO 1997).

La Convention sur la Diversité Biologique (« Convention on Biological Diversity » ; CBD en anglais) définit la gestion *in-situ* comme « la conservation des écosystèmes et des habitats naturels ainsi que le maintien et le rétablissement de populations viables d'espèces dans leur milieu naturel et, dans le cas d'espèces domestiquées ou cultivées, dans le milieu où elles ont développé leurs caractères distinctifs » (CBD 1992). Dans le cas des plantes cultivées, cela implique le maintien ou

9. Une accession représente une entité, qu'il s'agisse d'une variété, d'une population ou d'un clone, qui est intégrée dans une banque de gènes à un moment précis (COMBETTE et al. 2015).

la gestion de populations (variétés génétiquement hétérogènes) dans leur environnement agricole. Cette stratégie de gestion est basée sur une vision plus complète de la biodiversité cultivée, intégrant ressources génétiques, agro-écosystèmes et savoirs associés.



FIGURE 1.8 – Maisons de semences en France. a. Initiatives répertoriées sur le site www.communityseedbanks.org. Dans cette thèse, nous avons interagi avec les deux en rouge. b. Maison de semences du Groupement des Agriculteurs Biologistes et Biodynamistes du Maine-et-Loire. ARDEAR AURA : Association Régionale pour le Développement de l'Emploi Agricole et Rural Auvergne-Rhône-Alpes. Crédit photo : Perrine Tavernier.

Avant l'établissement d'un système semencier formel (et encore aujourd'hui dans plusieurs pays), les paysan.ne.s, qui assumaient les activités de sélection, de production de semences et de production alimentaire, étaient au centre de la gestion de la biodiversité cultivée (figure 1.6). Depuis les années 1980, en réponse à l'instauration d'un système semencier formel, de nouvelles stratégies de gestion *in-situ* de la biodiversité cultivée ont émergé en milieu paysan. Il s'agit essentiellement d'approches collectives, telles que des banques de gènes communautaires ou des banques de semences communautaires, des maisons de semences paysannes (figure 1.8), des groupes, associations ou réseaux de « sauveurs » de semences, des bibliothèques de semences, entre autres¹⁰ (CHABLE et al. 2020). Ces diverses stratégies supportent des activités qui vont au-delà de la seule gestion de la biodiversité cultivée, incluant la recherche et la sélection.

La gestion *in-situ* présente plusieurs avantages. Elle favorise l'évolution continue des variétés, leur permettant de s'adapter aux environnements où elles pourraient être cultivées. En outre, elle permet de préserver les savoirs associés à ces variétés, tout en facilitant leur utilisation. Les nouvelles stratégies de gestion, largement basées sur des approches collectives, offrent également des espaces d'interaction entre paysan.ne.s et d'autres acteur.trice.s qui s'intéressent aux enjeux de la biodiversité cultivée (CHABLE et al. 2020), favorisant ainsi les relations entre différent.e.s

¹⁰. Plusieurs initiatives de maisons de semences paysannes en France sont présentés dans un document du Réseau Semences Paysannes (RSP) (RSP 2014).

groupes sociaux et stimulant l'émergence d'innovations. Cependant, selon la FAO, le développement d'initiatives de gestion *in-situ* est encore limité par un manque de soutien politique et économique (FAO 1997).

1.3 La recherche participative

Dans la section précédente, j'ai présenté les enjeux autour de la biodiversité cultivée. A la croisée d'enjeux agronomiques et nutritionnels, son déclin apparaît comme une forte source de vulnérabilité pour les systèmes agro-alimentaires. Dans cette section, j'introduis la recherche participative. Ce type de recherche s'inscrit également dans la notion d'agroécologie forte de CALAME 2016 et répond au principe 10 du groupe GIRAF (tableau 1.1).

L'urgence et l'incertitude induites par les crises socio-écologiques nous poussent à réfléchir au rôle de la science dans la société, et à la façon de faire la recherche. Cette section commence par une présentation de réflexions issues des sciences sociales concernant la posture de la science et la méthode scientifique. Ces réflexions nous amènent à reconsidérer l'approche de la recherche pour la rendre plus cohérente avec les enjeux actuels. A la fin de cette première section, j'introduis le concept de science post-normale (SPN), qui fournit un cadre théorique permettant d'orienter les stratégies scientifiques ainsi que les liens entre sciences, politique et société dans un monde incertain. Dans une deuxième sous-section, je définis la recherche participative et explicite en quoi elle s'aligne avec la SPN.

1.3.1 La recherche scientifique dans un monde incertain

1.3.1.1 La science n'est pas neutre

La notion de neutralité du/de la chercheur.euse est encore très répandue. Selon cette vision, qui s'inscrit dans le paradigme positiviste, le/la scientifique est extérieur.e à son objet d'étude. Son rôle consiste à produire, par une « extraction des données du terrain » (OLIVIER DE SARDAN 1995a), « la connaissance », qui existe indépendamment du « connaisseur » (POPPER 1991).

Dans le champ des sciences sociales, la posture du/de la chercheur.euse suscite de nombreux débats épistémologiques depuis plusieurs décennies. La neutralité, défendue au début du XX^e siècle par des sociologues comme Max Weber (WEBER 1919) n'est aujourd'hui « plus une notion qui permet de définir la posture méthodologique du chercheur » (BEAUGUITTE 2022). Selon des

auteur.e.s tel.le.s que WOOLGAR et LATOUR 1988 le.la chercheur.euse n'est jamais neutre. Sa démarche de recherche s'inscrit toujours en « référence au système de représentations et des valeurs qui façonne sa relation au monde et aux problèmes de société de son temps » (KUHN 2008). Ainsi, « les questions que l'on se pose à un moment donné dans une discipline donnée sont en partie le reflet des sociétés dans lesquelles on vit » (BEAUGUITTE 2022). Plus concrètement, l'engagement du.de la scientifique, parfois inconscient, se manifeste dès le choix du sujet d'étude, et de la formulation des questions de recherche.

Reconnaître l'engagement du.de la scientifique nécessite de s'inscrire dans un paradigme alternatif au positivisme. Certain.e.s chercheur.euse.s, comme BRASSEUR 2012, proposent le paradigme interprétativiste, où le.la scientifique est conscient.e de sa non neutralité et cherche à se distancer autant que possible de son objet d'étude. Cependant, de plus en plus d'auteur.e.s placent la recherche dans le cadre conceptuel constructiviste (THIOLENT 2011 ; KUHN 2008). Ce paradigme repose sur l'idée que le réel n'existe pas en tant que tel, mais qu'il est « construit par l'acte de connaître » (LE MOIGNE 1995). Il reconnaît que le.la scientifique porte des intentions dans sa recherche, il.elle est donc indissociable de son travail et peut être qualifié.e de « chercheur.euse-acteur.trice » (BRASSEUR 2012).

Au-delà de la posture du.de la chercheur.euse, le constructivisme remet en question la prétendue objectivité des connaissances scientifiques. Selon ce modèle, l'« objet » (la connaissance) est co-construit par l'interaction entre le.la chercheur.euse et son terrain (PERRET et SÉVILLE 2007). Les connaissances sont donc subjectives et contextuelles (BRASSEUR 2012). Ce raisonnement concerne également les sciences expérimentales, très souvent associées à une haute objectivité. En effet, la philosophe Isabelle Stengers souligne que l'expérimentation repose sur une mise en scène spécifique, conçue de manière à ne permettre qu'une seule interprétation des observations qui en découlent. Ce dispositif garantit la haute fiabilité des résultats et constitue, selon Stengers, la « force du laboratoire ». Toutefois, sans discréditer cette force des sciences expérimentales, Stengers met en évidence la singularité du discours propre à ces sciences, en démontrant qu'elles sont tout aussi socialement construites et situées que d'autres formes de savoirs (STENGERS 1997).

1.3.1.2 Les relations entre sciences et société

Reconnaître que la neutralité du.de la chercheur.euse est illusoire, et que les connaissances scientifiques ne sont pas complètement objectives, nous pousse à revoir la place de la science dans la société. Cette réflexion est d'autant plus importante dans un contexte de crise.

Ainsi, des auteur.e.s tel.le.s que Bruno Latour et Isabelle Stengers appellent à une prise de conscience de la part des chercheur.euse.s de leur responsabilité concernant l'impact de leurs travaux sur la société (LATOUR 2008 ; STENGERS 1997). De fait, Latour et Stengers affirment que la science et la politique sont indissociables, et que les chercheur.euse.s ont une responsabilité politique à travers leur travail.

Les travaux de Stengers contribuent à la réflexion sur les rapports entre sciences et démocratie. Stengers critique le fait que les sciences, et surtout les sciences expérimentales, bénéficient souvent d'un pouvoir implacable par rapport aux savoirs profanes et à d'autres disciplines scientifiques en raison de leur prétendue validité, objectivité et certitude (STENGERS 2000). Or, dans le contexte des débats publics et des controverses sociales, les problèmes abordés dépassent le champ d'application des sciences expérimentales. Si ces sciences peuvent analyser certaines dimensions des problèmes sociétaux, et apporter des informations qui alimentent le débat public, elles ne suffisent pas à le résoudre intégralement. Pour appréhender pleinement les controverses sociales, il est essentiel d'inclure les contributions d'autres disciplines ainsi que celles d'autres citoyen.ne.s (STENGERS 1997). Plusieurs exemples illustrent ce propos, dont celui des organismes génétiquement modifiés (OGM), présenté dans l'encadré 1.3.1. La vision de Stengers concernant la place des sciences dans le débat public est d'autant plus pertinente dans un contexte d'incertitude élevée.

Encadré 1.3.1 - L'exemple des organismes génétiquement modifiés dans les relations entre sciences et débat public selon Stengers, 1997

Dans le cas des OGM, Stengers constate que les arguments politiques se concentrent principalement sur les aspects de santé et d'environnement, qui peuvent être appréhendés au moins en partie par les sciences expérimentales. Cependant, ils négligent souvent les dimensions économiques et sociales, qui relèvent d'autres disciplines scientifiques, ainsi que des systèmes de valeurs portés par l'ensemble de la société. Ainsi, de nombreux.e.s scientifiques considèrent qu'il est possible de vivre avec les OGM et rejettent les oppositions citoyennes qui seraient fondées sur des peurs irrationnelles ou sur une résistance au changement. Or selon Stengers, « l'avenir en commun » avec les OGM doit être décidé avec l'ensemble des citoyen.ne.s concerné.e.s, en considérant non seulement des savoirs experts, mais aussi des savoirs profanes et des arguments moraux.

La réflexion au sujet des relations entre sciences et démocratie peut également s'appliquer en amont de la recherche, en posant la question de qui définit les orientations de la recherche, et par quels processus. Enfin, l'argumentation de Stengers sur les liens entre sciences, société et politique peut aussi être étendue à la manière dont le processus de recherche est mené.

1.3.1.3 Concilier engagement et rigueur méthodologique

Admettre que les projets de recherche sont engagés soulève également la question de comment assurer la rigueur méthodologique dans la démarche scientifique. Des éléments de réponse peuvent être trouvés dans la littérature traitant des approches qualitatives mobilisées en sciences sociales, ainsi que dans les travaux réflexifs sur la méthodologie des sciences participatives.

Par exemple, dans son article portant sur la conciliation de la rigueur et de l'engagement dans la recherche en géographie, BEAUGUITTE 2022 insiste sur l'importance d'explicitier son positionnement [politique] en tant que chercheur.euse, ainsi que les choix théoriques qui en découlent. L'auteur souligne la nécessité « d'explicitier le plus clairement possible ses choix méthodologiques et de baser ses travaux sur des données empiriques solides et documentées ». Cette transparence qui permet de situer d'où on parle et de comprendre la démarche scientifique adoptée permet de limiter les biais et, surtout, de les rendre facilement identifiables.

Une autre caractéristique essentielle pour garantir la rigueur méthodologique, qui est prévalente dans les approches qualitatives des sciences sociales, est celle de la réflexivité continue. Celle-ci invite les chercheur.euse.s à se questionner en permanence sur leurs rôles, présupposés, méthodes et influence dans le processus de recherche (OLIVIER DE SARDAN 1995b; JODELET 2003; GODRIE et al. 2020). La philosophe Isabelle Stengers invite également les chercheur.euse.s à se montrer ouvert.e.s aux débats et aux critiques, y compris celles émanant de citoyen.ne.s non scientifiques (STENGERS 1997).

Dans leur article sur les sciences participatives, HOULLIER et MERILHOU-GOUDARD 2016 proposent neuf recommandations visant à garantir la qualité et la rigueur des approches participatives, dont certaines peuvent être transposées plus largement à toute démarche scientifique. Les auteurs parlent notamment de l'importance de garantir « la clarté des objectifs des recherches », « la qualité et la transparence du protocole », « la fiabilité et la reproductibilité des données », « le respect de la déontologie scientifique » ou encore « l'ouverture et le partage des données et résultats ».

Ainsi, en dépit d'un engagement assumé de la recherche, la rigueur de la démarche scientifique peut être assurée par le respect de principes tels que la transparence et la réflexivité.

1.3.1.4 La science post-normale

Prendre conscience de l'engagement de la recherche et accepter nos responsabilités en tant que chercheur.euse.s nous oblige à sortir de la vision positiviste de la recherche scientifique. Le concept de la science post normale (SPN), développé par Silvio Funtowicz et Jérôme R. Ravetz à la fin du XX^e siècle, peut nous aider dans cette démarche. La SPN propose une approche de résolution de problèmes qui vise à produire des connaissances utilisables pour la prise de décision politique et pour l'action, dans des contextes où les enjeux sont importants, complexes et incertains (figure 1.9) (FUNTOWICZ et RAVETZ 2003).

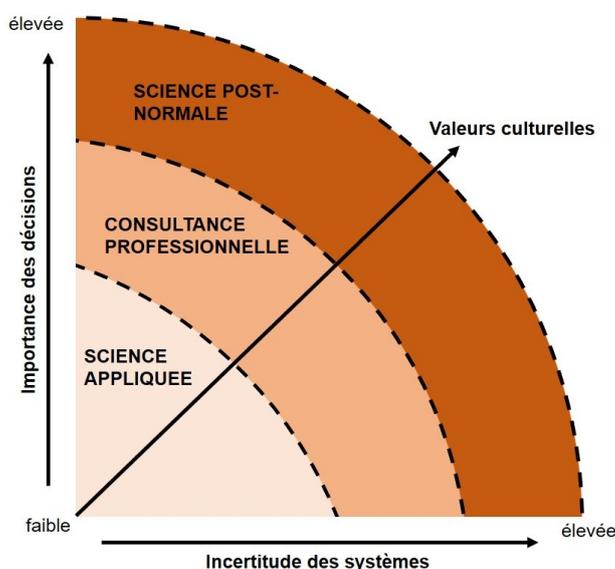


FIGURE 1.9 – La science post-normale, en comparaison à des approches plus classiques de résolution de problèmes : la science appliquée et la consultance professionnelle. La science post-normale est particulièrement pertinente dans les contextes d'incertitude élevée, où des enjeux majeurs reposent sur des décisions politiques. Il est alors essentiel de considérer les valeurs et préoccupations de toutes les parties prenantes. Adaptée du diagramme de FUNTOWICZ et RAVETZ 2003, modifié par Arthur Perrotton.

Cette stratégie s'inscrit en opposition à la « normalité ». La « normalité » concerne à la fois un type de démarche scientifique et les liens entre les décisions politiques et les connaissances scientifiques (FUNTOWICZ et RAVETZ 2003). L'approche scientifique « normale » telle que décrite par KUHN 2012 repose sur la résolution de problèmes successifs au sein d'un paradigme accepté par tout.e.s. Par rapport aux relations entre sciences et politique, la « normalité » suppose que la science fournit aux décideur.euse.s politiques des connaissances suffisantes et adaptées (FUNTOWICZ et RAVETZ 2003). La normalité fait donc référence à la démarche scientifique et au positionnement de la science dans un paradigme positiviste.

Or, l'hypothèse de la « normalité » n'est plus valable aujourd'hui, surtout face à l'incertitude et aux multiples crises auxquelles les sociétés sont confrontées (FUNTOWICZ et RAVETZ 2003). RAVETZ 1999 affirme que « trop souvent, nous devons prendre des décisions politiques majeures avec seulement des informations scientifiques irrémédiablement incertaines ». La SPN propose une alternative face à ce constat. Elle reconnaît que les connaissances scientifiques sont à la fois incertaines et ancrées dans un système de valeurs. Elle reconnaît également que les décisions politiques ne peuvent pas se fonder uniquement sur des faits scientifiques, mais doivent également tenir compte des valeurs, des intérêts et des préoccupations des différentes parties impliquées. Ainsi, la SPN met l'accent sur la participation de toutes les parties prenantes, notamment les citoyen.ne.s non scientifiques et non politiques professionnel.le.s dans la production et l'utilisation des connaissances scientifiques. Elle pose la question comment, et par qui, le cadre de production de connaissances est défini, en proposant une vision plus inclusive et démocratique. Enfin, la SPN accorde autant d'importance au processus de production de connaissances qu'aux résultats de ce dernier (FUNTOWICZ et RAVETZ 2003 ; RAVETZ 1999).

En résumé, la SPN propose une approche de la science basée sur la résolution de problèmes concrets, le plus souvent à l'échelle locale, en impliquant et en considérant les intérêts et les valeurs des parties prenantes.

1.3.1.5 La recherche selon la science post-normale

Deux critères majeurs caractérisent une recherche alignée avec la SPN : la finalité et la qualité du processus de recherche. En effet, la SPN fait référence à une démarche scientifique dont les objectifs, clairement définis et partagés par l'ensemble des parties prenantes, visent à contribuer à la résolution de problèmes sociétaux (FUNTOWICZ et RAVETZ 2003).

Dans ce contexte, l'objectif de la science n'est pas de produire des connaissances universelles, mais plutôt de générer des connaissances mobilisables pour résoudre ces problèmes et tendre vers un objectif commun de transformation sociale. Selon GODRIE et al. 2020, les savoirs issus de ces démarches de recherche sont caractérisés par « un haut niveau de validité contextuelle ». Ils sont également « socialement robustes [parce que] la validité n'est plus uniquement déterminée par des communautés scientifiques étroitement circonscrites, mais par des communautés d'engagement beaucoup plus larges » (GODRIE et al. 2020).

Par ailleurs, la science selon la SPN accorde une grande importance aux processus de recherche (FUNTOWICZ et RAVETZ 2003). Elle a pour objectif de favoriser la « justice cognitive », en transformant les espaces de recherche en lieux de « co-apprentissage », où scientifiques et non scientifiques professionnel.le.s sont tou.te.s « co-chercheur.euse.s » (GODRIE et al. 2020). MORRISSETTE 2013 évoque également le terme de « démocratie délibérative » conduisant à une « émancipation individuelle et collective ». Selon GÉLINEAU et al. 2012, cette qualité des processus peut être évaluée par le degré d’appropriation du processus scientifique par les acteur.trice.s profanes.

La réflexion proposée par STENGERS 1997 sur la démocratie au sein des processus de recherche est particulièrement pertinente dans ce contexte. En effet, Stengers cite deux principes pour favoriser l’inclusivité et la démocratie dans les démarches scientifiques : la reconnaissance de la légitimité égale des différents types de savoirs, et la vigilance pour éviter toute hiérarchie dans la répartition des pouvoirs entre les acteur.trice.s.

Ainsi, la recherche selon la SPN se caractérise par ses deux objectifs majeurs : générer des connaissances scientifiques afin de répondre à des questions et problèmes sociétaux, et mettre en place des processus inclusifs pouvant favoriser la démocratie à une échelle plus large. A travers ces deux objectifs, la recherche contribue à une transformation sociale.

1.3.2 La recherche participative parmi les sciences participatives

Dans la sous-section précédente, j’ai décrit les différentes caractéristiques d’une recherche adaptée à un monde incertain. Dans cette sous-section, je présente un type de recherche qui répond aux principes de la recherche dans un contexte de SPN : la recherche participative. Je situe cette approche par rapport à d’autres démarches de sciences participatives.

1.3.2.1 Les sciences participatives

Les sciences participatives sont définies par HOULLIER et MERILHOU-GOUDARD 2016 comme « des formes de production de connaissances scientifiques auxquelles des acteurs non scientifiques professionnels — qu’il s’agisse d’individus ou de groupes — participent de façon active et délibérée »¹¹ (HOULLIER et MERILHOU-GOUDARD 2016). Cette définition englobe une diversité

11. Dans cette définition, les connaissances scientifiques sont définies comme « des connaissances validées par les pairs selon des normes de preuve en usage dans les communautés de recherche (réfutabilité, reproductibilité, etc.) ». Elles « se distinguent des savoirs (savoirs d’action, savoir-faire, etc.) qui sont généralement non codifiés et liés à des situations locales

d’approches, qui varient en fonction des finalités, du type de public impliqué, du degré d’implication de ce public non académique, de la forme d’engagement, du type de protocole, de l’échelle du projet et de la (ou des) discipline(s) scientifique(s) associée(s) (HOULLIER et MERILHOU-GOUDARD 2016 ; VAUGHN et JACQUEZ 2020). Ainsi, plusieurs auteur.e.s, telle.s que GIROUX 2011, HAKLAY 2015 ou HOULLIER et MERILHOU-GOUDARD 2016 ont élaboré des typologies visant à classer les approches participatives. La plupart de ces classifications intègrent l’implication des acteur.trice.s non académiques comme un critère majeur. La diversité des démarches de sciences participatives se reflète dans la variété de termes utilisés dans la littérature pour y faire référence (figure 1.10).



FIGURE 1.10 – Diversité (non exhaustive) des termes anglais faisant référence à des types de sciences participatives. Certains de ces termes sont par ailleurs polysémiques. Sources : HOULLIER et MERILHOU-GOUDARD 2016 ; VAUGHN et JACQUEZ 2020.

1.3.2.2 Une définition de la recherche participative

La recherche participative peut être considérée comme un type de science participative. Le concept trouve ses racines dans les réflexions de divers penseurs, dont Paolo Freire, John Dewey et Kurt Lewin, à partir des années 1940. Ces derniers plaident en faveur d’une science à l’écoute des populations, et étroitement liée à l’action et au changement social (STORUP et al. 2013 ; MACAULAY 2017).

». La participation est quant-à-elle définie comme « la compétence des citoyens ou des groupes à être concernés de manière directe par un problème et mobilisés par leur volonté de mieux connaître des phénomènes qui les concernent, ou d’agir sur leurs conditions propres ou sur leurs environnements proches ou lointains » (HOULLIER et MERILHOU-GOUDARD 2016).

Plusieurs définitions de la recherche participative existent dans la littérature. Ce terme peut être vu comme un mot « parapluie » englobant une diversité d’approches (MACAULAY 2017). Néanmoins, la plupart des auteur.e.s caractérisent la recherche participative par l’implication des bénéficiaires de la recherche tout au long du processus de recherche, et par la production de résultats pertinents et cohérents pour ces acteur.trice.s non académiques. Selon ANADON et COUTURE 2007, il s’agit d’un ensemble d’approches qui « permettent d’établir des liens entre la recherche et l’action, entre la théorie et la pratique, entre la logique du chercheur et celle des praticiens ».

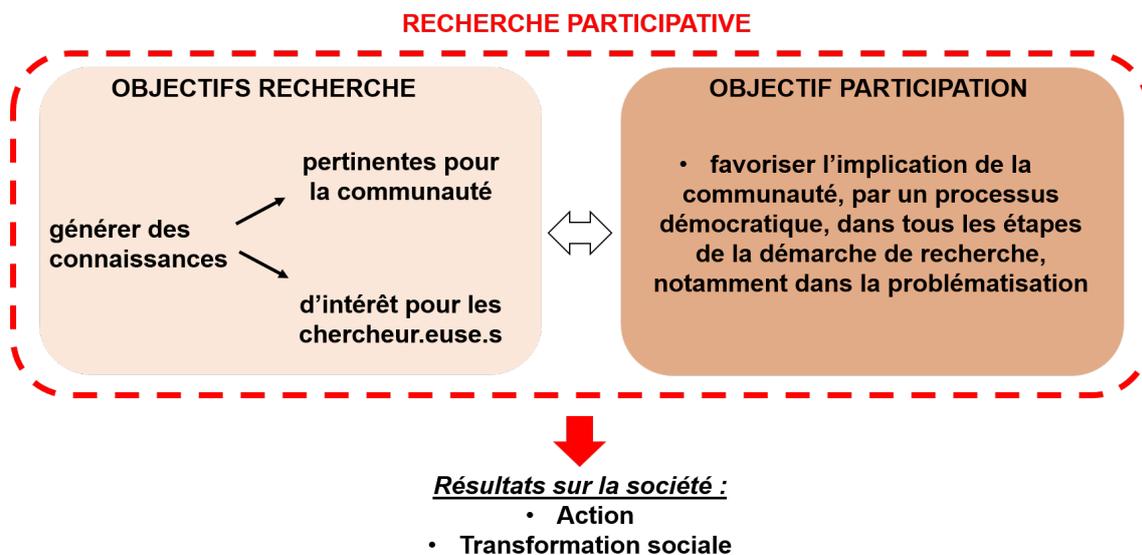


FIGURE 1.11 – La recherche participative, telle que considérée dans cette thèse. Ce concept est caractérisé par ses deux dimensions (la recherche et la participation), qui ont leurs objectifs respectifs mais qui sont indissociables. Ces deux dimensions font en sorte que les processus de recherche participative favorisent souvent l’action et la transformation sociale. Par ailleurs, dans la plupart des cas, la recherche participative s’intéresse à des problématiques locales, et prend en compte les savoirs vernaculaires.

Selon HOULLIER et MERILHOU-GOUDARD 2016, la recherche participative se caractérise par une collaboration totale entre chercheur.euse.s et communauté, dès la problématisation des thématiques de recherche, par des objectifs concrets visant à contribuer à la résolution de défis sociétaux, et par la production de connaissances pouvant conduire à l’innovation ou à la transformation sociale. De plus, CORNWALL et JEWKES 1995 évoquent l’intérêt des approches de recherche participative pour les « priorités et perspectives locales ». Les auteur.e.s citent également des rapports de pouvoirs équilibrés entre chercheur.euse.s et autres acteur.trice.s, ainsi que la considération des savoirs vernaculaires dans le processus de recherche.

Dans cette thèse, je m'appuierai sur la définition proposée par l'association Sciences Citoyennes, qui décrit la recherche participative comme « un type de participation citoyenne à la recherche, où des membres d'une organisation de la société civile s'associent avec des chercheurs académiques pour construire et mener ensemble un projet de recherche. L'objectif dans ce type de partenariat est de produire des connaissances qui, à la fois, constituent un réel intérêt scientifique pour le chercheur et répondent également aux besoins du partenaire associatif » (SCIENCES CITOYENNES 2023). Selon cette définition, la recherche participative répond aux critères de la SPN. D'une part, elle cherche à répondre à un questionnement ou à un problème issu de la société. D'autre part, elle accorde de l'importance au processus, en veillant à impliquer les acteur.trice.s non académiques dès les phases initiales de la recherche.

En résumé, la recherche participative peut être caractérisée par ses deux dimensions : la recherche et la participation. En ce qui concerne la recherche, il s'agit de produire des connaissances d'intérêt à la fois pour les chercheur.euse.s et pour les partenaires non académiques. Par rapport à la participation, l'objectif est de permettre une implication aboutie de la communauté, par des processus démocratiques, et en particulier dans les premières phases de la démarche (figure 1.11). Ces deux dimensions peuvent également servir de base pour l'évaluation des processus de recherche participative.

Enfin, il est important de noter que les frontières entre la recherche participative et d'autres approches qui s'alignent avec la SPN sont floues. Notamment, la distinction avec la recherche-action et la recherche action participative est difficile à établir. Il me semble que deux différences ressortent dans la littérature : la façon d'appréhender l'action et l'objectif de la production de connaissances. Dans le cas de la recherche participative, l'action n'est pas un objectif en soi, mais est souvent une conséquence de la démarche de recherche. Par ailleurs, la production de connaissances peut être une fin en soi. Dans les cas de la recherche-action et de la recherche action participative, l'action est au centre du processus de recherche, et la production de connaissances est uniquement un moyen pour atteindre les objectifs de la démarche (MORRISSETTE 2013).

1.4 La sélection participative

Dans les deux sections précédentes, j'ai présenté deux des piliers de l'agroécologie, mobilisés par mes travaux de thèse : la biodiversité cultivée et la recherche participative. Dans la section suivante, j'évoque rapidement l'intérêt croissant de la recherche pour les espèces « négligées et sous-utilisées » (« neglected and underutilized species » ; NUS en anglais). Je présente ensuite un type de recherche participative, au cœur des enjeux liés au déclin de la biodiversité cultivée : la sélection participative.

1.4.1 La recherche sur les espèces « négligées et sous-utilisées »

Le milieu de la recherche s'est progressivement intéressé à la diminution de la biodiversité cultivée et aux risques qu'elle représente. En particulier, les projets de recherche sur les espèces NUS se sont multipliés ces dernières années (MUGIYO et al. 2021 ; CHIVENGE et al. 2015 ; KACZMAREK et al. 2023). Les NUS sont définies par PADULOSI et al. 2013 comme des « espèces végétales utiles qui sont marginalisées, voire totalement ignorées, par les chercheur.euse.s, les sélectionneur.euse.s et les décideur.euse.s ». Si ces espèces sont négligées, c'est parce qu'elles ne présentent actuellement pas d'intérêt commercial. Cependant, ces cultures revêtent une grande importance pour les communautés locales, en particulier en milieu rural. D'une part, elles présentent le plus souvent un intérêt diététique, grâce à leur apport en nutriments essentiels. D'autre part, elles présentent un intérêt agronomique en raison de leur adaptation à des niches agroécologiques locales, parfois marginales, et de leurs faibles besoins d'intrants (PADULOSI et HOESCHLE-ZELEDON 2004). Cet article souligne également leur importance culturelle. Toutefois, les NUS sont peu représentées dans les collections *ex-situ*, et peu présentes dans le système semencier formel (PADULOSI et HOESCHLE-ZELEDON 2004).

Au début des années 2000, l'ONU a mené deux projets internationaux visant à promouvoir les NUS (PADULOSI et al. 2011). Ces derniers se sont distingués par une approche collaborative, réunissant une grande diversité d'acteur.trice.s. Parmi les principales conclusions de ces projets, il est ressorti la nécessité de repenser fondamentalement les stratégies de recherche et de développement afin de restaurer ou de promouvoir la culture des NUS. Cela implique de réorienter les objectifs des projets, en leur attribuant une importance autre que purement économique. Mettre en place des approches inclusives, rassemblant différentes parties prenantes est aussi apparu essentiel.

1.4.2 La sélection participative

En ce qui concerne l'obtention et la sélection variétale, de nouvelles pratiques ont également vu le jour dans les dernières décennies. Notamment, des projets dits de « sélection participative » se sont développés depuis une quarantaine d'années. CECCARELLI et GRANDO 2020 définissent la sélection participative comme un type de recherche participative appliquée à l'obtention et/ou la sélection variétale de plantes cultivées. Elle est caractérisée par la « participation de client.e.s (essentiellement, mais pas uniquement, de paysan.ne.s) dans toutes les décisions les plus importantes au cours de toutes les étapes d'un programme de sélection » (CECCARELLI et GRANDO 2020). Sept étapes sont mentionnées par les auteur.e.s : l'identification des besoins et de la demande, la définition des objectifs du programme, la génération ou l'identification de variants, la sélection des populations, l'évaluation de variétés, la diffusion de nouvelles variétés et la production et distribution de semences (figure 1.12). CECCARELLI et GRANDO 2020 établissent également une différence entre l'évaluation variétale participative, où les acteur.trice.s non académiques n'interviennent qu'à partir de l'étape d'évaluation des variétés, et la sélection participative.

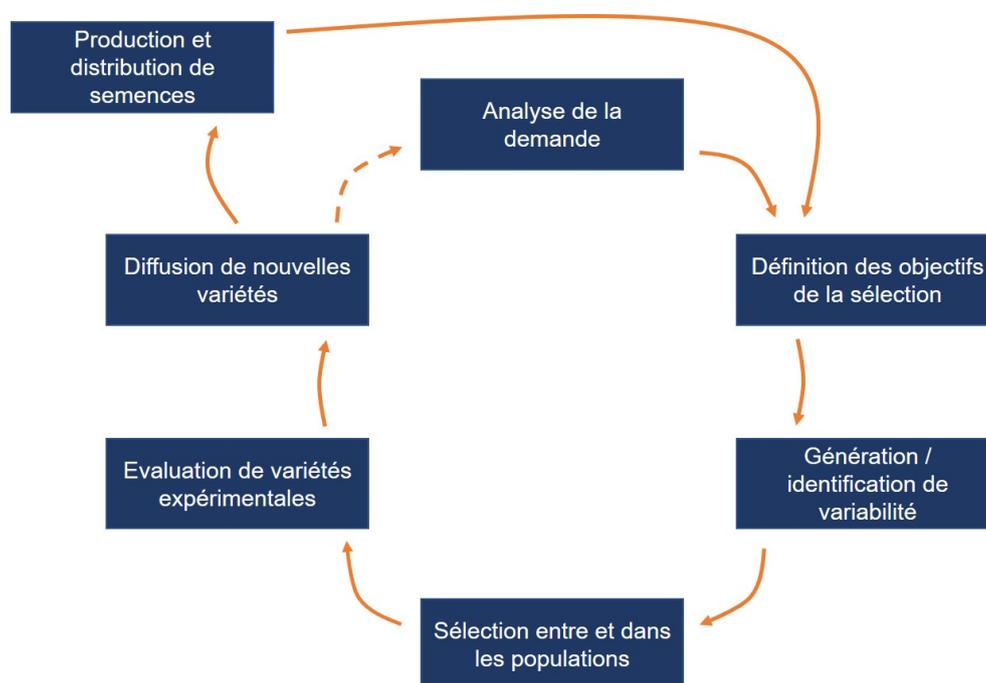


FIGURE 1.12 – Principales étapes d'un programme de sélection. Modifié de : CECCARELLI et GRANDO 2020.

Selon plusieurs auteur.e.s, la sélection participative a démontré sa capacité à créer des variétés plus résilientes (CECCARELLI et GRANDO 2020 ; GOLDRINGER et al. 2019), avec un taux d'adoption par les producteur.trice.s supérieur à celui des variétés issues du secteur semencier formel (GALLUZZI et al. 2015). Ces projets se concentrent généralement sur des populations hétérogènes et dynamiques, et ont un impact positif sur l'augmentation de la diversité génétique (CECCARELLI et GRANDO 2020 ; JOSHI et al. 1997). De plus, le processus de sélection participative est décrit par CECCARELLI et GRANDO 2020 comme socialement inclusif. Il favorise l'autonomisation (« empowerment ») des paysan.ne.s, en leur permettant de s'affranchir de la « technologisation » de l'obtention variétale et du système semencier formel (CHABLE et BERTHELLOT 2006), et peut contribuer à l'équité entre les genres (TUFAN et al. 2018). De plus, la sélection participative est un moyen de créer des variétés adaptées à l'agriculture biologique (CHABLE et BERTHELLOT 2006), et peut améliorer localement la sécurité alimentaire des ménages (JOSHI et al. 2012). Toutefois, malgré les avantages agronomiques et socio-économiques qu'elles représentent, les approches de sélection participative restent très peu institutionnalisées (CECCARELLI et GRANDO 2020).

Par ailleurs, divers.e.s chercheur.euse.s et paysan.ne.s impliqué.e.s dans des projets de sélection participative se sont intéressé.e.s à la démarche mise en place, en identifiant des éléments essentiels à leur réalisation (CHABLE et BERTHELLOT 2006 ; DEMEULENAERE et GOLDRINGER 2017). Par exemple, CHABLE et BERTHELLOT 2006 ont identifié quatre étapes synthétisant l'implication des paysan.ne.s dans ce type de projets. La première consiste à créer « un groupe et un espace d'échanges », et donc à bâtir une relation de confiance réciproque entre les acteur.trice.s (DEMEULENAERE et GOLDRINGER 2017). RIVIÈRE et al. 2013 mentionne l'importance du travail de coordination, qui est souvent mené par la recherche ou par un.e animateur.trice d'un collectif paysan. Enfin, une réflexion sur le rôle des chercheur.euse.s dans ces projets est également proposée par certain.e.s auteur.e.s. Selon, ROUSSEAU-TRAORÉ et KASTLER 2004, le.la chercheur.seuse « d'omniscient, devient animateur, révélateur du savoir et des savoir-faire des paysans tout en apportant une certaine méthodologie de travail ». Selon CHABLE et BERTHELLOT 2006, le rôle du.de la chercheur.euse est d'accompagner le.la paysan.ne dans sa réappropriation de la semence.

1.4.3 La sélection participative sur le blé tendre en France

En France, plusieurs expériences de sélection participative, sur diverses espèces végétales, ont vu le jour dès les années 2000 (CHABLE et BERTHELLOT 2006). Parmi celles-ci, un programme de sélection participative sur le blé tendre, impliquant le Réseau Semences Paysannes (RSP) et l'équipe de recherche Diversité, Evolution et Adaptation des Populations (DEAP) de l'Unité Mixte de Recherche Génétique Quantitative et Évolution-Le Moulon (UMR GQE) de l'INRAE a émergé au début des années 2000. Celui-ci est né de l'initiative de Jean-François Berthelot, paysan-boulangier qui cultivait de nombreuses variétés paysannes ou historiques sur des micro-parcelles. En 2006, il décide d'effectuer des croisements, afin de combiner les intérêts de différentes variétés (DAWSON et al. 2011 ; RIVIÈRE et al. 2013). Pour cela, il fait appel à l'aide de l'équipe DEAP, et 90 croisements sont effectués. Assez rapidement, le groupe blé du RSP, ainsi que d'autres scientifiques de disciplines diverses s'associent au projet qui « devient collectif » (DEMEULENAERE et GOLDRINGER 2017). Il est tout de suite convenu que l'ensemble des tâches réalisées dans le projet (conception des dispositifs expérimentaux, élaboration des protocoles, gestion des données, analyses) feraient l'objet de discussions et de décisions collectives. De plus, la démarche de recherche (méthodologie de sélection, organisation collective) peut être modifiée à tout moment suite à une décision collective (RIVIÈRE et al. 2013).

En 2008, la génération F3 des croisements de Jean-François Berthelot est distribuée à d'autres paysan.ne.s. Depuis lors, une évaluation annuelle de différentes variétés est conduite à la ferme. Pour ceci, une méthodologie, portant sur des aspects techniques et organisationnels, a été co-construite (RIVIÈRE et al. 2013). Il s'est notamment agi de concevoir des dispositifs expérimentaux permettant aux paysan.ne.s d'évaluer un maximum de variétés dans leurs fermes (en limitant les répétitions intra-fermes) et aux chercheur.euse.s d'analyser les données par des méthodes statistiques. Il a également fallu mettre en place une organisation collective, développer une méthode statistique basée sur l'approche bayésienne pour analyser les données, ainsi qu'une base de données (SHiNeMas) (RIVIÈRE et al. 2013). Ainsi, les chercheur.euse.s impliqué.e.s dans la démarche identifient plusieurs types d'innovations qui découlent du projet. L'innovation « génétique » fait référence aux variétés créées et est l'un des résultats du programme. Les innovations « techniques » (outils développés) et « organisationnelles » (fonctionnement en collectif) font partie d'innovations « méthodologiques » nécessaires au déroulement du projet (RIVIÈRE et al. 2013 ; DEMEULENAERE et GOLDRINGER 2017).

RIVIÈRE et al. 2013 soulignent que la sélection au sein de ce programme est à la fois décentralisée et participative. Décentralisée, parce qu'elle a lieu dans les fermes des différent.e.s paysan.ne.s impliquées, valorisant ainsi les interactions entre le génotype et l'environnement. Participative parce que l'utilisateur.trice final.e est impliqué.e.s dans le processus de sélection. En effet, les paysan.ne.s interviennent à toutes les étapes de la sélection illustrées dans la figure 1.12.

Par rapport à l'approche méthodologique, les chercheur.euse.s impliqué.e.s dans ce projet de sélection évoquent le temps nécessaire au processus de co-construction (DEMEULENAERE et GOLDRINGER 2017). Par exemple, le développement de la méthode statistique et la formalisation de l'organisation collective ont fait l'objet d'une thèse (RIVIÈRE 2014). RIVIÈRE et al. 2013 évoque également l'« équilibre entre dépendance/indépendance du paysan au réseau ». Dans le cas de ce projet, le.la paysan.ne est très libre par rapport au choix des variétés évaluées et à la gestion des parcelles expérimentales sur sa ferme. Néanmoins, la mise en réseau est indispensable pour l'échange de variétés, pour la création de variabilité, notamment par la diversité des pratiques culturelles, pour l'évaluation statistique, etc.

En 2013, un total de 650 « germplasm »¹², dont 165 créés à partir de croisements dans le cadre du projet, avaient été évalués (RIVIÈRE et al. 2013). Au-delà de ce résultat sur la diversité génétique circulant dans le réseau, RIVIÈRE et al. 2013 mentionne également la réappropriation de la sélection par les paysan.ne.s, ainsi qu'une évolution dans les pratiques des paysan.ne.s (par exemple, une augmentation des échanges de semences au sein du réseau), et de la recherche.

Enfin, en complément des évaluations de variétés annuelles, des projets visant à répondre à certains questionnements venant des paysan.nes et/ou des chercheur.euses, sont régulièrement initiés, souvent sous la forme de thèses (encadré 1.4.1).

En plus de ce programme national sur le blé tendre, une initiative de sélection participative sur le blé dur a été initiée dans les années 2000 dans le cadre du projet Céréaliculture Biologique en Camargue (CEBIOCA). Celle-ci a réuni plusieurs chercheur.euse.s de disciplines diverses ainsi que des collectifs tels que le Centre d'Initiative et de Valorisation de l'Agriculture et du Milieu rural de l'Aude (BioCIVAM 11) et la Fédération Nationale de l'Agriculture Biologique (FNAB) (CHABLE et BERTHELLOT 2006; MOURET et al. 2005). Par ailleurs, sans s'inscrire dans un contexte de sélection, le projet de recherche participative « Pays Blé », lancé par l'INRAE et coordonné par Véronique Chable dès 2009, a abouti à la mise en place d'un réseau d'expérimentation,

12. Le terme « germplasm » fait référence à du matériel génétique.

de préservation et de promotion de variétés de blé tendre adaptées à l'agriculture biologique dans les terroirs bretons (GOLDRINGER et al. 2023). Ce projet, au sein duquel des évaluations organoleptiques de diverses variétés de blé tendre ont été réalisées (VINDRAS-FOUILLET 2014), a également servi de point de départ pour le lancement de plusieurs projets européens centrés sur la biodiversité cultivée : Solibam, Diversifood, Liveseed et LiveSeeding.

Encadré 1.4.1 - Projets de thèses annexes à l'évaluation annuelle des variétés

En 2011, Mathieu Thomas a mis en évidence la pertinence de la sélection à la ferme et d'un système d'échanges de semences décentralisé en France, pour le maintien d'une diversité génétique élevée (THOMAS 2011).

En 2014, la thèse de Pierre Rivière a porté sur le développement d'une méthodologie, regroupant des aspects techniques et organisationnels pour le projet de sélection. Il a notamment mis en place une approche statistique pour l'évaluation de dispositifs hautement déséquilibrés (RIVIÈRE 2014).

En 2014, Camille Vindras-Fouillet a mis en place des tests d'évaluation de la qualité organoleptique, ainsi qu'un ensemble d'outils sensoriels adaptés au contexte de la sélection décentralisée pour intégrer le critère de la qualité sensorielle avec deux exemples : le blé et le brocoli (VINDRAS-FOUILLET 2014).

En 2018, Gaëlle van Frank a étudié, entre autres, les réponses des mélanges à différentes pratiques de la sélection (VAN FRANK 2018).

En 2022, la thèse de Baptiste Rouger a porté sur une approche de modélisation participative, visant à co-construire et évaluer des scénarios de gestion de la biodiversité cultivée dans différents réseaux, afin de mieux comprendre leur impact sur la diversité globale (ROUGER 2022).

Actuellement, Michel Turbet-Delof travaille sur la caractérisation de l'environnement de culture dans le but d'améliorer l'évaluation des variétés (TURBET-DELOF in prep).

1.5 Contexte de la thèse et questions de recherche

1.5.1 Contexte et positionnement de la thèse

Cette thèse s'inscrit dans un programme de recherche plus large porté par Marie-Thérèse Charreyre, le programme « Agriculture-Nutrition-Santé » (ANS). Débuté en 2019 et situé dans la région de Lyon (100 km autour de la métropole de Lyon), il vise à aborder des enjeux de santé en

lien avec l'alimentation et l'agriculture, par des approches de recherche inter-, transdisciplinaires et participatives. Plus précisément, cette thèse fait partie d'un sous-projet de ce programme, axé sur l'étude de céréales. Elle représente le premier travail conséquent de ce sous-projet. La genèse de la thèse est abordée plus en détail dans le chapitre 3.

Cette thèse se positionne dans une démarche d'agroécologie forte, telle que proposée par CALAME 2016. D'une part, elle s'intéresse à des ressources végétales marginales, les blés vêtus. D'autre part, elle adopte une démarche de recherche participative et située à une échelle territoriale. Elle est donc en totale conformité avec les principes 6 et 10 de STASSART et al. 2012 (tableau 1.1). En ce qui concerne la participation, elle cherche à favoriser une implication la plus aboutie possible des acteur.trice.s non académiques.

Enfin, cette thèse s'inspire grandement du programme national de sélection participative sur le blé tendre mené en France depuis 2006. Bien qu'elle ne se présente pas comme un projet de sélection à proprement parler, elle s'inscrit dans la continuité du projet porté par le RSP et l'équipe DEAP de l'INRAE. Elle adopte une démarche similaire, mais s'intéresse à des espèces de blés moins courantes que le blé tendre, à savoir les blés vêtus et sur une zone géographique plus limitée, la région lyonnaise.

1.5.2 Objectifs globaux et questions de recherche

En raison de son ancrage dans le programme ANS, nous avons convenu, dès le commencement de la thèse, qu'elle explorerait des aspects agronomiques et nutritionnels de céréales marginales et qu'elle serait géographiquement ancrée dans la région de Lyon. Néanmoins, au début de la thèse, le choix des espèces sur lesquelles porterait la recherche n'était pas définitivement établi. De plus, nous n'avons pas déterminé de problématiques de recherche précises. En effet, nous souhaitons que le choix des espèces et l'élaboration des questions de recherche soient issus d'un processus participatif. Toutefois, dès le début de la thèse, nous avons deux objectifs globaux :

- (i) **Evaluer une (des) espèce(s) de céréales marginales d'intérêt pour les paysan.ne.s en région lyonnaise en fonction de critères agronomiques et nutritionnels choisis de façon participative.**
- (ii) **Créer du lien entre différent.e.s acteur.trice.s s'intéressant à cette (ces) espèce(s) de céréales marginales sur le territoire, afin d'initier une collaboration sur le long terme.**

La première étape de la thèse a été de constituer un collectif de recherche multi-acteur.trice.s et définir l'objet ainsi que les questions de recherche par une démarche participative. Les questions présentées ci-dessous sont qui ont émergé de ce processus et ont été abordées au cours de la thèse. Du fait que la thèse marque le début d'une initiative plus vaste, elles restent exploratoires.

Les trois premières questions concernent l'évaluation agronomique des espèces évaluées, et sont traitées au sein du chapitre 4 :

- (1) *Quelles sont les principales caractéristiques agronomiques et morphométriques des grains de chaque espèce étudiée ?*
- (2) *Quelle est la variabilité intra-spécifique pour chaque espèce ?*
- (3) *Quelle est la variabilité liée à l'environnement sur les traits agronomiques et morphométriques des grains ?*

Les trois questions suivantes concernent la composition en protéines du gluten des espèces évaluées et sont traitées dans le chapitre 5 :

- (1) *Les blés vêtus ont-ils des compositions en protéines du gluten différentes par rapport au blé tendre ?*
- (2) *Quelle est la variabilité intra-spécifique pour chaque espèce ?*
- (3) *Quelle est la variabilité liée à l'environnement sur la composition en protéines du gluten ?*

En plus de traiter ces questions, j'ai souhaité porter un regard réflexif sur la démarche de recherche mise en place au cours de cette thèse. Ainsi, dans le chapitre 6, je questionne les forces et les faiblesses de l'approche participative développée dans la thèse, par rapport aux deux objectifs globaux définis au début de la thèse, en m'appuyant sur le cadre d'analyse de la sous-optimalité (présenté dans le chapitre 6). Plus précisément, je pose les questions suivantes :

- (1) *Quelle a été l'efficacité du processus de recherche participative expérimenté pendant ma thèse (les objectifs initiaux ont-ils été atteints) ?*
- (2) *Quelle a été la performance de ce processus (par quels moyens ces objectifs ont été atteints) ?*
- (3) *En quoi la démarche mise en place apparaît robuste et quelles sont ses principales fragilités ?*

1.5.3 Plan de la thèse

La suite de cette thèse est structurée de la façon suivante. Le chapitre 2 est consacré à un état de l'art de la littérature scientifique sur les blés vêtus. Il introduit ainsi les trois espèces de blé qui ont fait l'objet de nos recherches. Le chapitre 3 décrit la démarche de recherche mise en œuvre. Il explicite la constitution et le fonctionnement du collectif multi-acteur.trice.s et présente le dispositif expérimental sur lequel s'appuie la thèse. Dans le chapitre 4, les résultats issus de l'évaluation agronomique des trois espèces de blés vêtus sont présentés. Le chapitre 5 porte quant-à-lui sur les résultats des compositions en protéines du gluten des espèces étudiées. Ensuite, le chapitre 6 constitue une analyse réflexive de la démarche participative mise en œuvre et décrite dans le chapitre 3. Enfin, le chapitre 7 est une brève conclusion générale sur l'ensemble des travaux menés tout au long de la thèse.

1.6 Bibliographie

- ALTIERI, M. A. et al. (1983). *Agroecology : the scientific basis of alternative agriculture*. Berkeley, California : Division of Biological Control.
- ALTIERI, M. A. (1995). *Agroecology : The science of sustainable agriculture*. 2nd edition. Boulder, CO. : Westview Press.
- ANADON, M. et C. COUTURE (2007). « La recherche participative, une préoccupation toujours vivace ». In : *M. Anadón (Éd.), La recherche participative*, p. 3-7.
- ASSENS, S., F. EWERT, P. MARTRE, R. P. RÖTTER, D. B. LOBELL, D. CAMMARANO, B. A. KIMBALL, M. J. OTTMAN, G. WALL, J. W. WHITE et al. (2015). « Rising temperatures reduce global wheat production ». In : *Nature climate change* 5.2, p. 143-147. DOI : [10.1038/nclimate2470](https://doi.org/10.1038/nclimate2470).
- BALFOURIER, F., S. BOUCHET, S. ROBERT, R. DE OLIVEIRA, H. RIMBERT, J. KITZ, F. CHOLET, I. W. G. S. CONSORTIUM, B. CONSORTIUM et E. PAUX (2019). « Worldwide phylogeography and history of wheat genetic diversity ». In : *Science advances* 5.5. DOI : [10.1126/sciadv.aav0536](https://doi.org/10.1126/sciadv.aav0536).
- BARNOSKY, A. D., E. A. HADLY, J. BASCOMPTE, E. L. BERLOW, J. H. BROWN, M. FORTELIUS, W. M. GETZ, J. HARTE, A. HASTINGS, P. A. MARQUET et al. (2012). « Approaching a state shift in Earth's biosphere ». In : *Nature* 486.7401, p. 52-58. DOI : [10.1038/nature11018](https://doi.org/10.1038/nature11018).
- BEAUGUITTE, L. (2022). *Concilier rigueur scientifique et engagement*. URL : <https://hal.science/hal-03573027/document>.
- BENSIN, B. (1928). *Agroecological characteristics description and classification of the local corn varieties*. Chorotypes.
- BERGHEAUD, V., J.-M. AUDERGON, M.-C. BONNIFACE, A. PRIET et A.-F. ADAM-BLONDON (2023). « Pilier plante - Actualités ». In : *Assemblée Générale Ressources Agronomiques pour la Recherche (RARE)*.
- BOINON, J.-P. (2015). « La spéculation sur les marchés agricoles ». In : *Recherches Internationales* 102.1, p. 79-92.
- BONJEAN, A. (2001). « Histoire de la culture des céréales et en particulier de celle du blé tendre (*Triticum aestivum* L.) » In : *Dossier de l'environnement de l'INRA* 21, 29-37p.
- BONNEUIL, C., E. DEMEULENAERE, F. THOMAS, P.-B. JOLY, G. ALLAIRE et I. GOLDRINGER (2006). « Innover autrement ? La recherche face à l'avènement d'un nouveau régime de production et de régulation des savoirs en génétique végétale ». In : *Dossiers de l'environnement de l'INRA* 30, p. 29-51.
- BONNEUIL, C. et M. FENZI (2011). « Des ressources génétiques à la biodiversité cultivée : la carrière d'un problème public mondial ». In : *Revue d'anthropologie des connaissances* 5.2, p. 206-233. DOI : [10.3917/rac.013.0206](https://doi.org/10.3917/rac.013.0206).
- BONNEUIL, C., R. GOFFAUX, I. BONNIN, P. MONTALENT, C. HAMON, F. BALFOURIER et I. GOLDRINGER (2012). « A new integrative indicator to assess crop genetic diversity ». In : *Ecological Indicators* 23, p. 280-289. DOI : [10.1016/j.ecolind.2012.04.002](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.04.002).
- BONNEUIL, C. et F. THOMAS (2012). *Semences, une histoire politique : amélioration des plantes, agriculture et alimentation en France depuis la Seconde Guerre mondiale*. ECLM.
- BONNIN, I., C. BONNEUIL, R. GOFFAUX, P. MONTALENT et I. GOLDRINGER (2014). « Explaining the decrease in the genetic diversity of wheat in France over the 20th century ». In : *Agriculture, Ecosystems & Environment* 195, p. 183-192. DOI : [10.1016/j.agee.2014.06.003](https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.06.003).
- BRASSEUR, M. (2012). « L'interaction du chercheur avec son terrain en recherche-action : deux cas d'accompagnement individuel des managers ». In : *Recherches en Sciences de Gestion* 2, p. 103-118. DOI : [10.3917/resg.089.0101](https://doi.org/10.3917/resg.089.0101).
- CALAME, M. (2016). *Comprendre l'agroécologie : origines, principes et politiques*. T. 220. ECLM.

- CARTRON, F. et J.-L. FICHET (2020). *Rapport d'information fait au nom de la délégation sénatoriale à la prospective sur « Vers une alimentation durable : Un enjeu sanitaire, social, territorial et environnemental majeur pour la France »*. Rapport au Sénat n° 476.
- CBD (1992). *Convention on Biological Diversity*. Article 2 - Use of Terms.
- CECCARELLI, S. et S. GRANDO (2020). « Participatory plant breeding : who did it, who does it and where? » In : *Experimental Agriculture* 56.1, p. 1-11. DOI : [10.1017/S0014479719000127](https://doi.org/10.1017/S0014479719000127).
- CHABLE, V. et J.-F. BERTHELLOT (2006). « La sélection participative en France : présentation des expériences en cours pour les agricultures biologiques et paysannes ». In : *Le courrier de l'environnement de l'INRA* 30, p. 129-138.
- CHABLE, V., E. NUIJTEN, A. COSTANZO, I. GOLDRINGER, R. BOCCI, B. OEHEN, F. REY, D. FASOULA, J. FEHER, M. KESKITALO et al. (2020). « Embedding cultivated diversity in society for agro-ecological transition ». In : *Sustainability* 12.3, p. 784. DOI : [10.3390/su12030784](https://doi.org/10.3390/su12030784).
- CHALLINOR, A. J., J. WATSON, D. B. LOBELL, S. HOWDEN, D. SMITH et N. CHHETRI (2014). « A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation ». In : *Nature climate change* 4.4, p. 287-291. DOI : [10.1038/nclimate2153](https://doi.org/10.1038/nclimate2153).
- CHIVENGE, P., T. MABHAUDHI, A. T. MODI et P. MAFONGOYA (2015). « The potential role of neglected and underutilised crop species as future crops under water scarce conditions in Sub-Saharan Africa ». In : *International journal of environmental research and public health* 12.6, p. 5685-5711. DOI : [10.3390/ijerph120605685](https://doi.org/10.3390/ijerph120605685).
- CHRISTIANSEN, M., S. ANDERSEN et R. ORTIZ (2002). « Diversity changes in an intensively bred wheat germplasm during the 20 th century ». In : *Molecular breeding* 9, p. 1-11. DOI : [10.1023/A:1019234323372](https://doi.org/10.1023/A:1019234323372).
- COMBETTE, P., N. COUX, J. DEBIN, P. de KOCHKO, A.-P. DU TEIL, E. GRAS, M. HARISTOY, L. HAZARD, B. JOLY, G. KASTLER et al. (2015). *Gérer collectivement la biodiversité cultivée*. Educagri, p. 221. URL : [hal-02794506](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02794506).
- CORNWALL, A. et R. JEWKES (1995). « What is participatory research? » In : *Social science & medicine* 41.12, p. 1667-1676. DOI : [10.1016/0277-9536\(95\)00127-S](https://doi.org/10.1016/0277-9536(95)00127-S).
- DAVIS, D. R., M. D. EPP et H. D. RIORDAN (2004). « Changes in USDA food composition data for 43 garden crops, 1950 to 1999 ». In : *Journal of the American College of Nutrition* 23.6, p. 669-682. DOI : [10.1080/07315724.2004.10719409](https://doi.org/10.1080/07315724.2004.10719409).
- DAWSON, J. C., P. RIVIÈRE, J.-F. BERTHELLOT, F. MERCIER, P. DE KOCHKO, N. GALIC, S. PIN, E. SERPOLAY, M. THOMAS, S. GIULIANO et al. (2011). « Collaborative plant breeding for organic agricultural systems in developed countries ». In : *Sustainability* 3.8, p. 1206-1223. DOI : [10.3390/su3081206](https://doi.org/10.3390/su3081206).
- DE SCHUTTER, O. (2014). *The Transformative Potential of the Right to Food : Report of the Special Rapporteur on the Right to Food, Olivier De Schutter*. United Nations Human Rights Council.
- DEBITON, C. (2021). « Patrimoine génétique : Le CRB recèle les trésors des céréales à paille ». In : *Perspectives agricoles* 489. Consulté le 06-10-2023. URL : <https://www.perspectives-agricoles.com/recherche-agronomie/patrimoine-genetique-le-crb-recele-les-tresors-des-cerealespaille>.
- DEMEULENAERE, É. et I. GOLDRINGER (2017). « Semences et transition agroécologique : initiatives paysannes et sélection participative comme innovations de rupture ». In : *Natures sciences sociétés* Supp. 4, p. 55-59. DOI : [10.1051/nss/2017045](https://doi.org/10.1051/nss/2017045).
- DÍAZ, S., U. PASCUAL, M. STENSEKE, B. MARTÍN-LÓPEZ, R. T. WATSON, Z. MOLNÁR, R. HILL, K. M. CHAN, I. A. BASTE, K. A. BRAUMAN et al. (2018). « Assessing nature's contributions to people ». In : *Science* 359.6373, p. 270-272. DOI : [10.1126/science.aap882](https://doi.org/10.1126/science.aap882).

- EBERL, E., A. S. LI, Z. Y. J. ZHENG, J. CUNNINGHAM et A. RANGAN (2022). « Temporal Change in Iron Content of Vegetables and Legumes in Australia : A Scoping Review ». In : *Foods* 11.1, p. 56. DOI : [10.3390/foods11010056](https://doi.org/10.3390/foods11010056).
- ENGELS, J. (2002). « Plant genetic resources management and conservation strategies : problems and progress ». In : *XXVI International Horticultural Congress : Plant Genetic Resources, The Fabric of Horticultures Future 623*, p. 179-192. DOI : [10.17660/ActaHortic.2003.623.19](https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2003.623.19).
- FAO (1997). *The state of the world's plant genetic resources for food and agriculture*. FAO. Rome.
- (1999). *Agricultural Biodiversity, Multifunctional Character of Agriculture and Land Conference, Background Paper 1*. Maastricht, The Netherlands.
- (2019). *The state of the world's biodiversity for food and agriculture*. Bélanger, J., Pilling, D. FAO Commission on Genetic Resources for Food et Agriculture Assessments. Rome.
- FAO (2023). *What is agrobiodiversity ?* URL : <https://www.fao.org/3/y5609e/y5609e01.htm> (visité le 04/10/2023).
- FAO, IFAD, UNICEF, WFP et WHO. (2017). *The state of food security and nutrition in the world 2017. Building resilience for peace and food security*. FAO. Rome. ISBN : 978-92-5-109888-2.
- FISCHBECK, G. (1981). « The usefulness of genebanks—perspectives for the breeding of plants ». In : *The Use of Genetic Resources in the Plant Kingdom, UPOV, Geneva*, p. 16-26.
- FOLEY, J. A., N. RAMANKUTTY, K. A. BRAUMAN, E. S. CASSIDY, J. S. GERBER, M. JOHNSTON, N. D. MUELLER, C. O'CONNELL, D. K. RAY, P. C. WEST et al. (2011). « Solutions for a cultivated planet ». In : *Nature* 478.7369, p. 337-342. DOI : [10.1038/nature10452](https://doi.org/10.1038/nature10452).
- FRANCIS, C., G. LIEBLEIN, S. GLIESSMAN, T. BRELAND, N. CREAMER, R. HARWOOD, L. SALOMONSSON, J. HELENIUS, D. RICKERL, R. SALVADOR et al. (2003). « Agroecology : The ecology of food systems ». In : *Journal of sustainable agriculture* 22.3, p. 99-118. DOI : [10.1300/J064v22n03_10](https://doi.org/10.1300/J064v22n03_10).
- FU, Y.-B. (2006). « Impact of plant breeding on genetic diversity of agricultural crops : searching for molecular evidence ». In : *Plant Genetic Resources* 4.1, p. 71-78. DOI : [10.1079/PGR2006116](https://doi.org/10.1079/PGR2006116).
- FUNTOWICZ, S. et J. RAVETZ (2003). « Post-normal science ». In : *International Society for Ecological Economics (ed.), Online Encyclopedia of Ecological Economics*. URL : <https://isecoeco.org/pdf/pstnormsc.pdf>.
- GALE, M. D., S. YOUSSEFIAN et G. RUSSELL (1985). « Dwarfing genes in wheat ». In : *Progress in plant breeding* 1, p. 1-35.
- GALLUZZI, G., R. ESTRADA, V. APAZA, M. GAMARRA, Á. PÉREZ, G. GAMARRA, A. ALTAMIRANO, G. CÁCERES, V. GONZA, R. SEVILLA et al. (2015). « Participatory breeding in the Peruvian highlands : Opportunities and challenges for promoting conservation and sustainable use of underutilized crops ». In : *Renewable Agriculture and Food Systems* 30.5, p. 408-417. DOI : [10.1017/S1742170514000179](https://doi.org/10.1017/S1742170514000179).
- GATERSLEBEN, I. (2018). *Mansfeld's world database of agricultural and horticultural crops*.
- GÉLINEAU, L., É. DUFOUR et M. BÉLISLE (2012). « Quand recherche-action participative et pratiques AVEC se conjuguent : enjeux de définition et d'équilibre des savoirs ». In : *Recherches qualitatives* 13, p. 13-54.
- GIEC (2021). *Impacts, Vulnerability and Exposure to Climate Change. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Rapp. tech. World Meteorological Organization et United Nations Environment Programme.
- GIROUX, M. (2011). « La participation citoyenne, un outil pour mieux connaître la biodiversité : portrait nord-américain ». In : *Communication aux Troisièmes Rendez-vous de l'Accord Canada-France*, p. 22-26.
- GLIESSMAN, S. R. (2007). *Agroecology : the ecology of sustainable food systems*, CRC Press, Taylor & Francis. 3rd edition. NewYork, USA : CRC Press.

- (2018). « Defining agroecology ». In : *Agroecology and Sustainable Food Systems* 42.6, p. 599-600. DOI : [10.1080/21683565.2018.1432329](https://doi.org/10.1080/21683565.2018.1432329).
- GODRIE, B., M. BOUCHER, S. BISSONNETTE, P. CHAPUT, J. FLORES, S. DUPÉRÉ, L. GÉLINEAU, F. PIRON et A. BANDINI (2020). « Injustices épistémiques et recherche participative : un agenda de recherche à la croisée de l’université et des communautés ». In : *Gateways : International Journal of Community Research and Engagement* 13.1. DOI : [10.5130/ijcre.v13i1.7110](https://doi.org/10.5130/ijcre.v13i1.7110).
- GOFFAUX, R., I. GOLDRINGER, C. BONNEUIL, P. MONTALENT et I. BONNIN (2011). *Quels indicateurs pour suivre la diversité génétique des plantes cultivées ? Le cas du blé tendre en France depuis un siècle*. Rapp. tech. URL : [hal-02810480](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02810480).
- GOLDRINGER, I., V. CHABLE et E. SERPOLAY (2023). *A la recherche des blés. Retour sur 20 ans de sélection paysanne et participative*. Poster présenté lors de la Rencontre de praticiens au GAEC du Pont de l’Arche à Bouchemaine (49) – Prix de la recherche participative, 16-17 juin 2023.
- GOLDRINGER, I., G. van FRANK, C. BOUVIER D’YVOIRE, E. FORST, N. GALIC, M. GARNAULT, J. LOCQUEVILLE, S. PIN, J. BAILLY, R. BALTASSAT et al. (2019). « Agronomic evaluation of bread wheat varieties from participatory breeding : a combination of performance and robustness ». In : *Sustainability* 12.1, p. 128. DOI : [10.3390/su12010128](https://doi.org/10.3390/su12010128).
- GÓMEZ-BAGGETHUN, E., R. DE GROOT, P. L. LOMAS et C. MONTES (2010). « The history of ecosystem services in economic theory and practice : from early notions to markets and payment schemes ». In : *Ecological economics* 69.6, p. 1209-1218. DOI : [10.1016/j.ecolecon.2009.11.007](https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.11.007).
- GUZMÁN, E. S. (2006). *De la sociología rural a la agroecología*. T. 1. Icaria editorial.
- HAKLAY, M. (2015). « Citizen science and policy : a European perspective ». In.
- HAMMER, K. et G. LAGHETTI (2005). « Genetic Erosion—Examples from Italy ». In : *Genetic Resources and Crop Evolution* 52, p. 629-634. DOI : [10.1007/s10722-005-7902-x](https://doi.org/10.1007/s10722-005-7902-x).
- HAWKESWORTH, S., A. D. DANGOUR, D. JOHNSTON, K. LOCK, N. POOLE, J. RUSHTON, R. UAUY et J. WAAGE (2010). « Feeding the world healthily : the challenge of measuring the effects of agriculture on health ». In : *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences* 365.1554, p. 3083-3097. DOI : [10.1098/rstb.2010.0122](https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0122).
- HOULLIER, F. et J.-B. MERILHOU-GOUDARD (2016). « Les sciences participatives en France : Etats des lieux, bonnes pratiques et recommandations ». In : *Les sciences participatives en France (2016)*.
- IFOAM (2023). *The four principles of organic agriculture*. URL : <https://www.ifoam.bio/why-organic/shaping-agriculture/four-principles-organic> (visité le 05/10/2023).
- IPBES (2019). *Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*. URL : https://www.ipbes.net/sites/default/files/inline/files/ipbes_global_assessment_report_summary_for_policymakers.pdf.
- JODELET, D. (2003). « Aperçus sur les méthodologies qualitatives ». In : *Les méthodes des sciences humaines*, p. 139-162.
- JOSHI, K., K. DEVKOTA, D. HARRIS, N. KHANAL, B. PAUDYAL, A. SAPKOTA et J. WITCOMBE (2012). « Participatory research approaches rapidly improve household food security in Nepal and identify policy changes required for institutionalisation ». In : *Field Crops Research* 131, p. 40-48. DOI : [10.1016/j.fcr.2012.03.001](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.03.001).
- JOSHI, K., M. SUBEDI, R. RANA, K. KADAYAT et B. STHAPIT (1997). « Enhancing on-farm varietal diversity through participatory varietal selection : a case study for Chaite rice in Nepal ». In : *Experimental Agriculture* 33.3, p. 335-344. DOI : [10.1017/S0014479797003049](https://doi.org/10.1017/S0014479797003049).
- KACZMAREK, T., S. CAUSSE, S. D. ABDUL, S. ABRAHAM, E. G. ACHIGAN-DAKO, C. ADJE, J. ADJEBENG-DANQUAH, R. Y. AGYARE, L. AKANVOU, Y. BAKASSO et al. (2023). « Towards conservation and sustainable use of an indigenous crop : A large partnership network enabled the genetic diversity

- assessment of 1539 fonio (*Digitaria exilis*) accessions ». In : *Plants, People, Planet*. DOI : [10.1002/ppp3.10424](https://doi.org/10.1002/ppp3.10424).
- KAHLUOTO, H., J. KASEVA, J. BALEK, J. E. OLESEN, M. RUIZ-RAMOS, A. GOBIN, K. C. KERSEBAUM, J. TAKÁČ, F. RUGET, R. FERRISE et al. (2019). « Decline in climate resilience of European wheat ». In : *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116.1, p. 123-128. DOI : [10.1073/pnas.1804387115](https://doi.org/10.1073/pnas.1804387115).
- KHAN, A. R., I. GOLDRINGER et M. THOMAS (2020). « Management practices and breeding history of varieties strongly determine the fine genetic structure of crop populations : A case study based on European wheat populations ». In : *Sustainability* 12.2, p. 613. DOI : [10.3390/su12020613](https://doi.org/10.3390/su12020613).
- KHOURY, C. K., A. D. BJORKMAN, H. DEMPEWOLF, J. RAMIREZ-VILLEGAS, L. GUARINO, A. JARVIS, L. H. RIESEBERG et P. C. STRUIK (2014). « Increasing homogeneity in global food supplies and the implications for food security ». In : *Proceedings of the national Academy of Sciences* 111.11, p. 4001-4006. DOI : [10.1073/pnas.1313490111](https://doi.org/10.1073/pnas.1313490111).
- KHOURY, C. K., S. BRUSH, D. E. COSTICH, H. A. CURRY, S. de HAAN, J. M. ENGELS, L. GUARINO, S. HOBAN, K. L. MERCER, A. J. MILLER et al. (2022). « Crop genetic erosion : understanding and responding to loss of crop diversity ». In : *New Phytologist* 233.1, p. 84-118. DOI : [10.1111/nph.17733](https://doi.org/10.1111/nph.17733).
- KUHN, L. (2008). « Complexity and educational research : A critical reflection ». In : *Educational Philosophy and Theory* 40.1, p. 177-189. DOI : [10.1111/j.1469-5812.2007.00398.x](https://doi.org/10.1111/j.1469-5812.2007.00398.x).
- KUHN, T. S. (2012). *The Structure of Scientific Revolutions*. Chicago : University of Chicago Press.
- LA VIA CAMPESINA (2023). *La Via Campesina*. URL : <https://viacampesina.org/en/> (visité le 13/10/2023).
- LATOUR, B. (2008). « Pour un dialogue entre science politique et science studies ». In : *Revue française de science politique* 58.4, p. 657-678. DOI : [10.3917/rfsp.584.0657](https://doi.org/10.3917/rfsp.584.0657).
- LE MOIGNE, J. (1995). *Les Épistémologies Constructivistes*. Paris : Presses Universitaires de France. Rapp. tech. ISBN 2-13-046943-3.
- LOUAFI, S., M. THOMAS, E. T. BERTHET, F. PÉLISSIER, K. VAING, F. JANKOWSKI, D. BAZILE, J.-L. PHAM et M. LECLERCQ (2021). « Crop diversity management system commons : Revisiting the role of genebanks in the network of crop diversity actors ». In : *Agronomy* 11.9, p. 1893. DOI : [10.3390/agronomy11091893](https://doi.org/10.3390/agronomy11091893).
- MACAULAY, A. C. (2017). « Participatory research : What is the history ? Has the purpose changed ? » In : *Family Practice* 34.3, p. 256-258. DOI : [10.1093/fampra/cmz117](https://doi.org/10.1093/fampra/cmz117).
- MARRÓN-PONCE, J. A., T. G. SÁNCHEZ-PIMIENTA, S. RODRÍGUEZ-RAMÍREZ, C. BATIS et G. CEDIEL (2022). « Ultra-processed foods consumption reduces dietary diversity and micronutrient intake in the Mexican population ». In : *Journal of Human Nutrition and Dietetics*. DOI : [10.1111/jhn.13003](https://doi.org/10.1111/jhn.13003).
- MAYER, A.-M. (1997). « Historical changes in the mineral content of fruits and vegetables ». In : *British Food Journal* 99.6, p. 207-211. DOI : [10.1108/00070709710181540](https://doi.org/10.1108/00070709710181540).
- MENDRAS, H. (1984). *La fin des paysans*. Actes sud Paris.
- MONTEIRO, C. A. (2009). « Nutrition and health. The issue is not food, nor nutrients, so much as processing ». In : *Public health nutrition* 12.5, p. 729-731. DOI : [10.1017/S1368980009005291](https://doi.org/10.1017/S1368980009005291).
- MORA, C., D. SPIRANDELLI, E. C. FRANKLIN, J. LYNHAM, M. B. KANTAR, W. MILES, C. Z. SMITH, K. FREEL, J. MOY, L. V. LOUIS et al. (2018). « Broad threat to humanity from cumulative climate hazards intensified by greenhouse gas emissions ». In : *Nature Climate Change* 8.12, p. 1062-1071. DOI : [10.1038/s41558-018-0315-6](https://doi.org/10.1038/s41558-018-0315-6).
- MORRISSETTE, J. (2013). « Recherche-action et recherche collaborative : quel rapport aux savoirs et à la production de savoirs ? » In : *Nouvelles pratiques sociales* 25.2, p. 35-49. DOI : [10.7202/1020820ar](https://doi.org/10.7202/1020820ar).
- MOURET, J.-C., F. DREYFUS, D. DESCLAUX, P. MARNOTTE, F. MESLEARD et J.-M. BARBIER (2005). « La construction d'une démarche interdisciplinaire à partir de l'émergence de la céréaliculture biolo-

- gique en Camargue : le projet CEBIOCA ». In : *Actes du séminaire sur les recherches en agriculture biologique-Programme AgriBio de l'INRA 2*, p. 31-41.
- MUGIYO, H., V. G. CHIMONYO, M. SIBANDA, R. KUNZ, C. R. MASEMOLA, A. T. MODI et T. MABHAUDHI (2021). « Evaluation of land suitability methods with reference to neglected and underutilised crop species : A scoping review ». In : *Land* 10.2, p. 125. DOI : [10.3390/land10020125](https://doi.org/10.3390/land10020125).
- MURPHY, K. M., P. G. REEVES et S. S. JONES (2008). « Relationship between yield and mineral nutrient concentrations in historical and modern spring wheat cultivars ». In : *Euphytica* 163, p. 381-390. DOI : [10.1007/s10681-008-9681-x](https://doi.org/10.1007/s10681-008-9681-x).
- NEGIN, J., R. REMANS, S. KARUTI et J. C. FANZO (2009). « Integrating a broader notion of food security and gender empowerment into the African Green Revolution ». In : *Food Security* 1, p. 351-360. DOI : [10.1007/s12571-009-0025-z](https://doi.org/10.1007/s12571-009-0025-z).
- NORDER, L. A., C. LAMINE, S. BELLON et A. BRANDENBURG (2016). « Agroecologia : polissemia, pluralismo e controvérsias ». In : *Ambiente & Sociedade* 19, p. 01-20. DOI : [10.1590/1809-4422ASOC129711V1932016](https://doi.org/10.1590/1809-4422ASOC129711V1932016).
- OLIVIER DE SARDAN, J.-P. (1995a). *Anthropologie et développement. : Essai en socio-anthropologie du changement social*. Karthala Editions.
- (1995b). « La politique du terrain. Sur la production des données en anthropologie ». In : *Enquête. Archives de la revue Enquête* 1, p. 71-109.
- PADULOSI, S., S. BALA RAVI, W. ROJAS, R. VALDIVIA, M. JAGER, V. POLAR et E. GOTOR (2011). « Experiences and lessons learned in the framework of a global UN effort in support of neglected and underutilized species ». In : *II International Symposium on Underutilized Plant Species : Crops for the Future-Beyond Food Security 979*, p. 517-532.
- PADULOSI, S. et I. HOESCHLE-ZELEDON (2004). « Underutilized plant species : what are they ? » In : *LEISA-LEUSDEN- 20*, p. 5-6.
- PADULOSI, S., J. THOMPSON, P. RUDEBJER et al. (2013). *Fighting poverty, hunger and malnutrition with neglected and underutilized species : needs, challenges and the way forward*. Bioersivity International, p. 60.
- PERRET, V. et M. SÉVILLE (2007). *Fondements épistémologiques de la recherche*.
- PERSSON, L., B. M. CARNEY ALMROTH, C. D. COLLINS, S. CORNELL, C. A. de WIT, M. L. DIAMOND, P. FANTKE, M. HASSELLÖV, M. MACLEOD, M. W. RYBERG et al. (2022). « Outside the safe operating space of the planetary boundary for novel entities ». In : *Environmental science & technology* 56.3, p. 1510-1521. DOI : [10.1021/acs.est.1c04158](https://doi.org/10.1021/acs.est.1c04158).
- POPPER, K. (1991). *La connaissance objective*.
- RAVETZ, I. (1999). « What is post-normal science ». In : *Futures-the Journal of Forecasting Planning and Policy* 31.7, p. 647-654.
- RAY, D. K., J. S. GERBER, G. K. MACDONALD et P. C. WEST (2015). « Climate variation explains a third of global crop yield variability ». In : *Nature communications* 6.1, p. 5989. DOI : [10.1038/ncomms6989](https://doi.org/10.1038/ncomms6989).
- REIF, J. C., P. ZHANG, S. DREISIGACKER, M. L. WARBURTON, M. van GINKEL, D. HOISINGTON, M. BOHN et A. E. MELCHINGER (2005). « Wheat genetic diversity trends during domestication and breeding ». In : *Theoretical and Applied Genetics* 110, p. 859-864. DOI : [10.1007/s00122-004-1881-8](https://doi.org/10.1007/s00122-004-1881-8).
- REIJNTJES, C., B. HAVERKORT et A. WATER-BAYER (1992). *Farming for the future*. London : MacMillan Press Ltd.
- RENARD, D. et D. TILMAN (2019). « National food production stabilized by crop diversity ». In : *Nature* 571.7764, p. 257-260. DOI : [10.1038/s41586-019-1316-y](https://doi.org/10.1038/s41586-019-1316-y).
- RIVIÈRE, P. et al. (2013). « Mise en place d'une méthodologie de sélection participative sur le blé tendre en France. » In : *Innovations Agronomiques* 32, p. 427-441.

- RIVIÈRE, P. (2014). « Méthodologie de la sélection décentralisée et participative : un exemple sur le blé tendre ». Thèse de doct. Paris 11.
- ROCKSTRÖM, J., W. STEFFEN, K. NOONE, Å. PERSSON, F. S. CHAPIN III, E. LAMBIN, T. M. LENTON, M. SCHEFFER, C. FOLKE, H. J. SCHELLNHUBER et al. (2009). « Planetary boundaries : exploring the safe operating space for humanity ». In : *Ecology and society* 14.2. URL : <http://www.jstor.org/stable/26268316>.
- ROUGER, B. (2022). « Coconstruction et évaluation de scénarios de gestion dynamique de la biodiversité cultivée dans des réseaux paysans et jardiniers à l'aide de la modélisation participative ; application à deux études de cas sur la tomate et sur le blé tendre en France ». Thèse de doct. Université Paris Cité.
- ROUSSEAU-TRAORÉ, C. et G. KASTLER (2004). « Sauvons la recherche agronomique... d'elle-même ! ou les promesses de la sélection participative. » In : *Nature et Progrès* 48, p. 29-32.
- ROUSSEL, V., L. LEISOVA, F. EXBRAYAT, Z. STEHNO et F. BALFOURIER (2005). « SSR allelic diversity changes in 480 European bread wheat varieties released from 1840 to 2000 ». In : *Theoretical and Applied Genetics* 111, p. 162-170. DOI : [10.1007/s00122-005-2014-8](https://doi.org/10.1007/s00122-005-2014-8).
- ROUSSEL, V., J. KOENIG, M. BECKERT et F. BALFOURIER (2004). « Molecular diversity in French bread wheat accessions related to temporal trends and breeding programmes ». In : *Theoretical and Applied Genetics* 108, p. 920-930. DOI : [10.1007/s00122-003-1502-y](https://doi.org/10.1007/s00122-003-1502-y).
- RSP (2014). *Les Maisons des Semences Paysannes*. URL : <https://ressources.semencespaysannes.org/docs/les-maisons-des-semences-paysannes.pdf>.
- SCHUMACHER, E. F. (1973). « Small is beautiful : economics as if people mattered ». In : *London : Blond & Briggs*.
- SCIENCES CITOYENNES (2023). *Recherche participative*. URL : [%5Curl%7Bhttps://sciencescitoyennes.org/rechercheparticipative%7D](https://sciencescitoyennes.org/rechercheparticipative%7D) (visité le 13/10/2023).
- SEMAE (2023). *Pourquoi une inscription obligatoire des variétés dans un catalogue officiel*. URL : <https://www.semae.fr/decryptage/pourquoi-une-inscription-obligatoire-des-varietes-dans-un-catalogue-officiel/> (visité le 14/10/2023).
- SEVILLA GUZMÁN, E. et G. WOODGATE (2013). « Agroecology : Foundations in agrarian social thought and sociological theory ». In : *Agroecology and Sustainable Food Systems* 37.1, p. 32-44. DOI : [10.1080/10440046.2012.695763](https://doi.org/10.1080/10440046.2012.695763).
- STASSART, P. M., P. BARET, J.-C. GRÉGOIRE, T. HANCE, M. MORMONT, D. REHEUL, D. STILMANT, G. VANLOQUEREN et M. VISSER (2012). « L'agroécologie : trajectoire et potentiel pour une transition vers des systèmes alimentaires durables ». In : *Agroécologie, entre pratiques et sciences sociales*. Sous la dir. de D. VANDAM, M. STREITH, J. NIZET et P. M. STASSART. Educagri.
- STEFFEN, W., W. BROADGATE, L. DEUTSCH, O. GAFFNEY et C. LUDWIG (2015). « The trajectory of the Anthropocene : the great acceleration ». In : *The Anthropocene Review* 2.1, p. 81-98. DOI : [10.1177/205301961456478](https://doi.org/10.1177/205301961456478).
- STEFFEN, W., J. ROCKSTRÖM, K. RICHARDSON, T. M. LENTON, C. FOLKE, D. LIVERMAN, C. P. SUMMERHAYES, A. D. BARNOSKY, S. E. CORNELL, M. CRUCIFIX et al. (2018). « Trajectories of the Earth System in the Anthropocene ». In : *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115.33, p. 8252-8259. DOI : [10.1073/pnas.1810141115](https://doi.org/10.1073/pnas.1810141115).
- STENGERS, I. (1997). *Sciences et pouvoirs. Faut-il en avoir peur ?* Labor.
- (2000). « Les sciences et la lutte contre l'opinion ». In : *Revue d'Etudes et de Critique Sociale* 1, p. 33-45. DOI : [10.3917/naqd.013.0033](https://doi.org/10.3917/naqd.013.0033).
- STORUP, B., G. MILLOT et C. NEUBAUER (2013). « La recherche participative comme mode de production de savoirs ». In : *Un état des lieux des pratiques en France, Paris : Fondation Sciences Citoyennes*.

- THIOLLENT, M. (2011). « Action research and participatory research : An overview ». In : *International Journal of Action Research* 7.2, p. 160-174.
- THOMAS, M. (2011). « Gestion dynamique à la ferme de l'agrobiodiversité : relation entre la structure des populations de blé tendre et les pratiques humaines ». Thèse de doct. Paris 7.
- THOMAS, M., J. C. DAWSON, I. GOLDRINGER et C. BONNEUIL (2011). « Seed exchanges, a key to analyze crop diversity dynamics in farmer-led on-farm conservation ». In : DOI : [10.1007/s10722-011-9662-0](https://doi.org/10.1007/s10722-011-9662-0).
- TICHIT, M., S. BELON, M. DECONCHAT, C. AGREIL, S. AVIRON, J. BARBIER, T. BONNEAU, C. DEVERRE, D. MAGDA, M. MEURET et al. (2010). *L'agroécologie en action*. Rapport d'Assemblée Générale. Cap Esterel.
- TILMAN, D., C. BALZER, J. HILL et B. L. BEFORT (2011). « Global food demand and the sustainable intensification of agriculture ». In : *Proceedings of the national academy of sciences* 108.50, p. 20260-20264. DOI : [10.1073/pnas.1116437108](https://doi.org/10.1073/pnas.1116437108).
- TUFAN, H. A., S. GRANDO et C. MEOLA (2018). *State of the knowledge for gender in breeding : case studies for practitioners*. Article de travail. Lima, Peru.
- TURBET-DELOF, M. (in prep). « Mieux évaluer les performances des blés paysans par une caractérisation de l'environnement de culture et des situations agricoles spécifiques ». Thèse de doct. Université Paris-Saclay.
- VAN DER PLOEG, J. D. (2008). *The New Peasantries. Struggles for Autonomy and Sustainability in an Era of Empire and Globalization Earthscan*. Sterling, London.
- VAN FRANK, G. (2018). « Gestion participative de la diversité cultivée et création de mélanges diversifiés de blé tendre à la ferme ». Thèse de doct. Université Paris-Saclay.
- VAUGHN, L. M. et F. JACQUEZ (2020). « Participatory research methods—Choice points in the research process ». In : *Journal of Participatory Research Methods* 1.1. DOI : [10.35844/001c.13244](https://doi.org/10.35844/001c.13244).
- VINDRAS-FOUILLET, C. (2014). « Evaluation de la qualité sensorielle de produits pour la sélection participative en agriculture biologique : cas du blé et du brocoli ». Thèse de doct.
- WANG-ERLANDSSON, L., A. TOBIAN, R. J. van der ENT, I. FETZER, S. te WIERIK, M. PORKKA, A. STAAL, F. JARAMILLO, H. DAHLMANN, C. SINGH et al. (2022). « A planetary boundary for green water ». In : *Nature Reviews Earth & Environment* 3.6, p. 380-392. DOI : [10.1038/s43017-022-00287-8](https://doi.org/10.1038/s43017-022-00287-8).
- WEBER, M. (1919). *Le savant et le politique*. PEF.
- WEZEL, A., S. BELLON, T. DORÉ, C. FRANCIS, D. VALLOD et C. DAVID (2009). « Agroecology as a science, a movement and a practice. A review ». In : *Agronomy for sustainable development* 29, p. 503-515. DOI : [10.1051/agro/2009004](https://doi.org/10.1051/agro/2009004).
- WOOLGAR, S. et B. LATOUR (1988). *La vie de laboratoire : la production des faits scientifiques*. Editions La Découverte.
- ZAMPIERI, M., C. J. WEISSTEINER, B. GRIZZETTI, A. TORETI, M. van den BERG et F. DENTENER (2020). « Estimating resilience of crop production systems : From theory to practice ». In : *Science of the Total Environment* 735, p. 139378. DOI : [10.1016/j.scitotenv.2020.139378](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139378).

Les blés vêtus

Contenu

2.1	Introduction	56
2.2	Définition	56
2.3	Génétique et phylogénie	58
2.4	Morphologie	60
2.5	Histoire et culture actuelle	61
2.6	Caractéristiques agronomiques	66
2.7	Caractéristiques nutritionnelles	70
2.8	Le cas du gluten	73
2.9	Conclusion	77
2.10	Bibliographie	79



Amidonnier de la Forêt Noire.

2.1 Introduction

Ce chapitre a pour but de présenter en détail les trois sous-espèces de blé sur lesquelles porte la thèse, à savoir l’engrain (En), l’amidonnier (Am) et le grand épeautre (GE). Il se présente comme un état de l’art non exhaustif de la littérature scientifique.

Au-delà de cette introduction des objets d’étude du programme de recherche, ce chapitre cherche à répondre à certaines interrogations qui ont émergé aux cours des échanges avec les différent.e.s partenaires. Il aborde ainsi plusieurs aspects de ces sous-espèces de blé, qui vont au-delà de ceux traités par la thèse. De plus, cet état de l’art aspire à servir de base pour orienter de nouvelles réflexions au sein du projet de recherche, en s’appuyant sur les connaissances scientifiques déjà établies.

Des reviews de la littérature sur l’Am (ZAHARIEVA et al. 2010) et sur l’En (ZAHARIEVA et MONNEVEUX 2014), et un article exhaustif sur le GE (CAMPBELL 2010) ont été préalablement publiés. Dans ce chapitre, je m’appuie principalement sur les informations contenues dans ces travaux antérieurs, que j’enrichis avec des éléments provenant d’autres articles scientifiques. L’objectif n’est pas de répéter le travail effectué par ces auteur.e.s, mais plutôt de le rendre plus accessible à une diversité d’acteur.trice.s.

La première section de ce chapitre se consacre à la définition des trois sous-espèces de blé étudiées. Ensuite, il couvre des aspects généraux de ces ressources, tels que leur génétique, leur morphologique, leur histoire, leur culture actuelle, ainsi que la diversité génétique intra-spécifique. Enfin, il s’intéresse aux deux principales raisons de leur regain d’intérêt, à savoir leurs caractéristiques agronomiques et leur composition en éléments d’intérêt nutritionnel.

2.2 Définition

Le terme « blé » fait référence à toutes les espèces du genre *Triticum*. Il comprend donc des espèces et sous-espèces cultivées et des espèces et sous-espèces sauvages qui leur sont apparentées (FELDMAN et al. 1995). Les espèces comprises dans le terme « blé » font partie de la famille botanique des graminées (*Poaceae*). Il s’agit de plantes annuelles et à reproduction autogame. Parmi les sous-espèces cultivées, le blé tendre (*T. aestivum* L. ssp. *aestivum*, BT) et le blé dur (*T. turgidum* L. (Thell.) ssp. *durum* (Desf.) Husn., BD) sont les plus répandues actuellement. Il existe néanmoins d’autres sous-espèces moins connues telles que l’engrain (*T. monococcum* L.

subsp. *monococcum*, En), l'amidonnier (*T. turgidum* L. (Thell.) ssp. *dicoccon* (Schrank) Thell., Am) et le grand épeautre (*T. aestivum* L. ssp. *spelta* (L.) Thell., GE).

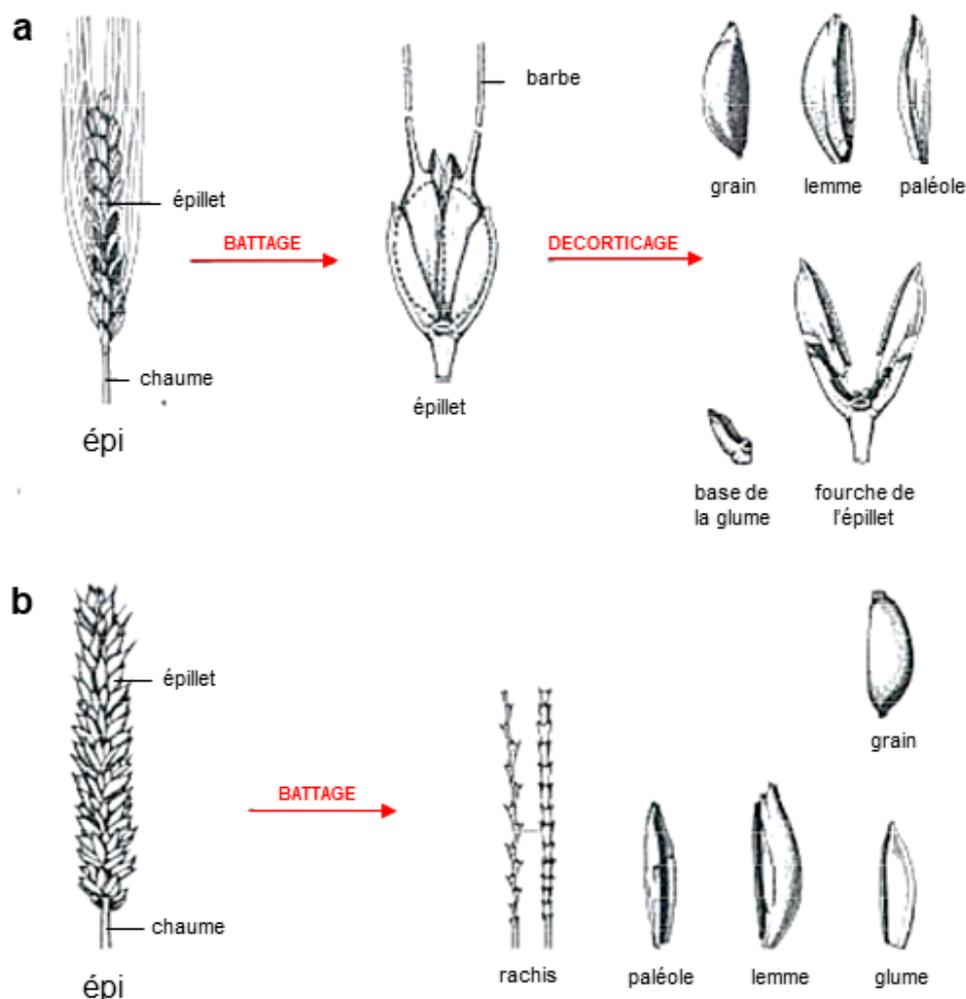


FIGURE 2.1 – Anatomie des épis de blés vêtus (a) et nus (b) et résultats des étapes de battage et de décortiquage. Pour les blés vêtus (a), le battage permet d'obtenir des épillets. Une étape de décortiquage est ensuite nécessaire pour extraire le grain des enveloppes coriaces. Pour les blés nus (b), le battage permet directement d'extraire les grains. Le rachis ressort entier de l'opération. Figure modifiée de NESBITT 1996.

On appelle « blés vêtus » (« hulled wheats » en anglais) toutes les espèces de blé pour lesquelles on obtient des épillets (et non des grains nus) après l'opération de battage (NESBITT 1996). Ces épillets sont constitués d'un segment de rachis, de glumes coriaces et contiennent un seul ou plusieurs grain(s). L'aspect vêtu d'une sous-espèce de blé résulte ainsi de deux caractères : un rachis semi-cassant (au niveau des entre-noeuds) et des glumes solides. En revanche, dans le cas des blés nus, le rachis ressort entier de l'opération de battage. Ce sont les glumes qui se cassent, libérant les grains (NESBITT 1996). Pour obtenir des grains à partir de blés vêtus, une étape de décortiquage est donc nécessaire (figure 2.1).

Il existe plusieurs sous-espèces de blés vêtus. Dans cette thèse, je ne parlerai que des trois les plus connues : l'En, l'Am et le GE. Ces trois sous-espèces sont des NUS : autrefois cultures vivrières, elles sont aujourd'hui très peu cultivées, consommées et étudiées (PADULOSI 1996). Néanmoins, elles connaissent actuellement un regain d'intérêt majeur en raison de leurs caractéristiques agronomiques et de leurs propriétés nutritionnelles.

2.3 Génétique et phylogénie

Les botanistes ont proposé une classification des blés cultivés et de leurs apparentés sauvages, avec trois groupes principaux basés sur la ploïdie (le nombre de chromosomes). On distingue les blés diploïdes, les blés tétraploïdes et les blés hexaploïdes (BONJEAN 2001). Les blés diploïdes ont 14 chromosomes ($2n = 2x = 14$), les blés tétraploïdes en ont 28 ($2n = 4x = 28$) et les blés hexaploïdes ont 42 chromosomes ($2n = 6x = 42$). Les trois principales sous-espèces de blés vêtus ont des ploïdies différentes : l'En est diploïde, l'Am est tétraploïde (tout comme le blé dur, le blé poulard, le blé de Pologne, le blé de Perse et le blé Khorasan) et le GE est hexaploïde (tout comme le BT, le blé hérisson et le blé compact). Une phylogénie simplifiée des blés est présentée dans la figure 2.2.

Il est intéressant de noter que l'origine génétique du caractère « vêtu » diffère selon les sous-espèces de blé qui le présentent (CHARMET 2011). Les principaux gènes associés à ce trait se trouvent à des loci non orthologues chez l'En (*soft glume* ; *sog*) et l'Am (*tenacious glume* ; *Tg*). Ainsi, chez ces deux sous-espèces, l'aspect « grains nus » est le résultat d'une évolution convergente. Pour le GE, le caractère vêtu dépend de deux gènes : *Tg* et *Q*. Toutes les sous-espèces de blé hexaploïdes vêtues portent les allèles récessifs de ces deux gènes. Le gène *Q* a des effets pléiotropiques sur la forme de l'épi et sur la ténacité des glumes, et il est présent chez les blés tétraploïdes et hexaploïdes. L'hypothèse la plus probable est que l'allèle récessif *q*, présent chez le GE, aurait émergé après l'apparition des premiers blés hexaploïdes, qui étaient à grains nus (CHARMET 2011 ; CAMPBELL 2010).

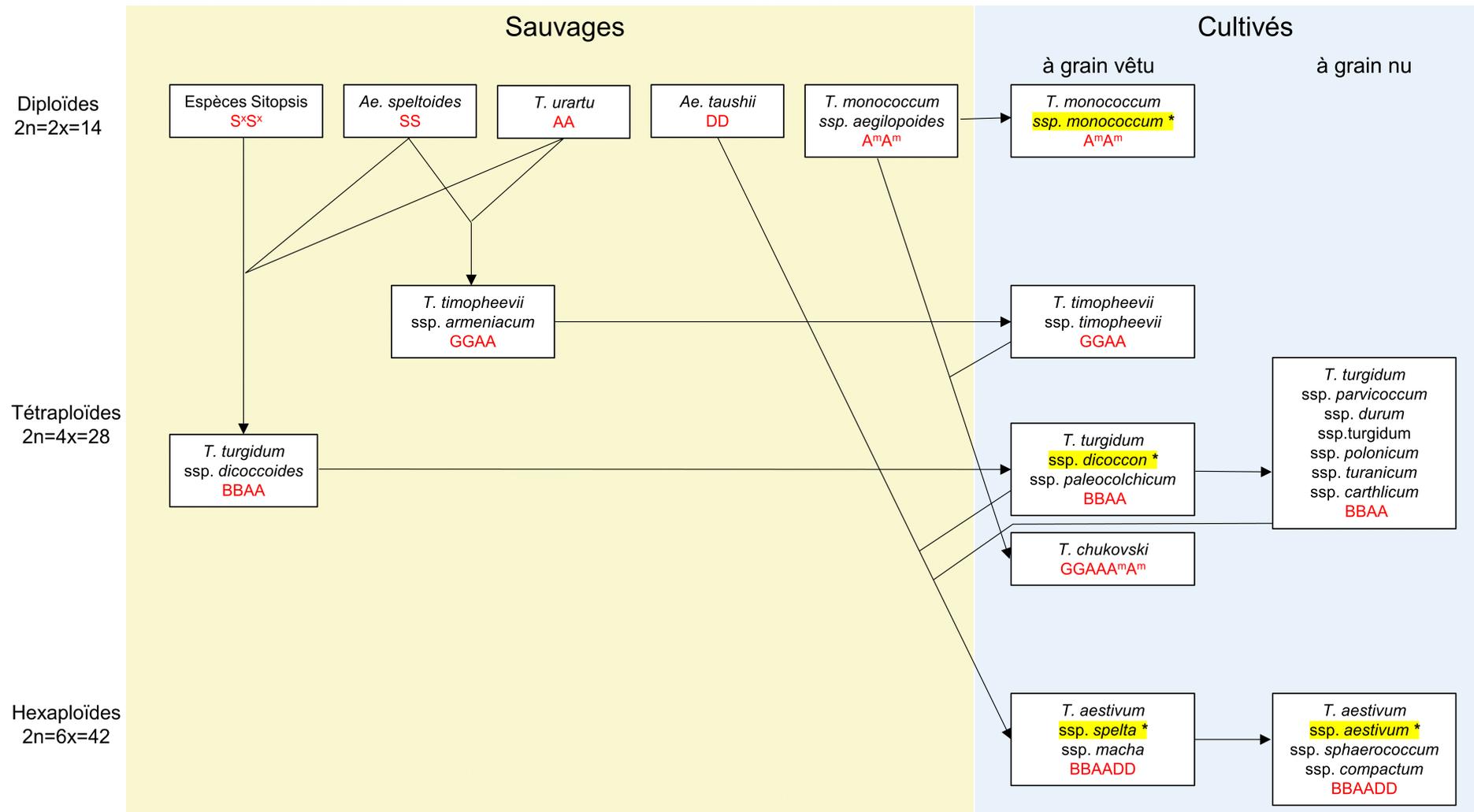


FIGURE 2.2 – Phylogénie du genre *Triticum* d'après FELDMAN et al. 1995. Les sous-espèces surlignées en jaune et suivies d'un astérisque (*) sont celles étudiées dans cette thèse. Figure modifiée de BONJEAN 2001.

2.4 Morphologie

En ce qui concerne la morphologie, l'En se caractérise par une hauteur relativement élevée, atteignant entre 60 et 130 cm, et il forme un grand nombre de talles. ZAHARIEVA et MONNEVEUX 2014 soulignent également que cette sous-espèce possède des tiges à parois fines, creuses et flexibles, ce qui, selon certain.e.s auteur.e.s, confère une certaine résistance à la verse. Les épis de l'En sont plutôt petits (entre 6 et 12 cm de long) et le plus souvent barbus. Ils sont très compacts, fins et denses (autour de 20 à 30 épillets par épi). Les épillets ont une forme oblongue-ovée, et contiennent généralement un seul grain. Les grains sont petits (15 à 35 mg), oblongs, plutôt plats et vitreux (ZAHARIEVA et MONNEVEUX 2014).

Quant à l'Am, sa hauteur varie grandement, s'étendant de 36 à 150 cm (ZAHARIEVA et al. 2010). Les tiges ne sont pas complètement creuses, mais partiellement remplies par de la moelle. Comme pour l'En, les épis de l'Am sont denses, compacts, fins et le plus souvent barbus. Les épillets ont une forme aplatie sur l'intérieur et contiennent généralement deux grains. Les grains sont longs et allongés, pointus aux deux extrémités et présentent généralement une couleur blanche ou rouge (ZAHARIEVA et al. 2010).

Finalement, le GE atteint une hauteur d'environ 90 à 130 cm (CAMPBELL 2010). Il a des épis plus longs mais moins denses que ceux du BT et des autres blés vêtus, bien que le nombre d'épillets par épi soit équivalent à celui du BT. Contrairement à l'En et à l'Am, les épis sont généralement dépourvus de barbes. Enfin, les grains du GE sont de grande taille et allongés (CAMPBELL 2010). Il est intéressant de noter que les trois espèces de blé vêtues mentionnées ici ont un péricarpe plus fin que les blés nus (NESBITT 1996; ZAHARIEVA et MONNEVEUX 2014). Bien sûr, il existe une variabilité morphologique importante au sein de chaque sous-espèce (ZAHARIEVA et MONNEVEUX 2014).

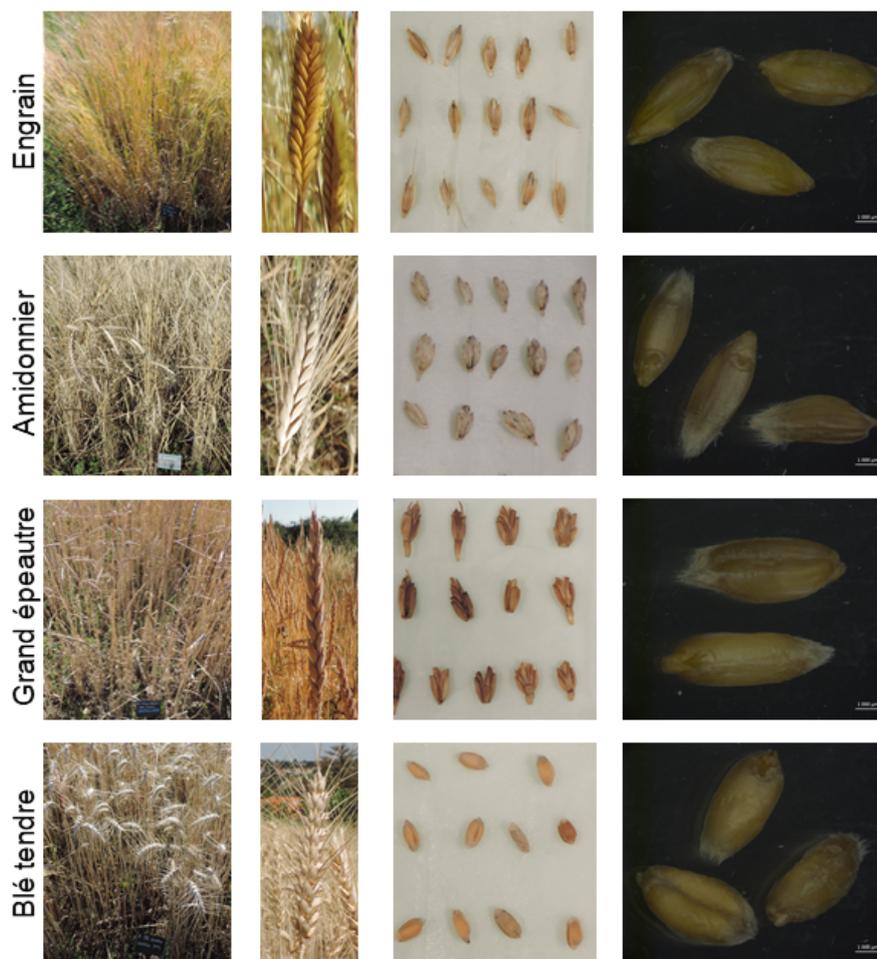


FIGURE 2.3 – Morphologie des blés vêtus et du blé tendre. Pour chaque sous-espèce, des photos des pieds au champ, des épis au champ, des épillets ou grains nus après battage et des grains nus (échelle = 1000 μm sont montrées).

2.5 Histoire et culture actuelle

2.5.1 Domestication

L'En et l'Am sont les premières sous-espèces de blé qui ont été domestiquées au début du Néolithique (entre 8900 et 7000 av. JC.) (BONJEAN 2001), dans les territoires actuels de la Syrie et de la Turquie (LEV-YADUN et al. 2000). L'En a été domestiqué à partir d'une sous-espèce de *Triticum* sauvage : *T. monococcum* L. ssp *aegilopoides* (Link) Thell. (BONJEAN 2001). L'ancêtre sauvage tétraploïde de l'Am, *T. turgidum dicoccon* ssp. *dicoccoïdes* (Körn. Ex Asch & Graebn.) Thell., serait issu d'une hybridation dans un environnement naturel de *T. urartu* Tum. Ex Gand. et d'une espèce d'*Aegilops* diploïde. Quant aux blés hexaploïdes, ils sont issus de plusieurs événements d'hybridation entre espèces de blés tétraploïdes cultivées et espèces

d'*Aegilops* sauvages diploïdes (*Aegilops tauschii* pour l'ancêtre hexaploïde du GE et du BT) (BONJEAN 2001). Ainsi, les blés tétra et hexaploïdes sont issus d'hybridations spontanées suivies de doublements chromosomiques. Concernant les blés hexaploïdes, il est actuellement supposé qu'au moins deux croisements indépendants entre différents blés tétraploïdes et formes d'*Ae. tauschii* auraient eu lieu, en Iran et en Turquie (GILES et BROWN 2006). Un troisième événement d'hybridation aurait pu également avoir eu lieu, en dehors du Croissant Fertile (SALAMINI et al. 2002), entre l'Am et un blé hexaploïde (ALVAREZ 2021).

Dès le début de la culture des blés, certains traits ont été sélectionnés, témoignant du processus de domestication. Parmi ces traits, on retrouve la solidité du rachis, qui permet de récolter des épis plutôt que des épillets, et qui réduit les pertes à la récolte liées au détachement des épillets. Ce trait est essentiellement déterminé par le gène (*Brittle rachis*) (CHARMET 2011). Un autre trait important est la synchronisation de l'arrivée à maturité des grains. Dans un deuxième temps, la sélection a porté sur les mutants à grains nus, ce qui facilite considérablement le processus de battage (BONJEAN 2001).

2.5.2 Diffusion et déclin

Après leur domestication, les sous-espèces de blé ont commencé à se répandre dans le Nord-Ouest et le Nord du Levant (Proche-Orient). Dès les années -8000, elles ont diffusé vers l'Europe depuis le territoire actuel de la Turquie, en passant par la Grèce. Deux principales routes de d'expansion depuis la Grèce ont été identifiées : la première se dirigeant vers le nord du bassin méditerranéen, et la deuxième traversant les balkans par la vallée du Danube jusque la vallée du Rhin. Les blés se sont alors étendus dans le nord, le centre et l'ouest de l'Europe, qu'ils ont gagné autour des années -5000. Les blés auraient également rejoint l'Europe centrale par une route secondaire passant par le Caucase et le sud de la Russie. Leur diffusion a aussi eu lieu en Asie (ils ont atteint l'ouest du Pakistan en -6500 et l'est de la Chine vers -3500) et en Afrique (ils ont gagné l'Égypte en -6000). Ils gagnent finalement l'Amérique des siècles plus tard, lors de la colonisation du continent (BONJEAN 2001).

Les premières sous-espèces de blé qui ont diffusé dans l'ouest de l'Europe étaient l'Am et l'En (en mélange, avec quelques blés nus tétra et hexaploïdes en quantités très minoritaires) (BONJEAN 2001). Malgré leur importance majeure pendant des millénaires, ces deux sous-espèces ont connu un déclin important, et ont même totalement disparu de nombreuses régions. Le déclin de l'Am dans la région du Levant commence en -3000, du fait de son remplacement par de l'orge

(ZAHARIEVA et al. 2010). Néanmoins, c'est lors du 1^{er} millénaire, et surtout pendant le Moyen-Age que ces blés connaissent une érosion importante, à cause de leur remplacement par des espèces à grains nus (ZAHARIEVA et al. 2010). Dans leur review sur l'En, ZAHARIEVA et MONNEVEUX 2014 évoquent que cette sous-espèce est restée en culture essentiellement dans des zones montagneuses jusqu'au début du XX^e siècle. On trouvait alors de l'En dans certaines régions du Moyen-Orient, de la Turquie, du Caucase, d'Europe et Afrique du Nord.

Le cas du GE est un peu différent. Cette sous-espèce aurait connu son apogée lors de l'âge de Fer (750-150 av. J.-C.), dans plusieurs régions d'Europe (ALVAREZ 2021). Elle serait devenue la sous-espèce de blé dominante au sud de l'Allemagne et en Suisse, et une culture d'importance majeure au Royaume-Uni et en Espagne (CUBADDA et MARCONI 2002). Le GE a été cultivé sur des surfaces conséquentes en Europe jusqu'au XIX^e siècle (ALVAREZ 2021 ; HARLAN 1981), en particulier par les alamans (GRADMANN 1901).

Deux raisons majeures expliquent le déclin des sous-espèces vêtues. D'une part, le caractère vêtu rend l'obtention de grains prêts à la consommation ou à la transformation plus difficile. D'autre part, leurs rendements sont inférieurs à ceux des blés nus (PADULOSI 1996). Cependant, dans certaines régions comme le Proche-Orient, le déclin des sous-espèces vêtues ne peut pas être attribué uniquement à l'introduction de sous-espèces à grain nu, puisque ces deux formes ont coexisté pendant des millénaires (ZAHARIEVA et al. 2010). Enfin, il convient de souligner que les sous-espèces de blé vêtues ayant connu un important déclin avant l'industrialisation des systèmes agro-alimentaires, elles n'ont pas (ou peu¹) fait l'objet d'une sélection professionnelle.

2.5.3 Culture actuelle

Bien qu'il existe un nombre conséquent de sous-espèces de blé, seules deux d'entre elles, le blé dur et surtout le BT sont actuellement cultivées à grande échelle. La FAO estime à 218 millions d'hectares en 2020 et à 221 millions d'hectares en 2021 les surfaces mondiales cultivées en blé (FAOSTAT 2015), dont 93% seraient occupées par du BT (MARTÍNEZ-MORENO et al. 2022). En France, l'organisme de statistiques agricoles Agreste estimait en février 2023 un assolement en BT de 4,76 Mha, et en blé dur de 233 000 ha (AGRESTE 2023).

Il est très difficile de trouver des statistiques concernant la production d'autres sous-espèces de blé. Aujourd'hui, l'En est toujours cultivé sur des petites surfaces en Turquie, dans les Balkans,

1. Voir la section suivante (2.5.3) qui évoque des programmes de sélection récents sur ces sous-espèces.

en Europe centrale, dans le Sud-ouest de l'Europe et au Maroc (ZAHARIEVA et MONNEVEUX 2014). En France, la culture de l'En (plus connu sous le nom de « petit épeautre ») est essentiellement concentrée en Haute-Provence. En 2013, 220 ha étaient cultivées en Haute-Provence sous l'indication géographique protégée « Petit Epeautre de Haute-Provence » (CHABROL et al. 2013).

Par rapport à l'Am, il a été estimé dans les années 1990 que cette sous-espèce occupait 1% des surfaces cultivées en blé dans le monde (STALLKNECHT et al. 1996). Cette céréale conserve une importance non négligeable en Inde (2% de la culture de blé début années 2000), en Ethiopie (7% de la culture de blé dans les années 1990) et au Yémen. La présence d'Am au XIX^e siècle a aussi été documentée en Turquie, dans l'ex-Yougoslavie, au Sud-Ouest et au centre de l'Europe, et dans certains états du « midwest » et de l'ouest des Etats-Unis (ZAHARIEVA et al. 2010). Dans les années 1980, alors qu'on le croyait disparu d'Italie, la présence d'Am a été documentée dans le sud du pays. Sa redécouverte a conduit à un regain d'intérêt pour cette céréale (appelée « farro medio ») et à une relance de sa production. Dans les années 2000, on estimait que l'Am était cultivé sur une surface de 2000 ha en Italie (ZAHARIEVA et al. 2010). En France, des variétés de pays étaient cultivées jusqu'au milieu du XX^e siècle dans des régions montagneuses. Il s'agissait essentiellement de la variété « Am blanc » (aussi appelée « épeautre de Mars », « épeautre du Cap d'hiver », « Am de Tartarie ») et la variété « Am roux » (ou « Am de Tarascon ») (ZAHARIEVA et al. 2010).

La culture du GE est aujourd'hui également restreinte à des zones marginales, souvent caractérisées par des sols pauvres. En Europe, cette sous-espèce est actuellement essentiellement cultivée en Europe de l'Est, en Allemagne, en Belgique, en Suisse, en Slovénie, dans les Asturies (Espagne) et en Italie. Cette céréale est également cultivée dans certains états des Etats-Unis, dont l'Ohio (CAMPBELL 2010; ALVAREZ 2021). Récemment, les surfaces cultivées de GE ont augmenté suite aux programmes de sélection mis en place dès les années 1970 aux Etat-Unis, en Suisse, et en Belgique (CAMPBELL 2010). Deux des plus grands projets ont été menés en Suisse² et à la Station d'amélioration des plantes de Gembloux, en Belgique (CAMPBELL 2010). Ces initiatives sont à l'origine de multiples variétés inscrites au catalogue européen, dont certaines sont issues d'hybridations avec du BT. Aujourd'hui, la culture du GE occupe environ 100 000 ha en Allemagne, 13 000 en Autriche et 5 500 en Suisse (ALVAREZ 2021).

2. Les programmes d'amélioration en Suisse ont beaucoup utilisé la variété *Oberkulmer Rotkorn* dans les croisements (CAMPBELL 2010).

Dans les années 1990, des programmes de sélection sur l'En et l'Am ont également vu le jour (ZAHARIEVA et al. 2010; ZAHARIEVA et MONNEVEUX 2014). L'article de DE VITA et al. 2007 présente une évaluation de variétés d'Am et de GE développées grâce à des programmes de sélection. Parmi ces variétés, certaines résultent de croisements (permettant l'introgession de gènes) avec le blé dur pour l'Am et avec le BT pour le GE. Néanmoins, la plupart des projets évoqués par ZAHARIEVA et al. 2010; ZAHARIEVA et MONNEVEUX 2014 se distancient des programmes de sélection classiques. Par exemple, un des principaux programmes de sélection sur l'Am résulte d'une collaboration entre une coopérative agricole et un centre de recherche, l'Istituto di Genetica Vegetale, dans la région de Molise en Italie (PERRINO et al. 1993).

Encadré 2.5.1 - Les usages des blés vêtus

Différents usages des blés vêtus sont rapportés dans la littérature. L'En, l'Am et le GE peuvent être utilisés comme fourrage ou pour l'alimentation humaine (ZAHARIEVA et al. 2010; ZAHARIEVA et MONNEVEUX 2014; CAMPBELL 2010). En tant que fourrage, les épillets non décortiqués et partiellement broyés sont parfois directement donnés aux animaux (ZAHARIEVA et MONNEVEUX 2014). Pour l'alimentation humaine, l'En et l'Am ont couramment été consommés sous forme de pain, de porridge, de gruau, de grains entiers dans des soupes, de grains concassés et utilisés pour fabriquer de la bière (ZAHARIEVA et MONNEVEUX 2014; ZAHARIEVA et al. 2010). Dans les Asturies, l'Am sert aussi à fabriquer des aliments pour bébés (ZAHARIEVA et al. 2010). En Europe, le GE était essentiellement transformé en pain (CAMPBELL 2010). Récemment, de nouveaux usages sont apparus pour ces trois céréales, comme la transformation en pâtes alimentaires (Am et GE), en céréales pour le petit déjeuner (GE), en crackers ou dans la biscuiterie (surtout GE) (CAMPBELL 2010; ZAHARIEVA et al. 2010). Enfin, l'usage des chaumes en vannerie ou dans la construction (paillage) a été documenté pour l'En (ZAHARIEVA et MONNEVEUX 2014).

2.5.4 Diversité génétique

Un nombre croissant d'études porte sur l'évaluation de la diversité génétique de cultures négligées, dont certaines sous-espèces de blé. En général, ces recherches visent à documenter la diversité présente au sein des collections. Par exemple, plusieurs travaux ont montré l'importante diversité génétique parmi les accessions d'En (ZAHARIEVA et MONNEVEUX 2014; DESHEVA et al. 2020; DESHEVA et KYOSEV 2016), d'Am (ZAHARIEVA et al. 2010; DEMIREL 2020) et de GE (BERTIN et al. 2004; CABALLERO et al. 2004; GULYÁS et al. 2012; AN et al. 2005). Cette diversité est certainement due au fait que les variétés de ces sous-espèces ont été cultivées dans des conditions diverses et contrastées, sans avoir fait l'objet d'une sélection moderne, qui privilégie un nombre restreint de critères.

Cependant, ces études se concentrent souvent sur un faible nombre d'accessions (ZAHARIEVA et MONNEVEUX 2014), parfois contenues dans des collections régionales. Par exemple, les travaux de DESHEVA et al. 2020 et de DESHEVA et KYOSEV 2016 portent sur les accessions d'En dans la banque de graines de Bulgarie, tandis que ceux de CABALLERO et al. 2004 et ALVAREZ 2021 se focalisent sur les accessions espagnoles. De plus, certaines études apportent des résultats contrastés, révélant des niveaux de diversité faibles. C'est notamment le cas de travaux sur des variétés d'Am en Inde (SALUNKHE et al. 2013) et en Ethiopie (ALAYACHEW et GELETU 2017). En outre, plusieurs auteur.e.s soulignent l'importance de la diversité intra-variétale par rapport à la diversité inter-variétale (BARCACCIA et al. 2002; DEMIREL 2020; CABALLERO et al. 2004).

Certaines études ont également été menées sur la diversité des variétés en culture, et ont identifié une diversité importante parmi des variétés d'En en Turquie (ZOMMITA et al. 2023), d'Am en Italie (BARCACCIA et al. 2002), et de GE en Espagne (ALVAREZ 2021). Cependant, ALVAREZ 2021 évoque le risque d'érosion génétique au champ lié à la potentielle disparition de traits non désirés par les cultivateur.trice.s, ainsi que, pour le GE, par l'expansion de variétés issues de croisements avec du BT. Enfin, il est intéressant de souligner la diversité de méthodes employées pour caractériser la diversité génétique. Certaines études privilégient des approches agro-morphologiques, tandis que d'autres recourent à des techniques moléculaires, incluant des analyses génétiques ainsi que l'étude d'autres composantes, notamment les protéines de stockage (protéines du gluten).

2.6 Caractéristiques agronomiques

Une des principales raisons pour lesquelles les blés vêtus connaissent un regain d'intérêt est leur prétendue robustesse agronomique et leur adaptation à des pratiques de culture biologiques. Dans cette section, je reviens brièvement sur les connaissances scientifiques au sujet des caractéristiques agronomiques des blés vêtus.

2.6.1 Résistance à des stress abiotiques

Les trois sous-espèces de blés vêtus sont connues pour leur adaptation aux sols pauvres (ZAHARIEVA et al. 2010; ZAHARIEVA et MONNEVEUX 2014; CUBADDA et MARCONI 2002). Après avoir été remplacés par des sous-espèces à grains nus, les blés vêtus ont principalement été cultivés dans des zones marginales, où les conditions ne sont pas favorables à la culture du BT ou

du blé dur. L'En, l'Am et le GE auraient ainsi évolué dans des environnements peu favorables, auxquels ils seraient actuellement adaptés.

En particulier, l'En serait bien adapté aux climats de montagne, caractérisés par des sols pauvres et par une pluviométrie élevée (ZAHARIEVA et MONNEVEUX 2014). Certaines variétés asiatiques d'En tolèrent des conditions de sécheresse, mais la plupart des variétés à l'échelle mondiale sont sensibles au stress hydrique, surtout après la phase d'épiaison. Une étude menée par ADU et al. 2011 a montré qu'en situation de stress hydrique, l'En présente une sénescence des feuilles drapeau plus rapide que les autres sous-espèces de blés vêtus.

En revanche, le GE a été décrit comme étant résistant à la sécheresse (CUBADDA et MARCONI 2002). De plus, bien qu'il existe très peu d'études sur la résistance des blés vêtus aux toxicités du sol, il a été montré que l'En et le GE sont sensibles à des niveaux élevés de salinité (ZAHARIEVA et MONNEVEUX 2014; CAMPBELL 2010). Enfin, il convient de noter que ces caractéristiques agronomiques peuvent varier fortement entre les différentes variétés de chaque sous-espèce.

2.6.2 Résistance à des stress biotiques

Les blés vêtus se distingueraient également du BT et du blé dur par leur résistance à différents stress biotiques. Les trois sous-espèces seraient particulièrement résistantes à plusieurs types de rouille et au mildiou (ZAHARIEVA et MONNEVEUX 2014; ZAHARIEVA et al. 2010; CAMPBELL 2010; ALVAREZ 2021). Selon CAMPBELL 2010, cette résistance chez le GE n'est pas uniquement attribuable à la présence de glumes, les grains nus de GE étant également plus résistants que ceux de BT. Les articles de review de ZAHARIEVA et MONNEVEUX 2014 et de ZAHARIEVA et al. 2010 évoquent également la résistance de l'En et de certaines variétés d'Am à d'autres maladies fongiques telles que l'oïdium pour l'En et la maladie du « charbon nu du blé », la fusariose et la septoriose pour l'Am. Ces travaux font également état d'une tolérance élevée des sous-espèces diploïdes et tétraploïdes aux attaques de pucerons, de la mouche de Hesse, et pour l'En, aux nématodes et aux drosophiles. Néanmoins, ces résistances restent controversées. Par exemple, l'article plus récent de COSTANZO et al. 2019 témoigne d'une forte sensibilité de l'Am par rapport aux maladies foliaires, dont la rouille et la septoriose. De plus, ZAHARIEVA et al. 2010 soulignent que, en particulier pour l'Am, il existe une grande variabilité au sein d'une même sous-espèce.

2.6.3 Cycle de développement

Les cycles de développement des blés vêtus peuvent différer de ceux du BT, offrant ainsi une adaptation à certaines conditions environnementales ou à des pratiques culturales spécifiques. Par exemple, l'En est caractérisé par un cycle de développement plus long que celui du BT (ZAHARIEVA et MONNEVEUX 2014). Une arrivée à maturité plus tardive que celle du BT a également été documentée pour le GE dans l'Ohio (CAMPBELL 2010). En ce qui concerne l'Am, Nikolaï Vavilov a identifié des variétés à maturation très précoce ainsi que des variétés relativement tardives, notamment celles originaires des régions montagneuses d'Europe occidentale (ZAHARIEVA et al. 2010). En raison de leur cycle de développement court, la plupart des variétés d'Am sont plus adaptées à une culture de printemps (ZAHARIEVA et al. 2010). Il existe également des variétés d'En et de GE plus adaptées à des cultures de printemps (ZAHARIEVA et MONNEVEUX 2014 ; KONVALINA et al. 2010).

2.6.4 Rendement

Le rendement inférieur des blés vêtus par rapport à celui des sous-espèces à grains nus est l'une des principales limites à leur réintégration dans les systèmes agricole (DE VITA et al. 2007). De plus, il est important de noter que le rendement est très variable en fonction des conditions environnementales (LONGIN et al. 2016). Dans leur review, ZAHARIEVA et MONNEVEUX 2014 évoquent également une importante variabilité intra-spécifique en termes de rendements pour l'En.

Parmi les quelques études récentes qui ont évalué les rendements de variétés d'En et d'Am dans des conditions de culture biologiques, BENCZE et al. 2020 ont rapporté des valeurs comprises entre 1,34 et 4,33 t/ha pour l'En et entre 1,76 et 3,58 t/ha pour l'Am. COSTANZO et al. 2019 ont trouvé des valeurs moyennes de 1,28 t/ha pour l'En et 0,59 t/ha pour l'Am en 2015-2016 et de 3,13 t/ha pour l'En et 2,23 t/ha pour l'Am en 2016-2017. Néanmoins, il est important de noter que les rendements estimés par ces deux études concernent des grains vêtus (non décortiqués).

L'étude de LONGIN et al. 2016, également réalisée en conditions d'agriculture biologique, mais avec des niveaux de fertilisation adaptés à chacune des sous-espèces, rapporte des rendements en grains nus de 2,7 t/ha pour l'En, 3,6 t/ha pour l'Am, 5,0 t/ha pour le GE et 8,0 t/ha pour le BT.

2.6.5 Tallage et verse

En situation d'agriculture biologique, la capacité de tallage peut permettre au blé de couvrir efficacement le sol, contribuant ainsi à être compétitif vis-à-vis des adventices. Le potentiel de tallage élevé pour l'En ressort dans la littérature scientifique (ZAHARIEVA et MONNEVEUX 2014).

La hauteur des blés vêtus, pouvant entraîner des risques de verse, constitue une autre limite à leur réintroduction dans les systèmes agricoles (DE VITA et al. 2007). Toutefois, ZAHARIEVA et al. 2010 ; ZAHARIEVA et MONNEVEUX 2014 mentionnent l'existence de variétés d'En et d'Am résistantes à la verse. Malgré ces potentielles résistances, les études de COSTANZO et al. 2019, BENCZE et al. 2020 et LONGIN et al. 2016 ont observé des taux de verse importants, pour les trois sous-espèces vêtues. De plus, BENCZE et al. 2020 ont signalé des corrélations positives entre le taux de verse et les rendements.

2.6.6 Récapitulatif des tendances par espèce

La littérature scientifique met en évidence certaines tendances : les blés vêtus se montrent bien adaptés à des conditions de culture marginales, notamment sur des sols pauvres en azote, où ils atteignent des rendements acceptables. Au sein de chaque sous-espèce, de nombreuses variétés semblent également démontrer une résistance à diverses maladies fongiques. Toutefois, ces blés présentent généralement des rendements inférieurs à ceux des blés nus, et leur sensibilité à la verse est notable. Il convient également de noter que la plupart des informations documentées dans la littérature restent controversées, et que la variabilité intra-spécifique pour les différentes caractéristiques est généralement élevée.

Encadré 2.6.1 - Les blés vêtus au champ

Peu d'études évoquent des pratiques culturales spécifiques pour les blés vêtus. Par ailleurs, l'agriculture biologique se distingue souvent par une diversité de pratiques, adaptées à une échelle locale. Les pratiques appropriées aux blés vêtus sont donc certainement très variées, dépendant des conditions environnementales, des variétés cultivées et des traditions locales. Néanmoins, certaines fiches techniques suggèrent un itinéraire technique similaire à celui du BT (CHAMBRE D'AGRICULTURE SAÔNE ET LOIRE 2018 ; OPABA (BIO EN GRAND EST) 2020). La principale différence réside dans la réduction des doses de fertilisants, notamment des apports d'azote. De plus, en particulier pour l'En, la date de semis peut être avancée (ou retardée pour certaines variétés d'Am). Enfin, il est recommandé de semer les graines avec les glumes pour une meilleure levée (CAMPBELL 2010).

2.7 Caractéristiques nutritionnelles

La deuxième raison pour laquelle les blés vêtus suscitent un regain d'intérêt est leur qualité nutritionnelle, souvent décrite comme supérieure à celle du BT. Le blé est une source d'énergie, de protéines, de fibres alimentaires et de composés bioactifs (DINU et al. 2018). Sa consommation, en particulier sous la forme de grains entiers, a été associée à de nombreux effets bénéfiques sur la santé, tels que la réduction des risques de maladies cardio-vasculaires (AUNE et al. 2016). Toutefois, les produits à base de blé suscitent aujourd'hui de nombreuses interrogations. Ils sont souvent mis en cause pour leur possible contribution à l'augmentation des maladies chroniques liées à l'alimentation telles que l'obésité, le diabète de type II, les allergies et les intolérances alimentaires (SHEWRY 2018). Parmi ces questionnements, la plupart concernent le gluten.

Plusieurs hypothèses existent sur les teneurs en protéines, composés bioactifs, fibres et lipides des sous-espèces à grain vêtu, suggérant une meilleure qualité nutritionnelle par rapport au BT et au blé dur. Cette section est un résumé de la littérature scientifique sur les compositions des grains des blés vêtus en ces éléments. Le cas spécifique du gluten sera abordé dans la section 2.8.

2.7.1 Composition du grain en éléments d'intérêt nutritionnel

2.7.1.1 Les protéines

Parmi les tendances qui se dégagent dans la littérature scientifique, on trouve la teneur plus élevée en protéines pour l'En et pour l'Am par rapport au BT. Les études mentionnées dans les reviews de ZAHARIEVA et MONNEVEUX 2014; ZAHARIEVA et al. 2010 évoquent des taux de protéines compris entre 13,2% et 28,5% pour l'En et entre 18% et 23% pour l'Am. L'étude plus récente de GEISLITZ et al. 2019 trouve des valeurs de 11,6% pour l'En et de 11,1% pour l'Am, comparées à 9,6% pour le BT. Diverses études suggèrent également des teneurs en protéines supérieures pour le GE que pour le BT, mais les différences entre ces deux sous-espèces sont souvent faibles (CASTAGNA et al. 1995; LONGIN et al. 2016; BENCZE et al. 2020). De plus, différentes études s'accordent pour dire que les compositions en acides aminés des blés vêtus sont comparables à celles du BT. Ils se caractérisent par de faibles quantités de lysine et des quantités élevées de proline et de glutamine (qui facilitent la panification) (ZAHARIEVA et MONNEVEUX 2014; ZAHARIEVA et al. 2010; CUBADDA et MARCONI 2002).

2.7.1.2 Les lipides

Les céréales contiennent généralement de 2 à 6% de lipides, ce qui en fait une source relativement faible de ces nutriments par rapport à d'autres aliments (PELILLO et al. 2010). Néanmoins, certaines études rapportent des teneurs en lipides totaux supérieures dans les blés vêtus que dans le BT (PELILLO et al. 2010; BIEL et al. 2021), en particulier pour l'En (SUCHOWILSKA et al. 2009). De plus, une étude comparative des métabolomes des différentes sous-espèces de blés vêtus effectuée par RIGHETTI et al. 2016 a mis en lumière certains lipides comme critères distinctifs des différentes sous-espèces. Ainsi, des concentrations plus élevées de phosphatidylcholines et de lysophosphatidylcholines semblent être caractéristiques de l'En.

2.7.1.3 Les micronutriments

En ce qui concerne les micronutriments, diverses études rapportent des taux plus élevés de minéraux pour les blés vêtus par rapport au BT. Selon des travaux cités par ZAHARIEVA et MONNEVEUX 2014, les trois sous-espèces présentent des niveaux plus élevés de zinc, de fer, de cuivre et de selenium que le BT. L'En se distingue particulièrement par son importante teneur en calcium, en manganèse et en soufre. CUBADDA et MARCONI 2002 mentionnent également des concentrations supérieures en phosphore et en magnésium pour le GE par rapport au BT.

L'autre différence qui ressort de la littérature concerne les caroténoïdes, avec des teneurs plus élevées pour l'En et l'Am que pour le BT (ZAHARIEVA et MONNEVEUX 2014; SHEWRY et HEY 2015). SHEWRY et HEY 2015 rapportent des concentrations moyennes de caroténoïdes totaux de 8,23 µg/100g de matière sèche pour l'Am, soit 3,5 à 3,8 fois plus élevées que pour le BT, l'En et le GE. De plus, l'En se distingue par des concentrations en lutéine (caroténoïde aux propriétés antioxydantes) quatre fois supérieures à celles du BT (ZAHARIEVA et MONNEVEUX 2014).

Un travail de revue sur les composés bioactifs dans diverses sous-espèces de blés a été mené par SHEWRY et HEY 2015, en considérant uniquement les études où les variétés évaluées ont été cultivées dans les mêmes conditions. Les auteur.e.s concluent, qu'en dehors des caroténoïdes, il existe très peu de différences entre les sous-espèces en termes de composés tels que les tocols, les stérols, les acides phénoliques, l'acide ferulique, les alkyresorcinsols, l'acide phytique³ et les composants de la vitamine B. Diverses études suggèrent que d'autres antinutriments, comme les inhibiteurs de la trypsine et les tannins varient également très peu d'une sous-espèce à l'autre

3. L'acide phytique est considéré comme un anti-nutriment.

(CUBADDA et MARCONI 2002 ; ZAHARIEVA et al. 2010). Enfin, une étude de ZIEGLER et al. 2016 sur les FODMAPs (fermentable oligosaccharides, disaccharides, monosaccharides, and polyols), fortement associés au syndrome de l'intestin irritable, rapporte des concentrations similaires, voire légèrement supérieures pour l'En par rapport aux autres sous-espèces de blé.

2.7.1.4 Les fibres alimentaires

Les fibres alimentaires sont des polysaccharides qui ne sont pas digérés. Elles ne fournissent donc pas d'énergie, mais elles jouent un rôle essentiel dans la régulation du transit intestinal. De plus, elles contribuent à réduire les risques de développer diverses maladies, notamment des pathologies cardiaques, le diabète de type II, l'obésité et le cancer du colon (ANDERSON et al. 2009). Les trois sous-espèces de blés vêtus ont tendance à présenter des teneurs inférieures en fibres alimentaires par rapport au BT. Selon la review de SHEWRY et HEY 2015, les valeurs de fibres totales s'élèvent à 9,2 % de matière sèche pour l'Am, 10,8 % pour l'En, 11,2 % pour le GE et 15,0 % pour le BT. Ces différences entre les sous-espèces semblent être principalement liées aux concentrations de fibres insolubles, les taux de fibres solubles variant peu. Cependant, au moins pour l'Am, ces tendances restent controversées. En effet, certaines études citées par ZAHARIEVA et al. 2010 rapportent des concentrations élevées de fibres pour la sous-espèce tétraploïde. Les fibres alimentaires ont également une influence sur l'indice glycémique⁴ des aliments. La review de ZAHARIEVA et al. 2010 cite plusieurs travaux qui rapportent un indice glycémique faible pour l'Am. Toutefois, ces résultats sont en contradiction avec d'autres études qui mesurent des teneurs en fibres relativement faibles pour cette sous-espèce.

2.7.1.5 Récapitulatif des tendances par espèce

En résumé, certaines tendances ressortent de la littérature : les blés vêtus ont des teneurs supérieures en protéines (en particulier l'En), en certains micronutriments, dont les caroténoïdes pour l'En et l'Am, et des teneurs moindres en fibres alimentaires par rapport au BT. Cependant, la plupart des résultats sur les compositions biochimiques des grains des diverses sous-espèces de blé restent sujets à controverses (CUBADDA et MARCONI 2002 ; ALVAREZ 2021 ; ZAHARIEVA et al. 2010). Par ailleurs, pour la plupart des critères mesurés, une variabilité intra-spécifique élevée est constatée.

4. Cet indice mesure la vitesse de l'élévation de la glycémie suite à l'ingestion d'un aliment. Des teneurs en fibres élevées sont généralement associées à des indices glycémiques faibles.

2.8 Le cas du gluten

Au cours des dernières décennies, une préoccupation croissante parmi la population s'est manifestée concernant les problèmes de santé associés à la consommation de blé (KUCEK et al. 2015 ; RÉMÉSY et al. 2015 ; SCHERF 2019). La plupart de ces inquiétudes est liée au gluten (RÉMÉSY et al. 2015). Par ailleurs, de nombreuses hypothèses suggèrent que la composition du gluten serait différente au sein des blés vêtus par rapport au BT et au blé dur, ce qui pourrait influencer leur digestibilité. La composition en protéines du gluten des blés vêtus est également l'un des sujets abordés dans cette thèse, dans le chapitre 5.

Dans cette section, je commence par présenter ce qu'est le gluten. J'évoque ensuite les pathologies associées au gluten ainsi que les hypothèses existantes dans la littérature concernant son lien avec ces pathologies. La teneur en gluten total et la composition en protéines du gluten parmi les blés vêtus sont traitées dans le chapitre 5.

2.8.1 Le gluten

Le gluten est un mélange composé de deux types de protéines : les gliadines (GLIA) et les gluténines (GLUT) (figure 2.4). Lors de l'ajout d'eau est à la farine et du pétrissage, ces protéines s'entremêlent autour des granules d'amidon, formant ainsi un réseau tridimensionnel viscoélastique qu'on appelle gluten (BIESIEKIERSKI 2017 ; DELCOUR et al. 2012). Les GLIA et les GLUT représentent entre 80 et 90% du total des protéines présentes dans le grain de blé (BIESIEKIERSKI 2017 ; DELCOUR et al. 2012 ; WIESER et al. 2023). Il s'agit de protéines de réserve qui fournissent les acides aminés essentiels nécessaires à la germination (DELCOUR et al. 2012).

Les GLIA sont des protéines globulaires majoritairement monomériques, solubles dans l'éthanol aqueux, avec une masse molaire variant de 30 000 à 80 000 g/mol (VERAVERBEKE et DELCOUR 2002)). Elles peuvent être classées en trois sous-catégories en fonction de leur mobilité électrophorétique : les oméga-gliadines (ω -GLIA), les alpha/bêta-gliadines (α/β -GLIA) et les gamma-gliadines (γ -GLIA) (DELCOUR et al. 2012). Les GLUT sont des protéines en forme de bâtonnets qui s'agrègent par des liaisons disulfures, formant des complexes pouvant atteindre vingt millions de g/mol (DELCOUR et al. 2012). Insolubles dans l'éthanol, elles peuvent être extraites à l'aide d'acides dilués contenant de l'urée, un surfactant et un agent réducteur (qui permet la réduction des ponts disulfures) (PRONIN et al. 2020). Les GLUT peuvent être divisées en deux

sous-catégories en fonction de leur masse molaire : les GLUT de haute masse molaire (HMW-GS), qui font entre 70 000 et 90 000 g/mol, et les GLUT de faible masse molaire (LMW-GS), qui font entre 20 000 et 45 000 g/mol (DELCOUR et al. 2012). En outre, le grain de blé contient deux autres types de protéines, les albumines (ALB) et les globulines (GLOB), qui assurent les réactions enzymatiques et la structure cellulaire (DELCOUR et al. 2012).

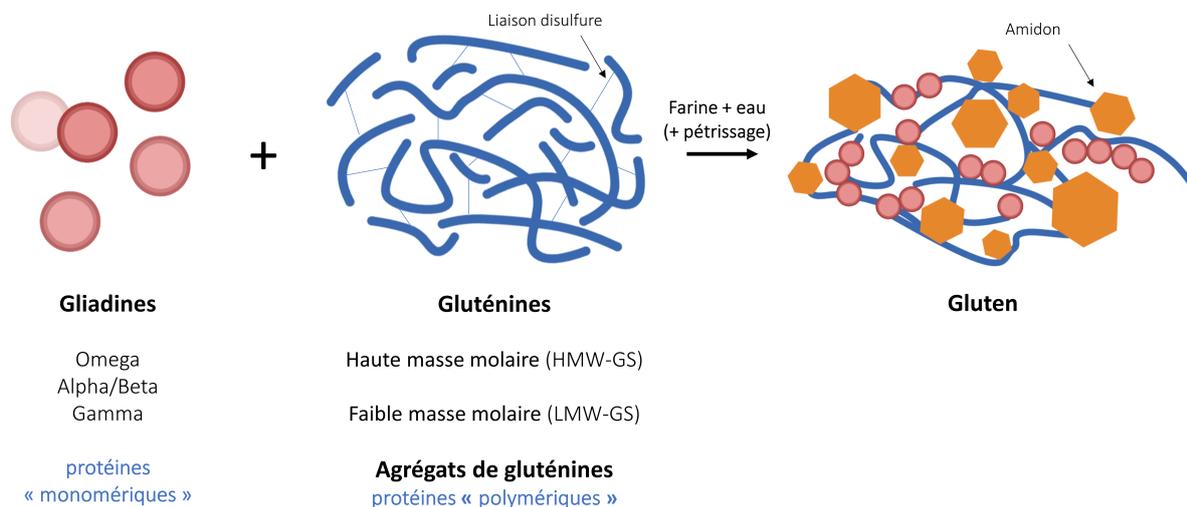


FIGURE 2.4 – Schéma du gluten. Modifié d'un schéma du rapport de stage de LEPAGNEUL 2022.

2.8.2 Les pathologies associées au gluten

Au cours des dernières décennies, une préoccupation croissante à l'égard des problèmes de santé associés aux produits à base de blé s'est répandue (KUCEK et al. 2015 ; RÉMÉSY et al. 2015). Parmi ces pathologies, la maladie cœliaque, causée par l'ingestion de gluten, a vu sa prévalence multipliée par quatre au cours des 50 dernières années (KUCEK et al. 2015). De plus, une nouvelle pathologie connue sous le nom de sensibilité au blé non cœliaque⁵, a émergé (BOUVELOUP 2016 ; RÉMÉSY et al. 2015 ; KUCEK et al. 2015). Aucune cause spécifique ni symptôme clinique n'ayant été clairement identifié pour caractériser cette pathologie, elle est décrite par les expert.e.s comme « Une entité clinique dans laquelle l'ingestion de gluten entraîne des symptômes digestifs et/ou extra digestifs qui régressent lors d'un régime sans gluten, après élimination de l'allergie au blé et de la maladie cœliaque » (BOUVELOUP 2016). Étant donné que les symptômes de cette sensibilité régressent voire disparaissent lorsque la consommation de gluten est arrêtée, celui-ci est suspecté être à l'origine de la maladie. Les mécanismes physiopathologiques, les protéines du blé soupçonnées d'être impliquées dans ces maladies, les symptômes cliniques et la prévalence de ces

5. Aussi appelée « hypersensibilité au blé »

pathologies sont détaillés dans le tableau 2.1. L'allergie au blé, également liée à la consommation de blé mais pas uniquement aux protéines du gluten, est également décrite dans ce tableau.

2.8.3 Hypothèses sur les causes de ces pathologies

L'apparition de la sensibilité au blé non cœliaque (RÉMÉSY et al. 2015) et l'augmentation des cas de maladie cœliaque (KUCEK et al. 2015) ayant eu lieu à une période concomitante à celle de la sélection de variétés tolérantes au pétrissage intensif, on peut supposer que les programmes de sélection mis en œuvre pour l'industrialisation du pain ont contribué au développement de ces pathologies. En effet, les proportions des différentes protéines jouent un rôle important dans les propriétés rhéologiques de la pâte (GEISLITZ et al. 2018 ; ISLAM et al. 2019 ; JIANG et al. 2019 ; SCHOBER et al. 2006 ; WIESER et KIEFFER 2001), ce qui en fait un critère de sélection majeur pour optimiser les processus de panification (KISZONAS et MORRIS 2018). Par exemple, l'amélioration de la résistance au pétrissage intensif a été réalisée en augmentant la force (indicateur d'élasticité et de viscosité) et l'extensibilité du gluten (MEFLEH et al. 2019). Or, ces propriétés physiques sont étroitement liées à des teneurs élevées en GLUT, et en particulier en HMW-GS, par rapport aux teneurs en GLIA (CALL et al. 2020 ; KUCEK et al. 2015 ; ISLAM et al. 2019 ; WIESER et KIEFFER 2001). La force du gluten est également associée à une quantité élevée d'agrégats protéiques, qui sont particulièrement résistants à la digestion pancréatique (MEFLEH et al. 2019). De plus, les protéines du gluten contiennent un grand nombre de résidus de proline et de glutamine, qui contribuent également à la résistance du gluten à la digestion (GASS et al. 2007). Ainsi, une hypothèse émergente suggère que l'augmentation des concentrations de GLUT et d'agrégats protéiques de grande taille, résultant de la sélection variétale moderne, rendrait le blé plus difficile à digérer et contribuerait au développement de certaines pathologies, notamment la sensibilité au blé non cœliaque (RÉMÉSY et al. 2015 ; CALL et al. 2020).

TABLEAU 2.1 – Pathologies causées par l’ingestion de blé. Source : BOUTELOUP 2016.

	Allergie au blé	Maladie cœliaque	Sensibilité au blé non cœliaque
Type de maladie	Allergie (hypersensibilité impliquant des mécanismes immunitaires). Plusieurs types ont été décrits : allergie respiratoire (asthme du boulanger), allergie alimentaire, anaphylaxie au blé induite par l’effort, urticaire de contact.	Entéropathie d’origine auto-immune.	Inconnu (n’implique ni les mécanismes de l’allergie ni les mécanismes auto-immuns), implique potentiellement l’immunité innée.
Facteur déclenchant	En fonction des types d’allergie : les inhibiteurs de l’ α -amylase ou de la trypsine (ATIs) (famille des ALB + GLOB), les protéines de transfert non spécifiques des lipides, les GLIA, la GLIA ω -5.	Les GLIA (qui déclenchent la réponse immunitaire innée) et les GLUT.	Inconnues, parmi les protéines suspectées, on trouve : les protéines du gluten, les ATIs, les agglutinines du blé et les FODMAPs (fermentable oligosaccharides, disaccharide, monosaccharide and polyols) qui sont un des facteurs à l’origine du syndrome de l’intestin irritable.
Physiopathogénie	Réaction immune adaptative caractérisée par une activation des lymphocytes T. Il en existe deux types : médiées ou non médiées par les IgE.	Réponse immune innée et réponse immune adaptative qui cause des lésions de l’intestin grêle.	Inconnue, potentiellement réponse immune innée.
Symptômes cliniques	Brûlures, démangeaisons et gonflement au niveau de la bouche et de la gorge, rhino-conjonctivite, rash cutané, bronchospasme, douleurs abdominales avec nausées, ballonnement et diarrhée, choc anaphylactique.	Retard de croissance pondérale chez l’enfant, signes digestifs (malabsorption, entéropathie, carences, constipation, vomissements, douleurs abdominales, amaigrissement), symptômes extra-digestifs (hypoplasie de l’émail dentaire, ostéopénie, ostéoporose, retard pubertaire, anémie, aménorrhée, fatigue, aphtose buccale récurrente, fracture et anomalies biologiques hépatiques, etc.).	Symptômes digestifs identiques à ceux du syndrome de l’intestin irritable et similaires à ceux de la maladie cœliaque (douleurs abdominales, gaz, ballonnement, transit irrégulier, anémie) et symptômes extra-digestifs (maux de tête ou migraines, sensation d’esprit embrumé, de léthargie, fatigue chronique, dépression, anémie, engourdissement au niveau des jambes, des bras ou des doigts, douleurs articulaires et musculaires, eczéma, éruptions cutanées).
Diagnostic	Prick tests cutanés, patch tests cutanés, détection in vitro d’IgE spécifiques d’allergènes alimentaires ou moléculaires identifiés, tests fonctionnels (régime d’éviction et tests de provocation).	Test sérologique, fibroscopie œsogastroduodénale avec biopsies duodénales.	Diagnostic d’exclusion (exclusion de l’allergie au blé et de la maladie cœliaque).
Prévalence	Entre 0,3 et 0,4% (NWARU et al. 2014) en Europe.	Entre 0,56 à 1,26% en Europe et aux Etats-Unis.	Difficile à déterminer, entre 0,5 à 13% selon diverses études.

Néanmoins, l'implication de ces protéines et de ces agrégats dans la sensibilité au blé non cœliaque n'est pas démontrée (KUCEK et al. 2015). Il est également possible que, tout comme pour la maladie cœliaque et pour l'allergie au blé, certains épitopes présents sur les protéines du gluten soient impliqués (RÉMÉSY et al. 2015). De plus, d'autres molécules telles que les inhibiteurs de l' α -amylase ou de la trypsine (ATIs), qui font partie de la famille des albumines et des globulines, les agglutinines du blé et les FODMAPs (fermentable oligosaccharides, disaccharide, monosaccharide and polyols) qui sont un des facteurs à l'origine du syndrome de l'intestin irritable, sont également suspectées d'être responsables de la sensibilité au blé non cœliaque (BOUPELOUP 2016). En outre, le type de farine consommé (plus ou moins complète), ainsi que les procédés de transformation tels que la durée et l'intensité du pétrissage et le type de fermentation pour le pain ont un impact sur la composition en protéines du produit final, ce qui affecte certainement la digestibilité du gluten (RÉMÉSY et al. 2015). En résumé, la sensibilité au blé non cœliaque demeure encore mal comprise, et le rôle des protéines du gluten dans cette pathologie n'est pas établi à ce jour (KUCEK et al. 2015).

2.9 Conclusion

Les informations présentes dans la littérature scientifique nous offrent un aperçu de l'histoire et des principales caractéristiques associées à chacune des trois espèces de blés vêtus. En ce qui concerne les aspects agronomiques et nutritionnels, certaines tendances se dégagent pour des espèces spécifiques. Cependant, de nombreuses questions restent controversées.

En effet, assez peu d'études se sont jusqu'à présent intéressées aux caractéristiques agronomiques et nutritionnelles spécifiques des blés vêtus. Par ailleurs, chacun des travaux publiés s'est focalisé sur un nombre restreint de variétés, cultivées dans des conditions particulières. Or, les critères agronomiques et la composition des grains varient non seulement d'une variété à l'autre au sein d'une même espèce, mais sont également influencés par l'effet de l'environnement, et par l'interaction entre l'environnement et la variété en question (interaction génotype x environnement) (DINU et al. 2018; SHEWRY et HEY 2015; SHEWRY 2018; LONGIN et al. 2016). Ces effets de la variété, de l'environnement et de l'interaction entre les deux peuvent expliquer en grande partie les fluctuations et les résultats contradictoires retrouvés dans la littérature.

Par rapport à l'aspect nutritionnel, il est important de rappeler que l'analyse de la composition des grains entiers ne reflète pas la composition du produit final. Les processus de transformation

ont en effet un impact important sur la composition des aliments. Par exemple, une étude menée par ZIEGLER et al. 2016 a montré que lors de la panification, un temps de levée dépassant quatre heures pouvait réduire les concentrations de FODMAPS jusqu'à 90%.

Pour mieux comprendre les caractéristiques propres à chaque sous-espèce ainsi que les niveaux de variabilité intra-spécifiques, de futures études sont nécessaires. De plus, étant donné l'influence des effets de la variété, de l'environnement et de leur interaction, il est essentiel de réaliser des évaluations dans des conditions de culture réelles.

Bien que sur le plan botanique, l'En, l'Am et le GE sont classés en tant que **sous-espèces** de blé, dans la littérature scientifique, ils sont souvent considérés comme des espèces. Par souci de simplicité, dans la suite de cette thèse, j'y ferai également référence en tant qu'**espèces** distinctes.

2.10 Bibliographie

- ADU, M. O., D. L. SPARKES, A. PARMAR et D. O. YAWSON (2011). « Stay green in wheat : comparative study of modern bread wheat and ancient wheat cultivars ». In : *ARPN Journal of Agricultural and Biological Science* 6, p. 16-24. URL : <http://hdl.handle.net/123456789/4921>.
- AGRESTE (2023). *Agreste Infos rapides - Grandes cultures - février 2023 - 15*. URL : https://agreste.agriculture.gouv.fr/agresteweb/download/publication/publie/IraGcu2315/2023_15inforapgdscultures.pdf.
- ALAYACHEW, S. A. et K. T. GELETU (2017). « Genetic diversity of Ethiopian emmer wheat *Triticum dicoccum* Schrank landraces using seed storage proteins markers ». In : *African Journal of Biotechnology* 16, p. 889-894. DOI : [10.5897/AJB2016.15835](https://doi.org/10.5897/AJB2016.15835).
- ALVAREZ, J. B. (2021). « Spanish spelt wheat : From an endangered genetic resource to a trendy crop ». In : *Plants* 10.12, p. 2748. DOI : [10.3390/plants10122748](https://doi.org/10.3390/plants10122748).
- AN, X., Q. LI, Y. YAN, Y. XIAO, S. HSAM et F. ZELLER (2005). « Genetic diversity of European spelt wheat (*Triticum aestivum* ssp. *spelta* L. em. Thell.) revealed by glutenin subunit variations at the Glu-1 and Glu-3 loci ». In : *Euphytica* 146, p. 193-201. DOI : [10.1007/s10681-005-9002-6](https://doi.org/10.1007/s10681-005-9002-6).
- ANDERSON, J. W., P. BAIRD, R. H. DAVIS JR, S. FERRERI, M. KNUDTSON, A. KORAYM, V. WATERS et C. L. WILLIAMS (2009). « Health benefits of dietary fiber ». In : *Nutrition reviews* 67.4, p. 188-205. DOI : [10.1111/j.1753-4887.2009.00189.x](https://doi.org/10.1111/j.1753-4887.2009.00189.x).
- AUNE, D., N. KEUM, E. GIOVANNUCCI, L. T. FADNES, P. BOFFETTA, D. C. GREENWOOD, S. TONSTAD, L. J. VATTEN, E. RIBOLI et T. NORAT (2016). « Whole grain consumption and risk of cardiovascular disease, cancer, and all cause and cause specific mortality : systematic review and dose-response meta-analysis of prospective studies ». In : *British Medical Journal* 353. DOI : [10.1136/bmj.i2716](https://doi.org/10.1136/bmj.i2716).
- BARCACCIA, G., L. MOLINARI, O. PORFIRI et F. VERONESI (2002). « Molecular characterization of emmer (*Triticum dicoccon* Schrank) Italian landraces ». In : *Genetic Resources and Crop Evolution* 49, p. 417-428. DOI : [10.1023/A:1020650804532](https://doi.org/10.1023/A:1020650804532).
- BENCZE, S., M. MAKÁDI, T. J. ARANYOS, M. FÖLDI, P. HERTELENDY, P. MIKÓ, S. BOSI, L. NEGRI et D. DREXLER (2020). « Re-introduction of ancient wheat cultivars into organic agriculture—Emmer and einkorn cultivation experiences under marginal conditions ». In : *Sustainability* 12.4, p. 1584. DOI : [10.3390/su12041584](https://doi.org/10.3390/su12041584).
- BERTIN, P., D. GRÉGOIRE, S. MASSART et D. DE FROIDMONT (2004). « High level of genetic diversity among spelt germplasm revealed by microsatellite markers ». In : *Genome* 47.6, p. 1043-1052. DOI : [10.1139/g04-065](https://doi.org/10.1139/g04-065).
- BIEL, W., A. JAROSZEWSKA, S. STANKOWSKI, M. SOBOLEWSKA et J. KĘPIŃSKA-PACELIK (2021). « Comparison of yield, chemical composition and farinograph properties of common and ancient wheat grains ». In : *European Food Research and Technology* 247.6, p. 1525-1538. DOI : [10.1007/s00217-021-03729-7](https://doi.org/10.1007/s00217-021-03729-7).
- BIESIEKIERSKI, J. R. (2017). « What is gluten? » In : *Journal of gastroenterology and hepatology* 32, p. 78-81. DOI : [10.1111/jgh.13703](https://doi.org/10.1111/jgh.13703).
- BONJEAN, A. (2001). « Histoire de la culture des céréales et en particulier de celle du blé tendre (*Triticum aestivum* L.) » In : *Dossier de l'environnement de l'INRA* 21, 29-37p.
- BOUTELOUP, C. (2016). « Les pathologies digestives liées au blé ou au gluten : certitudes et doutes ». In : *Cahiers de Nutrition et de Diététique* 51.5, p. 248-258. DOI : [10.1016/j.cnd.2016.06.002](https://doi.org/10.1016/j.cnd.2016.06.002).
- CABALLERO, L., L. MARTIN et J. ALVAREZ (2004). « Variation and genetic diversity for gliadins in Spanish spelt wheat accessions ». In : *Genetic Resources and Crop Evolution* 51, p. 679-686. DOI : [10.1023/B:GRES.0000034575.97497.6e](https://doi.org/10.1023/B:GRES.0000034575.97497.6e).

- CALL, L., M. KAPPELLER, H. GRAUSGRUBER, E. REITER, R. SCHOENLECHNER et S. D'AMICO (2020). « Effects of species and breeding on wheat protein composition ». In : *Journal of Cereal Science* 93, p. 102974. DOI : [10.1016/j.jcs.2020.102974](https://doi.org/10.1016/j.jcs.2020.102974).
- CAMPBELL, K. G. (2010). « Spelt : agronomy, genetics, and breeding ». In : *Plant Breed Reviews*. Sous la dir. de J. JANICK. T. 15, p. 187-213.
- CASTAGNA, R., B. BORGH, N. DI FONZO, M. HEUN et F. SALAMINI (1995). « Yield and related traits of einkorn (*T. monococcum* ssp. *monococcum*) in different environments ». In : *European Journal of Agronomy* 4.3, p. 371-378. DOI : [10.1016/S1161-0301\(14\)80038-5](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(14)80038-5).
- CHABROL, D., J. B. BASSENE et S. FOURNIER (2013). *Petit épeautre de Haute-Provence : quand l'IGP est le pivot d'un système associant différents signes de qualité*. URL : https://agritrop.cirad.fr/572336/1/document_572336.pdf.
- CHAMBRE D'AGRICULTURE SAÔNE ET LOIRE (2018). *Culture de l'épeautre en zone allaitante d'élevage*. Rapp. tech. Chambre d'agriculture Saône et Loire. URL : [%5Curl%7Bhttps://bourgognefranchecomte.chambres-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/Bourgogne-Franche-Comte/CDA71/07_2018_epeautre_zone_allaitante.pdf%7D](https://bourgognefranchecomte.chambres-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/Bourgogne-Franche-Comte/CDA71/07_2018_epeautre_zone_allaitante.pdf) (visité le 17/09/2023).
- CHARMET, G. (2011). « Wheat domestication : lessons for the future ». In : *Comptes rendus biologies* 334.3, p. 212-220. DOI : [10.1016/j.crv.2010.12.013](https://doi.org/10.1016/j.crv.2010.12.013).
- COSTANZO, A., D. C. AMOS, G. DINELLI, R. E. SFERRAZZA, G. ACCORSI, L. NEGRI et S. BOSI (2019). « Performance and nutritional properties of einkorn, emmer and rivet wheat in response to different rotational position and soil tillage ». In : *Sustainability* 11.22, p. 6304. DOI : [10.3390/su11226304](https://doi.org/10.3390/su11226304).
- CUBADDA, R. et E. MARCONI (2002). « Spelt wheat ». In : *Pseudocereals and Less Common Cereals—Grain Properties and Utilization Potential*. New York, NY, USA : Springer, p. 153-173. DOI : [10.1007/978-3-662-09544-7_5](https://doi.org/10.1007/978-3-662-09544-7_5).
- DE VITA, P., A. M. MASTRANGELO, P. CODIANNI et M. FORNARA (2007). « Bio-agronomic evaluation of old and modern wheat, spelt and emmer genotypes for low-input farming in Mediterranean environment ». In : *Italian Journal of Agronomy* 2.3, p. 291-302. DOI : [10.4081/ija.2007.291](https://doi.org/10.4081/ija.2007.291).
- DELICOUR, J. A., I. J. JOYE, B. PAREYT, E. WILDERJANS, K. BRIJS et B. LAGRAIN (2012). « Wheat gluten functionality as a quality determinant in cereal-based food products ». In : *Annual review of food science and technology* 3, p. 469-492. DOI : [10.1146/annurev-food-022811-101303](https://doi.org/10.1146/annurev-food-022811-101303).
- DEMIREL, F. (2020). « Genetic diversity of Emmer wheats using iPBS markers ». In : *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi* 20, p. 640-646. DOI : [10.31590/ejosat.814537](https://doi.org/10.31590/ejosat.814537).
- DESHEVA, G. et B. KYOSEV (2016). « Evaluation of genetic diversity of einkorn genotypes maintained in the national collection of Bulgaria by multivariate analysis ». In : *SCIREA, Journal of Agriculture* 1.1, p. 1-15.
- DESHEVA, G. N., B. KYOSEV et M. DESHEV (2020). « Assessment genetic diversity of einkorn genotypes (*Triticum monococcum* L.) by gliadin electrophoresis ». In : *Acta agriculturae Slovenica* 116.2, p. 327-336. DOI : [10.14720/aas.2020.116.2.1430](https://doi.org/10.14720/aas.2020.116.2.1430).
- DINU, M., A. WHITTAKER, G. PAGLIAI, S. BENEDETTELLI et F. SOFI (2018). « Ancient wheat species and human health : Biochemical and clinical implications ». In : *The Journal of nutritional biochemistry* 52, p. 1-9. DOI : [10.1016/j.jnutbio.2017.09.001](https://doi.org/10.1016/j.jnutbio.2017.09.001).
- FAOSTAT, F. (2015). *Faostat*. URL : <https://www.fao.org/faostat/en/> (visité le 31/03/2023).
- FELDMAN, M., F. G. H. LUPTON et T. E. MILLER (1995). « Wheats ». In : *Evolution of crop plants*. Sous la dir. de J. SMARTT et N. W. SIMMONDS. London : Longman Group Ltd., p. 184-192.
- GASS, J., M. T. BETHUNE, M. SIEGEL, A. SPENCER et C. KHOSLA (2007). « Combination enzyme therapy for gastric digestion of dietary gluten in patients with celiac sprue ». In : *Gastroenterology* 133.2, p. 472-480. DOI : [10.1053/j.gastro.2007.05.028](https://doi.org/10.1053/j.gastro.2007.05.028).

- GEISSLITZ, S., C. F. H. LONGIN, K. A. SCHERF et P. KOEHLER (2019). « Comparative study on gluten protein composition of ancient (einkorn, emmer and spelt) and modern wheat species (durum and common wheat) ». In : *Foods* 8.9, p. 409. DOI : [10.3390/foods8090409](https://doi.org/10.3390/foods8090409).
- GEISSLITZ, S., H. WIESER, K. A. SCHERF et P. KOEHLER (2018). « Gluten protein composition and aggregation properties as predictors for bread volume of common wheat, spelt, durum wheat, emmer and einkorn ». In : *Journal of Cereal Science* 83, p. 204-212. DOI : [10.1016/j.jcs.2018.08.012](https://doi.org/10.1016/j.jcs.2018.08.012).
- GILES, R. J. et T. A. BROWN (2006). « GluDy allele variations in *Aegilops tauschii* and *Triticum aestivum* : implications for the origins of hexaploid wheats ». In : *Theoretical and applied genetics* 112, p. 1563-1572. DOI : [10.1007/s00122-006-0259-5](https://doi.org/10.1007/s00122-006-0259-5).
- GRADMANN, R. (1901). « Der Dinkel und die Alemannen ». In : *Württembergische Jahrbücher für Statistik und Landeskunde*, p. 103-158.
- GULYÁS, G., M. RAKSZEI, Z. BOGNÁR, L. LÁNG et Z. BEDŐ (2012). « Evaluation of genetic diversity of spelt breeding materials based on AFLP and quality analyses ». In : *Cereal Research Communications* 40.2, p. 185-193. DOI : [10.1556/crc.40.2012.2.2](https://doi.org/10.1556/crc.40.2012.2.2).
- HARLAN, J. R. (1981). « The early history of wheat : earliest traces to the sack of Rome ». In : *Wheat science today and tomorrow*, p. 1-19.
- ISLAM, S., Z. YU, M. SHE, Y. ZHAO et W. MA (2019). « Wheat gluten protein and its impacts on wheat processing quality ». In : *Frontiers of Agricultural Science and Engineering* 6.3, p. 279-287. DOI : [10.15302/J-FASE-2019267](https://doi.org/10.15302/J-FASE-2019267).
- JIANG, P., J. XUE, L. DUAN, Y. GU, J. MU, S. HAN, L. CHEN, Y. LI, W. MA, Y. YAN et al. (2019). « Effects of high-molecular-weight glutenin subunit combination in common wheat on the quality of crumb structure ». In : *Journal of the Science of Food and Agriculture* 99.4, p. 1501-1508. DOI : [10.1002/jsfa.9323](https://doi.org/10.1002/jsfa.9323).
- KISZONAS, A. M. et C. F. MORRIS (2018). « Wheat breeding for quality : A historical review ». In : *Cereal Chemistry* 95.1, p. 17-34. DOI : [10.1094/CCHEM-05-17-0103-FI](https://doi.org/10.1094/CCHEM-05-17-0103-FI).
- KONVALINA, P., I. CAPOUCHOVÁ, Z. STEHNO et J. MOUDRY (2010). « Agronomic characteristics of the spring forms of the wheat landraces (einkorn, emmer, spelt, intermediate bread wheat) grown in organic farming ». In : *Journal of Agrobiological Sciences* 27.1, p. 9-17. DOI : [10.2478/s10146-009-0002-3](https://doi.org/10.2478/s10146-009-0002-3).
- KUCEK, L. K., L. D. VEENSTRA, P. AMNUAYCHEEWA et M. E. SORRELLS (2015). « A grounded guide to gluten : how modern genotypes and processing impact wheat sensitivity ». In : *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 14.3, p. 285-302. DOI : [10.1111/1541-4337.12129](https://doi.org/10.1111/1541-4337.12129).
- LEPAGNEUL, J. (2022). « Study of gluten proteins gliadins and glutenins in hulled wheats ». Mém. de mast. Aix - Marseille Université.
- LEV-YADUN, S., A. GOPHER et S. ABBO (2000). « The cradle of agriculture ». In : *Science* 288.5471, p. 1602-1603. DOI : [10.1126/science.288.5471.1602](https://doi.org/10.1126/science.288.5471.1602).
- LONGIN, C. F. H., J. ZIEGLER, R. SCHWEIGERT, P. KOEHLER, R. CARLE et T. WÜRSCHUM (2016). « Comparative study of hulled (einkorn, emmer, and spelt) and naked wheats (durum and bread wheat) : Agronomic performance and quality traits ». In : *Crop Science* 56.1, p. 302-311. DOI : [10.2135/cropsci2015.04.0242](https://doi.org/10.2135/cropsci2015.04.0242).
- MARTÍNEZ-MORENO, F., K. AMMAR et I. SOLÍS (2022). « Global changes in cultivated area and breeding activities of durum wheat from 1800 to date : A historical review ». In : *Agronomy* 12.5, p. 1135. DOI : [10.3390/agronomy12051135](https://doi.org/10.3390/agronomy12051135).
- MEFLEH, M., P. CONTE, C. FADDA, F. GIUNTA, A. PIGA, G. HASSOUN et R. MOTZO (2019). « From ancient to old and modern durum wheat varieties : Interaction among cultivar traits, management, and technological quality ». In : *Journal of the Science of Food and Agriculture* 99.5, p. 2059-2067. DOI : [10.1002/jsfa.9388](https://doi.org/10.1002/jsfa.9388).

- NESBITT, M. (1996). « From staple crop to extinction? The archaeology and history of hulled wheat ». In : *Hulled Wheat : Promoting the Conservation and Use of Underutilized and Neglected Crops*, p. 41-100.
- NWARU, B., L. HICKSTEIN, S. PANESAR, G. ROBERTS, A. MURARO, A. SHEIKH, E. F. ALLERGY et A. G. GROUP (2014). « Prevalence of common food allergies in Europe : a systematic review and meta-analysis ». In : *Allergy* 69.8, p. 992-1007. DOI : [10.1111/all.12423](https://doi.org/10.1111/all.12423).
- OPABA (BIO EN GRAND EST), C. d. A. (2020). *Petit épeautre ou engrain*. Rapp. tech. URL : https://biograndest.org/wp-content/uploads/2021/10/2021_Fiche_ALS_petitepeautre.pdf (visité le 17/09/2023).
- PADULOSI, S. (1996). *Hulled Wheats : Proceedings of the First International Workshop on Hulled Wheats*. T. 4. Castelvecchio Pascoli, Toscane, Italie : Bioversity International.
- PELILLO, M., F. FERIOLO, G. IAFELICE, E. MARCONI et M. F. CABONI (2010). « Characterisation of the phospholipid fraction of hulled and naked tetraploid and hexaploid wheats ». In : *Journal of cereal science* 51.1, p. 120-126. DOI : [10.1016/j.jcs.2009.11.002](https://doi.org/10.1016/j.jcs.2009.11.002).
- PERRINO, P., S. INFANTINO, P. BASSO et A. DI MARZIO (1993). « Valutazione e selezione di farro in ambienti marginali dell'Appennino molisano ». In : *Informatore Agrario* 49, p. 41-41.
- PRONIN, D., S. GEISLITZ, A. BÖRNER et K. A. SCHERF (2020). « Fingerprinting of wheat protein profiles for improved distinction between wheat cultivars and species ». In : *Cereal Chemistry* 97.5, p. 999-1009. DOI : [10.1002/cche.10323](https://doi.org/10.1002/cche.10323).
- RÉMÉSY, C., F. LEENHARDT et A. FARDET (2015). « Donner un nouvel avenir au pain dans le cadre d'une alimentation durable et préventive ». In : *Cahiers de nutrition et de diététique* 50.1, p. 39-46. DOI : [10.1016/j.cnd.2014.07.005](https://doi.org/10.1016/j.cnd.2014.07.005).
- RIGHETTI, L., J. RUBERT, G. GALAVERNA, S. FOLLONI, R. RANIERI, M. STRANSKA-ZACHARIASOVA, J. HAJŠLOVA et C. DALL'ASTA (2016). « Characterization and discrimination of ancient grains : A metabolomics approach ». In : *International Journal of Molecular Sciences* 17.8, p. 1217. DOI : [10.3390/ijms17081217](https://doi.org/10.3390/ijms17081217).
- SALAMINI, F., H. ÖZKAN, A. BRANDOLINI, R. SCHÄFER-PREGL et W. MARTIN (2002). « Genetics and geography of wild cereal domestication in the near east ». In : *Nature Reviews Genetics* 3.6, p. 429-441. DOI : [10.1038/nrg817](https://doi.org/10.1038/nrg817).
- SALUNKHE, A., S. TAMHANKAR, S. TETALI, M. ZAHARIEVA, D. BONNETT, R. TRETOWAN et S. MISRA (2013). « Molecular genetic diversity analysis in emmer wheat (*Triticum dicoccon* Schrank) from India ». In : *Genetic Resources and Crop Evolution* 60, p. 165-174. DOI : [10.1007/s10722-012-9823-9](https://doi.org/10.1007/s10722-012-9823-9).
- SCHERF, K. A. (2019). « Immunoreactive cereal proteins in wheat allergy, non-celiac gluten/wheat sensitivity (NCGS) and celiac disease ». In : *Current Opinion in Food Science* 25, p. 35-41. DOI : [10.1016/j.cofs.2019.02.003](https://doi.org/10.1016/j.cofs.2019.02.003).
- SCHOBER, T. J., S. R. BEAN et M. KUHN (2006). « Gluten proteins from spelt (*Triticum aestivum* ssp. *spelta*) cultivars : A rheological and size-exclusion high-performance liquid chromatography study ». In : *Journal of Cereal Science* 44.2, p. 161-173. DOI : [10.1016/j.jcs.2006.05.007](https://doi.org/10.1016/j.jcs.2006.05.007).
- SHEWRY, P. R. (2018). « Do ancient types of wheat have health benefits compared with modern bread wheat? » In : *Journal of cereal science* 79, p. 469-476. DOI : [10.1016/j.jcs.2017.11.010](https://doi.org/10.1016/j.jcs.2017.11.010).
- SHEWRY, P. R. et S. HEY (2015). « Do "ancient" wheat species differ from modern bread wheat in their contents of bioactive components? » In : *Journal of Cereal Science* 65, p. 236-243. DOI : [10.1016/j.jcs.2015.07.014](https://doi.org/10.1016/j.jcs.2015.07.014).
- STALLKNECHT, G. F., K. GILBERTSON et J. RANNEY (1996). « Alternative wheat cereals as food grains : Einkorn, emmer, spelt, kamut, and triticale ». In : *Progress in new crops* 1996, p. 156-170.

- SUCHOWILSKA, E., M. WIWART, Z. BOREJSZO, D. PACKA, W. KANDLER et R. KRKA (2009). « Discriminant analysis of selected yield components and fatty acid composition of chosen *Triticum monococcum*, *Triticum dicoccum* and *Triticum spelta* accessions ». In : *Journal of Cereal Science* 49.2, p. 310-315. DOI : [10.1016/j.jcs.2008.12.003](https://doi.org/10.1016/j.jcs.2008.12.003).
- VERAVERBEKE, W. S. et J. A. DELCOUR (2002). « Wheat protein composition and properties of wheat glutenin in relation to breadmaking functionality ». In : *Critical reviews in food science and nutrition* 42.3, p. 179-208. DOI : [10.1080/10408690290825510](https://doi.org/10.1080/10408690290825510).
- WIESER, H. et R. KIEFFER (2001). « Correlations of the amount of gluten protein types to the technological properties of wheat flours determined on a micro-scale ». In : *Journal of Cereal Science* 34.1, p. 19-27. DOI : [10.1006/jcrrs.2000.0385](https://doi.org/10.1006/jcrrs.2000.0385).
- WIESER, H., P. KOEHLER et K. A. SCHERF (2023). « Chemistry of wheat gluten proteins : Quantitative composition ». In : *Cereal Chemistry* 100.1, p. 36-55. DOI : [10.1002/cche.10553](https://doi.org/10.1002/cche.10553).
- ZAHARIEVA, M., N. G. AYANA, A. A. HAKIMI, S. C. MISRA et P. MONNEVEUX (2010). « Cultivated emmer wheat (*Triticum dicoccon* Schrank), an old crop with promising future : a review ». In : *Genetic resources and crop evolution* 57, p. 937-962. DOI : [10.1007/s10722-010-9572-6](https://doi.org/10.1007/s10722-010-9572-6).
- ZAHARIEVA, M. et P. MONNEVEUX (2014). « Cultivated einkorn wheat (*Triticum monococcum* L. subsp. *monococcum*) : the long life of a founder crop of agriculture ». In : *Genetic resources and crop evolution* 61, p. 677-706. DOI : [10.1007/s10722-014-0084-7](https://doi.org/10.1007/s10722-014-0084-7).
- ZIEGLER, J. U., D. STEINER, C. F. H. LONGIN, T. WÜRSCHUM, R. M. SCHWEIGERT et R. CARLE (2016). « Wheat and the irritable bowel syndrome—FODMAP levels of modern and ancient species and their retention during bread making ». In : *Journal of Functional Foods* 25, p. 257-266. DOI : [10.1016/j.jff.2016.05.019](https://doi.org/10.1016/j.jff.2016.05.019).
- ZOMMITA, S., G. G. YILDIZ, N. ZENCİRCİ, Ö. ÖZBEK, Ö. C. ÜNÜVAR et E. S. ÜNLÜ (2023). « Assessment of genetic diversity based on agro-morphological traits and ISSR molecular markers in einkorn wheat (*Triticum monococcum* ssp. *monococcum*) landrace populations from Turkey ». In : *International Journal of Secondary Metabolite* 10.1, p. 86-105. DOI : [10.21448/ijsm.1084853](https://doi.org/10.21448/ijsm.1084853).

Démarche de recherche

Contenu

3.1	Introduction	86
3.2	Le montage du projet de thèse	87
3.3	L'enquête de terrain	90
3.4	Le collectif multi-acteur.trice.s	111
3.5	Le dispositif expérimental 2021-2022	130
3.6	Bibliographie	150



Parcelles expérimentales au CRBA, recouvertes par un voile P17 après les semis 2021.

3.1 Introduction

Comme mentionné dans le chapitre 1, les objectifs globaux¹ de la thèse avaient été déterminés avant son démarrage. Ainsi, nous avons convenu que la thèse explorerait des aspects agronomiques et nutritionnels de céréales marginales, par une approche participative, et qu'elle serait géographiquement ancrée dans la région lyonnaise (100 km autour de la métropole de Lyon). Toutefois, les espèces sur lesquelles porterait la recherche et les questions précises qu'elle adresserait n'avaient pas été totalement définies. En outre, peu de partenariats avaient été établis avec des acteur.trice.s non académiques.

De plus, notre intention était d'engager dès les premières phases de la recherche des acteur.trice.s non académiques résidant dans la région lyonnaise et présentant un intérêt pour les thématiques explorées. Nous souhaitons que, dans la mesure du possible, la définition des questions de recherche découlent d'un processus participatif. Etant donné que les paysan.ne.s sont le fondement de l'insertion de ressources génétiques marginales dans les systèmes agro-alimentaires, et que le projet incluait un volet agronomique, il nous a semblé pertinent de prioriser une collaboration avec ces professionnel.le.s. En parallèle, nous avons également échangé avec des personnes spécifiquement intéressées par les aspects nutritionnels des blés vêtus.

Dans ce chapitre, je présente comment nous avons constitué et animé, sans méthode définie au préalable, un collectif multi-acteur.trice.s, et comment nous avons élaboré les questions de recherche de la thèse. Je présente également le dispositif expérimental mis en place en 2021-2022 (D21-22), sur lequel s'est basée la thèse. Outre sa contribution à la compréhension des chapitres 4, 5 et 6, ce chapitre, purement descriptif, vise à fournir une base au collectif pour revenir sur la mise en place et sur certaines décisions du projet. La description du processus de recherche mis en œuvre présentée ci-dessous fera l'objet d'une analyse réflexive dans le chapitre 6.

La deuxième section (3.2) de ce chapitre revient sur l'origine du projet de thèse. Dans la troisième section (3.3), je présente une enquête de terrain que nous avons menée dès l'automne 2020 et qui visait, entre autres, à établir des collaborations avec des paysan.ne.s. Dans une quatrième section (3.4), j'introduis le collectif multi-acteur.trice.s et décris son organisation autour de ma thèse. Enfin, dans la section 3.5, je présente le dispositif expérimental (D21-22), dont sont issus les principaux résultats de cette thèse.

1. Il s'agissait de : (i) évaluer une (des) espèce(s) de céréales marginales d'intérêt pour les paysan.ne.s en région lyonnaise en fonction de critères agronomiques et nutritionnels choisis de façon participative et (ii) créer du lien entre différent.e.s acteur.trice.s s'intéressant à cette (ces) espèce(s) de céréales marginales sur le territoire, afin d'initier une collaboration sur le long terme.

3.2 Le montage du projet de thèse

Comme précisé précédemment, cette thèse fait partie d'un sous-projet, centré sur les céréales, du programme ANS² initié par Marie-Thérèse Charreyre en 2019. Contrairement à d'autres projets de recherche participative qui émergent de collectifs de citoyen.ne.s (STASSART et al. 2008), le programme ANS et mon projet de thèse sont issus d'initiatives qui émanent principalement de la recherche. D'après ma compréhension, le programme ANS est le résultat de l'initiative de Marie-Thérèse. Sa conception a néanmoins été influencée par une série d'échanges avec divers acteur.trice.s académiques et non académiques.

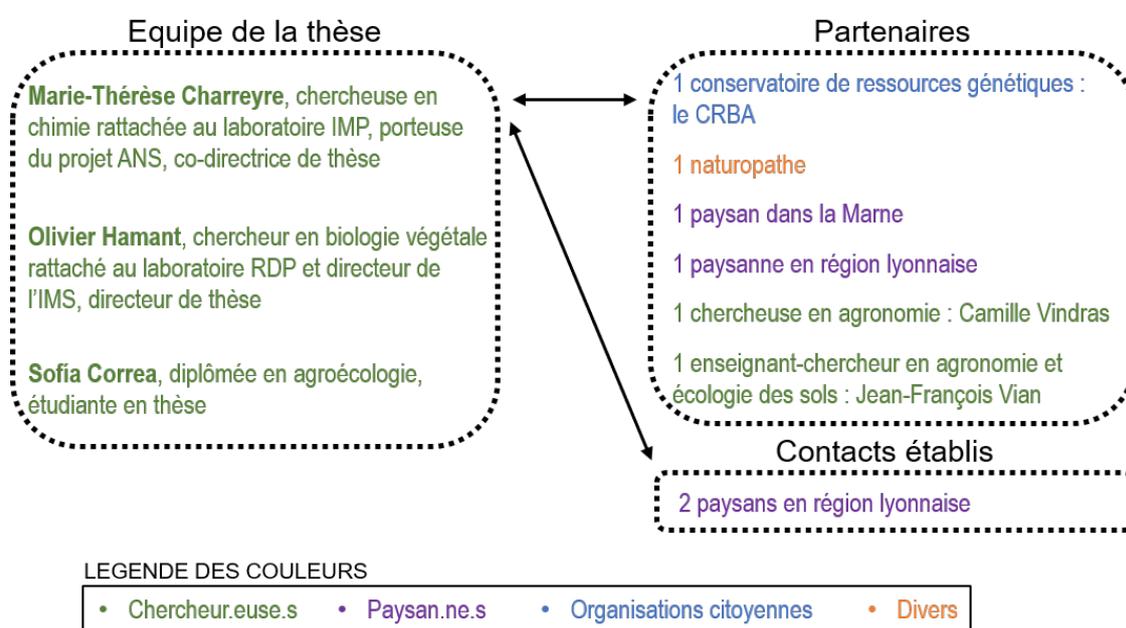


FIGURE 3.1 – Equipe de recherche au cœur de la thèse, partenaires du sous-projet « Céréales » du programme Agriculture-Nutrition-Santé (ANS) et prises de contacts établis avant le début de la thèse. A ce stade, les différents échanges passaient principalement par Marie-Thérèse. IMP : Ingénierie des Matériaux Polymères, RDP : Reproduction et Développement des Plantes, IMS : Institut Michel Serres.

Avant le démarrage de ma thèse, le programme ANS comportait deux sous-projets : l'un portant sur les cucurbitacées et l'autre sur les « épeautres »³. En ce qui concerne le projet sur les « épeautres », une collaboration avait été initiée avec le Centre de Ressources de Botanique Appliquée (CRBA) localisé à Charly (69390), ainsi qu'avec une naturopathe habitant la région de Lyon. Des échanges avaient également eu lieu avec un enseignant-chercheur en agronomie et écologie des sols, de l'Institut supérieur d'agriculture Rhône-Alpes (ISARA) (Jean-François Vian), une cher-

2. Le programme ANS s'intéresse à des enjeux de santé en lien avec l'alimentation et l'agriculture, par des méthodes de recherche inter, transdisciplinaires et participatives.

3. L'En et l'Am sont aussi connus sous le nom de petit et moyen épeautre, respectivement. Au début de ma thèse, nous utilisions le terme « épeautres » pour faire référence aux blés vêtus.

cheuse en agronomie (Camille Vindras)⁴, un chercheur en biologie végétale (Olivier Hamant)⁵ et une paysanne. Des discussions préliminaires avaient été entamées avec ces acteur.trice.s, au sujet des orientations du sous-projet (et donc de ma thèse). De plus, un paysan dans la Marne (51) avait cultivé une variété d'En, une variété de GE et une variété de BT au cours de la saison 2019-2020, dans le but de mener des analyses nutritionnelles sur les grains récoltés. Enfin, le contact avait été établi avec deux autres paysans installés en région lyonnaise (figure 3.1).

Suite à ma rencontre avec Marie-Thérèse, nous décidons d'écrire un projet de thèse sur les céréales marginales, axé principalement sur les « épeautres ». Nous associons Olivier Hamant, et quelques mois plus tard, j'obtiens un contrat doctoral auprès de l'Ecole Urbaine de Lyon. Je commence ainsi ma thèse, en octobre 2020, co-dirigée par Marie-Thérèse (chimiste, à l'Unité Mixte de Recherche Ingénierie des Matériaux Polymères ; UMR IMP ; à Villeurbanne) et Olivier (biologiste, à l'UMR Reproduction et Développement des Plantes ; RDP ; à Lyon).

Initialement, nous avions prévu un projet d'une durée de quatre ans. Toutefois, en raison de l'absence de financements et de motifs personnels, nous avons décidé, en milieu de deuxième année, de réduire la durée de la thèse à trois ans. Aussi, en milieu de thèse, Mathieu Thomas, généticien des populations dans l'UMR Amélioration Génétique et Adaptation des Plantes méditerranéennes et tropicales (AGAP) à Montpellier et engagé dans des projets de recherche participative, a rejoint mon encadrement. J'ai moi-même déménagé de Lyon à Montpellier, afin de poursuivre ma recherche dans des conditions techniques et scientifiques plus adaptées à mon projet, ainsi que pour des raisons personnelles.

Dès sa conception, et en raison de son ancrage dans le programme ANS, le projet de thèse portait sur une caractérisation agronomique et nutritionnelle de céréales marginales, notamment d'« épeautres ». Lors de la rédaction du projet, j'ai fait en sorte de le situer dans le contexte de la réintégration de biodiversité cultivée dans les systèmes agro-alimentaires. A ce stade, bien que nous envisagions déjà de travailler sur des blés vêtus, nous n'avions pas déterminé quelles espèces spécifiques seraient incluses dans notre recherche. Nous avons également convenu que, si les « épeautres » ne suscitaient pas d'intérêt parmi les acteurs non académiques associés, nous ajusterions le projet en fonction de leurs préférences.

De plus, dans une optique de contribuer au renforcement de pratiques agroécologiques et de créer des liens sociaux sur le territoire, nous partageons avec mes directeur.trice.s la volonté que

4. Au début de la thèse, Camille Vindras était rattachée à l'Institut Technique de l'Agriculture Biologique. Elle est maintenant chercheuse indépendante.

5. Aussi directeur de l'Institut Michel Serres (IMS).

la recherche menée intéresse des acteur.trice.s non académiques, en particulier des paysan.ne.s. Malgré des avis divergents au sein de l'équipe de recherche, nous avons initialement choisi d'impliquer des paysan.ne.s à titre individuel, plutôt que de passer par un collectif déjà existant. Ce choix était motivé par le souhait d'ouvrir la possibilité de participer à tou.te.s, sans devoir nécessairement faire partie d'une structure donnée. Dans la section suivante, je présente une enquête de terrain, qui, parmi d'autres buts, avait pour objectif d'associer des paysan.ne.s au projet de recherche. Dans les sections ultérieures, je décris le fonctionnement du collectif mis en place.

Encadré 3.2.1 - Le choix du vocabulaire

Dès le montage du projet de thèse, et probablement parce qu'il était utilisé dans le programme ANS, nous avons employé le terme de recherche « **participative** » pour faire référence à l'implication d'acteur.trice.s non académiques dans le processus de recherche. Le choix de ce terme n'a pas fait l'objet de discussions.

Dans le cadre de ma thèse, j'ai choisi de parler de « **paysan.ne.s** » plutôt que d'« agriculteur.trice.s ». Le terme « paysannerie », autrefois connoté négativement, est aujourd'hui employé pour désigner un type d'agriculture ancré dans un territoire, relativement indépendant des marchés internationaux, et fondé sur des savoir-faire humains (VAN DER PLOEG 2014). Ce terme est couramment adopté par des collectifs tels que le Réseau Semences Paysannes ou encore la Via Campesina, pour se distinguer d'un type d'agriculture entrepreneurial. Puisque ma recherche s'aligne avec les revendications de ces collectifs, et que je m'attendais à ce qu'elle intéresse des « paysan.ne.s » plutôt que des « agriculteur.trice.s », j'ai préféré désigner les cultivateur.trice.s associé.e.s à ma thèse par ce terme.

Enfin, par souci de clarté, je distingue dans ce manuscrit la « **collaboration** » de la « **contribution** ». Les « **collaborateur.trice.s** » se réfèrent aux individus ou entités qui participent aux décisions concernant l'orientation du projet, et dont l'implication est en général à long terme. Les « **collaborateur.trice.s** » travaillent donc ensemble en vue d'atteindre un objectif commun. En revanche, les « **contributeur.trice.s** » sont des personnes ou des organismes avec lesquels une relation est établie pour traiter une thématique spécifique ou pour apporter une aide méthodologique.

3.3 L'enquête de terrain

La première étape de ma thèse a consisté à mener une enquête de terrain auprès de cultivateur.trice.s installé.e.s dans la région lyonnaise. Cette enquête avait trois grands objectifs :

- (i) Obtenir une meilleure compréhension de la situation actuelle de la culture des céréales « marginales »⁶, avec un intérêt particulier pour les blés « marginaux », dans la région d'étude.
- (ii) Vérifier que les céréales marginales, en particulier les blés vêtus, intéressent bien les paysan.ne.s et commencer à identifier leurs intérêts et questionnements concernant ces blés.
- (iii) Présenter le projet de recherche et proposer aux paysan.ne.s intéressé.e.s d'y participer.

Cette enquête s'est déroulée en deux phases distinctes. La première phase, qui a eu lieu sur quelques semaines d'octobre à décembre 2020, a été menée par un groupe de quatre étudiant.e.s (Jean Barbançon, Léon Pahud, Mathilde Maufrais et Magali Poupard) en dernière année à l'ISARA, dans le contexte d'une « étude longue ». Ce travail a été encadré par Marie-Thérèse, Jean-François Vian, et moi-même. J'ai ensuite conduit la deuxième phase en janvier et février 2021. Ces deux étapes sont présentées séparément.

3.3.1 Première phase réalisée par des étudiant.e.s de l'ISARA

La première phase de l'enquête a été menée auprès de douze fermes localisées dans un rayon de 100 km autour de la métropole de Lyon. En raison des contraintes de temps imposées par l'ISARA, des entretiens menés pendant la période des semis de blé, et des restrictions liées à la Covid-19, les déplacements sur le terrain ont dû être limités. Ces conditions nous ont empêché.e.s d'effectuer une investigation exhaustive auprès d'un grand nombre de producteur.trice.s de céréales dans la région d'intérêt. Par conséquent, nous avons choisi de nous concentrer sur des paysan.ne.s susceptibles de présenter un intérêt pour des céréales marginales. Ces dernier.ère.s ont en partie été contacté.e.s via l'Association régionale pour le développement de l'emploi agricole et rural Auvergne-Rhône-Alpes (ARDEAR AURA). Certains contacts ont également été pris via le CRBA, l'ISARA, ainsi que via des contacts précédemment établis par Marie-Thérèse et Camille Vindras.

6. Nous entendons par « marginales » des espèces ou variétés de céréales peu cultivées et donc peu consommées en région lyonnaise (telles que les NUS).

Au moment où l'enquête a eu lieu, les espèces de céréales sur lesquelles le projet de thèse porterait n'avaient été définitivement sélectionnées. Malgré un intérêt de notre part pour les blés vêtus, nous gardions la possibilité de moduler le nombre et le choix des espèces étudiées (ou de changer d'objet d'étude) en fonction des résultats de l'enquête⁷. Nous n'avions pas, non plus, déterminé de terme pour désigner l'ensemble des espèces envisageables pour notre travail. Ainsi, pour la première phase de l'enquête de terrain, les étudiant.e.s de l'ISARA ont décidé d'employer le terme « céréales population »⁸. Néanmoins, il.elle.s se sont principalement intéressé.e.s aux « blés population », donc à des variétés population principalement de BT. Un des objectifs secondaires de leur étude a d'ailleurs porté sur la terminologie employée par les paysan.ne.s pour désigner ces espèces et/ou variétés de céréales.

Cette première phase de l'enquête a été menée à travers des entretiens semi-directifs (le plus souvent, deux entretiens par ferme). Le guide d'entretien utilisé est présenté en annexe A. L'étude s'est principalement focalisée sur :

- (1) Décrire les trajectoires des paysan.ne.s cultivant ou intéressé.e.s par les « céréales population », identifier les réseaux dont il.elle.s font partie et décrire les principales caractéristiques de leurs fermes.
- (2) Comprendre la place des « céréales population » dans ces fermes, la motivation des paysan.ne.s pour leur culture, ainsi que les pratiques associées à ces céréales. Plus précisément, des questions ont été posées sur les espèces et les variétés cultivées, sur l'approvisionnement en semences et le type de sélection effectuée, sur les itinéraires techniques associés à ces céréales et sur les moyens de stockage, de transformation et de commercialisation.

Deux objectifs secondaires pour le travail des étudiant.e.s, mais importants pour le projet de thèse, ont également été identifiés :

- (a) Entamer une réflexion sur la terminologie à adopter au sein du projet de recherche pour faire référence aux espèces et/ou variétés de céréales ciblées.
- (b) Identifier des verrous existants par rapport au développement des « céréales population » sur le territoire et des filières associées. Aussi, l'avis des enquêté.e.s par rapport à la mise en place d'un projet de recherche sur des « céréales population », englobant des blés vêtus, a été demandé.

7. A condition de rester sur des espèces et/ou variétés de céréales peu cultivées, peu consommées, et présentant un intérêt potentiel dans la région de Lyon

8. Par « céréales population », on entend toutes les variétés paysannes génétiquement hétérogènes, quelle que soit l'espèce de céréale.

L'enquête menée par les étudiant.e.s de l'ISARA dépasse le cadre des blés vêtus. Ainsi, je ne présente ci-dessous que les principales conclusions, issues du rapport des étudiant.e.s (BARBACON et al. 2020).

Par rapport aux parcours des douze enquêté.e.s, la majorité d'entre eux.elles a suivi une formation agricole. Seulement quatre se sont installé.e.s après une reconversion. Au-delà des réseaux par lesquels il.elle.s commercialisent leurs produits, les paysan.ne.s enquêté.e.s font partie de divers groupements. Parmi ceux-ci, les Coopératives d'Utilisation de Matériel Agricole (CUMA), le RSP et les Associations Départementales pour le Développement de l'Emploi Agricole et Rural (ADDEAR), qui sont regroupées au sein de l'ARDEAR AURA sont les plus fréquemment mentionnés.

Toutes les fermes enquêtées sont en agriculture biologique. Six fermes sont en polyculture-élevage, cinq fermes font uniquement des grandes cultures, et une seule ferme combine les grandes cultures avec du maraîchage. Il s'agit globalement de petites structures, avec dix fermes ayant une surface agricole utile (SAU) inférieure à 100 ha (la surface moyenne des exploitations céréalières en France était estimée à 96 ha en 2020 selon AGRESTE 2022), et seules quatre fonctionnant avec plus de trois unités de travail humain (UTH).

Par rapport aux espèces de « céréales population », les douze paysan.ne.s cultivent des variétés population de BT. Deux cultivent également des variétés population de maïs, tandis que trois autres cultivent de l'En. Parmi ces dernier.ère.s, un paysan cultive à la fois de l'En, de l'Am et du blé dur. Les motivations pour la culture de ces céréales sont très diverses. Les critères évoqués concernent principalement des intérêts agronomiques, des considérations politiques (autonomie semencière, militantisme, etc.), des intérêts nutritionnels et organoleptiques et l'aspect esthétique des céréales.

Pour s'approvisionner en semences, les paysan.ne.s enquêté.e.s passent principalement par les réseaux mentionnés précédemment, ainsi que par des échanges informels. Certain.e.s d'entre eux.elles ont également recours aux collections de l'INRAE. Ensuite, il.elle.s cultivent tou.te.s leurs variétés de BT en mélanges, composés soit uniquement de variétés population, soit de variétés population et de variétés modernes. La plupart des enquêté.e.s veille à préserver des niveaux de diversité élevés dans leurs mélanges. Néanmoins, seulement trois d'entre eux.elles disent exercer une sélection. Les critères de sélection mentionnés sont la résistance à la verse, la résistance aux maladies et l'aspect des grains. Enfin, bien que les itinéraires techniques sont très divers, on

retrouve dans l'ensemble des rotations longues, pouvant s'étendre jusqu'à douze ans.

L'ensemble des paysan.ne.s interrogé.e.s effectue la mouture de leurs récoltes, avec un moulin Astrié. Huit d'entre eux.elles vont jusqu'à la transformation en produits finis, principalement du pain. Concernant les circuits de vente, il.elle.s privilégient tou.te.s les circuits courts. Les phases de transformation effectuées à la ferme renforcent l'autonomie des cultivateur.trice.s, et augmentent la valeur ajoutée des produits commercialisés. Cette stratégie contribue à la viabilité économique de la culture de « céréales population ».

Les principaux verrous évoqués concernant la culture des céréales étudiées sont :

- L'accès au matériel nécessaire, notamment à une décortiqueuse pour les blés vêtus.
- La difficulté de l'approvisionnement en semences liée à la législation en vigueur. Actuellement, pour les variétés non inscrites au catalogue, seuls des échanges en vue d'un usage non commercial, ou pour des espèces non réglementées sont autorisés (RSP 2021).
- Le manque de formations et de connaissances sur ces espèces et/ou variétés.

Enfin, cette première phase d'enquête n'a pas débouché sur une terminologie à employer pour désigner les céréales ciblées. Ceci est probablement dû à la nature très large de l'objet d'étude (les « céréales population ») choisi par les étudiant.e.s. La réflexion sur la terminologie s'est poursuivie dans la seconde phase de l'enquête et pendant la mise en place du collectif de recherche.

En conclusion, l'enquête réalisée par mes étudiant.e.s de l'ISARA suggère que, malgré un intérêt existant auprès de paysan.ne.s sur le territoire, les espèces de céréales et notamment de blé autres que le BT sont très peu cultivées dans la région de Lyon. Cette première étude permet également de faire ressortir les principales caractéristiques des paysan.ne.s intéressé.e.s par des espèces de céréales plus marginales. Par ailleurs, tou.te.s les paysan.ne.s interrogé.e.s ont exprimé leur intérêt par rapport à un projet de recherche sur les « céréales population », comprenant des espèces de blés vêtus. Cinq d'entre eux.elles ont manifesté le désir de s'investir dans le projet de recherche. Bien que l'étude menée par les étudiant.e.s de l'ISARA ait permis de recueillir de nombreuses informations sur la présence blés marginaux en région lyonnaise, elle ne permet pas de dresser un état des lieux exhaustif de leur culture. En effet, elle est limitée par la taille de l'échantillon des enquêté.e.s (douze cultivateur.trice.s) et par son manque de représentativité par rapport à l'ensemble des agriculteur.trice.s de la région. De plus, le choix de travailler sur les « céréales population » a centré les entretiens principalement sur les variétés population de BT,

négligeant d'autres espèces de céréales.

3.3.2 Deuxième phase réalisée par l'équipe de recherche

La deuxième étape de l'enquête de terrain a consisté à revenir vers les cinq paysan.ne.s intéressé.e.s pour participer au projet de recherche. Deux autres cultivateur.trice.s, qui ne faisaient pas partie des douze enquêté.e.s, ont également été inclu.e.s. Aussi, deux sociétés commerciales revendant des blés vêtus (ci-dessous appelées « distributeurs ») et trois naturopathes recommandant la consommation de blés vêtus à leurs patient.e.s ont été interrogé.e.s. Cette seconde phase a été menée à l'aide d'entretiens semi-directifs (un guide d'entretien par type d'acteur, disponibles en annexe B), et d'un poster présentant les grandes lignes du projet de thèse (figure 3.2). Ce poster a servi de support pour présenter le projet de recherche de manière graphique, et ainsi favoriser l'émergence de remarques de la part des personnes interrogées. Pour cette deuxième phase d'enquête, nous avons choisi d'orienter les discussions sur les « céréales marginales du genre *Triticum* »⁹, et en particulier sur les blés vêtus.

Pour faire référence aux blés vêtus, nous avons employé le terme « épeautres », en explicitant que cela incluait l'En, l'Am et le GE. Les personnes interrogées ont été sollicitées sur la pertinence d'utiliser ce terme.

Les entretiens réalisés auprès des sept paysan.ne.s au cours de cette deuxième phase avaient trois objectifs :

- (1) Compléter les informations manquantes sur les trajectoires des paysan.ne.s interrogé.e.s lors de la première phase et sur leurs fermes. En particulier, les informations concernant la culture d'espèces de blé autres que le BT, et surtout de blés vêtus ont été approfondies (variétés cultivées et/ou conservées, origine des semences, pratiques associées à ces céréales, etc.).
- (2) Questionner la motivation pour la culture de « céréales marginales », en particulier pour les blés vêtus. Les connaissances et hypothèses par rapport à ces céréales ont également été interrogées. La terminologie à employer pour désigner l'ensemble des espèces et/ou variétés à considérer a aussi été abordée, en posant notamment la question de la vision/définition du terme « épeautres ».

9. Ce choix permettait de centrer l'enquête sur les blés. Il permet de prendre en compte à la fois des espèces marginales telles que les blés vêtus, et des variétés marginales comme les variétés population de BT ou de blé dur.

- (3) Présenter le projet de thèse à l'aide d'un poster, et recueillir les premières remarques des personnes interrogées. Cette présentation a également permis de confirmer la volonté des paysan.ne.s de s'impliquer dans le projet, et plus concrètement, d'être réuni.e.s lors d'une première réunion de travail.

Les entretiens conduits auprès des naturopathes et des distributeurs de blés vêtus avaient quant-à-eux pour principal objectif de comprendre les motivations des enquêté.e.s pour recommander la consommation de blés vêtus. Ces entretiens visaient ainsi à approfondir nos connaissances et les possibles hypothèses concernant l'aspect nutritionnel de ces blés. Le projet de recherche a également été présenté à ces enquêté.e.s, mais en raison de contraintes géographiques, seule la naturopathe habitant en région lyonnaise (et déjà impliquée dans le projet avant le début de la thèse) a continué de s'impliquer activement.

A la fin de cette deuxième étape d'enquête, six des sept paysan.ne.s interrogé.e.s se sont investi.e.s dans le projet de recherche. Par simplicité, je ne parlerai que de ces six cultivateur.trice.s. Dans les deux sous-sections suivantes, je présente d'abord les résultats issus des entretiens auprès des paysan.ne.s, et ensuite, ceux issus des entretiens avec les naturopathes et les distributeurs de blés vêtus.

Dans la suite du manuscrit, les six fermes qui ont participé au projet sont nommées par les acronymes suivants : CD, CM, HP&DM, JPC, MPR&PB, SR.



Projet de recherche participative sur les céréales marginales du genre *Triticum*

Thèse de Sofia CORREA, co-dirigée par Olivier HAMANT (RDP) et Marie-Thérèse CHARREYRE (IMP)

Contexte

↘ Biodiversité cultivée
 ↘ Robustesse des céréales cultivées
 ↗ Maladies en lien avec l'alimentation

Problématique globale et provisoire

Comment la culture de céréales marginales du genre *Triticum* peut-elle contribuer à améliorer la robustesse des éco-agrosystèmes et la qualité de l'alimentation sur le territoire lyonnais ?

Objectifs

- ↗ biodiversité cultivée au sein des céréales du genre *Triticum* en région lyonnaise
- Identifier des variétés d'intérêt selon des critères choisis de façon participative (agronomiques, nutritionnels, gustatifs, etc) au sein des fermes où elles pourraient être cultivées
- Créer du lien entre différents acteur.trice.s

Stratégie

Science participative



Sur des espèces de « blés » marginales



Engrain (*Triticum monococcum*)

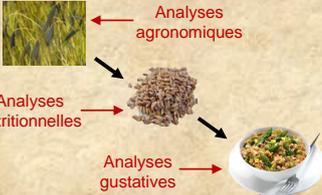


Amidonnier (*Triticum diccoccum*)



Grand épeautre (*Triticum spelta*)

Une approche du champ à l'assiette



Etapes

Octobre 2020 – Octobre 2021

- Etablissement des partenariats
- Enquête de terrain sur les céréales marginales vues par différents partenaires
- Dispositif expérimental exploratoire (au CRBA)
- Analyses nutritionnelles préliminaires
- Définition collaborative des questions de recherche et des moyens pour y répondre (expérimentations, analyses)

Octobre 2021 – Octobre 2022

- Dispositif expérimental 1
- Suite enquête de terrain

Octobre 2022 – Octobre 2023

- Dispositif expérimental 2
- Suite enquête de terrain



Moyens

- 🌾 **Semences** : CRBA, paysan.ne.s, autres (maisons de semences, conservatoires, etc) ?
- 🌱 **Terrain pour l'expérimentation** : ferme Melchior à Charly (ferme expérimentale du CRBA), fermes des paysan.ne.s ?
- 🔬 **Analyses agronomiques** : scientifiques, paysan.ne.s ?
- 🍷 **Analyses nutritionnelles** :
 - Globales : prestataire d'analyses
 - Lipides : plateforme de lipidomique de l'INSA de Lyon
 - Protéines : laboratoire IMP à Lyon
 - Micronutriments : laboratoire de métabolomique européen (à définir)
- 🍴 **Analyses gustatives** : étudiant.e.s en neurosciences et/ou en transformation alimentaire, restaurateur.trice.s
- 💰 **Financements** : publics, « open-science »

Partenaires

- 👤 Paysan.ne.s
- 👤 Acteur.trice.s de la santé (nutritionnistes essentiellement)
- 🏠 CRBA : Centre de Ressources de Botanique Appliquée
- 👤 Scientifiques et instituts techniques :
 - Laboratoire RDP : Reproduction et Développement des Plantes
 - Laboratoire IMP : Ingénierie des Matériaux Polymères
 - INSA : Institut National des Sciences Appliquées
 - ISARA : Institut Supérieur d'Agriculture Rhône-Alpes
 - ITAB : Institut de l'Agriculture et de l'Alimentation Biologiques
 - Laboratoire de métabolomique européen (à définir)
- 👤 Restaurateur.trice.s
- 👤 Autres ?

FIGURE 3.2 – Poster utilisé pour présenter le projet de thèse lors de la deuxième phase de l'enquête de terrain.

3.3.2.1 Entretiens auprès des paysan.ne.s

3.3.2.1.1 Profils des six fermes associées Comme attendu, les profils des six paysan.ne.s participant au projet de recherche et les caractéristiques de leurs fermes correspondent à ceux décrits par les étudiant.e.s de l'ISARA. Seul.e.s deux d'entre eux.elles sont issu.e.s de familles d'agriculteur.trice.s. Néanmoins, cinq ont suivi des formations agricoles. Cinq enquêté.e.s font partie de réseaux tels que les ADDEAR/ARDEAR, la Confédération Paysanne, des groupements d'intérêt économique et environnemental (GIEE), des CUMA, et diverses associations. Concernant les fermes, il s'agit de petites structures, avec des SAU variant de 17 à 85 ha et des UTH compris entre 1 et 5. Toutes les fermes sont en agriculture biologique et trois d'entre elles sont en polyculture élevage. Tou.te.s les paysan.ne.s interrogé.e.s font la mouture de leurs céréales (sur meule de pierre avec un moulin Astrié) et seul l'un d'entre eux n'est pas boulanger lui-même. Il est néanmoins associé à des boulanger.ère.s à qui il vend sa farine. Les cinq autres paysan.ne.s transforment leur farine en pain (tableau 3.1). La plupart des paysan.ne.s-boulangier.ère.s font du pain de BT à partir de farine T80 (dite « semi-complète ») et tou.te.s réalisent une fermentation au levain naturel et une cuisson dans un four à bois. Trois d'entre eux.elles fabriquent également d'autres produits à partir de leurs blés tels que des pâtes, des pâtisseries ou encore des brioches. Enfin, il.elle.s commercialisent tou.te.s leurs produits en vente directe ou en circuits courts, avec, au maximum, un intermédiaire.

Par rapport aux blés vêtus, deux des paysan.ne.s interrogé.e.s cultivent de l'En et un d'entre eux cultive à la fois de l'En et de l'Am (tableau 3.1). Néanmoins, les surfaces accordées aux blés vêtus sont relativement faibles, notamment par rapport à celles occupées par le BT. Les origines des semences sont globalement les mêmes que pour le BT : elles sont principalement issues d'échanges entre paysan.ne.s, informels ou organisés par des réseaux tels que le RSP ou l'ARDEAR. Certain.e.s variétés sont également issues des conservatoires de l'INRAE. Bien que deux paysan.ne.s cultivent les blés vêtus en mélange, ceux-ci sont composés de maximum trois variétés. Par ailleurs, la stratégie de gestion des mélanges (maintien de diversité génétique et sélection) paraît moins élaborée que pour les mélanges de BT. Les itinéraires techniques sont aussi globalement les mêmes pour les blés vêtus que pour le blé tendre. La principale différence concerne les densités de semis (en kg/ha), qui sont inférieures pour l'En par rapport au BT chez CD et chez MPR&PB, mais qui sont supérieures pour l'En et pour l'Am par rapport au BT chez SR. De plus, l'En est souvent placé après le BT dans les rotations. Concernant la commercialisation des blés vêtus, les trois paysan.ne.s qui cultivent de l'En le commercialisent sous forme de pain.

Le seul paysan qui cultive de l'Am le vend sous forme de pâtes. Aussi, il est intéressant de noter que cinq des six paysan.ne interrogé.e.s ont des blés vêtus en microparcelles. Ces microparcelles ont divers objectifs dans chacune de fermes : la collection de variétés, l'évaluation de variétés, la multiplication et la conservation de variétés en pur afin de les intégrer dans des mélanges. D'autres espèces de blés tels que le blé poulard ou le blé dur sont également présentes dans ces microparcelles. Enfin, parmi les autres céréales cultivées par les paysan.ne.s interrogé.e.s figurent le seigle (par cinq paysan.ne.s), l'orge (par deux paysan.ne.s), le maïs (par un.e paysan.ne) et le sorgho (par un.e paysan.ne).

TABLEAU 3.1 – Cultures de blés au sein des six fermes participant au projet de recherche. BT : blé tendre, En : engrain, Am : amidonnier, GE : grand épeautre, BD : blé dur, BP : blé poulard. Fond vert : BT, fond bleu : En, fond rouge : Am, fond jaune : GE.

Début du tableau 3.1						
Ferme	CD	CM	HP&DM	JPC	MPR&PB	SR
Culture de BT	2 mélanges de 15 à 20 et de 25 à 30 variétés population.	1 mélange de 5 variétés modernes.	1 mélange d'une centaine de variétés population.	1 mélange de 4 variétés population.	1 mélange de 4 variétés modernes + reliquats de variétés population.	1 mélange d'une dizaine de variétés population.
Surface de BT (ha)	12	5	NA	NA	10	6
Variétés de BT	NA, certaines variétés issues de programmes de sélection participative.	Togano, Filou, Arenzo, 2 autres.	NA, certaines variétés venant de chez CD et de chez SR.	Rouge de Bordeaux, Barbu du mâconnais, « Autrichien », Alauda.	Renan, Togano, Apache, Armstrong, Pireneo, reliquats de variétés population de chez CD.	Carossela, Cucceta, Barbu Milanais, Saissette de Provence, Touzelles, Meunier d'Apt, Bardot, Bladette.
Choix des variétés de BT	Mélange 1 : adaptation au terrain. Mélange 2 : résistance à la verse et rendement.	NA	NA	Adaptation au terrain.	Adaptation au climat, à l'altitude, résistance aux maladies, etc.	Résistance à la verse, aux maladies, au gel, couleur et forme des grains.
Gestion des mélanges	Mélange 1 : sélection massale dans le mélange + rajout de semences de variétés maintenues en pur en microparcelles tous les 2 ans. Mélange 2 : NA.	Sélection massale dans le mélange + compte rajouter de la diversité avec les variétés population en collection. Pas de stratégie de sélection définie car peur de perdre de la diversité.	Sélection massale dans le mélange.	Sélection massale dans le mélange. Critères de sélection : résistance à la verse, recouvrement, adaptation au terroir.	Sélection massale dans le mélange. Critère de sélection : recouvrement.	Volonté de sélectionner en fonction du tallage et de la facilité de panification.
Densité de semis du BT (kg/ha)	150	150	150	150	200	140

Continuation du tableau 3.1						
Ferme	CD	CM	HP&DM	JPC	MPR&PB	SR
Transformation du BT	Pain (à partir de farine T80), brioches, biscuits sucrés et salés.	Farine (T110 et T150), pain.	Pain (à partir de farine T80), paille.	Farine (T65, T80, T90, et T150).	Pain, brioches, pâtisseries.	Pain (à partir de farine T80).
Culture de En	3 variétés.	/	/	/	1 variété.	1 mélange de 2 variétés.
Surface de En (ha)	1	/	/	/	10	1
Variétés de En	Noir de Turquie, petit épeautre de Haute Provence, de Bulgarie.	/	/	/	Variété allemande au nom inconnu.	Petit épeautre de Haute Provence, variété au nom inconnu.
Gestion des mélanges.	NA	/	/	/	/	Sélection massale dans le mélange.
Densité de semis de l'En (kg/ha)	100	/	/	/	160	200
Transformation de l'En	Pain	/	/	/	Pain.	Pain.
Culture de Am	/	/	/	/	/	1 mélange de 2 variétés.
Surface de Am (ha)	/	/	/	/	/	2
Variétés de Am	/	/	/	/	/	Noir, Blanc.
Gestion des mélanges	/	/	/	/	/	Sélection massale dans le mélange.
Densité de semis de l'Am (kg/ha)	100 (microparcelles)	/	/	/	/	160
Transformation de l'Am	/	/	/	/	/	Pâtes.
Culture de GE	/	/	/	/	/	/
Densité de semis du GE (kg/ha)	150 (microparcelles)	/	/	/	/	/
Décorticage	Décortiqueuse partagée à travers une CUMA.	/	/	/	NA	Fait par une agricultrice vers Clermont-Ferrand.
Autres espèces de blé	/	/	/	/	/	Blé dur
Espèces de blé en micro-parcelles	BT, BP, BD, En, Am, GE.	BT, BP, En, GE.	En, Am, GE.	BT, BP, En.	/	BT, BP, En, Am.
Objectif(s) des microparcelles	Collection, enrichissement des mélanges.	Multiplication, collection, enrichissement des mélanges.	Evaluation de nouvelles espèces et variétés.	Collection, conservation en pur des variétés du mélange de BT.	/	Multiplication.

Fin du tableau 3.1

3.3.2.1.2 Intérêts et connaissances par rapport aux blés vêtus Malgré le fait qu'ils soient peu cultivés, la présence de blés vêtus dans des microparcelles au sein de cinq fermes témoigne d'un intérêt pour ces espèces de la part des paysan.ne.s interrogé.e.s. Une forte motivation par rapport à la culture de ces blés est effectivement ressortie des discussions. Globalement, que ce soit pour les variétés populations de BT ou pour les espèces de blés vêtus, les motivations portaient sur l'esthétique des variétés, sur leurs intérêts agronomiques (rusticité, adaptation à des conditions de culture difficiles et à l'agriculture biologique), sur une volonté d'autonomie économique, et parfois, sur des aspects nutritionnels (tableau 3.2).

Néanmoins, l'intérêt manifesté était variable en fonction des espèces et des personnes (tableau 3.2). Pour l'En, les principaux arguments cités reposaient sur les débouchés économiques d'une céréale « à la mode » et de la prétendue qualité nutritionnelle de cette espèce. Tous les paysan.ne.s ont manifesté de la curiosité par rapport à l'Am, mais moins d'arguments justifiant son étude ou sa culture sont ressortis, du fait de la grande méconnaissance de cette espèce. Le seul paysan qui cultive de l'Am le qualifie de « multi-usages », car il peut être transformé en une multitude de produits différents. Toutefois, certain.e.s questionnent la viabilité économique de ces deux espèces, en raison de leurs faibles rendements et des investissements (décorticage, stockage) nécessaires pour leur culture. Enfin, le GE est la seule espèce pour laquelle certain.e.s paysan.ne.s ont exprimé un intérêt moindre. Trois d'entre eux.elles considéraient que ce blé ne représente aucun intérêt pour l'alimentation humaine par rapport au BT. Il convient également de noter que cinq paysan.ne.s ont exprimé un intérêt important pour les variétés populations de BT. Cette espèce représente pour eux.elles les principaux débouchés économiques, c'est « la base ». Par ailleurs, cinq des six enquêté.e.s ont évoqué un intérêt prononcé pour le blé poulard, principalement pour des raisons esthétiques.

TABLEAU 3.2 – Intérêt des paysan.ne.s pour les différents « blés marginaux ». Un surlignage vert symbolise un intérêt fort, un surlignage jaune un intérêt moyen et un surlignage mauve un intérêt moindre. BT : blé tendre, En : engrain, Am : amidonnier, GE : grand épeautre.

Ferme	CD	CM	HP&DM	JPC	MPR&PB	SR
BT (variétés population)	Oui (débouchés)	Oui (débouchés)	Oui	Oui (débouchés)	NA	Oui
En	/ (intérêt nutritionnel)	/	Oui (adaptation terroir et pratiques agricoles ?)	Oui (débouchés)	Oui (débouchés)	Oui (« bombe nutritionnelle »)
Am	/ (le connaît peu)	/	Oui (adaptation terroir et pratiques agricoles ?)	/	(ne le connaissent pas)	Oui (« multiusages »)
GE	Non (aucun intérêt sauf pour l'alimentation animale)	Oui (rendements)	Oui (adaptation terroir et pratiques agricoles ?)	Oui (débouchés)	Non (aucun intérêt sauf pour l'alimentation animale)	Non (« blé avec une enveloppe »)

De plus, des caractéristiques spécifiques chaque espèce de blés vêtus, et pour les variétés populations de BT ont été identifiées lors des entretiens (tableau 3.3). Les principales limites associées à la culture des blés vêtus reposent sur leurs rendements faibles (en particulier pour l'En), sur la nécessité de décortiquer les épillets après le battage et sur l'espace requis pour le stockage puisque les épillets sont stockés non décortiqués.

TABLEAU 3.3 – Caractéristiques des trois espèces de blés vêtus et des variétés population de blé tendre, ressorties lors des entretiens auprès des paysan.ne.s.
 BT : blé tendre, En : engrain, Am : amidonnier, GE : grand épeautre.

Caractéristiques	Agronomiques	Esthétiques / phénotypiques	Transformation	Nutritionnelles / santé	Gustatives	Economiques	Autres
BT (variétés population)	- Rendements moindres par rapport aux variétés modernes de BT, mais supérieurs à ceux des blés vêtus. - « Rusticité » : résistance à des conditions climatiques peu favorables, à certaines maladies et ravageurs, compétitivité par rapport aux adventices.	- Variétés hautes. - Très beaux.	- Caractéristiques technologiques différentes de celles des variétés modernes de BT.	- Probablement des teneurs en micronutriments supérieures à celles des variétés modernes de BT.	- « Goût unique ».	- Demande élevée. - Meilleure rentabilité que les blés vêtus.	/
En	- Rendements faibles par rapport au BT (sauf sur des parcelles « très pauvres »). - « Pénible à tous les niveaux » : cycle de développement très long, demande « beaucoup de travail ». - Avis contrastés sur la compétitivité par rapport aux adventices -Bon potentiel de tallage, résistant aux maladies, à la verse et au gel.	- Pas très haut (environ 1m).	- Difficulté liée au décorticage. - Particulièrement difficile à trier. - Occupe de la place au stockage. - Caractéristiques technologique très différentes de celles du BT.	- « Bombe nutritionnelle ».	- Très différent du BT. - Forte « typicité » du goût.	- Avis contrastés : rendements faibles, pertes lors du tri et de la mouture, mais forte demande.	- Moins de diversité entre variétés que pour le BT du au génome diploïde.
Am	- Rendements faibles, bien que supérieurs à ceux de l'En. - Avis contrastés sur sa « rusticité » -Le seul paysan qui en cultive décrit un cycle de développement très court (il serait mieux adapté à une culture de printemps), un tallage intéressant, bien que moindre par rapport à l'engrain, une résistance à la verse, mais une sensibilité à certaines maladies du feuillage et au gel.	- Pas très haut (environ 1m20). - Beau.	- Difficulté liée au décorticage -Occupe de la place au stockage. - « Multiusages » (sert à la fabrication de pain, de pâtes, de bière, etc.).	- Peu d'informations, mais certainement différent du BT.	- Léger goût de noisette.	/	- Surtout cultivé en Allemagne et en Italie (sous le nom de « Farro »).
GE	- Meilleurs rendements que l'En et l'Am. - Plus « rustique » que le BT : certaines variétés seraient résistantes à la verse, d'autres à des conditions climatiques peu favorables et à certaines maladies.	/	- Difficulté liée au décorticage. - Occupe « énormément » de place au stockage.	/	/	/	- Intéressant pour l'alimentation animale.

3.3.2.1.3 Terminologie En ce qui concerne la terminologie à adopter pour faire référence aux blés étudiés, le terme « blés marginaux » a semblé convenir à tou.te.s les enquêté.e.s. Les « blés marginaux » ont été globalement définis comme des blés peu cultivés et donc peu consommés. Ce terme semble correspondre assez fidèlement à l'appellation « NUS », utilisée dans la littérature scientifique. Dans les « blés marginaux », les paysan.ne.s incluent des espèces marginales tels que l'En et l'Am, mais aussi certaines variétés d'espèces majeures comme les variétés population de BT. Ce terme intègre également certaines « variétés anciennes » issues des débuts de la sélection professionnelle. Par ailleurs, il a été proposé d'exclure de cette définition certaines variétés de GE, notamment celles issues d'une hybridation avec le BT. En somme, le terme « blés marginaux » écarterait uniquement les variétés résultant d'une sélection professionnelle industrielle récente.

En revanche, le terme « épeautres », employé lors de cette deuxième série d'entretiens pour faire référence aux blés vêtus, apparaît dépourvu de sens aux yeux des cultivateur.trice.s. Il.elle.s affirment que les « épeautres sont des blés », et que ce terme n'est qu'une « notion complètement commerciale », un « mot valise qui ne s'intéresse qu'à l'aspect vêtu du grain, qui regroupe des choses très différentes ». Suite à cette enquête, nous avons choisi d'utiliser le terme « blés marginaux » pour faire référence à des espèces et/ou variétés peu cultivées et le terme « blés vêtus » pour faire référence à l'En, l'Am et au GE.

3.3.2.1.4 Retours sur le projet de thèse Enfin, une grande partie de cette deuxième phase d'enquête était consacrée à présenter le projet de thèse et à recueillir des commentaires des personnes interrogées. Tout d'abord, certaines attentes vis-à-vis du projet de recherche ont été identifiées. Celle qui a été le plus fréquemment évoquée porte sur la nécessité de clarifications par rapport aux caractéristiques nutritionnelles des différentes espèces et variétés de blés. Selon les enquêté.e.s, ces informations leur permettraient de mieux informer leurs client.e.s, à l'aide de données chiffrées. Elles pourraient également servir de bases argumentatives dans le cadre de la commercialisation de produits élaborés à partir de « blés marginaux ». Certain.e.s paysan.ne.s espéraient également que le projet de recherche contribue à « améliorer leurs systèmes [de culture, socio-économiques] », en approfondissant leur compréhension des espèces et des variétés cultivées. Enfin, plusieurs enquêté.e.s ont exprimé le désir que le projet de recherche facilite l'établissement de partenariats à plus grande échelle. A titre d'exemples, il.elle.s ont mentionné des collaborations avec des professionnel.le.s de la transformation céréalière, comme des meunier.ère.s, ou avec les pouvoirs publics. L'objectif à long terme de ces collaborations serait d'élargir l'« impact » du projet, potentiellement débouchant sur la création de filières axées sur les « blés marginaux ».

En outre, l'une des principales remarques sur le projet de thèse concernait le choix des espèces et des variétés sur lesquelles porterait la recherche. Globalement, les paysan.ne.s se montraient intéressé.e.s par les trois espèces de blés vêtus (bien que l'intérêt soit moindre pour le GE) et par le blé poulard. Un paysan a également exprimé sa curiosité par rapport à des espèces encore « plus marginales », non cultivées en France. Aussi, il est apparu essentiel d'inclure dans l'étude des variétés de BT en tant que témoins, pour comparer les variétés de blés vêtus à des variétés connues par les cultivateur.trice.s. La plupart des enquêté.e.s trouvaient qu'il était pertinent de considérer à la fois des variétés population et/ou des variétés anciennes de BT et des variétés modernes de BT.

Ensuite, de nombreux questionnements par rapport aux « blés marginaux » sont ressortis des discussions avec les paysan.ne.s. Afin d'en extraire des questions de recherche, ils sont représentés dans la figure 3.3 sous la forme d'effets et de traits d'intérêt. En plus des interrogations présentes dans la figure 3.3, les questions suivantes ont été évoquées :

- *Est-il possible de décortiquer les trois espèces de blés vêtus en mélange ?*
- *Quelles sont les corrélations entre le tallage et le rendement pour chacune des espèces ?*
- *Quelles sont les corrélations entre les « quantités » (rendements) et la « qualité » (nutritionnelle) pour chacune des espèces ?*
- *Quelles sont les corrélations entre les teneurs en micronutriments et les caractéristiques gustatives de chacune des espèces ?*

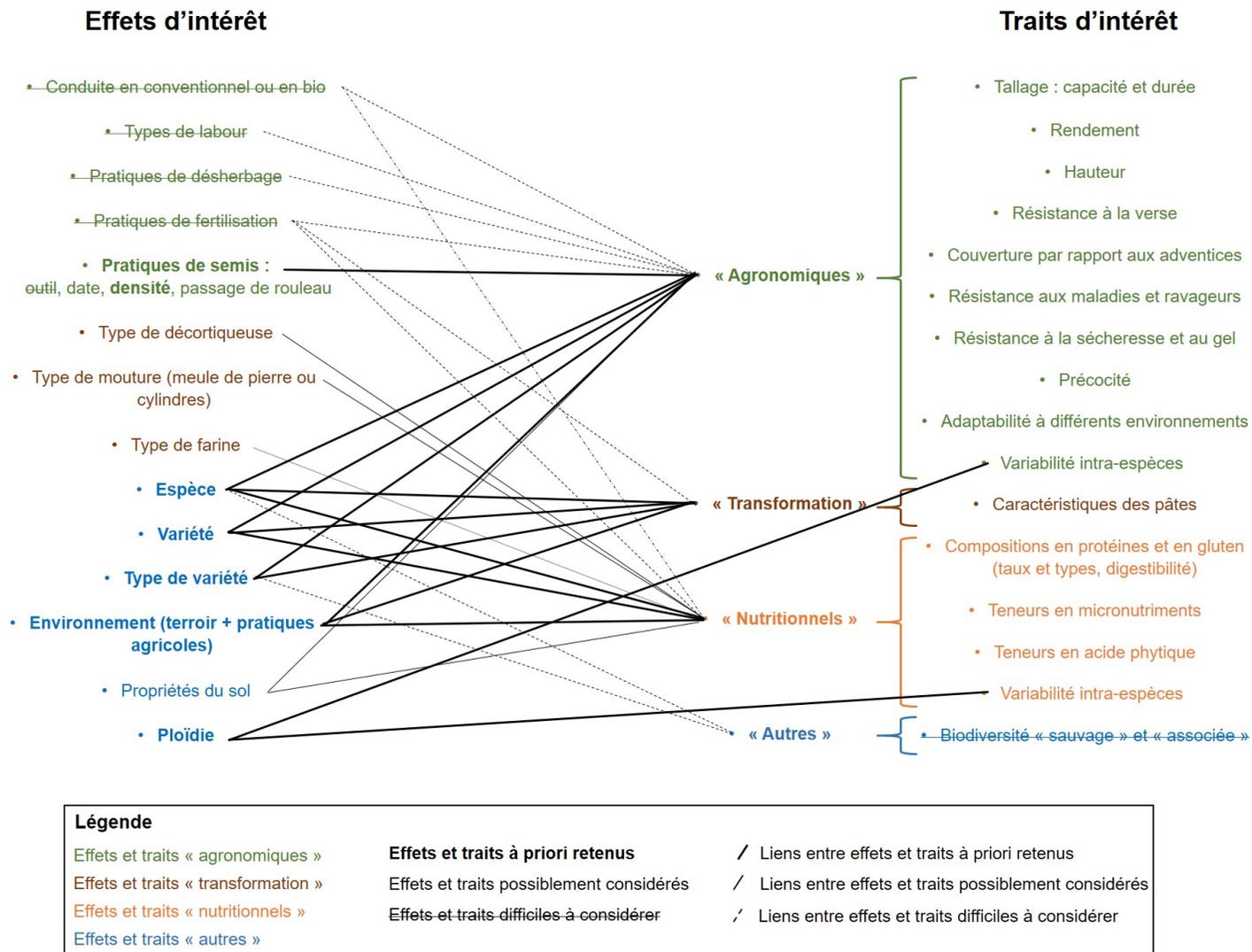


FIGURE 3.3 – Effets et traits d'intérêt évoqués par les paysan.ne.s enquêté.e.s. Ce schéma a été utilisé lors de la première réunion (le 8 mars 2021) avec les paysan.ne.s pour choisir de façon définitive les questions prioritaires à traiter au cours de la thèse.

Enfin, quelques autres remarques sur le projet de recherche ont été formulées :

- L'intérêt d'impliquer un collectif tel que l'ARDEAR AURA plutôt que des paysan.ne.s à titre individuel. Impliquer un collectif permettrait d'avoir un poids plus lourd, de toucher un plus grand nombre de personnes qui ne seraient pas impliquées individuellement dans le projet, et de mieux garantir la pérennité de la collaboration.
- Clarifier le rôle des acteur.trice.s impliqué.e.s dans le projet, afin d'éviter l'établissement de relations de pouvoir déséquilibrées.
- A terme, mener des analyses nutritionnelles sur des produits finis, plutôt que sur des grains entiers, pour qu'elles reflètent mieux ce que l'on mange.
- Justifier le fait de faire des analyses nutritionnelles sur des grains entiers plutôt que sur des produits transformés. Une proposition consistait à évaluer les pourcentages de « blés marginaux » consommés sous forme de grains entiers.
- La nécessité de faire un glossaire avec les termes mobilisés au sein du projet et de bien définir l'objet d'étude pour assurer une communication de qualité entre les différent.e.s partenaires du projet.
- Le fait que le projet tel que présenté n'aborde pas la situation socio-économique du.de la paysan.ne.
- L'intérêt de communiquer au grand public dès le début du projet, afin d'avoir un impact le plus large possible.
- L'importance de mettre en place des essais au sein des fermes pour l'évaluation des variétés. Autrement, les résultats apparaissent dépourvus de sens aux yeux des paysan.ne.s, car ils ne reflètent pas les caractéristiques des blés dans les environnements où ils seront réellement cultivés.

3.3.2.2 Entretiens auprès de naturopathes et de distributeurs de blés vêtus

Au-delà des paysan.ne.s, trois naturopathes et deux distributeurs de blés vêtus ont été interrogé.e.s au cours de cette deuxième phase d'enquête. Concernant les distributeurs, les enquêtes ont été réalisées auprès de représentants des « Greniers d'épeautre », une entreprise en Mayenne (53) et des « Jardins de Sainte Hildegarde », une entreprise localisée dans le Périgord (24).

Contrairement aux paysan.ne.s, et principalement pour des raisons géographiques, nous n'avons pas pour objectif d'impliquer ces personnes dans le projet de recherche (sauf une naturopathe, basée en région lyonnaise). Ainsi, ces entretiens semi-directifs avaient uniquement pour but d'explorer plus en détail les connaissances et questionnements au sujet de l'aspect nutritionnel des blés vêtus.

De plus, l'intérêt des cinq enquêté.e.s pour les blés vêtus résulte de la vision de la nutrition promue par Hildegarde de Bingen, une figure religieuse de l'Eglise catholique au XII^e siècle. Celle-ci aurait mis en avant de nombreux bienfaits nutritionnels de l'« épeautre ». Les discours se rejoignent donc fortement et reposent tous sur des arguments religieux, ce qui en complique l'analyse. Ainsi, cette section propose une synthèse succincte de ces entretiens, mettant en exergue les hypothétiques caractéristiques nutritionnelles et les impacts sur la santé de la consommation des blés vêtus. Cependant, les trajectoires des personnes interrogées et les stratégies des deux entreprises, qui ont été abordées lors des entretiens, ne sont pas abordées.

L'objectif commun des représentants des entreprises et des naturopathes est la commercialisation ou la recommandation de produits de haute qualité nutritionnelle. L'intérêt porté par ces acteur.trice.s sur les blés vêtus repose uniquement sur les avantages pour la santé résultant de leur consommation. Aucun argument lié aux aspects environnementaux ou politiques n'est évoqué. En effet, l'ensemble de ces acteur.trice.s est convaincu de la valeur nutritionnelle supérieure des blés vêtus par rapport au BT. Parmi les blés vêtus, certain.e.s estiment que seul le GE (l'espèce que Sainte Hildegarde aurait mentionnée) revêt de l'intérêt, tandis que d'autres attribuent également des avantages nutritionnels à l'En. De manière similaire aux paysan.ne.s, les naturopathes et distributeurs enquêté.e.s ont très peu, voire aucune, connaissance de l'Am. En outre, pour le GE, les personnes interrogées identifient entre cinq et neuf variétés, qui ne sont pas issues d'une hybridation avec le BT, et qui seraient les seules à présenter un intérêt diététique. Parmi ces variétés, on retrouve *Oberkulmer*, *Frankenkorn* et *Tyrolien Rouge*. Enfin, certain.e.s enquêté.e.s pensent que l'alimentation, surtout dans les pays occidentaux, devrait se baser exclusivement sur les blés vêtus, tandis que d'autres considèrent que ces céréales peuvent s'intégrer dans un régime alimentaire incluant d'autres espèces de céréales.

Les cinq enquêté.e.s ont soulevé de nombreux avantages pour la santé liés à la consommation de blés vêtus. Parmi ceux-ci, des effets sur l'humeur et sur la température corporelle sont les plus fréquemment mentionnés. En particulier, le GE a été décrit comme une céréale qui « rend joyeux », qui « donne de l'allégresse », et même comme une « panacée pour la mélancolie ». Il

a également été avancé que les blés vêtus sont « bons pour la frilosité » car ils « réchauffent de l'intérieur ». De plus, l'aspect très digeste de ces céréales est revenu de manière récurrente dans les discours. Selon quatre des cinq enquêtés.e.s, ces espèces conviendraient aux personnes souffrant de la maladie cœliaque. Finalement, parmi les autres bienfaits évoqués, on retrouve la sensation de satiété, une augmentation des défenses immunitaires, une meilleure résistance au stress, des propriétés cicatrisantes, une diminution des ongles cassants, de l'électrosensibilité et de la fatigue, et une augmentation de la tolérance aux traitements dans le cas des maladies graves.

Les compositions en éléments nutritionnels des blés vêtus ont été abordées plus en détail uniquement avec les trois naturopathes (tableau 3.4). Selon les discours, les blés vêtus se distingueraient du BT principalement par la « qualité de leur gluten ». Un autre facteur qui a été mentionné par deux des enquêtées est le thiocyanate, un anti-inflammatoire qui contribuerait à réduire les risques de cancer, dont les taux seraient élevés dans les blés vêtus.

TABLEAU 3.4 – Caractéristiques nutritionnelles des blés vêtus et formes de consommation recommandées selon les trois naturopathes enquêtées. BT : blé tendre, En : engrain, Am : amidonnier, GE : grand épeautre.

Protéines	<ul style="list-style-type: none"> - Plus que dans le BT. - Contiennent tous les acides aminés essentiels. - Seule céréale (GE) qui contient autant de lysine.
Gluten	<ul style="list-style-type: none"> - Gluten de très bonne qualité. - Gluten très digeste. - Avis contrastés sur les teneurs totales en gluten : pour certaines, il y en a plus dans le GE que dans l'En et pour d'autres il y en a plus dans l'En que dans le GE.
Lipides	<ul style="list-style-type: none"> - Deux fois plus de lipides que dans le BT. - Plus de lipides insaturés que dans le BT. - Bon rapport Oméga3/Oméga6.
Glucides	<ul style="list-style-type: none"> - Glucides de meilleure qualité que dans le BT. - Indice glycémique très bas. - Contiennent des glucides impliqués dans la modulation immunitaire.
Microéléments	<ul style="list-style-type: none"> - Contiennent « 45 minéraux et oligo-éléments ». - Teneurs en thiocyanate, un « anti-inflammatoire remarquable » très élevées. - Teneurs importantes en vitamines lipo et hydro solubles (A, D, E et celles du groupe B). - Moins d'acide phytique que dans le BT.
Autres	<ul style="list-style-type: none"> - La principale différence avec le BT concerne le gluten. - Les « synergies » entre éléments des blés vêtus sont très importantes. - Chez le GE, et contrairement au BT, tous les éléments nutritifs ne sont pas contenus uniquement dans le son.
Formes de consommation recommandées	<ul style="list-style-type: none"> - Avis contrastés : surtout sous forme de farine blanche pour une enquêtée, sous forme de la farine la moins raffinée possible pour une autre, et principalement sous forme de grains entiers pour la dernière.

Il est important de rappeler que les avantages nutritionnels attribués aux blés vêtus par les distributeurs et naturopathes ne sont pas validés par des études scientifiques jusqu'à présent.

3.3.3 Conclusion de l'enquête de terrain

En résumé, l'enquête de terrain a atteint ses trois objectifs initiaux. Tout d'abord, elle a contribué à améliorer la compréhension de l'état actuel de la culture des « céréales marginales », et en particulier des « blés marginaux » dont les blés vêtus, dans la région lyonnaise. De plus, elle a permis de confirmer l'intérêt de paysan.ne.s installé.e.s dans la région pour ces céréales, et de repérer certaines interrogations les concernant. Par ailleurs, le projet de recherche a été présenté à sept paysan.ne.s, leurs premières réactions ont été recueillies, et six d'entre eux.elles ont confirmé leur volonté de s'impliquer dans le projet. Certains commentaires ont permis de prendre des décisions majeures dès la fin de l'enquête. Notamment, il a été décidé de mettre en place des essais au sein des différentes fermes, et pas uniquement au CRBA, au cours de la thèse. Aussi, l'ARDEAR a été associée au projet de recherche suite aux retours issus de l'enquête. Le choix définitif des espèces et type de variétés sur lesquelles porterait la thèse a été établi plus tardivement en réunion avec les paysan.ne.s, mais l'enquête nous a conforté.e.s quant à l'intérêt de ces acteur.trice.s pour les blés vêtus. Elle a aussi mis en évidence la pertinence pour les cultivateur.trice.s d'inclure dans la recherche des variétés population et modernes de BT. Enfin, les cinq entretiens auprès de distributeurs et de naturopathes ont offert un premier aperçu des bénéfices nutritionnels qui peuvent être attribués aux blés vêtus.

Encadré 3.3.1 - Enquête sur la demande en « épeautres » dans la métropole de Lyon

Dans un potentiel objectif à long terme de contribuer à mettre en place une filière autour des blés, une deuxième enquête sur la demande en « épeautres » dans la métropole de Lyon a été réalisée en juin 2021. A nouveau, celle-ci a été effectuée par trois étudiant.e.s de l'ISARA (Léa Debaecker, Thomas Fayolle et Colline Rinaldi) et a été principalement encadrée par Jean-François Vian et Marie-Thérèse^a. Ce travail, mené auprès de distributeurs (magasins bios et boulangeries) de produits à base de blés vêtus, ainsi que de minoteries, avait pour objectifs de mieux comprendre : les types de produits contenant des blés vêtus commercialisés, l'état de la demande et de son évolution, l'origine des blés vêtus commercialisés et l'état des connaissances des distributeurs au sujet de ces blés.

Tout d'abord, les étudiant.e.s ont recensé 64 boulangeries proposant des produits à base de blés vêtus dans la métropole de Lyon, ainsi que cinq minoteries qui travaillent avec des blés vêtus dans la région AURA. La forme de commercialisation la plus répandue est le pain, suivie par la farine et les pâtes. Les enquêté.e.s s'accordent pour dire que la demande en « épeautres » augmente depuis une dizaine d'années. De plus, il est apparu que l'En est l'espèce la plus commercialisée et la plus connue (sous le nom de « petit épeautre »). En contraste, aucun.e des enquêté.e.s n'avait entendu parler de l'Am. La provenance des blés vêtus n'a été posée qu'à huit boulangeries, parmi lesquelles 37% s'approvisionnent dans la région AURA. Malgré la volonté de plusieurs boulangeries à s'approvisionner plus localement, elles sont dépendantes des minoteries, qui ne voient pas toutes un intérêt à renforcer les partenariats avec des paysan.ne.s du territoire (car leurs partenariats actuels leur conviennent). Ainsi, il apparaît que les minoteries jouent un rôle clé et seront à considérer vis-à-vis de l'établissement d'une filière locale autour des blés vêtus (DEBAECKER et al. 2021).

^a. J'ai moi-même été impliquée dans l'encadrement au début de l'enquête.

3.4 Le collectif multi-acteur.trice.s

3.4.1 Composition du collectif de la thèse

L'approche de recherche adoptée pour ma thèse se veut participative et transdisciplinaire. Cela signifie que des acteur.trice.s non scientifiques professionnel.le.s sont impliqu.e.s dans la démarche de recherche, et que des savoirs non académiques sont pris en compte dans le processus de réflexion. Dans le cadre de ma thèse, cette démarche a été concrétisée par la formation d'un collectif multi-acteur.trice.s rassemblant six paysan.ne.s ou couples de paysan.ne.s, l'ARDEAR AURA et le CRBA. Trois chercheur.euse.s complètent ce collectif, à savoir mes deux directeur.trice.s de thèse basé.e.s à Lyon (Marie-Thérèse et Olivier) et moi-même. Par ailleurs, au cours de mon doctorat, deux stagiaires (Justine Lepagneul et Aubin Démonté) ont rejoint le groupe de travail pendant la durée de leurs stages (figure 3.4). Dans la suite du manuscrit, j'évoquerai ce collectif, que j'ai en partie constitué et entièrement animé, par le terme « collectif de la thèse » ou simplement « collectif ». Il est important de noter que l'implication des membres de ce collectif peut être de type « collaboration » ou « contribution » (principalement, dans le cas des stages).

Toutefois, d'autres acteur.trice.s sont réuni.e.s au sein d'un groupe plus vaste impliqué dans le projet « Céréales » du programme ANS porté et animé par Marie-Thérèse. Ce deuxième cercle de partenaires intègre les membres du collectif de la thèse, ainsi que d'autres acteur.trice.s non académiques, dont une naturopathe et une diversité de chercheur.euse.s de diverses disciplines (figure 3.4). Dans cette thèse, je ne ferai référence qu'aux membres ce groupe avec lequel.le.s j'ai moi-même interagi. Je les désignerai comme « partenaires ». Les membres du deuxième cercle de partenaires ont eu des implications encore plus diverses que ceux du collectif de la thèse. Certain.e.s, comme Camille Vindras, ont eu un rôle de « consultance », et sont intervenu.e.s dans certaines décisions concernant l'orientation du projet, tendant vers une implication de type « collaboration ». D'autres sont intervenu.e.s très ponctuellement, pour effectuer une tâche précise ou apporter une aide méthodologique. C'est par exemple le cas des étudiant.e.s de l'ISARA ou encore de Lise Pugnet, dont les rôles sont de type « contribution ». Enfin, Mathieu Thomas, qui a rejoint le projet en réponse à ma demande, a un rôle d'implication particulier, centré sur l'encadrement de ma thèse.

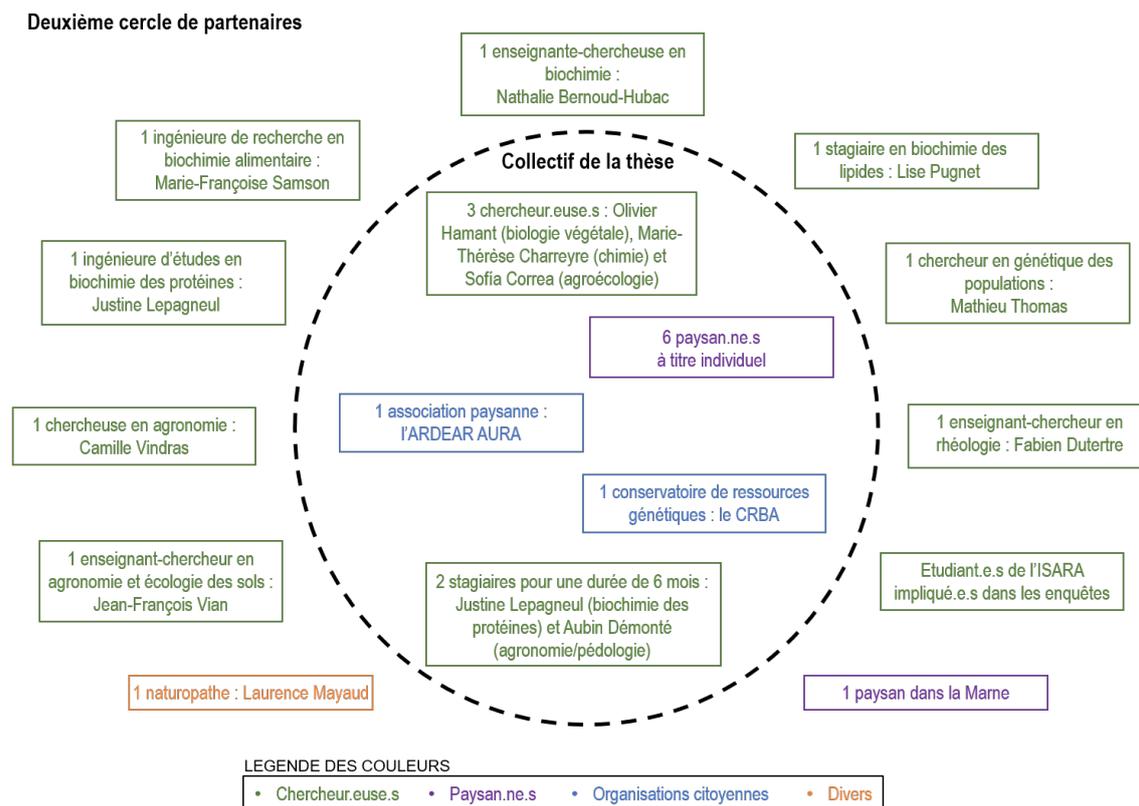


FIGURE 3.4 – Composition du collectif de la thèse (dont j’ai assuré l’animation pendant ma thèse) et membres du deuxième cercle de partenaires du programme Agriculture-Nutrition-Santé (ANS) avec lesquel.le.s j’ai échangé au cours de la thèse. Justine Lepagneul apparaît deux fois car elle a d’abord effectué un stage de six mois, en participant aux rencontres du collectif de la thèse, et ensuite, elle a été embauchée en contrat à durée déterminée (CDD) pour réaliser des analyses en biochimie des protéines.

En dehors de ces deux cercles d’acteur.trice.s, j’ai échangé, au cours de ma thèse, avec les membres de mon comité de suivi de thèse : Isabelle Goldringer, Yann Leverrier et Jean-François Vian. Ces chercheur.euse.s ont également influencé l’orientation de mon doctorat, notamment en conseillant de le recentrer à la fin de la première année.

La distinction entre le collectif de la thèse et le deuxième cercle de partenaires est faite uniquement dans le cadre du manuscrit. Je définis le collectif de la thèse comme un groupe dont j’ai assuré l’animation tout au long de ma thèse. La composition d’aucun de ces deux groupes n’a fait l’objet de formalisation au cours de la thèse.

3.4.2 Constitution du collectif de la thèse

Les collaborations avec les six paysan.ne.s du collectif de la thèse ont été initiées par le biais de l'enquête de terrain (section 3.3). La proposition et la pertinence d'inclure un collectif paysan parmi les acteur.trice.s du collectif a également émergé lors des entretiens. En conséquence, il a été proposé à l'ARDEAR AURA de rejoindre l'initiative. Le contact initial avec cette structure a été établi par téléphone, et suite à la présentation du projet, une salariée de l'association (Léa Bernard) a accepté de rejoindre le groupe de recherche. Enfin, le CRBA avait été contacté et avait commencé à s'impliquer avant le début de la thèse.

Une difficulté à laquelle font face de nombreux projets de recherche collaborative (surtout lors des phases initiales) est l'absence de financements pour dédommager les acteur.trice.s non académiques (CoEx 2023). Dans notre cas, nous avons pu dédommager les six paysan.ne.s, le CRBA et d'autres membres du deuxième cercle de partenaires pour le temps consacré au projet de recherche.

Enfin, il paraît important de mentionner que nous avons les contacts d'autres paysan.ne.s qui auraient pu être intéressé.e.s par le projet de recherche. Néanmoins, nous avons décidé de restreindre la taille du collectif, au moins pour la durée de la thèse, aux acteur.trice.s précédemment évoqué.e.s. Ce choix reposait sur un manque de moyens (humains et financiers) de notre part pour assurer l'animation d'un collectif plus large.

3.4.3 Contexte socio-professionnel des membres du collectif de la thèse

Trois types d'acteur.trice.s font partie du collectif de la thèse : des paysan.ne.s à titre individuel, des chercheur.euse.s et des organisations citoyennes : le CRBA et l'ARDEAR. Ces différent.e.s acteur.trice.s ont des contextes socio-professionnels et des temporalités qui leur sont propres, et qui doivent être prises en compte dans une organisation collective. Ces contextes et temporalités sont brièvement décrits ci-dessous.

La vie des paysan.ne.s s'articule principalement autour des cycles des plantes et des animaux. Ainsi, leur disponibilité varie grandement en fonction des saisons. Pour les paysan.ne.s-boulangère.s, la fabrication du pain impose également un rythme hebdomadaire. Les cinq paysan.ne.s investi.e.s dans ma thèse s'occupant également de la boulangerie consacrent deux à trois jours par semaine à cette activité, et ces jours diffèrent d'une ferme à l'autre. Ce sont sur-

tout ces jours de préparation du pain qui ont complexifié la planification des réunions. D'autres éléments à prendre en compte dans l'organisation des paysans incluent les ventes sur les marchés, les tâches administratives, les réunions associatives, la répartition des outils, entre autres.

Dans ce projet, l'organisation des chercheur.euse.s est également liée au cycle de développement du blé. Elle est aussi dépendante des durées et périodes des thèses et des stages, la participation à des formations et séminaires, la rédaction d'articles scientifiques, ainsi que l'échéance des projets. Dans le cas de ce projet, la durée de la thèse (initialement prévue pour quatre ans et finalement réduite à trois ans) a constitué une contrainte assez forte.

Enfin, chaque organisation citoyenne possède son propre mode d'organisation. Le CRBA est grandement dépendant des cycles des diverses plantes qu'il gère ou multiplie, ainsi que d'activités spécifiquement liées à la gestion de semences. Le rythme de l'association s'articule également autour des réunions en lien avec son implication dans divers projets (dont des projets de recherche), de réunions internes, et d'aspects administratifs. Au cours de la thèse, l'équipe du CRBA a été très mobilisée par le lancement du projet de ferme semencière, en collaboration avec la Métropole de Lyon. En ce qui concerne l'ARDEAR AURA, son organisation est liée à celle des paysan.ne.s, et par conséquent, aux cycles des plantes et des animaux. Dans le cadre de ma thèse, nous avons interagi avec une seule salariée de l'ARDEAR, dont le temps de travail est réparti entre l'animation et la coordination du réseau régional des ADDEAR (qui propose de l'accompagnement à l'installation paysanne et aux changements de pratiques) et l'animation du « groupe blé » de l'ARDEAR, qui consiste aussi en l'organisation de divers événements et formations, et le suivi de projets de recherche, entre autres.

3.4.4 Dynamique du collectif de la thèse

L'organisation du collectif de la thèse s'est naturellement structurée autour de la saison de culture du blé, ainsi que du calendrier de la thèse. Nous n'avons défini aucune stratégie de fonctionnement avant l'établissement du collectif. La dynamique s'est mise en place de manière assez intuitive et progressive.

Brièvement, la première année de thèse (octobre 2020 à septembre 2021) a été dédiée à l'enquête de terrain et à la mise en place du collectif de la thèse. Elle a également été l'occasion de mettre en place un dispositif agronomique exploratoire (DE), localisé au CRBA. Ce dernier comportait non seulement des variétés des trois espèces de blés vêtus, mais aussi des variétés de BT, de blé poulard et de blé dur (15 variétés au total). Enfin, plusieurs analyses nutritionnelles et technologiques préliminaires (ANTP) ont été réalisées lors de cette année (annexe C). Lors de la deuxième année de thèse (octobre 2021 à septembre 2022), le dispositif agronomique (D21-22) visant à répondre aux questionnements posés par le collectif a été mis en place, au CRBA et au sein des fermes de chacun.e des six paysan.ne.s participant au projet. De manière secondaire, lors de cette deuxième année, les données issues du suivi agronomique du DE ont été analysées et les échantillons issus des récoltes ont été évalués pour leur composition en gluten (stage de Justine Lepagneul). De plus, lors de la troisième année (octobre 2022 à septembre 2023), les données issues du suivi agronomique du D21-22 ont été analysées, et des analyses des compositions en protéines du gluten de ces nouveaux échantillons ont été réalisées en partenariat avec Justine Lepagneul et Marie-Françoise Samson de l'UMR Ingénierie des Agropolymères et Technologies Émergentes (IATE) (figure 3.4.4). Enfin, au démarrage de la thèse, il était prévu de mettre en place un troisième dispositif lors de l'année 2022-2023, à l'identique du D21-22. Néanmoins, nous avons dû renoncer à cette expérimentation, en raison de la réduction de la durée de la thèse à seulement trois ans.

Dans la suite de cette sous-section, je décris le fonctionnement qui s'est mis en place au sein du collectif de ma thèse, en évoquant surtout l'année 2021-2022.

CHAPITRE 3. DÉMARCHE DE RECHERCHE

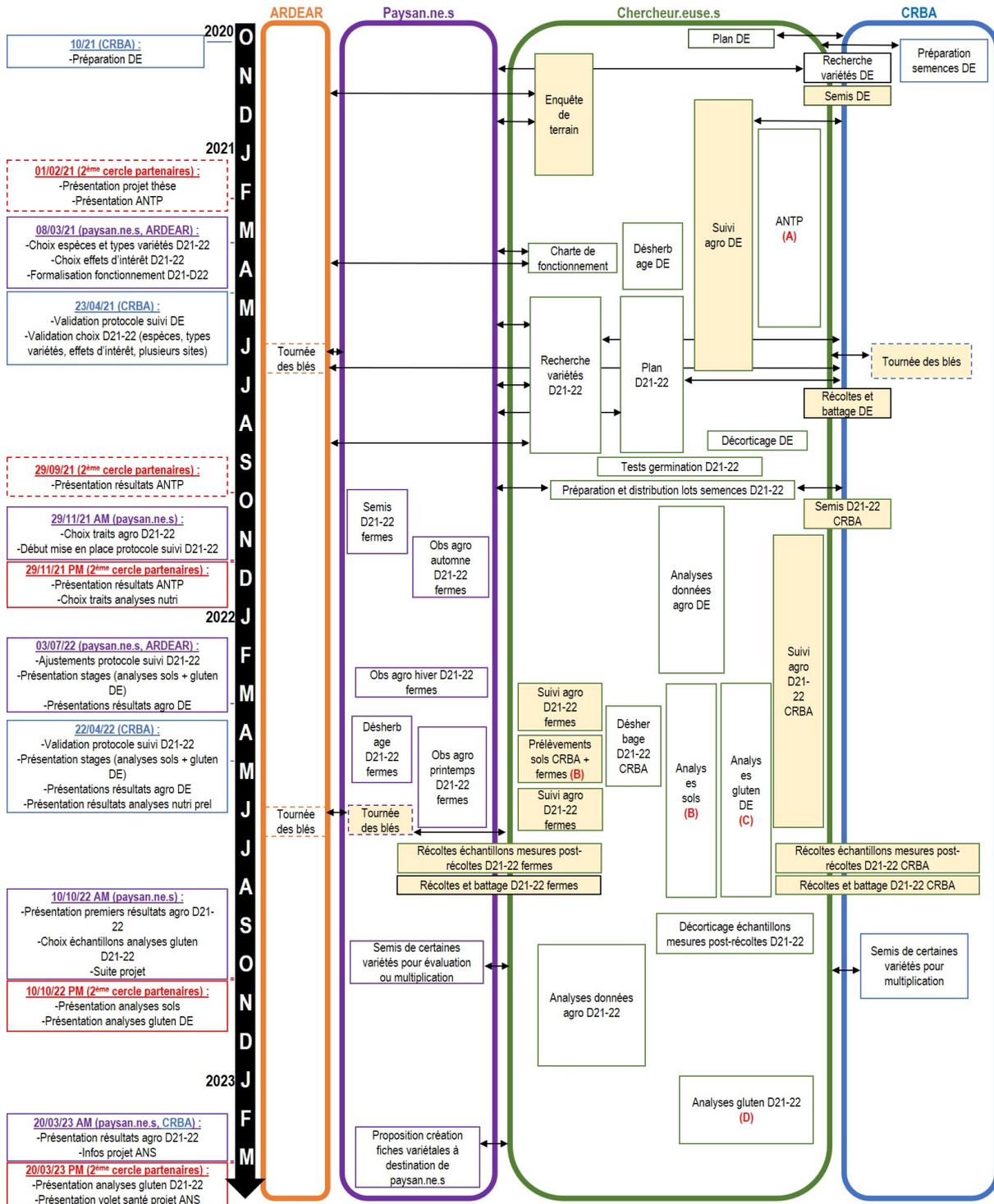


FIGURE 3.5 – (page précédente) Interactions entre les différent.e.s acteur.trice.s au sein du collectif de la thèse. A gauche de la frise, les réunions organisées par l'équipe de recherche sont représentées. Celles encadrées en bleu ont eu lieu avec le CRBA, en violet avec les paysan.ne.s et en rouge avec les membres du deuxième cercle de partenaires. A droite de la frise, chaque tâche est localisée dans la section et encadrée dans la couleur correspondant au type d'acteur.trice qui en a été responsable. Les flèches représentent les échanges bilatéraux qui ont eu lieu entre différents types d'acteur.trice.s pour accomplir des tâches spécifiques. Les tâches sur fond jaune ont requis des déplacements sur le terrain (dans les fermes ou au CRBA) de la part des chercheur.euse.s. Elles ont régulièrement donné lieu à des échanges informels. Celles à l'interface entre les rectangles correspondant à deux types d'acteur.trice.s différent.e.s ont été menées de façon conjointe. Si elles sont encadrées en noir, elles ont aussi été organisées de façon conjointe par les deux acteur.trice.s. Enfin, les éléments encadrés en pointillés ont été organisés en marge de la thèse, mais ils ont contribué aux interactions entre acteur.trice.s du collectif de recherche de la thèse. DE : dispositif exploratoire, D21-22 : dispositif 2021-2022, ANTP : analyses nutritionnelles et technologiques préliminaires, agro : agronomiques, obs : observations. **(A)** Contributions de différent.e.s acteur.trice.s, dont Lise Pugnet au cours d'un stage de trois mois en lipidomique (encadré par Nathalie Bernoud-Hubac, Marie-Thérèse et moi-même). **(B)** Effectuées au cours du stage de fin d'études ISARA d'Aubin Démonté, encadré par Jean-François Vian, Marie-Thérèse et moi-même. **(C)** Réalisées par Justine Lepagneul, lors de son stage de Master 2, encadré par Marie-Françoise Samsom, Marie-Thérèse et moi-même. **(D)** Les analyses chromatographiques ont été réalisées par Justine Lepagneul, lors d'un contrat à durée déterminée (CDD) de deux mois, encadrée par Marie-Françoise Samson.

3.4.4.1 Les réunions

Suite à la constitution du collectif, des réunions bisannuelles ont été organisées avec les six paysan.ne.s et l'ARDEAR. D'autres réunions ont été menées séparément avec le CRBA (figure 3.4.4). Chaque année, les rencontres avec les paysan.ne.s ont eu lieu à l'automne, après les semis et au printemps, avant les récoltes. Le principal objectif de ces réunions était de prendre des décisions importantes pour l'orientation des recherches. Par exemple, c'est lors de ces séances que les espèces et les types de variétés à étudier ont été définitivement fixés et que les questions de recherche et les protocoles scientifiques ont été discutés. De plus, à plusieurs reprises lors de ces réunions, nous avons présenté des résultats de recherche, ce qui a permis de les discuter collectivement. Il est également arrivé qu'une partie d'une réunion soit consacrée à faire un point sur la littérature scientifique au sujet d'un questionnement précis partagé par le groupe, qui avait émergé lors de la réunion précédente. Par ailleurs, bien que très limités, certains temps ont été consacrés à la formalisation du fonctionnement au sein du collectif. Le principal résultat concret de cette formalisation réside dans l'établissement d'une charte de fonctionnement, au sein de laquelle les engagements des différent.e.s acteur.trice.s (chercheur.euse.s et paysan.ne.s) sont détaillés. Cette charte, disponible dans l'annexe D, concerne spécifiquement la collaboration au cours de l'année 2021-2022, et mentionne essentiellement les engagements liés au D21-22. Enfin, nous avons veillé à ne pas trop charger les ordres du jour, ce qui a permis des pauses propices à des discussions informelles, favorisant ainsi le renforcement des liens entre les participant.e.s. Au total, cinq réunions ont eu lieu au cours de la thèse (tableau 3.5).

Concernant les participant.e.s, nous avons initialement choisi de mener des réunions distinctes avec les paysan.ne.s et l'ARDEAR d'une part, et avec le CRBA d'autre part (figure 3.4.4). Nous avons opté pour cette stratégie pour encourager la participation de tous les individus. Ainsi, les décisions concernant le projet de recherche étaient d'abord prises lors des rencontres avec les paysan.ne.s, et ensuite validées avec le CRBA. De plus, les remarques issues de ces échanges ont été prises en compte. Lors de la dernière réunion qui a eu lieu le 20 mars 2023, en estimant qu'on avait réussi à établir une relation de confiance suffisante avec les différents partenaires, nous avons réuni les paysan.ne.s et le CRBA. Enfin, lors de certaines réunions avec les paysan.ne.s, la naturopathe (Laurence Mayaud) et l'agronome (Camille Vindras) faisant partie du deuxième cercle de partenaires ont également été conviées.

Par ailleurs, certaines réunions ont été organisées en deux temps distincts, avec des participant.e.s différent.e.s. Lors de ces rencontres, la matinée était réservée aux échanges exclusifs avec les paysan.ne.s et l'ARDEAR. Ensuite, l'après-midi était dédié à la présentation de certains résultats de recherche. Le CRBA, et divers membres du deuxième cercle de partenaires étaient conviés à cette deuxième partie. Ce format a été suivi pour les réunions du 29 novembre 2021, du 10 octobre 2022, et du 20 mars 2023 (figure 3.4.4 et tableau 3.5). Néanmoins, j'ai constaté qu'en raison de contraintes de temps, les discussions autour des résultats exposés l'après-midi étaient limitées.

Plus concrètement, toutes les réunions avec les paysan.ne.s et avec le deuxième cercle de partenaires se sont déroulées dans le laboratoire IMP, situé sur le campus de l'université Lyon 1. Après des discussions avec les six paysan.ne.s ainsi qu'avec l'ARDEAR AURA, il est apparu que ce lieu serait préférable aux fermes, en raison de sa situation géographique centrale qui convenait mieux à l'ensemble des participant.e.s. Pour choisir les dates et les horaires des réunions, des sondages en ligne ont été proposés avec au moins six semaines d'avance. Bien que la fréquence de ces réunions bisannuelles, semblait convenir à tou.te.s les acteur.trice.s, il était difficile de trouver une date qui convienne à tout le monde. Ainsi, plusieurs réunions ont été réalisées avec seulement trois ou quatre paysan.ne.s, et la représentante de l'ARDEAR n'a pu assister qu'à deux d'entre elles (tableau 3.5). A chaque fois, nous avons proposé des appels téléphoniques ou en visioconférence avec les absent.e.s pour faire le point sur les discussions et décisions qui ont eu lieu.

En ce qui concerne les réunions bilatérales avec le CRBA, elles se déroulaient sur le site de l'association, à Charly. Celles-ci ont été moins nombreuses que celles avec les paysan.ne.s, ce qui est principalement dû à la faible disponibilité de l'équipe de salarié.e.s du CRBA. A plusieurs reprises, le CRBA a été convié aux réunions avec des membres du deuxième cercle de partenaires, mais n'a pas pu être présent.

TABLEAU 3.5 – Objectifs et conclusions des cinq réunions bisannuelles conduites pendant la thèse. En : engrain, Am : amidonnier, GE : grand épeautre, DE : dispositif exploratoire, D21-22 : dispositif expérimental 2021-202.

Début du tableau 3.5				
Date	Personnes présentes	Objectifs principaux	Décisions / Conclusions	Autres thèmes abordés
08/03/2021	<ul style="list-style-type: none"> - 5 paysan.ne.s. - Léa Bernard (ARDEAR). - 3 chercheur.euse.s : Olivier Hamant, Marie-Thérèse Charreyre, Sofia Correa. - 1 membre du collectif élargi : Camille Vindras. 	<ul style="list-style-type: none"> - Choix définitif des espèces et des types de variétés à évaluer. - Choix des questions de recherche à prioriser. 	<ul style="list-style-type: none"> - Etude des trois espèces de blés vêtus + de 2 témoins : variétés population de blé tendre et variétés modernes de blé tendre. - Seuls les effets à étudier ont été déterminés. Les effets qui sont ressortis comme étant prioritaires, au delà de l'effet de l'espèce, sont les suivants : <ol style="list-style-type: none"> 1. L'environnement (terroirs + pratiques agricoles), et notamment les propriétés du sol. 2. Le type de variété : population ou lignée pure. 3. Les effets liés à la transformation : type de décortiqueuse et type de mouture, à travers la problématique globale : « <i>Comment préserver les qualités nutritionnelles des grains lors des différentes étapes de transformation ?</i> » - Proposition d'une charte pour le D21-22 et première proposition de dispositifs à envoyer à l'ensemble du collectif par Sofia Correa. 	<ul style="list-style-type: none"> - Aspects pratiques concernant la mise en place du D21-22 au champ. - Validation du terme « blés vêtus » pour faire référence à l'En, Am, GE, et du terme « blés marginaux » qui inclut l'En, l'Am, le GE (variétés non hybridées) et les variétés population de blé tendre, entre autres.
29/11/2021 AM	<ul style="list-style-type: none"> - 5 paysan.ne.s. - 3 chercheur.euse.s : Olivier Hamant, Marie-Thérèse Charreyre, Sofia Correa. - Jean-François Vian (le temps d'une intervention sur la fertilité des sols, cf. colonne « Autres thèmes abordés ».) 	<ul style="list-style-type: none"> - Présentation du D21-22 dans son ensemble. - Retours sur la mise en place du D21-22 (semis 2021). - Choix des traits/caractéristiques agronomiques à prendre en compte. 	<ul style="list-style-type: none"> - Émergence de questions concernant les effets des densités et dates semis sur les rendements finaux. - Précisions sur les méthodes de semis et problèmes vécus par chaque participant.e ; globalement, levée tardive et mauvaise. - Traits/caractéristiques à mesurer : rendements (dont le rendement relatif), compétitivité par rapport aux adventices (à mesurer à 2 reprises), résistance à la verse (à mesurer à 2 reprises), précocité (date d'épiaison), tallage. - Répartition du travail entre acteur.trices : volonté des paysan.ne.s de participer au suivi des parcelles du D21-22 dans leurs fermes à travers des fiches de suivi ; accord pour que le suivi soit un peu moins conséquent (moins de mesures quantitatives effectuées par l'équipe de recherche) dans les fermes qu'au CRBA ; prévision de 2 séries de mesures effectuées par l'équipe de recherche et 4 fiches (1 par saison) avec des observations qualitatives à remplir par les paysan.ne.s. 	<ul style="list-style-type: none"> - Organisation des récoltes et du battage. - Possibles stratégies pour le décorticage des récoltes issues du D21-22. - Questionnement sur l'influence de la fertilité des sols sur les différents traits évoqués.
29/11/2021 PM	<ul style="list-style-type: none"> - 5 paysan.ne.s. - 3 chercheur.euse.s : Olivier Hamant, Marie-Thérèse Charreyre, Sofia Correa. - Membres du collectif élargi. 	<ul style="list-style-type: none"> - Présentation des résultats des analyses nutritionnelles préliminaires. 	<ul style="list-style-type: none"> - Identification de certains composés sur lesquels poursuivre les analyses : le taux de protéines, le gluten, les cendres (minéraux totaux), le fer et le zinc. 	/

Continuation du tableau 3.5

Date	Personnes présentes	Objectifs principaux	Décisions / Conclusions	Autres thèmes abordés
07/03/2022	<ul style="list-style-type: none"> - 4 paysan.ne.s - Léa Bernard (ARDEAR). - 5 chercheur.euse.s : Olivier Hamant, Marie-Thérèse Charreyre, Sofia Correa, Justine Lepagneul, Aubin Démonté. - 1 membre du collectif élargi : Camille Vindras. 	<ul style="list-style-type: none"> - Point sur les recherches bibliographiques sur les effets des densités et des dates de semis sur les rendements. - Retours sur la levée dans de D21-22. - Retours sur les propositions de fiches de suivi. - Validation du protocole de suivi agronomique (4 caractéristiques majeures estimées par des traits en lien). - Présentations des stages sur la fertilité des sols et sur les compositions en protéines du gluten. - Présentations des résultats (agronomiques) du DE mis en place au CRBA en 2020-2021. - Point sur les indemnisations des paysan.ne.s pour leur participation au projet. 	<ul style="list-style-type: none"> - Propositions de stratégies pour étudier les effets des dates et densités de semis sur les rendements ; émergence d'un nouveau questionnement sur comment favoriser le tallage. - Levée globalement hétérogène au sein de chaque site, tardive et assez mauvaise ; proposition d'ajuster le protocole de suivi à des densités faibles et hétérogènes (en mesurant un maximum de traits sur des pieds individuels). - Quelques modifications à effectuer sur les fiches de suivi ; notamment en faire 3 distinctes pour le suivi du printemps. - Validation du protocole, avec quelques ajustements mineurs. - Remarques sur les stages. - Peu de retours, probablement en raison du temps limité consacré à cette partie. 	/
10/10/2022 AM	<ul style="list-style-type: none"> - 3 paysan.ne.s. - 2 chercheuses : Marie-Thérèse Charreyre, Sofia Correa. 	<ul style="list-style-type: none"> - Présentation des premiers résultats du suivi agronomique du D21-22. - Validation des choix des échantillons issus du D21-22 à intégrer dans les analyses des compositions de protéines du gluten. - Discussion sur la suite du projet (notamment, le fait de ne pas reconduire de dispositif expérimental en 2022-2023). 	<ul style="list-style-type: none"> - Idées de traits supplémentaires à considérer (ex : poids spécifique). - Constat des conclusions limitées pouvant être tirées des dispositifs dans les fermes à cause du déséquilibre entre les sites. - Volonté de tester les effets de différentes pratiques agronomiques. - Eléments d'interprétation des résultats. - Accord sur les échantillons à inclure : pour ceux issus des fermes, choisir au moins une variété par espèce et prioriser celles qui ont été le plus répétées entre les sites. - Accord pour ne pas reconduire un dispositif équivalent en 2022-2023, mais volonté de multiplier des variétés pour relancer une expérimentation dans le futur. - Volonté d'assurer un suivi via les fiches utilisées en 2021-2022 sur les variétés en multiplication dans les fermes. 	/
10/10/2022 PM	<ul style="list-style-type: none"> - 3 paysan.ne.s. - 2 chercheur.euse.s : Marie-Thérèse Charreyre, Sofia Correa. - Membres du collectif élargi. 	<ul style="list-style-type: none"> - Présentation des résultats de stage sur la fertilité des sols. - Présentation des résultats de stage sur les compositions en protéines du gluten des échantillons du DE. 	<ul style="list-style-type: none"> - Retours sur la méthode d'analyse des données des sols, qui ne rentre pas assez dans le détail des données. 	/

Continuation du tableau 3.5				
Date	Personnes présentes	Objectifs principaux	Décisions / Conclusions	Autres thèmes abordés
20/03/2023 AM	<ul style="list-style-type: none"> - 3 paysan.ne.s. - 3 chercheur.euse.s : Olivier Hamant, Marie-Thérèse Charreyre, Sofia Correa. - CRBA 	<ul style="list-style-type: none"> - Présentation des résultats complets du suivi agronomique du D21-22. - Informations sur le projet ANS porté par Marie-Thérèse Charreyre. 	<ul style="list-style-type: none"> - Volonté de considérer au moins un trait supplémentaire : le poids spécifique. - Volonté de reconduire une expérimentation avec d'autres conditions climatiques (différentes de celles de l'année 2021-2022). - Eléments d'interprétation des résultats. - Nécessité de mieux formaliser le collectif : qui en fait partie ?, comment sont gérées les données ?, quels sont les objectifs et visions communes ?, etc. - Décision de consacrer la prochaine réunion à cette formalisation. - Des possibilités pour poursuivre la recherche, sans dépendre des financements venant de la recherche ont été évoqués. 	<ul style="list-style-type: none"> - Discussion sur le taux d'avortement de la variété de GE <i>Oberkulmer</i>.
20/03/2023 PM	<ul style="list-style-type: none"> - 3 paysan.ne.s - 2 chercheur.euse.s : Marie-Thérèse Charreyre, Sofia Correa. - CRBA. - Membres du collectif élargi. 	<ul style="list-style-type: none"> - Présentation des résultats des analyses des compositions en protéines du gluten des échantillons du D21-22. - Présentation du volet santé du projet ANS porté par Marie-Thérèse Charreyre. 	/	/
Fin du tableau 3.5				

Pour toutes les réunions, l'équipe de recherche prenait la décision des acteur.trice.s à inviter et fixait l'ordre du jour. J'ai moi-même animé toutes les réunions. Néanmoins, lors de certaines séances, des points spécifiques de l'ordre du jour ont été conduits par d'autres chercheur.euse.s (tableau 3.5). A l'issue de chaque réunion avec les paysan.ne.s, j'étais responsable de rédiger un compte-rendu, de le faire valider à tou.te.s les participant.e.s, et de mettre une version finale à disposition du collectif. Cependant, par manque de temps, un compte-rendu n'a été rédigé que pour deux des cinq réunions. Par ailleurs, il est important de noter que la rédaction de comptes-rendus n'a pas été prévue pour les réunions bilatérales avec le CRBA.

Les comptes-rendus des réunions avec les paysan.ne.s, l'ensemble des supports utilisés pour les animer, des documents complémentaires et la charte de fonctionnement établie pour l'année 2021-2022 ont été partagés à tous les membres du collectif de la thèse sur un espace de partage en ligne. La création de cet espace résultait d'une décision prise au cours de la réunion bisannuelle du 8 mars 2022 (tableau 3.5). Cependant, à ma connaissance, personne en dehors de moi-même ne l'a jamais consulté.

Il me semble important de noter que l'organisation de réunions distinctes, avec les paysan.ne.s et l'ARDEAR d'un côté et avec le CRBA de l'autre, a limité les échanges directs entre paysan.ne.s, ARDEAR et CRBA. Par ailleurs, les membres du collectif de la thèse ont eu l'occasion d'apercevoir d'autres membres du deuxième cercle de partenaires lors des séances de l'après-midi de certaines réunions bisannuelles. Cependant, en raison du temps limité consacré à ces séances de réunion, peu d'échanges ont eu lieu entre paysan.ne.s, ARDEAR, CRBA et d'autres partenaires.

3.4.4.2 La distribution des tâches pour le dispositif expérimental 2021-2022

Pour répondre aux questions soulevées par le collectif de recherche, un dispositif expérimental a été mis en place durant l'année 2021-2022 (D21-22), au CRBA et dans chacune des six fermes impliquées dans le projet. Ce dispositif est présenté en détail dans la section 3.5. L'établissement et le suivi de ce dernier ont nécessité la réalisation de diverses tâches, réparties entre les différent.e.s acteur.trice.s. Parmi ces tâches figurent la recherche de variétés, l'élaboration d'un plan expérimental, la mise en place des parcelles expérimentales (semis), la gestion technique de ces parcelles (désherbage, etc.), le suivi scientifique des variétés (observations et mesures sur le terrain), les opérations de récolte et de battage, le décorticage et les mesures et analyses post-récolte (figure 3.4.4).

La gestion du D21-22 a été orchestrée par l'équipe de recherche, à travers des interactions avec les paysan.ne.s d'une part, et avec CRBA d'autre part (figure 3.4.4). La répartition des tâches avec ces deux acteurs a été discutée lors de réunions. En ce qui concerne les paysan.ne.s, elle a principalement été abordée lors de la réunion du 8 mars 2021, et a été formalisée dans la charte de fonctionnement (annexe D). Ce document résume les engagements des paysan.ne.s par rapport au D21-22 : participer à la conception du dispositif, mettre en place chez eux.elles la partie du dispositif sur lequel un accord aura été trouvé, effectuer des observations sur les parcelles mises en place dans leurs fermes lors de quatre périodes du cycle de culture (automne, hiver, printemps, été), accueillir ponctuellement des chercheur.euse.s pour que ceux.celles-ci effectuent des notations plus conséquentes sur leurs parcelles expérimentales. La charte de fonctionnement énumère également les responsabilités de l'équipe de recherche : adapter les dispositifs aux contraintes de chacun.e, assurer le suivi des notations effectuées par les paysan.ne.s et être disponibles pour répondre à des questions en cas de besoin, faire des mesures quantitatives plus conséquentes avant et après la récolte sur les parcelles des fermes, être assurée.es en cas d'accident ou de dommage matériel lors des visites dans les fermes. Par rapport au CRBA, la répartition des tâches a été discutée à plusieurs reprises, mais aucune formalisation n'a été réalisée.

Plus concrètement, la conception du D21-22 a été réfléchi immédiatement suite aux réunions du 8 mars 2021 avec les paysan.ne.s et du 23 avril avec le CRBA. L'enjeu était de mettre en place une expérimentation qui permette de répondre scientifiquement aux questions soulevées par le collectif, tout en s'adaptant aux contraintes (surface disponible, moyens humains) de chaque site.

La préparation du plan du dispositif s'est déroulée en plusieurs étapes. Tout d'abord, un document a été envoyé aux paysan.ne.s pour leur demander le nombre maximal de parcelles qu'il.elle.s pourraient mettre en place dans leurs fermes, le format des parcelles souhaité¹⁰, et leurs préférences pour les différentes espèces de blé évaluées. Ce document a également permis de recenser les variétés (et leurs quantités) pouvant être mises à disposition par chaque paysan.ne, les densités de semis habituellement utilisées pour chaque espèce et, pour ceux.celle.s qui envisageaient de réaliser les semis au semoir, la quantité minimale de semences requise pour l'utilisation de cet outil. En parallèle, des échanges avec le CRBA ont eu lieu afin de connaître la surface totale et la configuration du terrain qui pourrait être mis à disposition.

10. Lors de la réunion du 8 mars 2021, certain.e.s paysan.ne.s ont souligné que, pour pouvoir utiliser leur semoir, il.elle.s préféreraient semer les variétés dans leurs fermes en bandes au lieu de microparcelles. Ainsi, il a été convenu que deux formats de parcelles seraient proposés : des microparcelles de 5 m² ou des bandes de la largeur des semoirs des paysan.ne.s et de longueur variable.

De manière concomitante à la conception des plans expérimentaux, nous avons entrepris la recherche de variétés auprès de divers.e.s acteur.trice.s : des paysan.ne.s dont nous avons obtenu le contact de bouche-à-oreille ou que nous avons rencontré.e.s lors de rencontres paysannes, des associations telles que Graines de Noé, ou encore des banques de gènes, notamment le Centre de Ressources Biologiques « Céréales à paille » (CRB) de l'INRAE de Clermont-Ferrand. Après avoir établi une première liste des variétés potentiellement disponibles en quantités suffisantes pour les inclure dans l'expérimentation, nous l'avons envoyée au paysan.ne.s, pour qu'il.elle.s indiquent leurs préférences. A partir de ces choix, j'ai proposé un premier plan expérimental pour chacune des six fermes. Ce dernier a servi de support pour initier des discussions avec les six paysan.ne.s, qui ont notamment soulevé des inadéquations avec la configuration de leurs parcelles. Suite à plusieurs séries d'échanges téléphoniques ou par mail, la troisième version des plans expérimentaux dans les fermes a été validée par tou.te.s les acteur.trice.s.

Après avoir finalisé les plans expérimentaux, et à l'issue de la récolte de 2021, l'équipe de recherche s'est occupée de centraliser les semences des variétés à intégrer dans le dispositif (figure 3.4.4). Pour chacune d'entre elles, j'ai effectué des tests de germination et calculé le « poids de mille semences¹¹ ». Les valeurs obtenues ont permis de calculer les masses à semer pour atteindre une densité de 250 graines/m². Ces masses ont ensuite permis de constituer des lots de semences avec les quantités exactes à semer, qui ont été distribués aux six paysan.ne.s.



FIGURE 3.6 – Semis au CRBA réalisés à travers des chantiers participatifs. A gauche (a), premiers semis effectués les 25 et 26 octobre 2021. A droite (b), deuxièmes semis effectués du 19 au 21 novembre 2021, après destruction des premiers.

Au niveau de la mise en place du dispositif, chaque paysan.ne s'est chargé.e de préparer les parcelles expérimentales, et de faire les semis au sein de sa ferme. Au CRBA, la préparation

11. J'ai choisi de parler de « semences » et non de « grains » car il s'agit d'épillets pour les blés vêtus et de grains nus pour le BT. Or un épillet d'Am ou de GE peut contenir jusqu'à trois graines.

des parcelles a été faite par des salariés du CRBA et par moi-même. Les semis ont quant-à-eux été réalisés la dernière semaine d’octobre 2021, manuellement, au cours d’un chantier participatif organisé par l’équipe de recherche. Néanmoins, ces semis ont été fortement ravagés par des oiseaux. Ainsi, une deuxième série de semis a été effectuée du 19 au 21 novembre, lors d’un nouveau chantier participatif organisé en urgence par l’équipe de recherche (figure 3.6). Ces nouveaux semis ont été protégés des oiseaux par un voile de forçage (P17).

Ensuite, la gestion technique des essais (désherbage, fertilisation), a été assurée par les paysan.ne.s dans les fermes et par les chercheur.euse.s au CRBA. En ce qui concerne le suivi scientifique, il a été mené à la fois par les paysan.ne.s et par les chercheur.euse.s au sein des fermes. Plus précisément, les paysan.ne.s ont réalisé des observations qualitatives à quatre périodes du cycle de culture (automne, hiver, printemps et été). Ces observations ont été effectuées à l’aide de fiches de suivi proposées par les chercheur.euse.s et validées par les paysan.ne.s suite à certaines modifications. Ces fiches ont été adaptées à partir des versions utilisées dans le projet de sélection participative sur BT mené par l’équipe DEAP de l’UMR GQE, et sont disponibles dans l’annexe E. Les chercheur.euse.s ont effectué deux séries de mesures, surtout quantitatives, au champ dans les fermes : une à la sortie de l’hiver et une juste avant maturité. Au CRBA, toutes les mesures ont été réalisées par l’équipe de recherche (figure 3.4.4). La liste exhaustive des variables estimées à partir de ces mesures est présentée dans la section 3.5.

Enfin, pour toutes les parcelles dans chacun des sites, nous avons récolté des échantillons d’épis sur lesquels des mesures post-récoltes ont été effectuées. Ces récoltes ont été faites par l’équipe de recherche, avec parfois l’aide des paysan.ne.s ou des salarié.e.s du CRBA. Les échantillons issus de ces récoltes ont tous été battus et décortiqués par l’équipe de recherche, à l’aide d’une batteuse de paille. Les mesures post-récoltes ont également été faites par les chercheur.euse.s (figure 3.4.4).

3.4.4.3 Les échanges informels

Comme illustré dans la figure 3.4.4, la gestion du D21-22 a été orchestrée par les chercheur.euse.s. Néanmoins, certaines tâches comme la conception des plans expérimentaux ou l’adaptation des fiches de suivi ont requis des échanges bilatéraux récurrents entre partenaires. Ces discussions traitant de sujets spécifiques ont eu lieu principalement par mail et par téléphone.

Au-delà des discussions qui ont eu lieu lors des réunions et des interactions autour d'un sujet précis (par exemple, la conception des plans expérimentaux), la collaboration a donné lieu à un nombre conséquent d'échanges informels. Ceux-ci ont eu lieu entre chercheur.euse.s et paysan.ne.s, lors des visites dans les fermes d'une part, et entre chercheur.euse.s et salarié.e.s du CRBA, lors des journées de travail sur le site du CRBA à Charly, de l'autre (figure 3.4.4). A l'occasion de certaines visites chez les paysan.ne.s, nous avons prévu des moments pour discuter de résultats qui n'avaient pas pu être abordés en réunion. Par exemple, lors de la visite pour les mesures à maturité, nous avons partagé les résultats des compositions en protéines du gluten sur les échantillons du DE. Ces discussions ont donné lieu à des remarques et à de nouvelles questions, qui ont été prises en compte dans la poursuite du projet. Elles ont par exemple abouti à l'ajout de variables agronomiques (comme celles en lien avec la précocité) dans le protocole de suivi. Néanmoins, ces déplacements et temps passés ensemble, ont surtout donné lieu à des discussions informelles, qui se sont avérés essentiels à l'établissement d'une relation de confiance.

Il me paraît important de noter que lors de la première année de thèse, le fait d'avoir déjà un dispositif en place (le DE au CRBA) et d'effectuer des ANTP a permis d'apporter des éléments concrets lors des échanges (formels et informels). En particulier, le suivi du DE a permis aux scientifiques d'avoir une meilleure compréhension de la culture des céréales étudiées. Le DE a également fait l'objet d'une visite dans le cadre de la « Tournée des blés » organisée par l'ARDEAR au mois de juin 2021, à laquelle quatre des six paysan.ne.s impliqué.e.s dans le projet ont assisté (figure 3.4.4). Cet événement a été l'occasion d'avoir des discussions informelles entre paysan.ne.s, chercheur.euse.s, ARDEAR et CRBA autour de blés vêtus et en dehors de la sphère académique.

3.4.5 La prise de décision

Au cours de la thèse, aussi bien au sein du collectif de la thèse que du deuxième cercle de partenaires, nous n'avons pas établi de modalités de prise de décisions. A posteriori, on peut identifier plusieurs types de décisions prises pendant les trois années de doctorat.

Tout d'abord, certaines décisions ont été prises exclusivement par l'équipe de recherche, parfois même par une seule chercheuse. Par exemple, les scientifiques ont choisi à eux.elles seul.e.s les personnes à convier aux diverses réunions, l'ordre du jour des rencontres, l'attribution des ressources financières au sein du projet. La décision de ne pas reconduire d'expérimentation lors de l'année 2022-2023 découle aussi uniquement des chercheur.euse.s. J'ai moi-même proposé l'ajout de variables en lien avec la morphométrie des grains (sous-section 3.5.4), afin de compléter les

variables agronomiques et renforcer la possibilité de publier un article scientifique.

Ensuite, certaines décisions bilatérales ont eu lieu, à chaque fois entre les chercheur.euse.s et un autre acteur.trice. Par exemple, la décision de mettre en place le DE a été prise par le CRBA et l'équipe de recherche. Le choix d'effectuer des ANTP, ainsi que la sélection des composés à analyser ont été réalisés entre les chercheur.euse.s et Laurence Mayaud (naturopathe du deuxième cercle de partenaires).

A certaines occasions, une question a émergé lors d'échanges bilatéraux. L'équipe de recherche se l'est appropriée et l'a abordée de la façon qui lui semblait la plus pertinente, sans engager de discussion avec d'autres membres du collectif ou partenaires. Par exemple, la question des propriétés technologiques (principalement en lien avec la fabrication de pain), et des liens avec la composition en protéines du gluten, a été discutée entre un paysan et les chercheur.euse.s. Suite à cette discussion, des analyses de rhéologie ont été initiées, avec une approche proposée par les chercheur.euse.s, sans consultation préalable des autres membres du collectif ou partenaires.

Enfin, plusieurs décisions ont été prises de manière plus collective (figure 3.7). Par exemple, bien que le choix des espèces à évaluer découle d'une proposition initiale des chercheur.euse.s, l'enquête de terrain a permis de vérifier l'intérêt suscité par ces blés auprès des paysan.ne.s. De plus, le choix des espèces exactes à inclure résulte de l'enquête et d'une discussion collective lors de la réunion du 8 mars 2021. D'autres décisions majeures, telles que l'inclusion de variétés population et modernes de BT, l'intégration de l'effet de l'environnement, avec des essais à la ferme, dès la première année d'expérimentation, les choix relatifs aux variables agronomiques, ainsi que la décision de se concentrer sur les protéines du gluten pour le volet nutritionnel sont issus à la fois de l'enquête et de discussions lors des réunions bisannuelles.

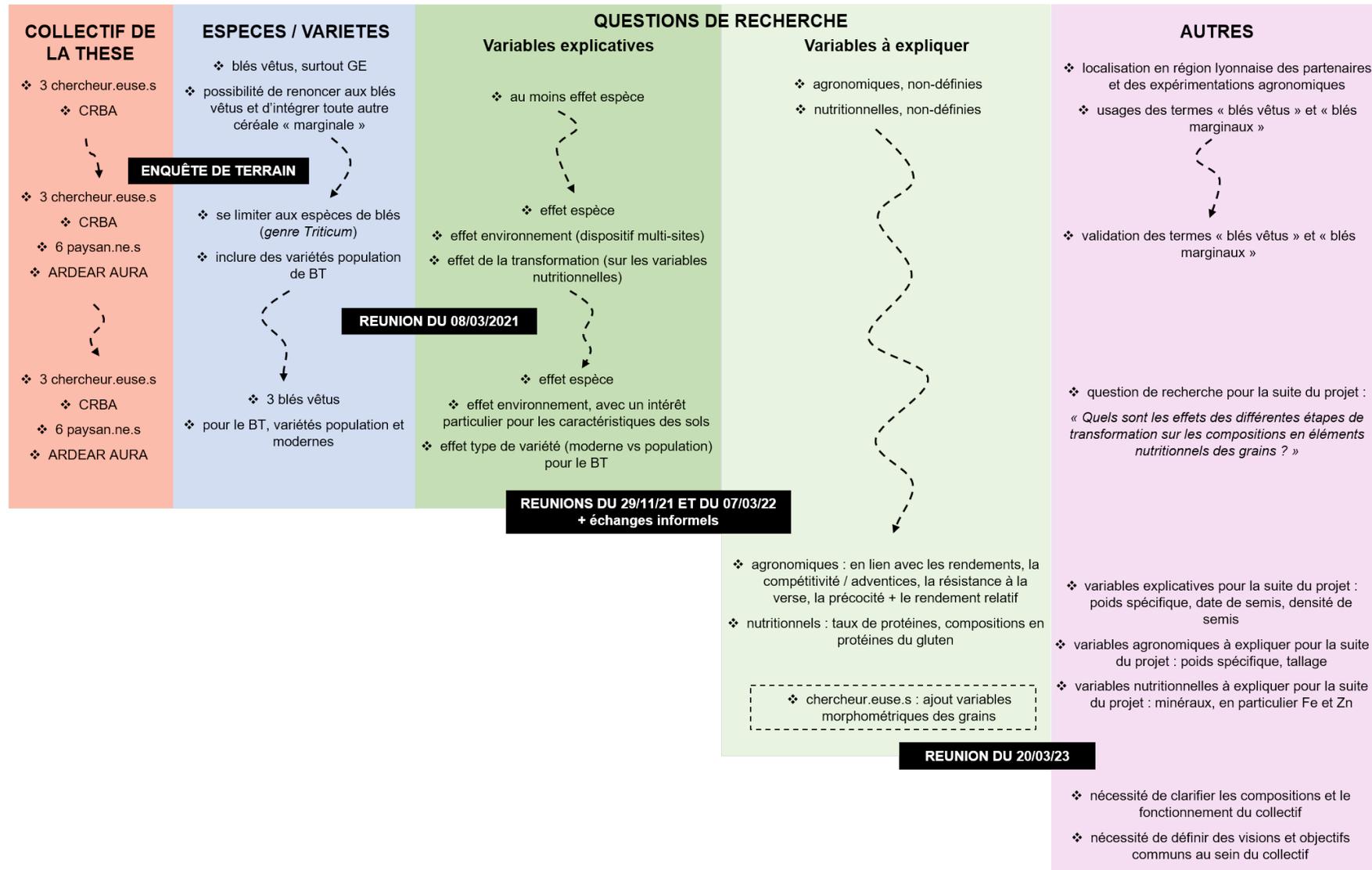


FIGURE 3.7 – Principales décisions collectives prises au cours de la thèse. L'ajout des variables en lien avec la morphométrie des grains est encadré en pointillés, car il est issu d'une décision émanant de la recherche. BT : blé tendre, GE : grand épeautre.

3.5 Le dispositif expérimental 2021-2022

Les échanges avec les différent.e.s acteur.trice.s, en particulier les paysan.ne.s, tout au long de la première année de thèse, ont conduit à l'élaboration d'une stratégie de recherche permettant de traiter les questionnements soulevés par le collectif. Concrètement, il s'est agi de mettre en place un dispositif expérimental : le D21-22.

Afin d'estimer un effet de l'espèce, ce dispositif devait comprendre le plus de variétés possible par espèce. D'autre part, pour prendre en compte l'effet de l'environnement, il devait être localisé sur plusieurs sites différents. Afin de répondre au souhait des paysan.ne.s d'évaluer les variétés chez eux.elle.s, les six fermes étaient incluses parmi ces sites, en plus du CRBA.

Néanmoins, nous avons dû faire face à plusieurs contraintes. Parmi celles-ci, on peut citer la difficulté de trouver des variétés de blés vêtus avec des quantités de graines suffisantes pour les inclure dans l'expérimentation, les surfaces limitées au sein des fermes et au CRBA, et les moyens humains restreints. Par ailleurs, il a fallu s'adapter à la fois aux contraintes spécifiques de chaque site (par exemple, le nombre et le type - microparcelles ou bandes - de parcelles mises en place dans les fermes ont été choisis par les paysan.ne.s) et aux exigences de la recherche (c'est-à-dire, que l'on puisse répondre statistiquement au moins à une partie des questions posées). Pour ce dernier point, nous avons réfléchi au dispositif de telle sorte que les données issues du CRBA soient à elles seules suffisantes pour analyser les effets des espèces et des variétés¹². Nous nous sommes également assuré.e.s qu'une variété (*GE Oberkulmer*) était dans tous les sites, et que les variétés présentes dans les fermes se trouvaient dans trois sites minimum. En particulier, il a fallu trouver des compromis pour que certain.e.s paysan.ne.s acceptent d'inclure les variétés modernes de BT parmi les parcelles expérimentales de leurs fermes.

Pour le volet agronomique, la suite de la stratégie de recherche a consisté à mettre en place et suivre un protocole de mesures, visant à évaluer les caractéristiques les plus importantes selon les paysan.ne.s. Concernant le volet nutrition, il s'est agi d'établir des collaborations avec d'autres laboratoires de recherche permettant d'analyser les composés biochimiques d'intérêt pour le collectif. En particulier, pour l'analyse des compositions en protéines du gluten, un partenariat avec l'UMR IATE, localisée à Montpellier, a été mis en place.

12. Le CRBA était le seul site auquel j'avais accès en transports en communs, ce pourquoi nous avons décidé d'y placer la partie du dispositif la plus conséquente.

Dans cette section, je présente le D21-22 mis en place au CRBA et dans les six fermes. Ensuite, je liste l'intégralité des variables issues du suivi agronomique de ce dispositif. Pour le volet nutrition, centré sur les compositions en protéines du gluten, les protocoles expérimentaux sont détaillés dans la section « Matériel et méthodes » du chapitre 5.

3.5.1 Les variétés

Au total, le dispositif expérimental 2021-2022 comprenait sept variétés d'En, et huit variétés d'Am, de GE et de BT (tableau 3.6). Nous avons choisi de considérer en priorité des variétés déjà cultivées ou disponibles dans les collections de paysan.ne.s dans la région de Lyon, ainsi que celles faisant partie de la collection du CRBA. Concernant les trois espèces de blés vêtus, nos choix étaient restreints par la disponibilité de variétés, et par les quantités de semences disponibles, en particulier lorsqu'elles venaient de banques de gènes. Ainsi, la majorité des variétés d'En, d'Am et de GE proviennent de fermes de paysan.ne.s, du CRBA, et de l'association Graines de Noé située en Côte d'Or (21). Pour chacune des variétés incluses dans l'expérimentation, nous avons essayé de recueillir un maximum d'informations sur son histoire. En tenant compte de ces données, nous avons exclu certaines variétés qui portaient le même nom et dont l'histoire était similaire.

Initialement, trois variétés supplémentaires d'En, deux d'Am et trois de GE faisaient partie du dispositif¹³. Néanmoins, elles ont dû être écartées en raison d'un taux de levée insuffisant, ou parce que l'on ne disposait pas d'assez de semences pour les ressemer suite aux ravages d'oiseaux. La plupart de ces variétés provenaient de banques de graines.

En ce qui concerne le GE, nous avons priorisé des variétés qui n'ont pas été intentionnellement hybridées avec du BT. Cependant, pour des raisons de disponibilité, nous avons inclus deux variétés (*Ressac* et *Rouquin*) qui contiennent du BT dans leurs pedigrees (BERTIN et al. 2001). Néanmoins, il semblerait que la proportion du génome de ces deux variétés issue du BT est faible (KOENIG et al. 2015).

Pour ce qui est du BT, nous avons considéré les mélanges cultivés par chaque paysan.ne participant au projet, ainsi que deux variétés modernes, a priori adaptées à l'agriculture biologique (*Apache* et *Energo*). Ces choix devaient nous permettre d'établir des comparaisons entre les variétés de blés vêtus et les principales variétés de BT cultivées par les paysan.ne.s. Cette stratégie

13. Il s'agissait des variétés d'En *Mo. Vulgare 38V*, *Mo. Flavescens 113 V*, *Sault de Vaucluse*, toutes trois issues du CRB de Clermont-Ferrand ; des variétés d'Am *DC. Farrum Serotinum 42 V* provenant aussi du CRB de Clermont-Ferrand et *Rouge*, obtenu lors de rencontres paysannes ; des variétés de GE *Sp. Epeautre* venant du CRB de Clermont-Ferrand, *du Revermont* et *Israel Gene Bank*, toutes deux provenant du CRBA.

devait également permettre une comparaison entre mélanges paysans de BT et variétés modernes de BT cultivées en pur. Toutefois, il convient de noter que plusieurs mélanges paysans sont composés des mêmes variétés. Ils sont donc relativement proches d'un point de vue génétique, ce qui présente une limite par rapport au fait de les considérer comme des variétés distinctes.

En résumé, les variétés de blés vêtus évaluées dans le D21-22 représentent plutôt fidèlement l'ensemble des variétés assez facilement disponibles pour les paysan.ne.s en région lyonnaise.

TABLEAU 3.6 – Variétés d'engrain, d'amidonnier, de grand épeautre et de blé tendre incluses dans le dispositif expérimental 2021-2022.

Début du tableau 3.6					
Nom de la variété	Origine des semences	Type de variété	Type de conservation	Année récolte semences	Informations supplémentaires
Engrain (<i>Triticum monococcum</i> subsp. <i>monococcum</i>)					
<i>Allemand</i>	Association Graines de Noé (Côte d'Or, France)	Probablement variété paysanne	Multipliée pendant au moins 15 ans en microparcelles en Côte d'Or (France).	2018	Récupérée au début des années 2000 auprès d'une ferme en Allemagne.
<i>de Bulgarie</i>	CRBA (Rhône, France)	Probablement variété paysanne	Multipliée pendant 10 ans en microparcelles dans une ferme en Isère (France) et une fois au CRBA.	2021	Récupérée autour de 2010 auprès d'un boulanger en Bulgarie (selon lequel la variété poussait spontanément dans les champs) et donnée au CRBA en 2020.
<i>Graines de l'Ain</i>	Association Graines de l'Ain (Ain, France)	Probablement variété paysanne	Cultivée pendant au moins deux ans par un paysan dans l'Ain (France).	2021	Récupérée par un paysan français auprès d'une ferme en Allemagne.
<i>Mix JMG</i>	Ferme dans la Marne (France)	Mélange de variétés paysannes	Cultivée pendant au moins 7 ans par un paysan dans la Marne (France).	2020	Mélange de 5 variétés d'origines différentes : une ferme en Allemagne, et 4 fermes en France (dans le Val de Loire, la Champagne et l'Argonne).
<i>Noir</i>	Ferme en Haute-Savoie (France)	Probablement variété paysanne	Multipliée pendant au moins 7 ans en Haute-Savoie (France).	NA	Récupérée par un paysan français lors de rencontres paysannes.
<i>Petit épeautre de Provence</i>	CRBA (Rhône, France)	Mélange de variétés paysannes	Multipliée pendant 3 ans en microparcelles puis cultivée 3 ans dans une ferme dans la Loire (France). Multipliée une fois en microparcelles au CRBA.	2021	Mélange de deux variétés (principalement une récupérée auprès d'un paysan dans les Alpes de Haute Provence (France) et petite quantité d'une autre obtenue par des échanges paysans.
<i>Pop de Barcelonnette</i>	CRBA (Rhône, France)	Probablement variété paysanne	Multipliée une fois en microparcelles au CRBA.	2021	Donnée au CRBA par l'Association Savoirs de Terroirs (Ardèche, France).
Amidonnier (<i>Triticum turgidum</i> subsp. <i>dicoccumdicoccum</i>)					
<i>Blanc</i>	CRBA (Rhône, France)	Probablement variété paysanne	Multipliée pendant 5 ans en microparcelles puis cultivée 4 ans dans la Loire (France). Multipliée une fois au CRBA.	2021	Récupérée par un paysan français en Allemagne (initialement, la variété était mélangée à un autre amidonnier aux épis noirs).
<i>Blanc long</i>	CRBA (Rhône, France)	Probablement variété paysanne	Multipliée une fois en microparcelles au CRBA.	2021	Donnée au CRBA par l'Association Savoirs de Terroirs (Ardèche, France).
<i>Bleu d'Ethiopie</i>	CRBA (Rhône, France)	NA	Conservation <i>ex-situ</i> dans la Banque de gènes d'Israël, et multipliée une fois en microparcelles au CRBA	2021	Récupérée par le CRBA auprès de la Banque de graines d'Israël.
<i>de la Forêt Noire</i>	CRBA (Rhône, France)	Probablement variété paysanne	Multipliée une fois en microparcelles au CRBA.	2021	Récupérée par le CRBA auprès d'un paysan français.

Continuation du tableau 3.6					
Nom de la variété	Origine des semences	Type de variété	Type de conservation	Année récolte semences	Informations supplémentaires
<i>de Poveda</i>	Association Graines de Noé (Côte d'Or, France)	Probablement variété paysanne	Multipliée une fois en microparcelles en Côte d'Or (France).	2019	Récupérée auprès d'une association belge autour de 2018.
<i>de Souabe</i>	Association Graines de Noé (Côte d'Or, France)	Probablement variété paysanne	Multipliée une fois en microparcelles en Côte d'Or (France).	2020	Récupérée auprès d'une association belge autour de 2018.
<i>Gris</i>	Association Graines de Noé (Côte d'Or, France)	Probablement variété paysanne	Conservation <i>ex-situ</i> au CRB de Clermont-Ferrand, suivie de 10 ans de multiplication en microparcelles en Côte d'Or (France).	2018	Récupérée auprès du CRB de Clermont-Ferrand.
<i>Roux Blanc</i>	Association Graines de Noé (Côte d'Or, France)	Probablement variété paysanne	Multipliée pendant 10 ans en microparcelles en Côte d'Or (France).	2018	Récupérée par le fondateur de Graines de Noé dans les années 1990 et multipliée au moins 10 ans en Côte d'Or (France).
Grand épeautre (<i>Triticum aestivum</i> subsp. <i>spelta</i> (L.) Thell.)					
<i>Arduinii</i>	Banque de gènes de l'INRAE : CRB de Clermont-Ferrand (France).	Probablement variété paysanne	Conservation <i>ex-situ</i> au CRB de Clermont-Ferrand, avec une seule multiplication.	2009	Multipliée une fois en Auvergne (France).
<i>de Manitoba</i>	CRBA (Rhône, France)	Probablement variété paysanne	Multipliée pendant au moins 5 ans dans une ferme en Isère (France) et une fois au CRBA	2021	Récupérée par un paysan français auprès d'une ferme dans la région du Manitoba (Canada).
<i>Doré</i>	Ferme en Haute-Savoie (France)	Variété paysanne ou variété historique	Conservation <i>ex-situ</i> au CRB de Clermont-Ferrand, puis conservation dans un monastère, puis cultivée pendant plusieurs années en Haute-Savoie (France).	2021	Récupérée auprès d'un monastère (les moines avaient eux-mêmes récupéré la variété auprès du CRB de Clermont-Ferrand) par un boulanger et cultivée pendant plusieurs années (au début par le boulanger et ensuite par un paysan) en Haute-Savoie (France).
<i>Escanda de Asturias</i>	Ferme dans la région de León (Espagne)	Probablement variété paysanne	Cultivée pendant au moins 5 ans dans la région de León (Espagne).	2021	Variété originaire des Asturies (Espagne).
<i>Oberkulmer</i>	Ferme dans la Marne (France)	Variété historique	Cultivée pendant au moins 12 ans dans la Marne (France)	2020	Variété suisse récupérée par un paysan français en Allemagne. La variété est issue d'une sélection massale à partir d'une variété de pays suisse. Elle a été créée en 1948, enregistrée au catalogue européen (https://www.semoe.fr), et utilisée dans des programmes de sélection (SIEDLER et al. 1994).
<i>Ressac</i>	Association Graines de Noé (Côte d'Or, France)	Variété moderne	Multipliée pendant au moins 5 ans en microparcelles en Côte d'Or (France).	2015	Variété belge récupérée par le fondateur de Graines de Noé. Cette variété a été obtenue à l'Institut agronomique de Gembloux, et est dérivée de <i>Rouquin</i> (son pedigree inclut la variété <i>Oberkulmer</i> , et du blé tendre) (BERTIN et al. 2001). Elle est inscrite au catalogue européen (https://www.semoe.fr).
<i>Rouquin</i>	Association Graines de Noé (Côte d'Or, France)	Variété moderne	Multipliée pendant au moins 5 ans en microparcelles en Côte d'Or (France).	2015	Variété belge récupérée par le fondateur de Graines de Noé. Cette variété a été obtenue à l'Institut agronomique de Gembloux, et son pedigree inclut la variété <i>Oberkulmer</i> , et du blé tendre (BERTIN et al. 2001).

Continuation du tableau 3.6					
Nom de la variété	Origine des semences	Type de variété	Type de conservation	Année récolte semences	Informations supplémentaires
<i>Tyrolien Rouge</i>	Ferme en Normandie (France)	Probablement variété historique	Multipliée au moins une fois en Normandie (France)	2020	Variété autrichienne (KOENIG et al. 2015).
Blé tendre (<i>Triticum aestivum</i> subsp. <i>aestivum</i>)					
<i>Mix HP&DM</i>	Ferme dans le Rhône (France)	Mélange de variétés paysannes	Cultivée pendant 10 ans dans le Rhône (France). Tous les ans, une sélection massale a été exercée pour favoriser les grains de grosse taille.	2021	Mélange d'environ 100 variétés paysannes. Certaines variétés sont issues des fermes de CD et de SR.
<i>Mix CD</i>	Ferme en Isère (France)	Mélange de variétés paysannes	Cultivée pendant au moins 5 ans en Isère (France). Sélection massale faite uniquement la première année. Des petites quantités de différentes variétés ont été ajoutées tous les 2 ans pour maintenir un niveau de diversité génétique élevé.	2021	Mélange d'environ 30 variétés, dont certaines issues de programmes de sélection participative. Les variétés ont été choisies pour leur adaptation aux conditions pédoclimatiques de la ferme, pour leur résistance à la verse et pour leurs rendements élevés.
<i>Mix SR</i>	Ferme dans la Loire (France)	Mélange de variétés paysannes	Cultivée pendant 3 ans dans la Loire (France). Tous les ans, une sélection massale a été exercée, pour favoriser les grains de grosse taille.	2021	Mélange d'environ 10 variétés paysannes (<i>Carossela, Cucceta, Barbu Milanais, Saissette de Provence, Touzelles, Meunier d'Apt, Bardot, Bladette</i>). Certaines de ces variétés sont issues de la ferme de CD. Initialement, les variétés ont été choisies pour leur résistance à la verse, aux maladies et au climat froid.
<i>Mix GA</i>	Ferme dans l'Ain (France)	Mélange de variétés paysannes et de variétés historiques	Pendant 5 ans, multiplication de chaque variété séparément dans l'Ain (France). Au sein de chaque variété, une sélection massale a été exercée tous les ans pour favoriser l'adaptation aux conditions pédoclimatiques locales, la résistance à la verse et la couverture du sol. Le mélange a été composé chaque année avec des proportions égales de chaque variété.	2021	Mélange de 4 variétés (<i>Rouge de Bordeaux, Barbu du mâconnais, Autrichien, Alauda</i>). Initialement, les variétés ont été choisies pour leur adaptation aux conditions pédoclimatiques du département de l'Ain.
<i>Mix PG</i>	Ferme dans l'Isère (France)	Mélange de variétés modernes	Cultivé pendant 5 ans en Isère (France). Une sélection massale a été exercée tous les ans pour favoriser la compétitivité par rapport aux adventices et la taille des grains.	2021	Mélange de variétés modernes (<i>Renan, Togano, Apache, Armstrong, Pireneo</i>) et résidus de variétés paysannes (issues de la ferme de CD). Les variétés ont été initialement choisies pour leur adaptation à un climat de montagne.
<i>Mix CM</i>	Ferme dans la Loire (France)	Mélange de variétés modernes	Cultivé pendant 2 ans dans la Loire (France).	2021	Mélange de 5 variétés modernes (<i>Togano, Filou, Arenzo</i> et 2 autres) et résidus de variétés paysannes.
<i>Apache</i>	Ferme dans la Marne (France)	Variété moderne	Cultivé pendant plusieurs années dans la Marne (France) selon des pratiques de culture conventionnelles.	2020	Variété moderne, inscrite au catalogue français en 1998 (https://www.semae.fr).
<i>Energo</i>	Ferme dans la Marne (France)	Variété moderne	Cultivé pendant plusieurs années dans la Marne (France) selon des pratiques de culture conventionnelles.	2020	Variété autrichienne, inscrite au catalogue européen (https://www.semae.fr).
Fin du tableau 3.6					

3.5.2 Les sept sites

Comme mentionné précédemment, le D21-22 a été mis en place au CRBA et dans six fermes. Ces sept sites sont localisés dans un rayon de 100 km autour de la ville de Lyon (figure 3.8). Ils sont répartis sur quatre départements : l'Ain (01), l'Isère (38), la Loire (42) et le Rhône (69).

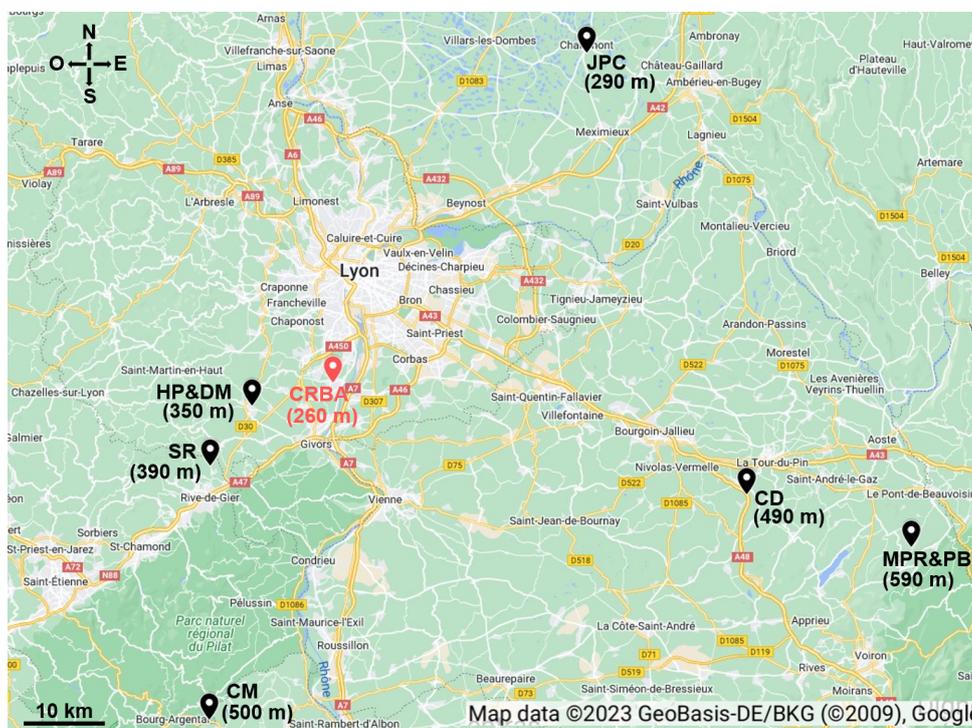


FIGURE 3.8 – Localisation géographique des sept sites (le CRBA et six fermes, nommées par des acronymes) au sein desquels le dispositif 2021-2022 a été mis en place. Les altitudes correspondantes sont indiquées entre parenthèses.

Les principales différences en termes de climat entre les sept sites sont liées à leur altitude et à l'humidité. En particulier, les fermes MPR&PB et CM se situent en zones montagneuses, caractérisées par des hivers longs et des températures basses. La ferme JPC, localisée dans la région des Dombes, se distingue par des sols très humides. Lors de l'enquête de terrain, il est apparu que la principale contrainte climatique à laquelle font face les six paysan.ne.s est la sécheresse estivale. Celle-ci affecte particulièrement HP&DM, dont les parcelles agricoles sont exposées au vent. Globalement, la saison 2021-2022 a été marquée par un printemps chaud et surtout très sec (figure 3.9).

Les relations entre les propriétés des sols, les caractéristiques agronomiques des plantes et la composition en éléments nutritionnels des grains est une question qui est ressortie des échanges avec les paysan.ne.s et avec le CRBA (3.7). Ce sujet a été en partie abordé par un stage de fin d'études mené par Aubin Démonté, étudiant de l'ISARA, de mars à août 2022 (DÉMONTÉ 2022).

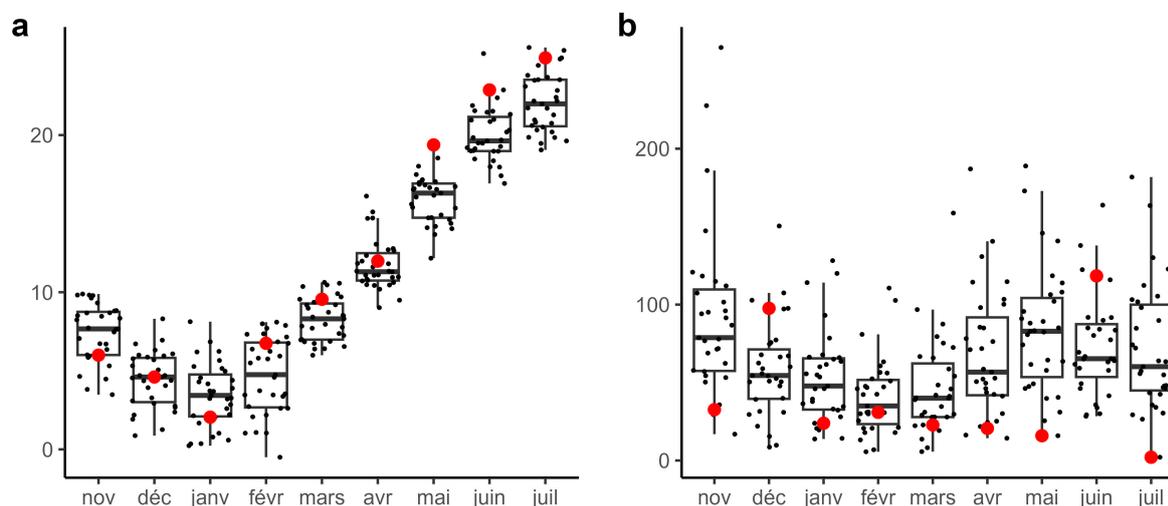


FIGURE 3.9 – Températures mensuelles moyennes en °C (a) et précipitations mensuelles totales en mm (b) sur le site du CRBA. Les boxplots représentent les distributions de valeurs pour les données de 1992 à 2022, les points noirs représentent les valeurs individuelles pour chaque année comprise entre 1992 et 2022, et les points rouges représentent les valeurs de la saison 2021-2022. La valeur élevée de précipitations totales observée pour le mois de juin 2022 est liée à un orage de grêle qui a eu lieu le 30 juin. Les données sont issues des données SAFRAN de l'INRAE (MAURY et al. 2021), et correspondent à une maille de 2 x 2 km comprenant le site du CRBA.

L'objectif plus précis de ce stage a consisté à caractériser la fertilité des sols des sept sites accueillant le D21-22, en vue d'utiliser ces analyses pour approfondir l'interprétation des observations agronomiques et biochimiques. Ainsi, quatre composantes de la fertilité des sols (la texture, la nutrition hydrique et minérale, la vie du sol et le pH) ont été identifiées et évaluées par un ensemble de paramètres (tableau 3.7). Ces paramètres sont issus d'analyses d'échantillons de sol effectuées par un prestataire (Celesta-lab), de mesures réalisées par l'équipe de recherche sur le terrain et d'entretiens. Les échantillons pour les analyses en laboratoire ont été constitués par un mélange de huit prélèvements, effectués à 20 cm de profondeur, en des points distincts des parcelles expérimentales. Des mesures de pénétrométrie ont également été effectuées en huit points des parcelles expérimentales, tandis que la profondeur des sols n'a été mesurée qu'en quatre points. Tous les échantillons ont été prélevés et toutes les mesures sur le terrain ont été réalisées sur les parcelles expérimentales du D21-22. Dans les sites au sein desquels le dispositif était réparti sur deux parcelles de culture distinctes (avec des précédents culturels différents), toutes les

mesures et prélèvements ont été effectués séparément sur chacune de ces deux parcelles.

Au cours de son stage, Aubin Démonté a effectué une analyse multi-critères basée sur les paramètres représentés sur fond vert dans le tableau 3.7. Cette analyse a mis en évidence trois sites avec une fertilité élevée (JPC, MPR&PB, SR), deux avec une fertilité intermédiaire (CRBA, CD) et deux avec une fertilité moindre (CM, HP&DM) (DÉMONTÉ 2022). Néanmoins, ce type d'analyse simplifie beaucoup les données. Ainsi, les paysan.ne.s ont suggéré de regarder les valeurs individuelles des différents paramètres (ou de mettre en place une analyse moins simplificatrice), pour permettre une meilleure interprétation des résultats agronomiques et nutritionnels au regard de ces analyses pédologiques.

TABLEAU 3.7 – Caractéristiques pédologiques des sept sites accueillant le dispositif expérimental 2021-2022. N : azote, C : carbone, MO : matière organique, CEC ; capacité d'échange cationique, TFS : terre fine sèche, TS : terre sèche. Fond vert : paramètres utilisés par Aubin Démonté pour comparer la fertilité des sols entre les sites par une analyse multicritères. Il a identifié trois sites avec des fertilités élevées (noms des sites en vert dans le tableau), deux sites avec des fertilités moyennes (noms des sites en bleu) et deux sites avec des fertilités faibles (noms des sites en rouge). (1) Données issues des analyses Celesta-lab. (2) Données issues d'entretiens. (3) Mesuré par Aubin Démonté à l'aide d'une tarière. (4) Estimé à partir de mesures de résistance à la pénétration réalisées par Aubin Démonté à l'aide d'un pénétromètre. A partir d'une résistance de 3 MPa, on estime que le sol n'est plus explorable par les racines. (5) Calculée par Aubin Démonté à l'aide du calcul de DOUSSAN et al. 2017. (6) Calculé par Aubin Démonté à partir des données de Celesta-Lab. Au CRBA, il n'a pas été possible d'estimer la profondeur du sol et la profondeur d'enracinement possible en raison du taux de cailloux trop élevé qui empêchait l'utilisation des outils de mesure. Tableau réalisé à partir du rapport de stage de DÉMONTÉ 2022.

Site	CRBA		CD	CM		HP&DM		JPC	MPR&PB	SR
Parcelle	1 et 2	3	1	1	2	1	2	1	1	1
Données géographiques										
Département	69		38	42		69		01	38	42
Altitude (m)	260		490	500		350		290	590	390
Texture des sols										
Texture sols (A=argiles, L=limons, S=sables) (1)	Sable limoneux (8% A ; 33% L ; 59% S)	Sable limoneux (9% A ; 34% L ; 57% S)	Limon argilo-sableux (10% A ; 44% L ; 36% S)	Sable limoneux (6% A ; 31% L ; 63% S)	Sable limoneux (10% A ; 28% L ; 62% S)	Sableux (11% A ; 16% L ; 33% S)	Sableux (5% A ; 22% L ; 73% S)	Limon sableux (8% A ; 58% L ; 35% S)	Limon sableux (7% A ; 43% L ; 50% S)	Sable argilo-limoneux (12% A ; 34% L ; 54% S)
Densité apparente (T/m ³) (1)	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,35	1,35	1,4	1,4	1,5
Charge en cailloux (%) (2)	≈ 50		17	30		12		20	15	13
Profondeur sols (cm) (3)	NA		90 ±15	45 ±15	76 ±30	61 ±16	54 ±16	36 ±2	77 ±26	42 ±20
Profondeur enracinementl (cm) (4)	NA		≈ 52	≈ 18	≈ 11	≈ 21	≈ 18	≈ 36	≈ 77	≈ 32
Nutrition hydrique et minérale										
Réserve utile (mm) (5)	38	36	108	23	16	29	25	89	107	107
N total (g/kg TFS) (1)	2,0	1,8	2,2	1,2	1,0	0,9	1,0	2,1	2,3	2,8
Phosphore Olsen P2O5 (g/kg TFS) (1)	0,068	0,056	0,082	0,083	0,098	0,069	0,081	0,196	0,061	0,03
Potassium-K2O (g/kg TFS) (1)	0,183	0,175	0,220	0,382	0,411	0,133	0,154	0,271	0,138	0,574
Magnésium-MgO (g/kg TFS) (1)	0,215	0,217	0,105	0,173	0,107	0,137	0,144	0,224	0,099	0,522
Calcium-CaO (g/kg TFS) (1)	2,70	2,07	4,53	1,38	1,03	1,66	1,64	2,88	3,40	3,01
NaO (g/kg TFS) (1)	0,010	0,018	0,011	0,012	0,021	0,011	0,011	0,011	0,010	0,028
Rapport K2O/MgO (1)	0,90	0,80	2,10	2,20	3,80	1,00	1,10	1,20	1,4	1,10
C organique/argile (6)	0,27	0,22	0,11	0,24	0,13	0,11	0,25	0,28	0,29	0,28
Vie du sol										
Biomasse microbienne (mgC/kg terre) (1)	360	267	526	187	161	130	141	507	481	609
C organique total (g/kg TS) (1)	23,8	21,7	22,8	15,0	12,6	10,8	11,7	23,6	25,1	33,3
MO totale (% TFS) (1)	4,1	3,7	3,9	2,6	2,2	1,9	2,0	4,1	4,3	5,7
MO libre (% MO totale) (1)	36	30	14	28	21	35	32	24	22	19
Potentiel minéralisation N (mg/kg/28j) (1)	43,9	34,4	22,2	24,6	22,9	21,1	23,5	55,3	32,6	34,8
Potentiel minéralisation C (mg/kg/28j) (1)	485,6	391,9	324,4	219,6	211,9	241,9	268,1	759,4	519,4	436,9
Éléments complémentaires										
pH eau (1)	6,6	6,4	7,5	6,1	5,7	6,6	6,6	6,8	7,0	6,7
pH KCl (1)	5,9	5,6	6,7	5,0	4,4	5,7	5,8	6,0	6,2	6,2
CEC (Cmol+/kg) (1)	10,85	9,33	14,86	8,7	8,98	6,56	5,91	10,79	11,08	15,3

3.5.3 Les dispositifs dans chacun des sept sites

Le dispositif au CRBA comprenait l'intégralité des variétés évaluées (tableau 3.6). Il était composé de deux blocs complets disposés dans le sens de la pente (figure 3.10). Chacun des blocs était situé sur trois parcelles distinctes du CRBA¹⁴, séparées par des haies. Pour prendre en compte un éventuel effet de ces parcelles du CRBA, deux variétés ont été répétées sur chacune des trois parcelles du CRBA au sein de chaque bloc (figure 3.10). Pour les variétés pour lesquelles on disposait de suffisamment de semences, des parcelles de 4,4 m² ont été mises en place. Pour les autres, nous avons été contraint.e.s à des parcelles de 1 m². Toutes les parcelles ont été semées à une densité de 250 graines/m²¹⁵. Les semis ont été faits manuellement, en rangs écartés de 20 cm, du 19 au 21 novembre 2021. Pour les protéger de ravages d'oiseaux, l'ensemble des parcelles a été recouvert par un voile de forçage (P17), immédiatement après les semis et jusqu'au 25 janvier 2022.

En raison des quantités limitées de semences disponibles pour certaines variétés, ainsi que des contraintes relatives à la surface et au temps, nous avons inclus un nombre restreint de variétés dans les parcelles des fermes. Le choix des variétés à inclure dans les fermes s'est fait en fonction des disponibilités de semences et des préférences des paysan.ne.s. Nous avons également veillé à ce que chaque variété soit présente dans au moins trois sites¹⁶. Le tableau 3.8 présente les variétés évaluées dans les fermes, ainsi que leur distribution parmi les sept sites.

14. Nous considérons les parcelles 40 et 41 comme une seule parcelle.

15. Ici, on parle bien de 250 graines germinables par m². Pour les blés vêtus, le nombre d'épillets correspondant a été calculé.

16. Cela n'a pas été possible pour la variété de BT *Mix CM*.

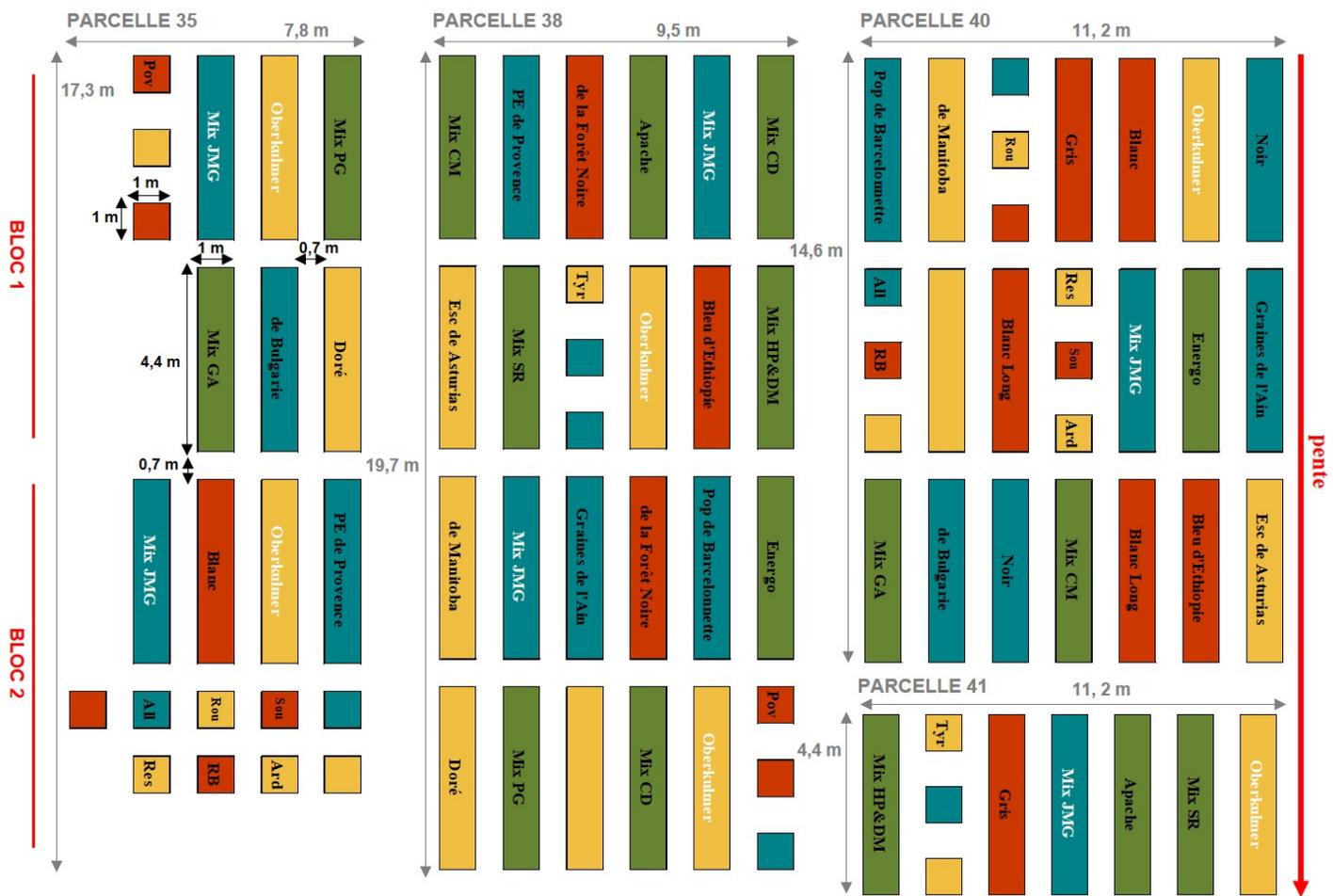


FIGURE 3.10 – Dispositif mis en place au CRBA en 2021-2022. Chaque couleur de parcelle représente une espèce : bleu pour l’engrain, rouge pour l’amidonniér, jaune pour le grand épeautre et vert pour le blé tendre. Les variétés dont les noms sont écrits en blanc (En *Mix JMG* et *GE Oberkulmer* sont répétées, au sein des deux blocs, dans les trois parcelles du CRBA (35, 38, 40 + 41). Les parcelles sans nom de variété étaient occupées par des variétés qui ont été exclues du jeu de données.

TABLEAU 3.8 – Répartition des variétés au sein des sept sites compris dans le dispositif expérimental 2021-2022. Les croix indiquent la présence des variétés au sein de chaque site. Les variétés qui sont répétées au sein des sites sont identifiées par un fond vert. Les croix rouges signalent des variétés qui ont dû être exclues des analyses en raison d’une levée insuffisante.

Espèce	Variété	CRBA	CD	CM	HP&DM	JPC	MPR&PB	SR	Total sites/variété
Engrain	<i>Allemand</i>	X		X		X	X	X	5
	<i>de Bulgarie</i>	X		X				X	3
	<i>Mix JMG</i>	X	X	X		X	X	X	6
	<i>PE de Provence</i>	X		X				X	3
Amidonnier	<i>Blanc</i>	X		X	X	X		X	5
	<i>de la Forêt Noire</i>	X	X	X				X	4
	<i>Gris</i>	X	X	X	X				4
	<i>Roux blanc</i>	X	X		X	X		X	5
Grand épeautre	<i>Doré</i>	X	X		X	X		X	5
	<i>Escanda de Asturias</i>	X	X	X				X	4
	<i>de Manitoba</i>	X		X				X	3
	<i>Oberkulmer</i>	X	X	X	X	X	X	X	7
	<i>Tyrolien rouge</i>	X	X	X				X	4
Blé tendre	<i>Mix HP&DM</i>	X	X	X	X				4
	<i>Mix CD</i>	X	X	X			X	X	5
	<i>Mix SR</i>	X				X		X	3
	<i>Mix GA</i>	X	X	X		X			4
	<i>Mix PG</i>	X	X					X	3
	<i>Mix CM</i>	X		X					2
	<i>Apache</i>	X		X		X			3
	<i>Energo</i>	X				X		X	3
Total variétés/site		21	12	16	6	10	4	16	

Dans les fermes, deux types de parcelles ont été mises en place (figure 3.11 et annexe F). Quatre fermes ont choisi des microparcelles d’environ 5 m². Dans les deux autres, des bandes de 30 à 55 m² ont été mises en place (tableau 3.9). Le choix des bandes plutôt que des microparcelles était motivé par la possibilité d’effectuer les semis mécaniquement au semoir. A l’origine, nous avons convenu que chaque participant.e assurerait le suivi des parcelles expérimentales de sa ferme en appliquant son itinéraire technique habituel, mais que les densités de semis seraient homogènes dans tous les sites. Finalement, les tailles des parcelles convenues n’ont pas été parfaitement respectées, et deux paysan.ne.s ont souhaité augmenter les densités de semis au sein de leurs fermes, entraînant des variations de densités de semis entre certains sites. Les modalités de semis et le suivi technique des parcelles expérimentales au sein de chaque lieu sont résumés dans le tableau 3.9.



FIGURE 3.11 – a, b. Microparcelles au CRBA (a) et chez JPC (b). c, d. Bandes chez HP&DM (c) et chez MPR&PB (d). Crédit photo (c) : Aubin Démonté.

Dans l'ensemble, cette stratégie nous a permis de distinguer deux jeux de données différents pour l'analyse. Le premier (« Jeux de données - CRBA » ; JD-CRBA) contient uniquement les variétés évaluées au CRBA, et permet d'étudier l'effet de chacune des quatre espèces sur les traits agronomiques et nutritionnels analysés. Le deuxième (« Jeux de données - multi-sites » ; JD-MS) ne contient que les variétés présentes dans deux sites minimum (variétés du tableau 3.8) et permet d'aborder l'effet de l'environnement sur les divers traits.

Dans les chapitres 4 et 5, l'effet de l'espèce et la variabilité intra-spécifique sont analysés à partir des données du JD-CRBA. Ensuite, l'effet de l'environnement est traité à partir des données du JD-MS.

TABLEAU 3.9 – Gestion technique des dispositifs dans chacun des sept sites.

Site	CRBA		CD	CM		HP&DM		JPC	MPR&PB	SR
Parcelle (ref ferme ou CRBA)	1 et 2	3	1	1	2	1 et 2	3	1	1	1
Surface des parcelles expérimentales	Microparcelles de 4.4 m ²		Microparcelles de 5 m ²	Microparcelles de 5 m ²		Bandes de 30 à 55 m ²		Microparcelles de 3.1 à 4.2 m ²	Bandes de 45 m ²	Microparcelles 5 m ²
Rotation	1ère année de culture sur cette parcelle	2ème année de culture sur cette parcelle	3 ans de prairie temporaire, blé, blé, méteil, engrais vert, méteil, blé	Oignon, jachère	Jachère, céréale, jachère	NA	NA	Avant le maïs, 10 ans de prairie	Engrain, blé tendre, trèfle violet, blé tendre, engrain, blé tendre	Prairie temporaire constituée de sainfoin avant le haricot sec
Précédent cultural	Prairie permanente	Maraîchage diversifié	Méteil (triticale, pois)	Oignon	Jachère	Tournesol	Pois chiche	Maïs	Engrain	Haricot sec
Travail du sol	Labour superficiel à 15 cm de profondeur (Rotovator)		Labour à 20 cm de profondeur + passage de herse	Labour avec une herse rotative + passage de râteau		Labour		Labour à 20 cm avec une herse rotative	Labour à 20 cm avec une herse rotative	Deux passages d'un outil type « patte d'oie » qui « scalpe »
Traitement des graines	Vinaigre blanc à 8%		Sulfate de cuivre, uniquement sur BT	Vinaigre blanc à 4%		Vinaigre blanc		Décoction de prêle et cuivre	Aucun	Aucun
Date de semis	19-21/11/2021		26/10/2021	29/11/2021		22/11/2021		16/11/2021	18/10/2021	22/10/2021
Densité de semis prévue (graines/m ²)	250		250	250		300		250	300	250
Densité de semis réelle (graines/m ²)	250		250	250		326 à 390		384 à 406	400	250
Méthode de semis	En rangs, espacés de 20 cm ; semis à la main graine par graine, à environ 2.5 cm de profondeur ; recouvrement à la main ou au râteau ; recouvrement par un voile P17 pendant 2 mois		A la volée ; enfouissement à la herse étrille	A la volée ; enfouissement au râteau		A la volée ; enfouissement à la herse plate		2 parcelles à la volée, les autres en rangs espacés d'environ 25 cm ; enfouissement au râteau	Au semoir à sabot ; enfouissement à la herse rotative	A la volée ; enfouissement à la griffe
Fertilisation	Aucune		Avant labour, épandage d'un fumier très pailleux	Aucune		NA		3 passages avec différents extraits fermentés	Fumier composté (30 t/ha)	Aucune
Désherbage	Manuel, mi-avril		Aucun	Aucun		Aucun		Passage de herse étrille sur 3 cm le 17 mars.	Passage de herse étrille 3 semaines après les semis	Aucun

3.5.4 Le suivi agronomique

Comme mentionné précédemment, le suivi agronomique réalisé sur le D21-22 a consisté en des mesures au champ, effectuées à la fois par les chercheur.euse.s et par les paysan.ne.s et en des mesures post-récolte, effectuées par les chercheur.euse.s.

Suite aux divers échanges avec les paysan.ne.s (tableau 3.5 et figure 3.7), nous avons convenu de nous intéresser à trois caractéristiques agronomiques d'intérêt majeur : la compétitivité par rapport aux adventices, la résistance à la verse et le rendement. Notre stratégie consistait à évaluer un certain nombre de variables, dont certaines à l'échelle de la plante, en lien avec ces trois caractéristiques.

Néanmoins, nous avons dû nous focaliser principalement sur la compétitivité par rapport aux adventices et le rendement. En effet, il y a eu peu de verse pendant la saison 2021-2022, ce qui a limité nos estimations de cette caractéristique. Pour des questions de faisabilité, nous avons principalement évalué la compétitivité vis-à-vis des adventices en analysant la couverture du sol par les plants de blé à différentes étapes de la saison. En ce qui concerne le rendement, nous avons considéré les composantes du rendement (densité de pieds, nombre d'épis par pied, nombre de grains par épi, poids de mille grains ou PMG), ainsi que d'autres traits associés. Au CRBA, nous n'avons pas pu estimer le nombre de grains par épi en raison d'un orage de grêle qui a fortement endommagé les parcelles expérimentales le 30 juin 2021. De ce fait, nous n'avons pas pu estimer les rendements finaux.

Par ailleurs, nous avons considéré plusieurs variables en lien avec la précocité, une quatrième caractéristique qui est ressortie des échanges avec les paysan.ne.s (figure 3.7). De plus, nous avons inclus à titre exploratoire, plusieurs variables supplémentaires d'intérêt pour les paysan.ne.s, telle que la couleur des plantes au printemps. Enfin, nous avons également considéré des variables de morphométrie des grains. Ces dernières ont été rajoutées par moi-même afin d'enrichir les données à présenter dans un article de recherche.

Plusieurs variables sont spécifiques à une phase de la saison de culture (par exemple, la couverture du sol par les pieds de blé). Nous avons préféré les associer à des périodes de l'année (par exemple, « sortie d'hiver ») plutôt qu'à des stades de développement des blés (par exemple, « tallage »). Ce choix est lié au fait des importants décalages dans le cycle de développement entre et même au sein des espèces étudiées.

L'intégralité des variables estimées est présentée dans les tableaux 3.11 et 3.12. Pour les variables utilisées dans l'analyse finale, la méthode d'estimation (mesures sur le terrain et calculs) est détaillée dans le chapitre 4. Enfin, le tableau 3.10 précise les dates auxquelles les séries de mesures 1 et 2 réalisées par les chercheur.euse.s ont été faites dans chaque site.

TABLEAU 3.10 – Dates des mesures 1 et 2 effectuées par l'équipe de recherche.

Site	CRBA	CD	CM	HP&DM	JPC	MPR&PB	SR
Mesures 1	02/03/22 au 04/03/22	14/03/22	11/03/22	09/03/22	08/03/22	14/03/22	10/03/22
Mesures 2	13/06/22 au 16/06/22	23/06/22	30/06/22	01/07/22	20/06/22 au 21/06/22	23/06/22	17/06/22 au 18/06/22

TABLEAU 3.11 – Variables agronomiques quantitatives estimées sur le dispositif expérimental 2021-2022. Pour chaque variable, la période de mesure, l'acteur.trice (chercheur.euse.s ou paysan.ne.s) qui a fait les mesures et les sites sur lesquelles elle a été mesurée (CRBA, fermes ou les deux) sont indiqués. Le tableau représente également, sur les cinq colonnes de droite, les caractéristiques agronomiques d'intérêt pour les paysan.ne.s, auxquelles chacune des variables peut être associée. Les variables mesurées à la fois par les paysan.ne.s et par les chercheur.euse.s ont le plus souvent été estimées au CRBA par les chercheur.euse.s et dans les fermes par les paysan.ne.s. Pour les mesures effectuées par les chercheur.euse.s, les mesures 1 et 2 correspondent aux séries de mesures (1 : en sortie d'hiver et 2 : à la fin du printemps / début de l'été) effectuées au sein de tous les sites. Pour les paysan.ne.s, les saisons auxquelles les mesures ont été faites sont indiquées. CH : chercheur.euse.s, PA : paysan.ne.s. (1) Ces mesures ont été faites lors des mesures 1 dans les fermes, mais au CRBA, elles ont été faites plus tôt, début février.

Début du tableau 3.11										
Variable	Unité	Période mesure	Chercheur.euse.s	Paysan.ne.s	CRBA	Fermes	Compétitivité adventices	Résistance verse	Rendement	Autres
Densité semis réelle	graines/m ²	Mesures 1	X		X	X			X	X
Densité pieds	pieds/m ²	Mesures 1 (1)	X		X	X	X	X	X	X
Taux levée	%	Mesures 1 (1)	X		X	X			X	
Couverture blé sortie d'hiver	% sol	Mesures 1	X		X	X	X			
Couverture adventices sortie d'hiver	% sol	Mesures 1	X		X	X	X			
Hauteur pied sortie d'hiver	cm	Mesures 1	X		X	X	X			X
Stade BBCH sortie d'hiver	% de pieds au stade tallage	Mesures 1	X		X	X	X			X
Couverture blé milieu printemps	% sol	Fin avril	X		X		X			
Couverture adventices milieu printemps	% sol	Fin avril	X		X		X			
Hauteur pied milieu printemps	cm	Fin avril	X		X		X			X
Stade BBCH milieu printemps	% de pieds au stade montaison	Fin avril	X		X		X			X
Verse mX	score exprimé en %	CH : Plusieurs mesures au cours du printemps PA : Plusieurs mesures au cours du printemps	X	X	X	X		X		
Verse début été	score exprimé en %	Mesures 2	X		X	X		X		
Verse récolte	score exprimé en %	Récolte échantillons	X		X	X		X		
Densité épis	épis/m ²	Mesures 2	X		X	X			X	
Densité talles	talles/m ²	Mesures 2	X		X	X			X	
Proportion talles avortées	%	Mesures 2	X		X	X			X	
Nb d'épis par pied	nb	Mesures 2	X		X	X		X	X	
Nb de talles par pied	nb	Mesures 2	X		X	X	X			
Hauteur pied finale	cm	Mesures 2	X		X	X		X		
LLSD talle principale	cm	Mesures 2	X		X	X				X
Longueur épi principal	cm	Mesures 2	X		X	X		X	X	
Rendement brut	g/m ²	Post-récolte	X		X	X			X	
Masse épi	g	Post-récolte	X		X	X			X	
Nb de grains par épi	nb	Post-récolte	X		X	X			X	

Continuation du tableau 3.11										
Variable	Unité	Période mesure	Chercheur.euse.s	Paysan.ne.s	CRBA	Fermes	Compétitivité adventices	Résistance	Rendement	Autres
Rendement relatif	/	Post-récolte	X		X	X			X	X
Rendement estimé	t/ha	Post-récolte	X		X	X			X	
Rendement estimé par pied	g	Post-récolte	X		X	X			X	
PMG	g	Post-récolte	X		X	X			X	
Longueur grains	mm	Post-récolte	X		X	X				X
Largeur grains	mm	Post-récolte	X		X	X				X
Périmètre grains	mm	Post-récolte	X		X	X				X
Surface grains	mm ²	Post-récolte	X		X	X				X
Longueur/largeur grains	/	Post-récolte	X		X	X				X
Circularité grains	valeur entre 0 et 1 (1 = parfaitement circulaire)	Post-récolte	X		X	X				X
Fin du tableau 3.11										

TABLEAU 3.12 – Variables agronomiques qualitatives estimées sur le dispositif expérimental 2021-2022. Pour chaque variable, la période de mesure, l'acteur.trice (chercheur.euse.s ou paysan.ne.s) qui a fait les mesures et les sites sur lesquelles elle a été mesurée (CRBA, fermes ou les deux) sont indiqués. Le tableau représente également, sur les cinq colonnes de droite, les caractéristiques agronomiques d'intérêt pour les paysan.ne.s, auxquelles chacune des variables peut être associée. Les variables mesurées à la fois par les paysan.ne.s et par les chercheur.euse.s ont le plus souvent été estimées au CRBA par les chercheur.euse.s et dans les fermes par les paysan.ne.s. Pour les mesures effectuées par les chercheur.euse.s, les mesures 1 et 2 correspondent aux séries de mesures (1 : en sortie d'hiver et 2 : à la fin du printemps / début de l'été) effectuées au sein de tous les sites. Pour les paysan.ne.s, les saisons auxquelles les mesures ont été faites sont indiquées. CH : chercheur.euse.s, PA : paysan.ne.s. Certaines variables sont spécifiques à une phase de la saison de culture. Nous avons préféré les associer à des périodes de l'année (par exemple, « sortie d'hiver ») plutôt qu'à des stades de développement des blés (par exemple, « tallage »). Ce choix est lié au fait des importants décalages dans le cycle de développement entre et même au sein des espèces étudiées.

Début du tableau 3.12										
Variable	Unité	Période mesure	Chercheur.euse.s	Paysan.ne.s	CRBA	Fermes	Compétitivité adventices	Résistance verse	Rendement	Autres
Avancement levée	4 valeurs qualitatives : NA = absence; lente = présence de plantes très petites (max 2 cm), même si pas sur l'ensemble de la parcelle; intermédiaire = présence de plantes de taille intermédiaire (entre 2 et 5 cm); rapide = présence de plantes assez grandes (entre 5 et 10 cm)	CH : Automne PA : Automne / hiver	X	X	X	X	X		X	
Régularité levée	4 valeurs qualitatives : NA = pas de levée; régulière = régulière sur l'ensemble de la parcelle; intermédiaire; irrégulière = irrégulière sur la parcelle (certaines zones avec et d'autres sans levée)	CH : Automne PA : Automne / hiver	X	X	X	X	X		X	
Densité peuplement	4 valeurs : 0 à 99; 100 à 199; 200 à 299; 300 à 399; > 400	Hiver		X		X	X	X	X	X
Note globale sortie d'hiver	5 valeurs : 0 = moche; 1 = plutôt moche; 2 = intermédiaire; 3 = belle; 4 = très belle	CH : Mesures 1 PA : Hiver	X	X	X	X				X
Port sortie d'hiver	3 valeurs qualitatives : étalé, intermédiaire, dressé	CH : Mesures 1 PA : Hiver	X	X	X	X	X			X
Note globale milieu printemps	5 valeurs : 0 = moche; 1 = plutôt moche; 2 = intermédiaire; 3 = belle; 4 = très belle	CH : Fin avril PA : Printemps	X	X	X	X				X
Tallage milieu printemps	3 valeurs qualitatives : faible, moyen, élevé	CH : Fin avril PA : Printemps	X	X	X	X	X		X	
Port milieu printemps	3 valeurs qualitatives : étalé, intermédiaire, dressé	CH : Fin avril PA : Printemps	X	X	X	X	X			X
Couleur milieu printemps	4 valeurs : vert pâle; vert clair; vert foncé; autre	Printemps		X		X				X

Continuation du tableau 3.12										
Variable	Unité	Période mesure	Cherch eur. euse.s	Paysan. ne.s	CRBA	Fermes	Compé titivité advent ices	Résis tance verse	Rende ment	Autres
Note globale épiaison mX	5 valeurs : 0 = moche ; 1 = plutôt moche ; 2 = intermédiaire ; 3 = belle ; 4 = très belle	CH : Plusieurs mesures au printemps PA : Plusieurs mesures au printemps	X	X	X	X				X
Epiaison mX	4 valeurs (% épis) : 0 % ; 0 à 50 % ; 50 à 100 % ; 100	CH : Plusieurs mesures au printemps PA : Plusieurs mesures au printemps	X	X	X	X				X
Epiaison mX bin	2 valeurs (% épis) : 0 à 49 % ; 50 à 100 %	CH : Plusieurs mesures au printemps PA : Plusieurs mesures au printemps	X	X	X	X				X
Sante épiaison mX	5 valeurs qualitatives : 0 = très mauvaise santé ; 1 = mauvaise santé ; 2 = intermédiaire ; 3 = bonne santé ; 4 = aucun pb visible	CH : Plusieurs mesures au printemps PA : Plusieurs mesures au printemps	X	X	X	X		X		
Note globale avant récolte	5 valeurs : 0 = moche ; 1 = plutôt moche ; 2 = intermédiaire ; 3 = belle ; 4 = très belle	CH : Mesures 2 PA : Eté	X	X	X	X				X
Santé épi avant récolte	5 notes qualitatives : 0 = très mauvaise santé ; 1 = mauvaise santé ; 2 = intermédiaire ; 3 = bonne santé ; 4 = aucun pb visible	Mesures 2	X		X	X				X
Diamètre talles	3 valeurs : faible, intermédiaire, élevé	Mesures 2	X		X	X		X		
Echaudage	4 valeurs : nul, faible, intermédiaire, fort	Récolte échantillons	X		X	X			X	
Résistance grêle	3 valeurs qualitatives : "faible", "intermédiaire", "forte"	Début juillet	X		X					X

Fin du tableau 3.12

3.6 Bibliographie

- AGRESTE (2022). *Agreste Recensement agricole 2020*. URL : https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/Pri2213/Primeur%202022-13_RA2020_%20VersionD%C3%A9finitive.pdf (visité le 04/09/2023).
- BARBACON, J., M. MAUFRAIS, L. PAHUD et M. POUPARD (2020). *Etat des lieux de la culture des céréales dites anciennes dans la région lyonnaise*. Rapport de stage Etude Longue ISARA.
- BERTIN, P., D. GRÉGOIRE, S. MASSART et D. DE FROIDMONT (2001). « Genetic diversity among European cultivated spelt revealed by microsatellites ». In : *Theoretical and Applied Genetics* 102, p. 148-156. DOI : [10.1007/s001220051630](https://doi.org/10.1007/s001220051630).
- CoEX (2023). *Ébauche de manuel pour les projets collaboratifs sur les semences entre organisations paysannes et institutions de recherche*. Document de travail. URL : https://projetcoex.sciencesconf.org/data/pages/Manuel_projets_collaboratifs_CoEx_1.pdf (visité le 25/10/2023).
- DEBAECKER, L., T. FAYOLLE et C. RINALDI (2021). « *Autour des épeautres : état des lieux de la demande sur la Métropole de Lyon* ». Rapport de stage Maestro ISARA.
- DÉMONTÉ, A. (2022). *Influence de la fertilité des sols sur les rendements de 4 espèces de blé (Triticum monococcum, Triticum dicoccum, Triticum aestivum L. subsp. Spelta, Triticum aestivum subsp. aestivum)*. Mémoire de Fin d'Etudes ISARA.
- DOUSSAN, C., C. RUEDESSOLS et I. COUSIN (2017). « La Réserve Utile : concepts, outils, controverses ». In : *Atelier du RMT Sols et Territoires*, 40-p. URL : <https://hal.science/hal-01595478/document>.
- KOENIG, A., K. KONITZER, H. WIESER et P. KOEHLER (2015). « Classification of spelt cultivars based on differences in storage protein compositions from wheat ». In : *Food chemistry* 168, p. 176-182. DOI : [10.1016/j.foodchem.2014.07.040](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.07.040).
- MAURY, O., I. GARCIA DE CORTAZAR ATAURI, P. BERTUZZI, B. PERSYN et M. LAGIER (2021). *SI-CLIMA : Système d'information de données climatiques maillées*. Version V1. DOI : [10.15454/HIPDPZ](https://doi.org/10.15454/HIPDPZ).
- RSP (2021). *Kit réglementaire. Comprendre le cadre existant : quelles ouvertures pour la biodiversité cultivée ?* URL : https://www.semencespaysannes.org/images/documents/semons-nos-droits/KIT-SEMENCES-PAYSANNES_WEB_2021.pdf.
- SIEDLER, H., M. MESSMER, G. SCHACHERMAYR, H. WINZELER, M. WINZELER et B. KELLER (1994). « Genetic diversity in European wheat and spelt breeding material based on RFLP data ». In : *Theoretical and Applied Genetics* 88, p. 994-1003. DOI : [10.1007/BF00220807](https://doi.org/10.1007/BF00220807).
- STASSART, P. M., M. MORMONT et D. JAMAR (2008). « La recherche-intervention pour une transition vers le développement durable ». In : *Économie rurale* 306, p. 8-22. DOI : [10.4000/economierurale.432](https://doi.org/10.4000/economierurale.432).
- VAN DER PLOEG, J. D. (2014). *Les Paysans du XXIe Siècle ; : Mouvements de repaysanisation dans L'Europe d'aujourd'hui*. Fondation Charles Leopold Mayer.

Caractérisation agronomique et de la morphométrie des grains

Contenu

4.1	Introduction	152
4.2	Caractérisation des quatre espèces et estimation de la variabilité intra-spécifique . . .	154
4.3	Effet de l'environnement	196
4.4	Conclusion	221
4.5	Bibliographie	223



Caractérisation agronomique au champ. Crédit photo : Justine Lepagneul.

4.1 Introduction

Ce chapitre s'intéresse à l'évaluation des caractéristiques agronomiques et morphométriques des grains des quatre espèces de blé étudiées. Il répond donc à la question des différences agronomiques entre blés vêtus et BT.

Parmi les variables choisies en collaboration avec les paysan.ne.s, l'analyse porte essentiellement sur celles en lien avec la compétitivité par rapport aux adventices (estimée à travers la couverture du sol par les plants de blé) et avec le rendement¹. Divers autres critères d'importance pour les praticien.ne.s, tels que le rendement relatif, le taux de protéines et la précocité, ont également été pris en compte. Enfin, j'ai rajouté les variables en lien avec la morphométrie des grains afin de compléter les données présentées dans l'article en section 4.2.

Le chapitre est divisé en deux grandes sections. La première (4.2) a pour but d'identifier des caractéristiques agronomiques et morphométriques des grains propres à chacune des trois espèces de blés vêtus, en comparaison au BT. Elle s'intéresse également à la variabilité intra-spécifique. Elle répond ainsi aux deux questions suivantes posées par le collectif :

- (1) *Quelles sont les principales caractéristiques agronomiques et morphométriques des grains de chaque espèce étudiée ?*
- (2) *Quelle est la variabilité intra-spécifique pour chaque espèce ?*

Pour la question (1), suite à des recherches bibliographiques et aux discussions collectives, nous avons émis deux hypothèses :

- (a) Les blés vêtus, et en particulier l'En, couvriraient mieux le sol, auraient des teneurs en protéines plus élevés et des cycles de développement différents (plus longs pour l'En) par rapport au BT. Ils pourraient ainsi être mieux adaptés à des pratiques agroécologiques, notamment à l'agriculture biologique et à une fertilisation réduite.
- (b) Les blés vêtus ont généralement des rendements inférieurs à ceux du BT. Néanmoins, ces différences pourraient être minimales, voire inexistantes en conditions de culture peu favorables (en situations de stress abiotiques par exemple).

1. La résistance à la verse a peu été étudiée, car il y a eu peu de pressions au cours de la saison 2021-2022. Par ailleurs, l'estimation des rendements au CRBA n'a pas abouti, car les parcelles expérimentales ont été détruites par un épisode de grêle le 30 juin 2022, détruisant les épis et nous empêchant d'estimer le nombre de grains par épi.

Pour la question (2), nous avons émis trois hypothèses :

- (a) Les blés vêtus pourraient présenter une variabilité intra-spécifique supérieure à celle du BT, du fait qu'ils n'ont pas fait l'objet d'une sélection intensive sur un nombre de critères restreint.
- (b) Parmi les variétés de BT, les variétés paysannes se distingueraient des variétés modernes, et présenteraient des caractéristiques plus appropriées à des pratiques agroécologiques, notamment à l'agriculture biologique et à une fertilisation réduite.
- (c) La variabilité intra-spécifique de la morphométrie des grains pourrait refléter la variabilité intra-spécifique des caractéristiques agronomiques.

Pour répondre à ces deux questions, j'ai analysé uniquement les données issues de l'essai au CRBA (JD-CRBA). Les résultats sont présentés sous format d'un article scientifique écrit en anglais dans la section 4.2.

Ensuite, la troisième section (4.3) de ce chapitre interroge les effets des environnements sur les paramètres agronomiques et morphométriques des grains. Elle répond donc à la troisième question du collectif :

- (3) *Quelle est la variabilité liée à l'environnement sur les traits agronomiques et morphométriques des grains ?*

Par rapport à cette question (3), nous avons énoncé les deux hypothèses suivantes :

- (a) L'importance de l'effet de l'environnement pourrait varier en fonction des variables agronomiques (et morphométriques de grains) considérées.
- (b) Une partie importante de la variabilité liée à l'environnement pourrait être expliquée par la fertilité des sols.

Pour étudier l'effet de l'environnement, j'ai travaillé sur les données issues des parcelles des six fermes, en plus de celles du CRBA. Seules les variétés évaluées dans au moins deux sites ont été considérées (JD-MS). Ces résultats sont présentés dans la section 4.3.

Justine Lepagneul et Aubin Démonté ont contribué aux mesures sur le terrain dont sont issues les données présentées dans ce chapitre. Les mesures effectuées par les six paysan.ne.s n'ont pas pu être comprises dans les analyses. Néanmoins, leurs retours ont été pris en compte pour l'interprétation des résultats.

4.2 Caractérisation des quatre espèces et estimation de la variabilité intra-spécifique

Cette section a été rédigée en anglais sous forme d'un article scientifique. L'appendice (« appendix » en anglais) 4 est un dossier avec les jeux de données et tous les codes R employés pour l'analyse des données. Il n'est donc pas inclus dans ce manuscrit.

Beyond common wheat: evaluation of agronomic features and intra-species diversity of three hulled wheat species (einkorn, emmer and spelt) in a participatory plant breeding perspective in France

Sofia Correa^{1,2,3,4} (0009-0004-7842-6826), Justine Lepagneul², Aubin Démonté^{1,5}, CRBA⁶, Jean-Philippe Clair⁷, Christian Dalmasso⁸, Cédric Mary⁸, Denis Mignard⁹, Honorine Perino⁹, Marie-Pierre Repecaud¹⁰, Stéphane Rouvès¹¹, Léa Bernard⁹, Gustave Fradin¹² (0000-0003-2272-730X), Camille Vindras-Fouillet¹³, Jean-François Vian⁵ (0000-0001-5878-4168), Mathieu Thomas^{3,4} (0000-0001-5803-9547), Olivier Hamant¹ (0000-0001-6906-6620), Marie-Thérèse Charreyre² (0000-0002-1303-0888)

1. Laboratoire de Reproduction et Développement des Plantes, Univ Lyon, ENS de Lyon, UCB Lyon 1, CNRS 5667, INRAE, 69007 Lyon, France; sofia.correa@universite-lyon.fr; olivier.hamant@ens-lyon.fr

2. Univ Lyon, Université Lyon1, INSA Lyon, UMR CNRS 5223, Ingénierie des Matériaux Polymères, Villeurbanne, F-69622, France;

3. CIRAD, UMR AGAP Institut, F-34398 Montpellier, France; mathieu.thomas@cirad.fr

4. UMR AGAP Institut, Univ Montpellier, CIRAD, INRAE, Institut Agro, Montpellier, France ;

5. ISARA-Lyon (Member of the Univ Lyon), Department of Agroecology and Environment, 69364 Lyon cedex 07, France;

6. Centre de Ressources de Botanique Appliquée, 69390 Charly, France;

7. Graines de l'Ain, 01550 Farges, France;

8. Association Régionale pour le Développement de l'Emploi Agricole et Rural Auvergne-Rhône-Alpes, 69007 Lyon, France;

9. Le Croissant Fertile, 69440 Mornant, France;

10. GAEC la Ferme des Pierres Gardées, 38620 Velanne, France;

11. GAEC de La Viry, 42800 Saint-Joseph, France;

12. Centre d'Écologie Fonctionnelle et Évolutive, 34000 Montpellier, France;

13. Amaranthus, 38210 Tullins, France

*Correspondence: sofiacorream@yahoo.com; marie-therese.charreyre@univ-lyon1.fr

ABSTRACT

Expanding crop diversity is increasingly seen as a sustainable solution to many of the upcoming challenges of agriculture in this century. Participatory plant breeding is an operational way to support this effort. Here we focused on three neglected species related to common wheat (*Triticum aestivum* subsp. *aestivum*): einkorn (*Triticum monococcum* subsp. *monococcum*), emmer (*Triticum turgidum* subsp. *dicoccum*) and spelt (*Triticum aestivum* subsp. *spelta* (L.) Thell). Using a situated approach with farmers in the Lyon region of France, we evaluated their agronomic properties, kernel morphologies and intra-species diversity. Einkorn clearly differed from the other species in terms of agronomic features. This species was associated to high tillering, high protein contents, a long phenological cycle, small kernels and low relative yields. Concerning kernel morphometries, each species had a unique kernel shape and size, except for emmer, which exhibited a wide size diversity. While einkorn and common wheat showed little intra-species variability, diversity was remarkably high within emmer varieties. Spelt also had a high intra-species variability for agronomic parameters, but not for kernel morphometries. Noteworthy features for individual varieties were also identified. Emmer *Bleu d’Ethiopie*, a free-threshing variety, stood out for its precocity, short height and rather high protein contents. Emmer varieties *Blanc Long*, *Roux Blanc* and spelt variety *Escanda de Asturias* had particularly big kernels. Finally, einkorn *Noir* had a relatively early heading time. By testing hulled wheat varieties through participative research in a region used to common wheat monocultures, we illustrate how crop diversity can widen the adaptability spectrum of agro-socio-ecosystems.

KEYWORDS

Neglected and underutilized species, einkorn, emmer, spelt, participatory research, kernel morphometries

1. INTRODUCTION

Despite the controversies concerning the quantifications of genetic erosion, the scientific community agrees that the world's crop diversity has greatly decreased during the 20th century (FAO, 1993; Khoury et al., 2022). This decline is mainly due to the establishment of a seed system organization that provides genetically homogeneous and high-yielding varieties that meet the needs of industrial agriculture and food system (Bonneuil & Thomas, Frédéric, 2009; Massawe et al., 2016). In fact, since the end of the 19th century, genetically heterogeneous varieties selected by farmers (also called landraces) were progressively replaced by genetically homogeneous varieties obtained by professional breeders. This trend was fostered after World War II by the development of new technologies for plant breeding and by the settlement of regulations for seed production (Bonneuil et al., 2012; Massawe et al., 2016).

Today, such an over-optimized system is failing because of its numerous internal vulnerabilities and negative externalities on ecosystems (e.g. progressive loss of ecosystem services triggering increase use of fertilizers and pesticides, higher ecosystem degradation in a feedback loop) and on farmer's economic

prospects and health (Horrigan et al., 2002). As United Nations special rapporteur on the right to food Olivier de Shutter claimed: “our food systems are making people sick”. Crop diversity is recognized as an essential lever to increase food production in a sustainable way, to limit the vulnerability of agricultural systems to climatic, social and economic shocks, and to ensure food security and nutrition (FAO, 2019; Khoury et al., 2014; Mijatović et al., 2013). Hence, agroecology proponents call for an urgent reintroduction of crop diversity, together with the development of more local and diversified agricultural systems (Chable et al., 2020; Nicholls & Altieri, 2018).

Wheat (*Triticum spp.*) is one of the three major staple crops in the world (Massawe et al., 2016). Using an indicator for diversity (H_T^*) that combines spatial distribution of varieties and genetic diversity, Bonnin et al. (2014) showed a decrease of at least 50 % in overall *in-situ* genetic diversity within wheat in France during the 20th century. Some authors have questioned wheat yield stability and predicted that, without adaptation strategies, yields would fluctuate and globally decrease during the 21st century (Challinor et al., 2014), with predictions of an overall reduction in wheat productivity of 6% for each °C of temperature increase (Asseng et al., 2015).

Participatory Plant Breeding is an effective approach that brings together researchers and other stakeholders to work on crop diversity (Ceccarelli & Grando, 2009). In France, such approach on wheat has been going on since 2006 (Rivière et al., 2013). Several heterogeneous varieties and mixtures adapted to organic and diversified farming systems have been developed, evaluated and used (van Frank et al., 2020). Yet, the corresponding projects have mostly focused on the dominant species of wheat, common wheat (*Triticum aestivum* subsp. *aestivum*, hereafter “CW”). In this study, we worked on three neglected and underutilized species of wheat: einkorn (*Triticum monococcum* subsp. *monococcum*, hereafter “Ei”), emmer (*Triticum turgidum* subsp. *dicoccum*, hereafter “Em”) and spelt (*Triticum aestivum* subsp. *spelta* (L.) Thell., hereafter “Sp”) with the participation of local actors from the suburbs of Lyon, France.

Ei is a diploid wheat (genome AA) while Em is tetraploid (genome AABB). It is derived from wild emmer (*T. diccoides*) that resulted itself from the hybridization between 2 diploid wild grasses. Both of them belong to the first domesticated crops (Bonjean, 2001). Sp and CW are hexaploid (genome AABBDD) and are more recent domesticated crops. Hexaploid wheats are issued from a hybridization between tetraploid wheats and *Aegilops tauschii* (genome DD). Today, Sp and CW are considered as two subspecies of the same species (Bonjean, 2001). Ei, Em and Sp were largely replaced by high-yielding and free-threshing species during the first millennium AD (Zaharieva et al., 2010; Zaharieva & Monneveux, 2014), but Sp remained a quite important crop in some countries such as Germany, Switzerland, Austria and Belgium (Campbell, 1997; Cubadda & Marconi, 2002). Because the kernels of these wheat species remain enclosed in tough glumes after threshing, they are referred to as “hulled wheats” (HW) (Bonjean, 2001), and as many other neglected crops, they are regaining interest today

(Shewry, 2018). In fact, these wheat species are thought to be better adapted than CW modern varieties to low-input organic practices and to harsh environments (Cubadda & Marconi, 2002; Zaharieva et al., 2010; Zaharieva & Monneveux, 2014). They are also seen as highly-nutritious crops (Dinu et al., 2018; Shewry, 2018). While resistance to pests and diseases (Rouse & Jin, 2011; Singh et al., 2008; Zaharieva & Monneveux, 2014), and high protein levels despite poor fertilization have been shown for Ei in several studies (Bencze et al., 2020; Zaharieva & Monneveux, 2014), high variability is observed across varieties for other valuable traits (Zaharieva & Monneveux, 2014). Some interesting traits such as earliness, resistance to diseases, high protein contents, tillering and large kernels have been reported in Em accessions (Bencze et al., 2020; Beteselassie et al., 2007; Boguslavskij et al., 2000; Hailu & Merker, 2008; Longin et al., 2016; Zaharieva et al., 2010), but big differences are also observed between varieties (Longin et al., 2016; Zaharieva et al., 2010). Finally, Sp has been shown to have correct yields in poor soils (Cubadda & Marconi, 2002) and high protein contents (Kohajdova & Karovicova, 2008), but it appears more similar to CW than the other HW species (Longin et al., 2016). Although these discrepancies call for clarification, a certain level of variability could help to face a fluctuating environment and should thus be assessed as a pertinent feature.

In this study, we questioned the ability of Ei, Em and Sp to suit organic and diversified farming systems in the region of Lyon (France). This work builds on situated knowledge through the participation of local actors: six farmers, a center of botanical resources (Centre de Ressources de Botanique Appliquée, hereafter “CRBA”) and a farmer organization (Association pour le Développement de l’Emploi Agricole et Rural) are involved. These non-academic actors took part in all the stages of the research, including the definition of the scientific questions and hypotheses.

We addressed two main questions. First, we assessed agronomic and kernel morphometric parameters to determine whether some varieties of HW (in particular those of Ei) exhibited features of particular interest for organic farming in the region of Lyon, such as better ground coverages, high protein contents, and different developmental cycles (hypotheses based on farmers’ observations and on the literature). As we anticipated HW yields to be lower than those of CW, we also investigated whether the yield gaps would be rather small in unfavorable conditions. Second, we compared the intra-species variability across the four species and checked whether HW would exhibit higher variability, as they did not undergo recent intensive breeding. In addition, we discussed the added value of the participatory approach.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Field trial

Seven Ei, eight Em, eight Sp and eight CW varieties (table 1) were evaluated at the CRBA (Charly, Lat 45.6°N, Long 4.8°E, Alt 242 m) during the growing season 2021/2022. For HW, we explored different

4.2. CARACTÉRISATION DES QUATRE ESPÈCES ET ESTIMATION DE LA VARIABILITÉ INTRA-SPÉCIFIQUE

seed sources (table 1 for details) and selected all varieties with sufficient seed quantity to conduct the trial. For CW, we included the six mixtures of varieties that were cultivated by each of the farmers involved in the project, and two modern varieties. All the varieties were sown in a complete-randomized block design, with two blocks (the experimental plan is shown in the appendix 1).

TABLE 1 Einkorn, emmer, spelt and common wheat varieties studied. Farm names are indicated with initials: CD, CM, GA, HP&DM, JMG, JPC, PG, SR.

Variety name	Origin of the seeds	Type of variety	Type of conservation	Harvest year of the seeds	Additional information
Einkorn (<i>Triticum monococcum</i> subsp. <i>monococcum</i>)					
<i>Allemand</i>	Association Graines de Noé (Côte d'Or, France)	Probably landrace	Multiplied for at least 15 years in small plots in Côte d'Or (France).	2018	Recovered at the beginning of the years 2000 from a farm in Germany.
<i>de Bulgarie</i>	CRBA (Rhône, France)	Probably landrace	Multiplied during 10 years in small plots in a farm in Isère (France) and once at the CRBA.	2021	Recovered around 2010 from a baker in Bulgaria (according to whom the variety grew spontaneously in the fields) and given to the CRBA in 2020.
<i>Graines de l'Ain</i>	Association Graines de l'Ain (Ain, France)	Probably landrace	Cultivated for at least two years by a farmer in the Ain (France).	2021	Recovered by a French farmer in a farm in Germany.
<i>Mix JMG</i>	Farm in the Marne (France)	Mixture of landraces	Cultivated for at least 7 years by a farmer in the Marne (France).	2020	Mixture of 5 varieties from different origins: a farm in Germany, and 4 farms in France (in the regions of Val de Loire, Champagne and Argonne).
<i>Noir</i>	Farm in Haute-Savoie (France)	Probably landrace	Multiplied during at least 7 years in Haute-Savoie (France).	NA	Recovered by a French farmer during farmer seed exchanges.
<i>Petit épeautre de Provence</i>	CRBA (Rhône, France)	Mixture of landraces	Multiplied for 3 years in small plots and then cultivated 3 years in a farm in the Loire (France). Multiplied once in the CRBA in small plots.	2021	Mixture of two varieties (mostly one recovered from a farmer in the Alpes-de-Haute-Provence (France) and small quantities of another one obtained at farmer seed exchanges).
<i>Pop de Barcelonnette</i>	CRBA (Rhône, France)	Probably landrace	Multiplied once in small plots in the CRBA.	2021	Provided to the CRBA by the association Savors de Terroirs (Ardèche, France).
Emmer (<i>Triticum turgidum</i> subsp. <i>dicoccum</i>)					
<i>Blanc</i>	CRBA (Rhône, France)	Probably landrace	Multiplied for 5 years in small plots and then cultivated for 4 years in the Loire (France). Multiplied once in the CRBA in small plots.	2021	Recovered by a French farmer in Germany (initially, it was mixed to another emmer variety with black ears).
<i>Blanc long</i>	CRBA (Rhône, France)	Probably landrace	Multiplied once in small plots in the CRBA.	2021	Provided to the CRBA by the association Savors de Terroirs (Ardèche, France).
<i>Bleu d'Ethiopie</i>	CRBA (Rhône, France)	Unknown	<i>Ex-situ</i> conservation (Israel Gene Bank) + 1 year of multiplication in small plots in the CRBA.	2021	Recovered by the CRBA from the Israel Gene Bank (IGB).
<i>de la Forêt Noire</i>	CRBA (Rhône, France)	Probably landrace	Multiplied once in small plots in the CRBA.	2021	Recovered by the CRBA from a French farmer.
<i>de Poveda</i>	Association Graines de Noé (Côte d'Or, France)	Probably landrace	Multiplied once in small plots in the Côte d'Or (France).	2019	Recovered from a Belgian association around 2018.
<i>de Souabe</i>	Association Graines de Noé (Côte d'Or, France)	Probably landrace	Multiplied once in small plots in the Côte d'Or (France).	2020	Recovered from a Belgian association around 2018.
<i>Gris</i>	Association Graines de Noé (Côte d'Or, France)	Probably landrace	<i>Ex-situ</i> conservation (CRB Clermont-Ferrand) + 10 years of multiplication in small plots in Côte d'Or (France).	2018	Recovered from the INRAe gene bank (CRB) in Clermont-Ferrand (France).
<i>Roux Blanc</i>	Association Graines de Noé (Côte d'Or, France)	Probably landrace	Multiplied during at least 10 years year in small plots in Côte d'Or (France).	2018	Recovered by the founder of Graines de Noé in the years 1990 and multiplied at least 10 years in Côte d'Or (France).
Spelt (<i>Triticum aestivum</i> subsp. <i>spelta</i> (L.) Thell.)					
<i>Arduinii</i>	INRAE gene bank Centre de Ressources Biologiques Céréales à Paille (CRB) (Clermont-Ferrand, France)	Probably landrace	<i>Ex-situ</i> conservation (CRB Clermont-Ferrand), with only one multiplication.	2009	Multiplied once in Auvergne (France).
<i>de Manitoba</i>	CRBA (Rhône, France)	Probably landrace	Multiplied during 5 years in small plots in a farm in Isère (France) and once at the CRBA.	2021	Recovered by a French peasant from a farm in Manitoba (Canada).

CHAPITRE 4. CARACTÉRISATION AGRONOMIQUE ET DE LA MORPHOMÉTRIE DES GRAINS

<i>Doré</i>	Farm in Haute-Savoie (France)	Landrace or historical variety	<i>Ex-situ</i> conservation (CRB Clermont-Ferrand) + unknown conservation in a monastery + cultivation during several years in Haute-Savoie (France).	2021	Recovered from a monastery (monks had themselves obtained the variety from the CRB in Clermont-Ferrand) by a baker and cultivated for several years (first by the baker and then by a farmer) in Haute-Savoie (France).
<i>Escanda de Asturias</i>	Farm in León (Spain)	Probably landrace	Cultivated for at least 5 years in León (Spain).	2021	Variety from the Asturias region in Spain.
<i>Oberkulmer</i>	Farm in the Marne (France)	Landrace	Cultivated for at least 12 years in Marne (France).	2020	Swiss variety recovered by a French farmer in Germany. This variety is issued from a mass selection from a swiss landrace. It was released in 1948, registered in the European catalogue of agricultural plant species (https://www.semec.fr/), and used in breeding programs (Siedler et al., 1994).
<i>Ressac</i>	Graines de Noé association (Côte d'Or, France)	Modern variety	Multiplied during at least 5 years year in small plots in Côte d'Or (France).	2015	Belgian variety recovered by the founder of Graines de Noé. This variety was obtained at the Gembloux Agronomic Institute, and is a derivative from <i>Rouquin</i> (therefore, it has some <i>Oberkulmer</i> and CW in its pedigree) (Bertin et al., 2001). It is registered in the European catalogue of agricultural plant species (https://www.semec.fr/).
<i>Rouquin</i>	Graines de Noé association (Côte d'Or, France)	Modern variety	Multiplied during at least 5 years year in small plots in Côte d'Or (France).	2015	Belgian variety recovered by the founder of Graines de Noé. This variety was obtained at the Gembloux Agronomic Institute, and has some <i>Oberkulmer</i> and CW in its pedigree (Bertin et al., 2001)
<i>Tyrolien Rouge</i>	Farm in Normandie (France)	Landrace	Multiplied at least once in Normandie (France).	2020	Austrian landrace (Koenig et al., 2015).
Common wheat (<i>Triticum aestivum</i> subsp. <i>aestivum</i>)					
<i>Mix HP&DM</i>	Farm in Rhône (France)	Mixture of landraces	Cultivated 10 years in Rhône (France). Every year, mass selection was done to favor big kernels.	2021	Mixture of around 100 landraces. Some varieties were obtained from farms CD and SR.
<i>Mix CD</i>	Farm in Isère (France)	Mixture of landraces	Cultivated at least 5 years in Isère (France). Mass selection only done on year 1. Small amounts of different varieties were added every 2 years, to maintain a high level of genetic diversity.	2021	Mixture of 30 varieties (land varieties and varieties from Participatory Plant Breeding). The varieties were chosen for their adaptation to local pedoclimatic conditions, resistance to lodging and high yields.
<i>Mix SR</i>	Farm in Loire (France)	Mixture of landraces	Cultivated 3 years in Loire (France). Every year, mass selection was done to favor big kernels.	2021	Mixture of around 10 landraces (<i>Carossela</i> , <i>Cucceta</i> , <i>Barbu Milanais</i> , <i>Saissette de Provence</i> , <i>Touzelles</i> , <i>Meunier d'Apt</i> , <i>Bardot</i> , <i>Bladette</i>). Some of the varieties came from CD farm. Initially, varieties were chosen for their resistance to lodging, diseases and cold weather.
<i>Mix GA</i>	Farm in Ain (France)	Mixture of landraces and historical varieties	For 5 years, multiplication of each variety separately in the Ain (France). Within each variety, mass selection was done every year to favor adaptation to local climatic conditions, lodging resistance and ground cover. The mixture was composed every year with equal proportions of each variety.	2021	Mixture of 4 landraces (<i>Rouge de Bordeaux</i> , <i>Barbu du mâcomais</i> , <i>Autrichien</i> , <i>Alauda</i>). Initially, the varieties were chosen for their adaptation to the pedoclimatic conditions of the Ain department.
<i>Mix PG</i>	Farm in Isère (France)	Mixture of modern varieties	Cultivated for 5 years in Isère (France). Mass selection done every year to favor weed competitiveness and kernel size.	2021	Mixture of commercial varieties (<i>Renan</i> , <i>Togano</i> , <i>Apache</i> , <i>Armstrong</i> , <i>Pireneo</i>) and residues of landraces (from CD farm). Varieties were initially chosen for their adaptability to a mountainous weather.
<i>Mix 5 CM</i>	Farm in Loire (France)	Mixture of modern varieties	Cultivated for 2 years in Loire (France).	2021	Mixture of 5 commercial varieties (<i>Togano</i> , <i>Filou</i> , <i>Arenzo</i> and 2 others) and residues of landraces.
<i>Apache</i>	Farm in the Marne (France)	Modern variety	Cultivated for several years in the Marne (France) under conventional practices.	2020	Commercial variety, registered in the French catalogue in 1998 (https://www.semec.fr/).
<i>Energo</i>	Farm in the Marne (France)	Modern variety	Cultivated for several years in the Marne (France) under conventional practices.	2020	Austrian commercial variety, registered in the European catalogue (https://www.semec.fr/).

The soil was sampled in April 2022. It was superficial (30 cm depth) had a sandy-loam texture (58% sand, 33% silt, 9% clay) and 20% of stones. The pH was 6.4 with 2% of soil organic carbon content. Consequently, the soil water holding capacity was low (around 1.2 mm/cm of soil). Pre-crops were either a permanent grassland or permanent grassland followed by one year of diversified vegetable culture. The experiment was sown between November 19 and November 21, 2022 after a superficial tillage at 15 cm depth (Rotovator Kubota RTZ 3011).

Plots were 1 or 4.4 m² (depending on the availability of seeds): 1 m width and 1 to 4.4 m length, with either 5 or 22 rows. Seeding rate was adjusted for a density of 250 germinable seeds per m². All plots were covered by a forcing sail (P17) during 2 months to prevent seedlings to be eaten by birds. The experiment was conducted according to organic standards. No organic fertilization was used and one manual weeding was done in mid-April 2022. Ears were manually harvested from June 22 to July 19, 2022, according to the degree of maturity of each variety.

Daily meteorological data (SAFRAN data from the INRAE, (Maury et al., 2023) from 1992 to 2022 were obtained for a 2 x 2 km² mesh including the CRBA. Average mean temperatures and total precipitations (including rain and snow) per month were calculated. The medium average temperature in the growing season (from November to July) was 12.0 °C and the total precipitations were 365 mm (figure 1). The season was particularly dry, especially from February to May 2022, with 90 mm rain only.

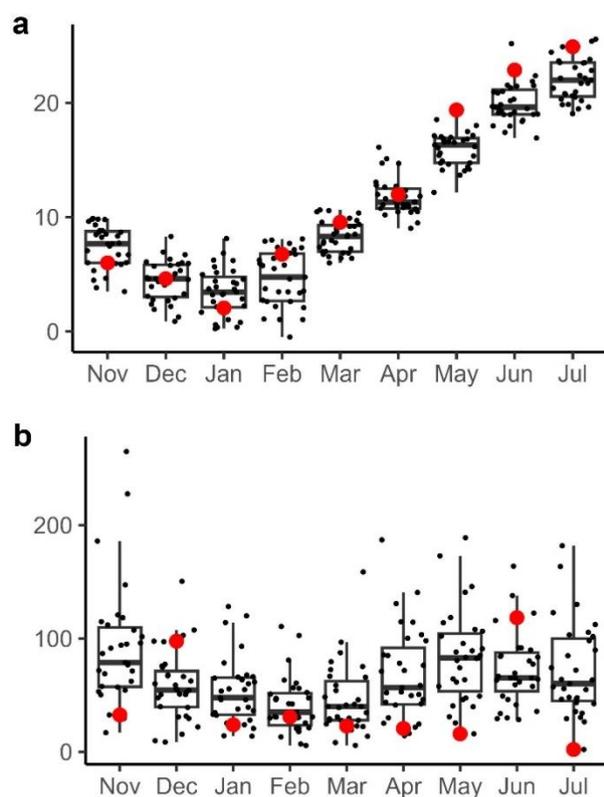


FIGURE 1 Monthly average temperatures in °C (a) and monthly total precipitations in mm (b). Boxplots represent the distributions of values for the years 1992 to 2022, black small dots represent individual values for the years 1992 to 2022, and red big dots indicate the value of the season 2021-2022.

2.2 Agronomic evaluation

All parameters included in the evaluation were first identified based on prior research on wheat and then selected with farmers to produce useful descriptions for them. Following this participatory approach, we mostly focused on parameters related to weed competitiveness and to yield as they were considered the most relevant for them. The chosen methods to measure these parameters were also adjusted in the light of their comments.

Plant height at the beginning of March and at the end of April was measured on 16 individual plants per plot. It was considered as the distance between the soil and the highest point of the plant, without straightening it. Plant final height (distance from the soil to the tip of the ear of the main tiller, straightening the plant when necessary) and LLSD (distance between last leaf and ear) were evaluated at maturity on 20 individual plants per plot. For each of these parameters, a mean value was calculated per plot.

All the other agronomic parameters were evaluated at the plot level. Emergence rate, the percentage of ground covered by the crop and ear and tiller number were assessed on a 100 x 60 cm quadrat (that included the 3 central rows of each plot). Emergence rate was estimated by counting the number of single plants and dividing them by the number of germinable seeds. At maturity, the numbers of ears

and tillers per plant were estimated relatively to single plant densities. The percentage of ground covered by the crop was visually assessed at the beginning of March and at the end of April. Plant posture (spreading, intermediate or upright) was evaluated on the same days as ground coverage and a quantitative score was given to each form (1 for spreading, 2 for intermediate and 3 for upright). Lodging was visually assessed in mid-June (the proportions of plants at different angles from the vertical were estimated), and a lodging severity score was calculated using the same method than Costanzo et al. (2019) with minor modifications (p.p. = proportion of plants in the given angle range (%)):

$$\textit{lodging severity score} = \frac{(p.p.45^{\circ}-75^{\circ})+2(p.p.75^{\circ}-90^{\circ})}{2} \quad (1)$$

Earliness was monitored each week from May 13 to June 8 (5 measurements in total). For each plot, heading was considered as achieved when more than 50% of the ears of the plot had headed (50% of the ear visible).

After harvesting, 60 grams of ears (when available) were sampled from each plot and were both threshed and dehulled using a laboratory threshing machine (approximately 1 cm of straw remained on the ears). To calculate relative yields, we divided the mass of kernels after threshing and dehulling by the mass of ears before threshing and dehulling. Finally, TKM (thousand kernel mass) were estimated on 331 non-broken kernels using the technology “Optoagrimetric” developed by Optomachines (<http://optomachines.fr>). For each sample, the average surface mass of one kernel (g/mm²) was multiplied by the average surface of one kernel (mm²) (x 1000).

Yields were assessed based on three parameters: emergence rate, number of ears per plant, and TKM. Yet, we could not estimate final grain yields since the experiment was damaged by a hail storm just before harvesting, preventing us from determining the numbers of kernels per ear. Weed competitiveness was assessed from ground cover by the crops, but also from plant height and posture.

2.3 Morphometric characterization of kernels

For each sample, morphometric parameters were obtained on 331 non-broken kernels using the technology “Optoagrimetric” developed by OptoMachines (<http://optomachines.fr>) which provides 2D projected images of individual kernels. The following parameters were considered for analysis: length (mm), width (mm), perimeter (mm), surface (mm²), length/width ratio (Ratio_LW) and circularity (equal to 1 if perfectly circular).

2.4 Total protein dosage

For total protein dosages, 12 g of kernels were milled using a CYCLOTEC 1093 Sample mill (FOSS TECATOR), with a 0.5 mm grid. After homogenization, 1.5 to 3 mg of flour were withdrawn for analyses. Protein contents (% N x 5.7) were determined by the Dumas combustion method (with a AE 2000 NC soil analyzer, Model Flash Smart 230V AC 50/60 Hz 1400VA, ThermoFisher). The values

were then expressed with respect to dry matter, considering the determination of water content (see appendix 2).

2.5 Data analysis

All statistical analyses were performed with R (version 4.2.2). Original data and R scripts are available in the appendix 3.

2.5.1 Descriptive characterization of species

To visualize the effect of species and inter-varietal variability, Principal Component Analysis (PCA) were done separately for agronomic parameters and kernel morphological parameters, on a dataset with the mean values for each variety of all parameters. The number of dimensions was chosen so that it explained at least 90% of total variation. PCA analyses were performed with the package FactoMineR 2.6.

2.5.2 Characterization of species: comparison of average values

To statistically test the effect of species, the following ANOVA model was run on all parameters measured at the plot level:

$$y_{i,j,k} = \mu + \alpha_i + \beta_{j|v_i} + \gamma_k + \varepsilon_{i,j,k} \quad (2)$$

In this model, μ was the intercept term, α_i accounted for the fixed effect of the i^{th} species, $\beta_{j|v_i}$ for the fixed effect of the j^{th} variety nested in the i^{th} species, γ_k for the fixed effect of the k^{th} bloc and $\varepsilon_{i,j,k}$ was the random residual. The distribution of the residuals was checked for each parameter by visual examination of the Q-Q and the residuals vs. fitted plots. Estimated marginal means (emmeans) were then calculated for each species and pairwise comparisons were achieved using Tukey HSD method with bonferroni adjustment for *p-values* (packages emmeans 1.8.2 and multcompView 0.1.8). For the parameters measured at the plant and at the kernel level, the same model was used, but the residual had an additional source of variability (individual plants or kernels).

2.5.3 Correlations between variables

Finally, to study correlations between variables, the Pearson coefficient was calculated for all pairs of continuous variables, on a dataset with one value per plot (corrplot package 0.92).

3. RESULTS

3.1 Characterization of species: specific traits and inter-varietal variability

Our main aims were (i) to test whether we could distinguish each species according to agronomic and kernel morphometric parameters of interest for the farmers, and (ii) to assess intra-specific variability across species, as a potentially pertinent agronomic trait. We mostly focused on parameters related to ground cover and to yield. Photos of all the studied varieties (ears) and of kernels for one variety per species are shown in figure 2.



FIGURE 2 Plant material. a. Photos of ears of all the studied varieties. For mixtures of common wheat several ears are represented to picture the intra-varietal diversity. Einkorn varieties, from left to right: *Allemand* (A), *de Bulgarie* (B), *Graines de l'Ain* (C), *Mix JMG* (D), *Noir* (E), *Petit épeautre de Provence* (F), *Pop de Barcelonnette* (G). Emmer varieties, from left to right: *Blanc* (H), *Blanc long* (I), *Bleu d'Ethiopie* (J), *de la Forêt Noire* (K), *de Poveda* (L), *de Souabe* (M), *Gris* (N), *Roux Blanc* (O). Spelt varieties, from left to right: *Arduinii* (P), *de Manitoba* (Q), *Doré* (R), *Escanda de Asturias* (S), *Oberkulmer* (T), *Ressac* (U), *Rouquin* (V), *Tyrolien Rouge* (W). Common wheat varieties, from left to right: *Mix HP&DM* (X), *Mix CD* (Y), *Mix SR* (Z), *Mix GA* (AA), *Mix PG* (AB), *Mix CM* (AC), *Apache* (AD), *Energo* (AE). b. Representative photos of the kernels of one variety per species (einkorn: *Mix JMG*, emmer: *Blanc*, spelt: *Oberkulmer*, common wheat: *mixture of Apache and Energo*). Scale bar for all kernel images is 1 mm.

To visually assess the differences between species and inter-varietal variability, we ran PCA analyses separately for agronomic and kernel morphometrical parameters and looked at the distribution of the varieties in the plots of individuals (figure 3).

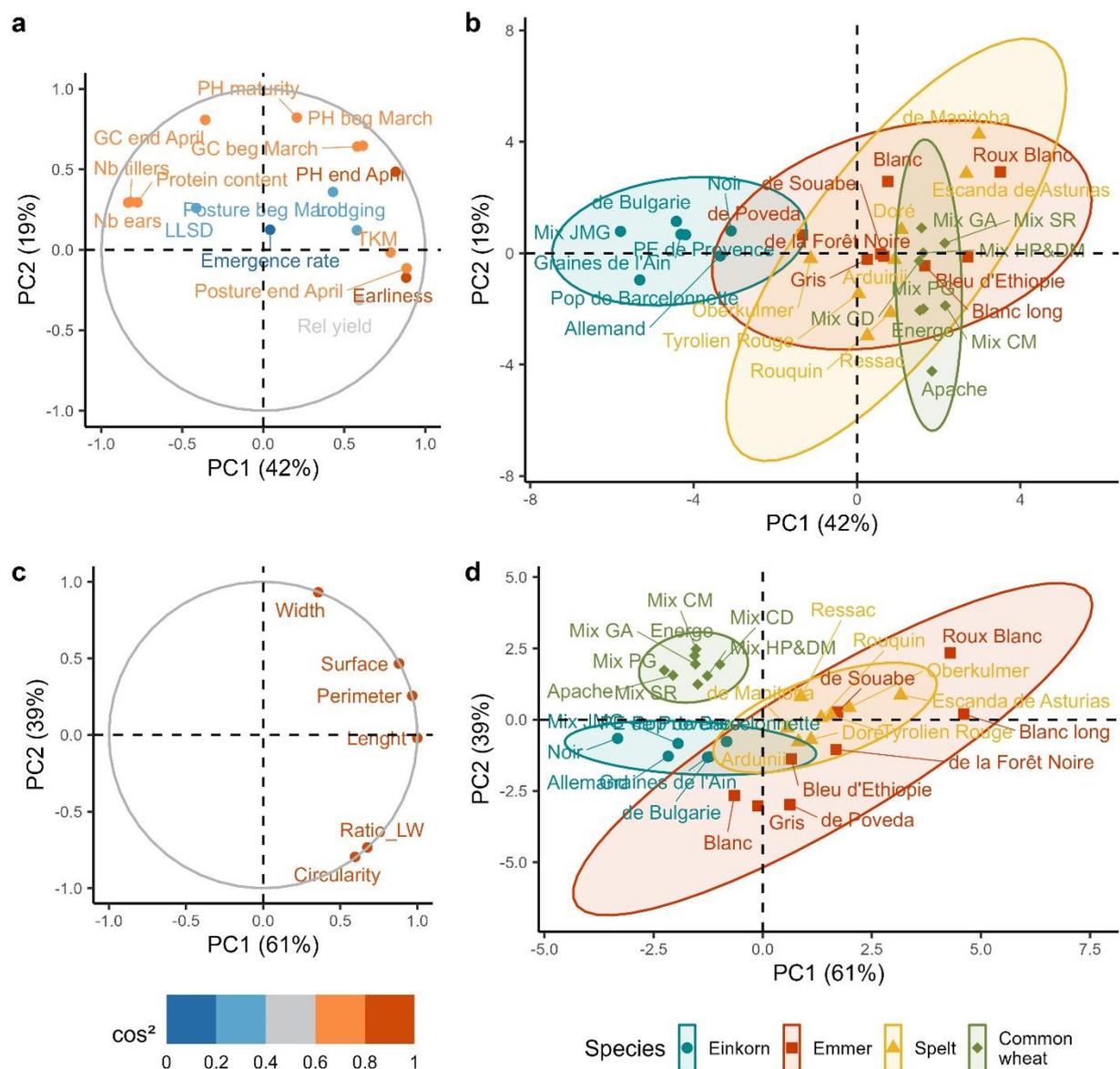


FIGURE 3 PCA on agronomic parameters (a, b) and on kernel morphometric parameters (c, d). a, c. Plot of variables. Colors indicate the quality of representation (cos²) of each variable. b, d. Plot of individuals, with 95% confidence ellipses of the mean point for each species. In the plot of variables for agronomic parameters (a), Em: emergence, GC: ground cover, PH: plant height, Post: posture, Prot: protein content, Rel: relative.

For agronomic parameters, Principal Component 1 (PC1) explained 42% and PC2 explained 19% of variability within the data (figure 3a and figure 3b). The graph of individuals (figure 3b) shows that Ei and CW varieties formed quite homogeneous groups, with little intra-species variability, while variability within Em and Sp was high. Ei was differentiated from the other species by PC1, and was associated to high tillering, late heading, low relative yields, low TKM, spreading posture at the end of April, small height and high protein contents (figure 2b). The distributions of Em, Sp and CW varieties overlapped, indicating that these species were not discriminated according to agronomic features. These 3 species were associated to lower tillering and higher TKM than Ei. Within CW, mixtures of landraces

(*Mix 4 GA*, *Mix SR*, *Mix HP&DM*, *Mix CD*) and commercial varieties or mixtures of commercial varieties (*Energo*, *Apache*, *Mix CM*, *Mix PG*) were differentiated on PC2. The latter were characterized by short plants, earliness and high relative yields (mostly the variety *Apache*). Sp varieties seemed divided into three groups: a first one containing *Oberkulmer*, *Tyrolien Rouge*, *Ressac* and *Rouquin*, a second one with *Doré* and *Arduinii* and a last one with *Escanda de Asturias* and *de Manitoba*. The latter one was characterized by tall plants, high TKM and earliness. Em *Roux Blanc* had similar characteristics than Sp *Escanda de Asturias* and *de Manitoba* (high plants, earliness, high TKM). Em *Blanc* also seemed to be characterized by tall plants, but it was less early than Em *Roux Blanc* and it had a lower TKM.

For kernel morphometrical parameters, PC1 explained 61% and PC2 39% of variability within the data (figure 3c and figure 3d). Ei, Sp and CW varieties were plotted in quite homogeneous and distinct groups (figure 3d), indicating little intra-species variability and precise morphometric characteristics for each species. On the contrary, Em varieties were widely distributed on the right side of PC1, and overlapped with Sp varieties. Ei and CW were separated from Sp and Em by PC1, while PC2 differentiated Em from CW (but not Sp from Em). Both Ei and CW kernels were rather small and less elongated than those of Em and Sp. CW kernels were larger and more circular (higher width and lower Ratio_LW) than those of Ei. Sp kernels were longer and bigger than those of Ei and CW, and more elongated than those of CW. Finally, Em kernels were rather elongated, but the variability within the species was high. Within Sp, the variety *Escanda de Asturias* had particularly big kernels, while within Em, varieties *Blanc*, *Gris* and *de Poveda* had thin and small kernels and varieties *Blanc Long* and *Roux Blanc* had big kernels. Within Ei varieties, Ei *Noir* had particularly small kernels.

These observations show that only Ei differed from the other species in terms of agronomic features. This species was characterized by high tillering, short plants, late heading, high protein contents, small kernels and low relative yields. Variability was always small for Ei and CW, both in terms on agronomic parameters and kernel morphology. Em kernel morphology stood out as the most variable one, matching high variability in agronomic features. In contrast, variability of Sp kernel morphology was low, despite high variability in agronomic parameters. This suggests that using kernel morphometry alone is unlikely to provide a complete picture of agronomic variability.

3.2 Characterization of species: comparison of average values

To go beyond the global PCA approach, we performed for all parameters, pairwise-comparison tests (Tukey HSD tests) on emmeans. Results for the most relevant parameters are shown in table 2. Results of the ANOVA and of the pairwise comparisons for all the parameters, together with the associated *p-values* are available in the appendix 4.

TABLE 2 Results of emmean pairwise-comparisons. For each species, emmeans and (\pm) standard errors (SE) are shown. For each parameter, emmeans with the same letter are not significantly different (p -value < 0.05 , Tukey test).

Parameter	Einkorn	Emmer	Spelt	Common wheat
<i>Agronomic parameters</i>				
Plant height beg. March (cm)	5.0 ^a \pm 0.1	8.3 ^c \pm 0.1	7.8 ^c \pm 0.1	6.7 ^b \pm 0.1
Ground cover beg. March (%)	16.8 ^a \pm 1.6	24.4 ^b \pm 1.5	22.8 ^{ab} \pm 1.5	21.2 ^{ab} \pm 1.5
Plant height end April (cm)	16.0 ^a \pm 0.4	28.9 ^b \pm 0.4	27.7 ^b \pm 0.4	27.9 ^b \pm 0.4
Ground cover end April (%)	34.6 ^a \pm 2.0	29.8 ^a \pm 1.9	29.9 ^a \pm 1.9	27.3 ^a \pm 1.9
Nb ears per plant	2.2 ^b \pm 0.1	1.1 ^a \pm 0.1	1.1 ^a \pm 0.1	1.1 ^a \pm 0.1
Plant final height (cm)	71.5 ^b \pm 0.7	78.7 ^c \pm 0.7	77.9 ^c \pm 0.7	67.9 ^a \pm 0.7
Relative yield (%)	59.7 ^a \pm 0.8	64.2 ^b \pm 0.8	64.8 ^b \pm 0.8	73.7 ^c \pm 0.8
TKM (g)	23.6 ^a \pm 0.5	36.5 ^b \pm 0.5	39.4 ^c \pm 0.5	38.3 ^{bc} \pm 0.5
Protein content (% dm)	17.3 ^c \pm 0.3	14.4 ^b \pm 0.3	14.1 ^b \pm 0.3	12.0 ^a \pm 0.3
<i>Kernel morphometric parameters</i>				
Surface (mm ²)	13.2 ^a \pm 0.0	16.1 ^c \pm 0.0	16.9 ^d \pm 0.0	15.1 ^b \pm 0.0
Ratio_LW	2.28 ^b \pm 0.00	2.51 ^d \pm 0.00	2.41 ^c \pm 0.00	2.05 ^a \pm 0.00

As expected, pairwise comparisons confirm the observations of the PCA analyses. In particular, Ei significantly differed from the three other species for all the parameters shown in Table 2, except for ground cover (at the beginning of March and at the end of April). Yet, this analysis also revealed new features.

Ground cover was significantly lower at the beginning of March for Ei (16.8 % in average) than for Em (24.4 %), but the differences with Sp (22.8 %) and CW (21.2 %) were not significant. No significant differences were observed across species at the end of April, even if Ei had the highest value (34.6 %). Plant height was significantly lower for Ei than all other species at the beginning of March (5.0 cm) and at the end of April (16.0 cm).

Within parameters related to yield, the number of ears per plant was significantly higher for Ei than for the other species (2.2 ears per plant for Ei, 1.1 for the other species). Yet, Ei had a significantly lower TKM than Em, Sp and CW (23.6 g for Ei, 36.5 for Em, 39.4 for Sp and 38.3 for CW). The difference in TKW between Em and Sp was also significant.

Regarding other agronomic parameters, final plant height was significantly lower for CW (67.9 cm) than for the three other species. It was also significantly lower for Ei (71.5 cm) than for Em and Sp. Relative yield was significantly lower for Ei (59.7%) and higher for CW (73.7%) than for the other species. Finally, protein contents were significantly higher for Ei (17.3 %dm) than for the other species, and lower for CW (12.0 %dm). Mean values for Em and Sp were 14.4 and 14.1 %dm, respectively.

Concerning kernel morphometry, all species exhibited significantly different surfaces, with Ei having the smallest (13.2 mm²), followed by CW (15.1 mm²), Em (16.1 mm²) and Sp (16.9 mm²). The four species also had significantly different values for kernel aspect-ratio (Ratio_LW), indicating that

proportionally to kernel perimeter, Em varieties had the more elongated kernels (ratio of 2.51), followed by Sp (ratio of 2.41), Ei (ratio of 2.28) and finally CW (ratio of 2.05).

While confirming the PCA analyses, we found distinct combinations of shape and size for kernels of Ei (small and rather elongated), Sp (big and elongated) and CW (rather small and circular), but not for Em. Em kernels were the most elongated in average, but the intra-species morphometric variability was high.

3.3 Agronomic characterization of individual varieties: some remarkable features

Since farmers are thinking of adopting some varieties, we were also interested in evaluating each variety according to agronomic characteristics. Figure 4 shows the heading advancement of each variety and figure 5 shows histograms for the most relevant agronomic parameters. Graphic representations for all the other measured parameters are shown in the appendix 5.

Concerning heading dates, table 3 indicates that CW is on average the earliest species, followed by Em and Sp and finally by Ei. Within Ei, *Ei Noir* had a surprisingly early heading (heading was completed on May 25th), while *Pop de Barcelonnette* was the latest variety (heading completed on June 8th). *Em Bleu d’Ethiopie*, *Sp Arduinii* and *Sp Doré* were as early as most of CW varieties (heading was completed on May 13). Compared to all other Sp varieties, *Ressac* was quite late (heading completed on May 25th).

Regarding parameters related to yield (emergence rate, number of ears per plant and TKM), figure 4 shows that the variety with the lowest emergence rate was *Ei Mix JMG* (52.3 % in average). Within Em, *Blanc Long* and *Roux Blanc* had lower emergence rates than average (65.3 and 69.3 %, respectively), while within Sp, *de Manitoba*, *Ressac* and *Rouquin* had rather high emergence rates (96.0, 85.7 and 92.3 %), respectively. *Ei Mix JMG* had the highest number of ears per plant (2.9). While *Ei Noir* and CW *Apache* had particularly low TKM (21.3 and 33.9 g, respectively), *Ei Petit épeautre de Provence* and *Ei Pop de Barcelonnette* had relatively high TKM (26.2 and 25.8 g, respectively). The highest TKM (54.1 g) was obtained for the Em *Roux Blanc*. Values above 45 g were also observed for Em *Blanc Long* (46.4 g) and Sp *Escanda de Asturias* (47.4 g). Within Em, varieties *Gris*, *Blanc*, *de Poveda* had TKM lower than 30 g (26.1, 26.7 and 29.1, respectively). Within Sp, *Arduinii*, *de Manitoba* and *Doré* had smaller kernels than average (36.7, 37.5 and 36.0 g, respectively).

Plant height at maturity was surprisingly homogeneous across Ei varieties (from 64.1 to 77.9 cm). It was more variable within the three other species. The tallest plants were observed for Sp *de Manitoba* (98.1 cm) and *Escanda de Asturias* (97.0 cm). Rather high values were measured for Em *de Souabe* (90.1 cm) and Em *Roux Blanc* (89.5 cm). Concerning CW, plants were taller for landraces and mixtures of landraces (from 73.6 to 87.3 cm) than for modern varieties (from 45.0 to 62.9 cm). Modern varieties were shorter than all Ei varieties. Several Em and Sp varieties, such as Em *Bleu d’Ethiopie* and Sp *Ressac*, were also shorter than Ei.

TABLE 3 Heading advancement of all studied varieties. Red crosses indicate that heading was completed on both plots, while blue ± indicate that heading was achieved in only one of the two plots.

Heading monitoring	May 13 th	May 20 th	May 25 th	May 31 st	June 8 th
Einkorn					
<i>Allemand</i>				X	
<i>de Bulgarie</i>			±	X	
<i>Graines de l'Ain</i>			±	X	
<i>Mix JMG</i>				X	
<i>Noir</i>			X		
<i>PE de Provence</i>			±	X	
<i>Pop de Barcelonnette</i>				±	X
Emmer					
<i>Blanc</i>		X			
<i>Blanc long</i>		X			
<i>Bleu d'Ethiopie</i>	X				
<i>de la Forêt Noire</i>		±	X		
<i>de Poveda</i>		±	X		
<i>de Souabe</i>		X			
<i>Gris</i>		X			
<i>Roux Blanc</i>		X			
Spelt					
<i>Arduinii</i>	X				
<i>de Manitoba</i>		X			
<i>Doré</i>	X				
<i>Escanda de Asturias</i>		X			
<i>Oberkulmer</i>	±	X			
<i>Ressac</i>			X		
<i>Rouquin</i>		X			
<i>Tyrolien Rouge</i>		X			
Common wheat					
<i>Mix HP&DM</i>		X			
<i>Mix CD</i>		X			
<i>Mix SR</i>	X				
<i>Mix GA</i>		X			
<i>Mix PG</i>	X				
<i>Mix CM</i>	X				
<i>Apache</i>	X				
<i>Energo</i>	X				

Regarding relative yields, Ei varieties *Noir* and *Mix JMG* had lower values than average (56.5 and 52.0 %). Within Em, values ranged between 58.0 % for Em *Gris* and 68.5 % for Em *Blanc Long*. Rather high relative yields were also observed for *Blanc* (66.3 %) and *Bleu d'Ethiopie* (67.4 %). Except for the *Oberkulmer* variety (relative yield of 42.4 %), values were quite homogeneous within Sp varieties (from 66.7 to 70.0).

Finally, Ei *Graines de l'Ain* had the highest protein content (19.1 %dm). Ei *Noir* had a low content compared to other Ei varieties (15.7 %dm). Within Em, *de Poveda* and *Gris* had rather high values (16.3 and 17.0 %dm) and within Sp, *Oberkulmer* had a very high protein content (18.1 %dm). On the contrary, Sp *Rouquin* had a low value (11.6 %dm). Within CW, a small difference was observed for mixtures of landraces with higher contents (from 11.9 to 13.5 %dm) than the two modern varieties and the mixture *Mix CM* (10.1 to 11.6 %dm).

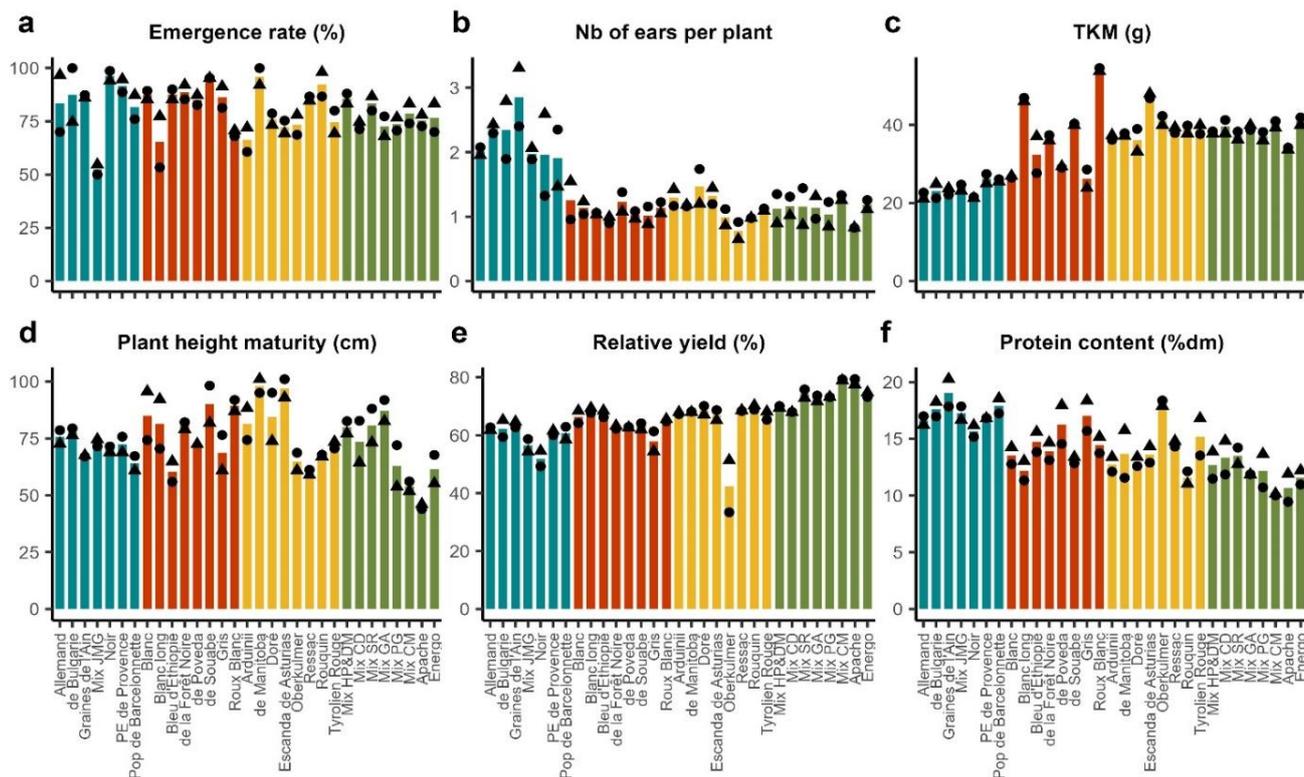


FIGURE 4 Mean values for some of the agronomic parameters. Black dots and triangles indicate the values for each of the two blocks (dots = values for block 1 and triangles = values for block 2). Each species is represented by a color: blue for einkorn, red for emmer, yellow for spelt and green for common wheat.

In conclusion, we showed that all Ei varieties have numerous tillers and high protein contents. Ei *Noir* can be of particular interest since it is earlier than the other Ei. Yet, it has smaller kernels and slightly lower protein contents. Within Em, the variety *Bleu d’Ethiopie* stood out as exceptionally early-maturing. Note that this is also a free-threshing variety, meaning that it does not require dehulling. All Ei varieties appear to be quite short, but several Em (*Bleu d’Ethiopie*, *Gris*, *de Poveda*) and Sp varieties (*Oberkulmer*, *Ressac*, *Rouquin*, *Tyrolien Rouge*) are at least as short. If the focus is on large kernels, the Em variety *Roux Blanc* and the Sp variety *Escanda de Asturias* are noteworthy options.

4. DISCUSSION

4.1 Trends per species and remarkable features for individual varieties

In our study, Ei clearly stood out from the other species, according to agronomic features and to kernel morphometry. Ei varieties were characterized by high tillering, high ground cover at the end of April, high protein contents, low relative yields and small and quite thin kernels (figure 3 and table 2). High ground cover until late in the growing season can be of major interest for organic farmers who look for weed competitive varieties. Because of its high protein contents despite low fertilization, this species is also interesting for farmers using low amounts of inputs, or as the last crop in a rotation. Furthermore,

protein contents are not negatively correlated with TKM for Ei (see appendix 6). Yet, growing Ei might implicate some changes in farming practices, such as earlier sowing or later harvest. If Ei characteristics are wanted, but late heading appears as a limit, the Ei variety *Noir* could be a good option, since it is earlier than other Ei.

Em and Sp had similar agronomic characteristics to those of CW landraces, making them an option to increase crop diversity without major changes in farming practices. Some Em varieties, such as *Bleu d’Ethiopie*, were extremely early (Table 3), while others, such as *de Poveda* and *Gris*, had high protein contents (16.3 and 17.0 %dm) (figure 4f). The first ones could be used as spring wheats, or for very late sowing while the latter could be used at the end of rotations. Em and Sp also appear more convenient for storing than Ei since less space is occupied by glumes (higher relative yields). For very early varieties, Em *Bleu d’Ethiopie* and Sp *Arduinii* and *Doré* could be good options. If looking for elevated protein contents, with agronomic characteristics close to those of CW, Em varieties *de Poveda* and *Gris* appear interesting. Sp varieties *Tyrolien Rouge* and *Oberkulmer* could also be considered (protein contents of 15.2 and 18.1 %dm). Yet, high protein contents for this latter variety might be due to the abortion rate (and therefore to the seed lot). If large kernels are desired, Em varieties *Blanc Long* and *Roux Blanc* and Sp *Escanda de Asturias* seem appropriate (TKM of 46.5, 54.1 and 47.4 g). Interestingly, Longin et al. (2016) also found very high TKM (about 60 g) for an Em variety. Finally, if plant height is seen as a limit, Em *de Souabe*, Em *Roux Blanc*, and Sp *de Manitoba* and Sp *Escanda de Asturias* should be avoided (heights at maturity of 90.1, 89.5, 98.1 and 97.0 cm). Yet, relations between large kernels and grain yields and between final plant heights and lodging for these varieties should still be assessed.

4.2 Agronomic relevance of HW traits

Our analysis also highlights pertinent agronomic features for HW, namely ground cover strategies, earliness, plant height, relative yield and protein content.

In organic farming, good weed competitiveness is required to minimize the need of mechanical weeding. Among the farmers we worked with, some preferred early varieties for quick ground cover while others preferred late varieties for late and long ground cover. We found better covering success for Em, Sp and CW at the beginning of March. This can be related to the height of the plants (table 2), and thus to earliness (table 4). In fact, plants were on average 3.2, 2.7 and 1.6 cm higher for Em, Sp and CW than for Ei (table 2). In April, better ground cover for Ei was not related to plant height since Ei plants were significantly shorter than other species (average height of 15.9 cm compared to 28-29 cm for the other species). Good ground cover for Ei was likely due to higher tillering (2.5 tillers per plant in average) and spreading form (table 2). Costanzo et al. (2019) also found better coverage for Ei compared to Em at the phenological stage of stem extension. Yet, the relations between these parameters and weed competitiveness still need to be studied. Note that tillering was not at its maximal potential, since

environmental conditions (late sowing, no fertilization, low precipitations during spring, shallow soil with low water-holding capacity) were harsh.

Early varieties do not only provide quick ground cover. They also have the advantage of being harvested before the onset of extreme summer weather conditions such as hail storms and heat waves. Late varieties can also be desirable to some farmers as they may be less affected by harsh weather throughout the growing period. In this study, we found that Ei varieties had a later heading date compared to other species, which is in line with previous research and farmer observations (Longin et al., 2016). However, the variety Ei *Noir*, had an earlier heading date (table 3). Within HW, the Em variety *Bleu d’Ethiopie* and Sp varieties *Arduinii* and *Doré* were particularly early (table 3).

According to the farmers, heading dates were uncommonly early, which is surely due to water stress caused by the little precipitations during the season (figure 1). Water stress probably also reduced tillering (Allahverdiyev, 2016), plant heights (Allahverdiyev, 2016; Mirbahar et al., 2009), number of grains per ear (Allahverdiyev, 2016; Gupta et al., 2001; Mirbahar et al., 2009) and TKM (Allahverdiyev, 2016; Gupta et al., 2001; Mirbahar et al., 2009). Total precipitations in June were higher than the previous years (figure 1), which is due to a strong hail storm that occurred on June, 30th. The storm occurred when all varieties of Em, Sp and CW and Ei *Noir* were ready to harvest, but not the six other Ei varieties. It might therefore have limited TKM reduction due to water shortage, explaining lower TKM for Ei *Noir* than for other Ei varieties (figure 4c).

Farmers are concerned by plant height as it can lead to lodging. We found that all Ei varieties were quite short, and that some Em and Sp varieties were just as short or even shorter (table 2 and figure 4). The differences in height compared to modern CW varieties, selected for short stems, were sometimes minimal (figure 4d). Yet, the relationship between plant height and lodging is not always straightforward and requires further investigation (Shah et al., 2019). For example, despite its short stature, lodging was observed for Em *Bleu d’Ethiopie* (see appendix 5). Overall, for all varieties, plant height was particularly short, likely due to the adverse environmental conditions during the growing season (table 3).

Relative yield is a parameter of high interest for farmers who grow HW, as it enables an estimation of grain yields immediately after harvesting. Additionally, a lower relative yield means that more space is occupied by the glumes during storage, since the seeds are generally stored with their hulls (for a better protection from weevils and a better ventilation within the silos). Within HW, relative yield was significantly lower for Ei, which is consistent with the results from Longin et al. (Longin et al., 2016). This parameter has no relevance for CW, since “naked” kernels are obtained immediately after threshing.

Protein content is a crucial aspect of grain quality, for both processing and nutrition. HW are thought to have elevated protein contents, and are therefore often considered as nutritious crops. Protein contents were overall higher for Ei varieties (mean of 17.3 %dm), but some high values were also observed for

Em varieties (mean of 14.4 %dm and maximal value of 17.0 %dm) (table 2 and figure 4f). These findings support the findings from previous studies (Bencze et al., 2020; Castagna et al., 1995; Longin et al., 2016; Mondini et al., 2014), showing that Ei, as well as some Em varieties, can have high protein yields, despite a limited N fertilization. Note that the extremely low relative yield (42.3 %) and the high protein content (18.1 %dm) observed for Sp *Oberkulmer* was probably due to its high rate of seed abortion. Interestingly, slightly higher values were observed for CW mixtures of landraces (similar to those of most Sp varieties) than for CW modern varieties (from 11.9 to 13.5 %dm for mixtures of landraces and from 10.1 to 12.2 %dm for modern varieties). This is also in accordance with previous studies (Goldringer et al., 2019), and validates that protein contents in CW modern varieties are very low if cultivated in low-input conditions. Yet, focusing on protein content is restrictive, since protein composition also plays an essential role in processing and is believed to be important in wheat digestibility. Previous studies have proven that compositions vary between HW and CW (Geisslitz et al., 2019; Pronin et al., 2020), but there is limited information on how this relates to digestibility.

HW low yields are pointed as a main limit for the adoption of these species by farmers, yet yield gaps between HW and CW might be small in marginal conditions. In this study, we worked on different parameters related to yield. Overall, it appeared that for Ei, yield depended mostly on tillering, while it was linked to kernel size for the three other species. Similar studies found that Sp, Em and Ei had at least 30 % lower yields than CW, and that Ei and Em yields were lower than those of Sp (Biel et al., 2016; Longin et al., 2016). However, the field trials in these studies were done in more optimal conditions, sometimes with adjusted N fertilization for each species, and included only modern CW varieties. Other studies compared HW yields in marginal conditions, but did not include CW in the experiments (Bencze et al., 2020; Costanzo et al., 2019). Further research is needed to compare HW and CW yields under different marginal conditions, and to understand to what extent the different parameters contribute to final yields.

4.3 HW do not necessarily exhibit higher intra-species variability than CW

For both agronomic and kernel morphometric parameters, we observed small variability within Ei and CW varieties and high variability within Em varieties. The low variability within CW supports previous findings, indicating that lower phenotypic variations (linked to smaller gene pools) are observed in highly selected species (Goriewa-Duba et al., 2018). Lower variability within Ei varieties compared to Em and Sp could be due to its diploid genome, that supports less variability.

Note that this trend remains debated. Other studies found very high intra-species variability within HW, including Ei, for agronomic (Longin et al., 2016; Mondini et al., 2014; Zaharieva et al., 2010; Zaharieva & Monneveux, 2014), kernel chemical (Zaharieva et al., 2010; Zaharieva & Monneveux, 2014) and kernel morphological characteristics (Goriewa-Duba et al., 2018). Yet, these intra-species variabilities should be checked with more varieties, from different origins. For CW, we mainly worked on mixtures

of varieties, which could explain the low variability observed between varieties, as it might be offset by high intra-varietal variability.

High intra-species diversity validates that HW are a considerable reservoir for crop diversity in a region that does not traditionally grows such species. Within agroecological farming systems, pedoclimatic conditions and management practices widely differ among farmers. Multi-site trials might show that HW could provide adapted varieties for such diverse farming conditions.

4.4 Kernel morphometry is not a good proxy for agronomic variability

We identified proper kernel morphometries, based on combinations of size and shape, for Ei (small, rather elongated), Sp (large, elongated) and CW (rather small, circular). Kernels of Em varieties were in average more elongated (average Ratio_LW of 2.5) than those of the other species. Yet, their shape and mostly their size highly varied across varieties (figure 3). This is in line with other studies that showed that Ei kernels are smaller compared to those of other wheats, and that HW kernels are thinner than those of CW. However, these studies found more elongated kernels for Ei than for Em and Sp. They also found very smaller kernels for CW than for Sp and Em (up to 1.35 and 1.22 times smaller, respectively) (Goriewa-Duba et al., 2018; Martín-Gómez et al., 2019). These findings together with ours support those of *Gegas et al.*, showing that breeding for high yielding CW varieties focused on plumpy kernels, while more ancient wheat kernels were thin and long (Gegas et al., 2010). Similar morphometries between some Em varieties and Sp varieties might be linked to their common AABB genomes. Overall, kernel morphometry seems to be linked to both phylogenetic relations and to selection pressure.

However, kernel morphological variability did not necessarily correlate with the variability in agronomic traits. For Sp, high variability was observed for agronomic characteristics and rather low variability for kernel morphometries (figure 3). Em intra-species variability was particularly important for morphometric data, which is in line with the study of *Goriewa-Duba et al.*, in which Em varieties with very similar morphologies than those of Sp were identified (Goriewa-Duba et al., 2018). As we found higher intra-species variability for agronomic features than for kernel morphometry (figure 3), particularly for Sp, using kernel morphometry alone is unlikely to provide a complete picture of agronomic variability.

4.5 The participatory approach generated immediately applicable knowledge

The evaluation presented in this study is the first one of a participatory research program on HW in the province of Lyon. As said previously, all parameters and methods of estimation were chosen in collaboration with farmers. Also, some varieties were evaluated in farmer's fields, but results were not reported here because the experimental designs were too unbalanced.

Although the evaluation was limited to a single growing season and location, some varieties were chosen by farmers for *on-farm* testing. Yet, trends reported here must be confirmed repeating this experiment on several years and/or locations, to consider the effect of environment. This effect has been reported as important, particularly for grain yield and protein contents (Longin et al., 2016). For instance, we saw for a given variety variable numbers of ears per plant and protein contents in the *on-farm* evaluations. Also, more than two blocks should be set in further trials, to enable better estimation of intra-varietal variance.

At the beginning of the project, knowledge on HW within the group of farmers was very scarce. Therefore, we focused on very broad questions, such as exploring trends for each species, intra-species variability and notable features for individual varieties. This first year of experimentation allowed to determine more specific questions, such as the role of tillering in weed competitiveness, and agronomic practices to promote tillering in the different HW species.

5. CONCLUSION

In the present study, we compared three neglected species of wheat, Ei, Em and Sp, to CW. We found that Ei differed from all the other species in terms of agronomic features. It was associated to high tillering, a late phenological cycle, short plants, small kernels, high protein contents despite little fertilization and low relative yields. While farming practices may need to be adapted, Ei may be suitable for cultivation in challenging environments. We also observed high variability within Sp and especially within Em varieties. These species may also represent a valuable reservoir of diversity, with a range of varieties valuable for different environmental and management conditions.

This work was conducted using a participatory approach, involving six farmers and a center of botanical resources. This approach facilitated the share of information among stakeholders, and help them to decide which species and which varieties to grow on their own farm in the future. This study can serve as a starting point for participatory selection, breeding and cultivation of these species. However, since numerous traits are greatly influenced by the environment (Longin et al., 2016), further *on-farm* evaluation over several years is needed. The characterization could also be completed by other important agronomic features (lodging, resistance to diseases), and by grain quality assessments, for both nutritional components and processing feasibility.

ACKNOWLEDGEMENTS

We thank all the farmers (especially Jean-Marie Gonet), gene banks (Centre de Ressources Génétiques de Céréales à Paille, Clermont-Ferrand) and associations (Graines de Noé, Dijon) who provided varieties. We are also grateful to Martin Ecartot, Aline Rocher and Frédéric Compan for the technical help consisting in dehulling, milling and kernel phenotyping. We thank the Plateforme d'Analyses Chimiques (Montpellier) and especially Raphaëlle Leclerc for the protein dosages. Thanks to Laurence Mayaud for her involvement in scientific discussions. We extend our gratitude to the Fondation les Treilles (Tourtour) for the additional evaluation of some varieties. Also, thanks to Isabelle Goldringer, Yann Leverrier and Pierre Barbillon for their valuable scientific advices. Lastly, Sofia Correa thanks Ecole Urbaine de Lyon for her PhD grant.

STATEMENTS AND DECLARATIONS

Funding

This work was funded by the European Research Council (ERC-2021-AdG-101019515 “Musix”) and by the Agence National de la Recherche in the frame of “Programme d’Investissements d’Avenir” (ANR-17-CONV-0004, “Agronomy-Nutrition-Health” research studio of Ecole Urbaine de Lyon).

Competing interests

The authors have no relevant financial or non-financial interests to disclose.

Author contributions

Sofia Correa, Olivier Hamant, CRBA, Pierre Berthet, Jean-Philippe Clair, Christian Dalmasso, Cédric Mary, Denis Mignard, Honorine Perino, Marie-Pierre Repecaud, Stéphane Rouvès, Gustave Fradin, Jean-François Vian, Camille Vindras-Fouillet, Léa Bernard and Marie-Thérèse Charreyre contributed to the conceptualization of the study and to the design of the experimental trial. Data collection was made by Sofia Correa, CRBA, Justine Lepagneul and Aubin Démonté. Analyses were performed by Sofia Correa, with the help of Gustave Fradin, Olivier Hamant, Mathieu Thomas and Marie-Thérèse Charreyre. The first draft of the manuscript was written by Sofia Correa, and discussed with Olivier Hamant, Mathieu Thomas and Marie-Thérèse Charreyre. All authors approved the final manuscript.

Data availability

The datasets generated and analyzed in the present study are included in this published article (in the appendix 3). All R scripts used for analyses are also available in the appendix 3.

REFERENCES

- Allahverdiyev, T. (2016). Yield and yield traits of durum wheat (*Triticum durum* desf.) and bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes under drought stress. *Genetika*, 48(2), 717-727. <https://doi.org/10.2298/GENSR1602717A>
- Asseng, S., Ewert, F., Martre, P., Rötter, R. P., Lobell, D. B., Cammarano, D., Kimball, B. A., Ottman, M. J., Wall, G. W., White, J. W., Reynolds, M. P., Alderman, P. D., Prasad, P. V. V., Aggarwal, P. K., Anothai, J., Basso, B., Biernath, C., Challinor, A. J., De Sanctis, G., ... Zhu, Y. (2015). Rising temperatures reduce global wheat production. *Nature Climate Change*, 5(2), Art. 2. <https://doi.org/10.1038/nclimate2470>
- Bencze, S., Makádi, M., Aranyos, T. J., Földi, M., Hertelendy, P., Mikó, P., Bosi, S., Negri, L., & Drexler, D. (2020). Re-Introduction of Ancient Wheat Cultivars into Organic Agriculture—Emmer and Einkorn Cultivation Experiences under Marginal Conditions. *Sustainability*, 12(4), Art. 4. <https://doi.org/10.3390/su12041584>
- Bertin, P., Grégoire, D., Massart, S., & de Froidmont, D. (2001). Genetic diversity among European cultivated spelt revealed by microsatellites. *Theoretical and Applied Genetics*, 102, 148-156. <https://doi.org/10.1007/s001220051630>
- Beteselassie, N., Fininsa, C., & Badebo, A. (2007). Sources of resistance to stem rust (*Puccinia graminis* f. Sp. *Tritici*) in Ethiopian tetraploid wheat accessions. *Genetic resources and crop evolution*, 54(2), 337-343. <https://doi.org/10.1007/s10722-005-5561-6>
- Biel, W., Stankowski, S., Jaroszewska, A., Pużyński, S., & Boško, P. (2016). The influence of selected agronomic factors on the chemical composition of spelt wheat (*Triticum aestivum* ssp. *Spelta* L.) grain. *Journal of Integrative Agriculture*, 15(8), Art. 8. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(15\)61211-4](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(15)61211-4)
- Boguslavskij, R. L., Golik, O. V., & Tkachenko, T. T. (2000). Cultivated emmer is valuable germplasm for durum wheat breeding. In Royo C. (ed.), Nachit M. (ed.), Di Fonzo N. (ed.), Araus J.L. (ed.). *Durum wheat improvement in the Mediterranean region: New challenges*. (p. 125-127).
- Bonjean, A. (2001). *Histoire de la culture des céréales et en particulier de celle du blé tendre (Triticum aestivum L.)*. 21, 29-37.
- Bonneuil, C., Thomas, F., & Petitjean, O. (2012). *Semences, une histoire politique : Amélioration des plantes, agriculture et alimentation en France depuis la Seconde Guerre mondiale*. Éditions Charles Léopold Mayer.
- Bonneuil, C., & Thomas, Frédéric. (2009). *Gènes, pouvoirs et profits : Recherche publique et régimes de production des savoirs de Mendel aux OGM* (Quae). Éditions Quae. <https://www.torrossa.com/en/resources/an/5063433>

- Bonnin, I., Bonneuil, C., Goffaux, R., Montalent, P., & Goldringer, I. (2014). Explaining the decrease in the genetic diversity of wheat in France over the 20th century. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 195, 183-192. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.06.003>
- Campbell, K. G. (1997). Spelt : Agronomy, genetics and breeding. In Janick J (ed) *Plant Breed Review* (Vol. 15, p. 187-213).
- Castagna, R., Borghi, B., Di Fonzo, N., Heun, M., & Salamini, F. (1995). Yield and related traits of einkorn (*T. monococcum* ssp. *Monococcum*) in different environments. *European Journal of Agronomy*, 4(3), Art. 3. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(14\)80038-5](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(14)80038-5)
- Ceccarelli, S., & Grandi, S. (2009). Participatory Plant Breeding. In M. J. Carena (Éd.), *Cereals* (p. 395-414). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-0-387-72297-9_13
- Chable, V., Nuijten, E., Costanzo, A., Goldringer, I., Bocci, R., Oehen, B., Rey, F., Fasoula, D., Feher, J., Keskitalo, M., Koller, B., Omirou, M., Mendes-Moreira, P., van Frank, G., Naino Jika, A. K., Thomas, M., & Rossi, A. (2020). Embedding Cultivated Diversity in Society for Agro-Ecological Transition. *Sustainability*, 12(3), Art. 3. <https://doi.org/10.3390/su12030784>
- Challinor, A. J., Watson, J., Lobell, D. B., Howden, S. M., Smith, D. R., & Chhetri, N. (2014). A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation. *Nature Climate Change*, 4(4), Art. 4. <https://doi.org/10.1038/nclimate2153>
- Costanzo, A., Amos, D. C., Dinelli, G., Sferrazza, R. E., Accorsi, G., Negri, L., & Bosi, S. (2019). Performance and Nutritional Properties of Einkorn, Emmer and Rivet Wheat in Response to Different Rotational Position and Soil Tillage. *Sustainability*, 11(22), Art. 22. <https://doi.org/10.3390/su11226304>
- Cubadda, R., & Marconi, E. (2002). Spelt Wheat. In P. S. Belton & J. R. N. Taylor (Éds.), *Pseudocereals and Less Common Cereals : Grain Properties and Utilization Potential* (p. 153-175). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-09544-7_5
- Dinu, M., Whittaker, A., Pagliai, G., Benedettelli, S., & Sofi, F. (2018). Ancient wheat species and human health : Biochemical and clinical implications. *The Journal of Nutritional Biochemistry*, 52, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.jnutbio.2017.09.001>
- FAO. (1993). *Harvesting Nature's diversity*.
- FAO. (2019). *The state of the world's biodiversity for food and agriculture*.
- Gegas, V. C., Nazari, A., Griffiths, S., Simmonds, J., Fish, L., Orford, S., Sayers, L., Doonan, J. H., & Snape, J. W. (2010). A Genetic Framework for Grain Size and Shape Variation in Wheat. *The Plant Cell*, 22(4), 1046-1056. <https://doi.org/10.1105/tpc.110.074153>
- Geisslitz, S., Longin, C. F. H., Scherf, K. A., & Koehler, P. (2019). Comparative Study on Gluten Protein Composition of Ancient (Einkorn, Emmer and Spelt) and Modern Wheat Species (Durum and Common Wheat). *Foods*, 8(9), Art. 9. <https://doi.org/10.3390/foods8090409>
- Goldringer, I., Frank, G. van, d'Yvoire, C. B., Forst, E., Galic, N., Garnault, M., Locqueville, J., Pin, S., Bailly, J., Baltassat, R., Berthelot, J.-F., Caizergues, F., Dalmaso, C., Kochko, P. de,

- Gascuel, J.-S., Hyacinthe, A., Lacanette, J., Mercier, F., Montaz, H., ... Rivière, P. (2019). Agronomic Evaluation of Bread Wheat Varieties from Participatory Breeding : A Combination of Performance and Robustness. *Sustainability*, 12(1), 128. <https://doi.org/10.3390/su12010128>
- Goriewa-Duba, K., Duba, A., Wachowska, U., & Wiwart, M. (2018). An Evaluation of the Variation in the Morphometric Parameters of Grain of Six Triticum Species with the Use of Digital Image Analysis. *Agronomy*, 8(12), Art. 12. <https://doi.org/10.3390/agronomy8120296>
- Gupta, N. K., Gupta, S., & Kumar, A. (2001). Effect of Water Stress on Physiological Attributes and their Relationship with Growth and Yield of Wheat Cultivars at Different Stages. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 186(1), 55-62. <https://doi.org/10.1007/BF03543302>
- Hailu, F., & Merker, A. (2008). Variation in gluten strength and yellow pigment in Ethiopian tetraploid wheat germplasm. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 55(2), 277-285. <https://doi.org/10.1007/s10722-007-9233-6>
- Horrihan, L., Lawrence, R. S., & Walker, P. (2002). How sustainable agriculture can address the environmental and human health harms of industrial agriculture. *Environmental Health Perspectives*, 110(5), 445-456. <https://doi.org/10.1289/ehp.02110445>
- 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), Art. 11. <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., Nabhan, G. P., Perales, H. R., Richards, C., Riggins, C., & Thormann, I. (2022). Crop genetic erosion : Understanding and responding to loss of crop diversity. *New Phytologist*, 233(1), 84-118. <https://doi.org/10.1111/nph.17733>
- Koenig, A., Konitzer, K., Wieser, H., & Koehler, P. (2015). Classification of spelt cultivars based on differences in storage protein compositions from wheat. *Food Chemistry*, 168, 176-182. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.07.040>
- Kohajdova, Z., & Karovicova, J. (2008). Nutritional value and baking applications of spelt wheat. *Acta Scientiarum Polonorum. Technologia Alimentaria*, 07(3), 5-14.
- Longin, C. F. H., Ziegler, J., Schweiggert, R., Koehler, P., Carle, R., & Würschum, T. (2016). Comparative Study of Hulled (Einkorn, Emmer, and Spelt) and Naked Wheats (Durum and Bread Wheat) : Agronomic Performance and Quality Traits. *Crop Science*, 56(1), Art. 1. <https://doi.org/10.2135/cropsci2015.04.0242>
- Martín-Gómez, Rewicz, Goriewa-Duba, Wiwart, Tocino, & Cervantes. (2019). Morphological Description and Classification of Wheat Kernels Based on Geometric Models. *Agronomy*, 9(7), 399. <https://doi.org/10.3390/agronomy9070399>

- Massawe, F., Mayes, S., & Cheng, A. (2016). Crop Diversity : An Unexploited Treasure Trove for Food Security. *Trends in Plant Science*, 21(5), 365-368.
<https://doi.org/10.1016/j.tplants.2016.02.006>
- Maury, O., Garcia de Cortazar Atauri, I., Bertuzzi, P., Persyn, B., & Lagier, M. (2023). *SICLIMA : Système d'information de données climatiques maillées* [Data set]. Recherche Data Gouv.
<https://doi.org/10.15454/HIPDPZ>
- Mijatović, D., Oudenhoven, F. V., Eyzaguirre, P., & Hodgkin, T. (2013). The role of agricultural biodiversity in strengthening resilience to climate change : Towards an analytical framework. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 11(2), Art. 2.
<https://doi.org/10.1080/14735903.2012.691221>
- Mirbahar, A. A., Markhand, G. S., Mahar, A. R., & Abro, S. A. (2009). *Effect of water stress on yield and yield components of wheat (Triticum aestivum L.) varieties*. 41(3), 1303-1310.
- Mondini, L., Grausgruber, H., & Pagnotta, M. A. (2014). Evaluation of European emmer wheat germplasm for agro-morphological, grain quality traits and molecular traits. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 61(1), 69-87. <https://doi.org/10.1007/s10722-013-0016-y>
- Nicholls, C. I., & Altieri, M. A. (2018). Pathways for the amplification of agroecology. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 42(10), 1170-1193.
<https://doi.org/10.1080/21683565.2018.1499578>
- Pronin, D., Geisslitz, S., Börner, A., & Scherf, K. A. (2020). Fingerprinting of wheat protein profiles for improved distinction between wheat cultivars and species. *Cereal Chemistry*, 97(5), 999-1009. <https://doi.org/10.1002/cche.10323>
- Rivière, P., Pin, S., Galic, N., De Oliveira, Y., David, O., Dawson, J., Wanner, A., Heckmann, R., Obbellianne, S., & Ronot, B. (2013). Mise en place d'une méthodologie de sélection participative sur le blé tendre en France. *Innovations agronomiques*, 32, 427-441.
- Rouse, M. N., & Jin, Y. (2011). Genetics of resistance to race TTKSK of Puccinia graminis f. Sp. Tritici in Triticum monococcum. *Phytopathology*, 101(12), 1418-1423.
<https://doi.org/10.1094/PHYTO-05-11-0133>
- Shah, L., Yahya, M., Shah, S. M. A., Nadeem, M., Ali, A., Ali, A., Wang, J., Riaz, M. W., Rehman, S., Wu, W., Khan, R. M., Abbas, A., Riaz, A., Anis, G. B., Si, H., Jiang, H., & Ma, C. (2019). Improving Lodging Resistance : Using Wheat and Rice as Classical Examples. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(17), Art. 17. <https://doi.org/10.3390/ijms20174211>
- Shewry, P. R. (2018). Do ancient types of wheat have health benefits compared with modern bread wheat? *Journal of Cereal Science*, 79, 469-476. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2017.11.010>
- Siedler, H., Messmer, M. M., Schachermayr, G. M., Winzeler, H., Winzeler, M., & Keller, B. (1994). Genetic diversity in European wheat and spelt breeding material based on RFLP data. *Theoretical and Applied Genetics*, 88(8), 994-1003. <https://doi.org/10.1007/BF00220807>

- Singh, K., Chhuneja, P., Kaur, S., Garg, T., Tiwari, V. K., Rawat, N., Bains, N. S., Dhaliwal, H. S., & Keller, B. (2008). *Triticum monococcum* : A source of novel genes for improving several traits in hexaploid wheat. *Proceedings of 11th International Wheat Genetics Symposium*.
- van Frank, G., Rivière, P., Pin, S., Baltassat, R., Berthelot, J.-F., Caizergues, F., Dalmaso, C., Gascuel, J.-S., Hyacinthe, A., Mercier, F., Montaz, H., Ronot, B., & Goldringer, I. (2020). Genetic Diversity and Stability of Performance of Wheat Population Varieties Developed by Participatory Breeding. *Sustainability*, *12*(1), Art. 1. <https://doi.org/10.3390/su12010384>
- Zaharieva, M., Ayana, N. G., Hakimi, A. A., Misra, S. C., & Monneveux, P. (2010). Cultivated emmer wheat (*Triticum dicoccon* Schrank), an old crop with promising future : A review. *Genetic Resources and Crop Evolution*, *57*(6), 937-962. <https://doi.org/10.1007/s10722-010-9572-6>
- Zaharieva, M., & Monneveux, P. (2014). Cultivated einkorn wheat (*Triticum monococcum* L. subsp. *monococcum*) : The long life of a founder crop of agriculture. *Genetic Resources and Crop Evolution*, *61*(3), Art. 3. <https://doi.org/10.1007/s10722-014-0084-7>

Appendix 1: CRBA localization and experimental design



a



b

FIGURE 1 Localization of the experimental design. (a) Map of the region of Lyon. The CRBA is represented by a fuchsia marker. (b) Satellite view of the experimental field. The red rectangles indicate the positions of blocks 1 and 2.

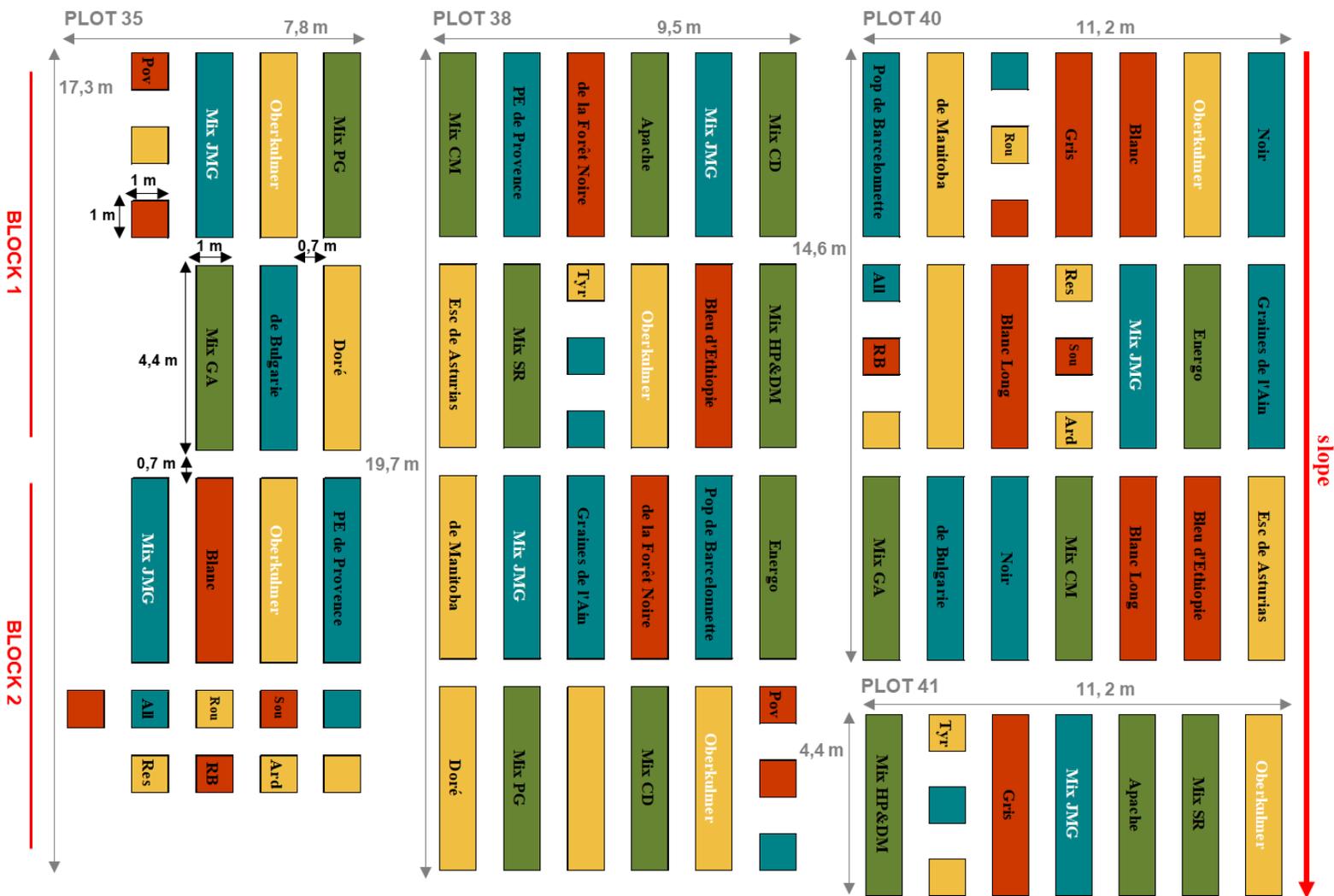


FIGURE 2 Experimental design. Blue: einkorn; red: emmer; yellow: spelt; green: common wheat. Each variety is repeated twice (one repetition per block). Blocks were defined according to the slope. All: einkorn *Allemand*; RB: emmer *Roux Blanc*; Pov: emmer *de Poveda*; Sou: emmer *de Souabe*; Ard: spelt *Arduinii*; Res: spelt *Ressac*; Rou: spelt *Rouquin*; Tyr: spelt *Tyrolien Rouge*. The experimental design was set on 4 different plots according to the CRBA cultivation plan: plots 35, 38, 40 and 41. Each of them was separated by a hedgerow. Varieties einkorn *Mix JMG* and spelt *Oberkulmer* (names in white) were repeated in each of these plots, within each of the two blocks. Only the plots in block 1 and plot 40 and in block 2 and plot 35 for einkorn *Mix JMG*, and in block 1 and plot 35 and block 2 and plot 38 for spelt *Oberkulmer* were retained in the analysis. Experimental plots without names were occupied by varieties that were removed from the analyses.

Appendix 2: Correction of protein contents

Protein contents were measured by the DUMAS method as % wet matter (% wm). Here, we explain how we corrected the results, to express them as % dry matter (% dm). Since moisture contents were measured on a single sample of each variety (pool of the ground kernels of the two plots), we could not use directly the moisture contents to correct the DUMAS protein contents.

First, we measured moisture contents on a single sample per variety (pool of the ground kernels from the two plots). Approximately 4 g of ground grains were dried in an oven at 130°C for 2 hours, and cooled down in a desiccator for 30 min. Moisture content was determined as follows:

$$\text{Moisture (\%)} = \frac{(\text{Mass before drying} - \text{Mass after drying}) \times 100}{\text{Mass after drying}} \quad (1)$$

Moisture contents of each variety are shown in figure 1.

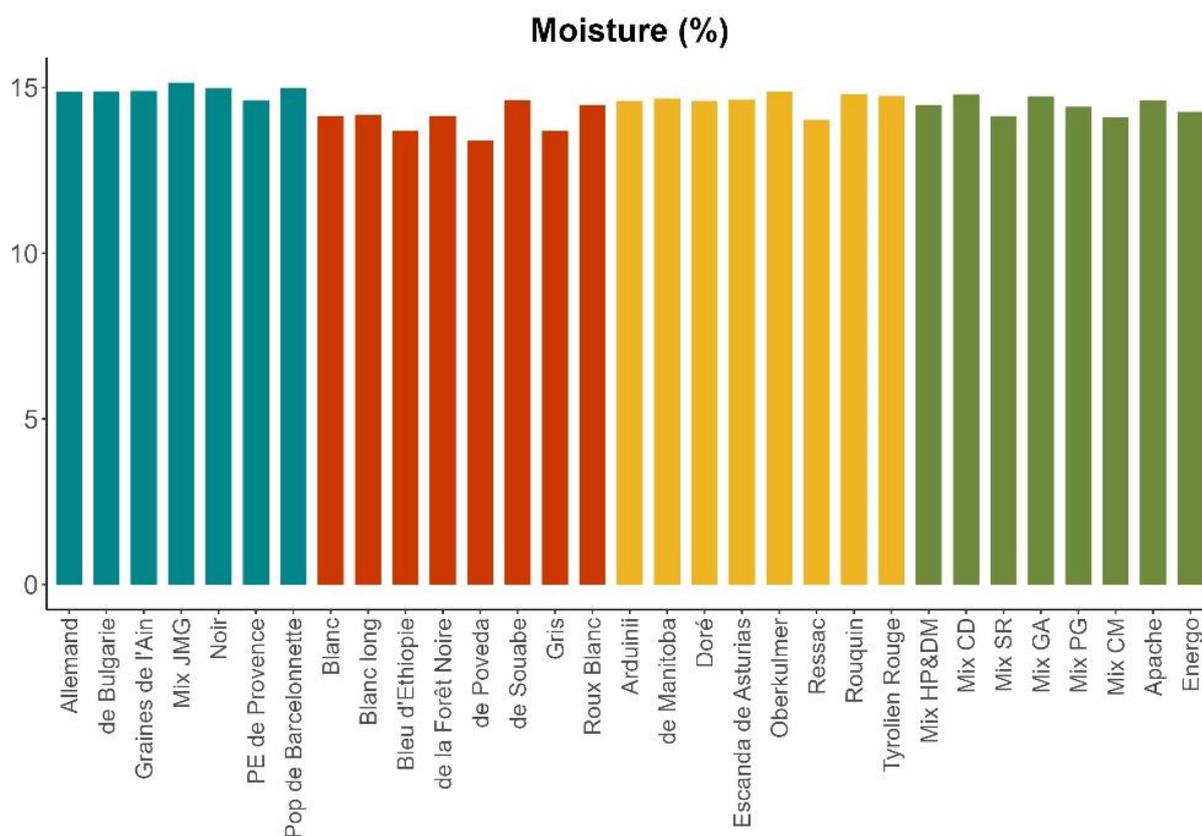


FIGURE 1 Moisture contents. Each species is represented by a color: blue for einkorn, red for emmer, yellow for spelt and green for common wheat.

Protein contents were also measured by Size Exclusion Chromatography (SE-HPLC) on the pooled samples (three technical replicates). Results were expressed as %dm using the following calculation:

$$Protein\ content(\%dm) = \frac{Protein\ content(\%wm) \times 100}{100 - Moisture\ (\%)} \quad (2)$$

Since SE-HPLC protein contents expressed as %dm and as %wm were highly correlated for each of the four species, we calculated the parameters (a=slope and b=intercept) of the linear regression for each species (figure 2). For each species, we then used these parameters to express the DUMAS protein contents as %dm as follows:

$$Protein\ content(\%dm) = a \times Protein\ content(\%wm) + b \quad (3)$$

All correlations presented here were done on a dataset with one value per variety (mean of two agronomic replicates for the DUMAS method and mean of three technical replicates for the SE-HPLC).

Also, this method relies on the hypothesis that protein contents measured through DUMAS and SE-HPLC are highly correlated, which is corroborated by the correlations between values obtained by the two methods shown in figure 3.

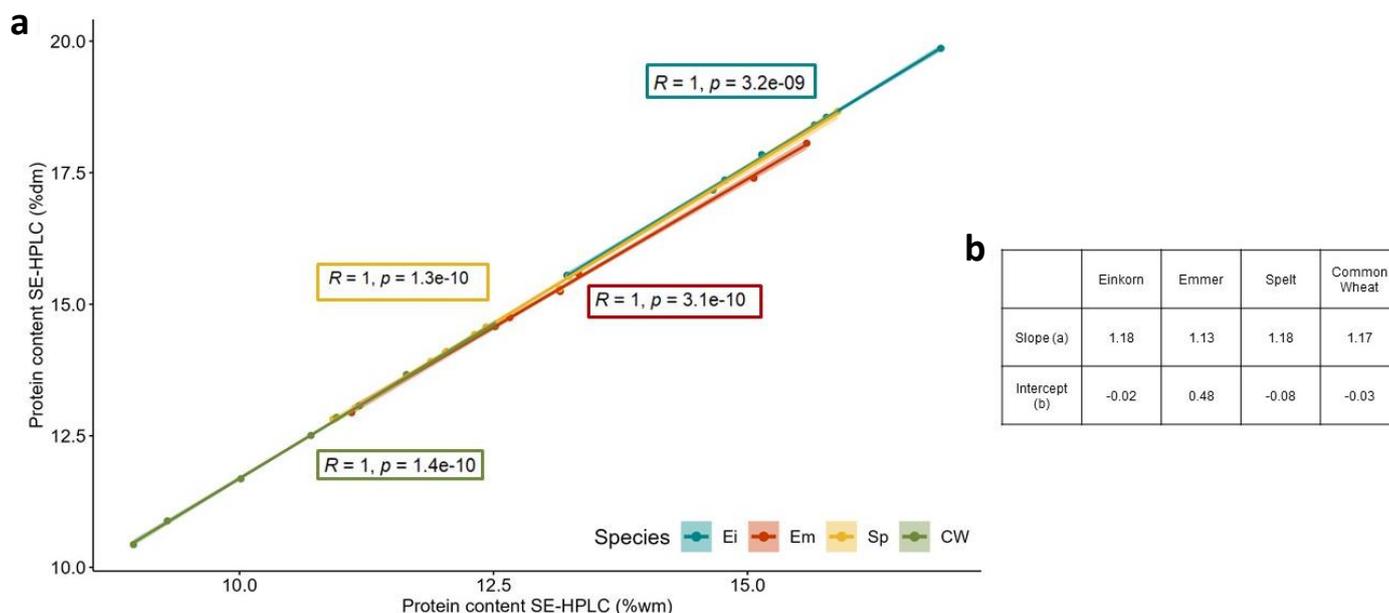


FIGURE 2 (a) Correlations between protein contents measured by SE-HPLC and expressed as %dm and as %wm. For each species, the linear regression coefficient (R) and the associated p -value are indicated. (b) Parameters (slope and intercept) of the linear models. Ei: einkorn; Em: emmer; Sp: spelt; CW: common wheat.

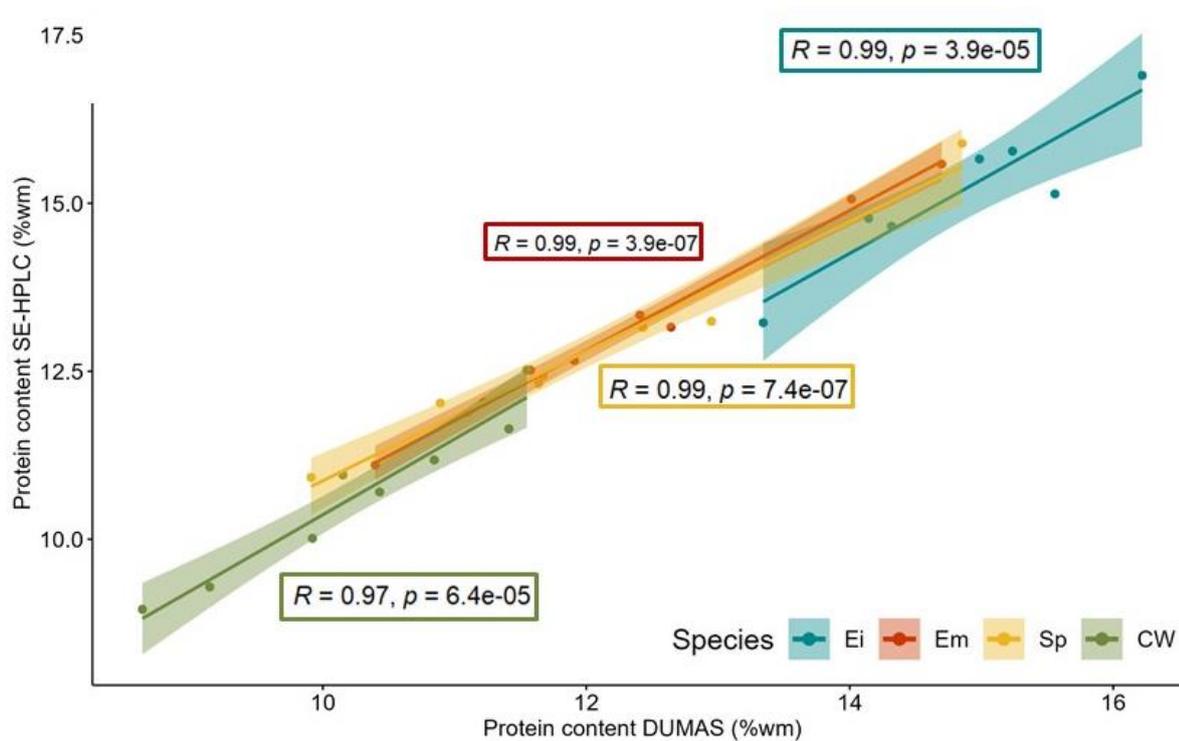


FIGURE 3 Correlations between protein contents measured by SE-HPLC and by DUMAS, both expressed %wm. For each species, the linear regression coefficient (R) and the associated p -value are indicated. Ei: einkorn; Em: emmer; Sp: spelt; CW: common wheat.

Appendix 3: ANOVA and emmean pairwise-comparisons

The results for all the variables for which the model was validated by the Q-Q and residuals versus fitted plots are shown.

TABLE 1 Results of the ANOVA. F-values and corresponding *p*-values for the effects of species, variety nested in species and block are displayed. Significance codes : 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 '' 1.

	Species		Variety nested in species		Block	
	F-value	<i>p</i> -value	F-value	<i>p</i> -value	F-value	<i>p</i> -value
<i>Agronomic parameters</i>						
Emergence rate (%)	2.2	0.109	4.05	0.000 ***	2.28	0.142
Height beg. March (cm)	114.72	< 2e-16 ***	35.01	< 2e-16 ***	3.27	0.071 .
Ground cover beg. March (%)	4.40	0.011 *	1.16	0.342	2.89	0.100 .
Height end April (cm)	269.04	< 2.2e-16 ***	41.36	< 2.2e-16 ***	8.61	0.003 ***
Ground cover end April (%)	2.48	0.081 .	1.10	0.400	1.289	0.265
Nb ears per plant	41.41	8.755e-11 ***	0.91	0.599	0.01	0.931
Nb tillers per plant	44.41	3.756e-11 ***	1.33	0.222	0.00	0.969
Final height (cm)	53.760	< 2.2e-16 ***	35.96	< 2.2e-16 ***	26.52	3.061e-07 ***
LLSD (cm)	62.70	< 2.2e-16 ***	18.07	< 2.2e-16 ***	35.01	4.319e-09 ***
Relative yield (%)	56.81	1.762e-12 ***	6.96	5.587e-07 ***	0.41	0.526
TKM (g)	214.72	< 2.2e-16 ***	17.19	6.912e-12 ***	1.05	0.313
Protein content (% dm)	68.24	1.668e-13 ***	4.51	5.580e-05 ***	24.06	3.049e-05 ***
<i>Kernel morphometric parameters</i>						
Length (mm)	3226.62	< 2e-16 ***	173.53	< 2e-16 ***	6.59	0.010 *
Width (mm)	877.82	< 2e-16 ***	159.34	< 2e-16 ***	33.01	9.297e-09 ***
Perimeter (mm)	1940.67	< 2e-16 ***	199.70	< 2e-16 ***	0.01	0.920
Surface (mm ²)	1844.66	< 2e-16 ***	211.46	< 2e-16 ***	1.51	0.219
Ratio_LW	3740.89	< 2e-16 ***	53.95	< 2e-16 ***	58.64	1.981e-14 ***
Circularity	3240.22	< 2e-16 ***	43.54	< 2e-16 ***	50.92	9.94e-13 ***

TABLE 2 Pairwise-comparison results. Emmeans, standard errors (SE) and 0.95 confidence intervals (Lower and Upper Confidence Levels; CL) are shown for each species. For each parameter, emmeans with the same letter are not significantly different (p -value < 0.05, Tukey test).

	Einkorn			Emmer			Spelt			Common wheat		
	Emmean ± SE	Lower CL	Upper CL	Emmean ± SE	Lower CL	Upper CL	Emmean ± SE	Lower CL	Upper CL	Emmean ± SE	Lower CL	Upper CL
<i>Agronomic parameters</i>												
Emergence rate (%)	82.8 ^a ± 2.0	77.6	87.9	83.1 ^a ± 1.8	78.3	88.0	79.6 ^a ± 1.8	74.7	84.4	77.4 ^a ± 1.8	72.5	82.2
Height beg. March (cm)	5.0 ^a ± 0.1	4.7	5.4	8.3 ^c ± 0.1	8.0	8.7	7.8 ^c ± 0.1	7.5	8.2	6.7 ^b ± 0.1	6.4	7.0
Ground cover beg. March (%)	16.8 ^a ± 1.6	12.5	21.0	24.4 ^b ± 1.5	20.4	28.3	22.8 ^{ab} ± 1.5	18.8	26.8	21.2 ^{ab} ± 1.5	17.3	25.2
Height end April (cm)	16.0 ^a ± 0.4	15.0	16.8	28.9 ^b ± 0.4	28.0	29.8	27.7 ^b ± 0.4	26.8	28.6	27.9 ^b ± 0.4	27.0	28.8
Ground cover end April (%)	34.6 ^a ± 2.0	29.3	39.8	29.8 ^a ± 1.9	24.8	34.7	29.9 ^a ± 1.9	25.0	34.8	27.3 ^a ± 1.9	22.4	32.2
Nb ears per plant	2.2 ^b ± 0.1	2.0	2.4	1.1 ^a ± 0.1	0.9	1.3	1.1 ^a ± 0.1	0.9	1.4	1.1 ^a ± 0.1	0.9	1.3
Nb tillers per plant	2.5 ^b ± 0.1	2.2	2.7	1.2 ^a ± 0.1	1.0	1.4	1.3 ^a ± 0.1	1.0	1.5	1.2 ^a ± 0.1	0.9	1.4
Final height (cm)	71.5 ^b ± 0.7	69.7	73.3	78.7 ^c ± 0.7	76.9	80.5	77.9 ^c ± 0.7	76.2	79.7	67.9 ^a ± 0.7	66.2	69.7
LLSD (cm)	14.0 ^d ± 0.3	13.3	14.8	12.8 ^c ± 0.3	12.1	13.6	10.3 ^b ± 0.3	9.6	11.0	8.9 ^a ± 0.3	8.2	9.6
Relative yield (%)	59.7 ^a ± 0.8	57.6	61.9	64.2 ^b ± 0.8	62.2	66.2	64.8 ^b ± 0.8	62.8	66.8	73.7 ^c ± 0.8	71.7	75.7
TKM (g)	23.6 ^a ± 0.5	22.2	24.9	36.5 ^b ± 0.5	35.2	37.7	39.4 ^c ± 0.5	38.1	40.6	38.3 ^{bc} ± 0.5	37.0	39.5
Protein content (%dm)	17.3 ^c ± 0.3	16.6	18.0	14.4 ^b ± 0.3	13.7	15.1	14.1 ^b ± 0.3	13.4	14.7	12.0 ^a ± 0.3	11.3	12.7
<i>Kernel morphometric parameters</i>												
Length (mm)	6.4 ^a ± 0.0	6.4	6.5	7.3 ^c ± 0.0	7.3	7.3	7.3 ^b ± 0.0	7.3	7.3	6.4 ^a ± 0.0	6.4	6.4
Width (mm)	2.8 ^a ± 0.0	2.8	2.8	2.9 ^b ± 0.0	2.9	2.9	3.0 ^c ± 0.0	3.0	3.0	3.1 ^d ± 0.0	3.1	3.1
Perimeter (mm)	17.9 ^a ± 0.0	17.8	17.9	19.9 ^c ± 0.0	19.8	19.9	20.0 ^d ± 0.0	19.9	20.0	18.5 ^b ± 0.0	18.4	18.5
Surface (mm ²)	13.2 ^a ± 0.0	13.1	13.3	16.1 ^c ± 0.0	16.0	16.2	16.9 ^d ± 0.0	16.8	17.0	15.1 ^b ± 0.0	15.0	15.2
Ratio_LW	2.28 ^b ± 0.00	2.27	2.29	2.51 ^d ± 0.00	2.50	2.51	2.41 ^c ± 0.00	2.41	2.42	2.05 ^a ± 0.00	2.04	2.06
Circularity	1.32 ^b ± 0.00	1.32	1.33	1.39 ^d ± 0.00	1.38	1.39	1.33 ^c ± 0.00	1.33	1.34	1.23 ^a ± 0.00	1.23	1.23

TABLE 3 *p-values* of the pairwise-comparisons. Significance codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 '.' 1.

		Ei	Em	Sp
Emergence rate (%)	Em	0.9991	-	-
	Sp	0.6372	0.5252	-
	CW	0.2039	0.1382	0.8270
Height beg. March (cm)	Em	<.0001 ***	-	-
	Sp	<.0001 ***	0.0606	-
	CW	<.0001 ***	<.0001 ***	<.0001 ***
Ground cover beg. March (%)	Em	0.0082 **	-	-
	Sp	0.0461 *	0.8804	-
	CW	0.1960	0.4624	0.8804
Height end April (cm)	Em	<.0001 ***	-	-
	Sp	<.0001 ***	0.1131	-
	CW	<.0001 ***	0.2452	0.9815
Ground cover end April (%)	Em	0.3005	-	-
	Sp	0.3340	0.9999	-
	CW	0.0538 .	0.7871	0.7474
Nb ears per plant	Em	<.0001 ***	-	-
	Sp	<.0001 ***	0.9842	-
	CW	<.0001 ***	0.9987	0.9969
Nb tillers per plant	Em	<.0001 ***	-	-
	Sp	<.0001 ***	0.9799	-
	CW	<.0001 ***	0.9997	0.9635
Final height (cm)	Em	<.0001 ***	-	-
	Sp	<.0001 ***	0.8549	-
	CW	0.0024 **	<.0001	<.0001
LLSD (cm)	Em	0.0157 *	-	-
	Sp	<.0001 ***	<.0001 ***	-
	CW	<.0001 ***	<.0001 ***	0.0042 *
Relative yield (%)	Em	0.0018 **	-	-
	Sp	0.0004 ***	0.9503	-
	CW	<.0001 ***	<.0001 ***	<.0001 ***
TKM (g)	Em	<.0001 ***	-	-
	Sp	<.0001 ***	0.0009 ***	-
	CW	<.0001 ***	0.0554 .	0.3693
Protein content (% dm)	Em	<.0001 ***	-	-
	Sp	<.0001 ***	0.7788	-
	CW	<.0001 ***	<.0001 ***	<.0001 ***
Length (mm)	Em	<.0001 ***	-	-
	Sp	<.0001 ***	0.0089 **	-
	CW	0.1539	<.0001 ***	<.0001 ***
Width (mm)	Em	<.0001 ***	-	-
	Sp	<.0001 ***	<.0001 ***	-
	CW	<.0001 ***	<.0001 ***	<.0001 ***
Perimeter (mm)	Em	<.0001 ***	-	-
	Sp	<.0001 ***	0.0192 *	-
	CW	<.0001 ***	<.0001 ***	<.0001 ***
Surface (mm ²)	Em	<.0001 ***	-	-
	Sp	<.0001 ***	<.0001 ***	-
	CW	<.0001 ***	<.0001 ***	<.0001 ***
Ratio_LW	Em	<.0001 ***	-	-
	Sp	<.0001 ***	<.0001 ***	-
	CW	<.0001 ***	<.0001 ***	<.0001 ***
Circularity	Em	<.0001 ***	-	-
	Sp	<.0001 ***	<.0001 ***	-
	CW	<.0001 ***	<.0001 ***	<.0001 ***

Appendix 5: Graphic representation of all studied variables

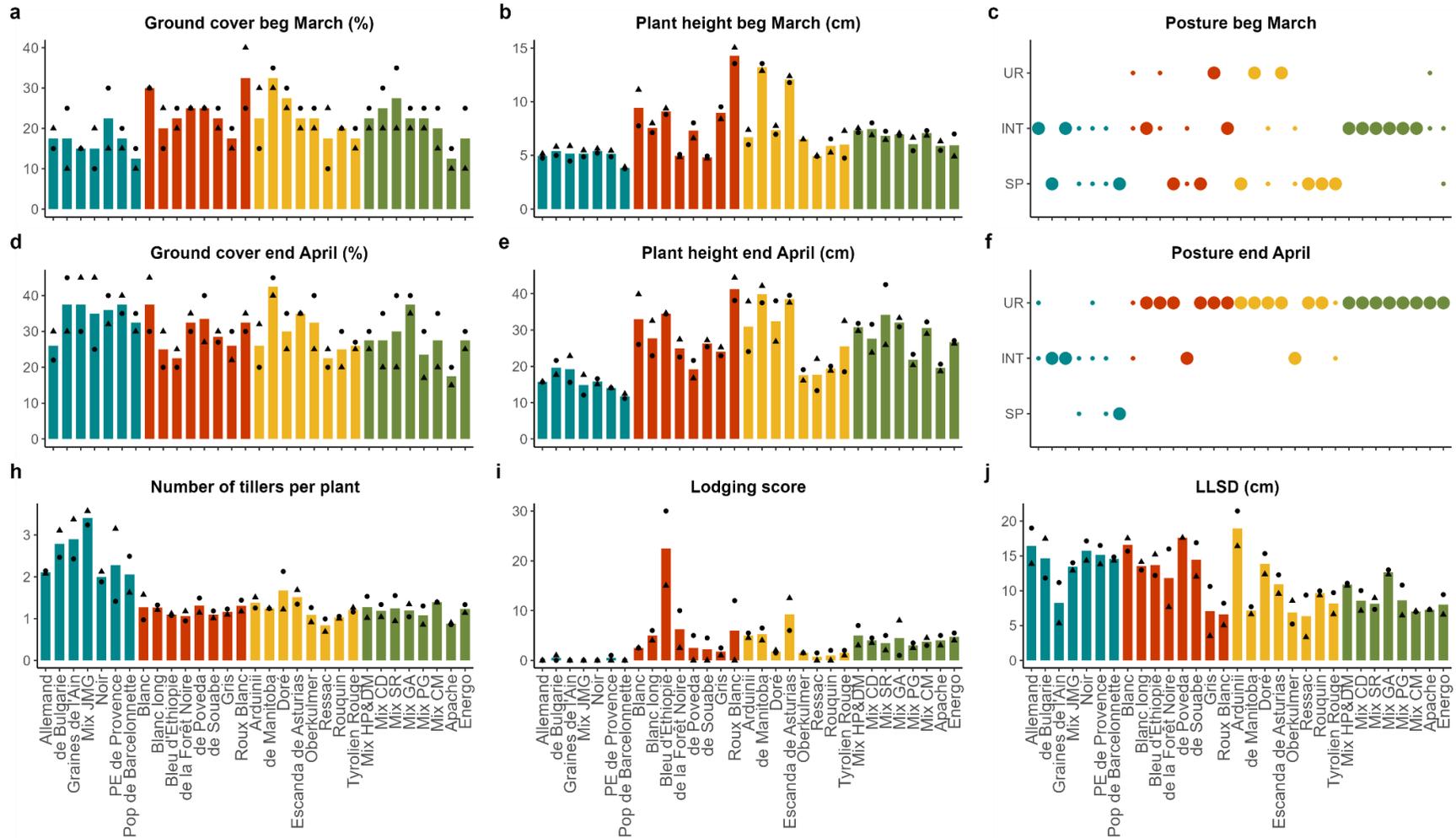


FIGURE 1 Mean values per variety for all the agronomic parameters not shown in figure 4. Each species is represented by a color: blue for einkorn, red for emmer, yellow for spelt and green for common wheat. In panels a, b, d, e, h, i, j, black dots and triangles indicate the values for each of the two blocks (dots = values for block 1 and triangles = values for block 2). For plant postures (panels c and f), big dots represent two plots, while small dots represent single plots. UR: upright, INT: intermediate, SP: spreading.

Appendix 6: Correlations between agronomic and kernel morphometric variables

TABLE 1 Pearson correlation coefficient for einkorn. Significance codes: 0 '****' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 " 1.

Parameter	Emergence rate	Ground cover beg March	Height plant beg March	Ground cover end April	Height plant end April	Height plant final	LLSD	Nb ears plant	Nb tillers plant	Relative yield	TKM	Protein content	Lenght	Width	Perimeter	Surface	Ratio LW
Einkorn																	
Ground cover beg March	0.47																
Height plant beg March	0.06	0.15															
Ground cover end April	0.29	0.56 *	0.36														
Height plant end April	0.25	0.38	0.64 *	0.59 *													
Height plant final	-0.14	0.39	0.38	0.04	0.39												
LLSD	-0.12	0.05	-0.21	-0.54 *	-0.53	0.37											
Nb ears plant	-0.48	-0.06	0.48	0.47	0.4	0.17	-0.4										
Nb tillers plant	-0.54 *	-0.28	0.48	0.32	0.34	0.08	-0.45	0.93 ****									
Relative yield	-0.08	-0.57 *	-0.08	-0.26	0.09	0.02	-0.22	0.06	0.23								
TKM	-0.32	-0.47	-0.32	-0.09	-0.47	-0.22	0.15	-0.13	0	0.34							
Protein content	-0.24	-0.64 *	0	0	0.27	-0.34	-0.59 *	0.19	0.39	0.65 *	0.38						
Lenght	-0.18	-0.57 *	-0.24	-0.06	-0.1	-0.16	-0.17	-0.06	0.13	0.75 **	0.81 ***	0.71 **					
Width	-0.3	-0.38	-0.27	-0.15	-0.45	-0.19	0.32	-0.23	-0.12	0.15	0.92 ****	0.29	0.64 *				
Perimeter	-0.21	-0.57 *	-0.26	-0.08	-0.19	-0.18	-0.07	-0.1	0.09	0.66 **	0.89 ****	0.66 *	0.99 ****	0.76 **			
Surface	-0.27	-0.57 *	-0.26	-0.1	-0.24	-0.16	-0.01	-0.1	0.08	0.6 *	0.93 ****	0.62 *	0.96 ****	0.83 ***	0.99 ****		
Ratio LW	0.01	-0.45	-0.1	0.06	0.21	-0.05	-0.46	0.09	0.26	0.85 ***	0.38	0.7 **	0.82 ***	0.1	0.72 **	0.63 *	
Circularity	0.11	-0.44	-0.16	0.08	0.13	-0.15	-0.41	-0.02	0.14	0.79 ***	0.44	0.66 *	0.85 ***	0.17	0.76 **	0.67 **	0.98 ****

TABLE 2 Pearson correlation coefficient for emmer. Significance codes: 0 '****' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 " 1.

Parameter	Emergence rate	Ground cover beg March	Height plant beg March	Ground cover end April	Height plant end April	Height plant final	LLSD	Nb ears plant	Nb tillers plant	Relative yield	TKM	Protein content	Lenght	Width	Perimeter	Surface	Ratio LW
Emmer																	
Ground cover beg March	0.01																
Height plant beg March	-0.5	0.48															
Ground cover end April	0.1	0.58 *	0.24														
Height plant end April	-0.22	0.55 *	0.75 ***	0.28													
Height plant final	-0.09	0.46	0.13	0.69 **	0.29												
LLSD	0.18	0.03	-0.4	0.1	-0.29	0.21											
Nb ears plant	-0.2	0.27	0.4	0.67 **	0.31	0.55 *	0.3										
Nb tillers plant	-0.44	0.08	0.45	0.53 *	0.26	0.46	0	0.88 ****									
Relative yield	-0.41	0.33	0.25	0.16	0.49	0.3	0.48	0.46	0.32								
TKM	-0.62 **	0.23	0.33	-0.04	0.44	0.49	-0.23	-0.03	0.13	0.41							
Protein content	0.32	-0.08	0.18	-0.02	-0.12	-0.37	-0.34	-0.09	-0.06	-0.56 *	-0.43						
Lenght	-0.7 **	0.08	0.22	-0.11	0.31	0.36	-0.28	-0.04	0.14	0.4	0.94 ****	-0.42					
Width	-0.58 *	0.21	0.33	-0.08	0.47	0.5	-0.19	-0.04	0.11	0.43	0.99 ****	-0.47	0.9 ****				
Perimeter	-0.67 **	0.13	0.27	-0.11	0.38	0.41	-0.26	-0.05	0.13	0.41	0.98 ****	-0.45	0.99 ****	0.96 ****			
Surface	-0.65 **	0.16	0.29	-0.08	0.4	0.44	-0.25	-0.04	0.13	0.41	0.99 ****	-0.43	0.97 ****	0.97 ****	1 ****		
Ratio LW	0.09	-0.31	-0.3	-0.02	-0.5 *	-0.52 *	-0.14	0.03	0.04	-0.33	-0.57 *	0.37	-0.27	-0.66 **	-0.42	-0.48	
Circularity	0.06	-0.26	-0.22	-0.06	-0.4	-0.55 *	-0.11	0.03	0.03	-0.26	-0.6 *	0.3	-0.3	-0.68 **	-0.44	-0.51 *	0.97 ****

TABLE 3 Pearson correlation coefficient for spelt. Significance codes: 0 '****' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 " 1.

Parameter	Emergence rate	Ground cover beg March	Height plant beg March	Ground cover end April	Height plant end April	Height plant final	LLSD	Nb ears plant	Nb tillers plant	Relative yield	TKM	Protein content	Lenght	Width	Perimeter	Surface	Ratio LW
Spelt																	
Ground cover beg March	0.31																
Height plant beg March	0.14	0.56 *															
Ground cover end April	0.18	0.78 ***	0.85 ****														
Height plant end April	-0.04	0.63 **	0.8 ***	0.65 **													
Height plant final	0.03	0.62 *	0.84 ***	0.72 **	0.94 ****												
LLSD	-0.45	-0.07	-0.13	-0.23	0.19	0.26											
Nb ears plant	-0.31	0.4	0.38	0.45	0.68 **	0.74 **	0.55 *										
Nb tillers plant	-0.33	0.35	0.36	0.45	0.66 **	0.71 **	0.48	0.98 ****									
Relative yield	0.32	-0.01	0.06	-0.25	0.35	0.28	0.31	0.14	0.1								
TKM	-0.23	-0.06	0.42	0.35	0.25	0.3	-0.22	0.14	0.24	-0.23							
Protein content	-0.34	-0.15	-0.01	0.1	-0.17	-0.26	-0.52 *	-0.25	-0.18	-0.72 **	0.22						
Lenght	-0.31	-0.12	0.29	0.23	0.2	0.24	-0.12	0.34	0.42	-0.27	0.88 ****	0.22					
Width	-0.06	-0.25	0.12	0.14	-0.09	-0.07	-0.5 *	-0.22	-0.08	-0.26	0.87 ****	0.35	0.71 **				
Perimeter	-0.26	-0.17	0.25	0.21	0.12	0.16	-0.24	0.19	0.29	-0.28	0.94 ****	0.28	0.98 ****	0.84 ****			
Surface	-0.32	-0.2	0.23	0.21	0.09	0.11	-0.27	0.11	0.23	-0.33	0.95 ****	0.36	0.93 ****	0.9 ****	0.98 ****		
Ratio LW	-0.36	0.14	0.21	0.11	0.37	0.4	0.48	0.74 ***	0.68 **	-0.02	0.06	-0.15	0.44	-0.33	0.23	0.11	
Circularity	-0.31	0.14	0.18	0.11	0.3	0.34	0.38	0.71 **	0.66 **	-0.11	0.11	-0.09	0.5 *	-0.24	0.31	0.18	0.98 ****

TABLE 4 Pearson correlation coefficient for CW. Significance codes: 0 '****' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 " 1.

Parameter	Emergence rate	Ground cover beg March	Height plant beg March	Ground cover end April	Height plant end April	Height plant final	LLSD	Nb ears plant	Nb tillers plant	Relative yield	TKM	Protein content	Lenght	Width	Perimeter	Surface	Ratio LW
Common wheat																	
Ground cover beg March	-0.2																
Height plant beg March	-0.05	0.6 *															
Ground cover end April	-0.27	0.76 ***	0.41														
Height plant end April	0.11	0.7 **	0.57 *	0.82 ***													
Height plant final	0.03	0.74 **	0.51 *	0.76 ***	0.71 **												
LLSD	-0.15	0.36	0.29	0.56 *	0.31	0.77 ***											
Nb ears plant	-0.16	0.6 *	0.37	0.7 **	0.75 ***	0.43	0.18										
Nb tillers plant	-0.03	0.6 *	0.39	0.68 **	0.77 ***	0.46	0.22	0.98 ****									
Relative yield	0.01	-0.32	-0.4	-0.15	-0.12	-0.6 *	-0.49	-0.06	-0.05								
TKM	-0.25	0.46	0.4	0.66 **	0.58 *	0.42	0.28	0.75 ***	0.7 **	-0.25							
Protein content	0.26	0.18	0.27	-0.07	0.15	0.35	-0.07	-0.19	-0.2	-0.59 *	-0.14						
Lenght	0.03	0.47	0.56 *	0.54 *	0.66 **	0.59 *	0.32	0.6 *	0.6 *	-0.53 *	0.61 *	0.19					
Width	-0.45	0.24	0.4	0.43	0.33	0.05	0.11	0.63 **	0.57 *	0.01	0.85 ****	-0.44	0.4				
Perimeter	-0.15	0.46	0.6 *	0.58 *	0.64 **	0.49	0.3	0.7 **	0.68 **	-0.42	0.78 ***	-0.02	0.94 ****	0.69 **			
Surface	-0.2	0.44	0.63 **	0.55 *	0.61 *	0.34	0.19	0.72 **	0.7 **	-0.24	0.8 ***	-0.15	0.83 ****	0.8 ***	0.96 ****		
Ratio LW	0.47	0.18	0.1	0.04	0.26	0.44	0.16	-0.07	-0.02	-0.45	-0.29	0.55 *	0.49	-0.6 *	0.17	-0.04	
Circularity	0.41	0.21	0.15	0.01	0.22	0.46	0.22	-0.09	-0.04	-0.57 *	-0.27	0.54 *	0.48	-0.56 *	0.17	-0.04	0.96 ****

4.3 Effet de l'environnement

Dans la section précédente, j'ai identifié des caractéristiques agronomiques et morphométriques des grains propres à chaque espèce, à chaque variété et exploré la diversité intra-spécifique de nos échantillons. Pour ceci, j'ai travaillé uniquement sur le dispositif expérimental du CRBA (JD-CRBA), qui comprenait les 31 variétés répétées au sein de deux blocs.

Dans cette section, j'analyse l'effet de l'environnement sur les caractéristiques agronomiques et morphométriques des grains. Pour ceci, je prends en compte les parcelles mises en place dans les fermes en plus de celles du CRBA. Seules les variétés répétées dans au moins deux sites (CRBA et au moins une ferme) sont considérées dans l'analyse (JD-MS). Ces variétés ainsi que leur distribution au sein des sept sites sont présentées dans le tableau 3.8 du chapitre 3.

Pour des raisons de clarté, j'ai conservé les figures de résultats, y compris leurs titres, ainsi que les équations en anglais. Ce choix facilite les liens entre la section 4.2, qui est rédigée sous forme d'article, et la présente section. De plus, les variables en français dans le texte sont systématiquement traduites, entre parenthèses, en anglais.

4.3.1 Matériel et méthodes

4.3.1.1 Paramètres évalués

Les variables prises en compte et les méthodes de mesure sont les mêmes que celles de l'analyse du JD-CRBA (section 4.2). Seules celles mesurées fin avril (couverture du sol (ground cover end April), hauteur des pieds (plant height end April) et posture (posture end April), qui n'ont pas été mesurés dans les fermes, ne sont pas considérés. Quatre variables supplémentaires, la densité de pieds (plant density), le nombre de grains par épi (nb of kernels per ear), le rendement estimé (estimated yield) (t/ha) et le rendement estimé par pied (estimated yield per plant) (g) (non considérés dans l'analyse du JD-CRBA) complètent cette analyse.

Pour estimer la densité de pieds (plant density), des comptages de pieds ont été faits sur un quadrat de 100 x 60 cm par parcelle (CRBA, JPC) ou sur deux à trois quadrats de 50 x 50 cm par parcelle (CD, CM, HP&DM, PG, SR). Le nombre de pieds a été rapporté à la surface pour obtenir une densité en pieds par m². Pour les parcelles avec deux ou trois quadrats, la densité moyenne est prise en compte.

Le nombre de grains par épi (nb of kernels per ear) a été estimé par le calcul suivant ² :

$$Nb\ kernels\ ear = \frac{Ear\ mass \times Rel\ yield \times 1000}{TKM}$$

Le rendement estimé (estimated yield) a été calculé en multipliant les composantes du rendement ³ :

$$Est\ yield\ (t/ha) = Plant\ density \times Nb\ ears\ plant \times Nb\ kernels\ ear \times 0.001 \times TKM \times 0.01$$

Le rendement estimé (estimated yield) en t/ha est fortement dépendant des densités de pieds. Il est donc affecté par des accidents de culture et par la variabilité des densités de semis d'un site à l'autre. Pour s'affranchir de ces biais, j'ai aussi estimé un rendement par pied (estimated yield per plant) (g) ⁴ :

$$Est\ yield\ plant(g) = \frac{100 \times Est\ yield}{Plant\ density}$$

La densité de pieds (plant density) n'avait pas été prise en compte dans l'analyse concernant uniquement le CRBA, car comme toutes les parcelles avaient été semées à la même densité (250 graines/m²), elle était équivalente au taux de germination (x 250). L'hétérogénéité des densités de semis entre les sites, et le fait que le rendement estimé dépende de la densité de pieds justifie son ajout dans l'analyse du JD-MS. Le nombre de grains par épi (nb of kernels per ear) n'avait quant-à-lui été calculé que pour sept variétés (dont une non comprise dans le JD-MS) au CRBA. Les épis de toutes les autres variétés ont été détruites par un épisode de grêle avant la récolte, ce qui a empêché l'estimation du nombre de grains par épi et donc des rendements en grains.

4.3.1.2 Analyse des données

Le JD-MS étant très déséquilibré (tableau 3.8, chapitre 3), je n'ai pas pu conduire d'analyse statistique. L'analyse présentée dans cette section n'est donc que descriptive. Plus précisément, deux analyses en composantes principales (ACP) (une avec les variables agronomiques et une avec les variables morphométriques des grains) ont été conduites sur un jeu de données avec une valeur

2. (Ear mass : masse des épis, Rel yield : rendement relatif, TKM : PMG)

3. (Plant density : densité de pieds, Nb of kernels per ear : nombre de grains par épi, TKM : PMG)

4. (Estimated yield : rendement estimé, Plant density : densité de pieds)

par combinaison variété x site (figure 4.1). Lorsqu'une variété était répétée au sein d'un même site, la valeur moyenne des deux répétitions a été prise en compte. Avant l'analyse, une imputation des données manquantes (fonction `imputePCA`, package `missMDA` 1.18) a été effectuée. Le nombre de composantes principales gardé dans l'ACP est tel que la variabilité représentée est égale à minimum 90% de la variabilité totale. Des histogrammes indiquant les valeurs de chaque variété dans chaque site pour les principales variables d'intérêt complètent l'analyse (figures 4.3 à 4.9).

4.3.2 Vision d'ensemble de l'effet de l'environnement

4.3.2.1 Sur les variables agronomiques

Concernant l'ACP sur les critères agronomiques, la composante principale (CP ou PC en anglais) 1 représente 34% de la variabilité et la CP2 en représente 17% (figure 4.1). La plupart des variables moins bien représentées (verse (lodging), posture (posture), LLSD (LLSD) et taux de levée (emergence rate)) l'étaient déjà dans l'analyse de l'essai du CRBA (figure 3a et b, section 4.2). Le taux de protéines (protein content) est quant-à-lui moins bien représenté que dans l'analyse portant uniquement sur le CRBA. Les variables qui contribuent le plus à la CP1 sont les rendements estimés (estimated yield), les hauteurs des pieds (plant height beg March), le nombre de grains par épi (nb of kernels per ear), le rendement relatif (relative yield) et la couverture du sol (ground cover beg March). Celles qui contribuent le plus à la CP2 sont les nombres de talles (nb of tillers per plant) et d'épis par pied (nb of ears per plant).

La densité de pieds (plant density) est fortement corrélée au taux de levée (emergence rate), et le nombre d'épis par pied (nb of ears per plant) est corrélé au nombre de talles par pied (nb of tillers per plant). Le rendement en grains estimé (estimated yield) apparaît corrélé à la densité de pieds (plant density) (et au taux de levée (emergence rate)), au nombre de grains par épi (nb of kernels per ear) et au rendement relatif (relative yield). Il apparaît moyennement corrélé au PMG (TKM).

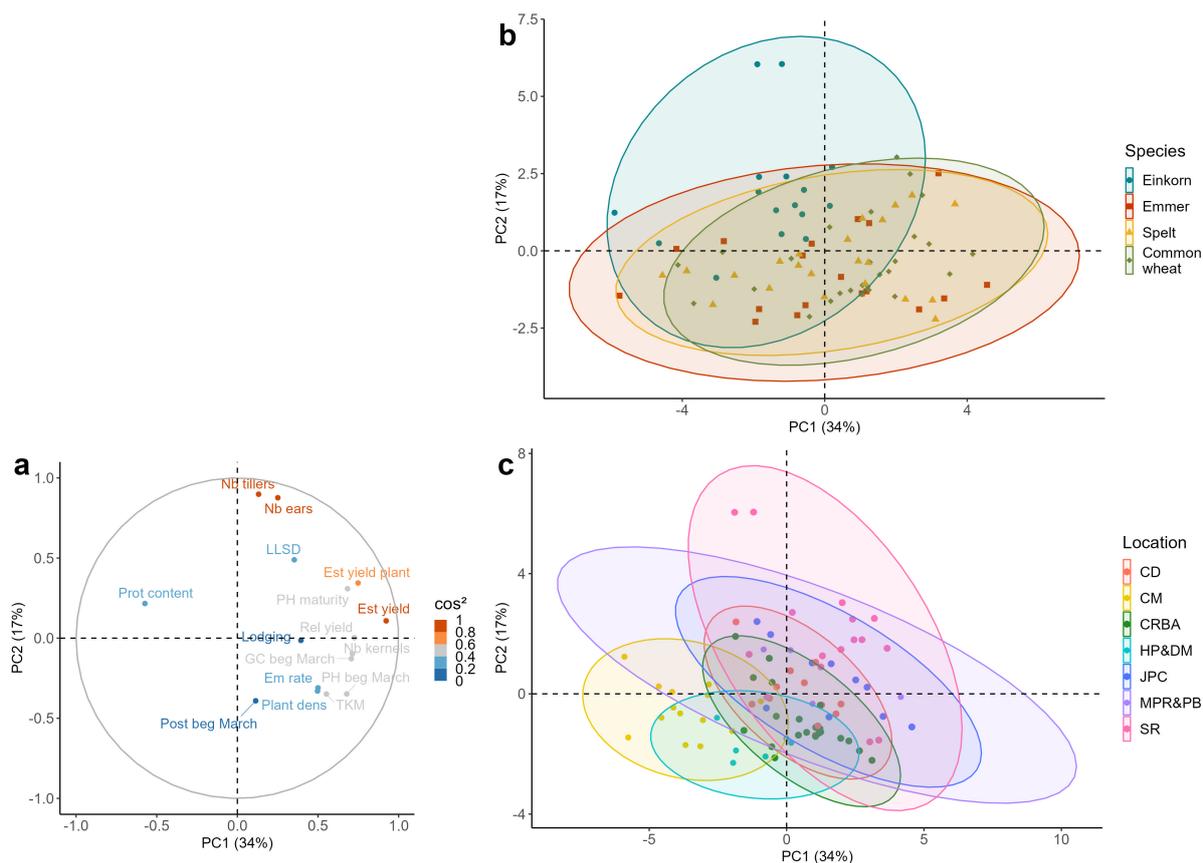


FIGURE 4.1 – PCA on agronomic parameters. a. Plot of variables. Colors indicate the quality of representation (\cos^2) of each variable. Em : emergence, Dens : density, GC : ground cover, PH : plant height, Post : posture, Nb tillers : Number of tillers per plant, Nb ears : Number of ears per plant, Nb kernels : Number of kernels per ear, Prot : protein, Est yield : Estimated yield, Est yield plant : Estimated yield per plant. b, c. Plots of individuals, according to the species (b) and to the location (c) with 95% confidence ellipses of the mean point for each species (b) or location (c).

Le graphe des individus représentés en fonction des quatre espèces (figure 4.1b) confirme les observations de l'analyse sur l'essai du CRBA. Seul l'En se distingue des trois autres espèces. Il est caractérisé par des tallage (nb tillers per plant) et taux de protéines (protein content) plutôt élevés et par des hauteurs de pied (plant height beg March), nombre de grains par épi (nb of kernels per ear), rendement relatif (relative yield), PMG (TKM), rendement estimé (estimated yield) et couverture du sol début mars (ground cover beg March) faibles. Le graphe des individus en fonction des sites rend compte d'un effet environnement (figure 4.1c). Cet effet est prononcé pour le site CM, qui se distingue clairement des autres, et qui est associé à des faibles taux de levée (emergence rate), densité de pieds (plant density), tallage (nb tillers per plant), couverture du sol (ground cover beg March), hauteur des pieds (plant height beg March), rendement relatif (relative yield), nombre de grains par épi (nb of kernels per ear), PMG (TKM), rendements estimés (estimated yield) et à des taux de protéines (protein content) élevés. Le site HP&DM

semble présenter des caractéristiques similaires à celles de CM, mais de façon moins notoire. Bien qu'ils ne sont pas très bien représentés par les CP1 et 2, les nuages de points des sites CD et CRBA semblent se superposer. Les variétés du CRBA se distinguent légèrement de celles de chez CD par la CP2 (décalage vers le bas du nuage de points). Enfin, les distributions des variétés des sites JPC, MPR&PB et SR se superposent aussi. Elles recourent en partie celles de CD et du CRBA, mais sont décalées vers la droite de la CP1 et le haut de la CP2. Ces sites sont associés à une couverture de sol (ground cover beg March) importante, des pieds hauts (plant height beg March), des rendements relatifs (relative yield), nombre de grains par épi (nb of kernels per ear), PMG (TKM) et rendements estimés (estimated yield) élevés. De plus, le site SR est caractérisé par un tallage (nb of tillers per plant) fort, en particulier pour les variétés d'En.

4.3.2.2 Sur les variables morphométriques des grains

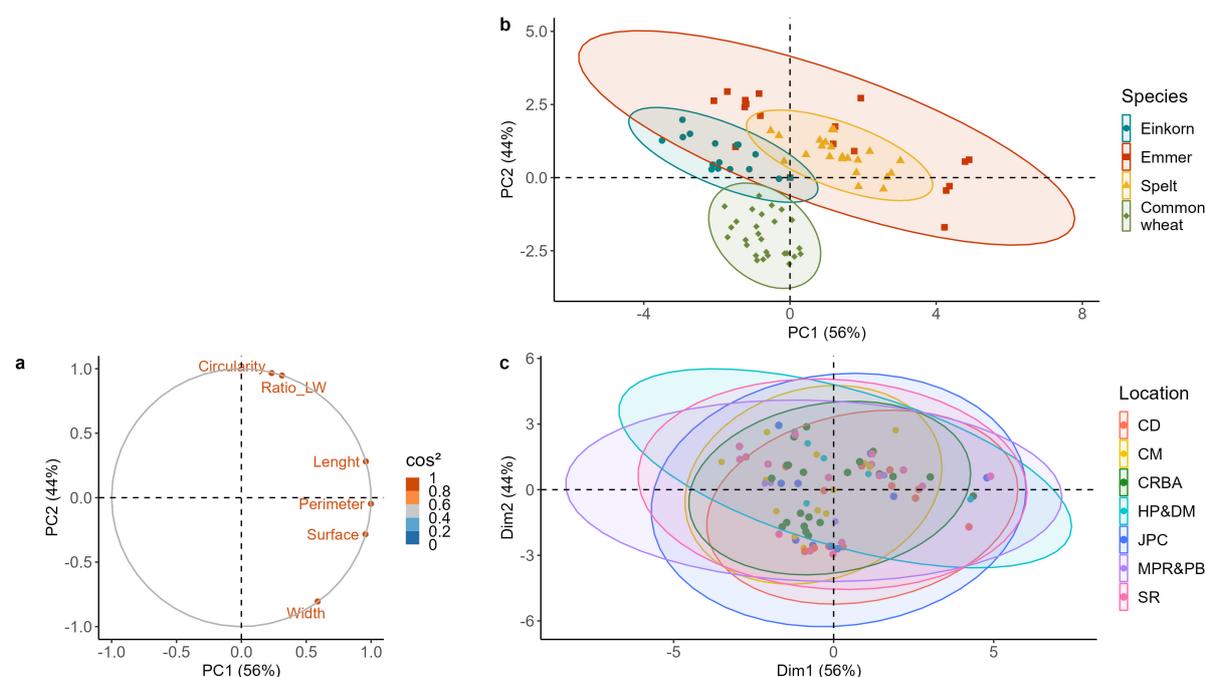


FIGURE 4.2 – PCA on kernel morphometric parameters. a. Plot of variables. Colors indicate the quality of representation (\cos^2) of each variable. b, c. Plots of individuals, according to the species (b) and to the location (c) with 95% confidence ellipses of the mean point for each species (b) or location (c).

Concernant les variables morphométriques des grains, les CP 1 et 2 représentent respectivement 56% et 44% de la variabilité totale (figure 4.2). A nouveau, le graphe des individus en fonction des espèces (figure 4.2b) confirme les observations de l'analyse uniquement au CRBA (figure 3c et d, section 4.2). On retrouve des groupes distincts, avec peu de variabilité intra, pour les variétés d'En, de BT et de GE. Les variétés d'Am apparaissent quant-à-elles très hétérogènes.

Leur distribution se superpose à celle du GE, et dans une moindre mesure, à celle de l'En. Lorsque les variétés sont représentées en fonction des sites (figure 4.2c), aucun groupe distinct ne ressort. Ainsi, les morphométries (taille et forme) des grains semblent ne pas varier entre environnements.

Ces ACP confirment les effets des espèces observés dans l'analyse de l'essai au CRBA. Concernant les variables agronomiques, seul l'En se distingue des autres espèces et est associé à des caractéristiques précises. Concernant les variables morphométriques, les caractéristiques propres à l'En, au BT et au GE sont retrouvées. L'importante hétérogénéité entre les variétés étudiées d'Am ressort aussi. Ces analyses sur le JD-MS suggèrent aussi que l'environnement a un effet sur les variables agronomiques, mais pas (ou peu) sur les variables morphométriques des grains.

4.3.3 Effet de l'environnement sur des variables spécifiques

Les ACP ont fourni une vision globale de l'effet de l'environnement sur l'ensemble des variables agronomiques (figure 4.1) et morphométriques des grains (figure 4.2). Dans cette section, l'effet de l'environnement est regardé séparément pour certaines variables. Pour ceci, les valeurs des variétés au sein de chaque site pour certaines variables d'intérêt particulier sont présentées graphiquement dans les figures 4.3 à 4.9. J'ai distingué les variables en lien avec la couverture du sol (figures 4.3 et 4.4), les composantes (figure 4.5) et estimations du rendement (figure 4.6), d'autres variables agronomiques d'intérêt (figures 4.7 et 4.8) et enfin la forme et taille des grains (figure 4.9).

4.3.3.1 Variables en lien avec la compétitivité par rapport aux adventices

La compétitivité par rapport aux adventices a principalement été estimée à travers des variables en lien avec la couverture du sol (densité de pieds (plant density), hauteur des pieds (plant height beg March) et posture (posture)) mesurées au début du mois de mars (figures 4.3 et 4.4). Pour chacune de ces variables, on retrouve certaines tendances pour les quatre espèces et pour des variétés en particulier.

Concernant la densité de pieds (plant density), l'En *Mix JMG* a de très faibles densités partout sauf chez JPC et chez MPR&PB (figure 4.3a). Ces densités sont de 36 pieds/m² chez CM, 56 chez CD, 75 chez SR, 131 au CRBA, 163 chez JPC et 169 chez MPR&PB. En termes d'hauteur (plant height beg March), l'En se distingue des autres espèces par des pieds courts (figure 4.3b). La variété d'Am *Roux Blanc* et les variétés de GE *de Manitoba* et *Escanda de Asturias* présentent quant-à-elles des hauteurs élevées sur l'ensemble des sites. Par exemple, les valeurs pour l'Am *Roux*

Blanc fluctuent entre de 9 cm chez CD et 14 cm au CRBA. De plus, on distingue une différence entre les variétés modernes et les variétés paysannes de BT, ces dernières étant légèrement plus hautes. Par rapport à la posture (posture), les variétés d'En ont toutes des postures étalées ou intermédiaires dans tous les sites (figure 4.3c), soulignant leur développement plus tardif. En contraste, on observe des postures dressées pour certaines variétés d'Am et de GE, dont la variété d'Am *Roux Blanc* (chez CD et HP&DM), ou encore les variétés de GE *Escanda de Asturias* (au CRBA, chez CD et SR) et *de Manitoba* (au CRBA, chez CM et SR).

Enfin, si on regarde la couverture du sol par les pieds de blé (ground cover beg March) (figure 4.4), la couverture moindre observée pour l'En par rapport aux autres espèces au CRBA ne ressort pas dans tous les sites. On observe cette même tendance uniquement chez JPC (couverture de 13% pour la variété *Mix JMG* et de 15% pour *Graines de l'Ain*).

Si on s'intéresse à l'effet de chacun des sites, on observe des densités de pieds (plant density) très variables (figure 4.3a). Elles sont très faibles chez CM (de 16 pieds/m² pour le BT *Mix CD* à 148 pour l'En *PE de Provence*), assez faibles chez CD (56 pieds/m² pour l'En *Mix JMG* à 158 pour le BT *Mix GA*), moyennes au CRBA (de 131 pieds/m² pour l'En *Mix JMG* à 229 pour l'En *PE de Provence*), chez JPC (de 133 pieds/m² pour l'Am *Blanc* à 215 pour l'Am *Roux Blanc*), MPR&PB (de 168 pieds/m² pour l'En *Mix JMG* à 219 pour le GE *Oberkulmer*) et SR (de 75 pieds/m² pour l'En *Mix JMG* à 234 pour l'Am *Roux Blanc*), et élevées chez HP&DM (de 193 pieds/m² pour le GE *Oberkulmer* à 335 pour le GE *Doré*). Par rapport à la posture (posture) des pieds, aucune tendance claire ne ressort pour les différents sites (figure 4.3c). Pour la hauteur des pieds début mars (plant height beg March) (figure 4.3b), on observe des valeurs extrêmement faibles chez CM (de 2 cm pour l'En *PE de Provence* à 5 pour l'Am *Blanc*), et des valeurs plutôt faibles chez CD (de 2 cm pour l'En *Mix JMG* à 10 pour le GE *Escanda de Asturias*). Dû à l'importante hétérogénéité entre variétés pour chacun des sites, même au sein d'une même espèce, il est difficile d'identifier des tendances par rapport à la hauteur des pieds pour les autres sites. Enfin, si on regarde la couverture du sol (ground cover beg March) (figure 4.4), on observe des valeurs très faibles pour le site CM (de 2% pour le BT *Mix CD* à 10% pour le BT **Mix GA**). Ceci est certainement lié à la fois aux très faibles densités de pieds (plant density) et à leur petite taille (plant height beg March). Pour tous les autres sites, il est difficile de distinguer des tendances, car la variabilité entre variétés au sein de chaque lieu est forte.

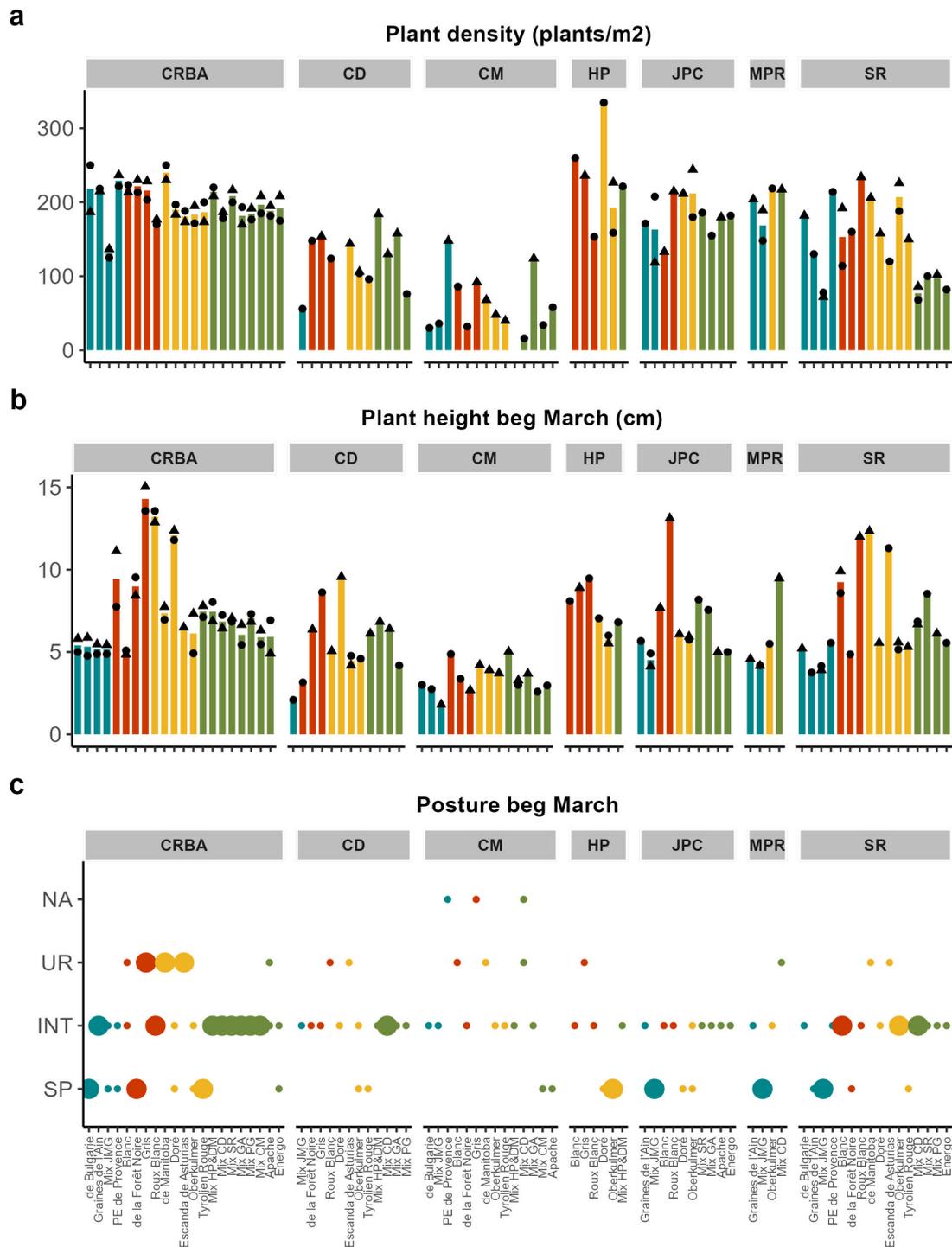


FIGURE 4.3 – Parameters related to ground cover at the beginning of March. In panels a and b, histograms represent the mean values for each variety in each location. Black dots and triangles indicate the values for each of the two blocks (dots = values for block 1 and triangles = values for block 2). For plant posture (panel b), big dots represent 2 plots, while small dots represent single plots. UR : upright, INT : intermediate, SP : spreading, NA : missing data. Each species is represented by a unique color: blue for einkorn, red for emmer, yellow for spelt, green for common wheat. HP : HP&DM, MPR : MPR&PB.

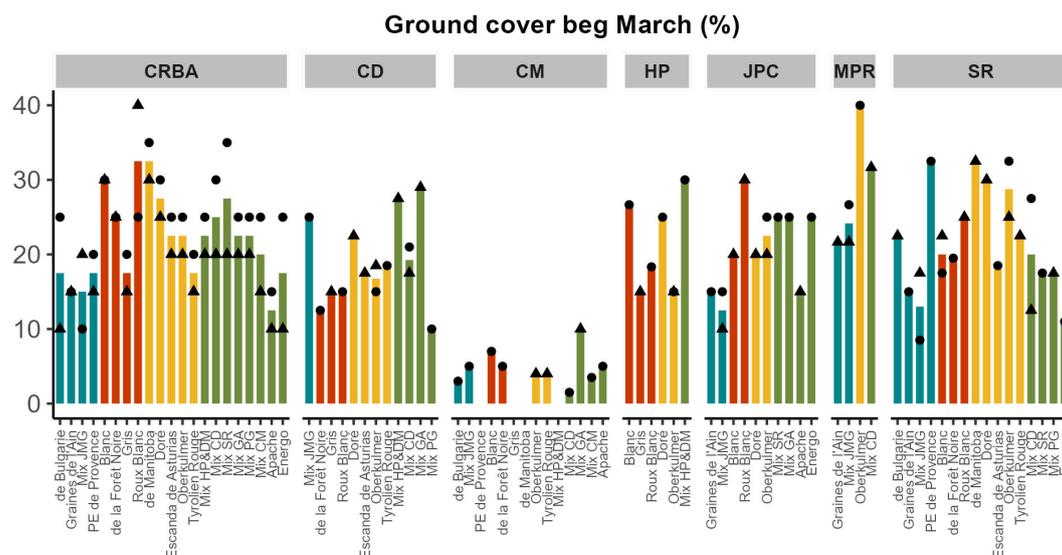


FIGURE 4.4 – Ground cover at the beginning of March. Histograms represent the mean values for each variety in each location. Black dots and triangles indicate the values for each of the two blocks (dots = values for block 1 and triangles = values for block 2). Each species is represented by a unique color : blue for einkorn, red for emmer, yellow for spelt, green for common wheat. HP : HP&DM, MPR : MPR&PB.

L'ACP sur les variables agronomiques suggérait que la couverture du sol début mars (plant height beg March) était corrélée à la densité de pieds (plant density) et à la hauteur des pieds (plant height beg March) (figure 4.1). La densité (plant density) semble influencer sur la couverture du sol (ground cover beg March) au sein des sites SR (pour toutes les variétés) et CD (pour certaines variétés uniquement). Chez CD par exemple, les deux variétés de BT présentant la meilleure couverture (ground cover beg March) sont également celles dont les densités de pieds (plant density) sont les plus élevées (figures 4.3a et 4.4). Les liens entre couverture du sol (ground cover beg March) et hauteur (plant height beg March) ressortent aussi, surtout au CRBA et pour certaines variétés en particulier. Les deux variétés qui ont la meilleure couverture (Am *Roux Blanc* et GE *de Manitoba*) sont aussi les plus hautes (figures 4.3c et 4.4). Au sein des fermes, la hauteur influence probablement aussi la couverture, mais cet effet est confondu avec celui des densités de pieds.

4.3.3.2 Composantes du rendement

La densité de pieds (plant density) a été présentée en figure 4.3a. Ici, je présente les autres composantes du rendement : le nombre d'épis par pied (nb of ears per plant), le nombre de grains par épi (nb of kernels per ear) et le PMG (TKM) (figure 4.5). Les estimations des rendements

en grains (estimated yield et estimated yield per plant) (en t/ha et en g/pied) sont également mentionnées (figure 4.6).

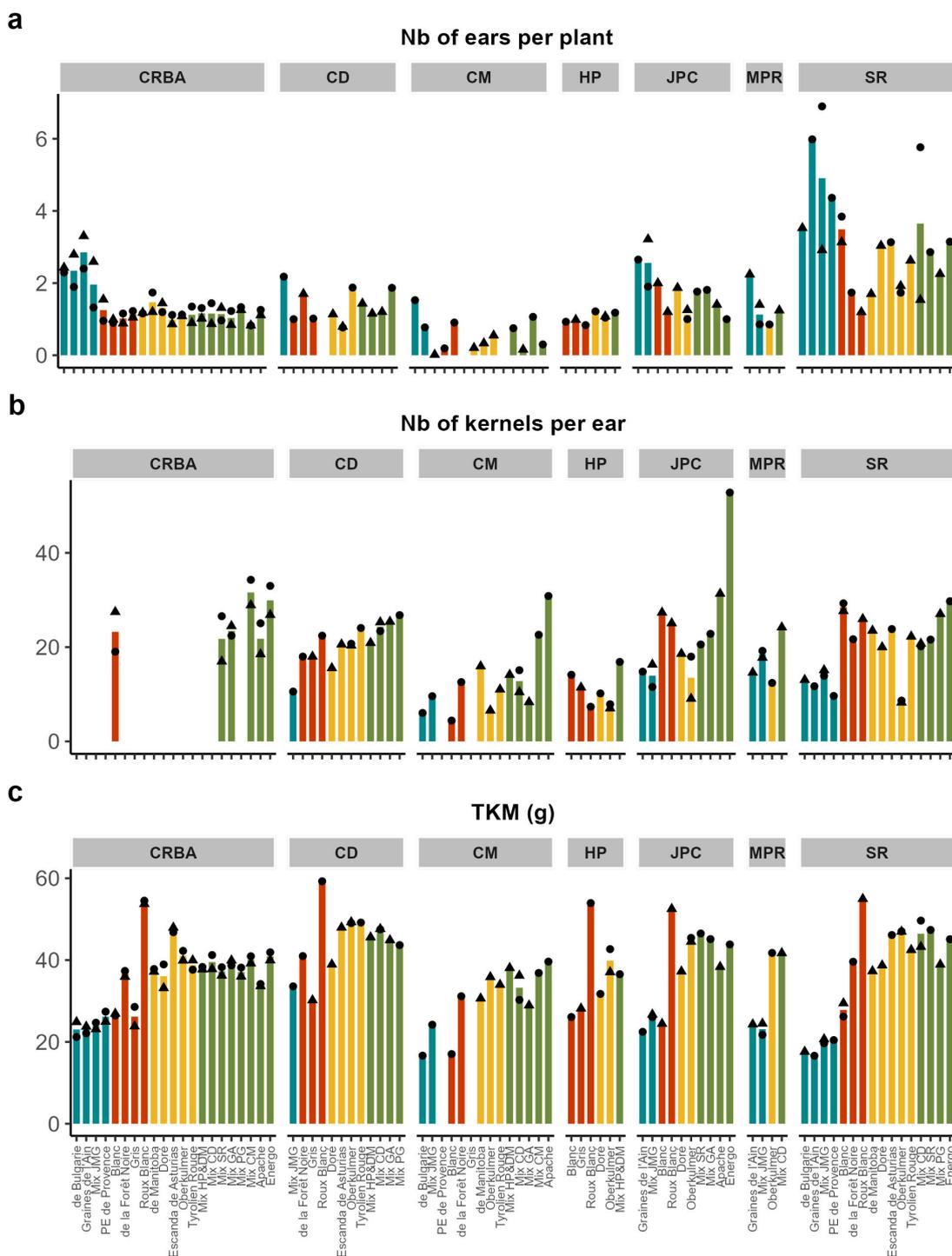


FIGURE 4.5 – Yield components. Histograms represent the mean values for each variety in each location. Black dots and triangles indicate the values for each of the two blocks (dots = values for block 1 and triangles = values for block 2). Each species is represented by a unique color : blue for einkorn, red for emmer, yellow for spelt, green for common wheat. HP : HP&DM, MPR : MPR&PB.

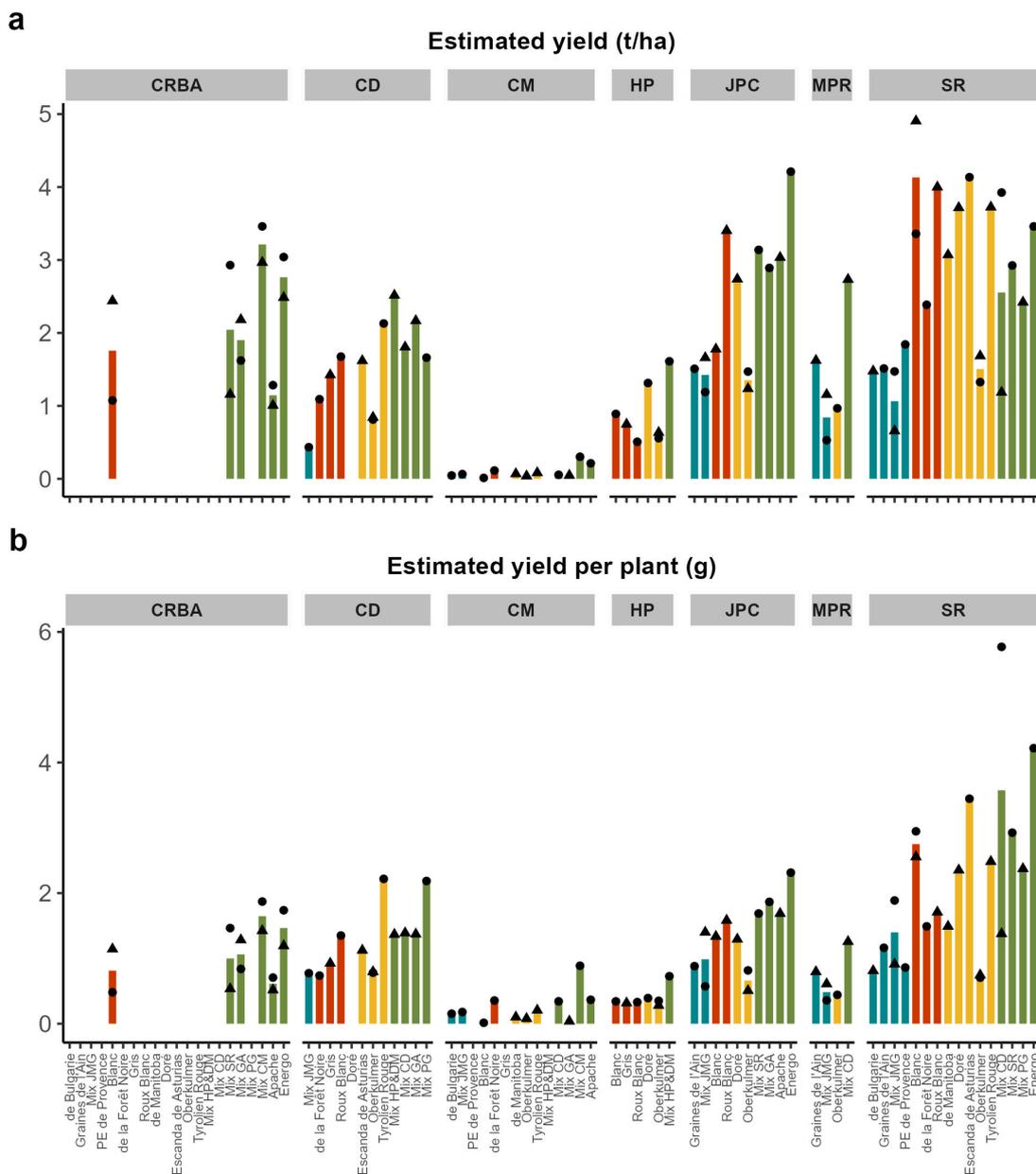


FIGURE 4.6 – Yield estimations. Histograms represent the mean values for each variety in each location. Black dots and triangles indicate the values for each of the two blocks (dots = values for block 1 and triangles = values for block 2). Each species is represented by a unique color : blue for einkorn, red for emmer, yellow for spelt, green for common wheat. HP : HP&DM, MPR : MPR&PB.

Pour les nombre d'épis par pied (nb of ears per plant), nombre de grains par épi (nb of kernels per ear) et PMG (TKM), on retrouve, sur l'ensemble des sites, les mêmes tendances par espèce et pour certaines variétés en particulier. Concernant le nombre d'épis par pied (nb of ears per plant), les valeurs sont partout supérieures pour les variétés d'En (figure 4.5a). Elles vont de 0,01 pour l'En *PE de Provence* à 1,5 pour l'En *de Bulgarie* chez CM, de 2,3 pour l'En *PE de Provence* à 3,4 pour l'En *Mix JMG* au CRBA, de 2,6 pour l'En *Graines de l'Ain* à 2,7 pour l'En *Mix JMG* chez JPC, de 3,8 pour l'En *de Bulgarie* à 5,6 pour l'En *Graines de l'Ain* chez SR, et de 4,2 pour l'En *Mix JMG* à 4,6 pour l'En *Graines de l'Ain* chez MPR&PB. La valeur pour l'En *Mix JMG* est de 2,9 chez CD. Pour le nombre de grains par épi (nb of kernels per ear), on observe, parmi les six fermes, des valeurs moindres pour les variétés d'En que pour les autres espèces (figure 4.5b). Pour la variété *En Mix JMG*, on compte environ 10,0 grains par épi chez CM, 10,6 chez CD, 14,0 chez JPC, 14,5 chez SR et 18,5 chez MPR&PB. Les valeurs sont également faibles pour la variété de GE *Oberkulmer* (de 6,7 grains par épi chez CM à 20,5 chez CD), ce qui est certainement lié au taux d'avortement élevé de cette variété sur l'ensemble des sites. Enfin, pour les PMG (TKM), on observe que les En, ainsi que les variétés d'Am *Blanc* et *Gris* ont de plus petits grains que toutes les autres variétés (figure 4.5c). L'importante variabilité constatée parmi les Am au CRBA est également observée sur l'ensemble des sites. Le PMG (TKM) est notamment très élevé pour l'Am *Roux Blanc* (de 52,5 g chez JPC à 59,3 chez CD). Au CRBA, les graines du GE *Escanda de Asturias* étaient particulièrement grandes par rapport aux autres variétés de GE (PMG de 47,3 g). Cette tendance n'est pas retrouvée de façon aussi claire dans les deux fermes (CD et SR) où cette variété est présente.

A partir des composantes du rendement, j'ai estimé les rendements en grains (figure 4.6). Dans tous les sites, les rendements (en t/ha et en g/pied) (estimated yield et estimated yield per plant) sont plus faibles pour les En, et pour le GE *Oberkulmer*. Pour les En, elles vont de 0,05 t/ha pour l'En *de Bulgarie* chez CM à 1,6 t/ha pour l'En *Graines de l'Ain* chez MPR&PB. Pour le GE *Oberkulmer*, les valeurs varient entre 0,04 t/ha chez CM et 1,5 chez SR. En ce qui concerne les rendements en g/ pied (estimated yield per plant) (figure 4.6b), on obtient aussi des valeurs plus faibles pour les En (de 0,15 g pour l'En *de Bulgarie* chez CM à 1,40 pour l'En *Mix JMG* chez SR) et le GE *Oberkulmer* (de 0,08 g chez CM à 0,79 g chez CD).

Pour la plupart des variables liées au rendement, on distingue aussi des tendances respectives à chacun des sites. Ainsi, le nombre d'épis par pied (nb of ears per plant) est plus élevé chez SR que partout ailleurs, et en particulier pour les En (figure 4.5a). Chez SR, les valeurs sont

de 3,5 épis par pied pour l'En *de Bulgarie*, 4,4 pour l'En *PE de Provence*, 4,9 pour l'En *Mix JMG* et 6,0 pour l'En *Graines de l'Ain*. Pour les autres espèces, il atteint des valeurs de 3,5 épis par pied pour l'Am (variété *Blanc*), 3,1 pour le GE (variété *Escanda de Asturias*) et 3,6 pour le BT (variété *Mix CD*). Pour le nombre de grains par épi (nb of kernels per ear) (figure 4.5b), on observe des valeurs globalement plus faibles chez CM (sauf pour le BT *Energo*) et chez HP&DM (de 4,4 grains par épi pour l'Am *Blanc* à 30,9 pour le BT *Apache* chez CM et de 7,4 grains par épi pour l'Am *Roux Blanc* à 16,9 pour le BT *Mix HP&DM* chez HP&DM). Il est difficile de discerner des tendances pour les autres sites, la variabilité au sein de chacun d'entre eux étant très élevée. Enfin, les PMG (TKM) sont très élevés chez CD (de 30 g pour l'Am *Gris* à 59 g pour l'Am *Roux Blanc*). Par rapport au CRBA, ils sont également élevés chez SR (sauf pour les En) et chez JPC. Chez HP&DM et surtout chez CM, les PMG (TKM) semblent légèrement plus faibles qu'au CRBA (figure 4.5c). Les valeurs vont de 167 g pour l'En *de Bulgarie* à 40 g pour le BT *Apache* chez CM, de 26 g pour l'Am *Blanc* à 54 g pour l'Am *Roux Blanc* chez HP&DM, de 23 g pour l'En *de Bulgarie* à 54 g pour l'Am *Roux Blanc* au CRBA, de 23 g pour l'En *de Bulgarie* à 53 g pour l'Am *Roux Blanc* chez JPC, de 17 g pour l'En *de Bulgarie* à 55 g pour l'Am *Roux Blanc* chez SR, et de 23 g pour l'En *Mix JMG* à 42 g pour le GE *Oberkulmer* chez MPR&PB.

Ainsi, les rendements estimés en t/ha (estimated yield) apparaissent relativement élevés chez SR, moyens chez JPC, CD et au CRBA et faibles chez MPR&PB, HP&DM et CM (figure 4.6a). Des valeurs particulièrement hautes sont observées pour certaines variétés dans les sites JPC et SR. Chez JPC, la variété de BT *Energo* atteint un rendement estimé de 4,2 t/ha. Chez SR, les variétés Am *Blanc*, Am *Roux Blanc*, GE *Doré*, GE *Escanda de Asturias*, GE *Tyrolien Rouge* et BT *Energo* ont les plus hauts rendements estimés par hectare, avec des valeurs de 4,1, 4,0, 3,7, 4,1, 3,7 et 3,5 t/ha, respectivement. Les rendements estimés par pied (estimated yield per plant) sont très faibles chez CM, HP et PG (figure 4.6b). La variabilité au sein du site SR est élevée, avec certaines variétés qui atteignent des valeurs particulièrement hautes. Notamment, le BT *Energo* (4,2 g), le GE *Escanda de Asturias* (3,4 g) et l'Am *Blanc* (2,8 g) ont des rendements estimés par pied très élevés. Le BT *Mix CD* a aussi une valeur moyenne élevée, mais l'écart entre les estimations des blocs 1 et 2 est tellement grande qu'il est difficile d'interpréter ce résultat.

4.3.3.3 Autres variables agronomiques d'intérêt

Au-delà des variables en lien avec la compétitivité par rapport aux adventices et avec le rendement, nous avons estimé la hauteur à maturité (plant height at maturity), le score de verse (lodging score) (figure 4.7), le rendement relatif (relative yield) et le taux de protéines (protein content) (figure 4.8).

Pour la hauteur à maturité (plant height at maturity), le rendement relatif (relative yield) et le taux de protéines (protein content), on retrouve à nouveau les mêmes tendances par espèces de l'analyse qui n'incluait que le CRBA (section 4.2). En ce qui concerne la verse (lodging score), très peu d'incidents ont eu lieu. Ainsi, nous ne pouvons pas dégager de tendances par espèce.

La hauteur à maturité (plant height at maturity) est plus faible pour l'En, pour certaines variétés d'Am (dont l'Am *Gris* et l'Am *Blanc*), pour le GE *Oberkulmer*, et pour les BT modernes ou les mélanges de variétés modernes (figure 4.7a). Les valeurs pour les En vont de 51 cm pour l'En *de Bulgarie* à 60 cm pour l'En *Mix JMG* chez CM, de 67 cm pour l'En *Graines de l'Ain* à 78 cm pour l'En *de Bulgarie* au CRBA, de 77 cm pour l'En *Mix JMG* à 91 cm pour l'En *PE de Provence* chez SR, de 103 cm pour l'En *Mix JMG* à 107 cm pour l'En *Grains de l'Ain* chez JPC et de 112 cm pour l'En *Grains de l'Ain* à 118 cm pour l'En *Mix JMG* chez MPR&PB. La valeur pour l'En *Mix JMG* chez CD est de 89 cm. En ce qui concerne la verse (lodging score), très peu de verse a été observée, ce qui nous empêche d'identifier des tendances par espèce. Les rendements relatifs (relative yield) sont aussi partout plus faibles pour les En (de 36% pour l'En *de Bulgarie* chez CM à 67% pour l'En *Mix JMG* chez CD), et plus élevés pour les BT (figure 4.8a). Au sein de tous les sites, le GE *Oberkulmer* a un rendement relatif extrêmement faible (de 36% chez SR à 57% chez CD). Au sein de tous les sites, une certaine hétérogénéité est constatée parmi les Am. Enfin, les teneurs en protéines (protein content) sont partout plus élevées pour les En (figure 4.8b). Elles atteignent 17,0 %ms chez MPR&PB (En *Mix JMG*), 17,5 %ms chez JPC (En *Graines de l'Ain*), 18,2 %ms chez CD (En *Mix JMG*), 19,1 %ms au CRBA (En *Grains de l'Ain*), 20,6 %ms chez CM (En *de Bulgarie*) et 21,4 %ms chez SR (En *de Bulgarie*). Des taux très élevés sont aussi constatés pour le GE *Oberkulmer* (allant de 15,8 %ms chez MPR&PB à 18,1 au CRBA). Des teneurs légèrement supérieures sont observées pour les BT paysans dans les sites CRBA et CM, mais cette tendance n'est pas mise en évidence chez JPC et SR.

Des tendances par site ressortent aussi pour chacun de ces quatre paramètres. Les hauteurs des pieds (plant height at maturity) sont très élevées chez JPC et chez MPR&PB, élevées chez SR, intermédiaires chez CD, plutôt basses au CRBA, et très faibles chez CM et chez HP&DM (figure 4.7a). On atteint des hauteurs maximales de 72 cm chez HP&DM (Am *Roux Blanc*), 80 cm chez CM (Am *de la Forêt Noire*), 98 cm au CRBA (GE *de Manitoba*), 106 cm chez CD (Am *Roux Blanc*), 120 cm chez SR (Am *Roux Blanc*), 135 cm chez MPR&PB (BT *Mix CD*) et 145 cm chez JPC (Am *Roux Blanc*). Les rendements relatifs (relative yield) semblent plutôt élevés au CRBA, chez CD, JPC et SR, intermédiaires chez MPR&PB et faibles chez CM et chez HP&DM (figure 4.8a). Parmi les blés vêtus, les valeurs maximales sont atteintes par le GE *Tyrolien Rouge* (57%) chez CM, par l'En *Graines de l'Ain* (64%) chez MPR&PB, par l'Am *Blanc* (67%) chez HP&DM, par le GE *Doré* (69%) au CRBA, par le GE *Tyrolien Rouge* (72%) chez SR, par le GE *Doré* (73%) chez JPC et par le GE *Tyrolien Rouge* (73%) chez CD. Concernant les taux des protéines (protein content), on retrouve des valeurs très élevées chez CM, alors qu'elles sont relativement faibles chez JPC et chez MPR&PB (figure 4.8b). Comme déjà mentionnée, les taux les plus élevés sont observés pour des variétés d'En dans tous les sites, sauf chez HP&DM où ils sont obtenus par l'Am *Gris* (18,8%). Enfin, des taux de verse (lodging score) importants ont été constatés chez MPR&PB, pour les variétés de BT et de GE (figure 4.7b). A titre d'exemples, on observe un score de 65 pour le GE *Oberkulmer* et de 91 pour le BT *Mix CD*. Chez JPC, la variété d'Am *Roux Blanc* a également versé (score de 75).

4.3.3.4 Taille et forme des grains

Pour les deux variables liées à la morphométrie des grains (surface et ratio_LW), les tendances par espèce et par variété sont les mêmes au sein des sept sites (figure 4.9). On a notamment des surfaces projetées (surface) petites pour les En, intermédiaires pour les BT, élevées pour les GE et très variables pour les Am (figure 4.9a). Pour les En, les valeurs vont de 11 mm² pour l'En *de Bulgarie* chez CM à 15 mm² pour l'En *Mix JMG* chez CD; pour les Am, elles vont de 12 mm² pour l'Am *Blanc* chez CM à 21 mm² pour l'Am *Roux Blanc* chez CD; pour les GE, de 15 mm² pour le GE *de Manitoba* chez CM à 19 mm² pour le GE *Escanda de Asturias* au CRBA et pour le BT, de 14 mm² pour le BT *Mix GA* à 17 mm² pour le BT *Mix CD* chez CD. Les valeurs sont notamment très élevées pour l'Am *Roux Blanc* au sein de tous les sites (de 21 mm² chez JPC à 21 mm² chez CD). Concernant la finesse (ratio_LW), les tendances pour chacune des quatre espèces sont aussi les mêmes parmi les divers sites (figure 4.9b). Les BT ont des grains plus circulaires (ratio_LW de 1,9 pour le BT *Apache* chez CM à 2,2 pour le BT *Mix SR* chez

SR), les En ont des grains relativement allongés (ratio de 2,2 pour l'En *de Bulgarie* chez CM à 2,4 pour l'En *PE de Provence* au CRBA) et les Am (ratio_LW de 2,2 pour l'Am *Gris* chez CD à 2,6 pour l'Am *Blanc* chez JPC) et GE (ratio_LW de 2,3 pour le GE *Tyrolien Rouge* chez CD à 2,5 pour le GE *Doré* chez SR) ont des grains plutôt allongés. Pour ce paramètre, la variabilité au sein des variétés d'Am est moindre.

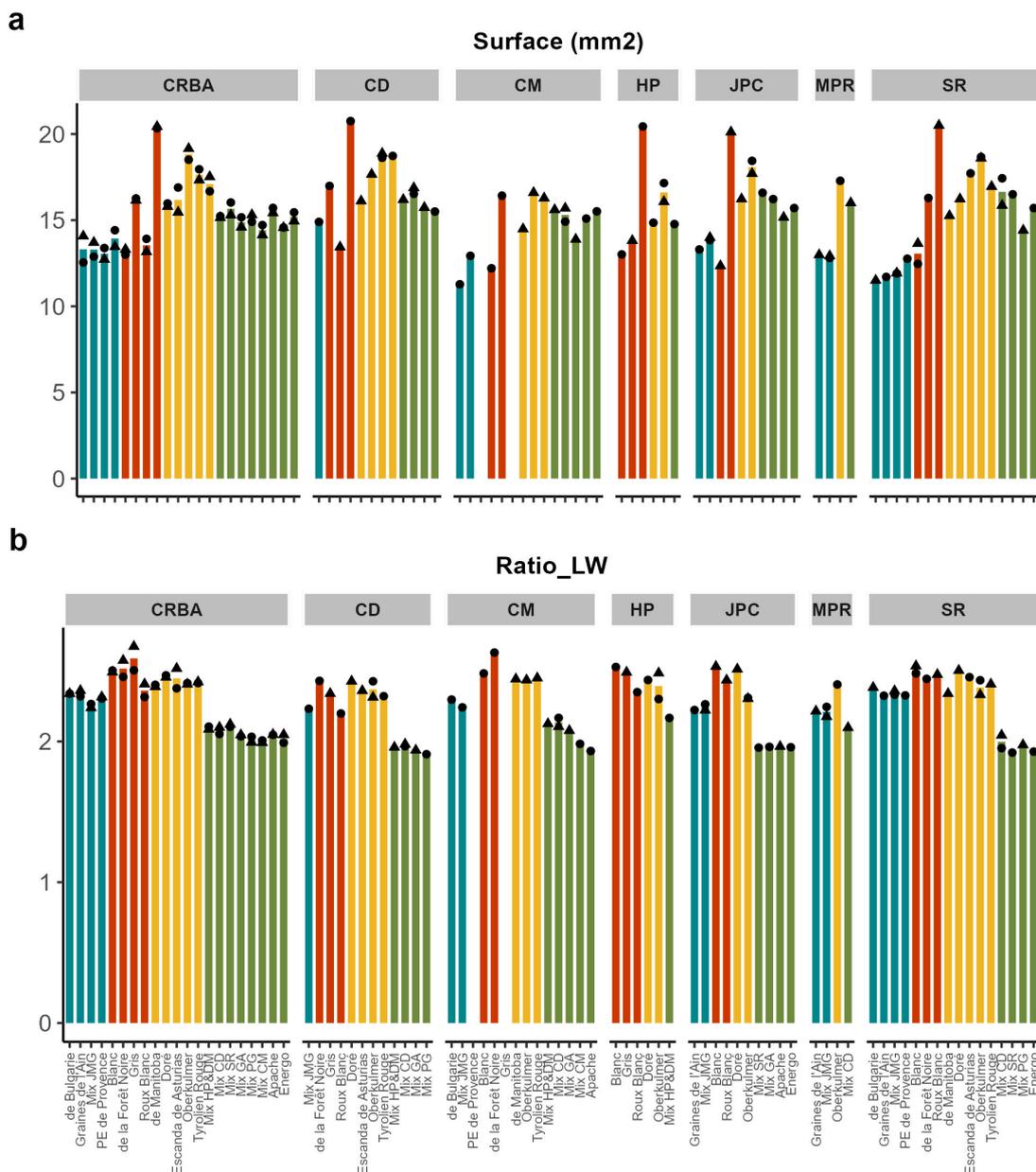


FIGURE 4.9 – Kernel size (a) and shape (b). Histograms represent the mean values for each variety in each location. Black dots and triangles indicate the values for each of the two blocks (dots = values for block 1 and triangles = values for block 2). Each species is represented by a unique color: blue for einkorn, red for emmer, yellow for spelt, green for common wheat. HP : HP&DM, MPR : MPR&PB.

La surface (surface) semble varier d'un site à l'autre (figure 4.9a). On observe notamment des petits grains chez CM (de 11 mm² pour l'En *de Bulgarie* à 17 mm² pour le GE *Oberkulmer*) et chez HP&DM (de 13 mm² pour l'Am *Blanc* à 20 mm² pour l'Am *Roux Blanc*) et des grands grains chez CD (de 13 mm² pour l'Am *Gris* à 19 mm² pour le GE *Oberkulmer*). Concernant la finesse (ratio_LW), on ne distingue pas de différence notable d'un site à l'autre (figure 4.9b).

4.3.4 Discussion et perspectives

4.3.4.1 Validation des tendances par espèce et par variété

Ces analyses sur plusieurs sites permettent de confirmer des tendances par espèces déjà observées dans l'analyse portant uniquement sur le CRBA (section 4.2). On retrouve la distinction de l'En par rapport aux autres espèces selon des critères agronomiques, ainsi que les différences morphométriques des grains de En, GE et de BT. La grande variabilité au sein des variétés d'Am est également observée dans tous les sites.

Ces résultats suggèrent aussi que malgré un tallage (nb tillers per plant) fort (en particulier chez SR), les rendements d'En restent plus faibles par rapport à ceux des autres espèces (figure 4.6). Ceci est lié à des nombres de grains par épi (nb of kernels per ear) et PMG (TKM) faibles (figure 4.5). Cette observation reste tout de même à confirmer par de futures évaluations, le remplissage des grains d'En ayant pu être affecté par les conditions climatiques spécifiques de l'année de l'expérimentation.



FIGURE 4.10 – Avortement du grand épeautre *Oberkulmer*.

Les données sur plusieurs sites confirment également des tendances pour certaines variétés en particulier. Par exemple, l'En *Mix JMG* a des densités (plant density) très faibles dans tous les sites (de 36 pieds/m² chez CM à 169 chez MPR&PB) (figure 4.3a). Ceci est lié à une mauvaise levée (emergence rate) (de 14% chez CM à 54% chez JPC), probablement due au lot de semences. Chez JPC et chez MPR&PB, les densités de semis élevées (300 et 400 graines/m², respectivement) expliquent les densités de pieds (plant density) supérieures. Le GE *Oberkulmer* ressort aussi dans tous les sites par des nombres de grains par épi (nb of kernels per ear) (de 6,6 chez CM à 20,5 chez CD), des rendements relatifs (relative yield) (de 36% chez SR à 57% chez

CD), des rendements estimés en t/ha (estimated yield) (de 0,037 t/ha chez CM à 0,97 t/ha chez MPR&PB) et en g par pied (estimated yield per plant) (de 0,078 g chez CM à 0,79 g chez CD) très faibles et par des taux de protéines (protein content) très élevés (de 15,8 %ms chez MPR&PB à 17,9 au CRBA). Ces observations sont certainement dues au taux d'avortement important des grains constaté pour cette variété sur l'ensemble des sites (figure 4.10). On n'a cependant à ce jour pas d'explication au sujet de la cause de cet avortement. Enfin, la variété d'Am *Roux Blanc* se caractérise par des pieds hauts dès le début du printemps (de 9 cm chez CD à 14 cm au CRBA début mars) jusqu'à la maturité (de 72 cm chez HP&DM à 145 cm chez JPC), et par de très gros grains (PMG (TKM) de 52,5 g chez JPC à 59,3 g chez CD).

4.3.4.2 Effet de l'environnement

Un effet de l'environnement semble se distinguer pour toutes les variables agronomiques, sauf pour la posture début mars (posture beg March) (figures 4.1 et 4.3). Pour la morphométrie des grains, on observe un effet de l'environnement pour la taille (surface) mais pas pour la finesse (ratio_LW) (figure 4.9).

Les différences constatées entre environnements pour les critères agronomiques peuvent être expliquées à la fois par des conditions pédoclimatiques et par les pratiques culturales. Des analyses de sol ont été effectuées sur l'ensemble des sites, et ont permis d'en estimer la fertilité (chapitre 3, sous-section 3.5.2). Enfin, les pratiques culturales (date, densité et technique de semis, travail du sol et précédents culturaux, fertilisation, désherbage) pour les parcelles expérimentales dans chaque site sont détaillés dans le tableau 3.9 du chapitre 3.

Les importantes différences de densités de pieds (plant density) parmi les sept sites peuvent être en partie expliquées par la variabilité dans les dates, densités et méthodes de semis. En effet, dans quatre sites (CRBA, HP&DM, CM, et dans une moindre mesure, JPC), les semis ont été faits très tard dans la saison (entre le 10 et le 29 novembre 2021), ce qui a pu limiter la levée. Cet effet a pu être compensé dans certains cas par des densités de semis supérieures à 250 gr/m². C'est le cas de HP&DM, où malgré des taux de levée faibles (valeur minimale de 39%), les densités de pieds (plant density) demeurent relativement hautes. Un semis à la volée peut également être source de variabilité. Globalement, l'enfouissement après un semis à la volée est plus superficiel et surtout plus hétérogène qu'avec un semis en rangs (manuel ou au semoir). Selon CD, l'enfouissement est aussi moins bon pour les épillets de blés vêtus que pour les grains nus de BT. Au CRBA, le soin particulier accordé au semis (semis manuel, recouvrement par un

voile P17) a pu compenser la date tardive de semis. Toutefois, quatre paysan.ne.s (CD, CM, JPC et SR) ont constaté des ravages d’oiseaux ou de chevreuils sur les parcelles expérimentales. Ces dégâts ajoutent une source de variabilité qu’il n’est pas possible d’estimer, et nous empêchent de mieux analyser les effets des dates, densités et méthodes de semis sur la levée.

L’impact de l’environnement sur les autres variables agronomiques peut être expliqué par les effets conjoints des contextes pédoclimatiques et des pratiques culturales. Du fait du printemps particulièrement sec en 2022, on peut supposer que la principale contrainte pour le développement des blés a été la ressource hydrique. Ainsi, au niveau pédologique, le principal facteur limitant aurait été la réserve utile.



FIGURE 4.11 – Echaudage de la variété d’amidonnier *Roux Blanc* dans la ferme HP&DM.

Or, on observe que les deux sites (CM et HP&DM) pour lesquels la réserve utile est la plus faible (entre 16 et 23 et entre 25 et 29 mm, respectivement, voir tableau 3.7, chapitre 3) sont ceux pour lesquels les composantes du rendement (hors la densité de pieds (plant density)) et les estimations des rendements sont aussi les plus faibles (figures 4.5 et 4.6). Dans ces deux sites, la couverture du sol en sortie d’hiver (ground cover beg March) est également basse (figure 4.4). Nous avons constaté un taux d’échaudage élevé dans ces deux fermes (figure 4.11), qui est probablement une conséquence du stress hydrique. Au CRBA, la réserve utile est également nettement plus basse (entre 36 et 38 mm) que dans les quatre autres fermes (tableau 3.7, chapitre 3). La meilleure couverture du sol (ground cover beg March) et les valeurs des composantes du rendement plus élevées observées dans ce site par rapport à CM et HP&DM, sont probablement dues au soin accordé lors des semis.

Il est intéressant de noter que la hauteur des pieds (plant height at maturity) (figure 4.7), semble très bien refléter les niveaux de fertilité des sols ressortis de l’analyse multicritères menée par Aubin Démonté (tableau 3.7, chapitre 3). A maturité, on observe des très petits pieds chez CM et chez HP&DM (sites avec une fertilité moindre), de plutôt petits pieds au CRBA (fertilité intermédiaire), des hauteurs intermédiaires chez CD (fertilité intermédiaire), plutôt élevées chez SR (fertilité forte) et très élevées chez JPC et chez MPR&PB (fertilité forte) (figure 4.7a). Néanmoins, les effets pédoclimatiques ne peuvent être dissociés de ceux des pratiques culturales. Or

les deux sites pour lesquels les sols sont les plus limitants (CM et HP&DM) sont aussi ceux, en dehors du CRBA, pour lesquels les dates de semis ont été les plus tardives. Aussi, les trois sites avec les meilleures fertilités selon l'analyse multicritères (JPC, MPR&PB et SR) sont ceux où les semis ont eu lieu le plus tôt (tableaux 3.7 et 3.9, chapitre 3).

Au sein des fermes CD, JPC, MPR&PB et SR, caractérisés par des fertilités plutôt bonnes et des dates de semis assez précoces, il semblerait que les stratégies de développement des blés ont été différentes. Par exemple, chez CD, les pailles sont restées très courtes, mais les grains étaient de très grande taille (figures 4.7 et 4.5). En contraste, chez SR, le taux de tallage a été très élevé, en particulier pour les variétés d'En (figure 4.12).



FIGURE 4.12 – Tallage de l'engrain *Graines de l'Ain*. a. CRBA, le 22 juin 2022. b. SR, le 18 juin 2022.

4.3.4.3 Limites dans les estimations des variables agronomiques

Les résultats présentés dans cette section nous permettent d'identifier des tendances respectives à différents environnements pour des variables en particulier, et de les associer à des caractéristiques pédoclimatiques et à des pratiques culturales. Il apparaît tout de même essentiel de considérer ces données avec précaution, notamment du fait de plusieurs limites dans les méthodes d'estimation de certaines variables évaluées.

Par exemple, l'estimation de la densité de pieds (plant density) dans les fermes est beaucoup moins fiable que celle au CRBA (figure 4.3). Les comptages de pieds dans ont été faits un mois plus tard dans les fermes. Les plantes étant plus développées, il était souvent difficile de distinguer

des pieds individuels (de talles ou d'autres graminées) (figure 4.13). Ceci ajoute un biais, en plus de celui lié aux ravages d'oiseaux. Ces biais expliquent en partie les valeurs de densités de pieds (plant density) assez homogènes au CRBA et très hétérogènes au sein des autres sites. Par ailleurs, certaines variables sont calculées à partir des densités de pied (nombre d'épis par pied (nb of ears per plant) et rendement estimé en t/ha (estimated yield)). Ces dernières sont donc aussi affectées par la fiabilité limitée des densités de pieds (plant density). Par rapport au nombre d'épis par pied (nb of ears per plant), calculée à partir des densités de pieds (plant density) et des densités d'épis (ear density), la mortalité entre les estimations de ces deux densités n'a pas été considérée, entraînant une sous-estimation du nombre d'épis par pied (nb of ears per plant). Ceci peut expliquer les valeurs inférieures à 1, observées notamment chez CM (figure 4.5a).

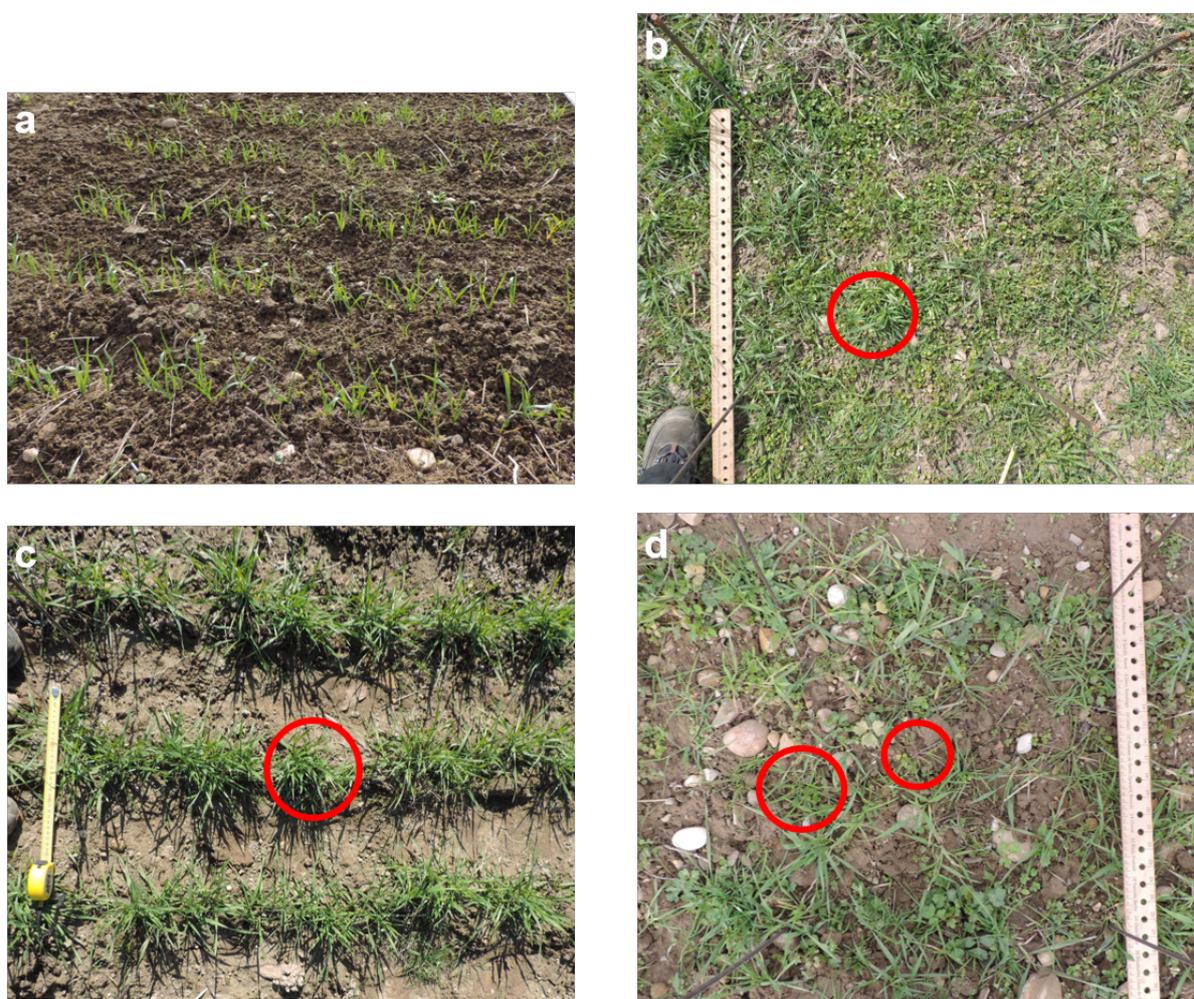


FIGURE 4.13 – Estimation des densités de pieds. a. CRBA, le 3 février 2022, blé tendre *Mix CM*. b. SR, le 10 mars 2022, blé tendre *Mix CD*. c. JPC, le 8 mars 2022, amidonnier *Roux Blanc*. d. CD, le 14 mars 2022, grand épeautre *Escanda de Asturias*. Les cercles rouges dans les panels b et c indiquent des touffes de pieds, dans lesquelles l'identification de pieds individuels est compliquée. Les cercles rouges dans le panel d montre des graminées, qui peuvent tout aussi bien être des pieds de blé comme des adventices.

4.3.4.4 Positionnement par rapport à la littérature

L'effet de l'environnement sur les caractéristiques agronomiques du blé est bien documenté dans la littérature scientifique. Certains paramètres, dont les taux de protéines et les rendements, sont très variables en fonction des environnements (LONGIN et al. 2016). Pour le rendement, l'influence de certaines pratiques culturales, dont les densités de semis, est également documentée (CASTAGNA et al. 1995). De plus, l'étude de LONGIN et al. 2016 montre des effets significatifs pour les interactions géotypes x environnements pour les PMG (TKM) et les hauteurs des pieds. Le tallage est reconnu comme étant fortement dépendant des conditions environnementales (DRECCER et al. 2013). Cependant, des « quantitative trait loci » (QTL) influant le potentiel de tallage ont aussi été mis en évidence chez le blé dur (GIUNTA et al. 2018). Pour ce critère en particulier, il serait intéressant d'identifier des pratiques culturales favorisant le tallage.

Par rapport aux protéines, les taux particulièrement élevés observés au sein des fermes CM et HP&DM (qui atteignent 20,6 %ms chez CM pour l'En *de Bulgarie* et 18,8 %ms chez HP&DM pour l'Am *Gris*), confirment les corrélations négatives entre rendements et taux de protéines décrites dans la littérature (OURY et GODIN 2007). Etonnamment, malgré des rendements estimés (estimated yield) relativement élevés, des taux de protéines (protein content) très élevés ont aussi été observés chez SR (21,4 %ms pour l'En *de Bulgarie*) (figure 4.8b). Enfin, les valeurs supérieures trouvées pour les blés vêtus par rapport au BT sont en accord avec plusieurs études (HIDALGO et al. 2009 ; GEISLITZ et al. 2019 ; MOUDRY et al. 2011 ; OLIVEIRA 2001). Cependant, certaines d'entre elles obtiennent des valeurs plus élevées pour les variétés d'Am par rapport à l'En (COSTANZO et al. 2019 ; BENCZE et al. 2020 ; MOUDRY et al. 2011).

En ce qui concerne les rendements relatifs (relative yield) et les PMG (TKM), on retrouve des valeurs cohérentes avec l'étude de LONGIN et al. 2016. Les auteur.e.s obtiennent des rendements relatifs de 58% pour l'En et de 70% pour l'Am et le GE, et trouvent des valeurs de PMG (TKM) nettement inférieures par rapport au BT uniquement pour l'En (47 g en moyenne pour le BT et 30 g pour l'En). Une grande variabilité parmi les variétés d'Am est également constatée, avec valeurs qui vont d'environ 45 à plus de 60 g (LONGIN et al. 2016). Nos résultats sont moins en accord avec ceux d'une autre étude menée en République Tchèque sur des variétés de printemps. Celle-ci trouve des valeurs de rendement relatif (relative yield) beaucoup plus élevées pour l'En (70,15% en moyenne), et des valeurs de PMG (TKM) plus faibles pour les Am et GE (34,19 g et 42,59 g en moyenne, respectivement) (KONVALINA et al. 2010).

Concernant la hauteur des pieds (plant height at maturity), des valeurs plus élevées sont trouvées dans la plupart des articles. Elles atteignent au moins 90 cm (et souvent plus d'un mètre) pour les En, et jusqu'à 1m50 pour certaines variétés de Am et de Sp (LONGIN et al. 2016 ; COSTANZO et al. 2019 ; OLIVEIRA 2001). Ceci rejoint les observations des paysan.ne.s, qui ont constaté que les pieds étaient beaucoup plus courts par rapport à d'autres années. A nouveau, cette taille réduite est certainement liée aux conditions climatiques de la saison, et dans certains cas, aux semis tardifs.

Enfin, bien que l'En est souvent associé à un tallage élevé (ZAHARIEVA et MONNEVEUX 2014), peu d'études fournissent des valeurs de nombres de talles ou d'épis par pied. Certaines estiment des densités d'épis, mais ne les rapportent pas au nombre de pieds ni à la densité de semis, hétérogène au sein d'un même essai (COSTANZO et al. 2019). Ainsi, il est difficile de comparer les valeurs obtenues dans cette étude à celles d'autres articles scientifiques. Cependant, d'après les observations des paysan.ne.s, le tallage a été très faible cette année. Le même constat a été établi par TURBET-DELOF in prep, sur les variétés paysannes de BT comprises dans l'évaluation du projet de sélection participative associant l'équipe DEAP et le RSP.

Finalement, concernant les rendements estimés (estimated yield), les valeurs trouvées chez SR pour l'En, l'Am et le GE sont assez cohérentes avec certaines études. Par exemple, LONGIN et al. 2016 obtiennent des rendements variant de 2 à 4 t/ha pour l'En, de 3 à 4 t/ha pour l'Am et de 4 à 6 pour le GE (LONGIN et al. 2016). Ces valeurs sont cependant atteintes avec une fertilisation azotée adaptée à chacune des espèces. Il est globalement difficile de comparer nos résultats à ceux de la littérature, car la plupart des études n'indiquent que des rendements bruts (en grains vêtus) (COSTANZO et al. 2019 ; BENCZE et al. 2020 ; DE VITA et al. 2007). On peut cependant supposer que le potentiel de rendement des variétés évaluées dans notre étude est supérieur aux rendements estimés. Dans la plupart des sites, les rendements ont été affectés par des densités de semis très faibles (notamment à cause d'accidents de culture), par un climat particulièrement sec, par des dates de semis tardives et, dans certains cas, par des fertilités de sol très faibles.

4.3.4.5 Perspectives

Les résultats issus du JD-MS suggèrent un effet de l'environnement sur la plupart des variables mesurées. L'analyse est cependant très limitée, notamment par les biais dans l'estimation de différentes variables. De plus, avec une seule année de données, et un dispositif très déséquilibré, j'ai dû me limiter à une analyse descriptive.

Il serait intéressant d'enrichir ces données avec d'autres évaluations des mêmes variétés sur plusieurs années, et dans les mêmes (ou plus) de sites. Les ravages d'oiseaux étant courants sur les essais de blé, une solution simple pour les limiter consisterait à prévoir des filets anti-oiseaux (mais pas des voiles de forçage, qui augmentent la température) pour tous les sites d'étude. Bien que plus lourds à mettre en place, des semis en rangs permettent aussi de faciliter le suivi au champ (pour les comptages de pieds et d'épis notamment). De plus, une homogénéisation des densités de semis sur l'ensemble des sites permettrait de s'affranchir des effets (par exemple sur les densités de pieds) induits par des densités variables. Concernant les estimations de densités de pied (plant density), il serait préférable de faire les comptages au stade « développement des feuilles » (BBCH 1). Ceci permettrait de mieux distinguer les pieds individuels (car le tallage n'a pas encore commencé et que les adventices sont moins présentes). Cependant, mener le suivi au champ aux stades de développement idéaux, sur plusieurs sites, dans un contexte de recherche participative, et avec un dispositif rassemblant des espèces dont les développements sont variables requiert non seulement de l'organisation, mais aussi des moyens humains. Dans le cas du dispositif présenté ici, cela n'aurait pas été possible, car la levée a été très tardive (elle n'était pas entièrement terminée avant l'enneigement des parcelles expérimentales dans certains sites).

Ici, nous avons examiné l'impact global de l'environnement sur diverses caractéristiques agronomiques et morphométriques de grains. Néanmoins, il serait intéressant d'analyser l'effet de stress précis (tel que le stress hydrique) à différents stades de développement des blés. En effet, plusieurs études montrent qu'en fonction de la date d'un stress donné, les impacts sur divers traits, dont le rendement, varient pour le BT. Par exemple, ZHANG et al. 2013 observent des baisses de rendement plus importantes lorsqu'un stress hydrique a lieu lors de la floraison que s'il a lieu pendant l'épiaison. GOODING et al. 2003 observent quant-à-eux une baisse du PMG (TKM) avec un stress hydrique pendant la période de remplissage des grains. Étant donné la tendance à une augmentation de la fréquence des printemps secs, il serait particulièrement pertinent d'étudier la réaction spécifique des blés vêtus à un stress hydrique survenant au printemps.

4.4 Conclusion

La première section de ce chapitre (4.2) a permis d'identifier les principales caractéristiques agronomiques et morphométriques des grains pour chacune des quatre espèces de blé. Il en est ressorti que l'En se différencie clairement des autres espèces, par un tallage élevé, un cycle de développement long, de petits pieds, des grains de petite taille, un rendement relatif faible et

des teneurs en protéines importantes. De plus, nous avons trouvé des caractéristiques morphométriques des grains spécifiques à l'En, au GE et au BT.

En ce qui concerne la variabilité intra-spécifique, nous avons observé des niveaux de diversité élevés parmi les variétés d'Am pour les variables agronomiques et morphométriques, et pour le GE, uniquement pour les variables agronomiques. Ainsi, contrairement à notre hypothèse initiale, nous n'observons pas systématiquement plus de diversité parmi les espèces de blés vêtus qu'au sein du BT. De plus, la variabilité intra-spécifique de la morphométrie des grains n'est pas apparue comme un proxy efficace pour évaluer la variabilité intra-spécifique des critères agronomiques. Il est toutefois important de préciser que ces estimations de diversité concernent les échantillons de variétés inclus dans cette étude particulière, et ne peuvent être généralisées à l'échelle de l'espèce.

Par ailleurs, nous avons identifié des variétés avec des caractéristiques notoires. Par exemple, l'Am *Bleu d'Ethiopie* se distingue par sa précocité et par son aspect non vêtu. L'En *Noir* est quant-à-lui plus précoce que les autres variétés d'En. En somme, l'En, tout comme certaines variétés d'Am et de GE, pourraient être plus adaptées que le BT à certains terroirs et pratiques culturales. Par rapport aux rendements, nous n'avons pas pu finaliser les estimations en raison de la destruction des épis par un orage de grêle sur le site du CRBA.

La deuxième section de ce chapitre (4.3) s'est intéressée à l'effet de l'environnement sur les variables agronomiques et morphométriques des grains. D'abord, les résultats confirment les tendances observées dans la section 4.2 pour l'En, et pour certaines variétés de blés vêtus. Ensuite, un niveau d'hétérogénéité important a été observé pour la plupart des variables agronomiques entre les différents sites. Concernant la morphométrie des grains, la taille des grains paraît être influencée par l'environnement, mais pas la forme.

Cette variabilité liée aux environnements a été analysée par rapport aux caractéristiques de sols. Si des tendances sont ressorties, les conclusions sont très limitées, car notre dispositif ne permet pas de dissocier les effets pédologiques de ceux liés au climat et aux pratiques culturales.

Pour valider ou infirmer nos hypothèses initiales, de futures expérimentations sont nécessaires. D'abord, pour confirmer les tendances observées pour chacune des espèces, pour certaines variétés en particulier, et pour réaliser des estimations des rendements. Ensuite, pour corroborer les différences constatées en termes de diversité intra-spécifique parmi nos échantillons de variétés. Enfin, pour aborder l'effet de l'environnement par des méthodes statistiques.

4.5 Bibliographie

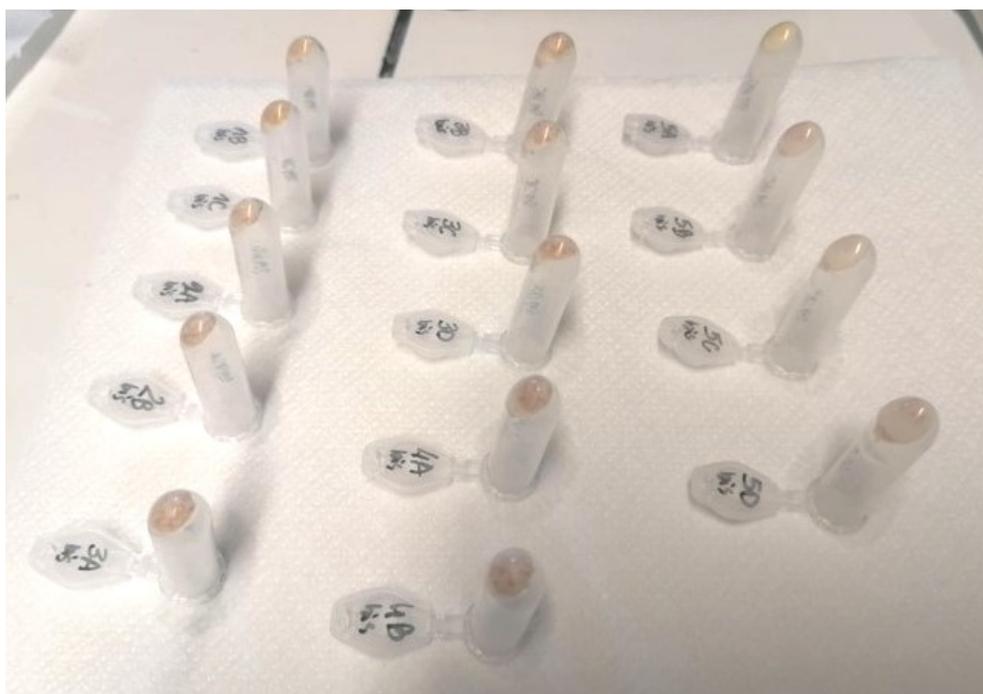
- BENCZE, S., M. MAKÁDI, T. J. ARANYOS, M. FÖLDI, P. HERTELENDY, P. MIKÓ, S. BOSI, L. NEGRI et D. DREXLER (2020). « Re-introduction of ancient wheat cultivars into organic agriculture—Emmer and einkorn cultivation experiences under marginal conditions ». In : *Sustainability* 12.4, p. 1584. DOI : [10.3390/su12041584](https://doi.org/10.3390/su12041584).
- CASTAGNA, R., B. BORCHI, N. DI FONZO, M. HEUN et F. SALAMINI (1995). « Yield and related traits of einkorn (*T. monococcum* ssp. *monococcum*) in different environments ». In : *European Journal of Agronomy* 4.3, p. 371-378. DOI : [10.1016/S1161-0301\(14\)80038-5](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(14)80038-5).
- COSTANZO, A., D. C. AMOS, G. DINELLI, R. E. SFERRAZZA, G. ACCORSI, L. NEGRI et S. BOSI (2019). « Performance and nutritional properties of einkorn, emmer and rivet wheat in response to different rotational position and soil tillage ». In : *Sustainability* 11.22, p. 6304. DOI : [10.3390/su11226304](https://doi.org/10.3390/su11226304).
- DE VITA, P., A. M. MASTRANGELO, P. CODIANNI et M. FORNARA (2007). « Bio-agronomic evaluation of old and modern wheat, spelt and emmer genotypes for low-input farming in Mediterranean environment ». In : *Italian Journal of Agronomy* 2.3, p. 291-302. DOI : [10.4081/ija.2007.291](https://doi.org/10.4081/ija.2007.291).
- DRECCER, M. F., S. C. CHAPMAN, A. R. RATTEY, J. NEAL, Y. SONG, J. (T. CHRISTOPHER et M. REYNOLDS (2013). « Developmental and growth controls of tillering and water-soluble carbohydrate accumulation in contrasting wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes : can we dissect them ? » In : *Journal of Experimental Botany* 64.1, p. 143-160. DOI : [10.1093/jxb/ers317](https://doi.org/10.1093/jxb/ers317).
- GEISLITZ, S., C. F. H. LONGIN, K. A. SCHERF et P. KOEHLER (2019). « Comparative study on gluten protein composition of ancient (einkorn, emmer and spelt) and modern wheat species (durum and common wheat) ». In : *Foods* 8.9, p. 409. DOI : [10.3390/foods8090409](https://doi.org/10.3390/foods8090409).
- GIUNTA, F., P. DE VITA, A. M. MASTRANGELO, G. SANNA et R. MOTZO (2018). « Environmental and genetic variation for yield-related traits of durum wheat as affected by development ». In : *Frontiers in plant science* 9, p. 8. DOI : [10.3389/fpls.2018.00008](https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00008).
- GOODING, M., R. ELLIS, P. SHEWRY et J. SCHOFIELD (2003). « Effects of restricted water availability and increased temperature on the grain filling, drying and quality of winter wheat ». In : *Journal of Cereal Science* 37.3, p. 295-309. DOI : [10.1006/jcrs.2002.0501](https://doi.org/10.1006/jcrs.2002.0501).
- HIDALGO, A., A. BRANDOLINI et S. RATTI (2009). « Influence of genetic and environmental factors on selected nutritional traits of *Triticum monococcum* ». In : *Journal of agricultural and food chemistry* 57.14, p. 6342-6348. DOI : [10.1021/jf901180q](https://doi.org/10.1021/jf901180q).
- KONVALINA, P., I. CAPOUCHOVÁ, Z. STEHNO et J. MOUDRY (2010). « Agronomic characteristics of the spring forms of the wheat landraces (einkorn, emmer, spelt, intermediate bread wheat) grown in organic farming ». In : *Journal of Agrobiological* 27.1, p. 9-17. DOI : [10.2478/s10146-009-0002-3](https://doi.org/10.2478/s10146-009-0002-3).
- LONGIN, C. F. H., J. ZIEGLER, R. SCHWEIGGERT, P. KOEHLER, R. CARLE et T. WÜRSCHUM (2016). « Comparative study of hulled (einkorn, emmer, and spelt) and naked wheats (durum and bread wheat) : Agronomic performance and quality traits ». In : *Crop Science* 56.1, p. 302-311. DOI : [10.2135/cropsci2015.04.0242](https://doi.org/10.2135/cropsci2015.04.0242).
- MOUDRY, J., P. KONVALINA, Z. STEHNO et I. CAPOUCHOVÁ (2011). « Ancient wheat species can extend biodiversity of cultivated crops ». In : *Scientific Research and Essay* 6.20, p. 4273-4280.
- OLIVEIRA, J. (2001). « North Spanish emmer and spelt wheat landraces : agronomical and grain quality characteristic evaluation ». In : *Plant Genetic Resources Newsletter*, p. 16-20.
- OURY, F.-X. et C. GODIN (2007). « Yield and grain protein concentration in bread wheat : how to use the negative relationship between the two characters to identify favourable genotypes ? » In : *Euphytica* 157.1-2, p. 45-57. DOI : [10.1007/s10681-007-9395-5](https://doi.org/10.1007/s10681-007-9395-5).

- TURBET-DELOF, M. (in prep). « Mieux évaluer les performances des blés paysans par une caractérisation de l'environnement de culture et des situations agricoles spécifiques ». Thèse de doct. Université Paris-Saclay.
- ZAHARIEVA, M. et P. MONNEVEUX (2014). « Cultivated einkorn wheat (*Triticum monococcum* L. subsp. *monococcum*) : the long life of a founder crop of agriculture ». In : *Genetic resources and crop evolution* 61, p. 677-706. DOI : [10.1007/s10722-014-0084-7](https://doi.org/10.1007/s10722-014-0084-7).
- ZHANG, X., J. CAI, B. WOLLENWEBER, F. LIU, T. DAI, W. CAO et D. JIANG (2013). « Multiple heat and drought events affect grain yield and accumulations of high molecular weight glutenin subunits and glutenin macropolymers in wheat ». In : *Journal of Cereal Science* 57.1, p. 134-140. DOI : [10.1016/j.jcs.2012.10.010](https://doi.org/10.1016/j.jcs.2012.10.010).

Caractérisation des compositions en protéines du gluten

Contenu

5.1	Introduction	226
5.2	Caractérisation des quatre espèces et estimation de la variabilité intra-spécifique	227
5.3	Effet de l'environnement	267
5.4	Conclusion	271
5.5	Bibliographie	273



Préparation des échantillons de chromatographie. Crédit photo : Justine Lepagneul.

5.1 Introduction

Ce chapitre s'intéresse à la caractérisation des compositions en protéines du gluten des grains des quatre espèces de blé étudiées. Il répond donc aux questions soulevées par le collectif, au sujet des différences nutritionnelles entre blés vêtus et blé tendre.

Le chapitre est divisé en deux sections. La première (5.2) décrit les compositions en protéines du gluten des trois espèces de blés vêtus, en comparaison au BT. Elle s'intéresse également à la variabilité intra-spécifique. Elle répond ainsi aux deux questions suivantes posées par le collectif :

- (1) *Les blés vêtus ont-ils des compositions en protéines du gluten différentes par rapport au blé tendre ?*
- (2) *Quelle est la variabilité intra-spécifique pour chaque espèce ?*

Pour la question (1), suite à des recherches bibliographiques et aux discussions collectives, nous avons émis l'hypothèse que :

- (a) Les blés vêtus, et en particulier l'En, auraient des compositions en protéines du gluten différentes par rapport à celles du BT. En particulier, les blés vêtus auraient moins de gluténines (GLUT), et surtout moins de gluténines de haut poids moléculaire (HMW-GS), hautement sélectionnées dans les variétés modernes de BT pour leur contribution aux propriétés technologiques (principalement en lien avec la panification).

En ce qui concerne la question (2), nous avons supposé que :

- (a) Les blés vêtus pourraient présenter une variabilité intra-spécifique supérieure à celle du BT, du fait qu'ils n'ont pas fait l'objet d'une sélection intensive sur un nombre de critères restreint.
- (b) Parmi les variétés de BT, les variétés paysannes se distingueraient des variétés modernes. Notamment, les variétés paysannes contiendraient moins de GLUT, et surtout de HMW-GS.

Pour répondre à ces deux questions, de la même façon que pour le chapitre 4, j'ai analysé uniquement les données issues de l'essai au CRBA (JD-CRBA), comprenant 31 variétés. Les résultats sont présentés sous format d'un article scientifique écrit en anglais dans la section 5.2.

Ensuite, la deuxième section (5.3) de ce chapitre interroge les effets des environnements sur les compositions en protéines du gluten des grains. Elle répond donc à la troisième question énoncée par le collectif :

(3) *Quelle est la variabilité liée à l'environnement sur la composition en protéines du gluten ?*

Par rapport à cette troisième question, nous avons énoncé les deux hypothèses suivantes :

- (a) Les compositions en protéines du gluten seraient peu influencées par un effet de l'environnement.
- (b) L'importance de l'effet de l'environnement pourrait varier en fonction des variables considérées.

Pour étudier l'effet de l'environnement, j'ai travaillé sur les données issues des parcelles des six fermes, en plus de celles du CRBA. Contrairement au chapitre précédent, seules certaines variétés du JD-MS ont été considérées. Ces variétés et leurs compositions en protéines du gluten sont présentées dans la section 5.3.

L'étude des compositions en protéines du gluten a été réalisée en partenariat avec Marie-Françoise Samson (UMR IATE) et Justine Lepagneul. Les analyses de chromatographie ont été effectuées par Justine, supervisée par Marie-Françoise. Ma contribution a porté sur la conception de l'étude, la préparation des échantillons (décorticage, broyage, etc.), l'analyse des données et la rédaction.

Dans le chapitre 4, les taux de protéines avaient été estimés par la méthode DUMAS. Dans ce chapitre, les taux de protéines présentés ont été mesurés par chromatographie.

5.2 Caractérisation des quatre espèces et estimation de la variabilité intra-spécifique

Cette section a été rédigée en anglais, sous forme d'un article scientifique. L'appendice (« appendix » en anglais) 3 est le jeu de données complet, et l'appendice 4 est un fichier html avec toutes les sorties des modèles. Ils ne sont donc pas inclus dans ce manuscrit.

Unraveling gluten protein compositions of einkorn, emmer and spelt grown in the Lyon region in France

Sofia Correa^{1,2,3,4,&} (0009-0004-7842-6826), Justine Lepagneul^{2,6,&}, Mathieu Thomas^{3,4} (0000-0001-5803-9547), Laurence Mayaud⁵, Olivier Hamant¹ (0000-0001-6906-6620), Marie-Françoise Samson⁶ (0000-0001-8770-2395), Marie-Thérèse Charreyre² (0000-0002-1303-0888)

1. Laboratoire de Reproduction et Développement des Plantes, ENS de Lyon, Université Lyon 1, CNRS 5667, INRAE, F-69007 Lyon, France ;

2. Université Lyon1, INSA Lyon, UMR CNRS 5223, Ingénierie des Matériaux Polymères, Villeurbanne, F-69622, France ;

3. CIRAD, UMR AGAP Institut, F-34398 Montpellier, France ;

4. UMR AGAP Institut, Univ Montpellier, CIRAD, INRAE, L'Institut Agro-Montpellier, F-34398 Montpellier, France ;

5. 24 Chemin du Vivier, F-69126 Brindas, France ;

6. IATE, Univ Montpellier, INRAE, L'Institut Agro-Montpellier, F-34060 Montpellier, France.

& : Sofia Correa and Justine Lepagneul should be considered joint first author.

Correspondence : Marie-Françoise Samson, Email : marie-francoise.samson@inrae.fr ; Marie-Thérèse Charreyre, Email : marie-therese.charreyre@univ-lyon1.fr

ORCID

Sofia Correa: **0009-0004-7842-6826**

Mathieu Thomas: **0000-0001-5803-9547**

Olivier Hamant: **0000-0001-6906-6620**

Marie-Françoise Samson : **0000-0001-8770-2395**

Marie-Thérèse Charreyre: **0000-0002-1303-0888**

ABSTRACT

Background and objectives: Minor species of wheat, including einkorn (Ei), emmer (Em) and spelt (Sp) are believed to have different gluten compositions compared to common wheat (CW). Given the limited research on these resources, and as a result of a collaboration with a collective of farmers, we aimed to provide insights into their gluten compositions. We focused on varieties readily accessible to farmers and bakers within the region of Lyon, France.

Findings: We compared gluten compositions in 31 wheat varieties, revealing significantly lower glutenin and protein aggregate contents in Ei and Em than in CW. Similar trends, though milder, were observed for Sp. Additionally, we observed intra-species variability, especially for Em, and identified varieties within each species with noteworthy protein profiles.

Conclusions: Each species exhibited characteristic protein contents, yet with intra-species variability. Utilizing an innovative approach to analyze the full information provided by chromatograms, we successfully identified varieties with unusual characteristics.

Significance and novelty: The specific protein compositions of Ei and Em, and to a lower extent Sp, may impact their processability and digestibility. Our study also highlights that considering complete chromatographic profiles can reveal differences that remain unnoticed when employing traditional analytical approaches.

KEYWORDS

Gluten, Hulled wheats, Osborne fractions, Protein, RP-HPLC, SE-HPLC

1. INTRODUCTION

Triticum aestivum spp. *aestivum* known as “common wheat” (CW) is the most widely grown species of wheat worldwide (de Sousa et al., 2021; Kucek et al., 2015). It is commonly used for bread making. While genetically heterogeneous varieties (landraces) were grown in the past, today, genetically homogeneous varieties (modern varieties) are largely dominant in industrialized countries (Bonnin et al., 2014). Indeed, since the end of the 19th century, selection for uniform, high-yielding varieties with specific technological properties was intensely carried out to meet the demands of standard and industrialized food systems (Bonneuil & Thomas, Frédéric, 2009). However, according to some authors, this selection was done at the expense of nutritional and health benefits (Garvin et al., 2006; Rémésy et al., 2015).

In recent decades, there has been growing concern among the population regarding health issues associated with the consumption of wheat-based products (Kucek et al., 2015; Rémésy et al., 2015, Scherf, 2019). Celiac disease is a well-described pathology caused by gluten ingestion, which has seen its prevalence increase of up to fourfold in the last 50 years (Kucek et al., 2015). In addition, a new

pathology has emerged, named non-celiac wheat sensitivity (NCWS) (Kucek et al., 2015; Rémésy et al., 2015; Bouteloup, 2016). Since the rise of NCWS and celiac disease occurred in a similar timeframe than the selection of CW modern varieties, it has been suggested that these varieties may have contributed to the development of gluten-linked pathologies, especially NCWS (Rémésy et al., 2015).

Gluten is a viscoelastic network composed by two types of storage proteins: gliadins (GLIA) and glutenins (GLUT) (Delcour et al., 2012; Biesiekierski, 2017). When water is added to the flour, GLIA and GLUT form entanglements around starch granules, leading to the formation of gluten (Delcour et al., 2012). Gluten-forming proteins account for 80-90% of total proteins in the CW kernel (Delcour et al., 2012; Biesiekierski, 2017; Wieser et al., 2023) and provide the essential amino acids for germination (Delcour et al., 2012). GLIA are globular monomeric proteins, with MW ranging from 30,000 to 80,000 g/mol (Veraverbeke & Delcour, 2002). According to their electrophoretic mobility, GLIA can be further subdivided into three subcategories: omega-gliadins (ω -GLIA), alpha/beta-gliadins (α/β -GLIA), and gamma-gliadins (γ -GLIA) (Delcour et al., 2012). On the other hand, GLUT are rod-like proteins that form large aggregates through disulfide bonds, possibly exceeding twenty millions g/mol (Delcour et al., 2012). Based on their MW, GLUT can be subdivided into high MW glutenin subunits (HMW-GS, 70,000 to 90,000 g/mol) and low MW glutenin subunits (LMW-GS, 20,000 to 45,000 g/mol) (Delcour et al., 2012). Additionally, the wheat kernel contains non-gluten proteins known as albumins (ALB) and globulins (GLOB), which are generally monomeric, of MW below 25,000 g/mol (Veraverbeke & Delcour, 2002) and ensure enzymatic reactions as well as cell structure (Delcour et al., 2012). Today, the analysis of wheat proteins is predominantly carried out using size-exclusion (SE) and reverse-phase (RP) high-performance liquid chromatography (HPLC) (Kiszonas & Morris, 2018). SE-HPLC (so-called SEC in polymer community) enables the quantification of monomeric and polymeric proteins. On the other hand, RP-HPLC is commonly used after a sequential extraction of three protein fractions: ALB and GLOB (ALB+GLOB), GLIA, and GLUT, originally developed by Osborne (1907). RP-HPLC enables the analysis of sub-categories within each protein fraction.

As CW modern varieties are potentially associated with health disorders, there has been increased interest in so-called “ancient cereals” which are frequently associated with health benefits (Shewry & Hey, 2015; Dinu et al., 2018; Shewry, 2018). Hulled wheats, such as einkorn (*Triticum monococcum* ssp. *monococcum*, hereafter Ei), emmer (*Triticum turgidum* ssp. *dicoccum*, hereafter Em) and spelt (*Triticum aestivum* ssp. *spelta*, hereafter Sp) belong to this category of “ancient cereals” (Shewry & Hey, 2015). Ei, a diploid wheat (genome A^mA^m), and Em, a tetraploid wheat (genome AABB) belong to the first domesticated crops, while Sp and CW, which are hexaploid (genome AABBDD), are more recently domesticated crops (Bonjean, 2001). Ei, Em and Sp have been widely replaced by CW due to their lower yields and the presence of a protective hull that remains attached to the kernels after threshing (Padulosi, 1996). Nevertheless, and although scientific debate persists on the matter, it is commonly believed that hulled wheats are of increased nutritional quality (Shewry & Hey, 2015; Dinu et al., 2018)

and that their consumption does not lead to health disorders as CW modern varieties, notably concerning gluten (Kucek et al., 2015; Scherf, 2019). Hulled wheats are also of interest because of their agronomical robustness and their adaptation to organic farming practices (Moudry et al., 2011).

A few studies have shown that hulled wheats have higher protein contents (Longin et al., 2016; Geisslitz et al., 2018, 2019) and comparable or slightly higher proportions of gluten proteins (GLIA and GLUT) in comparison to CW (Geisslitz et al., 2018, 2019). Furthermore, recent findings suggest that Ei stands out from other wheat species in terms of GLIA composition, especially due to its high contents of α -GLIA and ω 5-GLIA (Geisslitz et al., 2018; Wieser et al., 2023). Even if most studies indicate that hulled wheats do have different gluten protein compositions (distribution of the different types and subcategories of gluten proteins) than CW, these results are not consolidated yet. For instance, the study of Call et al. (2020) reports contradictory results from those of Geisslitz et al. (2018, 2019). As mentioned by the authors and by Wieser et al. (2023), these conflicting outcomes might be due to intra-species and environmental variability. Nonetheless, such contradictory results and the limited number of existing studies emphasizes the necessity for further research on gluten protein compositions in hulled wheats.

This study was conducted in the framework of participatory research. In fact, in a context of an alternative to industrialized agriculture, several groups of farmers across Europe, notably in France, have been engaged since the early 2000s in enhancing their local autonomy concerning species and varieties (Bocci & Chable, 2009; Demeulenaere & Bonneuil, 2011). We worked with one of these farmer collectives located in the Lyon region in France. This particular group was especially interested in expanding their understanding of the agronomical and nutritional characteristics of hulled wheats, as they aimed to incorporate these species into their farming systems. Regarding nutritional aspects, their main interest concerned the gluten protein composition.

This article details the compositions of gluten-forming proteins across a set of Ei, Em and Sp varieties, comparing them to a set of CW modern and landrace varieties. Most of the evaluated varieties are readily available for farmers within the Lyon region, and all of them were cultivated organically in the same region in 2021-2022. It is also worth noting that the gluten protein composition of most of these varieties has never been analyzed previously. More precisely, we first compared the total protein content, the total gluten proportion and the gluten composition (assessed by chromatography) of the four species. Second, we measured intra-species variability and identified unique varieties with unusual characteristics. For the evaluation of variability, we applied an innovative method that uses the full information contained in the chromatograms.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Plant material

Twenty-three varieties of hulled wheats (seven Ei, eight Em and eight Sp) and eight varieties of CW (four mixtures of landraces, two mixtures of modern varieties and two modern varieties) were evaluated for protein composition (table 1 and appendix 1). With only one exception (Sp *Arduinii*), all the varieties came from farms or associations dedicated to the conservation of genetic resources. Furthermore, a majority of these varieties came from farms or organizations located in the center-east of France, making them easily accessible to farmers in this area. The remaining varieties were obtained either from farms in the northern part of France (Ei *Mix JMG*, Sp *Oberkulmer*, Sp *Tyrolien Rouge*, CW *Apache* and CW *Energo*) or from Spain (Sp *Escanda de Asturias*). All the varieties were grown close to Lyon (France), at the Centre de Ressources de Botanique Appliquée (CRBA, Charly, Lat 45.6°N, Long 4.8°E, Alt 242 m) during the season 2021/2022, in a complete-randomized block design with two blocks, under organic management.

TABLE 1 Hulled wheat and common wheat varieties evaluated for protein composition¹. ^a For most hulled wheat varieties, breeding information is highly incomplete. As these species did not undergo intensive professional breeding, we hypothesized that varieties with no breeding information were landraces.

Variety name	Origin of the seeds	Type of variety
Einkorn (<i>Triticum monococcum</i> subsp. <i>monococcum</i>)		
<i>Allemand</i>	Association Graines de Noé (Côte d'Or, France)	Probably landrace ^a
<i>de Bulgarie</i>	CRBA (Rhône, France)	Probably landrace ^a
<i>Graines de l'Ain</i>	Association Graines de l'Ain (Ain, France)	Probably landrace ^a
<i>Mix JMG</i>	Farm in the Marne (France)	Mixture of 5 landraces
<i>Noir</i>	Farm in Haute-Savoie (France)	Probably landrace ^a
<i>Petit épeautre de Provence</i>	CRBA (Rhône, France)	Mixture of landraces
<i>Pop de Barcelonnette</i>	CRBA (Rhône, France)	Probably landrace ^a
Emmer (<i>Triticum turgidum</i> subsp. <i>dicoccum</i>)		
<i>Blanc</i>	CRBA (Rhône, France)	Probably landrace ^a
<i>Blanc long</i>	CRBA (Rhône, France)	Probably landrace ^a
<i>Bleu d'Ethiopie</i>	CRBA (Rhône, France)	Unknown
<i>de la Forêt Noire</i>	CRBA (Rhône, France)	Probably landrace ^a
<i>de Poveda</i>	Association Graines de Noé (Côte d'Or, France)	Probably landrace ^a
<i>de Souabe</i>	Association Graines de Noé (Côte d'Or, France)	Probably landrace ^a

¹ “Modern varieties” refer to highly uniform varieties developed by professional breeders after the 1960s and registered in either the French or the European catalogue; “historical varieties” refer to varieties developed by professional breeders prior the 1960s and “landraces” refer to genetically heterogeneous varieties selected by generations of farmers.

5.2. CARACTÉRISATION DES QUATRE ESPÈCES ET ESTIMATION DE LA VARIABILITÉ INTRA-SPÉCIFIQUE

<i>Gris</i>	Association Graines de Noé (Côte d'Or, France)	Probably landrace ^a
<i>Roux Blanc</i>	Association Graines de Noé (Côte d'Or, France)	Probably landrace ^a
Spelt (<i>Triticum aestivum</i> subsp. <i>spelta</i> (L.) Thell.)		
<i>Arduinii</i>	INRAE gene bank Centre de Ressources Biologiques Céréales à Paille (CRB) (Clermont-Ferrand, France)	Probably landrace ^a
<i>de Manitoba</i>	CRBA (Rhône, France)	Probably landrace ^a
<i>Doré</i>	Farm in Haute-Savoie (France)	Landrace or historical variety
<i>Escanda de Asturias</i>	Farm in León (Spain)	Probably landrace ^a
<i>Oberkulmer</i>	Farm in the Marne (France)	Landrace
<i>Ressac</i>	Association Graines de Noé (Côte d'Or, France)	Modern variety
<i>Rouquin</i>	Association Graines de Noé (Côte d'Or, France)	Modern variety
<i>Tyrolien Rouge</i>	Farm in Normandie (France)	Landrace
Common wheat (<i>Triticum aestivum</i> subsp. <i>aestivum</i>)		
<i>Mix HP&DM</i>	Farm in Rhône (France)	Mixture of landraces
<i>Mix CD</i>	Farm in Isère (France)	Mixture of landraces
<i>Mix SR</i>	Farm in Loire (France)	Mixture of landraces
<i>Mix GA</i>	Farm in Ain (France)	Mixture of 4 landraces + historical varieties
<i>Mix PG</i>	Farm in Isère (France)	Mixture of 4 modern varieties + small amounts of landraces
<i>Mix CM</i>	Farm in Loire (France)	Mixture of 5 modern varieties + small amounts of landraces
<i>Apache</i>	Farm in the Marne (France)	Modern variety
<i>Energo</i>	Farm in the Marne (France)	Modern variety

2.2 Sample preparation

After harvest, 60 g of ears of each plot were threshed and dehulled (for hulled wheats) using a laboratory threshing machine (S.R.C. s.a., Château-du-Loir, France). Then, 12 g of kernels were milled with a Cyclotec 1093 mill (Foss France, Nanterre, France), using a 0.5 mm grid. For each variety, 5 g of wholegrain flour from the two plots were mixed together to obtain a unique 10 g sample per variety.

For each sample, moisture content was determined. Approximately 5 g of wholegrain flour were dried at 130°C for 2 hours, and cooled down in a desiccator before weighting. Moisture content was then calculated following the AACC method 44-15.02 (AACC International, 1999).

2.3 Chromatography analyses

Protein composition was determined by SE-HPLC and RP-HPLC. All reagents were of analytical quality. Solvents used for the RP-HPLC were HPLC grade. Water used for chromatographic analysis was Milli Q water. The HPLC system Alliance 2695 and the photodiode array detector 2998 (Waters, Saint-Quentin en Yvelines, France) were controlled by the Empower 3 software (Waters, Saint-Quentin en Yvelines, France) also used to record the absorbance data and to make integrations.

2.3.1 SE-HPLC

A two-step extraction was done to extract the proteins from the flour samples as described by (Morel et al., 2000) with minor modifications. For each sample, 160 mg flour were suspended in 20 mL of sodium phosphate buffer (0.1 mol/L, pH 6.9) containing 1% (w/v) SDS and stirred for 80 min at 60°C. After centrifugation (30 min, 39,000 g, 20°C), an aliquot of supernatant (SDS-soluble protein extract) was transferred in a HPLC vial and stored at -20°C until analysis. To extract insoluble protein fraction (Fi), the pellet was resuspended with 5 mL of SDS-phosphate buffer and sonicated using a Vibra Cell 72434 sonicator (Bioblock Scientific, Illkirch, France) for 3 min at 3.5 watts for CW and at 7.5 watts for HW. Tubes were then centrifuged and supernatant was preserved at -20°C as described above. All extractions were done in triplicate.

A size-exclusion analytical column TSKgel G4000SWxl (300 x 7.8 mm, 450Å) (Tosoh Biosciences, Sigma-Aldrich, Saint Quentin Fallavier, France) was used with a guard column TSKgel SW-type (40 x 6 mm) (Tosoh Biosciences, Sigma-Aldrich, Saint Quentin Fallavier, France). Protein injection and elution were carried out as described by (Morel et al., 2000). Absorbance was recorded at 214 nm. A control sample (frozen stored CW protein extract) was analyzed every ten samples.

2.3.2 RP-HPLC

ALB+GLOB, GLUT and GLIA were extracted according to Wieser et al. (1998). For each sample, wholegrain flour (50 mg) was sequentially extracted: twice with 500 µL of Solvent 1 (0.067 mol/L Na₂HPO₄/KH₂PO₄, pH 7.6 with 0.4 mol/L NaCl) at room temperature (RT) to extract ALB/GLOB; then, three times with 500 µL of Solvent 2 (60% (v/v) ethanol) at RT to extract GLIA; and finally, twice with 500 µL of Solvent 3 (50% (v/v) 1-propanol, 0.05 mol/L Tris-HCl (pH 7.5), 2 mol/L urea, 1% (w/v) dithioerythritol) at 60°C to extract monomeric GLUT. Each extraction was started by vortexing for a few seconds. Extractions 1 and 2 were continued with stirring (10 min); for extraction 3, the tubes were purged with argon then placed for 30 min at 60°C, with vortexing after 15 min. Between each extraction step samples were centrifuged (15 min for solvent 1, 20 min for solvents 2 and 3, 6,000 g, 20°C and the corresponding supernatants were combined in HPLC vials. Samples were stored at -20°C until analysis. All sequential extractions were done in triplicates.

A reverse-phase C₁₈ silica gel analytical column (250 x 2.1 mm, 300Å) (ACE, AIT France, Cormeilles-en-Parisis, France) was used. Column temperature was maintained at 50°C, and flow rate was 0.2 mL/min. Absorbance was recorded at 210 nm. Then, 10 µL of each extract were injected onto the column, without prior filtration. Proteins were eluted with a gradient of solvents A (0.1% (v/v) trifluoroacetic acid (TFA) in Milli Q water) and B (0.08% (v/v) TFA in acetonitrile). ALB+GLOB extracts: 0 min 20% B, 20 min 60% B, 23 min 90% B, 28 min 90% B, 32 min 20% B, 42 min 20% B. Gliadin and glutenin extracts: 0 min 28% B, 30 min 56% B, 33 min 90% B, 38 min 90% B, 41 min 28% B, 51 min 28% B.

2.3.3 Peak integration and calculation of protein fractions

For the SE-HPLC first extract, five fractions were distinguished: F1 with the largest GLUT aggregates, F2 containing medium-size and small-size GLUT aggregates, F3 with HMW ALB and ω -GLIA, F4 with α/β - and γ -GLIA and F5 containing ALB+GLOB (Morel et al., 2000).

For the SE-HPLC second extract, the total area under the chromatogram represents the insoluble protein fraction (F_i). A total sample area was calculated by summing areas of both extracts. Then, each fraction was expressed as a percent of the total sample area ($F1\%$, $F2\%$, $F3\%$, $F4\%$, $F5\%$, $F_i\%$). Finally, unextractable polymeric protein percentage (UPP%) was calculated as follows (Gupta et al., 1993):

$$UPP(\%) = \frac{F_i\% \times 100}{(F1\% + F2\% + F_i\%)} \quad (1)$$

Total protein content was estimated by multiplying the total sample area by a factor based on UV response for the control sample and chromatographic settings. Obtained values (in g for 100g of wholegrain flour, expressed as % of a dry basis, db) were validated by comparing them to those obtained by the DUMAS combustion method, that determines total nitrogen content. Regression coefficients (R) between the two methods were of 0.97 (p -value = 6.4e-05) for CW and of 0.99 for the three hulled wheat species (p -value = 3.9e-05 for Ei, 3.9e-07 for Em and 7.4e-07 for Sp).

For the RP-HPLC, all fractions were first calculated relatively to the summed area of the three extractions (ALB+GLOB, GLIA, GLUT), to obtain values in percentage of total extracted proteins. The proportions of sub-categories of GLIA and GLUT were also calculated relatively to the gluten-forming proteins (summed area of GLIA and GLUT). Chromatograms of SE-HPLC and RP-HPLC, with the limits corresponding to each protein fraction are shown in the appendix 2. Individual values for each SE and RP-HPLC fractions (for each triplicate), together with means and standard deviations for each variety are shown in Table S5.

2.4 Statistical analyses

All analyses were done with the software R (version 4.2.2).

2.4.1 ANOVA

To assess the effect of species and of varieties on the protein compositions (proportions of different fractions measured by SE- and RP-HPLC) we ran the following ANOVA model for all protein fractions:

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_{jvi} + \varepsilon_{ijk} \quad (2)$$

In this model, μ was the intercept term, α_i accounted for the fixed effect of the i th species, β_{jvi} accounted for the fixed effect of the j th variety nested in the i th species and ε_{ijk} was the random residual with k from 1 to 3, corresponding to the 3 technical replicates. Estimated marginal means (emmeans) were then

calculated for each species, means were calculated for each variety, and pairwise comparisons (between species and between varieties) were achieved using Tukey HSD method with Bonferroni adjustment for *p-values* (packages emmeans 1.8.2 and multcompView 0.1.8). For all variables, the graphs of residuals of the models as well as outputs of both ANOVA and emmean comparisons are shown in S6.

2.4.2 PCA

To better evaluate between- and within-species variability related to gluten proteins, we analyzed the RP-HPLC data, using two PCAs. The first PCA was conducted on the mean values per variety (mean of triplicates) of the traditional gluten protein fractions (Gluten, GLIA, GLUT, ω -GLIA, α/β -GLIA, γ -GLIA, HMW-GS, LMW-GS) and ratios (GLIA/GLUT, LMW/HMW) determined by RP-HPLC.

The second PCA was run on the complete GLIA and GLUT RP-HPLC chromatographic profiles of each variety (mean of triplicates), using a similar method to that proposed by Pronin, Geisslitz, et al. (2020). More precisely, we considered absorbance values at all time points (every 0.0167 min, corresponding to the photodiode array detector acquisition rate). Absorbance values of the GLIA chromatogram (from 5.33 to 32.27 min) and of the GLUT chromatogram (from 9.73 to 31 min) were combined in a single data set prior achieving the PCA. Additional PCAs were run separately on the GLIA and GLUT absorbance values (appendix 5). All PCA were done using the package FactoMineR 2.6.

The analysis on the complete absorbance values of the GLIA and GLUT fractions was completed by a hierarchical clustering analysis using k-means and euclidean distances together with a heatmap visualization of the matrix. For the clustering analysis, we explored results obtained with different numbers of clusters (k). The clustering analysis and the heatmap were done using the package Complex Heatmaps 2.14. Clustering analysis and heatmap visualization were also achieved separately on the GLIA and GLUT absorbance values (appendix 5).

3. RESULTS

3.1 Total proteins and unextractable protein aggregates

The primary objective of this research was to compare the protein composition of Ei, Em, Sp and CW, with a particular focus on gluten proteins. We first assessed total protein content and unextractable polymeric protein proportion (UPP%) by SE-HPLC.

TABLE 2 (next page) Protein composition determined by SE-HPLC on wholegrain flours for all varieties: protein fractions from F1 to F5 (as % of the total protein content), Fi (SDS-unextractable polymeric proteins as % of the total protein content), UPP % and total protein content (% db). For each variety, values are means of triplicates. For each fraction and each species, emmean values with different letters are significantly different (*p-value* < 0.05, Tukey test).

5.2. CARACTÉRISATION DES QUATRE ESPÈCES ET ESTIMATION DE LA VARIABILITÉ INTRA-SPÉCIFIQUE

	F1 (% total prot)	F2 (% total prot)	F3 (% total prot)	F4 (% total prot)	F5 (% total prot)	Fi (% total prot)	UPP (%)	Total proteins (%db)
Allemand	9.0	17.0	14.8	36.4	19.6	3.1	10.7	17.4
de Bulgarie	8.5	17.1	16.9	36.4	18.5	2.7	9.5	18.4
Graines de l'Ain	8.5	17.0	17.3	36.5	17.9	2.9	10.1	19.9
Mix JMG	9.1	18.2	17.3	35.4	16.5	3.5	11.5	17.8
Noir	8.6	16.9	10.7	37.7	17.1	9.0	26.1	15.6
PE de Provence	9.1	18.5	16.5	34.7	17.3	3.9	12.4	17.2
Pop de Barcelonnette	8.5	18.2	17.8	35.9	16.3	3.3	10.8	18.6
Emmean Ei	8.8 d	17.5 d	15.9 d	36.1 b	17.6 d	4.1 a	13.0 a	17.8 d
Blanc	8.0	18.2	12.2	36.8	17.5	7.3	21.7	14.6
Blanc long	6.5	15.5	14.6	40.6	17.4	5.4	19.8	12.9
Bleu d'Ethiopie	6.0	15.3	10.9	44.1	16.6	7.1	24.9	15.2
de la Forêt Noire	5.7	14.6	13.1	42.1	15.7	8.8	30.1	14.7
de Poveda	7.2	16.1	16.5	37.8	15.4	7.0	23.2	17.4
de Souabe	6.1	15.4	12.7	41.0	16.6	8.1	27.4	14.1
Gris	6.4	14.3	13.3	43.3	15.6	7.2	25.7	18.1
Roux Blanc	6.6	18.6	13.3	37.1	15.4	8.8	25.9	15.6
Emmean Em	6.6 c	16.0 b	13.3 c	40.4 d	16.3 b	7.5 b	24.8 b	15.3 c
Arduinii	7.2	16.6	12.1	41.0	16.2	7.0	22.8	14.1
de Manitoba	6.3	17.1	12.4	34.2	14.3	15.6	40.0	14.6
Doré	6.8	16.6	13.0	37.4	14.7	11.5	32.9	13.9
Escanda de Asturias	6.6	16.7	11.6	36.5	15.0	13.6	37.0	14.4
Oberkulmer	7.1	18.2	12.4	39.4	14.1	8.8	25.7	18.7
Ressac	5.5	15.9	11.6	37.2	16.9	13.0	37.7	15.3
Rouquin	6.0	16.3	11.3	38.7	16.8	10.8	32.6	12.8
Tyrolien Rouge	5.3	15.4	12.5	38.3	13.9	14.6	41.4	15.5
Emmean Sp	6.4 b	16.6 c	12.1 a	37.8 c	15.2 a	11.9 c	33.8 c	14.9 b
Mix HP&DM	6.3	16.4	12.5	38.2	16.4	10.3	31.2	13.1
Mix CD	6.1	15.9	13.3	37.9	14.7	12.0	35.3	13.7
Mix SR	6.5	16.6	13.6	37.5	15.1	10.7	31.6	14.6
Mix GA	5.6	16.1	12.6	35.4	16.7	13.6	38.7	12.9
Mix CM	4.3	14.4	12.0	34.5	18.0	16.9	47.5	10.4
Mix PG	4.8	15.1	11.7	35.1	17.1	16.2	44.8	12.5
Apache	5.8	16.4	11.6	31.4	18.3	16.5	42.6	10.9
Energo	4.0	14.1	12.8	36.2	16.6	16.2	47.1	11.7
Emmean CW	5.4 a	15.6 a	12.5 b	35.8 a	16.6 c	14.0 d	39.8 d	12.5 a

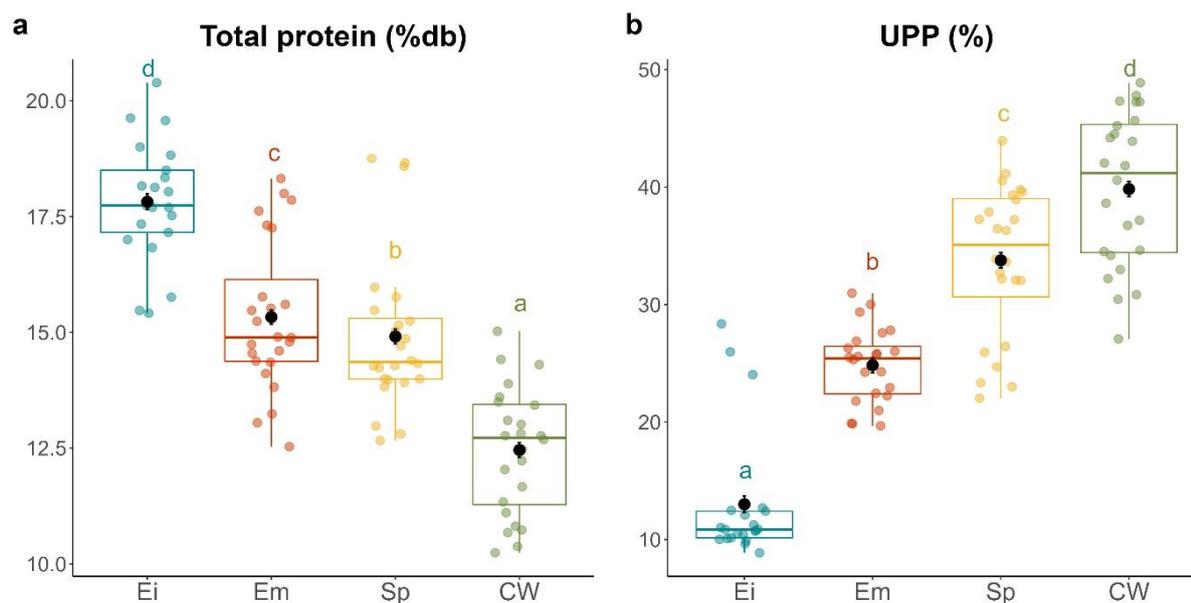


FIGURE 1 Total protein content and UPP% for the different species determined by SE-HPLC on wholegrain flours. For each species, black dots represent emmeans and error bars represent 0.95 confidence intervals. Colored dots indicate values for each triplicate. Species with different letters are significantly different (p -value < 0.05, Tukey test). Ei: einkorn, Em: emmer, Sp: spelt, CW: common wheat.

Total protein content was significantly different between the four species (figure 1a, table 2). It was the highest for Ei (17.8% db in average), followed by Em (15.3% db), Sp (14.9% db) and finally CW (12.5% db). The UPP% was highly significantly different between the four species (figure 1b, table 2). The lowest value was observed for Ei (13.0%), followed by Em (24.8%), Sp (33.8%) and CW (39.8%). Within each species, significant differences between varieties were also observed for protein content and UPP% (S6). For instance, Ei variety *Noir* had a lower protein content (15.6% db) and a higher UPP% (26.1%) than the other Ei varieties. Within Em, varieties *Gris* and *de Poveda* had the highest protein contents (18.1 and 17.4% db, respectively), while *Blanc long* had the lowest one (12.9% db). Within Sp, *Oberkulmer* stood out for its high protein content (18.7% db), while a low value was observed for *Rouquin* (12.8% db). Sp *Arduinii* and Sp *Oberkulmer* had notably low UPP% (22.8 and 25.7%, respectively) compared to the average value for Sp varieties (33.8%). Finally, within CW, varieties *Mix CM*, *Apache* and *Energo* had significantly lower protein contents (10.4, 10.9 and 11.7% db, respectively). These three varieties, together with *Mix PG* also had significantly higher UPP% (values ranging from 43% for *Apache* to 47% for *Mix CM*) (S6).

3.2 Gluten composing proteins

The proportions of gluten forming proteins (GLIA and GLUT) and subcategories within these families were analyzed by RP-HPLC after sequential extraction of each protein fraction.

TABLE 3 (next page) Protein composition measured by RP-HPLC on wholegrain flours: ALB+GLOB, GLIA subcategories, GLUT subcategories, total GLIA, total GLUT and total gluten (GLIA + GLUT) are expressed as % of the total protein content. Ratios of GLIA/GLUT and LMW/HMW are also displayed. Values are emmeans of triplicates. For each fraction and each species, emmean values with different letters are significantly different (p -value < 0.05, Tukey test).

CHAPITRE 5. CARACTÉRISATION DES COMPOSITIONS EN PROTÉINES DU GLUTEN

	ALB/GLOB (% total prot)	ω-GLIA (% total prot)	α/β- GLIA (% total prot)	γ-GLIA (% total prot)	Total GLIA (% total prot)	LMW- GS (% total prot)	HMW- GS (% total prot)	LMW/HMW	Total GLUT (% total prot)	GLIA/GLUT	Gluten (% total prot)
Allemand	24.0	3.7	44.9	17.8	66.3	7.5	2.2	3.5	9.7	6.9	76.0
de Bulgarie	22.3	3.5	45.5	18.7	67.6	7.7	2.3	3.4	10.0	6.7	77.7
Graines de l'Ain	20.7	3.3	46.2	19.4	68.9	8.1	2.3	3.5	10.4	6.8	79.3
Mix JMG	20.0	4.7	45.6	19.0	69.3	8.4	2.2	3.8	10.7	6.6	80.0
Noir	21.9	5.5	47.0	13.0	65.4	10.0	2.7	3.7	12.7	5.2	78.1
PE de Provence	20.3	4.5	42.8	21.1	68.3	9.1	2.3	4.0	11.4	6.0	79.7
Pop de Barcelonnette	19.4	4.3	43.5	20.5	68.2	9.8	2.6	3.7	12.4	5.7	80.6
Emmean Ei	21.2 b	4.2 a	45.1 c	18.5 a	67.7 d	8.7 a	2.4 a	3.7 c	11.0 a	6.3 c	78.8 a
Blanc	23.4	3.9	31.1	22.4	57.3	14.8	4.6	3.2	19.3	3.0	76.6
Blanc long	23.6	9.4	29.9	21.4	60.6	10.5	5.2	2.0	15.8	3.9	76.4
Bleu d'Ethiopie	21.2	8.3	35.3	17.6	61.2	12.3	5.3	2.3	17.6	3.5	78.8
de la Forêt Noire	20.4	8.7	31.6	23.1	63.4	10.2	5.9	1.7	16.1	3.9	79.6
de Poveda	22.9	11.8	22.0	24.1	57.9	12.3	6.9	1.8	19.2	3.0	77.1
de Souabe	22.4	7.7	28.9	24.5	61.2	10.9	5.5	2.0	16.4	3.7	77.6
Gris	19.6	9.2	35.5	22.8	67.5	8.3	4.6	1.8	12.9	5.2	80.4
Roux Blanc	20.8	6.6	31.9	22.0	60.5	14.6	4.1	3.6	18.6	3.2	79.2
Emmean Em	21.8 b	8.2 c	30.8 b	22.2 b	61.2 c	11.8 b	5.3 b	2.3 a	17.0 b	3.7 b	78.2 a
Arduinii	19.6	7.6	24.9	28.4	60.9	13.9	5.6	2.5	19.5	3.1	80.4
de Manitoba	17.5	7.4	24.5	20.1	52.0	21.2	9.3	2.3	30.5	1.7	82.5
Doré	18.8	10.9	26.6	16.7	54.2	17.3	9.6	1.8	27.0	2.0	81.2
Escanda de Asturias	19.0	7.9	26.0	21.6	55.6	17.7	7.8	2.3	25.4	2.2	81.0
Oberkulmer	17.2	7.5	30.5	22.0	60.0	16.7	6.1	2.7	22.9	2.7	82.8
Ressac	22.5	6.0	25.8	21.6	53.4	18.6	5.5	3.4	24.1	2.2	77.5
Rouquin	23.4	7.0	24.0	28.2	59.2	12.8	4.5	2.8	17.4	3.4	76.6
Tyrolien Rouge	18.9	7.8	26.9	19.5	54.3	18.6	8.2	2.3	26.8	2.1	81.1
Emmean Sp	19.6 a	7.8 b	26.2 a	22.3 b	56.2 b	17.1 c	7.1 c	2.5 b	24.2 c	2.4 a	80.4 b
Mix HP&DM	21.4	8.3	29.2	20.4	57.9	14.4	6.4	2.3	20.8	2.8	78.6
Mix CD	18.6	8.9	28.7	20.7	58.3	15.9	7.2	2.2	23.1	2.5	81.4
Mix SR	19.3	9.2	29.4	19.8	58.4	15.5	6.8	2.3	22.3	2.6	80.7
Mix GA	23.1	7.1	22.2	21.2	50.5	19.4	7.0	2.8	26.4	1.9	76.9
Mix PG	21.9	7.1	26.1	19.3	52.4	18.7	7.0	2.7	25.6	2.0	78.1
Mix CM	25.0	7.4	22.9	16.4	46.7	20.7	7.7	2.7	28.4	1.7	75.0
Apache	23.9	6.9	21.6	17.8	46.3	21.9	7.9	2.8	29.8	1.6	76.1
Energo	21.7	8.2	25.4	15.3	49.0	20.6	8.8	2.3	29.4	1.7	78.3
Emmean CW	21.9 b	7.9 b	25.7 a	18.9 a	52.4 a	18.4 d	7.4 c	2.5 b	25.7 d	2.1 a	78.1 a

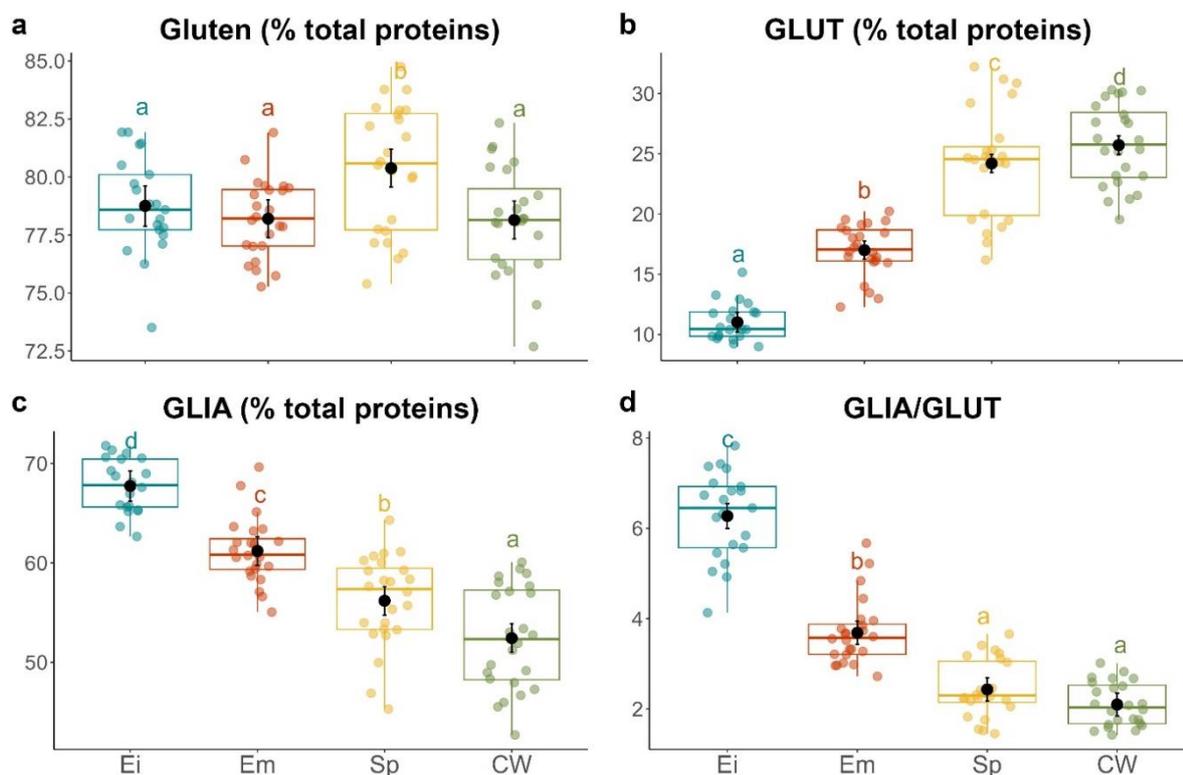


FIGURE 2 Gluten (GLIA + GLUT) content and gluten composition determined by RP-HPLC on wholegrain flours. Total gluten (a), GLUT (b) and GLIA (c) expressed as % of total proteins, GLIA/GLUT ratio (d). For each species, black dots represent emmeans and error bars represent 0.95 confidence intervals. Colored dots indicate values for each triplicate. Species with different letters are significantly different (p -value < 0.05, Tukey test). Ei: einkorn, Em: emmer, Sp: spelt, CW: common wheat.

With respect to total gluten (GLIA + GLUT), only Sp had significantly higher amount (80.4% of total proteins) than the other species (figure 2a, table 3). For the GLUT fraction, significant differences were observed between the four species, with the lowest value for Ei (11.0% of total proteins), followed by Em (17.0%), Sp (24.2%) and finally CW (25.7%) (figure 2b, table 3). All species also significantly differed with regards to the total GLIA contents (figure 2c, table 3). Ei had the highest proportion (67.7% of total proteins), followed by Em (61.2%), Sp (56.2%) and CW (52.4%). Finally, Ei had a higher GLIA/GLUT ratio (6.3) than the three other species. This ratio was also significantly higher for Em (3.7) than for Sp (2.4) and CW (2.1) (figure 2d, table 3). Once more, we observed some significant differences across varieties within each species. For example, a particularly high GLUT (30.5% of total proteins) content was observed for Sp *de Manitoba*. Yet, this value did not significantly differ from those of Sp *Doré* and Sp *Tyrolien Rouge* (S6). Within CW, significantly higher GLUT contents were found for *Mix CM*, *Apache* and *Energo* in comparison to *Mix HP&DM*, *Mix CD* and *Mix SR* (S6).

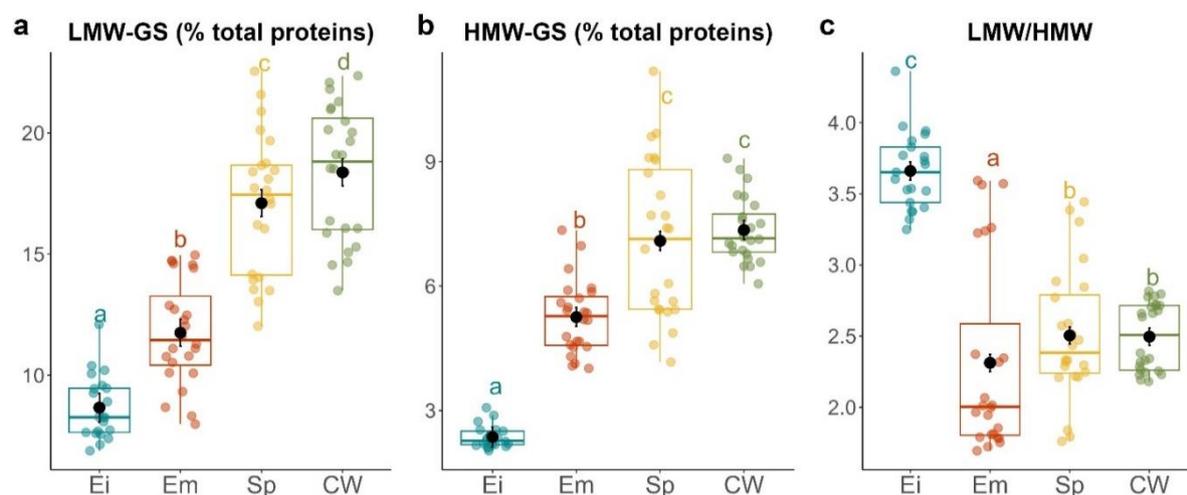


FIGURE 3 GLUT composition measured by RP-HPLC on wholegrain flours. LMW-GS (a) and HMW-GS (b) expressed as % of total proteins, LMW/HMW ratio (c). For each species, black dots represent emmeans and error bars represent 0.95 confidence intervals. Colored dots indicate values for each triplicate. Species with different letters are significantly different (p -value < 0.05, Tukey test). Ei: einkorn, Em: emmer, Sp: spelt, CW: common wheat.

To deepen our analysis, we also looked at the different GLIA and GLUT subcategories. With respect to GLUT (figure 3), we observed significantly lower values for Ei, for both LMW-GS (8.7% of total proteins, figure 3a) and HMW-GS (2.4%, figure 3b). For these two subcategories, Em also had significantly lower amounts (11.8% and 5.3% of total proteins for LMW-GS and HMW-GS, respectively) than Sp and CW (table 3, figure 3). While no difference was observed between Sp and CW for HMW-GS (figure 3b), a small but significant difference was found for LMW-GS, with a lowest value for Sp (17.1% of total proteins) than CW (figure 3a). Finally, the LMW/HMW ratio was significantly higher for Ei (3.7) than for the three other species, and lower for Em (2.3) (figure 3c). For the three parameters, very high variability was observed between Sp varieties. For example, values for HMW-GS within Sp varieties ranged from 5.5% of total proteins (*Sp Rouquin*) to 9.6% (*Sp Doré*) (table 3). For LMW-GS and for the LMW/HMW ratio, high intra-species variability was also observed for Em and CW. Notably, Em varieties *Blanc* and *Roux blanc* had significantly higher LMW/HMW ratios (3.2 and 3.6, respectively) than all other Em varieties. Concerning CW varieties, *Apache* and *Energo* had significantly higher HMW-GS contents than all other varieties, except *Mix CM* (S6).

Regarding GLIA, the dominant subcategory in all species was α/β -GLIA, with values going from 25.7% of total proteins for CW to 45.1% for Ei. In contrast, ω -GLIA was the less present GLIA type (table 3, figure 4). However, Ei had significantly higher α/β -GLIA (45.1% of total proteins) and lower ω -GLIA (4.2%) amounts than the three other species (figure 4a,b, table 3). The proportion of α/β -GLIA was also higher for Em (30.8% of total proteins) than for Sp (26.2%) and CW (25.7%). Regarding γ -GLIA,

significantly higher amounts were found for Em (22.2% of total proteins) and Sp (22.3%) than for Ei (18.5%) and CW (18.9%) (figure 4c).

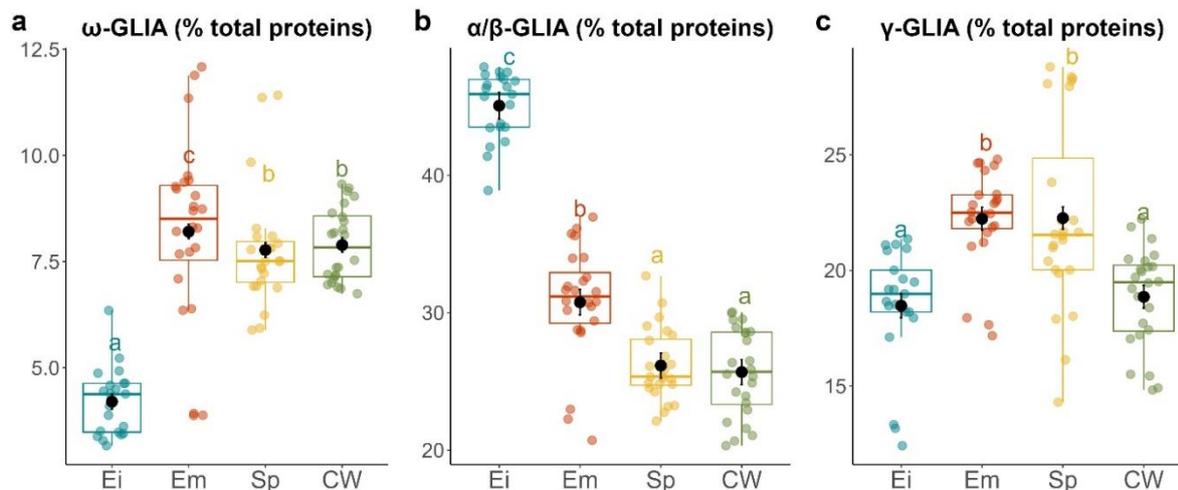


FIGURE 4 GLIA composition measured by RP-HPLC on wholegrain flours. α/β -GLIA (a), γ -GLIA (b) and ω -GLIA (c) expressed as % of total proteins. For each species, black dots represent emmeans and error bars represent 0.95 confidence intervals. Colored dots indicate values for each triplicate. Species with different letters are significantly different (p -value < 0.05, Tukey test). Ei: einkorn, Em: emmer, Sp: spelt, CW: common wheat.

Within Em varieties, a significantly lower α/β -GLIA proportion was obtained for Em *de Poveda* (22.0% of total proteins, table 3 and S6). Notably low γ -GLIA contents were found for Ei *Noir* (13.0% of total proteins) and Em *Bleu d’Ethiopie* (17.6%) in comparison to all other Ei and Em varieties. For this parameter, very high intra-species variability was observed for Sp, with significantly higher values found for Sp *Arduinii* and Sp *Rouquin* (28.2%). Regarding ω -GLIA, higher values were observed for Em *de Poveda* (11.8%) and Sp *Doré* (10.9%) compared to the other Em and Sp varieties, respectively (S6).

3.3 Highlighting inter- and intra-species variability using complete chromatographic profiles

To better assess the inter- and intra-species variability with regards to gluten proteins, we compared PCA analyses on traditional gluten protein fractions and ratios measured by RP-HPLC and on the complete RP-HPLC GLIA-GLUT chromatographic profiles (figure 5).

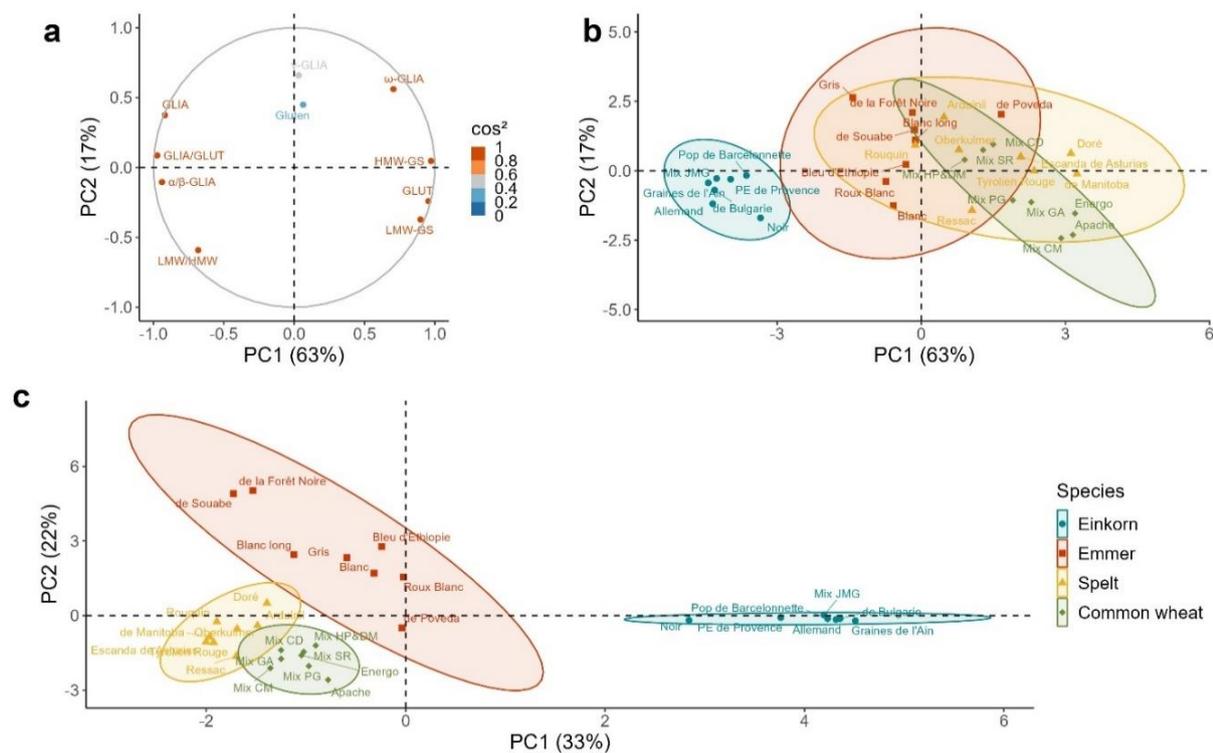


FIGURE 5 PCA analyses on RP-HPLC gluten protein fractions from table 3 (a, b) and on complete absorbance values of RP-HPLC GLIA-GLUT chromatographic profiles (c). a. Plot of variables for the PCA on RP-HPLC protein fractions. Colors indicate the quality of representation (\cos^2) of each variable. b-c. Plots of individuals (varieties), with 95% confidence ellipses of the mean point for each species, for the PCA on protein fractions (b) and on RP-HPLC GLIA-GLUT chromatograms (c).

In the PCA on traditional protein fractions, Principal Component 1 (PC1) explained 63% and PC2 explained 17% of variability within the data (figure 5a,b). In the PCA on complete chromatographic data, PC1 explained 33% and PC2 explained 22% of variability within the data (figure 5c). The difference in the percentage of variability explained by both PCA is certainly due to the higher number of variables considered for the PCA on complete chromatographic data (2887 variables compared to 10 for the PCA on protein fractions). Moreover, in the PCA on complete chromatographic data, 9 dimensions were needed to explain 90% of the variability within the data, while only 3 were needed in the PCA on protein fractions (data not shown). Given the very high number of variables, the plot of variables corresponding to the analysis on complete chromatographic data is unreadable (Figure S10).

In both PCA analyses, Ei was clearly differentiated from the other species (figure 5b,c). While the PCA on traditional protein fractions did not distinguish the three other species, Em was set apart by the complete chromatographic profiles (figure 5c). Despite a little overlap of the confidence ellipses corresponding to Sp and CW, these two species were also relatively well separated by the GLIA-GLUT combined chromatographic profiles (figure 5c). Interestingly, neither GLIA nor GLUT chromatographic profiles alone were able to differentiate Sp from CW (figure S7).

The PCA on complete chromatographic GLIA-GLUT data also revealed a high intra-species variability for Em compared to other species (figure 5c). Interestingly, intra-species variability within CW was rather high for traditional protein fractions, while it was relatively low in the analysis on complete chromatographic profiles (figure 5).

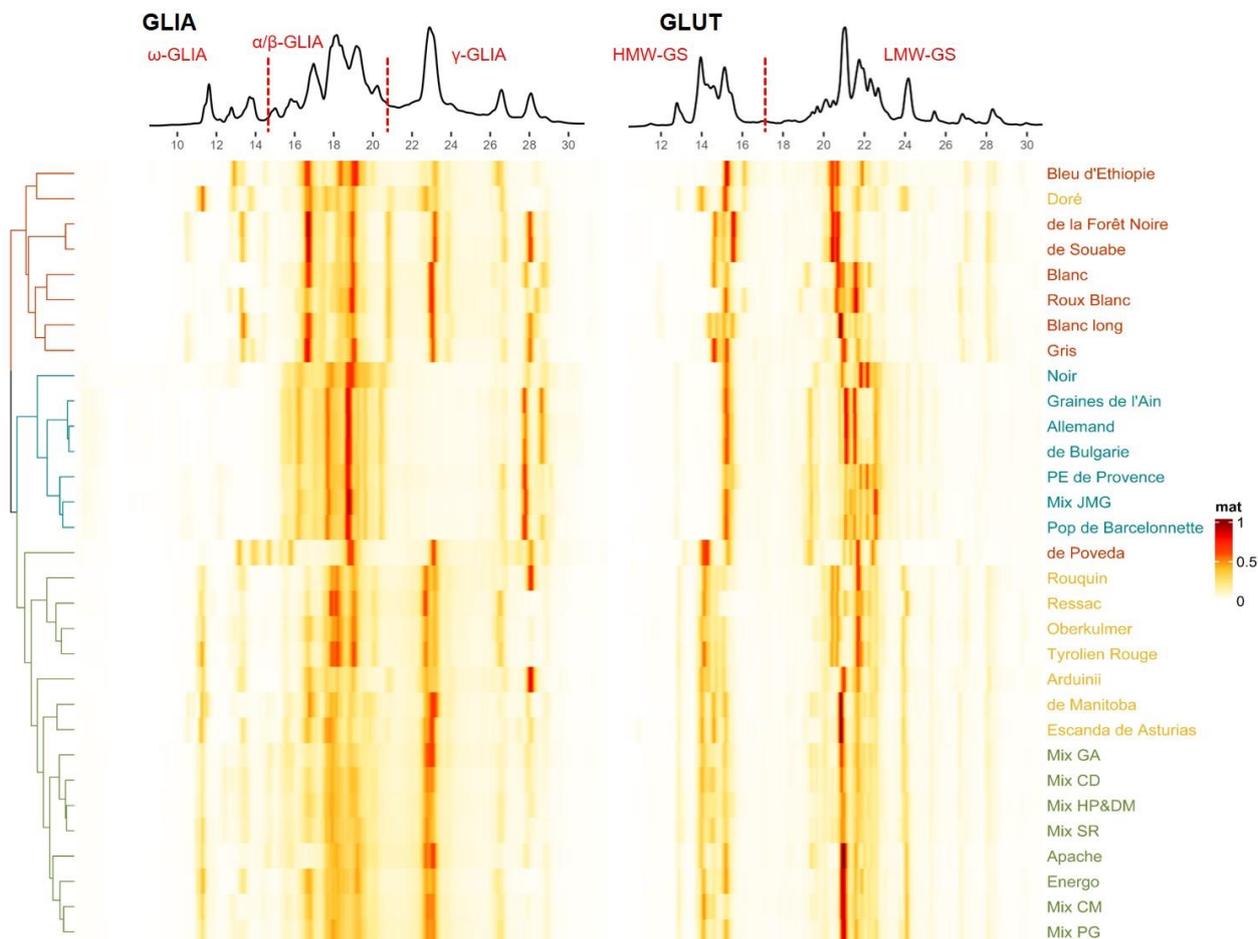


FIGURE 6 Heatmap visualization of RP-HPLC GLIA-GLUT combined chromatographic profiles. On the left of the heatmap, hierarchical clustering based on k-means (k=3) and euclidean distances are indicated. On the right of the heatmap, names of the varieties are colored with respect to the species: blue for einkorn, orange for emmer, yellow for spelt and green for common wheat. The chromatograms at the top of the heatmap are those of the common wheat landrace *Mix HP&DM*.

The hierarchical clustering and heatmap visualization of the chromatographic data also evidenced a notably high variability in the GLIA and GLUT profiles among the Em varieties (figure 6). With the exception of *Em de la Forêt Noire* and *Em de Souabe*, which exhibited highly similar GLIA and GLUT profiles, each Em variety displayed its own distinctive chromatographic signature (figure 6). This variability seems to be mostly due to the GLUT profiles (figure 6).

The Em variety with the most unusual gluten protein profile was *Em de Poveda*. This variety was set apart from all other Em in the PCA analyzes on traditional protein fractions and on complete chromatographic profiles (figure 5). *Em de Poveda* was also clustered separately from all other Em in

the hierarchical clustering analysis (figure 6). Notably, when we increased the number of clusters to 4 ($k=4$), the fourth cluster contained only *Em de Poveda* (data not shown). The heatmap visualization highlighted that differences in this variety are mainly linked to its ω -GLIA, α/β -GLIA and GLUT profiles (figure 6).

Within Ei, variety *Noir* appeared to be slightly different with regards to both traditional protein fractions (figure 5b) and gluten protein chromatographic profiles (figure 5c). Differences relied mostly on γ -GLIA and LMW-GS (figure 6). Within Sp, variety *Doré* had a different GLUT profile (figure 6). Its gluten protein chromatographic profile was closer to that of *Em Bleu d’Ethiopie* than to those of all other Sp varieties. Interestingly, Sp varieties *Oberkulmer*, *Rouquin*, *Ressac*, *Tyrolien Rouge*, which are genetically related, were clustered together (figure 6). Finally, with regards to CW, mixtures of landraces (*Mix GA*, *Mix HP&DM*, *Mix CD* and *Mix SR*) and modern varieties together with mixtures of modern varieties (*Apache*, *Energo*, *Mix CM* and *Mix PG*) formed two separate subgroups in the clustering analysis (figure 6). The differences between these two subgroups relied mostly on the LMW-GS profiles (figure 6).

4. DISCUSSION

4.1 Hulled wheats appear to have higher protein contents than CW, and they do not exhibit lower total gluten proportions

It is commonly believed by consumers that hulled wheats contain higher amounts of proteins and lower proportions of gluten than CW. We found significantly different protein contents across the four species, with the highest value measured for Ei (17.8% db), followed by Em (15.3), Sp (14.9) and CW (12.3) (Fig 1a). These results confirm those of previous studies (Bencze et al., 2020; Castagna et al., 1995; Longin et al., 2016; Mondini et al., 2014), indicating that hulled wheats can contain substantial amounts of proteins, higher than those of CW.

With regards to total gluten (GLIA + GLUT), we found similar contents for the four species (Fig 2a), with only a significantly higher value for Sp. These results corroborate previous studies that found either equal proportions between hulled wheats and CW, or higher gluten contents for hulled wheats, especially for Sp (Geisslitz et al., 2019; Koenig et al., 2015). Yet, they contradict the common belief of consumers, that “ancient” wheats would contain lower gluten amounts.

4.2 Em and especially Ei exhibit different gluten protein compositions, while Sp has a similar pattern than CW

Beyond total gluten, we also revealed different gluten-forming protein compositions in Ei, Em and Sp compared to CW. The differences with CW were particularly striking in Ei, evident in Em and only slight in Sp (table 3, figure 7).

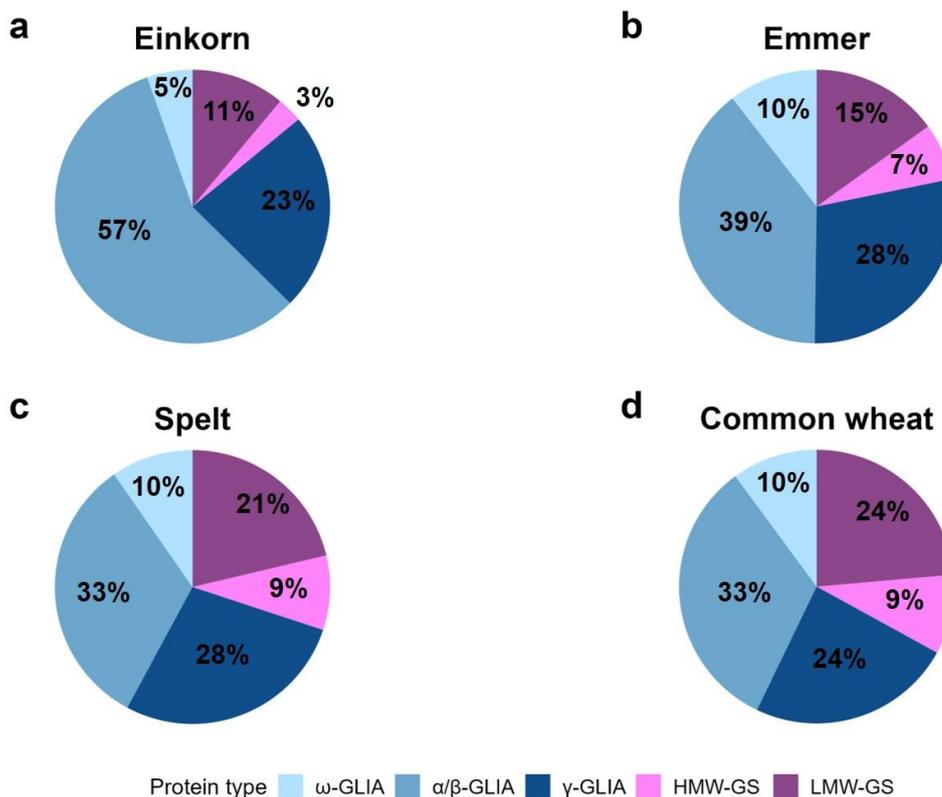


FIGURE 7 Average gluten protein composition for each species measured by RP-HPLC, on seven varieties for einkorn and eight for emmer, spelt and common wheat. All fraction subcategories are expressed as % of total gluten (GLIA + GLUT) proteins.

Overall, Ei had the most distinct gluten protein composition in comparison to CW (figures 5 and 6). This species was characterized by low UPP% and GLUT content, a high LMW/HMW ratio, and an excess of GLIA in comparison to GLUT. This unique protein composition in Ei aligns with the findings of Wieser (2000; 2009) and of Geisslitz et al. (2018, 2019). Only Call et al. (2020) did not find significant differences in the GLIA/GLUT ratio between Ei and CW. In our study, we also observed an extremely unbalanced GLIA composition for Ei, with a high amount of α/β -GLIA and a low amount of ω -GLIA. Yet, these results contradict previous research, that reported higher amounts of ω -GLIA in Ei than in CW (Geisslitz et al., 2018; Wieser, 2000; Wieser et al., 2009). These inconsistencies may stem from distinct evaluated material (varieties), or from differences in the detection of ω -GLIA via chromatographic techniques.

The very distinctive protein composition observed for Ei can be attributed to the absence of a common genome with tetraploid or hexaploid wheats (Shewry et al., 2003). The diploid genomic structure of Ei ($A^m A^m$) also accounts for its simpler protein profiles, with a lower diversity of protein types, as seen in the GLIA and GLUT RP-HPLC chromatographic profiles (figure 6). This is in line with previous studies, that have reported limited allelic diversity for HMW-GS in Ei compared to CW (Alvarez et al.,

2006). In contrast, tetraploid and hexaploid species exhibit complex composition patterns owing to high polymorphism in wheat storage proteins (Shewry et al., 2003).

Em presented similar characteristics to Ei, such as lower average UPP% and GLUT content, and a higher GLIA/GLUT ratio than CW (tables 2 and 3). However, these distinctions from CW were less pronounced compared to Ei, probably because Em and CW share the same A and B genomes (Shewry et al., 2003). In addition, intra species variability was higher within Em than within Ei (figures 5 and 6). Also, in contrast to Ei, the LMW/HMW ratio was slightly lower in Em than in CW (table 3 and figure 3c). The reported protein compositions for Em in the literature are more controversial than for Ei. For instance, neither Geisslitz et al. (2018) nor Call et al. (2020) observed differences in the LMW/HMW ratio compared to CW. With regards to the GLIA/GLUT ratio, both Geisslitz et al. (2018, 2019) and Wieser (2000) found a higher value for Em compared to CW, but Call et al. (2020) observed a lower ratio for Em than for Ei, Sp and CW. Once again, such differences may arise from genetic variability between the evaluated varieties in the different studies.

Finally, we observed little differences in gluten protein composition between Sp and CW (tables 2 and 3, figure 7c,d), which is in accordance with the shared A, B and D genomes of these two species (Shewry et al., 2003). The main difference concerned the UPP%, which was lower in Sp (33.8%) than in CW (39.8%) (table 2 and figure 1). UPP% are highly related to GLUT amounts, and results from the literature regarding these parameters in Sp are highly contradictory. While studies such as those of Takač et al. (2021) and Koenig et al. (2015) also found either lower UPP% or GLUT content for Sp than for CW, other authors found no significant differences between both species (Geisslitz et al., 2019), or even higher GLUT content in Sp than in CW (Call et al., 2020; Podolska et al., 2020).

Results regarding the LMW/HMW and the GLIA/GLUT ratios in Sp reported by previous studies are also controversial. For example, Takač et al. (2021) observed a higher LMW/HMW ratio for Sp than for CW, whereas Geisslitz et al. (2018) found no differences between the two species. As for the GLIA/GLUT ratio, Geisslitz et al. (2018, 2019) and Takač et al. (2021) found a lower inverted ratio (GLUT/GLIA) for Sp than for CW, while other authors reported a higher ratio for certain Sp varieties (Koenig et al., 2015; Podolska et al., 2020) or no significant differences between Sp and CW (Call et al., 2020; Geisslitz et al., 2018). These divergent outcomes are likely due to variations among the evaluated varieties in the different studies. Overall, the greater discordance observed when comparing Sp (rather than Ei or Em) to CW could arise from the higher resemblances between these two hexaploid species. As differences between these two hexaploidy species are rather small, they might be harder to detect.

4.3 Variability in gluten protein composition within each species

Rather high levels of intra-species variability in hulled wheat gluten protein compositions have been reported by Call et al. (2020), Geisslitz et al. (2018, 2019), Koenig et al. (2015), Takač et al. (2021) and

Wieser et al. (2009). The second aim of this study was to assess this variability in the evaluated set of varieties and to identify outstanding varieties.

For Ei, we found limited intra-species variability in gluten protein compositions (figure 5b). Nevertheless, variety *Noir* differed from the other Ei, as it had a surprisingly high UPP% (26.1%), a low GLIA/GLUT ratio (5.2), and a low amount of γ -GLIA (13.0% of total proteins). Furthermore, the analysis of complete RP-HPLC GLIA-GLUT chromatographic profiles revealed that Ei *Noir* also displayed variations in the monomeric composition of these fractions (figure 6).

When looking at gluten protein composition, intra-species variability appeared similar between Em, Sp and CW (figure 5b). Yet, the PCA analysis of complete RP-HPLC chromatographic profiles revealed a surprisingly higher intra-species variability for Em compared to the three other species (figure 5). This method also highlighted the notably unusual chromatographic signature of Em *de Poveda* (figure 6).

Regarding, Sp, the analysis of complete chromatographic profiles highlighted differences in the variety *Doré*, mostly linked to its HMW-GS profile (figure 6). Interestingly, varieties *Rouquin* and *Ressac*, which are derived from the crossbreeding between Sp and CW (Bertin et al., 2001), did not exhibit chromatographic profiles closer to those of CW compared to other Sp varieties (figure 6). These results support the observations of Koenig et al. (2015) who suggested that *Rouquin* and *Ressac* possess rather little CW elements in their genomes.

Finally, within CW, the analysis of complete chromatographic profiles separated mixtures of landraces (*Mix GA*, *Mix HP&DM*, *Mix CD* and *Mix SR*) and modern varieties together with mixtures of modern varieties (*Apache*, *Energo*, *Mix CM* and *Mix PG*) in two subgroups (figure 6). Interestingly, the landrace mixtures *Mix HP&DM*, *Mix CD* and *Mix SR* were also globally characterized by low UPP% (from 31.2 to 35.3%), high total gluten (GLIA + GLUT) (from 78.6 to 81.4% of total proteins), high GLIA/GLUT ratio (from 2.5 to 2.8), low LMW/HMW glutenin ratio (from 2.2 to 2.3), and relatively high total protein levels (from 12.9 to 14.6% db). These results are also consistent with previous research, indicating that recent breeding has led to an increase in GLUT contents while decreasing total protein amounts (Pronin, Börner, et al., 2020). However, since our study is based on only 8 CW varieties (including three landrace mixtures with similar compositions), it would be necessary to confirm these results with a broader range of genotypes.

All varieties evaluated in this study were cultivated in the same location, same year and under the same management conditions. Therefore, the reported variability is mainly due to genetics (species and varieties). Nonetheless, the environment, including pedoclimatic conditions and management practices, also influences protein compositions (Geisslitz et al., 2019; Rakszegi et al., 2016; Schober et al., 2006; Wieser et al., 2023). For instance, it is well recognized that an increased N fertilization increases GLIA more than GLUT in CW (Schober et al., 2006). However, Geisslitz et al. (2019) showed that while total protein content is highly impacted by the effect of environment, the proportions of gluten (GLIA +

GLUT), GLIA, GLUT and GLIA/GLUT ratio are more influenced by the species. Several other studies have also underlined the importance of the genetic factor in protein composition (Shewry, 2018; Veraverbeke & Delcour, 2002). Even if protein compositions seem to be more determined by genetics than by environmental conditions, findings presented in this study should be confirmed over several years.

4.4 Analysis of complete chromatographic profiles led to a more efficient discrimination of species and improved the identification of remarkable varieties

Most studies that analyze wheat gluten proteins using HPLC focus on traditional protein fractions. Only a few of them have attempted to gain a deeper understanding of the complexity of chromatographic profiles (Bertrand et al., 1990; Courcoux et al., 1992). An important contribution in this regard is the study of Pronin et al. (2020), where the authors introduce a novel integration method for RP-HPLC chromatographic profiles to better take into account the distribution of individual peaks.

Our findings highlight the added value of analyzing complete chromatographic profiles, which provide complementary information to the analysis of traditional gluten protein fractions. This innovative approach unveiled a noteworthy level of intra-species variability within the Em varieties. It also shed light on both similarities between varieties, such as *Em de la Forêt Noire* and *Em de Souabe*, and on varieties with unexpected patterns that did not stand out in the analysis based on traditional protein fractions, and on which it would be of particular interest to pursue research. Moreover, the analysis of complete chromatograms enabled an improved discrimination between the four species (figure 5). This method demonstrated that differences between and within species (especially for Em) are not solely reliant on the proportions of gluten protein fractions, but also on variations in the monomeric proteins that constitute these fractions (figure 6).

Overall, our results confirmed the conclusions of Pronin et al. (2020b), demonstrating that including more detailed information from HPLC chromatograms improves the discrimination of samples, and facilitates the identification of varieties with distinctive protein profiles. In this study, as we only analyzed 31 varieties, remarkable varieties could also be recognized by visual inspection of chromatograms. Yet, using PCA and clustering methods to analyze complete chromatographic profiles could be an efficient method for larger sample sets. Nevertheless, further research is needed to gain a deeper understanding of the chromatographic profiles.

5. CONCLUSION

In the present study, we investigated the gluten protein compositions in a set of Ei, Em and Sp varieties, in comparison to a set of CW modern varieties and landraces. The discrepancies with CW were striking for Ei, clear for Em and rather slight for Sp. Em, and especially Ei, were characterized by high total protein contents, low UPP%, high GLIA and low GLUT proportions and, in the case of Ei, high

LMW/HMW glutenin ratios. While these gluten protein compositions can present challenges in terms of processability, they may also influence the digestibility of end products. With respect to Sp, slightly higher total protein content, lower UPP% and higher GLIA/GLUT ratio were also observed in comparison to CW. Nevertheless, further investigation is needed to establish links between gluten protein compositions and gluten-related pathologies.

Furthermore, rather high variability was observed within the hulled wheat species, indicating that they can be considered as valuable reservoir of diversity. In addition, the analysis of complete chromatographic profiles of gluten proteins revealed a remarkably high intra-species variability in Em. This novel method also enabled the identification of varieties with unusual gluten protein chromatographic profiles, such as *Em de Poveda*, which warrants further investigation. Finally, this method demonstrated superior efficiency in discriminating wheat species compared to the analysis of traditional gluten protein fractions. However, further research is necessary to enhance our understanding of the distribution of individual peaks in the chromatographic profiles, and fully leverage the potential of chromatographic profiling as a tool for studying wheat protein composition.

To the best of our knowledge, gluten protein compositions had never been assessed for most varieties evaluated in this study. Hence, this work represents an original and valuable contribution, particularly for farmers and artisanal bakers interested in the diversity of wheat species available in the region of Lyon.

ACKNOWLEDGEMENTS

We thank all the farmers (Pierre Berthet, Jean-Philippe Clair, Christian Dalmasso, Jean-Marie Gonet, Cédric Mary, Maud Montagard, Denis Mignard, Honorine Périno, Marie-Pierre Répécaud, Stéphane Rouvès), Anne de Formigny and organisms (the Conservatoire de Ressources de Botanique Appliquée -CRBA- at Charly, the Centre de Ressources Biologiques des Céréales à Paille at INRAE Clermont-Ferrand and Graines de Noé at Dijon) who supplied us with the initial seed lots. We are particularly grateful to the CRBA for providing the field to grow the wheat varieties. We also thank Martin Ecartot, Aline Rocher, and Frédéric Compan at AGAP Institute (Montpellier) for the technical support provided for the dehulling and milling of the kernels. We acknowledge the Plateforme d'Analyses Chimiques (CEFE, Montpellier) and especially Raphaëlle Leclerc for the protein Dumas dosages. Finally, we are very grateful to the farmers and to Camille Vindras-Fouillet for their active participation in scientific discussions. SC acknowledges the Ecole Urbaine de Lyon for her Ph.D. grant. This research was funded by the Agence Nationale de la Recherche in the frame of “Programme d'Investissements d'Avenir” (ANR-17-CONV-0004, “Agronomy-Nutrition-Health” research studio of Ecole Urbaine de Lyon) and by the European Research Council (ERC-2021-AdG-101019515 “Musix”).

CONFLICT OF INTEREST STATEMENT

The authors declare that they have no conflict of interest.

REFERENCES

- AACC International. (1999). Method 44-15.02 : Moisture–air-oven methods. *Approved methods of analysis*.
- Bencze, S., Makádi, M., Aranyos, T. J., Földi, M., Hertelendy, P., Mikó, P., Bosi, S., Negri, L., & Drexler, D. (2020). Re-Introduction of Ancient Wheat Cultivars into Organic Agriculture—Emmer and Einkorn Cultivation Experiences under Marginal Conditions. *Sustainability*, *12*(4), Art. 4. <https://doi.org/10.3390/su12041584>
- Bertin, P., Grégoire, D., Massart, S., & de Froidmont, D. (2001). Genetic diversity among European cultivated spelt revealed by microsatellites. *Theoretical and Applied Genetics*, *102*, 148-156. <https://doi.org/10.1007/s001220051630>
- Bertrand, D., Courcoux, P., Autran, J.-C., Meritan, R., & Robert, P. (1990). Stepwise canonical discriminant analysis of continuous digitalized signals : Application to chromatograms of wheat proteins. *Journal of Chemometrics*, *4*(6), 413-427. <https://doi.org/10.1002/cem.1180040605>
- Biesiekierski, J. R. (2017). What is gluten? *Journal of Gastroenterology and Hepatology*, *32*(S1), 78-81. <https://doi.org/10.1111/jgh.13703>
- Bocci, R., & Chable, V. (2009). Peasant seeds in Europe : Stakes and prospects. *Journal of Agriculture and Environment for International Development (JAEID)*, *103*(1/2), Art. 1/2. <https://doi.org/10.12895/jaeid.20091/2.26>
- Bonjean, A. (2001). *Histoire de la culture des céréales et en particulier de celle du blé tendre (Triticum aestivum L.)*. *21*, 29-37.
- Bonneuil, C., & Thomas, Frédéric. (2009). *Gènes, pouvoirs et profits : Recherche publique et régimes de production des savoirs de Mendel aux OGM* (Quae). Éditions Quae. <https://www.torrossa.com/en/resources/an/5063433>
- Bouteloup, C. (2016). Les pathologies digestives liées au blé ou au gluten : Certitudes et doutes. *Cahiers de Nutrition et de Diététique*, *51*(5), Art. 5. <https://doi.org/10.1016/j.cnd.2016.06.002>
- Call, L., Kapeller, M., Grausgruber, H., Reiter, E., Schoenlechner, R., & D'Amico, S. (2020). Effects of species and breeding on wheat protein composition. *Journal of Cereal Science*, *93*, 102974. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2020.102974>
- Castagna, R., Borghi, B., Di Fonzo, N., Heun, M., & Salamini, F. (1995). Yield and related traits of einkorn (*T. monococcum* ssp. *Monococcum*) in different environments. *European Journal of Agronomy*, *4*(3), Art. 3. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(14\)80038-5](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(14)80038-5)
- Courcoux, Ph., Serot, Th., Larre, C., & Popineau, Y. (1992). Characterization and identification of wheat cultivars by multi-dimensional analysis of reversed-phase high-performance liquid chromatograms. *Journal of Chromatography A*, *596*(2), 225-232. [https://doi.org/10.1016/0021-9673\(92\)85011-H](https://doi.org/10.1016/0021-9673(92)85011-H)

- Delcour, J. A., Joye, I. J., Pareyt, B., Wilderjans, E., Brijs, K., & Lagrain, B. (2012). Wheat Gluten Functionality as a Quality Determinant in Cereal-Based Food Products. *Annual Review of Food Science and Technology*, 3(1), 469-492. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-022811-101303>
- Demeulenaere, E., & Bonneuil, C. (2011). Des Semences en partage. *Techniques & Culture. Revue semestrielle d'anthropologie des techniques*, 57, Art. 57. <https://doi.org/10.4000/tc.5902>
- de Sousa, T., Ribeiro, M., Sabença, C., & Igrejas, G. (2021). The 10,000-Year Success Story of Wheat! *Foods*, 10(9), Art. 9. <https://doi.org/10.3390/foods10092124>
- Dinu, M., Whittaker, A., Pagliai, G., Benedettelli, S., & Sofi, F. (2018). Ancient wheat species and human health : Biochemical and clinical implications. *The Journal of Nutritional Biochemistry*, 52, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.jnutbio.2017.09.001>
- Garvin, D. F., Welch, R. M., & Finley, J. W. (2006). Historical shifts in the seed mineral micronutrient concentration of US hard red winter wheat germplasm. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86(13), 2213-2220. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2601>
- Geisslitz, S., Longin, C. F. H., Scherf, K. A., & Koehler, P. (2019). Comparative Study on Gluten Protein Composition of Ancient (Einkorn, Emmer and Spelt) and Modern Wheat Species (Durum and Common Wheat). *Foods*, 8(9), Art. 9. <https://doi.org/10.3390/foods8090409>
- Geisslitz, S., Wieser, H., Scherf, K. A., & Koehler, P. (2018). Gluten protein composition and aggregation properties as predictors for bread volume of common wheat, spelt, durum wheat, emmer and einkorn. *Journal of Cereal Science*, 83, 204-212. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2018.08.012>
- Gupta, R. B., Khan, K., & Macritchie, F. (1993). Biochemical Basis of Flour Properties in Bread Wheats. I. Effects of Variation in the Quantity and Size Distribution of Polymeric Protein. *Journal of Cereal Science*, 18(1), 23-41. <https://doi.org/10.1006/jcrs.1993.1031>
- Islam, S., Yu, Z., She, M., Zhao, Y., Islam, S., & Ma, W. (2019). Wheat gluten protein and its impacts on wheat processing quality. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 6(3), 279. <https://doi.org/10.15302/J-FASE-2019267>
- Kiszonas, A. M., & Morris, C. F. (2018). Wheat breeding for quality : A historical review. *Cereal Chemistry*, 95(1), 17-34. <https://doi.org/10.1094/CCHEM-05-17-0103-FI>
- Koenig, A., Konitzer, K., Wieser, H., & Koehler, P. (2015). Classification of spelt cultivars based on differences in storage protein compositions from wheat. *Food Chemistry*, 168, 176-182. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.07.040>
- Kucek, L. K., Veenstra, L. D., Amnuaycheewa, P., & Sorrells, M. E. (2015). A Grounded Guide to Gluten : How Modern Genotypes and Processing Impact Wheat Sensitivity: A grounded guide to gluten.... *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 14(3), 285-302. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12129>
- Longin, C. F. H., Ziegler, J., Schweiggert, R., Koehler, P., Carle, R., & Würschum, T. (2016). Comparative Study of Hulled (Einkorn, Emmer, and Spelt) and Naked Wheats (Durum and

- Bread Wheat): Agronomic Performance and Quality Traits. *Crop Science*, 56(1), Art. 1. <https://doi.org/10.2135/cropsci2015.04.0242>
- Mondini, L., Grausgruber, H., & Pagnotta, M. A. (2014). Evaluation of European emmer wheat germplasm for agro-morphological, grain quality traits and molecular traits. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 61(1), 69-87. <https://doi.org/10.1007/s10722-013-0016-y>
- Morel, M.-H., Dehlon, P., Autran, J. C., Leygue, J. P., & Bar-L'Helgouac'h, C. (2000). Effects of Temperature, Sonication Time, and Power Settings on Size Distribution and Extractability of Total Wheat Flour Proteins as Determined by Size-Exclusion High-Performance Liquid Chromatography. *Cereal Chemistry Journal*, 77(5), 685-691. <https://doi.org/10.1094/CCHEM.2000.77.5.685>
- Moudrý, J., Konvalina, P., Stehno, Z., Capouchová, I., & Jr, J. (2011). Ancient wheat species can extend biodiversity of cultivated crops. *Scientific Research and Essays*, 6. <https://doi.org/10.5897/SRE11.928>
- Padulosi, S. (1996). *Hulled Wheats: Proceedings of the First International Workshop on Hulled Wheats, 21-22 July 1995, Castelvecchio Pascoli, Tuscany, Italy*. Bioersivity International.
- Podolska, G., Aleksandrowicz, E., & Szafrńska, A. (2020). Bread making potential of *Triticum aestivum* and *Triticum spelta* species. *Open Life Sciences*, 15(1), 30-40. <https://doi.org/10.1515/biol-2020-0004>
- Pronin, D., Börner, A., Weber, H., & Scherf, K. A. (2020). Wheat (*Triticum aestivum* L.) Breeding from 1891 to 2010 Contributed to Increasing Yield and Glutenin Contents but Decreasing Protein and Gliadin Contents. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(46), 13247-13256. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c02815>
- Pronin, D., Geisslitz, S., Börner, A., & Scherf, K. A. (2020). Fingerprinting of wheat protein profiles for improved distinction between wheat cultivars and species. *Cereal Chemistry*, 97(5), 999-1009. <https://doi.org/10.1002/cche.10323>
- Rakszegi, M., Mikó, P., Löschenberger, F., Hiltbrunner, J., Aebi, R., Knapp, S., Tremmel-Bede, K., Megyeri, M., Kovács, G., Molnár-Láng, M., Vida, G., Láng, L., & Bedő, Z. (2016). Comparison of quality parameters of wheat varieties with different breeding origin under organic and low-input conventional conditions. *Journal of Cereal Science*, 69, 297-305. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2016.04.006>
- Rémésy, C., Leenhardt, F., & Fardet, A. (2015). Donner un nouvel avenir au pain dans le cadre d'une alimentation durable et préventive. *Cahiers de Nutrition et de Diététique*, 50(1), 39-46. <https://doi.org/10.1016/j.cnd.2014.07.005>
- Scherf, K. A. (2019). Immunoreactive cereal proteins in wheat allergy, non-celiac gluten/wheat sensitivity (NCGS) and celiac disease. *Current Opinion in Food Science*, 25, 35-41. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2019.02.003>

- Schober, T. J., Bean, S. R., & Kuhn, M. (2006). Gluten proteins from spelt (*Triticum aestivum* ssp. *spelta*) cultivars : A rheological and size-exclusion high-performance liquid chromatography study. *Journal of Cereal Science*, *44*(2), 161-173. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2006.05.007>
- Shewry, P. R. (2018). Do ancient types of wheat have health benefits compared with modern bread wheat? *Journal of Cereal Science*, *79*, 469-476. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2017.11.010>
- Shewry, P. R., Halford, N. G., & Lafiandra, D. (2003). Genetics of Wheat Gluten Proteins. In *Advances in Genetics* (Vol. 49, p. 111-184). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0065-2660\(03\)01003-4](https://doi.org/10.1016/S0065-2660(03)01003-4)
- Shewry, P. R., & Hey, S. (2015). Do “ancient” wheat species differ from modern bread wheat in their contents of bioactive components? *Journal of Cereal Science*, *65*, 236-243. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2015.07.014>
- Takač, V., Tóth, V., Rakszegi, M., Mikić, S., Mirosavljević, M., & Kondić-Špika, A. (2021). Differences in Processing Quality Traits, Protein Content and Composition between Spelt and Bread Wheat Genotypes Grown under Conventional and Organic Production. *Foods*, *10*(1), 156. <https://doi.org/10.3390/foods10010156>
- Veraverbeke, W. S., & Delcour, J. A. (2002). Wheat Protein Composition and Properties of Wheat Glutenin in Relation to Breadmaking Functionality. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *42*(3), 179-208. <https://doi.org/10.1080/10408690290825510>
- Wieser, H. (2000). Comparative investigations of gluten proteins from different wheat species I. Qualitative and quantitative composition of gluten protein types. *European Food Research and Technology*, *211*(4), 262-268. <https://doi.org/10.1007/s002170000165>
- Wieser, H., Antes, S., & Seilmeier, W. (1998). Quantitative Determination of Gluten Protein Types in Wheat Flour by Reversed-Phase High-Performance Liquid Chromatography. *Cereal Chemistry Journal*, *75*(5), 644-650. <https://doi.org/10.1094/CCHEM.1998.75.5.644>
- Wieser, H., Koehler, P., & Scherf, K. A. (2023). Chemistry of wheat gluten proteins : Quantitative composition. *Cereal Chemistry*, *100*(1), 36-55. <https://doi.org/10.1002/cche.10553>
- Wieser, H., Mueller, K.-J., & Koehler, P. (2009). Studies on the protein composition and baking quality of einkorn lines. *European Food Research and Technology*, *229*(3), 523-532. <https://doi.org/10.1007/s00217-009-1081-5>

Appendix 1: Additional information on the evaluated varieties

TABLE 1 Additional information on the evaluated varieties for gluten composition¹. ^a For most hulled wheat varieties, breeding information is highly incomplete. As these species did not undergo intensive professional breeding, we hypothesized that varieties with no breeding information were landraces

Variety name	Origin of the seeds	Type of variety	Additional information
Einkorn (<i>Triticum monococcum</i> subsp. <i>monococcum</i>)			
<i>Allemand</i>	Association Graines de Noé (Côte d'Or, France)	Probably landrace ^a	Recovered at the beginning of the years 2000 from a farm in Germany, and multiplied for at least 15 years in Côte d'Or (France).
<i>de Bulgarie</i>	CRBA (Rhône, France)	Probably landrace ^a	Recovered around 2010 from a baker in Bulgary (according to whom the variety grew spontaneously in the fields). Multiplied during 10 years in a farm in Isère (France), and given to the CRBA in 2020.
<i>Graines de l'Ain</i>	Association Graines de l'Ain (Ain, France)	Probably landrace ^a	Recovered from a farm in Germany, and cultivated for at least two years by a farmer in the Ain (France).
<i>Mix JMG</i>	Farm in the Marne (France)	Mixture of 5 landraces	Mixture of 5 varieties from different origins: a farm in Germany, and 4 farms in France (in the regions of Val de Loire, Champagne and Argonne). Cultivated for at least 7 years by a farmer in the Marne (France).
<i>Noir</i>	Farm in Haute-Savoie (France)	Probably landrace ^a	Recovered by a French farmer during farmer seed exchanges. Multiplied during at least 7 years in Haute-Savoie (France).
<i>Petit épeautre de Provence</i>	CRBA (Rhône, France)	Mixture of landraces	Mixture of two varieties (mostly one recovered from a farmer in the Alpes-de-Haute-Provence (France) and small quantities of another one obtained at farmer seed exchanges), given to the CRBA in 2020.
<i>Pop de Barcelonnette</i>	CRBA (Rhône, France)	Probably landrace ^a	Provided to the CRBA by the association Savors de Terroirs (Ardèche, France).
Emmer (<i>Triticum turgidum</i> subsp. <i>dicoccum</i>)			
<i>Blanc</i>	CRBA (Rhône, France)	Probably landrace ^a	Recovered by a French farmer in Germany (initially, it was mixed to another emmer variety with black ears). Multiplied for 5 years and then cultivated for 4 years in the Loire (France), and given to the CRBA in 2020.
<i>Blanc long</i>	CRBA (Rhône, France)	Probably landrace ^a	Provided to the CRBA by the association Savors de Terroirs (Ardèche, France).
<i>Bleu d'Ethiopie</i>	CRBA (Rhône, France)	Unknown	Recovered by the CRBA from the Israel Gene Bank (IGB). Multiplied once at the CRBA.
<i>de la Forêt Noire</i>	CRBA (Rhône, France)	Probably landrace ^a	Recovered by the CRBA from a French farmer, and multiplied once at the CRBA.
<i>de Poveda</i>	Association Graines de Noé (Côte d'Or, France)	Probably landrace ^a	Recovered from a Belgian association around 2018, and multiplied once in Côte d'Or (France).
<i>de Souabe</i>	Association Graines de Noé (Côte d'Or, France)	Probably landrace ^a	Recovered from a Belgian association around 2018, and multiplied once in Côte d'Or (France).
<i>Gris</i>	Association Graines de Noé (Côte d'Or, France)	Probably landrace ^a	Recovered from the INRAE gene bank (CRB) in Clermont-Ferrand (France), and multiplied during 10 years in Côte d'Or (France).
<i>Roux Blanc</i>	Association Graines de Noé (Côte d'Or, France)	Probably landrace ^a	Recovered by the founder of Graines de Noé in the years 1990 and multiplied at least 10 years in Côte d'Or (France).
Spelt (<i>Triticum aestivum</i> subsp. <i>spelta</i> (L.) Thell.)			
<i>Arduinii</i>	INRAE gene bank Centre de Ressources Biologiques Céréales à Paille (CRB) (Clermont-Ferrand, France)	Probably landrace ^a	Only one multiplication was achieved by the CRB.
<i>de Manitoba</i>	CRBA (Rhône, France)	Probably landrace ^a	Recovered by a French peasant from a farm in Manitoba (Canada). Multiplied during 5 years in a farm in Isère (France) and given to the CRBA in 2020.

¹ “Modern varieties” refer to highly uniform varieties developed by professional breeders after the 1960s and registered in either the French or the European catalogue; “historical varieties” refer to varieties developed by professional breeders prior the 1960s and “landraces” refer to genetically heterogeneous varieties selected by generations of farmers.

5.2. CARACTÉRISATION DES QUATRE ESPÈCES ET ESTIMATION DE LA VARIABILITÉ
INTRA-SPÉCIFIQUE

<i>Doré</i>	Farm in Haute-Savoie (France)	Landrace or historical variety	Recovered from a monastery (monks had themselves obtained the variety from the CRB in Clermont-Ferrand) by a baker and cultivated for several years (first by the baker and then by a farmer) in Haute-Savoie (France).
<i>Escanda de Asturias</i>	Farm in León (Spain)	Probably landrace ^a	Variety from the Asturias region in Spain, cultivated for at least 5 years in León (Spain).
<i>Oberkulmer</i>	Farm in the Marne (France)	Landrace	Swiss variety recovered by a French farmer in Germany. This variety is issued from a mass selection from a swiss landrace. It was released in 1948, registered in the European catalogue of agricultural plant species (https://www.semae.fr/), and used in breeding programs (Siedler et al., 1994). Cultivated for at least 12 years in Marne (France).
<i>Ressac</i>	Association Graines de Noé (Côte d'Or, France)	Modern variety	Belgian variety recovered by the founder of Graines de Noé. This variety was obtained at the Gembloux Agronomic Institute, and is a derivative from Rouquin (therefore, it has some Oberkulmer and CW in its pedigree) (Bertin et al., 2001). It is registered in the European catalogue of agricultural plant species (https://www.semae.fr/). It was multiplied during at least 5 years in Côte d'Or (France).
<i>Rouquin</i>	Association Graines de Noé (Côte d'Or, France)	Modern variety	Belgian variety recovered by the founder of Graines de Noé. This variety was obtained at the Gembloux Agronomic Institute, and has some <i>Oberkulmer</i> and CW in its pedigree (Bertin et al., 2001). It was multiplied during at least 5 years in Côte d'Or (France).
<i>Tyrolien Rouge</i>	Farm in Normandie (France)	Landrace	Austrian landrace (Koenig et al., 2015), multiplied at least once in Normandie (France).
Common wheat (<i>Triticum aestivum</i> subsp. <i>aestivum</i>)			
<i>Mix HP&DM</i>	Farm in Rhône (France)	Mixture of landraces	Mixture of around 100 landraces. Some varieties were obtained from farms CD and SR. Cultivated 10 years in Rhône (France). Every year, mass selection was done to favor big kernels.
<i>Mix CD</i>	Farm in Isère (France)	Mixture of landraces	Mixture of 30 varieties (land varieties and varieties from Participatory Plant Breeding). The varieties were chosen for their adaptation to local pedoclimatic conditions, resistance to lodging and high yields. Cultivated at least 5 years in Isère (France). Small amounts of different varieties were added every 2 years, to maintain a high level of genetic diversity.
<i>Mix SR</i>	Farm in Loire (France)	Mixture of landraces	Mixture of around 10 landraces (<i>Carossela</i> , <i>Cucceta</i> , <i>Barbu Milanais</i> , <i>Saissette de Provence</i> , <i>Touzelles</i> , <i>Meunier d'Apt</i> , <i>Bardot</i> , <i>Bladette</i>). Some of the varieties came from CD farm. Initially, varieties were chosen for their resistance to lodging, diseases and cold weather. Cultivated 3 years in Loire (France). Every year, mass selection was done to favor big kernels.
<i>Mix GA</i>	Farm in Ain (France)	Mixture of 4 landraces + historical varieties	Mixture of 4 landraces (<i>Rouge de Bordeaux</i> , <i>Barbu du mâconnais</i> , <i>Autrichien</i> , <i>Alauda</i>). Initially, the varieties were chosen for their adaptation to the pedoclimatic conditions of the Ain department. For 5 years, multiplication of each variety separately in the Ain (France). Within each variety, mass selection was done every year to favor adaptation to local climatic conditions, lodging resistance and ground cover. The mixture was composed every year with equal proportions of each variety.
<i>Mix PG</i>	Farm in Isère (France)	Mixture of 4 modern varieties + small amounts of landraces	Mixture of commercial varieties (<i>Renan</i> , <i>Togano</i> , <i>Apache</i> , <i>Armstrong</i> , <i>Pireneo</i>) and residues of landraces (from CD farm). Varieties were initially chosen for their adaptability to a mountainous weather. Cultivated for 5 years in Isère (France). Mass selection done every year to favor weed competitiveness and kernel size.
<i>Mix CM</i>	Farm in Loire (France)	Mixture of 5 modern varieties + small amounts of landraces	Mixture of 5 commercial varieties (<i>Togano</i> , <i>Filou</i> , <i>Arenzo</i> and 2 others) and residues of landraces. Cultivated for 2 years in Loire (France).
<i>Apache</i>	Farm in the Marne (France)	Modern variety	Commercial variety, registered in the French catalogue in 1998 (https://www.semae.fr/). Cultivated for several years in the Marne (France) under conventional practices
<i>Energo</i>	Farm in the Marne (France)	Modern variety	Austrian commercial variety, registered in the European catalogue (https://www.semae.fr/). Cultivated for several years in the Marne (France) under conventional practices.

Appendix 2: SE and RP-HPLC chromatograms for individual varieties

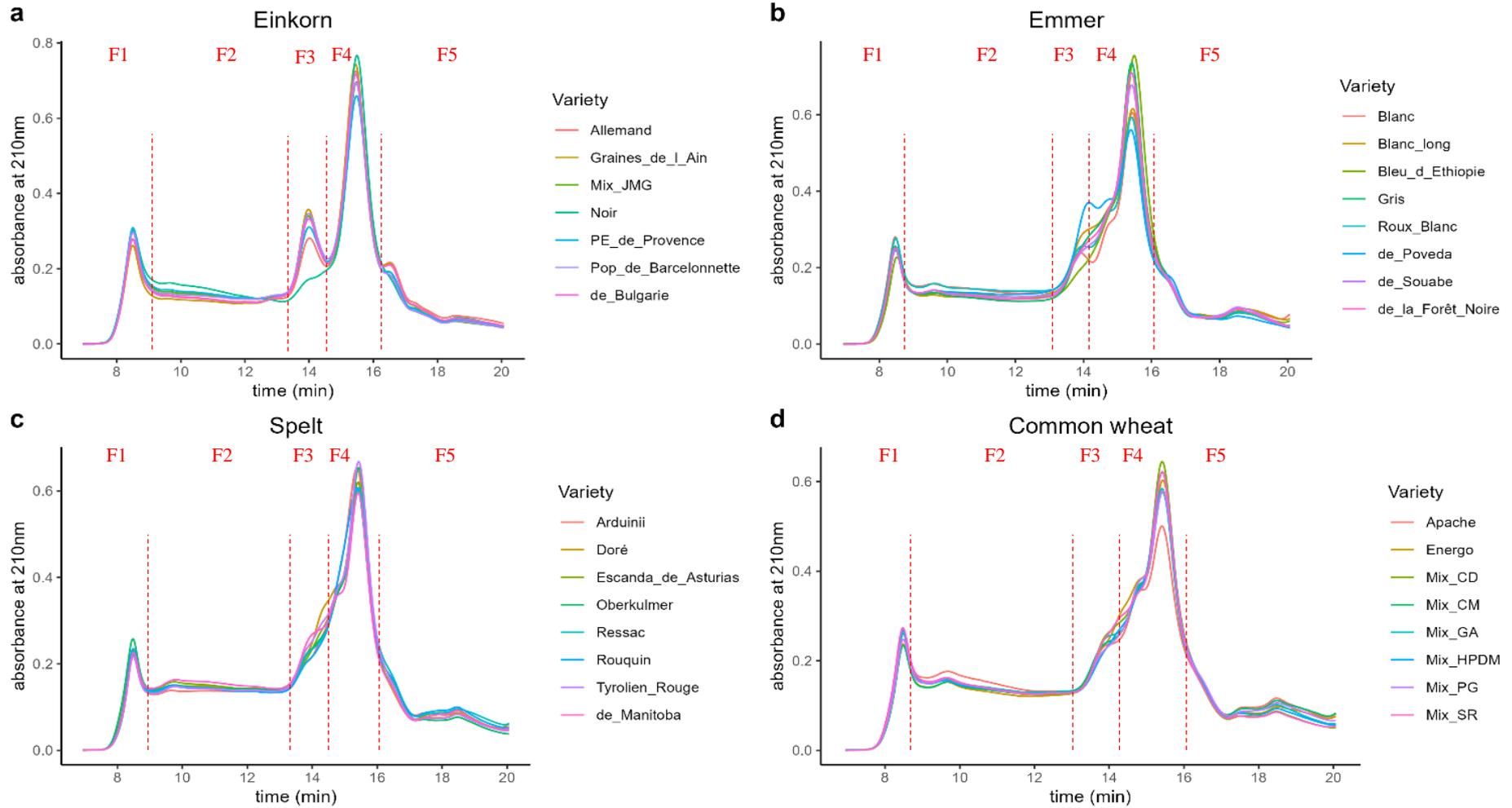


FIGURE 1 SE-HPLC chromatograms for einkorn (a), emmer (b), spelt (c) and common wheat (d) varieties. The limits of different protein fractions (from F1 to F5) are represented by red dotted lines. Chromatographic profiles for each variety are averaged profiles of the three triplicates.

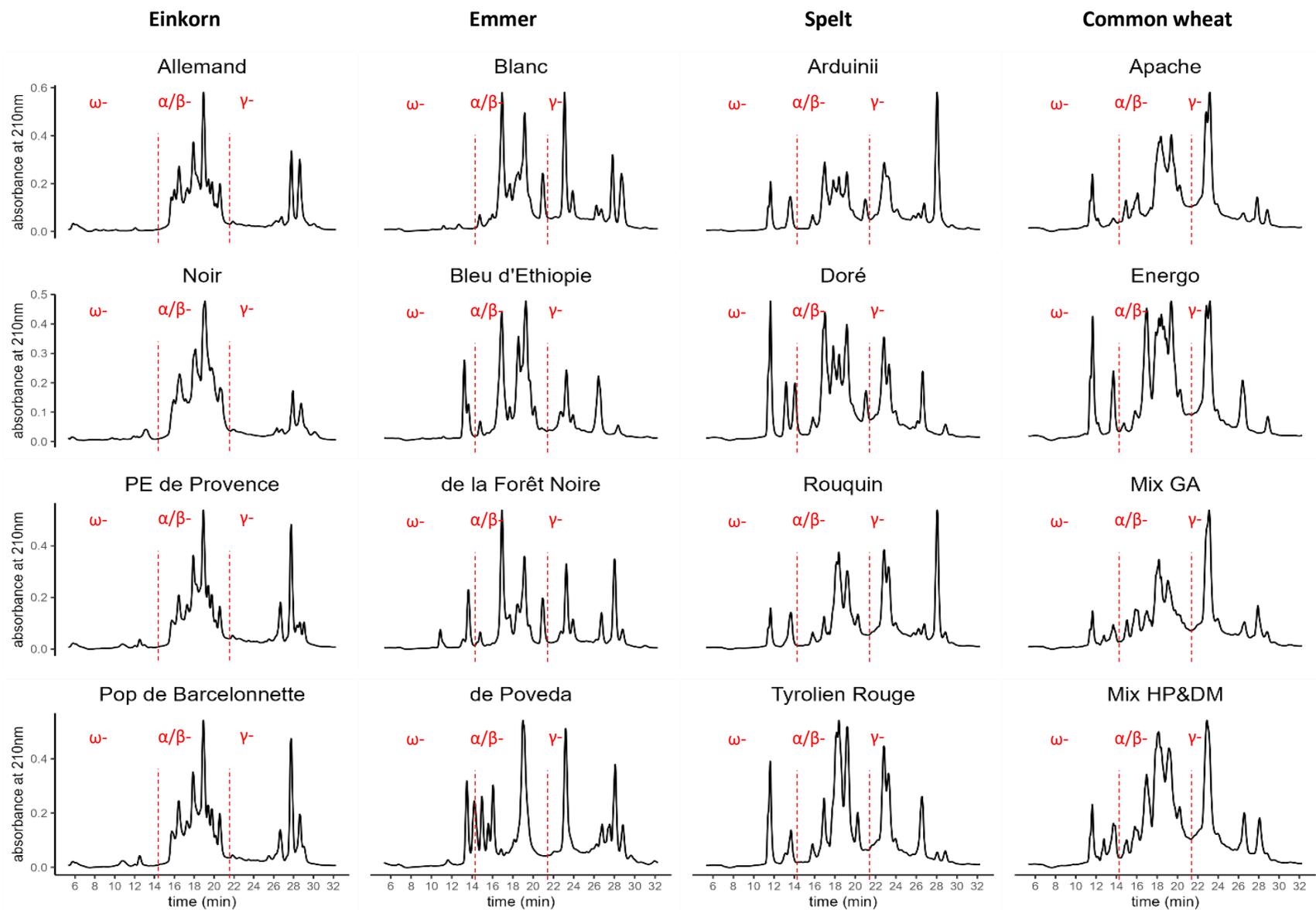


FIGURE 2 GLIA RP-HPLC chromatograms for einkorn, emmer, spelt and common wheat varieties. For each species, the chromatograms of four varieties are displayed. The limits of different protein fractions (ω -, α/β - and γ -GLIA) are represented by red dotted lines. Chromatographic profiles for each variety are averaged profiles of the three triplicates.

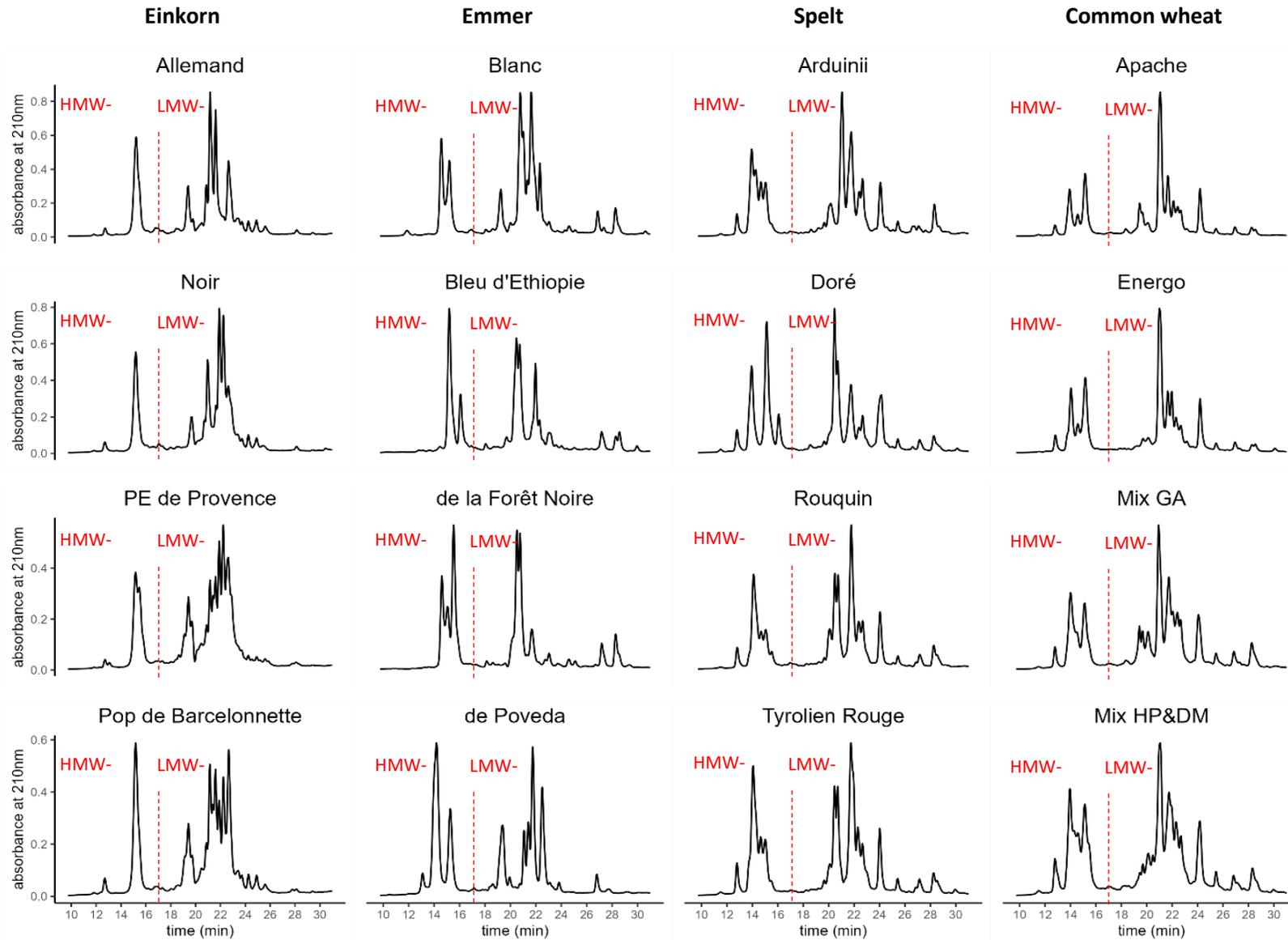


FIGURE 3 GLUT RP-HPLC chromatograms for einkorn, emmer, spelt and common wheat varieties. For each species, the chromatograms of four varieties are displayed. The limits of different protein fractions (HMW- and LMW-GLUT) are represented by red dotted lines. Chromatographic profiles for each variety are averaged profiles of the three triplicates.

Appendix 5: PCA and heatmap analyses on complete absorbance values of GLIA and GLUT RP-HPLC chromatographic profiles

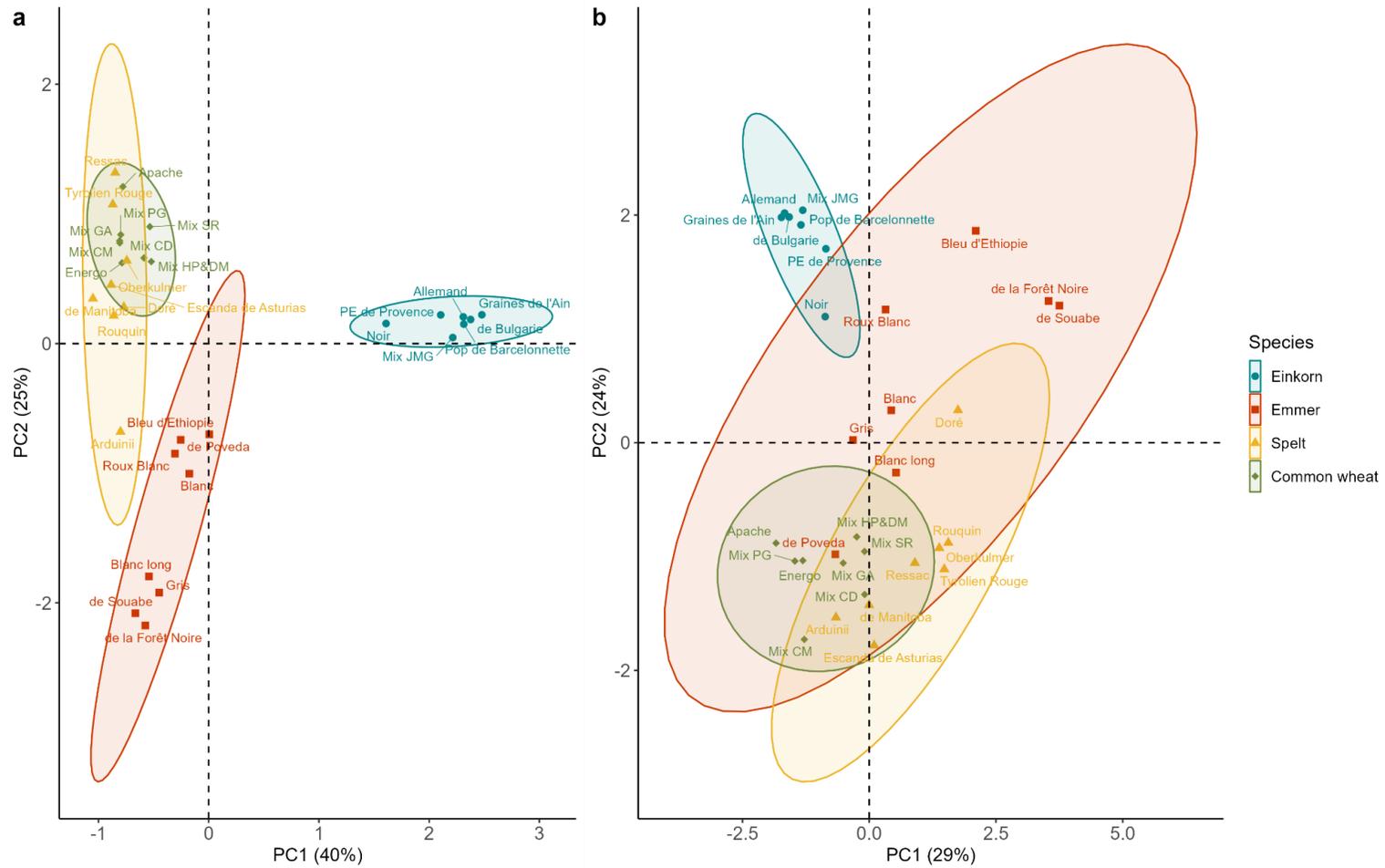


FIGURE 1 PCA analyses on complete absorbance values of GLIA (a) and GLUT (b) RP-HPLC chromatographic profiles. Plots of individuals (varieties) are represented, with 95% confidence ellipses of the mean point for each species.

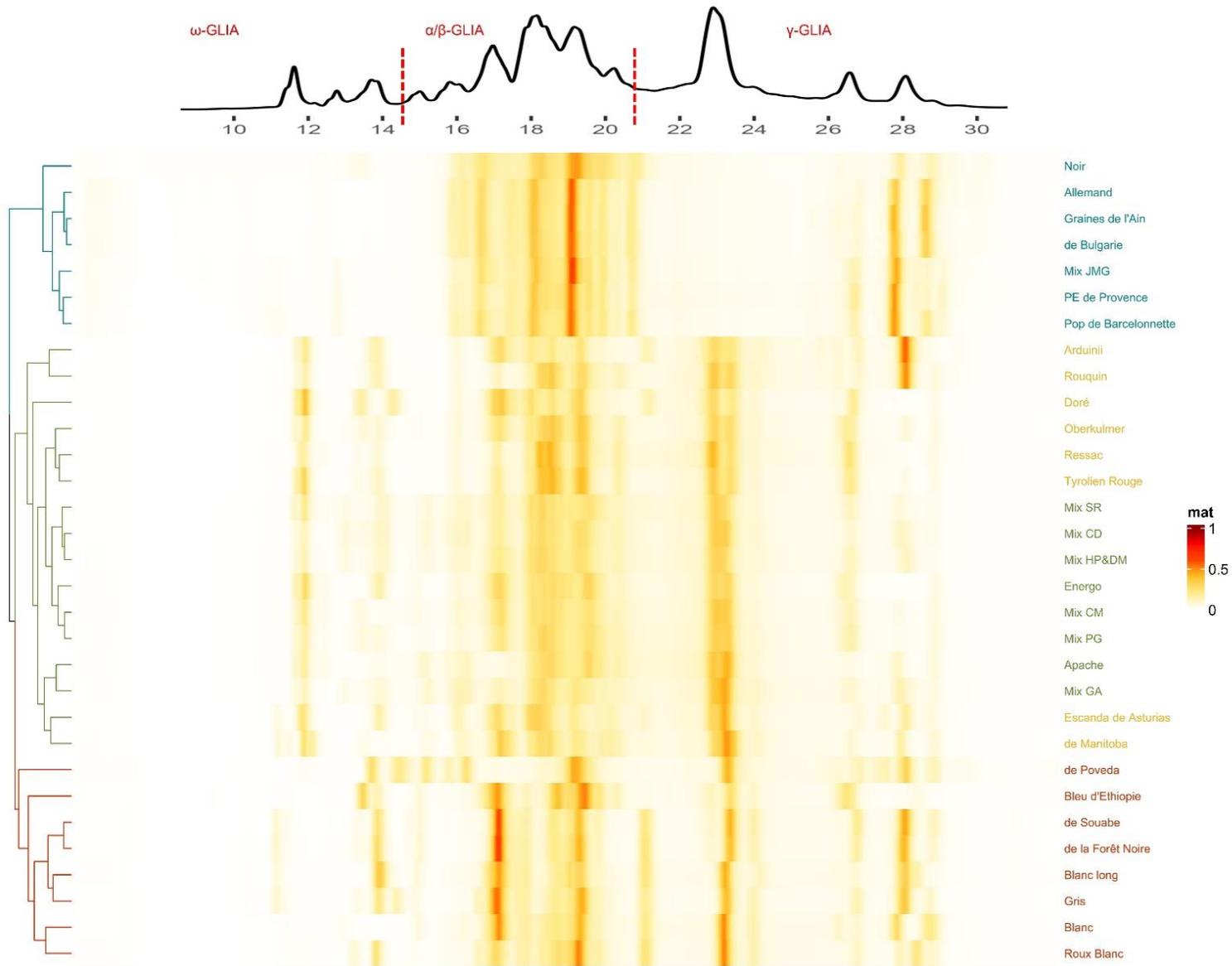


FIGURE 2 Hierarchical clustering based on k-means ($k=3$) and euclidean distances and heatmap visualization of RP-HPLC GLIA chromatographic profiles. On the right of the heatmap, names of the varieties are colored with respect to the species: blue for einkorn, orange for emmer, yellow for spelt and green for common wheat. The chromatograms of the top of the heatmap are those of the common wheat landrace *Mix HP&DM*.

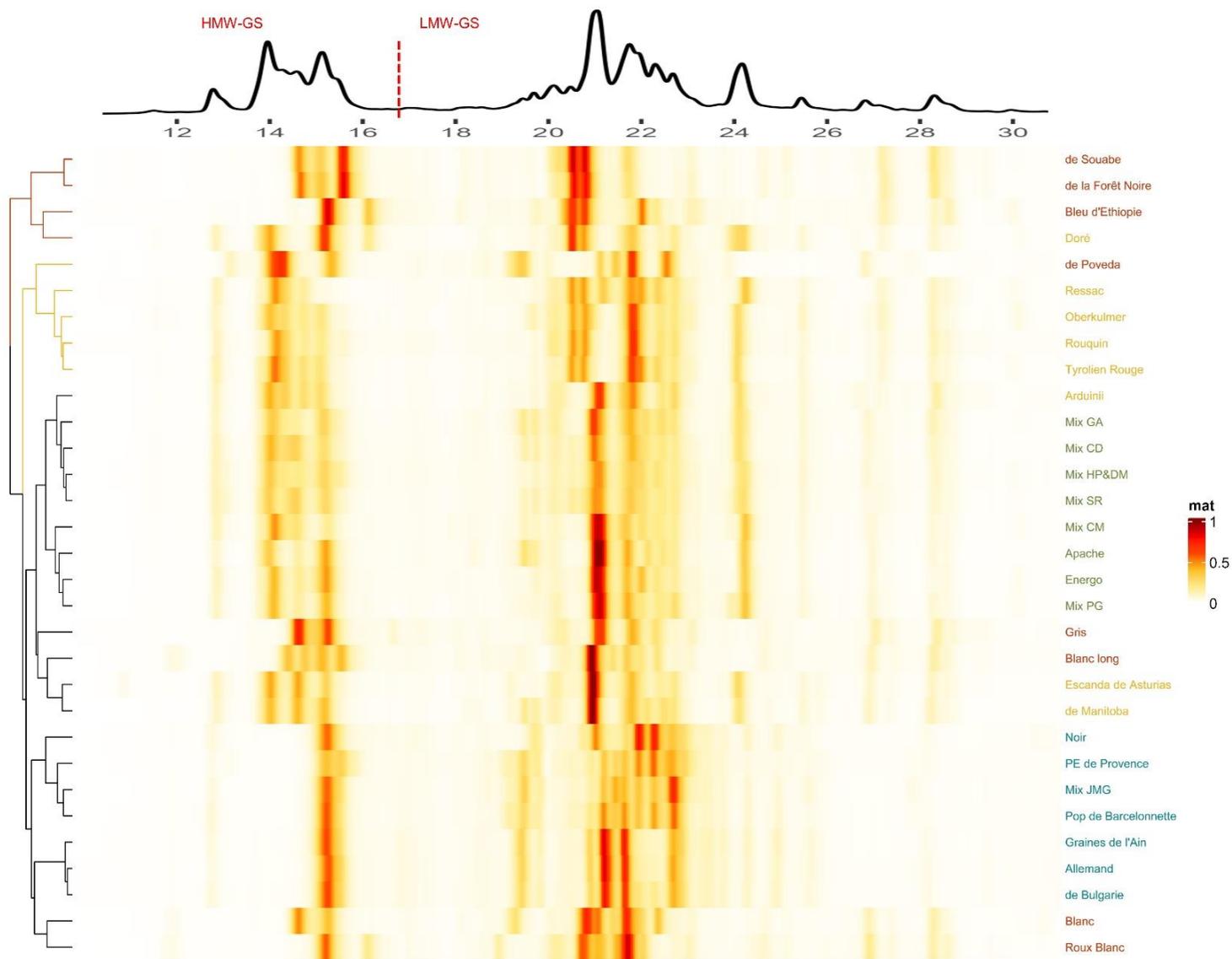


FIGURE 3 Hierarchical clustering based on k-means (k=3) and euclidean distances and heatmap visualization of RP-HPLC GLUT chromatographic profiles. On the right of the heatmap, names of the varieties are colored with respect to the species: blue for einkorn, orange for emmer, yellow for spelt and green for common wheat. The chromatograms of the top of the heatmap are those of the common wheat landrace *Mix HP&DM*.

Appendix 6: Plot of variables of the PCA on complete absorbance values of RP-HPLC GLIA-GLUT chromatographic profiles

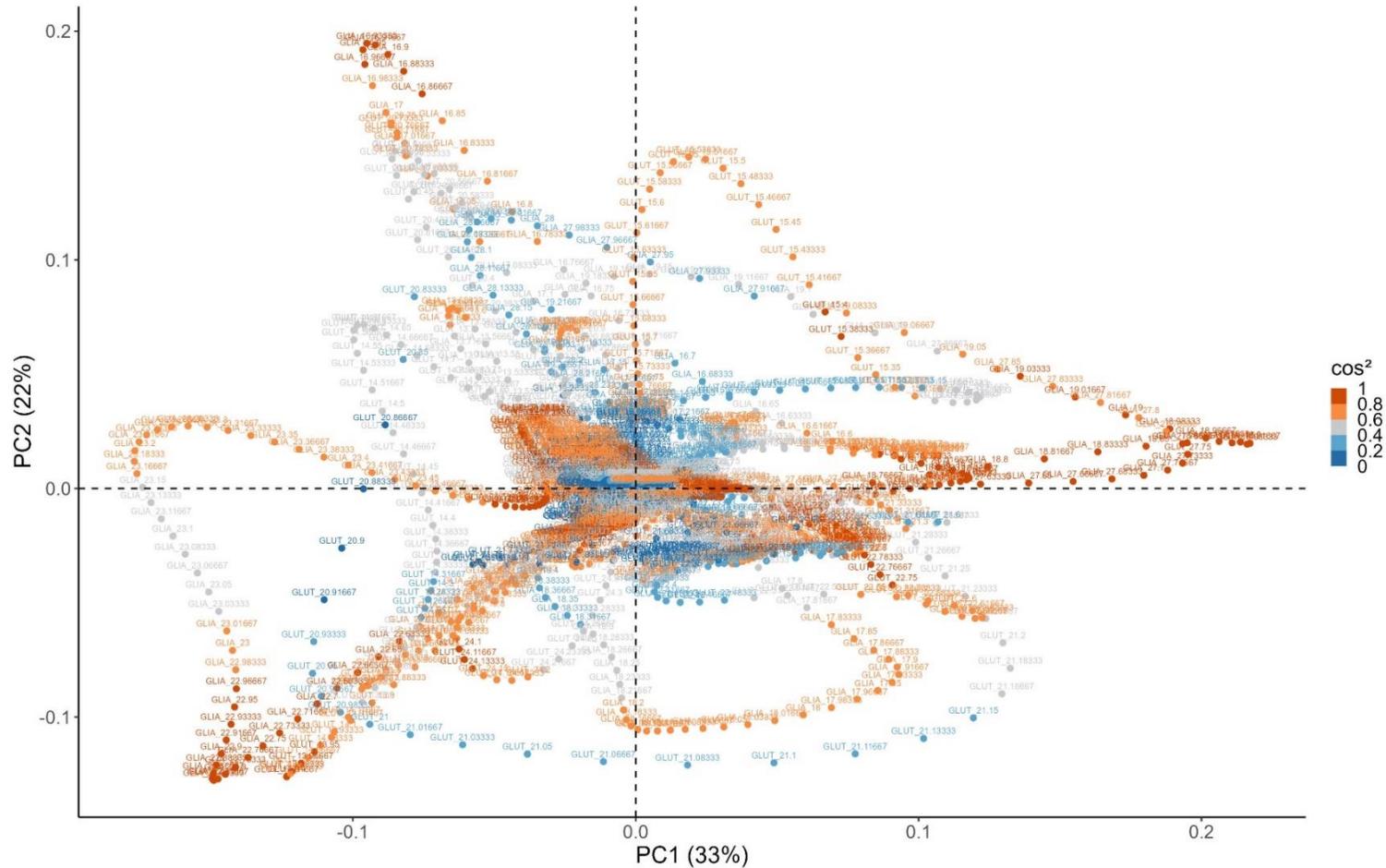


FIGURE 1 Plot of variables for the PCA on complete absorbance values of RP-HPLC GLIA-GLUT chromatographic profiles. Colors indicate the quality of representation (\cos^2) of each variable.

5.3 Effet de l'environnement

Dans la section précédente, j'ai caractérisé la composition en protéines du gluten pour chacune des quatre espèces, et exploré la diversité intra-spécifique. Pour ceci, j'ai travaillé uniquement sur le dispositif expérimental du CRBA (JD-CRBA), qui comprenait les 31 variétés répétées au sein de deux blocs. Dans cette section, j'analyse l'effet de l'environnement sur les compositions en protéines du gluten.

Pour des raisons de clarté, j'ai conservé les figures de résultats, y compris leurs titres, en anglais. Ce choix facilite les liens entre la section 5.2, qui est rédigée sous forme d'article, et la présente section.

5.3.1 Echantillons considérés

Pour des raisons de temps et de coût des analyses chromatographiques, les compositions en protéines du gluten ont été évaluées uniquement pour cinq variétés du JD-MS. Nous avons choisi de prendre en compte une variété par espèce, sauf pour le BT, pour lequel nous avons considéré un mélange de variétés paysannes (*Mix CD*) et une variété moderne (*Apache*). Pour chacune des espèces, nous avons inclus la (ou les pour le BT) variété(s) les plus répétées entre les sites d'étude. Les variétés prises en compte, ainsi que leur distribution parmi les sites sont présentées dans le tableau 5.1.

TABLEAU 5.1 – Répartition des variétés prises en compte pour l'analyse des compositions en protéines du gluten du jeu de données multi-sites au sein des sept sites. Les croix indiquent la présence des variétés au sein de chaque site. Les variétés qui sont répétées au sein des sites sont identifiées par un fond vert.

Espèce	Variété	CRBA	CD	CM	HP&DM	JPC	MPR&PB	SR	Total sites/variété
Engrain	<i>Mix JMG</i>	X	X	X		X	X	X	6
Amidonnier	<i>Blanc</i>	X		X	X	X		X	5
Grand épeautre	<i>Oberkulmer</i>	X	X	X	X	X	X	X	7
Blé tendre	<i>Mix CD</i>	X	X	X			X	X	5
	<i>Apache</i>	X		X		X			3
Total variétés/site		5	3	5	2	4	3	4	

Les compositions en protéines du gluten ont été déterminées sur des triplicats, exactement de la même façon pour les échantillons du JD-MS que pour ceux du JD-CRBA (section 5.2).

5.3.2 Effet de l'environnement sur les compositions en protéines du gluten

Comme pour l'analyse portant uniquement sur l'essai au CRBA, nous avons évalué le taux de protéines totales et le UPP% mesurés par SE-HPLC (figure 5.1). Nous avons également analysé la proportion de gluten et sa composition (figure 5.2), la proportion des différentes sous-catégories de GLUT (figure 5.3) et de GLIA (figure 5.4).

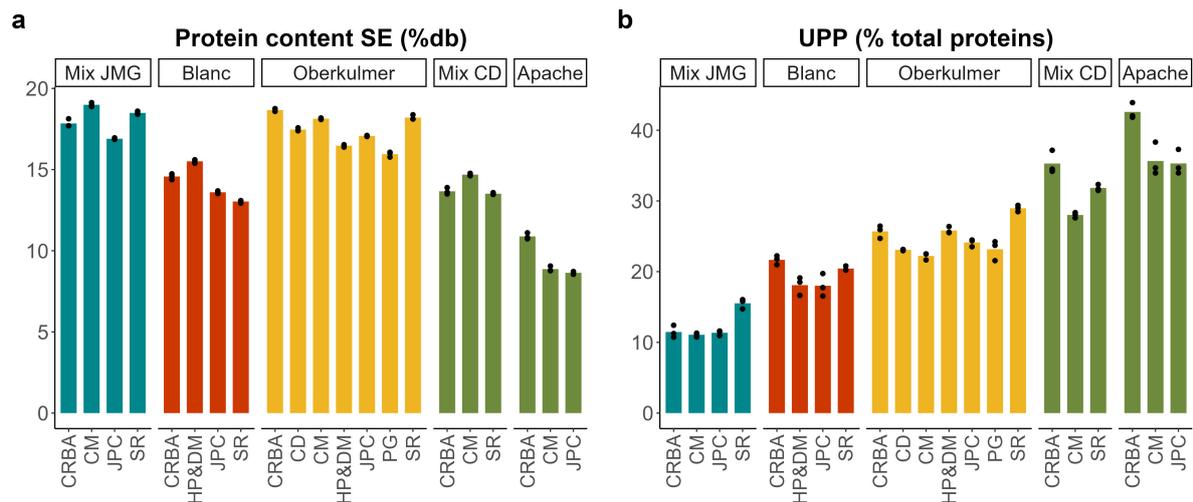


FIGURE 5.1 – Total protein content and UPP% determined by SE-HPLC for the five varieties in different locations. Histograms indicate the mean values (means of technical triplicates) of each variety in each location. Black dots represent the values of the technical triplicates. Each species is represented by a unique color : blue for einkorn, red for emmer, yellow for spelt, green for common wheat.

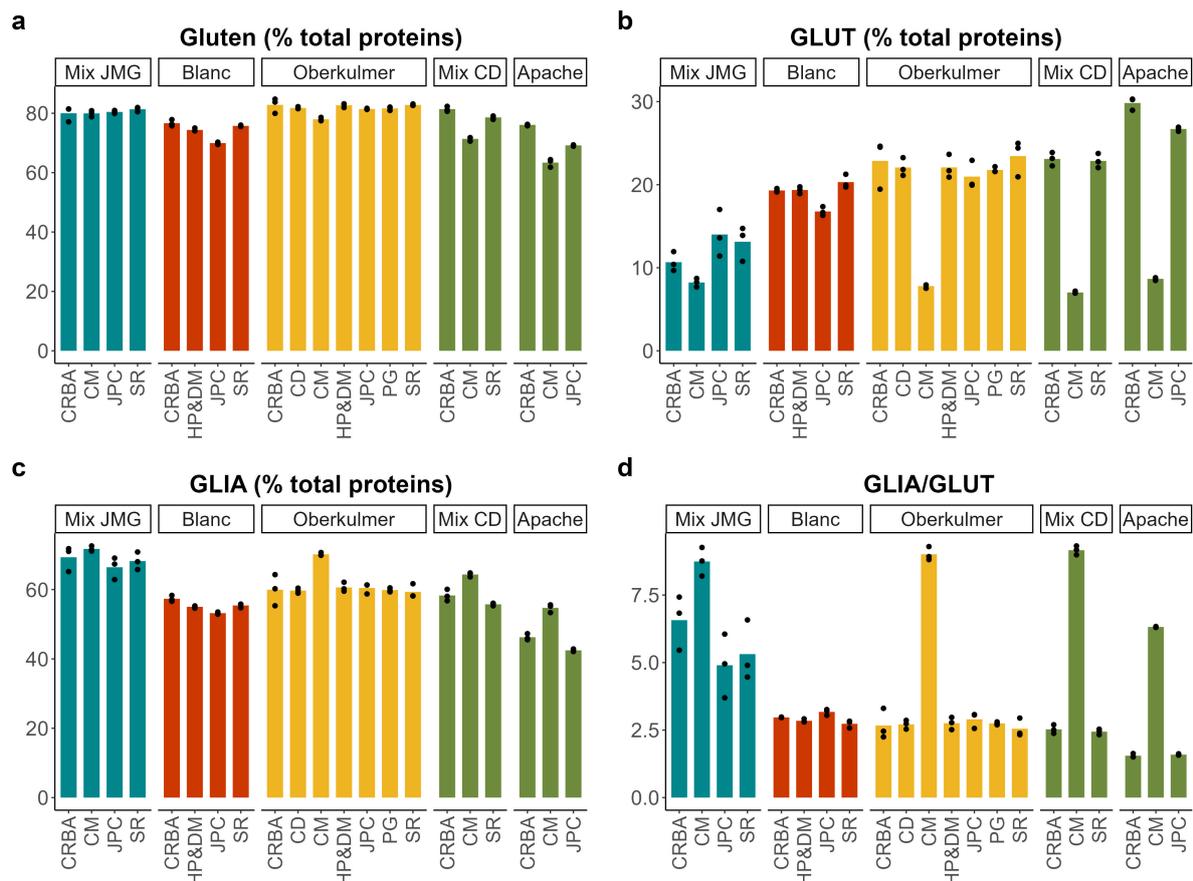


FIGURE 5.2 – Gluten (GLIA + GLUT) content and gluten composition determined by RP-HPLC for the five varieties in different locations. Total gluten (a), GLUT (b) and GLIA (c) are expressed as % of total proteins. d) GLIA/GLUT ratio. Histograms indicate the mean values (means of technical triplicates) of each variety in each location. Black dots represent the values of the technical triplicates. Each species is represented by a unique color : blue for einkorn, red for emmer, yellow for spelt, green for common wheat.

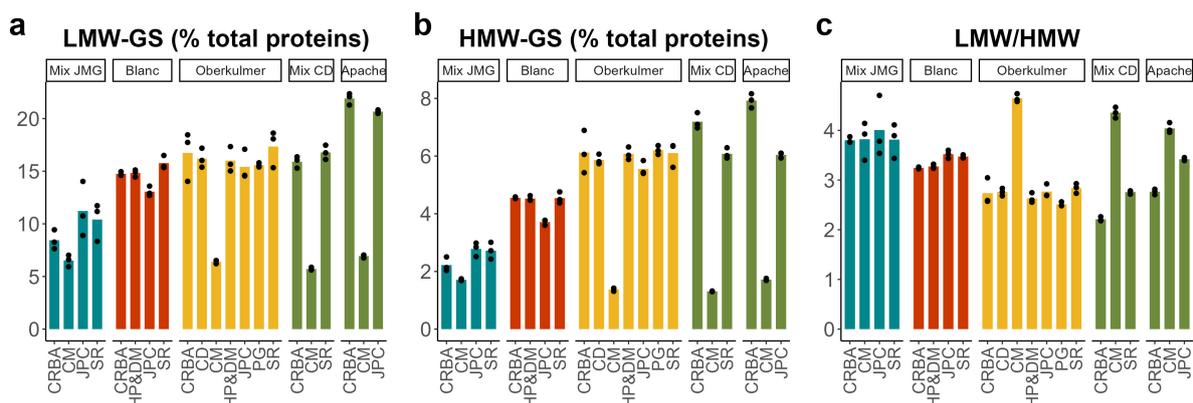


FIGURE 5.3 – GLUT composition determined by RP-HPLC for the five varieties in different locations. LMW-GS (a) and HMW-GS (b) are expressed as % of total proteins. c) LMW/HMW ratio. Histograms indicate the mean values (means of technical triplicates) of each variety in each location. Black dots represent the values of the technical triplicates. Each species is represented by a unique color : blue for einkorn, red for emmer, yellow for spelt, green for common wheat.

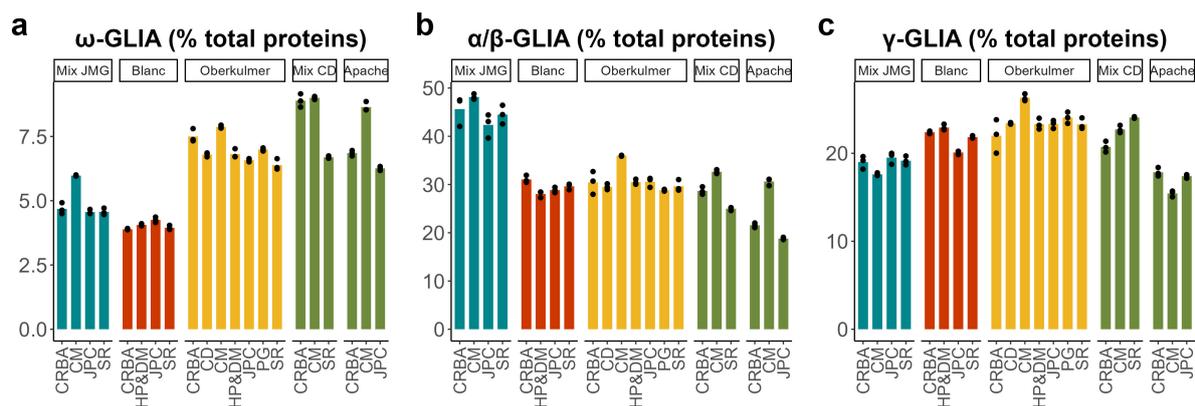


FIGURE 5.4 – GLIA composition determined by RP-HPLC for the five varieties in different locations. ω -GLIA (a), α/β -GLIA (b) and γ -GLIA (c) are expressed as % of total proteins. Histograms indicate the mean values (means of technical triplicates) of each variety in each location. Black dots represent the values of the technical triplicates. Each species is represented by a unique color : blue for einkorn, red for emmer, yellow for spelt, green for common wheat.

La variabilité environnementale sur le taux des protéines a été décrite dans le chapitre 4, avec un jeu de données plus important. On retrouvait des valeurs très élevées chez CM, alors qu’elles sont relativement faibles chez JPC et chez MPR&PB (4.8, chapitre 4).

Par rapport aux compositions en protéines du gluten, si l’on considère l’ensemble des sites sauf la ferme CM, aucun effet clair de l’environnement ne ressort. Il semble que les deux variétés de BT (*Mix CD* et *Apache*) ont des valeurs de UPP% et de gluten total supérieures au CRBA par rapport aux sites JPC (pour *Mix CD*) et SR (pour *Apache*). Cependant, le jeu de données ne permet pas de conclure quant à ces tendances. Ces observations sont en accord avec des études précédentes telle que celle de GEISLITZ et al. 2019, qui suggèrent que malgré un effet fort sur le taux de protéines totales, l’environnement a peu d’effet sur les compositions en différentes fractions protéiques.

Toutefois, un effet du site CM sur les compositions en protéines du gluten est observé. En particulier, les variétés du site CM sont caractérisées par des taux de GLUT très faibles (de 7,0% des protéines totales pour le BT *Mix CD* à 8,7% pour le BT *Apache*), conduisant à un ratio GLIA/GLUT élevé (de 6,3 pour le BT *Apache* à 9,2 pour le BT *Mix CD*) (figure 5.2). De plus, la proportion de HMW-GS est faible dans les variétés du site CM (de 1,2% des protéines totales pour le BT *Mix CD* à 1,7% pour le BT *Apache*), ce qui mène à un ratio LMW/HMW très élevé (de 3,8 pour l’En *Mix JMG* à 4,8 pour le GE *Oberkulmer*) (figure 5.3).

Le site CM est certainement celui où les blés ont subi les stress les plus sévères lors de la

saison 2021-2022 (tableaux 3.7 et 3.9 chapitre 3), ce qui a pu impacter les compositions en protéines du gluten. Néanmoins, des proportions réduites de GLUT par rapport à celles de GLIA sont généralement observées lorsque les niveaux d'azote sont élevés (SCHOBERT et al. 2006), ce qui n'est pas le cas dans le site CM. De plus, des recherches antérieures comme celle de DUPONT et al. 2007, indiquent que des changements environnementaux (tels que des variations de température) peuvent influencer l'expression des sous-unités (monomères) de HMW-GS sans altérer la quantité totale de la fraction protéique.

ZHANG et al. 2013 identifient une diminution des proportions de HMW-GS en cas de températures élevées pendant l'épiaison ou en cas de températures élevées pendant l'épiaison et la floraison. Par ailleurs, JIANG et al. 2009 rapportent une réduction du taux de HMW-GS en cas de sécheresse et en cas d'excès d'eau au moment du remplissage des grains. Il est certain que dans le site CM, les blés ont été soumis simultanément à des températures élevées et à des manques d'eau de l'épiaison jusqu'au remplissage grains (figure 3.9, chapitre 3). Néanmoins, la réduction drastique des proportions de GLUT en situation de stress intense reste à explorer en détail.

Enfin, la méthode d'analyse des profils chromatographiques complets (section 5.2) pourrait s'avérer utile pour explorer l'impact de changements environnementaux sur l'expression de sous-unités (monomères) de certaines fractions protéiques, comme rapporté par DUPONT et al. 2007.

5.4 Conclusion

Dans la première section de ce chapitre (5.2), nous avons caractérisé les compositions en protéines du gluten pour chacune des trois espèces de blés vêtus en comparaison à des variétés de BT. Il en est ressorti que l'En se différencie clairement du BT. L'espèce diploïde est associée à un taux de protéines totales élevé, un faible UPP%, des proportions élevée de GLIA et faible de GLUT, et un ratio LMW/HMW élevé. Avec l'exception du ratio LMW/HMW, l'Am suit les mêmes tendances que l'En, mais les différences avec le BT sont moins importantes. Enfin, nous avons observé des légères différences entre le GE et le BT. Le GE se distingue par une teneur en protéines légèrement supérieure, par un UPP% moindre et par un ratio GLIA/GLUT plus élevé que le BT. Ainsi, au moins pour l'En et l'Am, nous avons validé notre hypothèse (a), selon laquelle les blés vêtus ont des compositions en protéines du gluten différentes de celle du BT. Nous avons également vérifié que les différences portent sur des fractions protéiques, telles que les GLUT et surtout les HMW-GS, hautement sélectionnées dans les variétés modernes de BT.

De plus, nous avons observé une variabilité plutôt élevée au sein de chaque espèce de blé vêté, en particulier parmi les variétés d'Am (et moindre pour l'En). Ainsi, au moins pour l'Am, nous observons plus de diversité intra-spécifique que pour le BT. Il convient toutefois de rappeler que ces estimations de diversité concernent les variétés incluses dans cette étude particulière, et ne peuvent être généralisées à l'échelle de l'espèce.

Parmi les variétés de BT, nous avons constaté des tendances spécifiques aux mélanges de variétés paysannes. Ces derniers semblent aussi être caractérisés par un UPP% faible, un ratio GLIA/GLUT élevé et un ratio LMW/HMW faible. Ces résultats vont dans le sens de l'hypothèse (b), qui suggérerait que les variétés paysannes se distingueraient des variétés modernes.

De plus, nous avons identifié des variétés présentant des caractéristiques notoires. En particulier, l'Am *de Poveda* s'est distingué de toutes les autres variétés d'Am par ses profils chromatographiques uniques pour les fractions de protéines GLIA et GLUT. La composition des sous-unités (monomères) de ces deux fractions de protéines est distante pour cette variété par rapport aux autres Am étudiés. La méthode d'analyse des profils chromatographiques complets s'est avérée particulièrement efficace pour identifier le profil distinctif de cette variété, ainsi que pour discriminer les quatre espèces.

Dans la deuxième section de ce chapitre (5.3), nous nous sommes intéressé.e.s à l'effet de l'environnement sur les compositions en protéines du gluten. Un effet fort est ressorti uniquement pour le site CM, caractérisé par des proportions extrêmement faibles de GLUT, et en particulier de HMW-GS. Ces résultats suggèrent que l'environnement a un impact faible sur les proportions des différentes fractions protéiques du gluten, sauf dans des situations particulièrement stressantes, telles que celles du site CM.

Tout comme pour les variables agronomiques et morphométriques des grains, de futures expérimentations sont nécessaires pour confirmer ou réfuter nos hypothèses initiales. Ces futures études pourraient être menées sur plus de variétés par espèce, afin de confirmer les tendances par espèces, ainsi que les estimations de diversité intra-spécifique. Concernant l'effet de l'environnement, un jeu de données moins déséquilibré permettrait de l'évaluer par des méthodes statistiques. En outre, nous pourrions envisager un dispositif permettant d'évaluer l'impact de certains stress en particulier sur les diverses fractions protéiques et leurs compositions en sous-unités (monomères).

Finalement, il paraît important de rappeler que cette étude ne permet pas d'établir des relations entre les différentes compositions en protéines du gluten et des effets sur la santé.

5.5 Bibliographie

- DUPONT, F., R. CHAN et R. LOPEZ (2007). « Molar fractions of high-molecular-weight glutenin subunits are stable when wheat is grown under various mineral nutrition and temperature regimens ». In : *Journal of Cereal Science* 45.2, p. 134-139. DOI : [10.1016/j.jcs.2006.07.008](https://doi.org/10.1016/j.jcs.2006.07.008).
- GEISSLITZ, S., C. F. H. LONGIN, K. A. SCHERF et P. KOEHLER (2019). « Comparative study on gluten protein composition of ancient (einkorn, emmer and spelt) and modern wheat species (durum and common wheat) ». In : *Foods* 8.9, p. 409. DOI : [10.3390/foods8090409](https://doi.org/10.3390/foods8090409).
- JIANG, D., H. YUE, B. WOLLENWEBER, W. TAN, H. MU, Y. BO, T. DAI, Q. JING et W. CAO (2009). « Effects of post-anthesis drought and waterlogging on accumulation of high-molecular-weight glutenin subunits and glutenin macropolymers content in wheat grain ». In : *Journal of Agronomy and Crop Science* 195.2, p. 89-97. DOI : [10.1111/j.1439-037X.2008.00353.x](https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2008.00353.x).
- SCHOBER, T. J., S. R. BEAN et M. KUHN (2006). « Gluten proteins from spelt (*Triticum aestivum* ssp. *spelta*) cultivars : A rheological and size-exclusion high-performance liquid chromatography study ». In : *Journal of Cereal Science* 44.2, p. 161-173. DOI : [10.1016/j.jcs.2006.05.007](https://doi.org/10.1016/j.jcs.2006.05.007).
- ZHANG, X., J. CAI, B. WOLLENWEBER, F. LIU, T. DAI, W. CAO et D. JIANG (2013). « Multiple heat and drought events affect grain yield and accumulations of high molecular weight glutenin subunits and glutenin macropolymers in wheat ». In : *Journal of Cereal Science* 57.1, p. 134-140. DOI : [10.1016/j.jcs.2012.10.010](https://doi.org/10.1016/j.jcs.2012.10.010).

Analyse réflexive de la démarche de recherche

Contenu

6.1	Introduction	276
6.2	Le concept de sous-optimalité	277
6.3	La définition de l'optimum théorique et les questions posées	280
6.4	Analyse réflexive de la démarche de recherche	283
6.5	Conclusion	312
6.6	Bibliographie	315



Semis au CRBA en novembre 2021. Crédit photo : Alice Malivert.

6.1 Introduction

Le « processus [peut être] tout aussi important que les résultats » (BELLOT et RIVARD 2013). Cette affirmation revêt une signification particulière dans le contexte des démarches de recherche participative, où l'approche et la manière dont la recherche est menée sont aussi cruciales que les conclusions finales.

Une grande partie de mon travail de thèse a été consacré à la mise en place d'une démarche de recherche impliquant des citoyen.ne.s non scientifiques professionnel.le.s. Dès le début du doctorat, nous avons adopté un positionnement fort. Il était primordial pour nous que le projet ait du sens pour des citoyen.ne.s de la région lyonnaise, et qu'il contribue, à long terme, à une transition agroécologique du territoire. Pour atteindre ces objectifs de sens et de transformation sociale, nous avons opté pour une approche participative, dont le potentiel transformateur dépasse souvent celui d'approches descendantes plus classiques (KERRIGAN et al. 2023). Dans le cas de ma thèse, je souhaitais intégrer les acteur.trice.s non académiques dès les premières phases du projet.

Néanmoins, nous ne nous sommes pas appuyés sur un cadre méthodologique pré-existant pour conduire un projet de recherche associant des partenaires non scientifiques. Par ailleurs, nous étions confronté.e.s à des contraintes, principalement en termes de temps, avec seulement trois années pour finaliser le doctorat. Une autre difficulté résidait dans notre manque d'expérience et de compétences au sein de l'équipe de recherche, tant par rapport aux disciplines scientifiques nécessaires au projet que par rapport aux approches de recherche participative. Par conséquent, nous avons mené le projet de manière pragmatique, comme exposé dans le chapitre 3. A présent, il me semble essentiel de revenir sur la démarche mise en œuvre, d'en analyser les points forts et les faiblesses, et de proposer des perspectives. Je mobilise donc la notion de réflexivité continue pratiquée en sciences sociales, et qui encourage les chercheur.euse.s à remettre en permanence en question leurs pratiques et approches (OLIVIER DE SARDAN 1995a; JODELET 2003).

Ce chapitre constitue une analyse réflexive de la démarche de recherche mise en place au cours de la thèse. Pour effectuer cette analyse, j'ai choisi de me baser sur le concept de la sous-optimalité (SO) (HAMANT 2022), présenté ci-dessous (section 6.2). J'ai opté pour ce cadre novateur plutôt que d'employer des approches de sociologie plus classiques, telle que la sociologie de la traduction (ou théorie de l'acteur-réseau) (CALLON 2009; STRUM et al. 2013), déjà employée pour un tel exercice (KLAEDTKE 2017). Cette décision découle de plusieurs facteurs. D'une part, cette analyse n'étant pas un des objectifs initiaux de la thèse, nous n'avons pas mobilisé de méthode particulière

et donc pas collecté de données dédiées. D'autre part, nous ne disposons pas des compétences nécessaires au sein de l'équipe de recherche pour appliquer correctement une analyse sociologique.

Ce chapitre est structuré en cinq sections. Après l'introduction, la deuxième section (6.2) est une présentation du concept de SO. Dans la troisième section (6.3), je propose un optimum théorique et une série de questions qui guideront l'analyse. La quatrième (6.4) constitue l'analyse réflexive à proprement parler. Différents aspects de la démarche de recherche y sont discutés dans des sous-sections distinctes. Enfin, en guise de conclusion (section 6.5), je reviens sur l'ensemble de l'approche de recherche participative mise en œuvre dans cette thèse, et discute brièvement le choix du cadre d'analyse.

Il convient de souligner que l'exercice réflexif présenté dans ce chapitre est très exploratoire. Il est aussi subjectif, car il repose sur mes propres interprétations, qui ne sont pas nécessairement partagées par d'autres acteur.trice.s du projet de recherche. En conséquence, il n'engage que moi. Par ailleurs, l'analyse présentée se concentre sur la thèse. Les résultats ne seraient pas les mêmes si elle portait sur le projet « Céréales » du programme ANS dans son ensemble.

6.2 Le concept de sous-optimalité

Dans la suite de ce chapitre, j'utilise le vocabulaire de la **sous-optimalité**, qui est mis en évidence grâce à une couleur **bordeaux**. Pour clarifier les termes qui pourraient prêter à confusion, des définitions sont fournies dans le tableau 6.1.

La **sous-optimalité (SO)** se pose en contre-modèle, s'opposant à l'obsession de la **performance**¹ et de l'**optimisation**² qui prévaut dans nos sociétés. Ce concept a été récemment mis en avant par HAMANT 2022 dans son ouvrage intitulé « *La troisième voie du vivant* ». Dans nos sociétés, l'idée de **performance** est devenue un dogme qui promeut l'**optimisation**, le contrôle et la vitesse à tous les niveaux et dans tous les secteurs. Cette doctrine prédomine notamment dans le domaine économique où la rentabilité est le mot d'ordre, s'appuyant sur l'augmentation de l'**efficience** pour maximiser les profits en minimisant les coûts.

1. Définie comme la somme de l'efficacité (atteindre son objectif) et de l'efficience (avec le moins de moyens possible).
2. Définie comme l'augmentation de la performance.

TABLEAU 6.1 – Glossaire de la **sous-optimalité**. Les définitions proposées sont inspirées du livre « *La troisième voie du vivant* » de HAMANT 2022. Seuls les termes qui, selon moi, peuvent engendrer des confusions sont définis.

Terme	Définition
Efficacité	Aptitude (d'une personne, d'un groupe ou d'un système) à atteindre ses objectifs.
Efficience	Utilisation de ressources pour la réalisation d'un objectif.
Performance	Capacité à être efficace et efficient. Il s'agit d'atteindre ses objectifs en utilisant le moins de ressources possibles.
Optimiser	Fait d'obtenir le meilleur (l'optimum), selon plusieurs critères, d'une situation.
Robustesse	Capacité d'un système, en dépit de fluctuations, à maintenir sa stabilité à court terme, et de rester viable à long terme.
Externalité	Effet généré par une activité qui procure un avantage gratuit (externalité positive), ou une nuisance sans compensation (externalité négative).
Incohérence	Contradiction interne dans un système.

Cependant, ce credo de l'**optimisation** est aujourd'hui en difficulté face aux crises auxquelles nous sommes confronté.e.s. Non seulement la quête de **performance** s'inscrit dans un modèle de société à l'origine de ces crises, mais elle limite également la recherche de solutions réelles pour s'y adapter. Elle confine les initiatives dans une logique d'**optimisation** rigide qui autorise peu de **fluctuations**, de **marges de manœuvre** et donc d'**adaptabilité**.

Or la recherche de solutions viables faces aux multiples crises devient de plus en plus urgente. Pour élargir les possibles, HAMANT 2022 nous propose un positionnement à l'encontre de la **performance**. Il suggère d'adopter la notion de **SO**, consistant à concevoir des solutions et des systèmes qui fonctionnent tout en restant délibérément en deçà d'un **optimum** théorique. Ainsi, ces solutions conservent des **marges de manœuvre** qui permettent l'**adaptation**, la **fluctuation** et qui peuvent générer des **externalités positives**. En résumé, il s'agit de trouver un compromis entre **efficacité** et **robustesse**³, tout en acceptant les faiblesses et les **fluctuations**.

Pour nous guider dans cette démarche, HAMANT 2022 propose de s'inspirer des systèmes vivants, qui regorgent d'exemples de **SO**. Par exemple, notre information génétique est bien loin du cas d'école selon lequel un gène équivaut à une protéine, qui équivaut à une fonction. Dans le cas des humain.e.s, nous sommes non seulement diploïdes, mais notre génome est constitué de familles multigéniques. Nous observons également de nombreux cas de **redondances** dans les interactions impliquant gènes et protéines. Or ces systèmes biologiques, qui paraissent **inefficaces**, ne cessent de nous surprendre par leur capacité d'**adaptation**.

3. Définie comme la capacité d'un système à maintenir sa stabilité malgré les fluctuations.

Encadré 6.2.1 - **Sous-optimalité**, agroécologie, recherche participative et blés vêtus

L'objectif très global de ma thèse et du programme ANS est de contribuer à une transition vers des systèmes agroalimentaires plus agroécologiques dans la région de Lyon. Or l'agroécologie, telle que décrite dans cette thèse, peut être vue comme modèle **sous-optimal**. En effet, elle vise à renforcer la **robustesse** des systèmes agroalimentaires (notamment, par la diversification à plusieurs échelles), en maintenant un niveau basal d'**efficacité** (capacité à assurer la sécurité alimentaire et une alimentation de qualité) sans pour autant vouloir atteindre le maximum de **performance** (par exemple, en termes de rendements pour l'aspect agricole).

En comparaison avec d'autres pratiques de recherche, les approches participatives peuvent aussi paraître **sous-optimales**. Elles ne visent pas uniquement une **efficacité** scientifique, définie par la production d'un grand nombre de résultats généralisables. De plus, si ces approches peuvent sembler **lentes** et complexes, elles génèrent souvent des **externalités positives**, tel que l'établissement de liens entre différente.e.s acteur.trice.s de la société.

Enfin, les blés vêtus apparaissent aussi comme un objet d'étude **sous-optimal**. Peu **performants** (notamment en termes de rendements), ils regagnent de l'intérêt en raison de leur supposée **robustesse** agronomique et nutritionnelle (dans le sens d'une potentielle contribution à une alimentation de qualité).

Si on approfondit l'analyse, on s'aperçoit que les capacités d'**adaptation** des systèmes biologiques reposent souvent sur des propriétés perçues négativement par nos sociétés, telles que l'**hétérogénéité**, l'**incertitude**, l'**aléatoire**, la **lenteur**, la **redondance**, l'**incohérence**, ou encore l'**inachèvement**. Ainsi, pour faire face aux crises actuelles en tant que sociétés, HAMANT 2022 nous suggère également d'accepter nos **vulnérabilités** et de les considérer comme des opportunités pour élargir nos **marges de manœuvre**. D'autres auteur.e.s tel.le.s que ASHBY 1991 partagent ce type de vision. Dans leur article sur les systèmes complexes, ASHBY 1991 soulignent que ce sont les **fluctuations** internes qui permettent au système de s'adapter aux **fluctuations** externes. En biologie, cela fait écho aux capacités de régénération des tissus et des organes, une activité permanente qui permet notamment de répondre aux accidents.

La **SO**, illustrée facilement avec des exemples de la biologie, a de fortes bases théoriques dans d'autres disciplines, comme l'informatique (SHANNON 1948), la cybernétique (ASHBY 1956), l'ingénierie (REEVES 2019) ou le design des infrastructures (MARKOLF et al. 2022). Le point commun est le compromis entre **efficacité** et **robustesse**.

Par ailleurs, la **SO** peut être utilisée comme un cadre d'analyse des organisations sociales. Elle permet d'évaluer dans quelle mesure ces organisations s'écartent (ou pas) d'un **optimum**

théorique et comment cet écart peut engendrer de la **robustesse**, ainsi que des **externalités positives**⁴. Toutefois, il est important de noter que cette utilisation de la **SO** comme cadre d'analyse demeure très expérimentale.

Pour utiliser le cadre de la **SO** dans l'analyse de la démarche participative mise en œuvre au cours de la thèse, je commence par définir un **optimum** théorique propre au projet (section 6.3), englobant les volets de recherche et de participation. Ensuite, différents aspects du projet sont analysés (section 6.4).

6.3 La définition de l'optimum théorique et les questions posées

Pour analyser la démarche de recherche mise en œuvre en employant la **SO**, il nous faut considérer cette démarche de recherche comme une organisation sociale. En vue de déterminer un **optimum** théorique, il est également nécessaire de clarifier les objectifs de cette dernière.

Comme l'indique son nom, une recherche participative a des objectifs tant au niveau de la recherche que de la participation. Au vu de la variabilité des approches dites participatives (HOULLIER et MERILHOU-GOUDARD 2016), il est important de préciser les finalités propres à chaque projet. Concernant la thèse, son objectif sur le plan de la recherche est énoncé dans le premier objectif global présenté à la fin de l'introduction générale :

- (i) **Evaluer une (des) espèce(s) de céréales marginales d'intérêt pour les paysan.ne.s en région lyonnaise en fonction de critères agronomiques et nutritionnels choisis de façon participative.**

Plus précisément, sur le plan de la recherche, il s'agit de générer des résultats qui sont à la fois valorisables scientifiquement et qui ont du sens pour les acteur.trice.s non académiques impliqué.e.s dans le projet. La valorisation scientifique, sous forme de communication ou d'article évalué par les pairs, favorise l'enrichissement et le partage des connaissances au sein de la communauté académique. Elle permet également aux chercheur.euse.s de renforcer leur crédibilité (ce qui facilite l'accès à des financements pouvant impacter la viabilité du projet), ainsi qu'à des opportunités professionnelles futures. En outre, des résultats qui ont du sens pour les partenaires non scientifiques peuvent conduire à des actions et à des transformations sociales. Ces dernières

4. Ce travail a notamment été réalisé par un groupe d'étudiant.e.s, encadré.e.s par Olivier Hamant et moi-même dans le cadre de l'Unité d'Enseignement Environnement de l'ENS de Lyon, sur l'organisation sociale des Associations pour le maintien d'une agriculture paysanne (AMAP).

peuvent avoir lieu à l'échelle individuelle, par l'appropriation des résultats de la recherche, ou à l'échelle collective (par exemple, ils peuvent servir à réorienter le projet de recherche). Enfin, l'obtention de résultats en accord avec les attentes des acteur.trice.s non académiques favorise le maintien de leur intérêt pour le projet, et contribue ainsi aux objectifs en matière de participation.

Au-delà de la recherche, le projet de thèse avait des objectifs au niveau de la participation, comme en témoigne le deuxième objectif global mentionné à la fin de l'introduction générale :

- (ii) **Créer du lien entre différent.e.s acteur.trice.s s'intéressant à cette (ces) espèce(s) de céréales marginales sur le territoire, afin d'initier une collaboration sur le long terme.**

Telle qu'énoncée dans ce deuxième objectif global, la finalité en termes de participation était de faciliter la rencontre de différent.e.s acteur.trice.s pour mettre en place une collaboration sur le long terme autour du projet « Céréales » du programme ANS. De mon point de vue, il s'agissait de promouvoir une participation dans un maximum d'étapes du projet et à travers des processus aussi démocratiques que possible. Dans l'idéal, j'aurais aimé que le niveau de participation des acteur.trice.s non académiques atteigne le stade de l'autonomisation (« empowerment ») selon le diagramme de VAUGHN et JACQUEZ 2020 (figure 6.1).

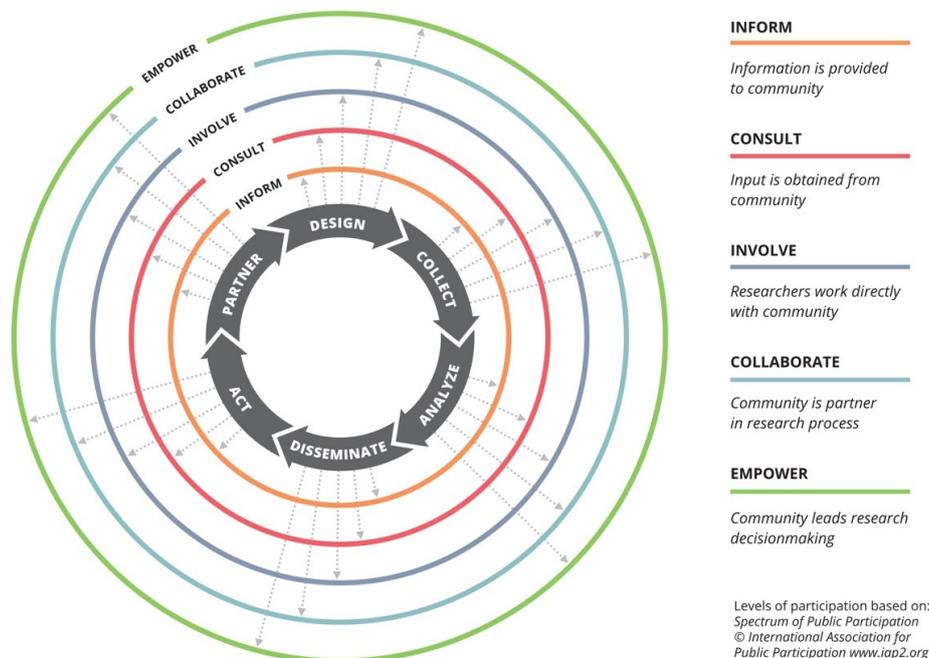


FIGURE 6.1 – Niveaux de participation aux différentes étapes d'un projet de recherche. A chaque étape du processus de recherche, un choix est fait concernant le degré de participation des acteur.trice.s non scientifique.s professionnel.le.s. Ce choix oriente ensuite la sélection des méthodes et outils employés pour la recherche. Source : (VAUGHN et JACQUEZ 2020).

Par ailleurs, les processus mis en œuvre dans le contexte de recherches participatives permettent des apprentissages multiples, pouvant se traduire par des changements de pratiques, et qui concernent aussi bien les acteur.trice.s académiques que non académiques (RIVIÈRE et al. 2013). Ces apprentissages et changements de pratiques s’inscrivent également dans la transformation sociale, et sont des résultats du processus de participation.

Si on reprend ces différents objectifs avec le vocabulaire de la **SO**, l’**efficacité** sur le plan de la recherche consisterait à générer des résultats valorisables sur le plan scientifique (objectif a) et pertinents pour les partenaires non académiques engagé.e.s dans la démarche de recherche (objectif b). En matière de participation, l’**efficacité** consisterait à mettre en place une participation de type autonomisation (« empowerment ») à tous les stades de la recherche (objectif c). Ainsi, l’**optimum** théorique engloberait la réalisation de ces trois objectifs, et ce, de la façon la plus **performante** possible (rapidement, avec un minimum de moyens).

Bien évidemment, atteindre cet **optimum** théorique est impossible, d’autant plus en seulement trois ans. Ainsi, cette analyse réflexive interroge la réelle **efficacité**, **performance** et **robustesse** du projet mené tout au long de la thèse. Plus précisément, elle répond aux questions suivantes :

- (1) *Quelle a été l’**efficacité** du processus de recherche participative expérimenté pendant ma thèse (les objectifs initiaux ont-ils été atteints) ?*
- (2) *Quelle a été la **performance** de ce processus (par quels moyens ces objectifs ont été atteints) ?*
- (3) *En quoi la démarche mise en place apparaît **robuste** et quelles sont ses principales **fragilités** ?*

Comme indiqué précédemment, l’analyse de la démarche de recherche présentée dans la section suivante est divisée en plusieurs sous-sections, abordant des aspects distincts. Chacune de ces sous-sections répond à certaines des questions énoncées ci-dessus, en fonction de leur pertinence par rapport à l’aspect traité. Une réponse à l’ensemble des questions par rapport à la démarche de recherche dans sa globalité est ensuite présentée dans la section 6.5. Enfin, certains éléments qu’il m’a semblé important de mentionner, bien qu’ils ne rentrent pas dans cadre de la **SO**, sont également évoqués.

6.4 Analyse réflexive de la démarche de recherche

La suite de ce chapitre constitue l'analyse à proprement parler de la démarche de recherche. Plusieurs aspects de l'approche participative sont analysés dans des sous-sections indépendantes. Ainsi, l'émergence du projet de recherche participatif (6.4.1), la gouvernance et l'organisation du collectif (6.4.2), les dimensions épistémiques (6.4.3), les premiers impacts de la thèse (6.4.4) et les apprentissages pour la suite du projet participatif (6.4.5) sont abordés.

6.4.1 L'émergence du projet de recherche participatif

Les chercheur.euse.s impliqué.e.s dans des projets de recherche participatifs soulignent l'importance des étapes de préparation. Celles-ci permettent d'établir des relations de confiance et de co-définir des objectifs communs (CoEX 2023 ; DEMEULENAERE et GOLDRINGER 2017). Dans le cadre des projets CO3 (co-construction des connaissances pour une transition écologique et solidaire), qui encouragent la collaboration entre scientifiques et société civile (AGROPOLIS FONDATION 2023), une année entière de financements est allouée à l'établissement de partenariats. Cette année permet d'organiser des échanges avec les collaborateur.trice.s, leur permettant de faire connaissance, d'exprimer leurs attentes et questionnements, tout en définissant des objectifs communs, des questions de recherche et une stratégie pour y répondre. Bien que cela n'ait pas été formalisé, cette phase initiale est similaire à ce que j'ai effectué au cours de ma première année de thèse. Ci-dessous, j'aborde d'abord la stratégie que nous avons employée pour impliquer des acteur.trice.s non académiques (sous-section 6.4.1.1). Je reviens ensuite sur les premières étapes de la collaboration (sous-section 6.4.1.2).

6.4.1.1 L'implication des acteur.trice.s non académiques

Deux stratégies peuvent être mobilisées pour impliquer des acteur.trice.s lors du montage d'un projet de recherche participatif. La première consiste à inviter toute personne intéressée à rejoindre le collectif dès les premières phases du processus, et à participer à la définition des objectifs et questions. Cette stratégie est souvent contrainte par le manque de temps et de financements (CoEX 2023). Une deuxième option est de rassembler, dans un premier temps, un nombre restreint de partenaires. Ce noyau dur permet de passer rapidement à l'action, et facilite l'avancement du projet sur le plan de la recherche. Si cette stratégie paraît plus **performante**, elle soulève des questions de légitimité et de démocratie. On peut se demander : *Qui peut décider*

à qui donner le droit de s'impliquer dans un projet de recherche participative territoriale ?

Dans le cas de cette thèse, nous avons plutôt suivi la deuxième stratégie. Ce choix était justifié par la contrainte temporelle liée à la durée de la thèse, par un manque de moyens humains pour assurer le suivi d'une expérimentation auprès d'un plus grand nombre de paysan.ne.s, ainsi que par une contrainte financière liée au dédommagement des partenaires pour leur participation au projet.

L'initiation des projets de recherche participative est souvent marquée par l'organisation d'un (ou plusieurs) atelier(s), permettant des échanges entre les différent.e.s acteur.trice.s et la définition d'orientations communes (CoEx 2023). Dans notre cas, nous avons opté pour une méthode plus atypique pour impliquer les paysan.ne.s : une enquête de terrain (chapitre 3). Malgré la **lenteur** et la **redondance**⁵ qui limitent la **performance** de cette stratégie, elle s'est avérée suffisamment **efficace** pour établir rapidement un nombre restreint de partenariats. Par ailleurs, l'enquête a généré plusieurs **externalités positives**. Notamment, je suis persuadée que le fait de s'être rencontré.e.s sur les lieux de travail des paysan.ne.s plutôt que dans un cadre académique a contribué à établir rapidement des relations de confiance. Nous pouvons également considérer les autres objectifs de l'enquête comme des **externalités positives**.

Au cours de l'enquête, le fait de présenter un projet très modulable peut être vu comme une source d'**incertitude**, surtout sur le plan de la recherche. En contraste, présenter un projet non défini a probablement facilité l'intérêt des paysan.ne.s, car les **marges de manœuvre** au niveau desquelles il.elle.s pouvaient agir étaient facilement identifiables. Même l'**hétérogénéité** du vocabulaire utilisé entre les deux phases de l'enquête a pu témoigner de l'**adaptabilité** du projet et permettre de faire ressortir des remarques à des échelles très larges. Dans tous les cas, nous sommes parvenu.e.s à intégrer des retours des enquêté.e.s, que ça soit pour prendre des décisions concernant l'expérimentation (telle que la prise en compte de variétés de BT paysannes et modernes) ou le collectif (comme l'intégration de l'ARDEAR).

En résumé, notre choix initial de restreindre le nombre de partenaires non académiques reflète une recherche de **performance**, notamment due à la durée limitée de la thèse. Au-delà des questions de légitimité, cette décision fait que le projet repose sur l'implication d'un nombre limité d'individus, ce qui constitue une source de **fragilité**. En contraste, la méthode d'enquête employée semble bien rentrer dans la **SO**. En dépit de sa **lenteur** et de la forte mobilisation de

5. L'enquête a demandé à l'équipe de recherche de se rendre au moins une fois dans chacune des fermes.

l'équipe de recherche, elle a été à la fois **efficace** (elle a permis l'implication d'acteur.trice.s non académiques et la modulation du projet en fonction de leurs retours) et source de **robustesse** (par l'instauration de relations de confiance).

6.4.1.2 Les premières étapes de la collaboration

Au-delà de l'établissement de relations de confiance, les phases préliminaires des projets participatifs visent à définir des objectifs communs et des stratégies de recherche. Celles-ci portent sur les protocoles de recherche et sur les modalités de fonctionnement du collectif. Dans le cas de la thèse, les objectifs avaient été déterminés par l'équipe de recherche, avant l'implication des acteur.trice.s non académiques. Par ailleurs, nous n'avons pas tenté de définir des objectifs communs à long terme pour le projet « Céréales » du programme ANS, ni de formaliser des modalités de gouvernance⁶. Si ces choix représentent une limite à l'aspect participatif, ils sont justifiés par les contraintes liées au calendrier de la thèse. De plus, la pré-détermination des objectifs de la thèse a fourni un cadre pour la définition collective des questions de recherche, qui ont émergé de l'enquête de terrain et des réunions, et qui nous ont permis, dès la deuxième année de thèse, de mettre en place un dispositif expérimental. Ainsi, bien que questionnables, nos choix préalables sur les objectifs de la thèse ont contribué à l'**efficacité** du processus sur le plan de la recherche et, si l'on considère uniquement la définition de questions de recherche, sur le plan de la participation.

Au sein des processus de recherche participative, l'utilisation d'un vocabulaire commun facilite les échanges entre différent.e.s types d'acteur.trice.s⁷. A l'issue de la première réunion bisannuelle du collectif de la thèse, nous avons convenu d'employer les termes « blés vêtus » et « céréales marginales ». Cependant, nous n'avons pas défini de vocabulaire commun pour d'autres termes qui auraient pu être mobilisés au cours du projet. De plus, ce travail n'a pas été fait avec l'ensemble des membres du deuxième cercle de partenaires. Ainsi, divers termes, tel que « épeautres », ont continué d'être employés lors des échanges. Selon moi, cette **hétérogénéité** dans le vocabulaire nuit à la communication au sein du collectif, limitant l'**efficacité** et la **robustesse** du projet.

Le fait d'avoir un dispositif en place (le DE au CRBA) et d'effectuer des analyses (ANTP) en parallèle de la définition des questions et stratégie de recherche est une autre particularité de cette thèse. Ces initiatives, qui ne répondent pas à une question énoncée collectivement et dont les résultats ne sont pas interprétables, peuvent paraître **incohérentes** sur le plan de la

6. En dehors de la charte concernant le D21-22.

7. La suggestion de mettre en place un glossaire pour le projet est d'ailleurs ressortie de l'enquête de terrain, et a été évoquée lors de la première réunion bisannuelle.

recherche. Toutefois, elles ont permis d'apporter des éléments concrets lors des discussions et donc de renforcer la **robustesse** de la collaboration. En ce sens, le DE et les ANTP peuvent être considérés comme des « objets frontières », dont la principale fonction est de faciliter les échanges entre des acteur.trice.s « expert.e.s » et « non expert.e.s » (BONDON et al. 2021). Cependant, il me semble que le temps passé à ces activités (la majorité de mon temps de travail la première année de thèse) a été excessif par rapport à leur intérêt.

En résumé, la première année de collaboration a été relativement **efficace** pour donner cours à une expérimentation répondant à des questions de recherche définies collectivement. Néanmoins, j'ai identifié plusieurs sources de **fragilité** qui peuvent compromettre la pérennité du projet. On peut notamment citer l'**hétérogénéité** du vocabulaire, l'absence de discussion au sujet des modalités de fonctionnement du collectif et la pré-définition des objectifs par l'équipe de recherche.

6.4.2 La gouvernance et l'organisation du collectif

Plusieurs expériences de recherche participative évoquent l'établissement de modalités de gouvernance qui cadrent l'organisation du groupe (COEX 2023 ; RIVIÈRE et al. 2013). Celles-ci sont généralement définies lors de discussions collectives au cours des phases de préparation du projet et peuvent évoluer, en s'adaptant aux besoins du collectif. Ces règles peuvent porter sur la répartition des rôles des différent.e.s acteur.trice.s, sur leurs engagements, les modalités de prise de décisions, la composition du collectif, le statut et la gestion des données, entre autres.

Dans le cas de cette thèse, en dehors de la charte formalisant les engagements de l'équipe de recherche et des paysan.ne.s autour du D21-22 (annexe D), aucune discussion sur la gouvernance du collectif n'a eu lieu. Ainsi, cette sous-section constitue une analyse a posteriori des rôles qui ont été pris par les différent.e.s acteur.trice.s au cours de la thèse (6.4.2.1), des façons dont les décisions ont été prises (6.4.2.2) et de l'organisation qui s'est mise en place (6.4.2.3). Une analyse détaillée du niveau de participation des acteur.trice.s non académiques du collectif de la thèse est également présentée.

6.4.2.1 La répartition des rôles et la participation

6.4.2.1.1 Les chercheur.euse.s Les projets de recherche participative exigent des chercheur.euse.s de sortir de leurs rôles habituels, et d'assumer des fonctions pour lesquelles il.elle.s ne sont pas toujours formé.e.s. Souvent, ces approches requièrent aussi un changement de pos-

ture des scientifiques, dont le rôle est d'accompagner divers acteur.trice.s, de faire émerger des questionnements, et d'apporter une aide méthodologique plutôt que de produire des données (ROUSSEAU-TRAORÉ et KASTLER 2004 ; CHABLE et BERTHELLOT 2006 ; HAZARD et al. 2020).

Dans ce projet, les chercheur.euse.s ont pris le rôle d'animateur.trice.s⁸. Au cours de ma thèse, il ne m'a pas paru que le fait que les chercheur.euse.s assument ce rôle ait posé de problèmes majeurs⁹. Durant les réunions bisannuelles, il m'a semblé que la prise de parole était équilibrée et qu'elles ont été assez **efficaces** pour la prise de décision. Le bon déroulement de l'animation a probablement été permis par l'absence de tensions entre les participant.e.s aux discussions.

Toutefois, le fait que les chercheur.euse.s prennent le rôle d'animateur.trice.s constitue une **fragilité** du processus de recherche. D'une part, le manque de formation pour assurer cette tâche peut engendrer de l'**inefficacité**. De plus, les chercheur.euse.s étant aussi parties prenantes du projet, cette situation peut entraîner ou accentuer l'établissement de relations de pouvoir déséquilibrées au sein du groupe. Il existe d'autres projets de recherche participative qui intègrent un.e animateur.trice professionnel.le. L'inclusion de cette tierce personne garantit une plus grande démocratie au sein de la collaboration, améliorant ainsi sa **robustesse**. Une autre solution, proposée par l'association Sciences Citoyennes, est la mise en place du « dispositif tiers-veilleur ». Il s'agit d'associer un.e observateur.trice, qui, sans devenir partie prenante du projet, accompagne et apporte de la réflexivité au collectif (SCIENCES CITOYENNES 2020).

Par ailleurs, au cours de la thèse, les chercheur.euse.s ont eu un rôle central dans les interactions entre les différent.e.s partenaires. A de multiples reprises, il.elle.s ont été les seul.e.s à échanger, à travers des discussions bilatérales, avec d'autres acteur.trice.s (sous-section 3.4.4, chapitre 3). Au sein du collectif de la thèse, cette position a été accentuée par l'organisation de réunions séparées avec les paysan.ne.s et l'ARDEAR d'une part, et avec le CRBA de l'autre. En ce qui concerne le deuxième cercle de partenaires, le manque de moments d'échange informels ainsi que l'absence de formalisation de la composition du collectif a fait en sorte que très peu d'interactions ont eu lieu entre paysan.ne.s, ARDEAR, CRBA et autres partenaires.

Cette position très centrale des chercheur.euse.s a permis d'interagir avec une grande diversité d'acteur.trice.s et a probablement contribué à l'**efficacité** de la thèse au niveau de la recherche. Néanmoins, la position centrale des chercheur.euse.s soulève des questions de démocratie

8. Dans les « fonctions d'animateur.trice.s », j'inclus la responsabilité de maintenir l'engagement du groupe et d'en gérer l'organisation. De plus, il s'agit, lors des échanges, de créer un environnement propice à la discussion et à la prise de décision.

9. Pour assumer ce rôle, j'ai suivi une formation appelée « Mobiliser et Accompagner des collectifs de projets agricoles et ruraux », organisée par le Groupe d'Expérimentation et de Recherche : Développement et Actions Localisées (GERDAL).

et d'équilibre des pouvoirs. L'interprétation faite par les chercheur.euse.s des propos des autres acteur.trice.s peut être biaisée par leur propre subjectivité. De plus, le fait que la quasi-totalité des échanges impliquent l'équipe de recherche peut limiter l'appropriation du projet par les autres acteur.trice.s, et donc nuire à l'objectif en termes de participation et à sa **robustesse**.

6.4.2.1.2 Les paysan.ne.s Les paysan.ne.s ont été impliqué.e.s alors que les objectifs globaux de la thèse avaient déjà été définis. Toutefois, nous avons tenté de les intégrer aux étapes ultérieures du processus autant que possible.

Dans les phases initiales du projet (de la conception à la collecte de données), l'implication des paysan.ne.s a oscillé entre la consultation (« consult ») et la collaboration (« collaborate ») (figure 6.1 et tableau 6.2). Selon mon analyse, les étapes où leur participation a été la plus aboutie sont la définition des questions de recherche et l'élaboration de la stratégie de recherche (D21-22). Pour ces phases, on peut considérer que l'objectif en termes de participation a été presque réalisé. Une participation moins aboutie est constatée pour d'autres étapes du projet, telle que l'analyse des données. D'une part, il me semble plus difficile d'imaginer des méthodes favorisant une implication forte pour cette tâche. De l'autre, le fait d'accepter une participation moindre à certaines étapes a aidé à l'avancement du projet sur le plan de la recherche, et a donc contribué à renforcer l'**efficacité** au niveau scientifique.

Bien qu'au cours de la thèse, le degré de participation que nous visons (l'autonomisation ou « empowerment ») n'a pas été totalement atteint, la démarche mise en place a été suffisamment **efficace** pour permettre l'implication des paysan.ne.s. Dans l'ensemble, il me paraît qu'il.elle.s ont eu un rôle de collaborateur.trice.s (section 3.2, chapitre 3). De plus, des signes témoignant de la volonté de certain.e.s paysan.ne.s d'accroître leur implication dans le projet ont émergé au cours de la thèse. Parmi ces éléments, on peut citer la création d'un groupe de travail coordonné par un des paysans pour élaborer des fiches variétales intégrant les données issues du D21-22 et destinées aux professionnel.le.s du secteur agricole. Lors de la dernière réunion bisannuelle, les suggestions visant à trouver des solutions pour s'affranchir des financements de la recherche et à formaliser la collaboration relèvent également d'un processus d'autonomisation (« empowerment »).

6.4.2.1.3 Le CRBA A ma connaissance, le CRBA a pris part à la définition des objectifs de la thèse. Cet acteur a également eu une implication forte lors des choix concernant le DE. Cependant, en ce qui concerne le D21-22, et les questions associées, son niveau d'implication a

plutôt été du type consultation (« consult ») (tableau 6.2). En effet, il s'est principalement agi de valider des décisions établies avec les paysan.ne.s. Ainsi, à partir de la deuxième année de thèse, le CRBA a plutôt eu un rôle de contributeur (section 3.2, chapitre 3). En ce qui concerne cet acteur, la démarche mise en place au cours de la thèse n'a pas été **efficace** pour permettre une implication de type autonomisation (« empowerment »).

6.4.2.1.4 L'ARDEAR L'ARDEAR a été intégrée au collectif suite à la demande des paysan.ne.s, qui est ressortie de l'enquête de terrain (chapitre 3). Pour le moment, son implication a été de type information (« inform ») ou consultation (« consult »). Invitée aux réunions bis-annuelles, la représentante de l'association a pris connaissance du projet et de son avancement. Certaines de ses remarques ont également été prises en considération dans les échanges (tableau 6.2). A nouveau, cet acteur n'a pas eu une implication de type autonomisation (« empowerment ») au cours de la thèse.

6.4.2.1.5 Le deuxième cercle de partenaires Les membres du deuxième cercle de partenaires ont eu des implications très hétérogènes (chapitre 3). La plupart d'entre eux.elles sont loin d'avoir eu une participation de type autonomisation (« empowerment »).

TABLEAU 6.2 – Degré de participation des acteur.trice.s non académiques du collectif de la thèse dans les différentes étapes du projet. Les étapes du projet de recherche et les niveaux d’implication sont issus du diagramme de VAUGHN et JACQUEZ 2020. Les termes anglais utilisés par les auteur.e.s sont indiqués entre guillemets et entre parenthèses. Part : participation, BT : blé tendre.

Etape du projet		Début du tableau 6.2					
		Paysan.ne.s		CRBA		ARDEAR	
		Degré de part	Justification	Degré de part	Justification	Degré de part	Justification
Conception (« design »)	Objectifs de la thèse	Consultation (« consult ») / implication (« involve »)	Les objectifs étaient définis avant l’implication des paysan.ne.s. Néanmoins, leurs retours ont conduit à des modifications du projet original (ex : le choix des espèces et l’intégration des deux types de variétés de BT).	Implication (« involve ») / Collaboration (« collaborate »)	Selon ma compréhension, certains objectifs (ex : évaluer des variétés pour ensuite en distribuer aux paysan.ne.s en région lyonnaise) ont été discutés avec le CRBA.	Information (« inform ») / Consultation (« consult »)	Les objectifs étaient définis avant l’implication de l’ARDEAR. Toutefois, lors de la présentation du projet à Léa Bernard, ses remarques ont été prises en compte.
	Questions de recherche	Collaboration (« collaborate »)	Malgré la contrainte posée par l’équipe de recherche d’évaluer deux types de critères (agronomiques et nutritionnels), le choix des questions de recherche était très ouvert. La décision de traiter une question large et exploratoire au niveau agronomique, visant à identifier des tendances pour chaque espèce et pour de multiples caractéristiques, est issue des retours de l’enquête de terrain et de la réunion bisannuelle du 8 mars 2021. Au niveau nutritionnel, le choix de focaliser les recherches sur le gluten découle également de divers échanges et de la réunion du 29 novembre 2021.	Consultation (« consult »)	Nous avons surtout vérifié que les questions énoncées avec les paysan.ne.s convenaient au CRBA.	Information (« inform ») / consultation (« consult »)	La représentante de l’ARDEAR était présente lors des réunions visant à définir les questions de recherche. Ses remarques ont alimenté les échanges, mais elle n’est pas intervenue dans le choix final des questions.
	Stratégie de recherche (D21-22)	Collaboration (« collaborate »)	Suite aux échanges avec les paysan.ne.s, nous avons décidé de mettre en place le D21-22 dans les six fermes en plus du CRBA. Les paysan.ne.s sont également intervenu.e.s dans la conception du D21-22 (densités de semis, tailles des parcelles, choix des variétés à inclure dans les parcelles des fermes, discussions sur les répétitions intra et inter sites). Il.elle.s ont aussi participé à l’élaboration du protocole de suivi agronomique basé sur quatre caractéristiques majeures. Leurs retours ont également conduit à la modification de la méthode d’évaluation de certains paramètres, à l’ajout ou au retrait de certains paramètres, et à l’adaptation des fiches de suivi leur étant destinées.	Implication (« involve »)	La partie du D21-22 mise en place au CRBA a été conçue à travers plusieurs échanges pour trouver un accord entre surface disponible et besoins scientifiques (mise en place de blocs, etc.). Certains paramètres et méthodes de mesure pris en compte dans le suivi agronomique sont issus de travaux préalables et d’échanges avec l’équipe du CRBA.	Information (« inform ») / consultation (« consult »)	La représentante de l’ARDEAR était présente lors de certaines réunions visant à définir la stratégie de recherche, et a exprimé certains retours, sans pour autant intervenir dans les prises de décisions.
Collecte des données (« collect »)		Implication (« involve ») / collaboration (« collaborate »)	Les paysan.ne.s ont participé à l’élaboration du protocole de suivi agronomique. Il.elle.s ont également effectué certaines observations au niveau de leurs fermes, mais ces données n’ont pas pu être intégrées dans l’analyse finale.	Information (« inform »)	En ce qui concerne le D21-22, le CRBA n’a pas participé à la collecte de données.	Information (« inform »)	L’ARDEAR n’a pas participé à la collecte de données.

Continuation du tableau 6.2						
Etape du projet	Paysan.ne.s		CRBA		ARDEAR	
	Degré de part	Justification	Degré de part	Justification	Degré de part	Justification
Analyse des données (« analyze »)	Consultation (« consult »)	Pour le moment, les méthodes d'analyses des données et les résultats qui en sont issus ont uniquement été présentés aux paysan.ne.s. Néanmoins, certains retours ont été parfois pris en compte (ex : l'analyse des compositions en protéines du gluten au-delà des fractions classiques a été faite en partie pour répondre aux remarques des paysan.ne.s). Des éléments issus des échanges sont également pris en compte dans les interprétations des résultats.	Information (« inform »)	Pour le moment, les méthodes d'analyses des données et les résultats qui en sont issus ont uniquement été présentés au CRBA.	Information (« inform »)	Pour le moment, les méthodes d'analyses des données et les résultats qui en sont issus ont uniquement été présentés à l'ARDEAR.
Dissémination des résultats (« disseminate »)	?	Pour le moment, aucune dissémination autre que le manuscrit de thèse, et les articles scientifiques en cours de soumission, n'a eu lieu. Cependant, un des paysans du collectif de recherche a suggéré de prendre en charge la coordination d'un groupe travail dont l'objectif serait l'élaboration de fiches variétales incorporant les données issues du D21-22 et à destination de professionnel.le.s du milieu agricole. Si cette initiative se concrétise, elle se situerait dans de l'autonomisation (« empowerment »).	Information (« inform »)	Pour le moment, aucune dissémination autre que le manuscrit de thèse, et les articles scientifiques en cours de soumission, n'a eu lieu.	Information (« inform »)	Pour le moment, aucune dissémination autre que le manuscrit de thèse, et les articles scientifiques en cours de soumission, n'a eu lieu.
Action (« act »)	?	Les premières années de collaboration ont conduit à des actions individuelles (ex : la poursuite de l'évaluation ou la multiplication de certaines variétés en vue d'une éventuelle mise en culture). Lors de la réunion du 20 mars 2023, la proposition de formaliser la collaboration, d'en définir les principaux objectifs à long terme, et de réfléchir à des solutions pour la poursuivre a été exprimée par les paysan.ne.s. Si cette proposition se concrétise, l'implication des paysan.ne.s se situerait dans la collaboration (« collaborate ») à l'autonomisation (« empowerment »).	?	Le CRBA a multiplié certaines variétés en 2022-2023, mais en dehors de cela, à ma connaissance, aucune action n'a été envisagée, que ça soit par les chercheur.euse.s ou par le CRBA.	?	Aucune action n'a été envisagée, que ça soit par les chercheur.euse.s ou par l'ARDEAR.
Etablissement de partenariats (« partner »)	Consultation (« consult »)	En dehors de l'intégration de l'ARDEAR survenue suite aux retours des paysan.ne.s, seul.e.s les chercheur.euse.s ont choisi avec qui établir des partenariats.	Consultation (« consult »)	Nous avons validé la décision d'impliquer des paysan.ne.s auprès du CRBA. Autrement, le CRBA n'est pas intervenu dans le choix des partenaires.	Information (« inform »)	L'ARDEAR n'est pas intervenue dans le choix des partenaires.

Fin du tableau 6.2

6.4.2.2 La prise de décisions

Les modalités de prise de décision découlent des rôles pris par les différent.e.s acteur.trice.s, ainsi que des échanges entre les partenaires tout au long du projet.

Certaines décisions majeures (telle que la définition des questions de recherche traitées par la thèse) ont été prises lors de réunions, impliquant les paysan.ne.s et l'ARDEAR, et ensuite validées auprès du CRBA. Elles ont fait l'objet de discussions, et tou.te.s les participant.e.s ont pu intervenir dans la prise de décision. De plus, des comptes-rendus ont été réalisés, permettant de retracer l'historique de la prise de décision, ainsi que les propositions et positionnements des participant.e.s. Si on peut considérer que ces décisions ont été prises de façon collective, le fait que seule une partie des acteur.trice.s était conviée à ces réunions soulève des questions de démocratie.

D'autres décisions ont été prises uniquement par deux acteur.trice.s (décisions bilatérales) ou exclusivement par l'équipe de recherche (chapitre 3). Par exemple, les questions sur les propriétés rhéologiques ont été abordées avec un seul paysan. De plus, les scientifiques ont choisi à eux.elles seul.e.s les personnes à convier aux diverses réunions, l'ordre du jour de ces rencontres, ou encore l'attribution des ressources financières au sein du projet. Ainsi, on peut interroger la pertinence pour l'ensemble du collectif des questions et décisions issues de ces discussions impliquant un nombre restreint d'acteur.trice.s. Par ailleurs, la question de la transparence est spécialement opportune pour ces décisions uni ou bilatérales, puisque leur origine n'est pas explicitée (contrairement à celles prises en réunion bisannuelles, qui sont reprises dans les comptes-rendus).

6.4.2.3 Les aspects organisationnels

Comme décrit dans le chapitre 3, l'organisation du collectif s'est mise en place assez naturellement, autour de la saison de culture du blé et du calendrier de la thèse. Dans la partie suivante, je reviens sur l'organisation autour des réunions. J'évoque également l'organisation entre chercheur.euse.s, paysan.ne.s et CRBA, autour du D21-22.

6.4.2.3.1 L'organisation collective autour des réunions Plusieurs types de réunions ont eu lieu au cours de la thèse : des réunions bisannuelles rassemblant chercheur.euse.s, paysan.ne.s et ARDEAR (comprenant parfois une session l'après-midi avec d'autres partenaires), des réunions bilatérales entre chercheur.euse.s et un.e autre partenaire (notamment le CRBA), et des réunions

avec divers membres du deuxième cercle de partenaires (section 3.4, chapitre 3).

Dans l'ensemble, il m'a paru que les réunions bisannuelles ont été **efficaces** pour prendre des décisions avec les acteur.trice.s convié.e.s. De plus, les ordres du jour peu chargés ont permis des pauses propices aux discussions informelles, favorisant les rencontres entre participant.e.s. Malgré leur fréquence limitée, les réunions avec le CRBA m'ont également paru **efficaces** pour valider les décisions prises en réunions bisannuelles. En revanche, il m'a semblé que lors des séances de l'après-midi des réunions bisannuelles, la participation des acteur.trice.s non académiques était limitée. D'une part, ces sessions se concentraient principalement sur la présentation de résultats de recherche, ce qui encourage moins les interventions. D'autre part, le temps restreint de ces séances, autorisant peu d'échanges informels et le manque de connaissances mutuelles parmi les participant.e.s¹⁰ ont certainement limité leur participation.

Malgré un certain absentéisme, la fréquence et la localisation des réunions semblait convenir aux paysan.ne.s, à l'ARDEAR, au CRBA et à l'équipe de recherche. Pour les réunions bisannuelles, la solution proposée face à l'absentéisme (effectuer des appels téléphoniques de « rat-trapage ») a permis à tou.te.s les membres du collectif de la thèse d'être à jour par rapport à l'avancement du projet. Néanmoins, cette solution nécessite une mobilisation très importante des chercheur.euse.s et accentue leur rôle central dans le projet. Par ailleurs, elle paraît peu **robuste**, dans la mesure où elle ne serait pas envisageable avec un collectif de plus grande taille. A mon avis, il serait plus approprié de donner plus d'importance aux comptes-rendus. Cela limiterait le rôle central des chercheur.euse.s, et renforcerait l'aspect participatif, par l'autonomisation des partenaires.

Globalement, l'organisation de réunions séparées avec les paysan.ne.s et l'ARDEAR d'une part et avec le CRBA d'autre part s'est avérée **efficace** pour prendre des décisions permettant l'avancement du projet sur le plan de la recherche, une participation assez aboutie des paysan.ne.s, et des échanges entre paysan.ne.s. Cependant, cette approche a certainement restreint l'implication du CRBA dans le processus. De plus, la démultiplication des rencontres instaure de la **lenteur**, de la **redondance** et requiert une forte mobilisation des chercheur.euse.s pour la préparation et la gestion des diverses réunions. Ceci en fait une stratégie peu **performante**, pour la prise de décision et peu **efficace** pour favoriser des échanges directs entre divers types d'acteur.trice.s. Par ailleurs, cette fragmentation des échanges peut poser des questions de démocratie, de transparence et renforce la position centrale des chercheur.euse.s. Ceci est accentué par l'absence de

10. Par ailleurs, d'une réunion à l'autre, les personnes conviées n'étaient pas les mêmes.

comptes-rendus pour toutes les réunions bilatérales avec le CRBA, pour lesquelles aucune trace n'est conservée.

6.4.2.3.2 L'organisation autour du dispositif expérimental 2021-2022 Au-delà de la dynamique globale du collectif, la gestion du D21-22 a nécessité une organisation entre chercheur.euse.s, paysan.ne.s et CRBA. Cette organisation a été gérée entre chercheur.euse.s et paysan.ne.s d'une part et entre chercheur.euse.s et CRBA d'autre part (sous-section 3.4.4, chapitre 3). La répartition des tâches et des responsabilités entre paysan.ne.s et chercheur.euse.s a été décidée principalement lors des réunions bisannuelles et l'engagement de ces deux catégories d'acteur.trice.s a été formalisé au sein d'une charte (annexe D). Au niveau technique, cette organisation a été **efficace**. En ce qui concerne le suivi agronomique, certaines observations n'ont pas été réalisées par l'ensemble des paysan.ne.s (sous-section 6.4.5.1). Par rapport au CRBA, la répartition des tâches et des responsabilités n'a pas fait l'objet d'une formalisation. Certains engagements et tâches n'ont pas toujours pu être respectés, conduisant à une mobilisation de l'équipe de recherche plus forte que prévu.

6.4.2.4 Gouvernance, organisation et sous-optimalité

Dans un premier temps, on peut se demander si la démarche mise en place au cours de la thèse a été **efficace** pour permettre une participation aboutie des acteur.trice.s non académiques. Concernant les paysan.ne.s, bien qu'une implication de type autonomisation (« empowerment ») n'a pas eu lieu (tableau 6.2), la démarche a permis une participation importante à divers stades du projet. Cependant, cette **efficacité** n'a pas été constatée dans le cas des autres acteur.trice.s.

Dans un second temps, on peut interroger l'équilibre entre **efficacité** et **robustesse** conférées à la démarche de recherche par la répartition des rôles, les façons de prendre des décisions et l'organisation observées au cours de la thèse. Dans l'ensemble, l'**inachèvement** et l'**hétérogénéité** de la participation des acteur.trice.s non académiques, l'**hétérogénéité** dans la prise de décisions, le fait de ne pas consacrer de temps à la formalisation de la gouvernance et la position centrale de l'équipe de recherche ont certainement contribué à l'**efficacité** du projet sur le plan de la recherche. En termes de participation, la démarche mise en œuvre a été relativement **efficace** uniquement pour les paysan.e.s.

En ce qui concerne la **robustesse**, il me semble que la participation aboutie des paysan.ne.s a été la principale force de la démarche. Cependant, plusieurs sources de **fragilité** sont à noter. Tout d'abord, la position centrale des chercheur.euse.s, le manque de clarté par rapport à la composition du collectif et aux rôles des différent.e.s partenaires peuvent compromettre la **robustesse** du projet (et son **efficacité** à long terme). En effet, ce dernier repose sur une très forte mobilisation des chercheur.euse.s et certaines décisions peuvent être en décalage avec les attentes des certain.e.s acteur.trice.s. De plus, les décisions prises de façon bilatérale ont entraîné une forte dispersion des thématiques abordées au cours de la thèse. D'une part, la pertinence des questions traitées pour l'ensemble du collectif et pour d'éventuels objectifs à long terme du projet sont questionnables. D'autre part, plusieurs de ces aspects n'ont été traités que partiellement, et n'apportent pas de réponse à la question initiale¹¹. A mon avis, impliquer un plus grand nombre d'acteur.trice.s dans des discussions aurait demandé davantage de temps (**lenteur**) pour prendre des décisions, mais cela aurait permis une identification plus intégrée des questions prioritaires (**robustesse**).

6.4.3 Les dimensions épistémiques

Les questions soulevées au sein des projets participatifs nécessitent souvent la mobilisation de plusieurs disciplines scientifiques, et de savoirs vernaculaires. La sous-section suivante revient sur la façon dont nous avons abordé l'inter (6.4.3.1) et la transdisciplinarité (6.4.3.3) au cours de la thèse. Les difficultés posées par le décalage entre les disciplines maîtrisées par l'équipe de recherche et celles nécessaires au projet sont également mentionnées (6.4.3.2.1).

6.4.3.1 La mobilisation de l'interdisciplinarité

Les deux stratégies évoquées dans la sous-section 6.4.1.1 pour la mobilisation d'acteur.trice.s non académiques s'appliquent également à l'implication des chercheur.euse.s. La première stratégie implique l'identification des disciplines requises dès les phases initiales du projet, avec l'association d'expert.e.s qui participent à la co-construction des objectifs, questions et stratégies de recherche. Les chercheur.euse.s associé.e.s ont donc un rôle de collaborateur.trice.s (section 3.2, chapitre 3). La seconde stratégie repose sur la formation initiale d'un noyau dur de collaborateur.trice.s pour lancer le projet. L'identification des disciplines nécessaires et la mobilisation d'expert.e.s, se fait progressivement, en parallèle de l'avancement du projet sur le plan de la re-

11. Par exemple, les ANTP n'ont été effectuées que sur six variétés toutes espèces confondues, qui n'avaient pas été cultivées dans les mêmes environnements. Au-delà de la valorisation scientifique, ceci limite très fortement les apports de ces analyses exploratoires, même pour les discussions au sein du collectif de recherche.

cherche. Dans ce deuxième scénario, qui correspond davantage au cas de la thèse, les expert.e.s associé.e.s peuvent avoir des implications variées, allant de la contribution à la collaboration.

En ce qui concerne la thèse, certaines disciplines, dont l'agronomie¹² et les sciences sociales, avaient été identifiées comme essentielles dès l'écriture du projet. Pour mobiliser ces deux disciplines, nous nous sommes reposé.e.s sur mes compétences. D'autres disciplines (comme la biochimie des protéines ou la pédologie), ont émergé des échanges et des questions énoncées par le collectif. Celles-ci ont été mobilisées par l'établissement de partenariats avec des expert.e.s.

Au cours du projet, notre approche pour mobiliser les différentes disciplines a évolué. Lors de la première année, il était question que je m'approprie en grande partie les compétences et connaissances nécessaires pour conduire les analyses à effectuer au cours de la thèse. Ceci a été le cas pour la lipidomique. En revanche, pour la composition du gluten, nous avons d'abord identifié la question comme étant une priorité pour la thèse, avant d'établir un partenariat avec une experte en biochimie des protéines et de recruter Justine Lepagneul en stage puis en CDD (chapitre 3). Néanmoins, nous avons, au sein de l'équipe de recherche, effectué des recherches bibliographiques pour avoir une maîtrise suffisante du sujet afin de pouvoir interagir à la fois avec les expert.e.s et avec le collectif de recherche. Ainsi, d'une stratégie initialement peu **efficace**, basée sur l'appropriation par une personne d'une diversité de compétences et connaissances potentiellement utiles au projet, nous sommes parvenu.e.s à une stratégie assez **efficace** consistant à identifier d'abord les questions prioritaires pour le collectif, puis à établir des partenariats en déléguant certains aspects techniques. En conséquence, au cours de la thèse, les membres de l'équipe de recherche ont été des personnes relais, assurant la communication entre expert.e.s et le collectif.

6.4.3.2 L'expertise de l'équipe de recherche

Cette thèse a nécessité la mobilisation de plusieurs disciplines, mais certaines d'entre elles étaient plus importantes que d'autres. Or, un décalage entre les disciplines représentées dans l'équipe de recherche et les besoins du projet est à souligner. Le décalage portait également sur l'expérience limitée concernant les processus participatifs¹³. Cet éloignement entre l'expertise des chercheur.euse.s et les disciplines nécessaires au projet a généré plusieurs difficultés, sur lesquelles je reviens ci-dessous. J'évoque la définition de questions de recherche pertinentes, la gestion de l'approche participative et l'environnement technique pour mener le projet.

12. L'agronomie est en soi un domaine interdisciplinaire. Pour cette thèse, les compétences nécessaires comprenaient la conception de dispositifs expérimentaux, le phénotypage au champ et après récolte et l'analyse statistique.

13. Ce projet est la première expérience en recherche participative de Marie-Thérèse Charreyre et Olivier Hamant.

6.4.3.2.1 Les questions de recherche Une des difficultés liée au décalage entre les disciplines maîtrisées par l'équipe de recherche et celles nécessaires au projet concerne la définition des questions de recherche. Le fait que la recherche bibliographique n'ait pas été identifiée comme un aspect prioritaire au cours de la première année de thèse a accentué cette situation.

Tout d'abord, la pertinence des questions énoncées du point de vue de la recherche et leur adéquation avec les moyens disponibles pour y répondre peuvent être interrogées. Par exemple, certaines de ces questions, telles que l'évaluation des quatre espèces, ainsi que l'étude de l'effet de l'environnement sur les caractéristiques agronomiques et sur les compositions en protéines du gluten avaient déjà fait l'objet de publications scientifiques, dont certaines basées sur un nombre de variétés plus conséquent et sur des dispositifs plus adaptés (LONGIN et al. 2016 ; GEISLITZ et al. 2018 ; GEISLITZ et al. 2019). Cette **redondance** n'est pas forcément problématique puisqu'elle est nécessaire à la consolidation des connaissances scientifiques, mais ces études antérieures auraient pu être mieux prises en compte dans les échanges et dans l'élaboration des questions de recherche.

Avec un peu de recul, je pense qu'une meilleure maîtrise des thématiques de recherche nous aurait conduit.e.s à adopter une stratégie légèrement différente. Par exemple, initialement, nous souhaitions établir des conclusions à l'échelle des espèces. Toutefois, nous ne disposions pas de suffisamment de variétés et n'avions pas d'aperçu sur la représentativité de notre échantillon par rapport à la diversité existante au sein de chaque espèce. Avec les moyens disponibles, nous ne pouvions conclure qu'à l'échelle de l'échantillon étudié, et éventuellement, émettre des hypothèses plus génériques sur les espèces. Avoir conscience de ces limites nous aurait probablement amené.e.s à situer géographiquement les questions de recherche dès le début de la thèse. Nous aurions ainsi pu poser la question de l'évaluation des ressources (variétés) disponibles au sein des fermes et dans divers conservatoires à l'échelle de la France, ou à toute autre échelle paraissant pertinente pour le collectif. En dehors de la dimension géographique, nous aurions pu collectivement définir d'autres critères pour le choix des variétés à évaluer. Cela aurait requis un effort plus important pour sélectionner et se procurer les variétés, mais le choix des variétés aurait été plus cohérent. Une autre option aurait été de conduire des analyses de diversité génétique au sein d'un premier échantillon très large, permettant de sélectionner un sous-échantillon représentatif de la diversité totale sur lequel conduire des évaluations phénotypiques. A mon avis, cette stratégie, couramment utilisée dans des programmes de sélection (KACZMAREK et al. 2023 ; TANG et al. 2007), aurait renforcé l'originalité du projet, et donc sa pertinence sur le plan scientifique.

Par ailleurs, le choix d'inclure quatre espèces dans l'étude paraît a posteriori très ambitieux. D'une part, rien qu'au CRBA, nous disposions d'une surface limitée, qui a restreint le nombre de blocs à seulement deux et qui a limité le nombre de variétés pouvant être incluses. D'autre part, nous ne disposions pas des moyens pour évaluer statistiquement l'effet de l'environnement sur les quatre espèces. Il me semble que cela aurait été plus réaliste de travailler sur une seule espèce au cours de la thèse. Cela nous aurait permis de répondre plus **efficacement** aux trois questions soulevées par le collectif : la caractérisation de l'espèce cultivée en région lyonnaise, la diversité intra-spécifique (au sein de l'échantillon de variétés considérées) et l'effet de l'environnement.

6.4.3.2.2 L'approche participative En ce qui concerne l'approche participative, l'expérience limitée au sein de l'équipe de recherche a également généré certaines difficultés. A nouveau, le fait de ne pas avoir considéré la recherche bibliographique sur ce type de démarche ou l'échange avec des chercheur.euse.s impliqué.e.s dans des approches similaires, comme des aspects prioritaires a accentué cette situation. Il me semble que du fait de cette faible expérience, les aspects de gouvernance du collectif ont fait l'objet de très peu de discussions, même parmi les chercheur.euse.s. Ceci a probablement limité la participation de certain.e.s acteur.trice.s, et a contribué à la position très centrale de l'équipe de recherche. Toutefois, l'ajout de Mathieu Thomas à l'encadrement de ma thèse et les échanges que nous avons pu avoir, ont permis de porter un regard réflexif sur l'approche participative, conduisant à des propositions d'amélioration, qui sont présentées dans la sous-section 6.4.5.2.

6.4.3.2.3 Les difficultés techniques Enfin, cet éloignement des disciplines représentées dans l'équipe d'encadrement a conduit à des difficultés techniques. En effet, les deux laboratoires auxquels j'étais rattachée au début de la thèse ne disposaient pas du matériel nécessaire à la conduite du projet, ce qui a demandé des efforts d'adaptation continuels au niveau technique (tableaux 6.3 et 6.4). Cette situation, qui a engendré de la **lenteur** au cours de la thèse, s'est améliorée lors de l'ajout de Mathieu Thomas à l'encadrement de la thèse, et de mon accueil au sein de l'UMR AGAP à Montpellier.

6.4.3.2.4 L'expertise de l'équipe de recherche et la sous-optimalité Tout d'abord, il me semble que le décalage au niveau des disciplines maîtrisées par l'équipe de recherche a limité l'**efficacité** dans la définition de questions pertinentes et réalistes. Ceci nous a conduit.e.s à poser des questions auxquelles nous ne pouvions répondre que partiellement. Consacrer plus de

temps à augmenter notre compréhension des enjeux liés au projet aurait certainement induit de la **lenteur** au début du processus. Néanmoins, cela nous aurait permis de mieux cibler les questions de recherche, améliorant l'**efficacité** (par notre capacité à y répondre) et la **robustesse** (par leur cohérence avec la suite du projet) de la démarche.

Le manque d'expérience de l'équipe de recherche par rapport aux démarches participatives a également engendré plusieurs sources de **fragilité**, mentionnées dans la sous-section 6.4.2.

TABLEAU 6.3 – Temps que j'ai consacré à la gestion technique des dispositifs expérimentaux (dispositif exploratoire et dispositif expérimental 2021-2022). PMG : poids de mille grains.

	DE		D21-22	
	Méthode	Temps estimé (j)	Méthode	Temps estimé (j)
Préparation parcelles	Grelinette (après passage d'un Rotovator par le CRBA) avec l'aide du CRBA	2	Grelinette (après passage d'un Rotovator par le CRBA).	4
Préparation lots semences	Fait par le CRBA.	/	Tests de germination en laboratoire, préparation des lots pour les fermes, traitement au vinaigre et préparation des lots pour le CRBA (x 2).	30 (15 pour les tests de germination, 1 pour la préparation des lots des fermes, 4 pour les 2 séries de traitement au vinaigre et la préparation des lots du CRBA)
Semis	A la main, avec l'aide du CRBA.	5	A la main, à travers un chantier participatif (x 2).	5 (2 pour le premier semis et 3 pour le second).
Désherbage	Manuel.	5	Manuel, avec l'aide de Justine et Aubin (au CRBA).	5
Récolte	Aux cisailles, avec l'aide du CRBA et de bénévoles.	5	Aux cisailles, avec l'aide de Justine et Aubin, du CRBA (pour les parcelles du CRBA), et des paysan.ne.s (pour les parcelles des fermes).	9 (dont 5 pour les fermes)
Battage	A la batteuse du CRBA, avec l'aide du CRBA	12	Battage et décortilage faits en une seule étape, à l'aide d'une batteuse de pailleuse, et uniquement sur des échantillons de chaque parcelle. Décortilage finalisé à la main à l'aide d'une dizaine de bénévoles	30
Décortilage	A la main, sur les quantités nécessaires pour les analyses de gluten du stage de Justine et pour des analyses métabolomiques non présentées dans ce manuscrit.	5 (+ 5 par Justine)		
Comptage (PMG)	A la main.	12	A l'aide de la technologie Optoagrimetric.	5

TABLEAU 6.4 – Temps que j'ai consacré aux tâches en lien avec les analyses nutritionnelles. ANTP : analyses nutritionnelles et technologiques préliminaires, DE : dispositif exploratoire, D21-22 : dispositif expérimental 2021-2022.

	Méthode	Temps estimé (j)
Nettoyage graines (tri imputrés et mites) pour les ANTP	A la main.	5
Broyage pour les analyses sur les échantillons du DE	Au pilon et au mortier.	6 (5 pour des analyses métabolomiques non présentées dans ce manuscrit et 1 pour le stage de Justine, avec l'aide de Justine et Marie-Thérèse) (+ 2 par Justine et Marie-Thérèse)
Broyage pour les analyses de composition du gluten sur les échantillons du D21-22	Avec un broyeur.	2

Enfin, au niveau technique, effectuer de nombreuses tâches manuellement m'a permis de mieux connaître les espèces étudiées et de mieux comprendre les difficultés auxquelles peuvent être confronté.e.s les cultivateur.trice.s. Ceci a probablement facilité les échanges avec les acteur.trice.s non académiques, contribuant à la **robustesse** de la collaboration. Toutefois, l'accumulation de ces tâches et le temps considérable que j'y ai consacré a été une source de **lenteur**, limitant la **performance** de la démarche. Pour la suite du projet, il me semble que le manque de moyens techniques est une source de **fragilité**, pouvant compromettre l'**efficacité** du projet.

Dans l'ensemble, le décalage entre les disciplines représentées dans l'équipe de recherche et les besoins du projet est, selon moi, une source de **fragilité**. L'association d'expert.e.s de certaines disciplines requises pour l'avancement de la recherche, en leur donnant un rôle de collaborateur.trice.s, pourrait améliorer cette situation. Cette solution est évoquée avec plus de détails dans la sous-section 6.4.5.

6.4.3.3 La transdisciplinarité

Au-delà de la mobilisation d'une diversité de disciplines scientifiques, la prise en compte de savoirs non académiques caractérise souvent les projets de recherche participatifs. Cette reconnaissance de différents types de savoirs est d'ailleurs citée par STENGERS 1997 pour favoriser l'inclusivité et la démocratie dans les démarches de recherche. Dès le début du projet, nous souhaitons mobiliser des savoirs non académiques. Cependant, nous n'avons pas défini de cadre pour leur intégration.

En ce qui concerne les paysan.ne.s, ils.elles possèdent une compréhension holistique de leur système, que l'on peut considérer comme un savoir-faire « global », ainsi que des connaissances plus précises fondées sur des expériences empiriques et l'observation. Ces deux types de savoirs peuvent être intégrés dans les décisions d'un projet de recherche.

Aujourd'hui, il apparaît que les savoirs non académiques ont été pris en compte à différentes phases de la thèse. En premier lieu, certaines connaissances détenues par les acteur.trice.s non académiques ont été considérées lors de la définition des questions de recherche et des hypothèses associées. Par exemple, l'effet de l'environnement a été pris en compte dès la première expérimentation collective (D21-22) parce que les paysan.ne.s étaient conscient.e.s de son importance et que les résultats obtenus n'auraient pas eu de sens à leurs yeux s'ils n'étaient pas issus de leurs propres fermes (intégration du savoir-faire « global »). Les hypothèses concernant le potentiel de tallage

accru de l'En ou encore des compositions en protéines du gluten différentes, en particulier pour l'En, sont également issues des observations des paysan.ne.s, au champ, et lors de la panification des blés vêtus (intégration de connaissances précises).

Ensuite, des savoirs non académiques ont été pris en compte dans l'établissement du D21-22 et de son suivi. Par exemple, la densité de semis, ou encore le mode de semis (sous forme d'épillets pour les blés vêtus et non de grains nus) ont été déterminés en tenant compte des retours d'expérience des paysan.ne.s (intégration de connaissances précises). Le protocole de suivi agronomique a aussi été élaboré par rapport à leurs connaissances et questionnements (intégration de connaissances précises). Notamment, les quatre grandes caractéristiques considérées en priorité découlent de leurs savoirs (par exemple, la verse a été prise en compte parce qu'elle pose un problème majeur aux paysan.ne.s et qu'il.elle.s suspectent les blés vêtus d'y être assez sensibles). En outre, des ajustements du protocole de suivi proposé par les chercheur.euse.s ont eu lieu suite aux retours des paysan.ne.s. A titre d'exemple, nous avons modifié les catégories pour évaluer le taux de verse, car l'une d'entre elles n'avait pas de sens pour les praticien.ne.s : le degré de verse n'était pas suffisant pour qu'il pose problème.

Certains savoirs vernaculaires ont aussi contribué à l'interprétation des résultats de recherche. Notamment, des savoirs liés à la culture ou à la transformation de certaines variétés ont permis d'approfondir, ou ont été confrontés, aux résultats scientifiques. Par exemple, l'expérience des paysan.ne.s nous a aidé.e.s à identifier des observations qui seraient dues aux conditions climatiques de la saison 2021-2022, comme le faible tallage de l'ensemble des espèces (intégration du savoir-faire « global »). Un autre exemple concerne l'En *Noir* qui avait été décrit par un des paysan.ne.s comme ayant une « typicité » moindre par rapport à d'autres En, notamment en termes de transformation et de goût (intégration de connaissances précises). Cette légère différence entre l'En *Noir* et les autres variétés a été retrouvée dans les résultats agronomiques et de la composition en protéines du gluten.

Néanmoins, il reste assez difficile d'intégrer certains savoirs et observations dans la démarche de recherche. Par exemple, la suggestion d'évaluer, par la couleur des feuilles, la faim d'azote à différents stades de développement est compliquée à prendre en compte. En effet, une façon d'évaluer objectivement et facilement une couleur est difficile à imaginer.

Bien que l'intégration des savoirs non académiques s'est faite de façon intuitive et pragmatique, elle semble avoir été assez **efficace**. A mon avis, cette inclusion des savoirs des acteur.trice.s

non scientifiques contribue à la fois à l'**efficacité** et à la **robustesse** du projet. En effet, elle permet de poser des questions et d'y répondre par des stratégies pertinentes pour les différent.e.s collaborateur.trice.s. Ceci favorise leur implication dans le projet, contribuant à l'**efficacité** par rapport à l'objectif de participation et à sa viabilité sur le long terme, donc à sa **robustesse**.

6.4.4 Les impacts de la thèse

Cette thèse s'inscrit dans le programme ANS, dont un des objectifs est d'initier des actions autour des blés vêtus au sein de la région lyonnaise. Le doctorat étant en quelque sorte le point initial du sous-projet sur les céréales de ce programme, générer des actions ou conduire à des transformations sociales n'était pas l'un de ses objectifs.

Néanmoins, certaines actions ont été entreprises par des membres du collectif de la thèse suite à ces premières années de recherche. A titre d'exemple, quatre des paysan.ne.s ont multiplié certaines variétés, en vue de poursuivre leur évaluation, et éventuellement, de les mettre en culture. Par ailleurs, le CRBA a entrepris, lors de la saison 2022-2023, une année de multiplication des variétés du D21-22 avec l'objectif de poursuivre leur évaluation, si possible, en maintenant une collaboration avec la recherche. A terme, il s'agirait de proposer les variétés présentant le plus d'intérêt dans le catalogue de la ferme semencière.

La thèse a également suscité des initiatives permettant de faire découvrir à un public plus large la diversité au sein des blés vêtus, ainsi que l'existence du projet de recherche. En particulier, le CRBA et JPC ont participé à la « Tournée des blés » organisée par l'ARDEAR en juin 2021 (pour le CRBA) et en juin 2022 (pour JPC) (figure 6.2). Dans les deux cas, la décision de participer à cet événement a été motivée par la présence de parcelles expérimentales au sein de ces deux sites (celles du DE pour le CRBA, et celles du D21-22 pour JPC). A ces deux occasions, une partie de la journée a été consacrée à la présentation du dispositif expérimental et du projet de recherche. Il me semble important de souligner le rôle indispensable de l'ARDEAR dans l'organisation de ce type de rencontres.

De plus, la constitution d'un collectif autour de la thèse a permis la mise en relation de certain.e.s acteur.trice.s de la région intéressées par les céréales marginales. Notamment, plusieurs des paysan.ne.s ne se connaissaient pas avant le début du projet. Au-delà de l'aspect recherche, le programme leur a permis d'échanger sur leurs pratiques, surtout en ce qui concerne la culture des blés vêtus. Par ailleurs, la plupart des paysan.ne.s n'avaient jamais eu d'échange avec le

CRBA. Malgré les interactions limitées entre ces deux catégories d'acteur.trice.s au cours de la thèse, selon l'ARDEAR et selon certain.e.s paysan.ne.s, le projet de recherche a tout de même permis un rapprochement¹⁴. Enfin, l'établissement de liens entre les divers partenaires et les chercheur.euse.s est aussi un résultat de cette thèse.



FIGURE 6.2 – Tournée des blés au CRBA en juin 2021 (a) et chez JPC (b) en juin 2022. Crédits photos : (a) Léa Bernard, (b) Justine Lepagneul.

En ce qui concerne le CRBA, les collaborations avec des instituts de recherche ont permis d'augmenter sa visibilité dans la région. Cela a notamment facilité l'identification de l'association par les élu.e.s locaux comme un acteur crédible pour initier un projet de réseau de fermes semencières sur le territoire de la métropole de Lyon (GRAND LYON 2022).

Ainsi, la thèse a généré des actions, telles que la multiplication de certaines variétés ou la participation à la « Tournée des blés », qui peuvent être vues comme des **externalités positives**. Toutefois, ces actions restent individuelles (elles sont réalisées par un.e seul.e acteur.trice) et non collectives. Par ailleurs, la thèse semble avoir facilité l'interaction entre certain.e.s acteur.trice.s, et participé à la visibilité du CRBA, contribuant donc à une certaine transformation sociale.

6.4.5 Quelques apprentissages pour la suite du projet participatif

Au-delà des résultats obtenus sur les plans de la recherche et de la participation, cette thèse peut être perçue comme une première expérience collective riche en apprentissages. Dans cette sous-section, j'évoque d'abord les apprentissages et propositions de perspectives découlant du D21-22 (6.4.5.1). J'aborde ensuite les apprentissages et propositions de perspectives en lien avec l'approche participative (6.4.5.2).

¹⁴. A titre anecdotique, un des paysans a employé la batteuse du CRBA pour effectuer le battage de ses parcelles de collection.

6.4.5.1 Le dispositif 2021-2022

Dans un contexte participatif et d'expérimentation à la ferme, il n'est pas possible d'atteindre la situation d'**optimalité** consistant à avoir des dispositifs complètement équilibrés dans plusieurs sites. Les dispositifs résultent d'un compromis entre les attentes et contraintes des chercheur.euse.s d'une part, et celles des partenaires non scientifiques de l'autre (RIVIÈRE 2014).

Le D21-22 a été conçu de telle sorte que l'analyse de l'effet de l'espèce et de la variabilité intra-spécifique reposent uniquement sur la partie du dispositif mise en place au CRBA (section 3.5, chapitre 3). Toutefois, dépendre d'un essai sur un seul site représente une prise de risque conséquente, puisqu'on n'est jamais à l'abri d'un accident de culture. De fait, en plus des ravages d'oiseaux sur les premiers semis que nous avons réussi à surmonter en effectuant une deuxième série de semis, les parcelles du D21-22 au CRBA ont été endommagées par un orage de grêle, nous empêchant d'estimer les rendements. En raison de cette impossibilité d'estimer les rendements, de la contrainte liée à la durée de la thèse, et pour des raisons personnelles, nous avons décidé de ne pas reconduire une deuxième expérimentation en 2022-2023. De plus, l'essai au CRBA comprenait seulement deux blocs (un minimum de trois blocs est généralement conseillé) et une seule année de données, ce qui représente le strict minimum pour effectuer des analyses statistiques.

Dans l'ensemble, nos choix et les accidents de culture sur le D21-22 ont fait en sorte que la variabilité liée à l'environnement et la variabilité inter-annuelle n'ont pas pu être prises en compte dans les estimations des effets de l'espèce et de la variabilité intra-spécifique, limitant fortement les conclusions de la thèse sur le plan agronomique. Il me semble qu'une stratégie plus **robuste** aurait consisté à concevoir un dispositif sur une seule année, mais sur plusieurs sites, pour étudier l'effet des espèces et la variabilité intra-spécifique.

En ce qui concerne l'effet de l'environnement, le D21-22 était trop déséquilibré pour permettre une estimation par des méthodes statistiques. Par ailleurs, au sein des fermes, en plus des accidents de culture tels que les ravages d'oiseaux à la levée, des sources de variabilité inattendues ont été constatées. Par exemple, une hétérogénéité en termes de densités de semis a eu lieu du fait que deux paysan.ne.s ont préféré semer à des densités supérieures à celles définies initialement, et que les tailles de parcelles préalablement déterminées n'ont pas été respectées partout. En ce qui concerne le suivi agronomique, les fiches à destination des paysan.ne.s n'ont pas été remplies par tou.te.s les participant.e.s. Certain.e.s d'entre eux.elles ont aussi modifié les catégories proposées dans les fiches, ce qui complique l'intégration des notations dans l'analyse des données.

En résumé, le D21-22 n'a pas été entièrement **efficace** sur le plan de la recherche, car il n'a pas permis de répondre statistiquement à l'ensemble des questions posées. Sa **performance** paraît également faible, car beaucoup de temps a été consacré à sa gestion, en particulier en ce qui concerne l'équipe de recherche, pour des conclusions assez limitées. Toutefois, le D21-22 a permis d'avoir une première expérience collective autour d'un dispositif expérimental, de fournir au collectif un meilleur aperçu de ses capacités et limites et de générer divers apprentissages, qui pourront être utiles lors de la conception de nouvelles expérimentations.

Parmi ces apprentissages, on peut citer les risques liés à l'expérimentation au champ, ainsi que l'importance des répétitions intra- et inter-sites. Pour atteindre un meilleur équilibre entre **efficacité** et **robustesse** de futurs dispositifs expérimentaux, une première piste serait de mieux réfléchir à la cohérence entre les questions posées et les moyens disponibles pour y répondre (évoquée dans la sous-section 6.4.3.2). En ce qui concerne la conception des dispositifs expérimentaux, une stratégie à deux niveaux pourrait être envisagée. Par exemple, on pourrait imaginer de mettre en place des dispositifs assez importants et contraignants au sein d'un nombre limité de sites, conçus pour permettre une analyse statistique des données (« niveau 1 »). En parallèle, d'autres sites pourraient accueillir un nombre variable de parcelles expérimentales, en fonction des possibilités et préférences des participant.e.s (« niveau 2 »). Les données issues de ces seconds sites pourraient être analysées de façon descriptive au regard des résultats des sites du « niveau 1 ». Ce type de stratégie a été mis en place dans le programme national de sélection participative sur BT, avec des fermes « régionales » accueillant des dispositifs plus conséquents que les fermes « satellites » (RIVIÈRE 2014).

Une autre option serait d'augmenter considérablement le nombre total de sites (passer à plusieurs dizaines de sites), tout en maintenant une grande flexibilité au niveau des dispositifs à chaque endroit. En effet, dans le cas du programme national de sélection participative sur BT, c'est le nombre élevé de sites (**redondance**), et la répétition d'une ou deux variétés sur l'ensemble des sites, qui permet l'analyse statistique par des approches bayésiennes (RIVIÈRE et al. 2013), et qui confère de la **robustesse** au projet. Ces deux options contribueraient à réduire la vulnérabilité face aux aléas et à surmonter les limites liées à l'analyse d'un dispositif avec un nombre restreint de parcelles au sein d'un nombre limité de sites.

Enfin, une troisième option serait de renoncer complètement aux analyses statistiques. Cette alternative, mise en avant par le collectif Mètis (RIVIÈRE 2023; MÈTIS 2023), permettrait de garder une grande souplesse dans la conception de futurs dispositifs. Néanmoins, elle nécessiterait

une réflexion sur la valorisation académique, qui devrait passer par une discipline autre que celle des sciences agronomiques.

Finalement, les aspects qui avaient été décidés collectivement et qui n'ont pas été entièrement réalisés au cours du D21-22 peuvent nous amener à revoir notre stratégie, en vue de prochaines expérimentations. Par exemple, on pourrait se demander si une densité de semis homogène entre tous les sites est strictement nécessaire, et discuter d'une méthode permettant des densités de semis variables sans compromettre la possibilité de valoriser les données sur le plan scientifique (ces densités variables pourraient rentrer dans un effet de l'environnement général). Au niveau des fiches de suivi à destination des paysan.ne.s, on pourrait réfléchir collectivement à des améliorations, de telle sorte qu'elles soient remplies par un maximum de participant.e.s, sans nécessité de les modifier en cours d'expérimentation. Ceci faciliterait la prise en compte des données qui en sont issues dans l'analyse finale.

6.4.5.2 La démarche participative

Au cours de la thèse, peu de temps a été accordé à la réflexion sur le processus participatif. Ceci a probablement contribué à l'**efficacité** du projet sur le plan de la recherche. Néanmoins, cette stratégie semble aussi avoir généré plusieurs sources de **fragilité** au niveau de la démarche participative, pouvant compromettre la pérennité du projet.

Dans cette sous-section, j'évoque quatre propositions en vue de renforcer la **robustesse** de l'approche participative et d'améliorer la qualité du processus pour la suite du projet. Je mentionne la réflexion concernant la composition du collectif, la formalisation des modalités de gouvernance, la définition d'objectifs et de visions communs et l'exercice réflexif. Ces différentes suggestions contribueraient, selon moi, à renforcer la transparence et la démocratie au sein du collectif, à limiter la position centrale des chercheur.euse.s et à renforcer l'implication des autres acteur.trice.s. Elles assureraient également une certaine rigueur méthodologique, au niveau de la démarche de recherche. Dans l'ensemble, elles permettraient de mieux répondre aux neuf recommandations de HOULLIER et MERILHOU-GOUDARD 2016 visant à garantir la rigueur et la qualité des approches participatives.

6.4.5.2.1 La composition du collectif

Tout d'abord, il me semble que l'exercice réflexif nous amène à revoir la composition du collectif d'acteur.trice.s autour du projet sur les céréales

du programme ANS. En ce qui concerne les acteur.trice.s non académiques, le choix d'ouvrir le collectif à plus de partenaires se pose. De plus, il pourrait être opportun de rediscuter la décision de favoriser l'implication d'individus plutôt que de collectifs. Il me semble que le renforcement de partenariats avec des organisations citoyennes, notamment paysannes, permettrait de facilement élargir le collectif et pourrait éviter les asymétries de pouvoirs au sein du groupe. Une solution concrète serait d'augmenter l'implication de l'ARDEAR. Nous pourrions également considérer l'implication du collectif Graines de l'Ain, dont un des membres fait déjà partie du projet.

La réflexion pourrait également porter sur la façon de mobiliser l'interdisciplinarité dans la suite du projet. Par exemple, on pourrait envisager d'associer d'autres scientifiques à l'équipe de recherche au cœur du projet. Ces expert.e.s pourraient être invité.e.s à rejoindre le collectif suite à l'identification de connaissances et de compétences nécessaires pour la suite de la recherche. En fonction des orientations futures du programme de recherche (paragraphe 6.4.5.2.3), il pourrait s'agir d'un.e agronome, généticien.ne, géographe, expert.e en sciences de la gestion, entre autres. En tant que collaborateur.trice.s, ces chercheur.euse.s prendraient aussi part aux décisions concernant l'orientation du projet de recherche.

En cas d'élargissement du collectif, il serait nécessaire de mettre en place des modalités de gouvernance appropriées. Par exemple, nous pourrions imaginer un fonctionnement avec des niveaux d'implication hétérogènes. Une stratégie couramment utilisée est la constitution d'un comité de pilotage, comprenant des représentant.e.s de chaque catégorie d'acteur.trice.s et responsable d'assurer l'avancement du projet, en prenant certaines décisions stratégiques. Une autre possibilité pour faciliter une dynamique collective avec un nombre élargi d'acteur.trice.s serait de faire appel à une animation professionnelle ou au dispositif de tiers-veilleur (SCIENCES CITOYENNES 2020). Pour ceci, une option serait d'avoir recours à une organisation citoyenne, disposant de compétences en la matière, telle que l'ARDEAR. Une autre possibilité consisterait à impliquer un.e expert.e en gestion dans le collectif, qui serait en charge de son animation.

6.4.5.2.2 La formalisation des modalités de gouvernance Une autre piste pour renforcer la démarche participative est la formalisation de la gouvernance du collectif. Dans un premier temps, il me semblerait important de clarifier et de formaliser la composition du collectif d'acteur.trice.s impliqué.e.s dans le projet « Céréales » du programme ANS. Il s'agirait de définir qui fait partie du groupe, quels sont les rôles respectifs des participant.e.s, et les processus d'intégration de nouveaux membres. A mon avis, une meilleure transparence sur qui fait

partie du collectif faciliterait des échanges directs entre acteur.trice.s, sans forcément passer par l'équipe de recherche. L'établissement de certaines règles concernant la composition du groupe d'acteur.trice.s renforcerait aussi l'aspect démocratique. Notamment, l'implication de nouveaux membres pourrait ne plus reposer uniquement sur les chercheur.euse.s.

L'effort de formalisation pourrait aussi concerner la manière de tenir compte de la diversité des statuts parmi les types d'acteur.trice.s impliqué.e.s dans le projet. Une réflexion pourrait être menée pour proposer des modalités de participation justes et équitables dans un projet rassemblant entre des acteur.trice.s rémunéré.e.s pour leur travail de recherche à travers leur statut de fonctionnaires (les chercheur.euse.s) et d'autres acteur.trice.s a priori non rémunéré.e.s pour leur travail de recherche.

La formalisation pourrait également porter sur les modalités de prise de décision. Par exemple, on pourrait établir différents niveaux de décisions, avec des conditions pour qu'elles puissent être prises. Cela induirait sûrement de la **lenteur** dans le processus décisionnel, mais cet effort permettrait de le décentraliser et d'en améliorer la transparence.

Enfin, la formalisation pourrait couvrir des sujets spécifiques, comme la gestion des données générées au cours du projet. Pendant ma thèse, lorsque nous avons voulu soumettre les articles scientifiques, nous avons été confronté.e.s à l'absence d'une réflexion préalable sur la gestion des données. La mise en place d'un plan de gestion des données, approuvé collectivement, permettrait de définir qui a accès aux données et de mettre en place des règles pour leur diffusion. Nous pourrions également décider de réaliser des comptes-rendus pour toutes les réunions ayant lieu au sein du projet. Cette initiative assurerait la traçabilité de la prise de décisions et renforcerait la transparence de la démarche participative. Dans le même ordre d'idées, on pourrait dynamiser l'espace partagé en ligne, permettant aux participant.e.s d'accéder librement aux différents documents partagés au cours du projet.

Concrètement, ces sujets de formalisation pourraient être récapitulés dans une charte, qui serait validée par l'ensemble des partenaires. Bien entendu, cette charte ne représenterait qu'un engagement moral et pourrait évoluer en fonction des besoins et des changements au sein du collectif. Le caractère évolutif du document pourrait même faire l'objet d'un article, comme c'est le cas pour la charte du Groupe « tomates » du RSP¹⁵ (GROUPE « TOMATES » s. d.). Plus qu'un outil restrictif et contraignant, l'établissement de ce document serait l'occasion de confronter

15. Cet article précise que la charte peut évoluer, et indique qu'un temps doit être prévu pour la rediscuter lors de chaque rencontre du groupe.

les positions respectives des différent.e.s acteur.trice.s par rapport aux sujets évoqués. Il s'agirait également de clarifier le fonctionnement du collectif, de trouver des accords sur des aspects pouvant faire l'objet de débats, et d'éviter d'éventuels malentendus. Tout en faisant écho aux principes évoqués par OSTROM 1990 pour la gouvernance des biens communs, il me semble que cette charte s'inscrirait complètement dans la notion de **SO**. Par son caractère évolutif, il s'agirait d'un document **inachevé** et **fluctuant**, ne conduisant à aucun engagement formel. Néanmoins, cet outil permettrait de rediscuter régulièrement des règles régissant le fonctionnement du collectif et des rôles de chaque partie prenante. Ainsi, une charte permettrait de renforcer la dimension participative du projet, et donc sa **robustesse**.

6.4.5.2.3 Les objectifs et visions communs Si la volonté de maintenir ou même d'accroître la participation des acteur.trice.s non académiques reste une intention au sein du projet, il me paraît aujourd'hui essentiel de définir des objectifs et visions communs au sein du collectif. En passant d'objectifs posés par la recherche à des objectifs choisis collectivement, cette initiative permettrait de renforcer la transparence par rapport à ces buts et de vérifier qu'ils sont partagés par les divers.e.s acteur.trice.s. La clarification des objectifs et des visions communes faciliterait également le choix de questions et de stratégies de recherche en accord avec ces derniers. Elle faciliterait la communication au sein du collectif, limiterait la dispersion au sein du projet de recherche, et améliorerait son **efficacité**.

Parmi les objectifs à long terme envisageables, on pourrait imaginer :

- Mettre en place une filière pour une ou plusieurs espèces de blés vêtus dans la région de Lyon.
- Mettre en place un programme d'évaluation ou de sélection participative sur une ou plusieurs espèces de blés vêtus dans la région de Lyon. Dans ce cas, on pourrait envisager de sortir plus de variétés de divers conservatoires et/ou de fermes, afin de les évaluer sur le plan phénotypique (et éventuellement génétique).
- Mieux comprendre les pratiques agricoles (par exemple, le taux de fertilisation, ou encore les dates de semis) convenant à une ou plusieurs espèces de blés vêtus, afin de faciliter leur adoption par des paysan.ne.s.
- Approfondir l'aspect nutritionnel et/ou les potentiels bienfaits sur la santé d'une ou plusieurs espèces de blés vêtus cultivées en région lyonnaise.
- Reprendre la question énoncée au cours de la première réunion bisannuelle, sur *comment*

préserver la composition des éléments d'intérêt nutritionnel tout au long des processus de transformation (mouture, stockage, et panification par exemple) ?

Dans la même idée, il me semblerait essentiel de clarifier les visions des différent.e.s partenaires sur certains aspects particulièrement importants pour le projet, et de se mettre d'accord sur des visions communes. En premier lieu, une discussion sur la vision de la « recherche participative » me paraît essentielle. Au-delà de comprendre ce que chacun.e entend par la participation, ceci permettrait de clarifier les volontés en termes de degrés d'implication des différent.e.s acteur.trice.s, et pourrait conduire à l'adaptation des objectifs du projet en fonction de ces retours. En effet, au cours de la thèse, le fait que l'objectif en termes de participation ait été défini uniquement par l'équipe de recherche paraît **incohérent**. Parmi les autres concepts qui pourraient faire l'objet de clarification, on peut citer la « nutrition » (encadré 6.4.1), ou encore, la « robustesse agromonomique » pour les blés vêtus. On pourrait reprendre l'idée évoquée par une paysanne au cours de l'enquête de terrain, consistant à mettre en place un glossaire, avec la définition des termes centraux au projet. Un travail de cette nature a été réalisé dans le cadre du projet BAKERY coordonné par Delphine Sicard (SICARD et al. 2023).

A nouveau, la définition d'objectifs et de visions communs n'est pas à voir comme une contrainte. Il s'agit plutôt d'une occasion de partager des avis probablement hétérogènes, et de trouver des accords au sein du collectif. Tout comme les modalités de gouvernance, les objectifs et visions peuvent être rediscutés régulièrement et **fluctuer** en fonction de l'avancement du projet et des évolutions du collectif.

Encadré 6.4.1 - La nutrition

Plusieurs visions, et donc plusieurs façons d'aborder la nutrition peuvent être envisagées. Par exemple, on peut imaginer une vision basée sur une compréhension intégrale de la composition des aliments, leurs liens avec la santé et l'adoption de régimes stricts. Le rôle de la recherche serait alors de générer les connaissances nécessaires, notamment par des analyses biochimiques détaillées. Néanmoins, cette vision ne *s'inscrit-elle pas dans une recherche d'optimisation et de contrôle* ? Par ailleurs, connaissant les nombreuses sources de variabilité de la composition des aliments (dont l'effet de l'environnement et des processus de transformation), ainsi que l'écart entre cette composition et ce qu'on assimile réellement, quelle est la faisabilité de cette approche ? On peut aussi soulever les **externalités négatives** d'une démarche de ce type, dont les coûts financiers et environnementaux, ainsi que le risque de favoriser une homogénéisation des régimes alimentaires.

Une autre manière d'aborder la nutrition privilégie la promotion de régimes alimentaires diversifiés et de qualité. On peut considérer que la science a déjà fourni les connaissances suffisantes pour comprendre les principes d'une alimentation saine. Le rôle de la recherche serait alors de faciliter l'appropriation d'aliments contribuant à ces régimes alimentaires, en mettant l'accent sur l'éducation alimentaire et sur la sensibilisation à la richesse des options disponibles. A mon avis cette deuxième vision s'inscrit mieux dans la **SO**. Axée sur l'éducation à l'alimentation, elle peut paraître moins **efficace** que la mise en place de régimes contrôlés, mais en favorisant l'autonomie individuelle, elle paraît plus **robuste**. Par ailleurs, cette deuxième approche implique une posture plus atypique de la recherche, mettant davantage l'accent sur l'éducation et l'accompagnement que sur la production de nouvelles connaissances.

6.4.5.2.4 La réflexivité Dans le contexte des sciences sociales, un grand nombre d'auteur.e.s considèrent la réflexivité comme un pilier fondamental pour assurer la rigueur méthodologique (OLIVIER DE SARDAN 1995b ; JODELET 2003 ; GODRIE et al. 2020). La réflexivité est également importante dans les approches de recherche participatives. Elle permet de revenir sur les processus mis en place, afin d'identifier des améliorations possibles. Dans le cas de ma thèse, j'ai réalisé ce travail réflexif seule. Toutefois, il me paraîtrait intéressant et nécessaire de proposer cet exercice à l'ensemble des membres du collectif. Ce travail pourrait avoir lieu régulièrement (annuellement par exemple) au sein du projet, et être intégré dans la formalisation des modalités de gouvernance.

Un exercice réflexif collectif et régulier offrirait à chacun.e l'occasion de s'exprimer sur le déroulement du processus. Étant donné que les attentes des participant.e.s peuvent évoluer au cours des projets, ce travail permettrait aussi d'ajuster périodiquement les orientations du projet en fonction de ces évolutions. Ainsi, cette initiative favoriserait la cohérence de la démarche

avec les attentes des participants et permettrait d'éviter d'éventuels malentendus. Bien que cette initiative puisse sembler **ralentir** le processus, elle renforcerait l'aspect participatif, contribuant à la **robustesse** du projet dans son ensemble.

6.5 Conclusion

L'analyse de plusieurs aspects de la démarche de recherche mise en place au cours de la thèse m'a permis d'identifier ses points forts et ses faiblesses. Parmi les principales forces figurent l'action dès les premières phases du projet, l'établissement de relations de confiance, l'implication assez forte des paysan.ne.s et la prise en compte relativement **efficace** des savoirs non académiques. En ce qui concerne les faiblesses, j'ai principalement relevé la transparence et démocratie limitée au sein du collectif d'acteur.trice.s, l'écart entre l'expertise de l'équipe de recherche et les besoins du projet, la position centrale et la nécessité d'une forte mobilisation des chercheur.euse.s.

A présent, je propose de conclure en évaluant à la fois l'**efficacité** et la **robustesse** de l'ensemble du processus (sous-section 6.5.1). Dans un second temps, je reviendrai rapidement sur l'intérêt de la **SO** en tant que cadre d'analyse pour ce type d'approche (sous-section 6.5.2).

6.5.1 Une démarche **sous-optimale** ?

Pour évaluer la **SO** de la démarche dans sa globalité, je propose de répondre aux questions énoncées dans la section 6.3. Les réponses à ces questions sont relatives à l'**optimum théorique**, qui rassemble trois objectifs :

- (a) Générer des résultats valorisables sur le plan scientifique.
- (b) Générer des résultats pertinents pour les partenaires non académiques engagé.e.s dans la démarche de recherche.
- (c) Mettre en place une participation de type autonomisation (« empowerment ») à tous les stades de la recherche.

Je ferai également référence aux deux objectifs initiaux de la thèse :

- (i) **Evaluer une (des) espèce(s) de céréales marginales d'intérêt pour les paysan.ne.s en région lyonnaise en fonction de critères agronomiques et nutritionnels choisis de façon participative.**

- (ii) **Créer du lien entre différent.e.s acteur.trice.s s'intéressant à cette (ces) espèce(s) de céréales marginales sur le territoire, afin d'initier une collaboration sur le long terme.**

Dans la sous-section suivante, je réponds aux trois questions en lien avec la **SO** en fonction des objectifs énoncés ci-dessus.

- (1) *Quelle a été l'efficacité du processus de recherche participative expérimenté pendant ma thèse (les objectifs initiaux ont-ils été atteints) ?*

Dans l'ensemble, l'objectif (a) peut être considéré comme partiellement atteint. En effet, si les résultats des compositions en protéines du gluten semblent valorisables sur le plan scientifique, la valorisation des résultats des analyses agronomiques s'avère moins évidente. De plus, de nombreux autres résultats, tels que ceux des ANTP ne sont pas valorisables.

L'objectif (b) est, selon moi, celui qui a été le mieux réalisé. Il me semble que la plupart des résultats générés au cours de la thèse ont du sens pour les acteur.trice.s non académiques impliqué.e.s dans le programme de recherche. Cela se reflète dans leur volonté de continuer à s'investir dans le projet. Néanmoins, mon avis prend en compte principalement les paysan.ne.s et le CRBA, avec lesquelles j'ai le plus interagi. De plus, mon regard est subjectif, et pour confirmer cette supposition, il faudrait recueillir les impressions des acteur.trice.s concerné.e.s.

Enfin, l'objectif (c) a été moyennement réalisé. Un niveau de participation important au cours de la thèse n'a été atteint que pour les paysan.ne.s. Par ailleurs, la démarche mise en place a permis peu d'échanges entre les différentes catégories d'acteur.trice.s autres que les chercheur.euse.s. Ainsi, il apparaît légitime de se demander dans quelle mesure cette thèse a réussi à créer suffisamment de liens et à mettre en place un cadre pour favoriser une collaboration à long terme.

Dans l'ensemble, on peut conclure que la démarche mise en place au cours de la thèse a été partiellement **efficace**, tant du point de vue de la recherche que de la participation.

- (2) *Quelle a été la performance de ce processus (par quels moyens ces objectifs ont été atteints) ?*

Au cours de la thèse, il me semble que la démarche adoptée a été peu **performante**. Ceci est notamment vrai pour les objectifs de recherche, pour lesquels une forte **lenteur** a été induite par la dispersion lors de la première année dans une diversité de questions, par la faible maîtrise

par l'équipe de recherche des disciplines nécessaires à la réalisation de la thèse et de la littérature scientifique. En ce qui concerne l'objectif de participation, la fragmentation des échanges a également induit de la **lenteur** et de la dispersion, limitant sa **performance**.

(3) *En quoi la démarche mise en place apparaît **robuste** et quelles sont ses principales **fragilités** ?*

Par rapport à la capacité à maintenir sa stabilité sur le court terme (si on considère la durée de la thèse), la démarche mise en place semble assez **robuste**. En effet, elle a pu résister à diverses **fluctuations** et sources d'**hétérogénéité**, notamment en ce qui concerne le D21-22. En revanche, si on prend en compte la viabilité sur le long terme, la démarche apparaît assez peu **robuste**. Les principales sources de **fragilité** concernent le processus participatif. Toutefois, les pistes d'amélioration proposées par l'exercice réflexif visant à renforcer la démarche pourraient permettre d'en améliorer la **robustesse** pour la suite du projet.

6.5.2 Le cadre d'analyse

Enfin, je voudrais rappeler que l'utilisation de la **SO** comme cadre pour l'analyse d'un système social, et plus précisément d'une démarche de recherche, est totalement exploratoire. Dans certains cas, faire rentrer des éléments d'analyse dans le cadre peut paraître assez artificiel. Par ailleurs, la **SO** oriente la réflexion d'une manière qui lui est propre. Elle permet de réfléchir à l'**efficacité** et à la **robustesse** plutôt que de focaliser l'analyse sur les apprentissages ou sur les changements pratiques mis en avant par la sociologie de la traduction (CALLON 2009). Néanmoins, il me semble que l'usage de la **SO** a permis de réaliser une analyse approfondie de la démarche participative, en gardant une certaine cohérence entre les différents aspects traités, et en permettant de dégager les principales forces et limites de l'approche mise en œuvre pendant la thèse.

6.6 Bibliographie

- AGROPOLIS FONDATION (2023). *Résultats : Troisième appel à projets CO3*. URL : <https://www.agropolis-fondation.fr/Troisieme-appel-a-projets-CO3-CO-COConstruction-des-Connaissances-pour-la?lang=en%7D> (visité le 27/10/2023).
- ASHBY, W. R. (1956). *An introduction to cybernetics*. Londres : Chapman & hall LTD. URL : <https://philarchive.org/archive/ASHAIT-6> (visité le 08/11/2023).
- (1991). « Requisite variety and its implications for the control of complex systems ». In : *Facets of systems science*, p. 405-417.
- BELLOT, C. et J. RIVARD (2013). « La reconnaissance : un enjeu au cœur de la recherche participative ». In : *Nouvelles pratiques sociales* 25.2, p. 105-124. DOI : [10.7202/1020824ar](https://doi.org/10.7202/1020824ar).
- BONDON, R., R. MATHEVET, C. MOUNET et S. CHAMAILLÉ-JAMMES (2021). « Passer les limites, rythmer le territoire. Paysage et mobilités du sanglier en Valbonnais (Isère, France) ». In : *Géocarrefour* 95.4. DOI : [10.4000/geocarrefour.16917](https://doi.org/10.4000/geocarrefour.16917).
- CALLON, M. (2009). « Éléments pour une sociologie de la traduction ». In : *L'Année sociologique*.
- CHABLE, V. et J.-F. BERTHELLOT (2006). « La sélection participative en France : présentation des expériences en cours pour les agricultures biologiques et paysannes ». In : *Le courrier de l'environnement de l'INRA* 30, p. 129-138.
- COEX (2023). *Ébauche de manuel pour les projets collaboratifs sur les semences entre organisations paysannes et institutions de recherche*. Document de travail. URL : https://projetcoex.sciencesconf.org/data/pages/Manuel_projets_collaboratifs_CoEx_1.pdf (visité le 25/10/2023).
- DEMEULENAERE, É. et I. GOLDRINGER (2017). « Semences et transition agroécologique : initiatives paysannes et sélection participative comme innovations de rupture ». In : *Natures sciences sociétés* Supp. 4, p. 55-59. DOI : [10.1051/nss/2017045](https://doi.org/10.1051/nss/2017045).
- GEISSLITZ, S., C. F. H. LONGIN, K. A. SCHERF et P. KOEHLER (2019). « Comparative study on gluten protein composition of ancient (einkorn, emmer and spelt) and modern wheat species (durum and common wheat) ». In : *Foods* 8.9, p. 409. DOI : [10.3390/foods8090409](https://doi.org/10.3390/foods8090409).
- GEISSLITZ, S., H. WIESER, K. A. SCHERF et P. KOEHLER (2018). « Gluten protein composition and aggregation properties as predictors for bread volume of common wheat, spelt, durum wheat, emmer and einkorn ». In : *Journal of Cereal Science* 83, p. 204-212. DOI : [10.1016/j.jcs.2018.08.012](https://doi.org/10.1016/j.jcs.2018.08.012).
- GODRIE, B., M. BOUCHER, S. BISSONNETTE, P. CHAPUT, J. FLORES, S. DUPÉRE, L. GÉLINEAU, F. PIRON et A. BANDINI (2020). « Injustices épistémiques et recherche participative : un agenda de recherche à la croisée de l'université et des communautés ». In : *Gateways : International Journal of Community Research and Engagement* 13.1. DOI : [10.5130/ijcre.v13i1.7110](https://doi.org/10.5130/ijcre.v13i1.7110).
- GRAND LYON (2022). *Un réseau de fermes semencières créé pour développer une agriculture locale et adaptée au changement climatique*. Dossier de presse. Institution de publication. URL : https://www.grandlyon.com/fileadmin/user_upload/media/pdf/espace-presse/dp/2022/20220614_dp_fermes-semencieres.pdf (visité le 29/09/2023).
- GROUPE « TOMATES » (s. d.). *Charte du Groupe « tomates »*. Charte.
- HAMANT, O. (2022). *La troisième voie du vivant*. Odile Jacob.
- HAZARD, L., M. CERF, C. LAMINE, D. MAGDA et P. STEYAERT (2020). « A tool for reflecting on research stances to support sustainability transitions ». In : *Nature Sustainability* 3.2, p. 89-95. DOI : [10.1038/s41893-019-0440-x](https://doi.org/10.1038/s41893-019-0440-x).
- HOULLIER, F. et J.-B. MERILHOU-GOUDARD (2016). « Les sciences participatives en France : Etats des lieux, bonnes pratiques et recommandations ». In : *Les sciences participatives en France (2016)*.
- JODELET, D. (2003). « Aperçus sur les méthodologies qualitatives ». In : *Les méthodes des sciences humaines*, p. 139-162.

- KACZMAREK, T., S. CAUSSE, S. D. ABDUL, S. ABRAHAM, E. G. ACHIGAN-DAKO, C. ADJE, J. ADJEBENG-DANQUAH, R. Y. AGYARE, L. AKANVOU, Y. BAKASSO et al. (2023). « Towards conservation and sustainable use of an indigenous crop : A large partnership network enabled the genetic diversity assessment of 1539 fonio (*Digitaria exilis*) accessions ». In : *Plants, People, Planet*. DOI : [10.1002/ppp3.10424](https://doi.org/10.1002/ppp3.10424).
- KERRIGAN, V., D. PARK, C. ROSS, R. M. HERDMAN, P. M. WILSON, C. GUNABARRA, W. TINAPPLE, J. BURRUNALI, J. NGANJMIRRA, A. P. RALPH et al. (2023). « Countering the “wrong story” : a Participatory Action Research approach to developing COVID-19 vaccine information videos with First Nations leaders in Australia ». In : *Humanities and Social Sciences Communications* 10.1, p. 1-12. DOI : [10.1057/s41599-023-01965-8](https://doi.org/10.1057/s41599-023-01965-8).
- KLAEDTKE, S. (2017). « Gouvernance de la santé des plantes et gestion de la biodiversité cultivée - le cas de la santé du haricot gérée par les membres de l'association "Croqueurs de Carottes". » NNT : 7NSARC128. Thèse de doct. grocampus Ouest.
- LONGIN, C. F. H., J. ZIEGLER, R. SCHWEIGGERT, P. KOEHLER, R. CARLE et T. WÜRSCHUM (2016). « Comparative study of hulled (einkorn, emmer, and spelt) and naked wheats (durum and bread wheat) : Agronomic performance and quality traits ». In : *Crop Science* 56.1, p. 302-311. DOI : [10.2135/cropsci2015.04.0242](https://doi.org/10.2135/cropsci2015.04.0242).
- MARKOLF, S. A., A. HELMRICH, Y. KIM, R. HOFF et M. CHESTER (2022). « Balancing efficiency and resilience objectives in pursuit of sustainable infrastructure transformations ». In : *Current Opinion in Environmental Sustainability* 56, p. 101181. DOI : [10.1016/j.cosust.2022.101181](https://doi.org/10.1016/j.cosust.2022.101181).
- MÈTIS (2023). *Collectif Mètis*. URL : <https://collectif-metis.org/> (visité le 01/11/2023).
- OLIVIER DE SARDAN, J.-P. (1995a). *Anthropologie et développement. : Essai en socio-anthropologie du changement social*. Karthala Editions.
- (1995b). « La politique du terrain. Sur la production des données en anthropologie ». In : *Enquête. Archives de la revue Enquête* 1, p. 71-109.
- OSTROM, E. (1990). *Governing the commons : The evolution of institutions for collective action*. Cambridge university press.
- REEVES, G. T. (2019). « The engineering principles of combining a transcriptional incoherent feedforward loop with negative feedback ». In : *Journal of biological engineering* 13, p. 1-11. DOI : [10.1186/s13036-019-0190-3](https://doi.org/10.1186/s13036-019-0190-3).
- RIVIÈRE, P. et al. (2013). « Mise en place d'une méthodologie de sélection participative sur le blé tendre en France. » In : *Innovations Agronomiques* 32, p. 427-441.
- RIVIÈRE, P. (2014). « Méthodologie de la sélection décentralisée et participative : un exemple sur le blé tendre ». Thèse de doct. Paris 11.
- (2023). « Débat sur la recherche participative ». In : *A la recherche des blés*. RSP.
- ROUSSEAU-TRAORÉ, C. et G. KASTLER (2004). « Sauvons la recherche agronomique... d'elle-même! ou les promesses de la sélection participative. » In : *Nature et Progrès* 48, p. 29-32.
- SCIENCES CITOYENNES (2020). *Le tiers-veilleur : un acteur de la recherche participative. Note sur l'accompagnement de la recherche participative*. URL : <https://sciencescitoyennes.org/note-tiers-veilleur/> (visité le 02/11/2023).
- SHANNON, C. E. (1948). « A mathematical theory of communication ». In : *The Bell system technical journal* 27.3, p. 379-423.
- SICARD, D., E. MICHEL et P. ROUSSEL (2023). *Glossaire de panification au levain naturel*. URL : <https://skosmos.loterre.fr/PAN/fr/> (visité le 08/11/2023).
- STENGERS, I. (1997). *Sciences et pouvoirs. Faut-il en avoir peur?* Labor.
- STRUM, S., M. CALLON, B. LATOUR et M. AKRICH (2013). *Sociologie de la traduction : textes fondateurs*. Presses des Mines via OpenEdition.

- TANG, R., G. GAO, L. HE, Z. HAN, S. SHAN, R. ZHONG, C. ZHOU, J. JIANG, Y. LI et W. ZHUANG (2007). « Genetic diversity in cultivated groundnut based on SSR markers ». In : *Journal of Genetics and Genomics* 34.5, p. 449-459. DOI : [10.1016/S1673-8527\(07\)60049-6](https://doi.org/10.1016/S1673-8527(07)60049-6).
- VAUGHN, L. M. et F. JACQUEZ (2020). « Participatory research methods—Choice points in the research process ». In : *Journal of Participatory Research Methods* 1.1. DOI : [10.35844/001c.13244](https://doi.org/10.35844/001c.13244).

Conclusion générale

Contenu

7.1	Récapitulatif des résultats de la thèse	320
7.2	Récapitulatif des perspectives de la thèse	321



Récoltes chez SR. Crédit photo : Gustave Fradin.

7.1 Récapitulatif des résultats de la thèse

Cette thèse s'inscrit dans le projet « Céréales » du programme ANS, porté par Marie-Thérèse Charreyre et situé en région lyonnaise. Elle a permis une première évaluation, sur une année et principalement sur un site, de 23 variétés de blés vêtus (sept En, huit Am et huit GE), accessibles pour les paysan.ne.s de cette région. L'évaluation, conduite en comparaison à huit variétés de BT, a essentiellement porté sur des critères agronomiques, morphométriques des grains et sur leur composition en protéines du gluten.

L'évaluation agronomique et l'étude des protéines du gluten ont mis en évidence des caractéristiques distinctives pour l'En. Sur le plan agronomique, cette espèce se distingue par un tallage élevé, un cycle de développement long, de petits pieds, des grains de petite taille, un rendement relatif faible et des teneurs en protéines importantes. En ce qui concerne la composition du gluten, l'En est associé à un faible UPP%, une proportion élevée de GLIA, faible de GLUT, et un ratio LMW/HMW élevé. Les variétés d'Am et de GE présentent également des différences par rapport au BT en termes de composition des protéines du gluten, mais ces différences sont moins marquées que pour l'En, en particulier pour le GE. Enfin, nous avons identifié des caractéristiques morphométriques des grains propres à l'En, au GE et au BT, mais pas à l'Am.

Nous avons également observé une variabilité intra-spécifique élevée pour l'Am, à la fois au niveau des paramètres agronomiques, morphométriques des grains et de la composition en protéines du gluten. En revanche, parmi les trois espèces de blés vêtus, l'En s'est démarqué par sa plus faible diversité intra-spécifique. Enfin, en ce qui concerne les variétés de BT et leur composition en protéines du gluten, nous avons constaté des tendances spécifiques aux mélanges de variétés paysannes. Ceux-ci semblent se distinguer des variétés modernes par un taux de protéines plus élevé, un faible UPP%, un ratio GLIA/GLUT élevé, et un ratio LMW/HMW faible. Dans l'ensemble, les niveaux élevés de variabilité intra-spécifique soulignent l'intérêt des blés vêtus comme sources de diversité parmi les blés. Toutefois, il est important de rappeler que ces estimations de variabilité se basent sur les échantillons de variétés incluses dans cette étude particulière, et ne peuvent être généralisées à l'échelle de l'espèce.

De plus, cette thèse a révélé des variétés aux caractéristiques notoires. Au niveau agronomique, l'Am *Bleu d'Ethiopie* se distingue par sa précocité et par son aspect non vêtu. L'En *Noir* présente une précocité accrue et une composition en protéines du gluten légèrement différente par rapport aux autres variétés d'En. Finalement, l'Am *de Poveda* s'est démarqué par ses profils

chromatographiques pour les fractions de GLIA et GLUT, qui diffèrent notablement de ceux des autres variétés d'Am étudiées.

L'étude de l'effet de l'environnement sur les paramètres évalués figurait parmi les objectifs initiaux de cette thèse. Sur le plan agronomique, nous avons constaté une variabilité relativement élevée entre les différents sites pour la plupart des paramètres. Concernant la morphométrie des grains, nos résultats suggèrent que la taille des grains est influencée par l'environnement, mais pas leur forme. Enfin, nous avons observé une influence de l'environnement sur les compositions en protéines du gluten uniquement chez CM, où les conditions de culture ont été particulièrement stressantes. Les variétés cultivées chez CM présentaient des proportions particulièrement faibles de GLUT. Néanmoins, le dispositif mis en place au cours de la thèse nous limite à une analyse purement descriptive de l'effet de l'environnement, qui ne permet pas d'établir des conclusions définitives.

Enfin, un autre résultat de cette thèse réside dans la constitution d'un collectif multi-acteur.trice.s, avec une participation assez aboutie de certain.e.s de ses membres, ainsi que dans l'expérience même de trois années de recherche participative. Cette expérience m'a permis de réaliser une analyse réflexive, et d'émettre des propositions visant à renforcer la robustesse de la démarche participative, ainsi que la viabilité du projet sur le long terme. Dans l'ensemble, cette première expérience et l'exercice réflexif posent des bases solides pour une possible continuation du projet « Céréales » du programme ANS.

7.2 Récapitulatif des perspectives de la thèse

Les résultats d'évaluation des variétés présentés dans cette thèse reposent sur une seule année d'expérimentation et, en grande partie, sur un seul site d'étude. Par conséquent, ces résultats sont à valider par de futures expérimentations.

De plus, les conclusions de l'évaluation des variétés sont spécifiques aux échantillons pris en compte. Afin de généraliser les tendances à l'échelle des espèces, il serait nécessaire d'inclure un nombre plus important de variétés dans l'étude. Une réflexion sur la stratégie d'échantillonnage pourrait également s'avérer pertinente. On pourrait envisager un échantillonnage conçu pour refléter la diversité globale de chaque espèce, ou, comme mentionné dans le chapitre 6, aligné sur des critères définis de manière collective.

Pour parvenir à une compréhension plus approfondie de l'influence globale de l'environnement sur les paramètres évalués, il serait nécessaire de mettre en place un dispositif sur plusieurs sites, plus complet et équilibré, qui permette une analyse de l'effet de l'environnement au moyen de méthodes statistiques. Si l'objectif est d'étudier l'effet d'une composante précise de l'environnement, qu'il s'agisse d'un paramètre pédoclimatique ou d'une pratique agronomique, un dispositif adapté pourrait être envisagé, avec la présence de témoins négatifs pour des comparaisons pertinentes.

Au niveau des compositions en protéines du gluten, il est important de rappeler que les résultats de cette thèse ne permettent pas d'établir de liens entre les compositions du gluten des grains et des effets sur la santé. Cette dimension demeure peu explorée par la recherche, nécessitant ainsi de futures études pour améliorer notre compréhension.

En ce qui concerne ce projet en particulier, le processus participatif pourrait être renforcé. Une perspective à court terme serait d'établir collectivement des modalités de gouvernance et de définir des objectifs communs aux différent.e.s acteur.trice.s impliqué.e.s. En fonction de ces objectifs, des orientations très variables pourraient être empruntées, allant de la poursuite d'analyses nutritionnelles détaillées, à la mise en place d'un programme de sélection participative.

Annexes

A	Guide d’entretien utilisé par les étudiant.e.s de l’ISARA pour la première phase de l’enquête	327
B	Guides d’entretiens utilisés pour la deuxième phase de l’enquête	331
C	Analyses nutritionnelles et technologiques préliminaires	341
	C.1 Introduction	341
	C.2 Profils nutritionnels globaux	342
	C.3 Lipidomique	350
	C.4 Bibliographie	357
D	Charte de fonctionnement	359
E	Fiches de suivi utilisées par les paysan.ne.s	363
F	Dispositifs expérimentaux dans les fermes	377

Guide d'entretien utilisé par les étudiant.e.s de l'ISARA pour la première phase de l'enquête

Guide d'entretien céréales populations :

Introduction :

Nous sommes un groupe de 4 étudiants en 5ème année à l'ISARA Lyon, une école d'ingénieur en agronomie. Dans le cadre d'un projet d'étude, nous travaillons pendant 6 semaines sur les semences paysannes et leur implantation dans la région Lyonnaise. Notre étude est en lien avec MT Chareyre (CNRS), Sofia Correa (thèse) et Camille Vindras (ITAB), et servira de base à un projet plus conséquent reliant l'agriculture et l'alimentation. Nous souhaitons identifier la diversité des fermes et des ressources génétiques concernées. Nous voulons également comprendre les pratiques culturelles liées à la culture de céréales paysannes et la structure du réseau dans la région. Pour cela, nous réalisons des entretiens avec les acteurs concernés.

1. Contexte :

Présentation enquêté

- Demander une brève présentation de l'enquêté (formation, métier, ambitions)

Présentation exploitation

- Présentation de l'exploitation/ entreprise pour comprendre sa méthodologie : (Historique/foncier/choix de production/UTH/contexte socio-économique)
 - Quand vous êtes-vous installés ?
 - Quelle SAU ? SAU consacrée aux variétés anciennes/blés populations ?
 - Pouvez-vous nous décrire rapidement la répartition de vos assolements ?
 - Combien êtes-vous à travailler sur l'exploitation ? de combien d'UTH avez-vous besoin spécifiquement pour votre production de CA et/ou BP ?
 - Quel est votre contexte pédoclimatique ? (Sols, pluviométrie, relief, sécheresse) / comment a-t-il évolué sur les 5-10 dernières années ?
 - Faites-vous partie de groupement de production ou d'autres démarches collectives ?

Présentation céréales anciennes/populations

- Quels ont été vos motivations pour vous lancer dans la culture de céréales population ?
- De quand date votre première production de variétés anciennes/ blés populations ?
- Concernant la controverse sur les termes céréales anciennes, céréales paysannes, céréales population, pourriez-vous nous dire les termes que vous employez pour définir vos céréales ?
- Pouvez-vous nous donner la définition que vous en avez ?

2. Choix de variétés :

- **Quelles céréales et quelle variétés/mélanges cultivez-vous ?** (petit, moyen, grand épeautre ou autre). Pourquoi ce choix ? (critère d'adaptation au terroir, de contrat, de panification, autre)
- Comment vous fournissez vous en semences ? (Achats/échanges/autoproduction)
- Si autoproduction, faites-vous de la sélection ? Et si oui, selon quels critères ?
- Si sélection, comment stockez/conserved-vous vos semences ?
- Quelles sont vos exigences concernant la génétique de vos semences ? Avez-vous une volonté de conserver certaines variétés ou plus globalement conserver la diversité des céréales (variétales) ? Est-ce pour une question d'adaptation à votre contexte pédoclimatique ?
- Bénéficiez-vous de soutien financier (aides/association) pour la culture de CP ?
- Avez-vous déjà participé à des projets de recherche participative ?

3. **Technique :**

- Quelles est votre démarche de valorisation pour vos céréales (BIO, autre).
- Pouvez-vous nous décrire votre itinéraire technique pour chaque culture de céréales (populations) ? (Travail du sol, fertilisation, phytosanitaire, irrigation...)
 - Êtes-vous en labour/non labour/travail superficiel ?
 - A quelle fréquence travaillez-vous vos sols ? traitements ?
 - Comment désherbez-vous entre les cultures (herse étrille ou rien) ? avez-vous un couvert permanent ?
 - Adaptez-vous vos dates de semis pour la maîtrise des adventices et ravageurs ? Ces dates ont-elles beaucoup évolué avec les changements climatiques ces 5-10 dernières années ? Avez-vous constaté de nouveaux types d'adventices ou de ravageurs ?
 - Pour votre fertilisation, quel type de MO est utilisé ? fréquence ? sous quelle forme et en quelle quantité ?
- Intégrez-vous ces cultures à des rotations ? Si oui, lesquelles ?
- Quelles sont les différences de comportement entre les céréales populations et les autres ? Résistance/comportement des céréales populations face au changement climatique ? aux adventices ou aux ravageurs ?
- Comment vous adaptez vous face à ces différences ?
 - Mélange d'espèces ? de variétés ? diversification pour plus de résilience ?
 - acceptation/prevision des pertes ?
- Lors de la conservation/stockage de vos semences, rencontrez-vous des problèmes liés aux maladies ? comme les caries du blé par exemple ou infection au penicillium de vos locaux.
 - Quels moyens de traitements avez-vous ?
- Quelles pratiques adaptez-vous/ mettez-vous en place face au changement climatique ?
- Souhaitez-vous cultiver d'autres variétés ou d'autres espèces à l'avenir ? Pourquoi ? Si oui, lesquelles ? Si non, quels seraient les freins à cela ? Avez-vous participé à des formations spécifiques à ce type de culture ? Si oui, lesquels et par qui ? Et si non, pensez-vous que cela vous a manqué ?

4. **Transformation :**

- Est-ce vous qui transformez-vous même vos céréales en farines, voir en pain (ou pâtes ou autres) ?
 - **Oui** (paysan/boulangier),
 - Est-il possible de nous décrire rapidement vos procédés. Quels matériels utilisez-vous ?
 - Faites-vous partie d'un groupement de matériel de meunerie ?
 - Quels appareils de décorticage avez-vous (pour les épeautres) ?
 - **Non** (paysan ou autre).
 - Pouvez-vous nous en dire plus sur les personnes qui s'en chargent. Y-a-t-il une démarche de valorisation des produits ?
- Avez-vous des partenaires ? Si oui, quels sont leurs rôles dans la transformation de vos céréales ?

5. **Commercialisation :**

- Quels sont les moyens de vente utilisés (Magasin de producteurs, AMAP, vente directe, boulangerie, ...).
- Que pensez-vous du "réseau" CP ? Et comment serait-il possible de le développer davantage selon vous ? (est-ce que cela fait partie de ses envies de le développer surtout ... ?)

- Etes-vous satisfait de la rentabilité de vos céréales ou aimeriez-vous que ces dernières soient mieux valorisées ? (Création de label par exemple)

6. Besoin/leviers :

- S'il y en a, quels sont les verrous (verrous sociaux, techniques, économiques) au développement des CP et des filières CP ? Comment les lever ?
- Comment favoriser les échanges entre acteurs et développer un réseau ? Acteurs, matériel, soutiens (quel type, de qui...)
- Pensez-vous qu'un projet territorial pourrait être utile ? Pourquoi ?

7. Conclusion : (10 min)

- Avec du recul, êtes-vous satisfait de vos cultures de CP ? Si c'était à refaire, le referiez-vous ? En changeant quelque chose ?
- Quels étaient vos objectifs de départ lors de l'implantation de cette culture, et ont-ils, selon vous été atteints ?
 - S'ils n'ont pas été atteint, de quoi auriez vous besoin pour les atteindre ?
- Seriez-vous prêt à faire partie d'un projet territorial de recherche participative concernant les CP ?

Guides d'entretiens utilisés pour la deuxième phase de l'enquête

Enquête Paysans

*Paysans retenus suite à l'enquête menée par les étudiants de l'ISARA, donc potentiellement intéressés par un projet de recherche participative sur les céréales « anciennes/marginales ».

*Informations générales déjà obtenues par l'enquête ISARA (présentation enquêté, présentation ferme, présentation céréales « anciennes » ; choix des variétés ; itinéraire technique ; transformation ; commercialisation).

***Demander l'accord de l'enquêté pour enregistrer l'entretien.**

I. Présentation de l'entretien

- Présentation rapide de l'enquêteur
- Objectifs de l'entretien :
 - Comprendre et confronter les visions des « épeautres » de différents acteurs
 - Présenter et commencer à discuter du projet de recherche participative et à établir des partenariats
 - Précision : cet entretien sera probablement mené plusieurs fois au cours de la thèse (environ une fois par an)
 - Utilisation des données : uniquement dans le cadre de la thèse, avec accord préalable des enquêtés
- Plan de l'entretien :
 - Présentation/trajectoire de l'enquêté
 - Vision des « épeautres »
 - Présentation du projet de recherche participative
 - Entretien surtout de type semi-directif, avec quelques questions ouvertes et quelques questions d'associations

II. Présentation de l'enquêté

A. Consigne initiale (question ouverte)

« Pourquoi êtes-vous agriculteur aujourd'hui ? »

B. Trajectoire de l'enquêté

- Passée [*tournants importants dans la trajectoire, activités avant d'être agriculteur*]
- Future [*envies/priorités pour les 5 ans à venir, volonté de développer certains aspect(s), lequel(s) ?*]

III. Les « épeautres »

A. Consigne initiale (question ouverte)

« Vous vous intéressez à des céréales qui sont aujourd'hui très marginales. Pourquoi cet intérêt ? »

B. Motivations pour la culture des « épeautres » (et autres « céréales marginales »)

- Motivations culture « épeautres » [*agronomiques ?, écologiques ?, biodiversité ?, économiques ?, nutritionnelles ?, positionnement idéologique/politique ?, esthétique ?*]
- Motivations pour culture PE, ME et GE [*motivation ?, plus ou moins que d'autres céréales ?, plus ou moins d'intérêt pour une de ces espèces ?*]
- Caractéristiques agronomiques PE, ME et GE [*lesquelles, différences entre les trois*]
- Motivation/intérêt pour augmenter biodiversité cultivée au sein de la ferme [*si oui comment : origine nouvelles espèces/variétés, critères pour le choix d'une nouvelle variété*]
- Motivation/intérêt pour la culture d'autres « céréales marginales » [*lesquelles, pourquoi*]

- Caractéristiques de ces « céréales marginales » [agronomiques, écologiques, biodiversité, économiques, nutritionnelles, esthétiques, etc]

C. Vision de l' « épeautre » ou des « épeautres »

- Vision de l' « épeautre » ou des « épeautres » [quelle vision/définition, inclusion des trois espèces dans le terme « épeautre(s) », vision en opposition par rapport à d'autres céréales dont le blé tendre, **variétés** incluses dans cette vision et pourquoi]
- Caractérisation PE, ME et GE [caractérisation PE, caractérisation ME, caractérisation GE, préférences pour l'une ou l'autre espèce ?, pourquoi ?]
- Inclusion de l' « épeautre » ou des « épeautres » dans céréales « marginales/anciennes » [pourquoi ?, toutes les variétés ?, uniquement certains types de variétés ?]
- Intérêt pour d'autres caractéristiques attribuées aux « épeautres » [écologiques, agronomiques, transformation, nutritionnelles, autres ?]
- Intérêt pour d'autres céréales (non marginales ?) [lesquelles, pourquoi]

Quelques associations :

- Si l' « épeautre » était :
 - un souvenir ?
 - une odeur ?
 - un objet ?
 - une personne ?

IV. Projet de recherche participative

A. Intérêt participation projet de recherche participatif

- Intérêt participer projet de recherche participatif sur ces céréales [pourquoi ?]
- Participation passée dans d'autres projets de recherche participative [si oui : lesquels ?]
- Attentes d'un projet de recherche participative [lesquelles ?]
- Intérêt collaborer avec d'autres types d'acteurs (autres que scientifiques, par ex : CRBA, transformateurs, nutritionnistes, restaurateurs) dans ce projet [si oui : quels acteurs ?, et quels intérêts ?]
- Degré de participation désiré [certaines étapes en particulier, temps disponible]

B. Présentation du projet

- Présentation du projet (support : poster)
 - Contexte, problématique et objectifs globaux : enrichir diversité cultivée au sein des « blés », et l'évaluer :
 - au sein des lieux de culture (fermes)
 - en fonction de critères agronomiques, nutritionnels et gustatifs d'intérêt pour différents acteurs dont agriculteurs, nutritionnistes, etc
 - créer du lien entre différents acteurs
 - Stratégie : approche de science participative
 - Présentation des moyens disponibles : semences/variétés (CRBA, certains agriculteurs, autres ?), terrain CRBA, méthodes d'analyses (statistiques, nutritionnelles, génétiques ?)
 - Présentation des partenaires (et prestataires)
 - Discussion sur des potentielles questions de recherche à redéfinir avec agriculteurs et autres acteurs cet hiver (profils agronomique et nutritionnel définissables en fonction des espèces ?, effets des facteurs G, E et GxE sur les caractéristiques agronomiques et nutritionnelles ?, effet de l'adaptation des variétés aux environnements et aux pratiques culturelles ?, influence des différents modes de conservation *in-situ* et *ex-situ* sur l'hétérogénéité génétique des variétés ?, etc)

*Pendant cette présentation, prise en compte des remarques de l'enquêté.

C. Retours sur le projet/intérêt participation

- Remarques sur le projet [*points à ajouter/enlever, question(s) prioritaire(s) pour l'enquêté*]
- Remarques sur les partenaires
- Intérêt pour y participer [*comment : réflexions (problématiques, interprétation résultats, méthodologie, etc), sélection variétés à évaluer, proposition variété(s) à évaluer, accueil dispositif expérimental à la ferme (taille, temps à y consacrer, nombre parcelles expérimentales)*]

V. Conclusion

- Relance éventuelle sur un (ou des) opérateur(s) qui n'aurai(ent) pas été abordé(s)
- Phrase de conclusion, et échange de moyens de contact (moyen de contact préféré, mail ou téléphone, par l'enquêté)
- Retours suite aux entretiens : synthèses envoyées par mail ou par la poste et possiblement présentation/discussion lors de réunions de groupe (1 fois par an, au moins les années 2 et 3)

Enquête acteurs santé

*Demander l'accord de l'enquêté pour enregistrer l'entretien.

I. Présentation de l'entretien

- Présentation rapide de l'enquêteur
- Objectifs de l'entretien :
 - Comprendre et confronter les visions des « épeautres » de différents acteurs
 - Présenter et commencer à discuter du projet de recherche participative et à établir des partenariats
 - Précision : cet entretien sera probablement mené plusieurs fois au cours de la thèse (environ une fois par an)
 - Utilisation des données : uniquement dans le cadre de la thèse, avec accord préalable des enquêtés
- Plan de l'entretien :
 - Présentation/trajectoire de l'enquêté
 - Vision des « épeautres »
 - Présentation du projet de recherche participative
 - Entretien surtout de type semi-directif, avec quelques questions ouvertes et quelques questions d'associations

II. Présentation de l'enquêté

A. Consigne initiale (question ouverte)

« Pourquoi êtes-vous naturopathe/nutritionniste/autre aujourd'hui ? »

B. Trajectoire de l'enquêté

- Passée [*tournants importants dans la trajectoire, activités avant d'être dans le secteur de la santé*]
- Future [*envies/priorités pour les 5 ans à venir, volonté de développer certains aspect(s), lequel(s) ?*]

III. Les « épeautres »

A. Motivations pour promouvoir la consommation d' « épeautre »

- Caractéristiques nutritionnelles de l' « épeautre » [*quels composés : lipides/protéines/minéraux/etc, par rapport à quelle(s) autre(s) céréale(s) ?, potentiels effets négatifs, différences entre PE, ME et GE*]
- Bienfaits sur la santé humaine des « épeautres » [*en lien avec les caractéristiques nutritionnelles, expériences personnelles ou de connaissances, tests cliniques, bienfaits sur personnes saines et/ou malades, quelles maladies ?, quels bienfaits ?, différences entre PE, ME et GE*]
- Forme de consommation [*lesquelles : pain/pâtes/grains/etc, certaines plus recommandées que d'autres ?, fréquence, combinaisons avec d'autres aliments, consommation sous forme de farine complète/semi-complète/raffinée*]
- Origine des aliments à base d' « épeautre » conseillés [*sans importance, certains cultivateurs/distributeurs et particulier*]

B. Vision de l' « épeautre » ou des « épeautres »

- Vision de l' « épeautre » ou des « épeautres » [*quelle vision/définition, inclusion des trois espèces dans le terme « épeautre(s) », vision en opposition par rapport à d'autres céréales dont le blé tendre, variétés incluses dans cette vision et pourquoi*]
- Caractérisation PE, ME et GE (autre que nutritionnelle) [*caractérisation PE, caractérisation ME, caractérisation GE, préférences pour l'une ou l'autre espèce ?, pourquoi ?*]
- Inclusion de l' « épeautre » ou des « épeautres » dans céréales « marginales/anciennes » [*pourquoi ?, toutes les variétés ?, uniquement certains types de variétés ?*]
- Intérêt pour d'autres caractéristiques attribuées aux « épeautres » [*écologiques, agronomiques, transformation, nutritionnelles, autres ?*]
- Intérêt pour d'autres céréales [*lesquelles, à quelle fréquence, sous quelles formes, pourquoi celles-là et pas d'autres*]

Quelques associations :

- Si l' « épeautre » était :
 - un souvenir ?
 - une odeur ?
 - un objet ?
 - une personne ?

IV. Projet de recherche participative

A. Intérêt participation projet de recherche participatif

- Intérêt participer projet de recherche participatif sur ces céréales [*pourquoi ?*]
- Participation passée dans d'autres projets de recherche participative [*si oui : lesquels ?*]
- Attentes d'un projet de recherche participative [*lesquelles ?*]
- Intérêt collaborer avec d'autres types d'acteurs (autres que scientifiques, par ex : CRBA, transformateurs, agriculteurs, restaurateurs) dans ce projet [*si oui : quels acteurs ?, et quels intérêts ?*]
- Degré de participation désiré [*certaines étapes en particulier, temps disponible*]

B. Présentation du projet

- Présentation du projet (support : poster)
 - Contexte, problématique et objectifs globaux : enrichir diversité cultivée au sein des « blés », et l'évaluer :
 - au sein des lieux de culture (fermes)
 - en fonction de critères agronomiques, nutritionnels et gustatifs d'intérêt pour différents acteurs dont agriculteurs, nutritionnistes, etc
 - créer du lien entre différents acteurs
 - Stratégie : approche de science participative
 - Présentation des moyens disponibles : semences/variétés (CRBA, certains agriculteurs, autres ?), terrain CRBA, méthodes d'analyses (statistiques, nutritionnelles, génétiques ?)
 - Présentation des partenaires (et prestataires)
 - Discussion sur des potentielles questions de recherche à redéfinir avec agriculteurs et autres acteurs cet hiver (profils agronomique et nutritionnel définissables en fonction des espèces ?, effets des facteurs G, E et GxE sur les caractéristiques agronomiques et nutritionnelles ?, effet de l'adaptation des variétés aux environnements et aux pratiques culturelles ?, influence des différents modes de conservation *in-situ* et *ex-situ* sur l'hétérogénéité génétique des variétés ?, etc)

*Pendant cette présentation, prise en compte des remarques de l'enquêté.

C. Retours sur le projet/intérêt participation

- Remarques sur le projet [*points à ajouter/enlever, question(s) prioritaire(s) pour l'enquête*]
- Remarques sur les partenaires
- Intérêt pour y participer [*comment : réflexions (problématiques, interprétation résultats, méthodologie, etc), sélection variétés à évaluer, proposition variété(s) à évaluer*]

V. Conclusion

- Relance éventuelle sur un (ou des) opérateur(s) qui n'aurai(ent) pas été abordé(s) ou sur le goût de l' « épeautre »
- Phrase de conclusion, et échange de moyens de contact (moyen de contact préféré, mail ou téléphone, par l'enquête)
- Retours suite aux entretiens : synthèses envoyées par mail ou par la poste et possiblement présentation/discussion lors de réunions de groupe (1 fois par an, au moins les années 2 et 3)

Enquête distributeurs

***Demander l'accord de l'enquêté pour enregistrer l'entretien.**

I. Présentation de l'entretien

- Présentation rapide de l'enquêteur
- Objectifs de l'entretien :
 - Comprendre et confronter les visions des céréales marginales de différents acteurs
 - Présenter et commencer à discuter du projet de recherche participative et à établir des partenariats
 - Précision : cet entretien sera probablement mené plusieurs fois au cours de la thèse (environ une fois par an)
 - Utilisation des données : uniquement dans le cadre de la thèse, avec accord préalable des enquêtés
- Plan de l'entretien :
 - Présentation/trajectoire de l'enquêté
 - Vision des céréales marginales, et en particulier des PE, ME et GE
 - Présentation du projet de recherche participative
 - Entretien surtout de type semi-directif, avec quelques questions ouvertes et quelques questions d'associations (partie sur la vision des céréales marginales)

II. Présentation de l'enquêté

A. Consigne initiale (question ouverte)

« Vous dirigez aujourd'hui une entreprise de distribution de produits à base d'épeautre. Comment en êtes-vous arrivé là ? »

B. Trajectoire de l'enquêté

- Passée [*tournants importants dans la trajectoire, activités avant de monter l'entreprise, motivations pour la distribution de produits à base d'épeautre*]
- Future [*envies/priorités pour les 5 ans à venir, volonté de développer certains aspect(s), lequel(s) ?*]

***Passer à la partie D, puis revenir à B, et C**

III. Les céréales marginales

A. Consigne initiale (question ouverte)

« Vous vous intéressez à des céréales qui sont aujourd'hui très marginales. Pourquoi cet intérêt ? »

B. Vision des céréales marginales

- Vision des céréales marginales [*quelle vision/définition ?, espèces/sous-espèces/variétés incluses dans cette vision/définition, caractéristiques communes de ces céréales, nom donné à ces céréales : marginales, variétés paysannes/population, anciennes, etc*]
- Vision basée sur espèces/types ou types de variétés ou autre [*définition céréales marginales plus rapportée à certaines espèces (GE, PE, ME, etc) ou à des types de variété (population, de pays, lignée pure, etc) ou aux deux ?, pourquoi ?, variétés population de BT incluses dans définition ?, lignée pures de GE ?*]
- Préférence(s) pour une/des espèce(s) et/ou variété(s) [*laquelle/lesquelles ?, pourquoi ?, différences avec d'autres espèces/variétés ?, espèces/types moins appréciés et pourquoi ?*]

Quelques associations :

- Si une céréale marginale (l'épeautre) était :
 - un souvenir ?
 - une odeur ?
 - un objet ?
 - une personne ?

C. Vision PE, ME et GE

- Vision des « épeautres » [*quelle vision/définition*]
- Caractérisation PE, ME et GE [*caractérisation PE, caractérisation ME, caractérisation GE, préférences pour l'une ou l'autre espèce ?, pourquoi ?*]
- Inclusion de PE, ME et GE dans céréales « marginales/anciennes » [*pourquoi ?, toutes les variétés ?, uniquement certains types de variétés ?*]
- Intérêt pour d'autres caractéristiques attribuées aux céréales marginales, en particulier PE, ME et GE [*écologiques, agronomiques, transformation, nutritionnelles, autres ?*]

D. Motivations/organisation de la distribution des produits à base d'« épeautre »

- Choix du territoire pour l'installation de l'entreprise [*caractéristiques particulières, hasard*]
- Types de produits distribués [*alimentaires et lesquels ?, autres et lesquels ?*]
- Caractéristiques des produits à base d'épeautre distribués [*goût, nutritionnelles, agronomiques, prix, circuits courts, quel(s) type d'épeautre, etc*]
- Espèces d'épeautre dans ces produits [*PE, ME, GE*]
- Distribution de produits sans épeautre [*lesquels ?, selon quels critères ?*]
- Origine des produits distribués [*origine(s) de l'épeautre, lieux de transformation*]
- Fournisseurs d'épeautre français [*lesquels, où se trouvent-ils ?, coordonnées*]
- Demande [*type de clientèle, motivations des clients, évolution de la demande, pour quels produits ?, localisation de la clientèle*]

Données quantitatives :

- Nombre de salariés
- Nombre de clients

*Retour parties A et B

IV. Projet de recherche participative

A. Présentation du projet

- Présentation du projet (support : poster)
 - Contexte, problématique et objectifs globaux : enrichir diversité cultivée au sein des « blés », et l'évaluer :
 - au sein des lieux de culture (fermes)
 - en fonction de critères agronomiques, nutritionnels et gustatifs d'intérêt pour différents acteurs dont agriculteurs, nutritionnistes, etc
 - créer du lien entre différents acteurs
 - Stratégie : approche de science participative
 - Présentation des moyens disponibles : semences/variétés (CRBA, certains agriculteurs, autres ?), terrain CRBA, méthodes d'analyses (statistiques, nutritionnelles, génétiques ?)
 - Présentation des partenaires (et prestataires)
 - Discussion sur des potentielles questions de recherche à redéfinir avec agriculteurs et autres acteurs cet hiver (profils agronomique et nutritionnel définissables en fonction des espèces ?, effets des facteurs G, E et GxE sur les caractéristiques agronomiques et nutritionnelles ?, effet de l'adaptation des variétés aux environnements et aux pratiques)

culturelles ?, influence des différents modes de conservation *in-situ* et *ex-situ* sur l'hétérogénéité génétique des variétés ?, etc)

***Pendant cette présentation, prise en compte des remarques de l'enquêté.**

B. Retours sur le projet/intérêt participation

- Remarques sur le projet [*points à ajouter/enlever, question(s) prioritaire(s) pour l'enquêté*]

V. Conclusion

- Relance éventuelle sur un (ou des) opérateur(s) qui n'aurai(ent) pas été abordé(s)
- Phrase de conclusion, et échange de moyens de contact (moyen de contact préféré, mail ou téléphone, par l'enquêté)
- Retours suite aux entretiens : synthèses envoyées par mail ou par la poste et possiblement présentation/discussion lors de réunions de groupe (1 fois par an, au moins les années 2 et 3)

Analyses nutritionnelles et technologiques préliminaires

C.1 Introduction

Différents types d'analyses nutritionnelles et technologiques préliminaires (ANTP) ont été effectuées au cours de la première année de thèse, sur des échantillons récoltés en 2020 et fournis par des paysan.ne.s : des analyses profils nutritionnels globaux (principalement, des macro et micronutriments), des analyses de lipidomique assez poussées, des analyses de rhéologie. De plus, des analyses de métabolomique ont été effectuées lors de la deuxième année de thèse, sur les échantillons issus du DE mis en place sur le site du CRBA en 2020-2021. Dans cette annexe, je ne présente qu'une partie des résultats des analyses de composition en macro et micronutriments et des analyses de lipidomique. J'ai sélectionné les résultats qui me paraissaient les plus informatifs, et qui me semblaient les plus pertinents pour discuter des futures orientations du projet.

Les analyses de profils nutritionnels globaux et les analyses de lipidomique ont été réalisées sur un ensemble de six échantillons : six variétés cultivées sur un total de trois sites (tableau C.1).

Les échantillons de blés vêtus ont été préalablement décortiqués par les paysan.ne.s qui les ont fournis. Ensuite, toutes les analyses ont été faites sur des broyats de grains entiers¹.

Dans la suite de cette annexe, je présente d'abord les analyses de profils nutritionnels globaux et ensuite les analyses de lipidomique.

1. Des analyses ont également été réalisées sur différents types de farines, mais elles ne sont pas présentées ici.

TABLEAU C.1 – Echantillons d’engrain, d’amidonner, de grand épeautre et de blé tendre utilisés pour les analyses nutritionnelles et technologiques préliminaires. Les trois variétés cultivées dans la Marne ont été cultivées sur une même parcelle par Jean-Marie Gonet, membre du deuxième cercle de partenaires.

Espèce	Nom de la variété	Type de variété	Type de conservation	Année récolte semences	Informations supplémentaires	Site culture
En	<i>Mix JMG</i>	Mélange de variétés paysannes	Cultivée pendant au moins 7 ans par un paysan dans la Marne (France).	2020	Mélange de 5 variétés d’origines différentes : une ferme en Allemagne, et 4 fermes en France (dans le Val de Loire, la Champagne et l’Argonne).	Ferme dans la Marne
	<i>Petit épeautre de Provence</i>	Mélange de variétés paysannes	Multipliée pendant 3 ans en microparcelles puis cultivée 3 ans dans une ferme dans la Loire (France). Multipliée une fois en microparcelles au CRBA.	2020	Mélange de deux variétés (principalement une récupérée auprès d’un paysan dans les Alpes de Haute Provence (France) et petite quantité d’une autre obtenue par des échanges paysans.	Ferme SR (Loire)
Am	<i>Blanc</i>	Probablement variété paysanne	Multipliée pendant 5 ans en microparcelles puis cultivée 4 ans dans la Loire (France). Multipliée une fois au CRBA.	2020	Récupérée par un paysan français en Allemagne (initialement, la variété était mélangée à un autre amidonnier aux épis noirs).	Ferme SR (Loire)
GE	<i>Oberkulmer</i>	Variété historique	Cultivée pendant au moins 12 ans dans la Marne (France)	2020	Variété suisse récupérée par un paysan français en Allemagne. La variété est issue d’une sélection massale à partir d’une variété de pays suisse. Elle a été créée en 1948, enregistrée au catalogue européen (https://www.semae.fr), et utilisée dans des programmes de sélection (SIEDLER et al. 1994).	Ferme dans la Marne
BT	<i>Mix HP&DM</i>	Mélange de variétés paysannes	Cultivée pendant 10 ans dans le Rhône (France). Tous les ans, une sélection massale a été exercée pour favoriser les grains de grosse taille.	2020	Mélange d’environ 100 variétés paysannes. Certaines variétés sont issues des fermes de CD et de SR.	Ferme HP&DM (Rhône)
	<i>Mix JMG</i>	Mélange de deux variétés modernes	Variétés cultivées pendant plusieurs années dans la Marne (France) selon des pratiques de culture conventionnelles.	2020	Mélange des variétés <i>Apache</i> et <i>Energo</i> .	Ferme dans la Marne

C.2 Profils nutritionnels globaux

Nous avons commencé par effectuer des analyses de macronutriments (protéines, glucides, lipides), micronutriments (minéraux, vitamines) et autres composés d’intérêt nutritionnel (fibres alimentaires totales, composition des protéines en acides aminés et lutéine). Ces analyses exploratoires visaient à identifier de premières différences notoires entre espèces, sur lesquelles l’on pourrait s’appuyer pour orienter la suite des recherches.

En collaboration avec Laurence Mayaud (naturopathe du deuxième cercle de partenaires), nous avons énoncé plusieurs hypothèses :

- (a) Les blés vêtus contiendraient plus de protéines, lipides, minéraux, vitamines et fibres alimentaires totales que le BT.
- (b) L'En contiendrait plus de lutéine que les trois autres espèces.
- (c) Les blés vêtus auraient une composition en acides aminés différente de celle du BT, avec notamment des proportions supérieures de lysine (acide aminé essentiel, peu présent dans les céréales).

Les différents paramètres à prendre en compte ont été sélectionnés par Marie-Thérèse et Laurence Mayaud (naturopathe, faisant partie du deuxième cercle de partenaires). J'ai moi-même contribué à la préparation des échantillons (tri des impuretés, etc) et réalisé l'analyse graphique des données.

C.2.1 Méthodes

Les analyses des macronutriments, micronutriments, et autres composés ont été effectuées par un prestataire d'analyses : Mérieux NutriSciences, selon des méthodes internes à l'entreprise (tableau C.2), sur un seul réplicat technique. Pour certains paramètres, une incertitude liée à la méthode de mesure est fournie avec les résultats. Le broyage des grains entiers a également été effectué par Mérieux NutriSciences.

Les résultats fournis par Mérieux NutriSciences sont exprimés par rapport à la matière humide. A partir du taux d'humidité, je les ai rapporté à la matière sèche par le calcul suivant (V_{ms} : Valeur par rapport à la matière sèche, V_{mh} : Valeur par rapport à la matière humide, mh : matière humide en g/100 g) :

$$V_{ms} = \frac{100 \times V_{mh}}{100 - mh}$$

Tous les résultats présentés ci-dessous sont exprimés par rapport à la matière sèche.

TABLEAU C.2 – Méthodes d’analyses utilisées par Mérieux NutriSciences. (1) Les résultats fournis par Mérieux NutriSciences sont exprimés par rapport à la matière humide. (2) Certaines méthodes sont accréditées par le Comité Français d’Accréditation (COFRAC).

Description analyse	Composants	Unité (1)	Méthode	Accréditation (2)
Humidité	Humidité - matière sèche	g/100 g	Méthode Interne LAB.CH.112	Accréditée
Lipides totaux	Matière grasse totale	g/100 g	Méthode Interne LAB.CH.078	-
Azote total	Azote	g/100 g	Méthode Interne LAB.CH.136	-
Protéines	Protéines	g/100 g	Calcul - N x 6.25	-
Glucides totaux	Glucides totaux	g/100 g	Calcul	-
Acides aminés totaux	Acide aspartique - Acide glutamique - Alanine - Arginine - Cystine - Glycine - Histidine - Hydroxyproline - Isoleucine - Leucine - Lysine - Methionine - Phenylalanine - Proline - Sérine - Threonine - Tryptophane - Tyrosine - Valine	g/100 g	(ST) Méthode Interne PNTQ1339 (HPLC)	-
Fibres alimentaires totales	Fibres totales	g/100 g	Méthode Interne LAB.CH.110	Accréditée
Cendres (matières minérales)	Cendres	g/100 g	Méthode Interne LAB.CH.127	-
Calcium	Calcium	mg/100 g	Méthode Interne LAB.CH.196	Accréditée
Magnésium	Magnésium	mg/100 g	Méthode Interne LAB.CH.196	Accréditée
Phosphore	Phosphore	mg/100 g	Méthode Interne LAB.CH.196	Accréditée
Potassium	Potassium	mg/100 g	Méthode Interne LAB.CH.196	Accréditée
Fer	Fer	mg/kg	Méthode Interne LAB.CH.196	Accréditée
Zinc	Zinc	mg/kg	Méthode Interne LAB.CH.196	Accréditée
Vitamine B1 (thiamine)	Vitamine B1 (thiamine)	mg/100 g	(ST) Méthode Interne PNTA0128 (HPLC/FD)	Accréditée
Vitamine PP (B3) en acide nicotinique	Vitamine PP (B3) en acide nicotinique	mg/100 g	(ST) Méthode Interne PNTA0147 (HPLC/FD)	Accréditée
Vitamine B9 (Acide folique)	Vitamine B9 (Acide folique)	µg/kg	(ST) Méthode Interne PNTA0138 (HPLC/DAD)	Accréditée
Vitamine E (Alphatocophérol)	Vitamine E	mg/kg	(ST) Méthode Interne PNTA0145 (HPLC/FD)	Accréditée
Caroténoïdes	Luteine E161b	mg/kg	(ST) MP 2078 rev 2 2014	NA

C.2.2 Glucides, protéines et lipides

Nous nous sommes d’abord intéressé.e.s aux macronutriments : les glucides, protéines et lipides (figure C.1). En ce qui concerne les glucides, aucune différence n’est observée entre les échantillons. Pour les protéines, on observe des taux supérieurs pour l’En *Mix JMG* (18,6 g/100 g) et pour l’Am *Blanc* (10,0 g/100 g). La teneur est également plus élevée pour le GE *Oberkulmer* (15,5 g/100 g) par rapport à l’En *PE de Provence* (13,2 g/100 g) et aux deux BT (12,0 g/100 g pour le BT *Mix HP&DM* et 12,4 g/100 g pour le BT *Mix ApEn*). Enfin, les teneurs en lipides totaux sont supérieures pour les deux En (3,9 g/100 g pour l’En *Mix JMG* et 4,0 g/100 g pour l’En *PE de Provence*) par rapport à tous les autres échantillons.

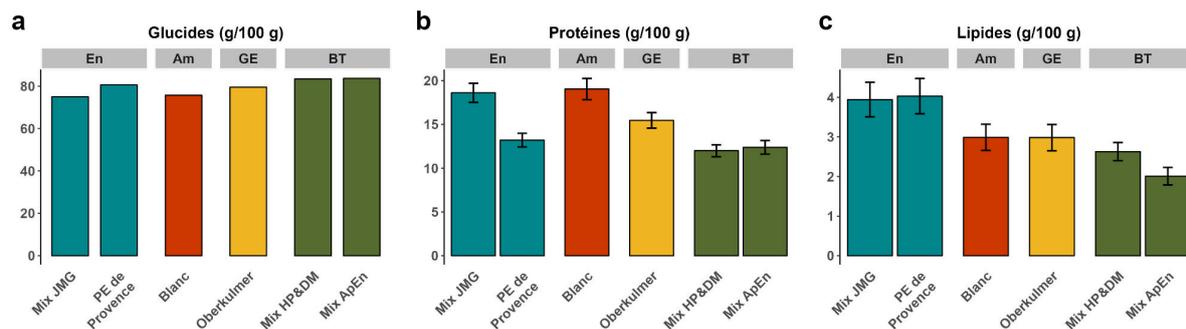


FIGURE C.1 – Teneurs en glucides, protéines et lipides, en g pour 100 g de matière sèche. Pour les protéines et lipides (panels b et c), les barres d'erreur indiquent l'incertitude liée à la méthode de mesure de Mérieux NutriSciences. Chaque espèce est représentée par une couleur : bleu pour l'engrain, rouge pour l'amidonnier, jaune pour le grand épeautre, vert pour le blé tendre.

C.2.3 Composition en acides aminés

Dans un second temps, nous avons regardé les compositions en acides aminés des protéines (figure C.2). Aucune différence évidente ne ressort parmi les six échantillons analysés.

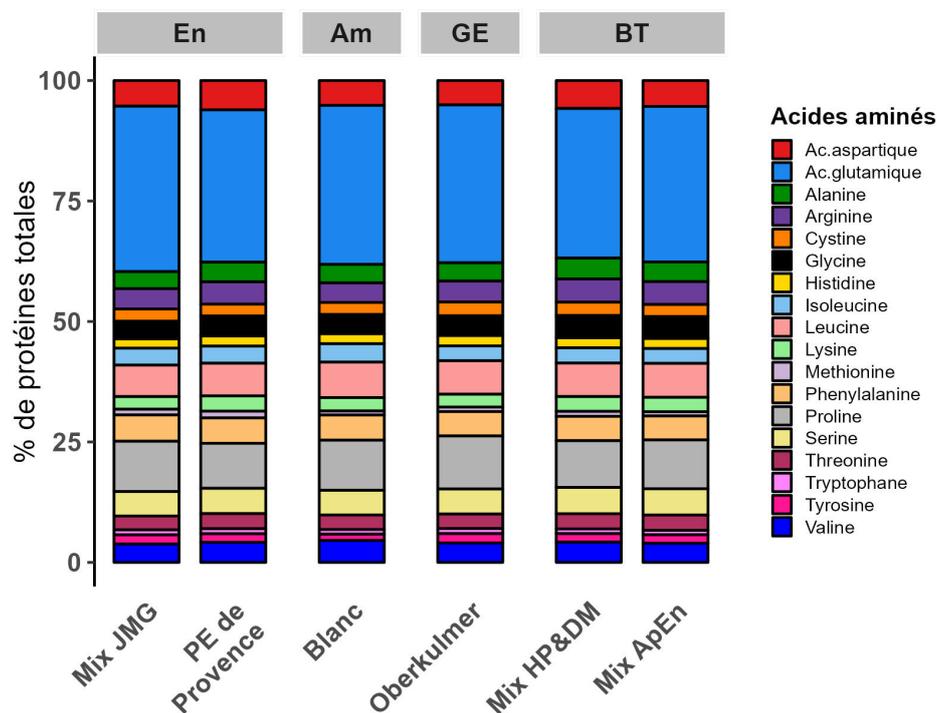


FIGURE C.2 – Composition des protéines en acides aminés (% de protéines totales).

C.2.4 Fibres alimentaires totales et cendres (minéraux)

Ensuite, nous nous sommes intéressé.e.s aux fibres alimentaires totales et aux cendres (figure C.3). Par rapport aux fibres, nous observons des taux supérieurs pour les deux variétés de BT (13,5 g/100 g pour le BT *Mix ApEn* et 15,7 g/100 g pour le BT *Mix HP&DM*). En ce qui concerne les cendres (minéraux), la teneur la plus élevée est constatée pour l'En *Mix JMG* (2,4 g/100 g).

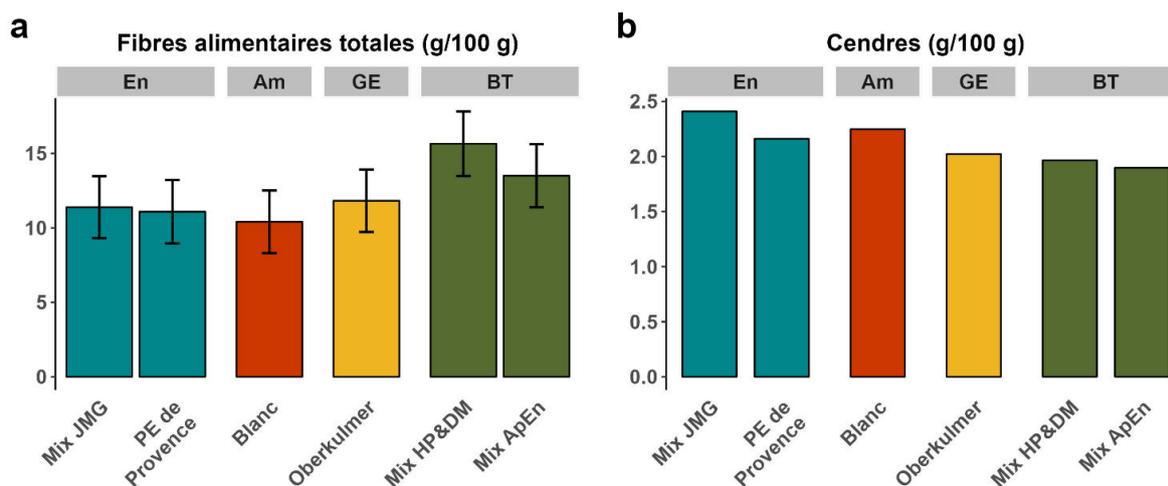


FIGURE C.3 – Teneurs en fibres alimentaires totales et minéraux (cendres), en g pour 100 g de matière sèche. Pour les fibres alimentaires totales (panel a), les barres d'erreur indiquent l'incertitude liée à la méthode de mesure de Mérieux NutriSciences. Chaque espèce est représentée par une couleur : bleu pour l'engrain, rouge pour l'amidonnié, jaune pour le grand épeautre, vert pour le blé tendre.

C.2.5 Minéraux

Au-delà de la teneur totale en minéraux (les cendres), nous avons analysé les taux de six minéraux distincts : le calcium, magnésium, phosphore, potassium, fer et zinc (figure C.4). Pour le calcium et le phosphore, les valeurs les plus élevées sont observées pour l'En *Mix JMG* (47 mg/100 g pour le calcium et 565 mg/100 g pour le phosphore). En ce qui concerne le potassium, la teneur la plus élevée est constatée pour l'En *PE de Provence* (569 mg/100 g). Enfin, pour le magnésium, le fer et le zinc les valeurs les plus hautes sont obtenues pour l'Am *Blanc* (173 mg/100 g pour le magnésium, 51 mg/kg pour le fer et 78 mg/kg pour le zinc).

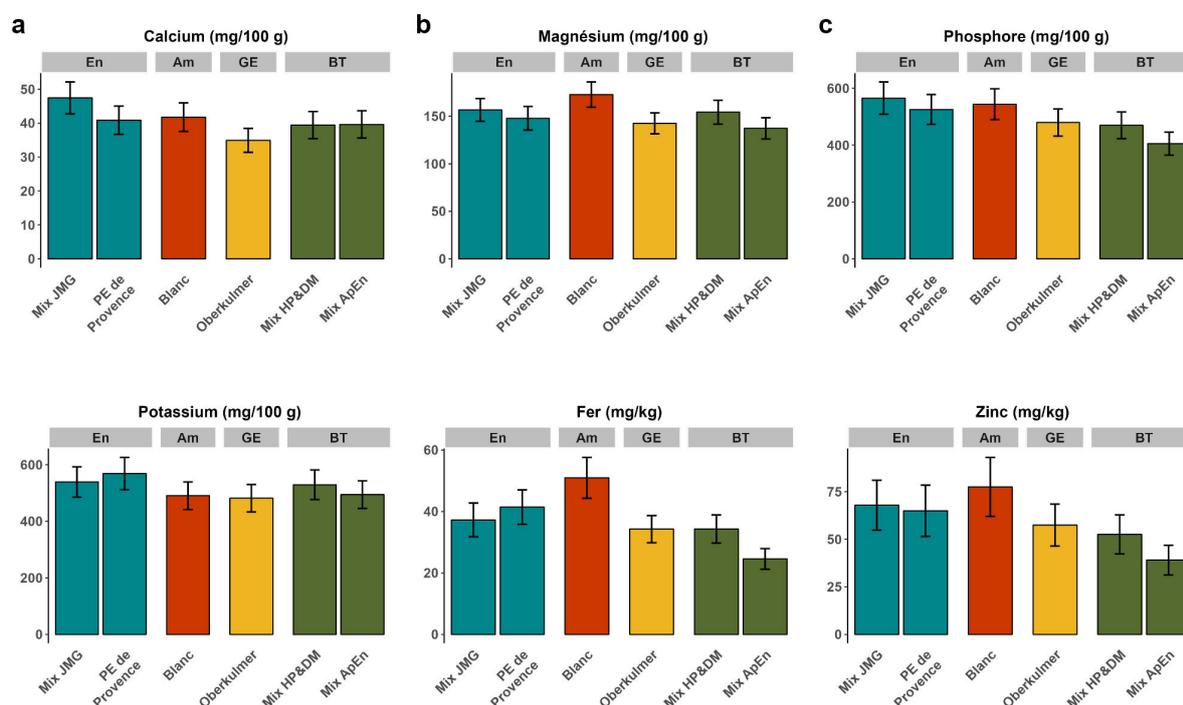


FIGURE C.4 – Teneurs en minéraux, en mg pour 100 g de matière sèche pour le calcium, magnésium, phosphore et potassium (panels a-d) et en mg par kg de matière sèche pour le fer et le zinc (panels e et f). Les barres d'erreur indiquent l'incertitude liée à la méthode de mesure de Mérieux NutriSciences. Chaque espèce est représentée par une couleur : bleu pour l'engrain, rouge pour l'amidonnier, jaune pour le grand épeautre, vert pour le blé tendre.

C.2.6 Vitamines

De plus, nous nous sommes intéressé.e.s à quatre vitamines : les vitamines B1 (thiamine), B3, B9 et E (figure C.5). En ce qui concerne la vitamine B3, on observe des teneurs supérieures pour les blés vêtus, en particulier pour les En (0,9 mg/100 g pour l'En *Mix JMG* et 1,0 mg/100 g pour l'En *PE de Provence*). Pour les trois autres vitamines, les incertitudes sont trop élevées pour effectuer des comparaisons entre échantillons.

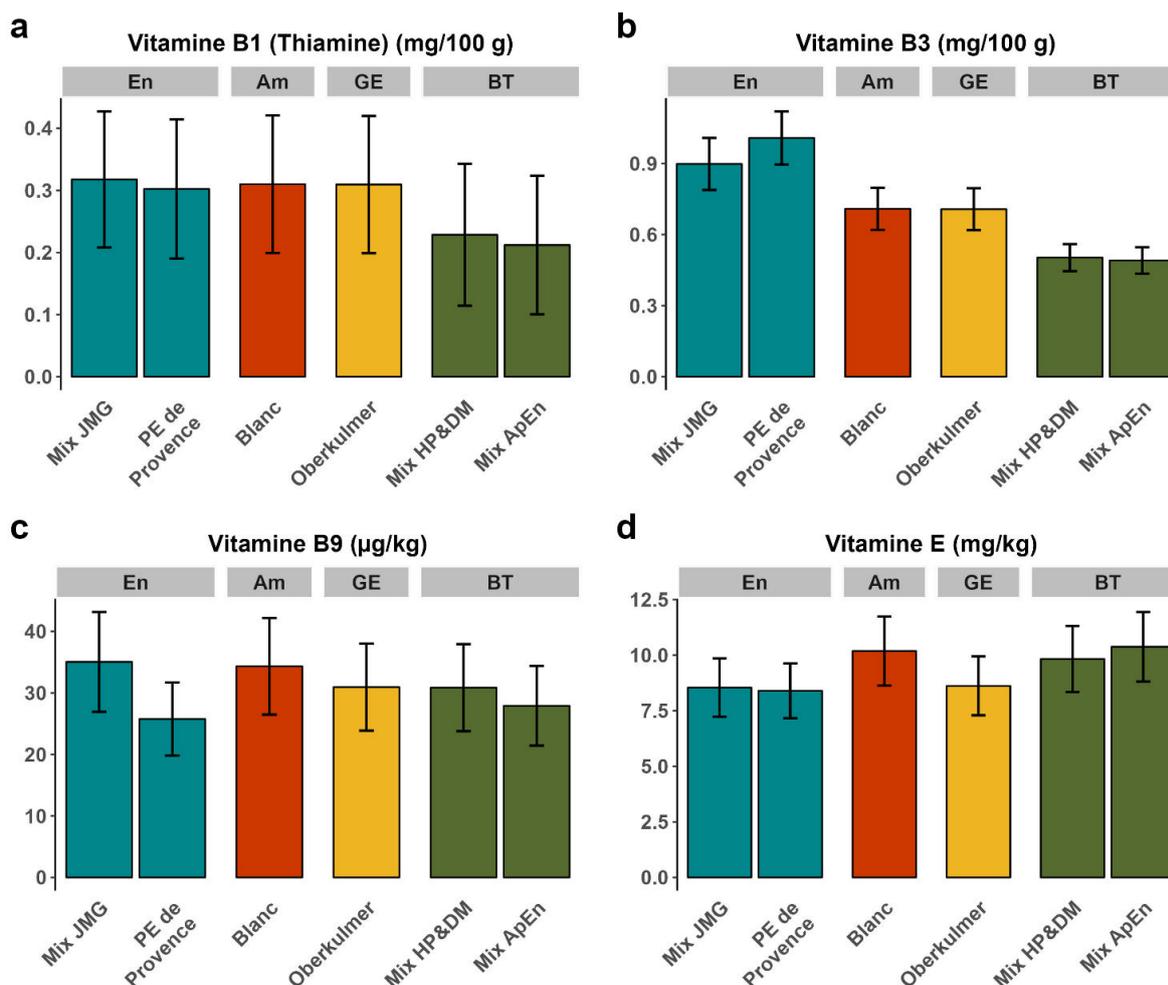


FIGURE C.5 – Teneurs en vitamine B1 (thiamine), B3, B9 et E, en mg pour 100 g de matière sèche pour les vitamines B1 et B3 (panels a et b), en µg/kg de matière sèche pour la vitamine B9 (panel c) et en mg/kg de matière sèche pour la vitamine E (panel d). Les barres d'erreur indiquent l'incertitude liée à la méthode de mesure de Mérieux NutriSciences. Chaque espèce est représentée par une couleur : bleu pour l'engrain, rouge pour l'amidonner, jaune pour le grand épeautre, vert pour le blé tendre.

C.2.7 Lutéine

Enfin, nous avons regardé les teneurs en lutéine, un caroténoïde (figure C.6). Des teneurs supérieures sont observées pour les deux variétés d'En (3,6 mg/kg pour l'En *PE de Provence* et 5,2 mg/kg pour l'En *Mix JMG*) par rapport aux autres échantillons.

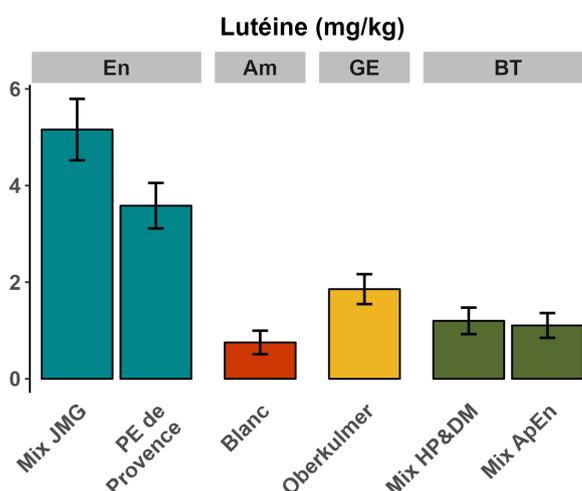


FIGURE C.6 – Teneur en lutéine en mg par kg de matière sèche. Les barres d'erreur indiquent l'incertitude liée à la méthode de mesure de Mérieux NutriSciences. Chaque espèce est représentée par une couleur : bleu pour l'engrain, rouge pour l'amidonniér, jaune pour le grand épeautre, vert pour le blé tendre.

C.2.8 Conclusion

Les analyses des profils nutritionnels globaux suggèrent certaines tendances, comme des taux de lipides et de lutéine supérieurs pour l'En (figures C.1 et C.6). Elles vont dans le sens de l'hypothèse (b), selon laquelle l'En aurait des teneurs plus importantes en lutéine par rapport aux autres espèces. Ces analyses permettent également de revoir les hypothèses (a) et (c). En effet, il semblerait que les blés vêtus n'ont pas toujours des taux de fibres alimentaires totales supérieurs à ceux du BT (figure C.3) et que les compositions des protéines en acides aminés est très similaire entre les quatre espèces étudiées (figure C.2).

Les résultats des profils nutritionnels globaux sont à prendre avec grande précaution. Le très faible nombre de variétés par espèce (une ou deux) et le fait que ces variétés n'aient pas été cultivées dans les mêmes environnements font en sorte que nous ne pouvons tirer aucune conclusion sur des caractéristiques propres aux espèces. Ce sont des analyses qui restent exploratoires.

C.3 Lipidomique

Des analyses de lipidomique ont également été réalisées. Tout comme celles des profils nutritionnels globaux, elles avaient une visée exploratoire. L'objectif était d'identifier des premières différences entre espèces, sur lesquelles les recherches pourraient être poursuivies. Dans cette annexe, je ne présente qu'une petite partie des résultats obtenus, ceux qui me paraissent les plus informatifs. J'évoque la teneur totale en lipides (acides gras totaux) la composition en classes de lipides (proportions de lipides neutres, phospholipides, acides gras libres et autres lipides), la composition en acides gras et la proportion d'acides gras insaturés.

En collaboration avec Laurence Mayaud (naturopathe du deuxième cercle de partenaires) et Nathalie Bernoud-Hubac (enseignante-chercheuse à l'Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Lyon, spécialiste en biochimie des lipides et membre du deuxième cercle de partenaires), nous avons énoncé plusieurs hypothèses :

- (a) Les blés vêtus contiendraient plus de lipides totaux que le BT.
- (b) Les blés vêtus auraient une composition en classes de lipides (lipides neutres, phospholipides, acides gras libres, autres lipides) différente de celle du BT.
- (c) Les lipides des blés vêtus auraient une composition en acides gras différente de celle du BT, avec notamment plus d'acides gras insaturés que le BT.

Les différents paramètres à prendre en compte ont été sélectionnés par Marie-Thérèse, Laurence Mayaud et Nathalie Bernoud-Hubac. La majorité du travail de laboratoire a été réalisé par Lise Pugnet (encadrée par Marie-Thérèse, Nathalie Bernoud-Hubac et moi-même) lors d'un stage de quatrième année de l'INSA, sous la supervision de Nathalie Bernoud-Hubac, Patricia Daira et Baptiste Fourmaux, du Laboratoire de Mécanique des Contacts et des Structures. J'ai moi-même contribué à la préparation des échantillons (tri des impuretés, etc.), effectué un premier essai des protocoles, et contribué à l'analyse graphique des données.

C.3.1 Méthodes

La section suivante est extraite du rapport de stage de Lise Pugno (PUGNET 2021).

C.3.1.1 Broyage et double extraction lipidique

L'objectif de cette étape est de faciliter l'extraction des lipides présents dans chaque échantillon de céréales. Un broyage de 50 grains est réalisé avec un mortier de laboratoire à température ambiante jusqu'à l'obtention d'une poudre plus ou moins fine (de 1 à 3 min selon l'échantillon). 500 mg environ de cette poudre sont ensuite pesés.

Un mix de standards internes (mix SI) est préparé pour un équivalent de sept échantillons avec les quantités indiquées dans le tableau C.3.

TABLEAU C.3 – Quantités de standards internes ajoutées par échantillon et contenues dans le mix SI (préparé pour sept échantillons). (1) Les HODE sont des lipides oxydés.

Nature du lipide	Quantité / échantillon	Quantités dans le mix
Triglycéride tri-17 :0	100 μg	700 μg
Cholestérol 3C13	10 μg	70 μg
Phosphatidylcholine 17 :0/14 :1	400 μg	2,8 μg
Phosphatidyléthanolamine 17 :0/14 :1	400 μg	2,8 μg
Acides gras libres 17 :0	60 μg	420 μg
9-HODE d4 (1)	400 μg	2,8 μg
13-HODE d4 (1)	400 μg	2,8 μg

Aux 500 mg de broyat, sont ajoutés 3 mL d'EtOH, 6 mL de CHCl_3 , 1/7 du mix SI, 90 μL de BHT de concentration 5.10^{-3} M et 1 mL d'eau distillée. Le tube est bien vortexé puis centrifugé deux fois 5 min à 4000 rpm. La phase organique inférieure est récupérée et mise à évaporer sous azote. En parallèle, une deuxième extraction est réalisée avec l'ajout de 6 mL de CHCl_3 , 3 mL d'EtOH ainsi que d'eau pour compléter le tube. Les deux phases organiques obtenues sont rassemblées et évaporées sous azote. Ensuite, le culot obtenu est repris par 200 μL de $\text{CHCl}_3/\text{EtOH}$ (2 :1, v/v). Le tube est vortexé pendant une minute. 10 μL sont prélevés et déposés dans un nouveau tube « Ltot » pour le dosage des acides gras des lipides totaux et les 190 μL restants sont déposés sur une colonne SPE (Solid Phase Extraction) pour la séparation des lipides.

C.3.1.2 Séparation par extraction en phase solide

L'objectif de cette étape est de séparer différents types de lipides selon leur polarité, en vue de les analyser ensuite indépendamment. Des colonnes SPE NH2 6CC (500MG) WATERS sont utilisées. La colonne est conditionnée par 8 mL d'hexane pestipur puis les 190 μ L restants de l'échantillon sont déposés sur la colonne. Trois fractions différentes sont récupérées : - Les lipides neutres, élués par 20 mL de CHCl₃ - Les acides gras libres et les lipides oxydés (HODEs), élués par 5 mL d'éther diéthylique/acide acétique (98 :2) - Les phospholipides, élués par 2,5 mL de MeOH/CHCl₃ (6 :1, v/v) puis 2,5 mL de sodium acétate à 0,05 M dans du MeOH/CHCl₃ (6 :1, v/v)

C.3.1.3 Traitement des fractions

Lipides neutres : La fraction des lipides neutres est évaporée sous azote et reprise par 200 μ L de CHCl₃/EtOH (2 :1, v/v). 40 μ L sont prélevés et déposés dans un nouveau tube « stérols », évaporés sous azote et repris par 100 μ L BSTFA/TMCS 1% pour le dosage des stérols. La réaction est laissée toute la nuit à température ambiante puis l'échantillon est conservé à 4°C. Les 160 μ L restants sont utilisés pour le dosage des acides gras des lipides neutres (tube « LN »).

Acides gras libres/Lipides oxydés (HODEs) : La fraction est séparée en deux (environ 2,5 mL dans chaque tube) après ajout de 200 μ L de MeOH contenant 10% de glycérol dans un des tubes au préalable. Le tube « HODEs » contenant le glycérol est utilisé pour l'analyse des HODEs, l'autre pour les acides gras libres (tube « AGL »).

Phospholipides : La fraction des phospholipides est évaporée sous azote et reprise par 200 μ L de CHCl₃/EtOH (2 :1, v/v). 20 μ L sont prélevés et mis dans un nouveau tube « PLtot » pour le dosage des acides gras des phospholipides totaux. 40 μ L sont prélevés et déposés dans un nouveau tube « PL-LC » pour le dosage des classes de phospholipides.

C.3.1.4 Dérivation/transésterification par le méthanol

L'objectif de cette étape est de transformer les acides gras en dérivés volatils aptes à être analysés par chromatographie gazeuse.

Les échantillons de lipides totaux, lipides neutres, acides gras libres et phospholipides totaux

sont évaporés sous azote puis repris par 250 μL de toluène/MeOH (1 :1, v/v) et 250 μL de BF₃/MeOH à 14%. Les tubes sont fermés sous azote, vortexés et portés à 100°C dans un bain sec pendant 1h30. Les échantillons sont mis dans la glace et additionnés d'1,5 mL de K₂CO₃ à 10% dans l'eau distillée et 2 mL d'isooctane pestipur. Ils sont ensuite vortexés et centrifugés à 800 g pendant 5 min pour récupérer délicatement la phase organique supérieure contenant les acides gras. Il ne faut surtout pas prélever de phase aqueuse : d'une part pour ne pas abîmer la colonne de chromatographie ; d'autre part car cela rendrait le chromatogramme inexploitable.

C.3.1.5 Injection en chromatographie gazeuse couplée à un détecteur à ionisation de flamme

Les fractions lipides totaux, lipides neutres, acides gras libres et phospholipides totaux sont évaporées sous azote après dérivation et reprises par les volumes d'isooctane pestipur indiqués tableau C.4 pour injection en chromatographie gazeuse couplée à un détecteur à ionisation de flamme (GC-FID).

TABLEAU C.4 – Volumes d'injection en chromatographie gazeuse couplée à un détecteur à ionisation de flamme (isooctane pestipur) pour chaque classe lipidique.

Classe lipidique	Volume d'isooctane (μL)
Lipides totaux	500
Lipides neutres	5000
Acides gras libres	200
Phospholipides	200 ou 150 (selon le réplikat)

C.3.2 Lipides totaux et composition en types de lipides

Nous nous sommes d'abord intéressé.e.s à la teneur en acides gras totaux (figure C.7). Des teneurs plus élevées sont observées pour les deux variétés d'En (82 nmol/mg pour En *PE de Provence* et 83 nmol/mg pour l'En *Mix JMG*), ce qui confirme les résultats obtenus par Mérieux NutriSciences.

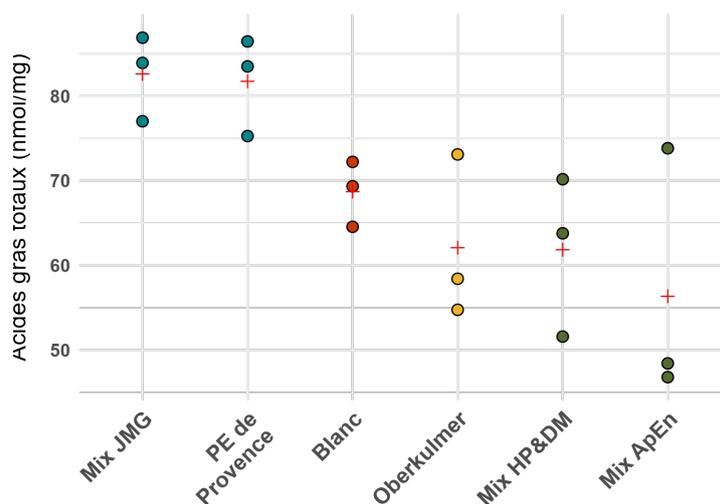


FIGURE C.7 – Teneurs en acides gras totaux (nmol/mg). Les croix rouges représentent la valeur moyenne des triplicats pour chaque échantillon. Les cercles indiquent les valeurs de chacun des triplicats. Chaque espèce est représentée par une couleur : bleu pour l'en grain, rouge pour l'ami-donnier, jaune pour le grand épeautre, vert pour le blé tendre.

Ensuite, nous avons regardé la composition en différentes classes de lipides (figure C.8). Les lipides neutres sont majoritaires au sein de tous les échantillons. Leur proportion varie entre 53% pour le BT *Mix ApEn* et 72% pour l'En *PE de Provence*. La proportion de cette classe de lipides semble plus élevée chez les En et le GE *Oberkulmer* que chez l'Am *Blanc* et les deux BT.

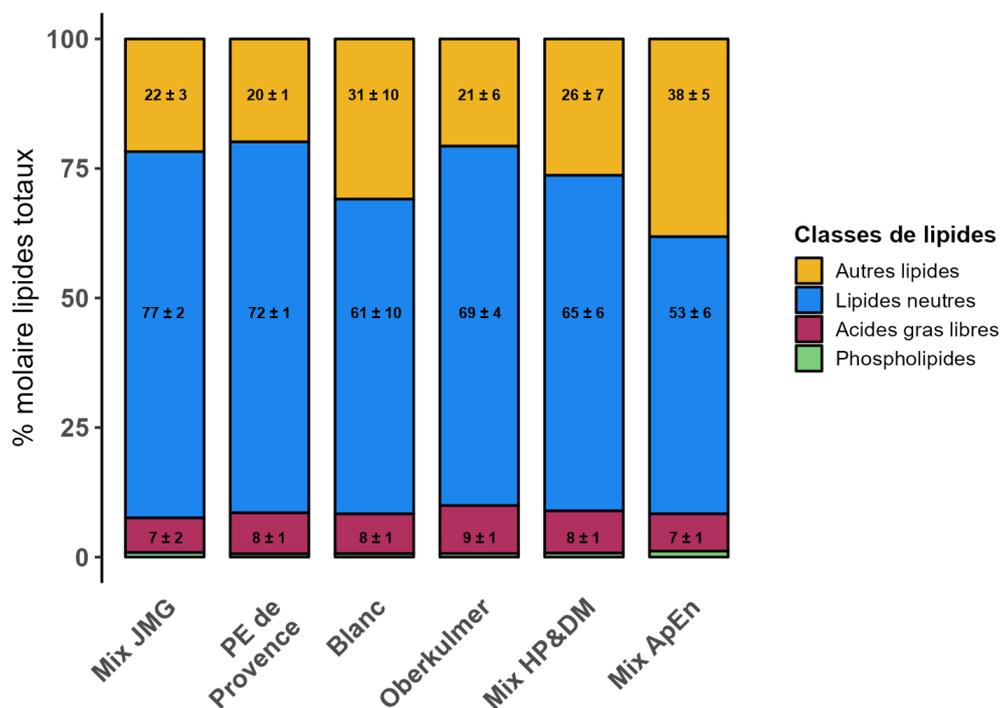


FIGURE C.8 – Proportion des différentes classes de lipides (% molaire de lipides totaux). Les valeurs moyennes et les écarts-types sont indiqués pour les lipides neutres, les acides gras libres et les autres lipides.

C.3.3 Composition en acides gras

La composition en acides gras des lipides totaux a également été analysée (figure C.9). Tous les blés vêtus semblent contenir plus d'acide oléique que d'acide palmitique, alors que le BT semble contenir plus d'acide palmitique que d'acide oléique. Par ailleurs, l'Am *Blanc* semble contenir moins d'acide linoléique (34%), un acide gras polyinsaturé (plus précisément, Oméga-6) essentiel (devant être apporté par l'alimentation).

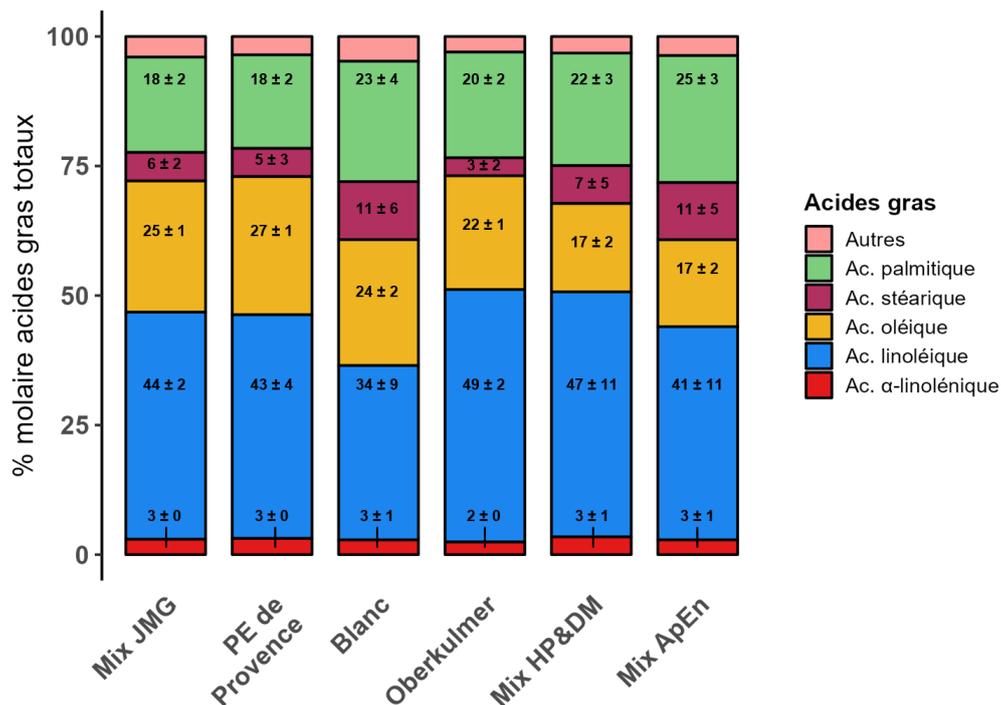


FIGURE C.9 – Proportion de différents acides gras (% molaire des acides gras totaux). Les valeurs moyennes et les écarts-types sont indiqués pour tous les acides gras.

C.3.4 Acides gras insaturés

Enfin, nous nous sommes intéressé.e.s aux acides gras insaturés (figure C.10). Nous n’observons pas de différence notable entre les échantillons. De plus, on constate des différences fortes entre valeurs des triplicats pour certains échantillons (par exemple, l’Am *Blanc*).

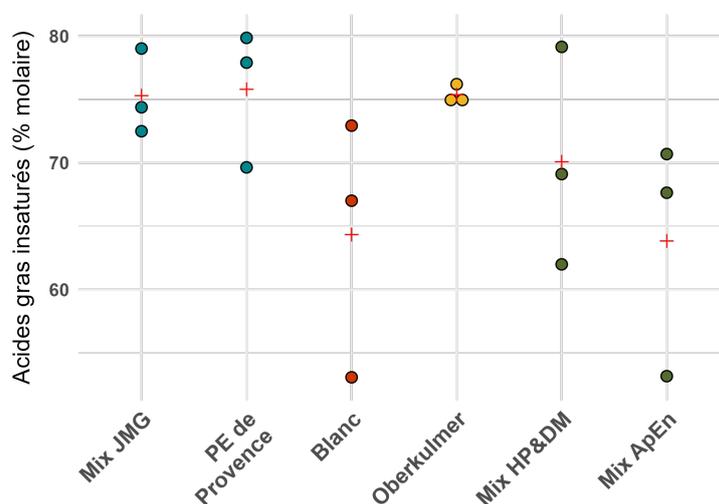


FIGURE C.10 – Proportion d’acides gras insaturés(% molaire des acides gras totaux). Chaque espèce est représentée par une couleur : bleu pour l’engrain, rouge pour l’amidonier, jaune pour le grand épeautre, vert pour le blé tendre.

C.3.5 Conclusion

Les analyses de lipidomique suggèrent des taux de lipides supérieurs pour l’En (figure C.7), ce qui va dans le sens de l’hypothèse (a). Elles suggèrent aussi une proportion de lipides neutres plus élevées pour les deux variétés d’En et le GE *Oberkulmer*. Enfin, en ce qui concerne la composition en acides gras, il semblerait que les blés vêtus, à l’inverse du BT, ont plus d’acide oléique que d’acide palmitique (figure C.9). Ceci irait dans le sens de l’hypothèse (c). Aucune différence n’a été observée entre les échantillons concernant la proportion d’acides gras insaturés (figure C.10).

Les résultats de ces analyses lipidomiques sont à prendre avec grande précaution. Le très faible nombre de variétés par espèce (une ou deux) et le fait que ces variétés n’aient pas été cultivées dans les mêmes environnements font en sorte que nous ne pouvons tirer aucune conclusion sur des caractéristiques propres aux espèces. Ce sont des analyses qui restent exploratoires.

C.4 Bibliographie

- PUGNET, L. (2021). *Etude de l'effet de la mouture sur le profil lipidique d'une céréale d'intérêt : l'épeautre*.
Rapport de stage de quatrième année.
- SIEDLER, H., M. MESSMER, G. SCHACHERMAYR, H. WINZELER, M. WINZELER et B. KELLER (1994).
« Genetic diversity in European wheat and spelt breeding material based on RFLP data ». In :
Theoretical and Applied Genetics 88, p. 994-1003. DOI : [10.1007/BF00220807](https://doi.org/10.1007/BF00220807).

Charte de fonctionnement

Charte de fonctionnement 2021-2022

Entre partenaires paysan.ne.s et chercheur.euse.s

PROJET

Projet de recherche collaborative sur les blés vêtus

Article 1 – Objet :

Le projet de recherche collaborative sur les blés vêtus vise à évaluer des variétés d'en grain, d'amidonnié et de grand épeautre (blés vêtus), ainsi que des variétés population de blé tendre, selon des critères agronomiques et nutritionnels.

Il s'appuie sur une méthodologie de recherche collaborative, associant notamment paysan.ne.s et chercheur.euse.s.

Cette charte définit les modalités de fonctionnement entre paysan.ne.s et chercheur.euse.s impliqué.e.s dans le projet pour l'année 2021-2022. Elle pourra évoluer lors des prochaines années.

Article 2 – Engagement des paysan.ne.s :

Les paysan.ne.s sont partenaires du projet de recherche, tout comme les chercheur.euse.s (aussi porteur.euse.s du projet), le CRBA¹, et certain.e.s naturopathes.

Ils.elles s'engagent à participer aux réunions (réunion annuelle) et aux échanges (mails, appels) concernant le projet.

Un engagement plus conséquent sur un an (une année de culture) est demandé à ceux.celles qui accueillent un dispositif expérimental à la ferme. Ils.elles s'engagent à :

- Participer à la définition des dispositifs expérimentaux (échanges par mail et téléphone)
- Mettre en place le dispositif sur lequel un accord aura été trouvé (les taille et complexité des dispositifs seront adaptées selon les contraintes de chacun.ne). Les paysan.ne.s sont propriétaires de la récolte sur les parcelles expérimentales, mais s'engagent à fournir une partie de semences à l'équipe de recherche pour des mesures agronomiques et analyses nutritionnelles en laboratoire²
- Effectuer des notations sur les parcelles de leur ferme lors de 4 périodes du cycle de culture (automne, hiver, printemps, été)³
- Accueillir ponctuellement des chercheur.euse.s (Sofia Correa + stagiaires) sur leur ferme, afin que ceux.celles-ci effectuent des notations sur leurs parcelles/bandes

¹ Conservatoire de Ressources de Botanique Appliquée

² La quantité de semences nécessaire dépendra des analyses prévues, et sera précisée dès qu'elle est connue. Ces semences seront achetées aux paysan.ne.s.

³ Les fiches de notations seront co-construites lors d'une prochaine réunion, en prenant appui sur des fiches pré-existantes utilisées dans des projets de recherche et sélection participative sur des variétés population de blé tendre (Isabelle Goldringer). Le temps passé pour chaque série de notations est inférieur à une demi-journée pour l'ensemble des bandes/micro-parcelles.

Article 3 – Engagement des chercheur.euse.s :

Les chercheur.euse.s sont à la fois partenaires, porteur.euse.s et animateur.trice.s du projet de recherche. Ils.elles s'engagent à :

- Impliquer les paysan.ne.s dans la définition/évolution des questions de recherche, dans l'élaboration des protocoles et dans l'analyse/interprétation/diffusion des résultats
- Restituer les résultats des expérimentations/analyses (agronomiques et nutritionnelles) et organiser des moments d'échange sur ceux-ci
- Dédommager financièrement les paysan.ne.s pour le temps et les moyens consacrés au projet de recherche (participation aux réunions, entretiens, temps passé pour faire les semis et notations, achat de semences, etc). Les montants du dédommagement seront calculés selon les grilles de l'ITAB⁴ (environ 100 euros pour une demi-journée)⁵

Concernant les dispositifs expérimentaux à la ferme, les chercheur.euse.s s'engagent à :

- Adapter les dispositifs aux mieux selon les contraintes de chacun (taille, nombre de bandes ou de parcelles, etc)
- Assurer un suivi lors des notations, notamment avec l'aide d'étudiants
- Faire des notations plus conséquentes avant et après la récolte (les chercheur.euse.s viendront eux.elles-mêmes faire des notations sur chaque ferme avant la récolte, et récupéreront des épis afin de faire d'autres analyses post-récolte)
- Lors des visites à la ferme, être assurées en cas d'accident ou de dommage matériel (personnellement + responsabilité civile)

⁴ Institut de l'Agriculture et de l'Alimentation Biologiques

⁵ Le financement pour ce dédommagement est assuré pour l'année 2021. Pour l'année 2022, une reconduction sera demandée, et les chercheur.euse.s informeront les paysan.ne.s de la confirmation de cette reconduction.

Fiches de suivi utilisées par les paysan.ne.s

Deux types de fiches de suivi ont été utilisées : des fiches d'observation des parcelles expérimentales et de fiches relatives au climat. Pour l'automne, l'hiver et l'été, une fiche de chaque type a été proposée. Pour le printemps, nous avons employé une fiche climat et trois fiches d'observations distinctes.

Ces fiches ont été modifiées à partir de fiches de suivi utilisées dans le cadre du projet national de sélection participative sur BT conduit par le RSP et l'équipe DEAP de l'UMR GQE (INRAE).

A remplir pendant le stade de levée

Variété + répétition (bloc)	Date d'observation	Levée : avancement	Levée : régularité	Commentaires
		<input type="checkbox"/> Lente <input type="checkbox"/> Intermédiaire <input type="checkbox"/> Rapide	<input type="checkbox"/> Irrégulière <input type="checkbox"/> Intermédiaire <input type="checkbox"/> Régulière	
		<input type="checkbox"/> Lente <input type="checkbox"/> Intermédiaire <input type="checkbox"/> Rapide	<input type="checkbox"/> Irrégulière <input type="checkbox"/> Intermédiaire <input type="checkbox"/> Régulière	
		<input type="checkbox"/> Lente <input type="checkbox"/> Intermédiaire <input type="checkbox"/> Rapide	<input type="checkbox"/> Irrégulière <input type="checkbox"/> Intermédiaire <input type="checkbox"/> Régulière	
		<input type="checkbox"/> Lente <input type="checkbox"/> Intermédiaire <input type="checkbox"/> Rapide	<input type="checkbox"/> Irrégulière <input type="checkbox"/> Intermédiaire <input type="checkbox"/> Régulière	
		<input type="checkbox"/> Lente <input type="checkbox"/> Intermédiaire <input type="checkbox"/> Rapide	<input type="checkbox"/> Irrégulière <input type="checkbox"/> Intermédiaire <input type="checkbox"/> Régulière	

A remplir pendant le stade de tallage

Variété + répétition (bloc)	Date d'observation	Note globale	Densité de peuplement (plantes/m ²)	Port au tallage	Commentaires
		<input type="checkbox"/> 0 : moche <input type="checkbox"/> 1 : plutôt moche <input type="checkbox"/> 2 : intermédiaire <input type="checkbox"/> 3 : belle <input type="checkbox"/> 4 : très belle	<input type="checkbox"/> 0 à 100 <input type="checkbox"/> 100 à 200 <input type="checkbox"/> 200 à 300 <input type="checkbox"/> 300 à 400 <input type="checkbox"/> > 400	<input type="checkbox"/> étalé <input type="checkbox"/> Intermédiaire <input type="checkbox"/> dressé	
		<input type="checkbox"/> 0 : moche <input type="checkbox"/> 1 : plutôt moche <input type="checkbox"/> 2 : intermédiaire <input type="checkbox"/> 3 : belle <input type="checkbox"/> 4 : très belle	<input type="checkbox"/> 0 à 100 <input type="checkbox"/> 100 à 200 <input type="checkbox"/> 200 à 300 <input type="checkbox"/> 300 à 400 <input type="checkbox"/> > 400	<input type="checkbox"/> étalé <input type="checkbox"/> Intermédiaire <input type="checkbox"/> dressé	
		<input type="checkbox"/> 0 : moche <input type="checkbox"/> 1 : plutôt moche <input type="checkbox"/> 2 : intermédiaire <input type="checkbox"/> 3 : belle <input type="checkbox"/> 4 : très belle	<input type="checkbox"/> 0 à 100 <input type="checkbox"/> 100 à 200 <input type="checkbox"/> 200 à 300 <input type="checkbox"/> 300 à 400 <input type="checkbox"/> > 400	<input type="checkbox"/> étalé <input type="checkbox"/> Intermédiaire <input type="checkbox"/> dressé	
		<input type="checkbox"/> 0 : moche <input type="checkbox"/> 1 : plutôt moche <input type="checkbox"/> 2 : intermédiaire <input type="checkbox"/> 3 : belle <input type="checkbox"/> 4 : très belle	<input type="checkbox"/> 0 à 100 <input type="checkbox"/> 100 à 200 <input type="checkbox"/> 200 à 300 <input type="checkbox"/> 300 à 400 <input type="checkbox"/> > 400	<input type="checkbox"/> étalé <input type="checkbox"/> Intermédiaire <input type="checkbox"/> dressé	

A remplir 1 seule fois aux stades fin de tallage ou début de montaison

Variété + répétition (bloc)	Date d'observation	Note globale	Tallage	Couleur	Adventices (quantité et type)	Commentaires
		<input type="checkbox"/> 0 : moche <input type="checkbox"/> 1 : plutôt moche <input type="checkbox"/> 2 : intermédiaire <input type="checkbox"/> 3 : belle <input type="checkbox"/> 4 : très belle	<input type="checkbox"/> faible <input type="checkbox"/> moyen <input type="checkbox"/> fort	<input type="checkbox"/> vert pâle <input type="checkbox"/> vert clair <input type="checkbox"/> vert foncé <input type="checkbox"/> autre :		
		<input type="checkbox"/> 0 : moche <input type="checkbox"/> 1 : plutôt moche <input type="checkbox"/> 2 : intermédiaire <input type="checkbox"/> 3 : belle <input type="checkbox"/> 4 : très belle	<input type="checkbox"/> faible <input type="checkbox"/> moyen <input type="checkbox"/> fort	<input type="checkbox"/> vert pâle <input type="checkbox"/> vert clair <input type="checkbox"/> vert foncé <input type="checkbox"/> autre :		
		<input type="checkbox"/> 0 : moche <input type="checkbox"/> 1 : plutôt moche <input type="checkbox"/> 2 : intermédiaire <input type="checkbox"/> 3 : belle <input type="checkbox"/> 4 : très belle	<input type="checkbox"/> faible <input type="checkbox"/> moyen <input type="checkbox"/> fort	<input type="checkbox"/> vert pâle <input type="checkbox"/> vert clair <input type="checkbox"/> vert foncé <input type="checkbox"/> autre :		
		<input type="checkbox"/> 0 : moche <input type="checkbox"/> 1 : plutôt moche <input type="checkbox"/> 2 : intermédiaire <input type="checkbox"/> 3 : belle <input type="checkbox"/> 4 : très belle	<input type="checkbox"/> faible <input type="checkbox"/> moyen <input type="checkbox"/> fort	<input type="checkbox"/> vert pâle <input type="checkbox"/> vert clair <input type="checkbox"/> vert foncé <input type="checkbox"/> autre :		

A remplir 1 à 4 fois autour du stade épiaison

Variété + répétition (bloc)	Date d'observation	Note globale	Epiaison	Maladies	Commentaires
		<input type="checkbox"/> 0 : moche <input type="checkbox"/> 1 : plutôt moche <input type="checkbox"/> 2 : intermédiaire <input type="checkbox"/> 3 : belle <input type="checkbox"/> 4 : très belle	<input type="checkbox"/> 0% épis <input type="checkbox"/> 0% à 50% épis <input type="checkbox"/> 50% à 100% épis <input type="checkbox"/> 100% épis	<input type="checkbox"/> sain <input type="checkbox"/> malade <input type="checkbox"/> très malade	
		<input type="checkbox"/> 0 : moche <input type="checkbox"/> 1 : plutôt moche <input type="checkbox"/> 2 : intermédiaire <input type="checkbox"/> 3 : belle <input type="checkbox"/> 4 : très belle	<input type="checkbox"/> 0% épis <input type="checkbox"/> 0% à 50% épis <input type="checkbox"/> 50% à 100% épis <input type="checkbox"/> 100% épis	<input type="checkbox"/> sain <input type="checkbox"/> malade <input type="checkbox"/> très malade	
		<input type="checkbox"/> 0 : moche <input type="checkbox"/> 1 : plutôt moche <input type="checkbox"/> 2 : intermédiaire <input type="checkbox"/> 3 : belle <input type="checkbox"/> 4 : très belle	<input type="checkbox"/> 0% épis <input type="checkbox"/> 0% à 50% épis <input type="checkbox"/> 50% à 100% épis <input type="checkbox"/> 100% épis	<input type="checkbox"/> sain <input type="checkbox"/> malade <input type="checkbox"/> très malade	
		<input type="checkbox"/> 0 : moche <input type="checkbox"/> 1 : plutôt moche <input type="checkbox"/> 2 : intermédiaire <input type="checkbox"/> 3 : belle <input type="checkbox"/> 4 : très belle	<input type="checkbox"/> 0% épis <input type="checkbox"/> 0% à 50% épis <input type="checkbox"/> 50% à 100% épis <input type="checkbox"/> 100% épis	<input type="checkbox"/> sain <input type="checkbox"/> malade <input type="checkbox"/> très malade	
		<input type="checkbox"/> 0 : moche <input type="checkbox"/> 1 : plutôt moche <input type="checkbox"/> 2 : intermédiaire <input type="checkbox"/> 3 : belle <input type="checkbox"/> 4 : très belle	<input type="checkbox"/> 0% épis <input type="checkbox"/> 0% à 50% épis <input type="checkbox"/> 50% à 100% épis <input type="checkbox"/> 100% épis	<input type="checkbox"/> sain <input type="checkbox"/> malade <input type="checkbox"/> très malade	
		<input type="checkbox"/> 0 : moche <input type="checkbox"/> 1 : plutôt moche <input type="checkbox"/> 2 : intermédiaire <input type="checkbox"/> 3 : belle <input type="checkbox"/> 4 : très belle	<input type="checkbox"/> 0% épis <input type="checkbox"/> 0% à 50% épis <input type="checkbox"/> 50% à 100% épis <input type="checkbox"/> 100% épis	<input type="checkbox"/> sain <input type="checkbox"/> malade <input type="checkbox"/> très malade	
		<input type="checkbox"/> 0 : moche <input type="checkbox"/> 1 : plutôt moche <input type="checkbox"/> 2 : intermédiaire <input type="checkbox"/> 3 : belle <input type="checkbox"/> 4 : très belle	<input type="checkbox"/> 0% épis <input type="checkbox"/> 0% à 50% épis <input type="checkbox"/> 50% à 100% épis <input type="checkbox"/> 100% épis	<input type="checkbox"/> sain <input type="checkbox"/> malade <input type="checkbox"/> très malade	
		<input type="checkbox"/> 0 : moche <input type="checkbox"/> 1 : plutôt moche <input type="checkbox"/> 2 : intermédiaire <input type="checkbox"/> 3 : belle <input type="checkbox"/> 4 : très belle	<input type="checkbox"/> 0% épis <input type="checkbox"/> 0% à 50% épis <input type="checkbox"/> 50% à 100% épis <input type="checkbox"/> 100% épis	<input type="checkbox"/> sain <input type="checkbox"/> malade <input type="checkbox"/> très malade	

Epiaison = 50% épi sorti de la gaine



Epi épié

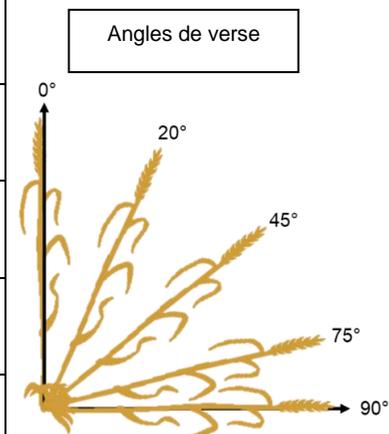
Source : ITAB

FICHE OBSERVATIONS 3 - Printemps

Nom :

A remplir 1 à 4 fois (notamment après un épisode de verse)

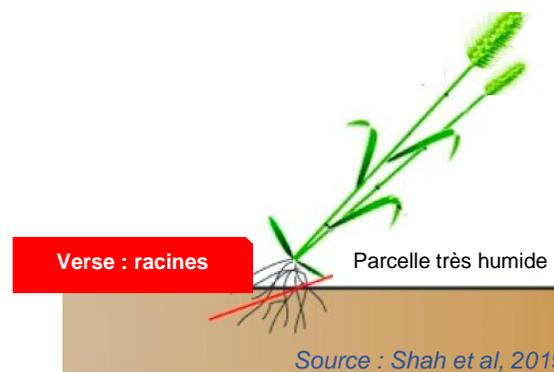
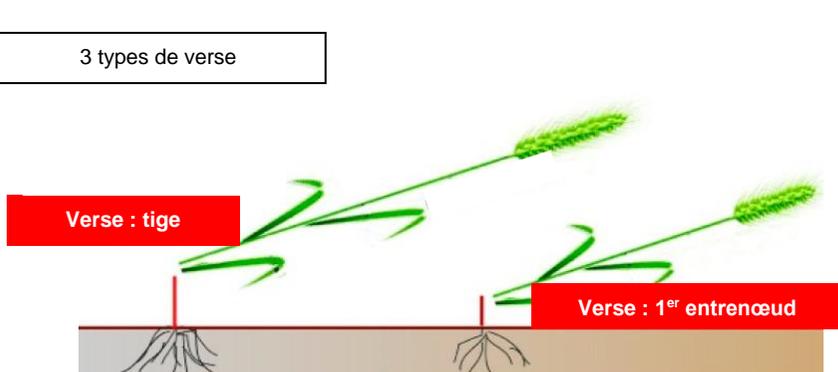
Variété + répétition (bloc)	Date d'observation	Verse	Type verse	Commentaires
		% plantes à 0° – 45° : % plantes à 45°– 75° : % plantes à 75°– 90° :	<input type="checkbox"/> racines <input type="checkbox"/> 1 ^{er} entrenœud <input type="checkbox"/> tige	
		% plantes à 0° – 45° : % plantes à 45°– 75° : % plantes à 75°– 90° :	<input type="checkbox"/> racines <input type="checkbox"/> 1 ^{er} entrenœud <input type="checkbox"/> tige	
		% plantes à 0° – 45° : % plantes à 45°– 75° : % plantes à 75°– 90° :	<input type="checkbox"/> racines <input type="checkbox"/> 1 ^{er} entrenœud <input type="checkbox"/> tige	
		% plantes à 0° – 45° : % plantes à 45°– 75° : % plantes à 75°– 90° :	<input type="checkbox"/> racines <input type="checkbox"/> 1 ^{er} entrenœud <input type="checkbox"/> tige	
		% plantes à 0° – 45° : % plantes à 45°– 75° : % plantes à 75°– 90° :	<input type="checkbox"/> racines <input type="checkbox"/> 1 ^{er} entrenœud <input type="checkbox"/> tige	
		% plantes à 0° – 45° : % plantes à 45°– 75° : % plantes à 75°– 90° :	<input type="checkbox"/> racines <input type="checkbox"/> 1 ^{er} entrenœud <input type="checkbox"/> tige	
		% plantes à 0° – 45° : % plantes à 45°– 75° : % plantes à 75°– 90° :	<input type="checkbox"/> racines <input type="checkbox"/> 1 ^{er} entrenœud <input type="checkbox"/> tige	
		% plantes à 0° – 45° : % plantes à 45°– 75° : % plantes à 75°– 90° :	<input type="checkbox"/> racines <input type="checkbox"/> 1 ^{er} entrenœud <input type="checkbox"/> tige	



368

ANNEXE E. FICHES DE SUIVI UTILISÉES PAR LES PAYSAN.NES

3 types de verse

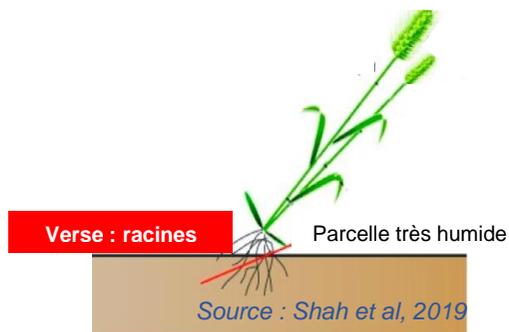
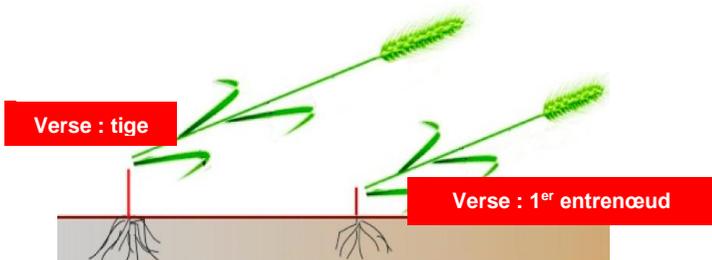


A remplir lors de la récolte

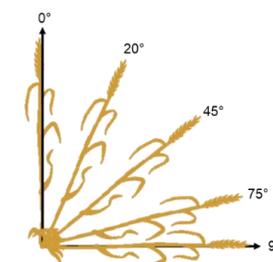
Variété + répétition (bloc)	Date de récolte	Verse	Type verse	Santé	Masse grains récoltés (g) <i>Préciser s'il s'agit de grains décortiqués !!</i>	Commentaires
		% plantes à 0° – 45° : % plantes à 45°– 75° : % plantes à 75°– 90° :	<input type="checkbox"/> racines <input type="checkbox"/> 1 ^{er} entrenœud <input type="checkbox"/> tige	<input type="checkbox"/> très bonne (aucun pb visible) <input type="checkbox"/> bonne <input type="checkbox"/> intermédiaire <input type="checkbox"/> mauvaise <input type="checkbox"/> très mauvaise		
		% plantes à 0° – 45° : % plantes à 45°– 75° : % plantes à 75°– 90° :	<input type="checkbox"/> racines <input type="checkbox"/> 1 ^{er} entrenœud <input type="checkbox"/> tige	<input type="checkbox"/> très bonne (aucun pb visible) <input type="checkbox"/> bonne <input type="checkbox"/> intermédiaire <input type="checkbox"/> mauvaise <input type="checkbox"/> très mauvaise		
		% plantes à 0° – 45° : % plantes à 45°– 75° : % plantes à 75°– 90° :	<input type="checkbox"/> racines <input type="checkbox"/> 1 ^{er} entrenœud <input type="checkbox"/> tige	<input type="checkbox"/> très bonne (aucun pb visible) <input type="checkbox"/> bonne <input type="checkbox"/> intermédiaire <input type="checkbox"/> mauvaise <input type="checkbox"/> très mauvaise		
		% plantes à 0° – 45° : % plantes à 45°– 75° : % plantes à 75°– 90° :	<input type="checkbox"/> racines <input type="checkbox"/> 1 ^{er} entrenœud <input type="checkbox"/> tige	<input type="checkbox"/> très bonne (aucun pb visible) <input type="checkbox"/> bonne <input type="checkbox"/> intermédiaire <input type="checkbox"/> mauvaise <input type="checkbox"/> très mauvaise		

369

3 types de verse



Angles de verse



Fiche « Automne » 2021

A retourner à Sofia Correa

Informations générales sur la parcelle 2021/2022

Nom :

Prénom :

L'idéal est que toutes les variétés aient le même itinéraire technique. Cependant, si des informations sont différentes pour certaines variétés, merci de l'indiquer.

Nom de la parcelle :

Taille de la parcelle :

Taille des micro-parcelles ou bandes :

Espace entre les microparcelles ou bandes :

Topographie : Pente → si oui : < 3% de 3 à 10% > 10%
 Plateau
 Plaine

Type de sol : limons argiles argilo-calcaire sableux
 autre :

Sol : séchant intermédiaire hydromorphe

Battance : oui non

Drainage : oui non

Informations complémentaires :

.....
.....
.....
.....
.....

Informations générales sur le semis 2021/2022

Si les informations sont différentes pour certaines variétés, merci de l'indiquer.

Labour avant semis : oui non

Traitement des graines avant semis (carie) : oui non

Si oui, préciser quel traitement a été fait :

.....

Date de semis :

Méthode de semis : volée semoir

Nombre de grains au m² :

Levée : lente rapide et régulière irrégulière

Précédent cultural :

Informations complémentaires :

.....

.....

.....

.....

.....

Plan des micro-parcelles ou bandes 2021/2022

Merci d'indiquer le Nord, une route à proximité, un point de repère particulier.

Lors du semis, un plan vous a été proposé. Il est reproduit ci-dessous. Si vous ne l'avez pas suivi ou que vous l'avez modifié, merci de bien vouloir le modifier voir de le redessiner ! Nous avons besoin du plan de l'essai pour créer les fiches suivantes et vous simplifier la tâche lors des prochaines mesures et observations.

Informations générales sur le climat : Automne 2021/2022

Pluies (par rapport aux normales saisonnières) :

excès normales faibles

Températures (par rapport aux normales saisonnières) :

froides moyennes chaudes

Accidents climatiques (grêle, gel, orage, inondation, neige...) :

.....

Accidents sur la culture (sanglier, gibiers...) :

.....

.....

.....

.....

Informations complémentaires :

.....

.....

.....

.....

.....

Merci de retourner toutes ces informations dans l'enveloppe fournie.

Fiche « Hiver » 2021

A retourner à Sofia Correa

Informations générales sur le climat 2021/2022

Nom :

Prénom :

Pluies (par rapport aux normales saisonnières) :

faibles

normales

excès

Températures (par rapport aux normales saisonnières) :

froides

normales

chaudes

Accidents climatiques (grêle, gel, orage, inondation, neige, etc) :

.....
.....
.....
.....
.....

Accidents sur la culture (sanglier, etc) :

.....
.....
.....
.....
.....

Informations complémentaires :

.....
.....
.....
.....
.....

Merci de retourner toutes ces informations dans l'enveloppe fournie.

Fiche « Printemps » 2022

A retourner à Sofia Correa

Informations générales sur le climat 2022

Nom :

Prénom :

Pluies (par rapport aux normales saisonnières) :

faibles

normales

excès

Températures (par rapport aux normales saisonnières) :

froides

normales

chaudes

Accidents climatiques (grêle, gel, orage, inondation, neige, etc) :

.....
.....
.....
.....
.....

Accidents sur la culture (sanglier, etc) :

.....
.....
.....
.....
.....

Informations complémentaires :

.....
.....
.....
.....
.....

Merci de retourner toutes ces informations dans l'enveloppe fournie.

Fiche « Eté » 2022

A retourner à Sofia Correa

Informations générales sur le climat 2022

Nom :

Prénom :

Pluies (par rapport aux normales saisonnières) :

faibles

normales

excès

Températures (par rapport aux normales saisonnières) :

froides

normales

chaudes

Accidents climatiques (grêle, gel, orage, inondation, neige, etc) :

.....
.....
.....
.....
.....

Accidents sur la culture (sanglier, etc) :

.....
.....
.....
.....
.....

Informations complémentaires :

.....
.....
.....
.....
.....

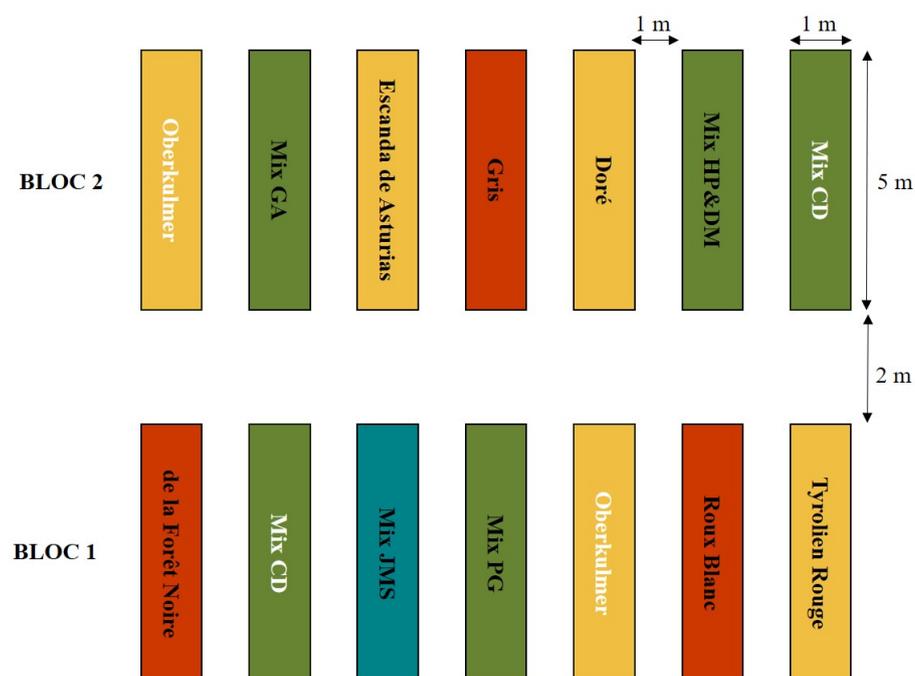
Merci de retourner toutes ces informations dans l'enveloppe fournie.

Crédit : RSP/INRA. Fiche « climat été » utilisée dans le programme de sélection participative du RSP sur les céréales. Fiche sous licence CC BY NC SA.

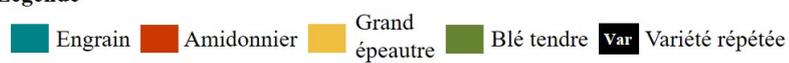


Dispositifs expérimentaux dans les fermes

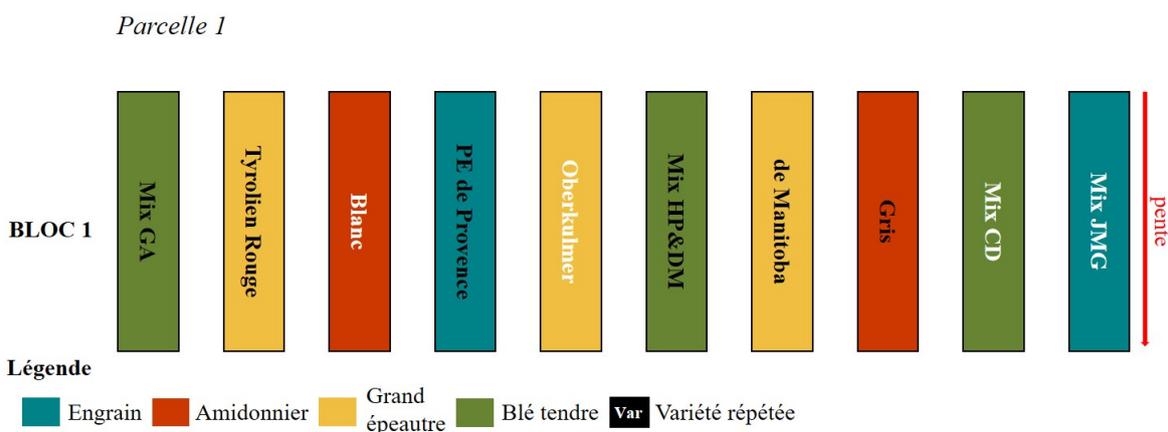
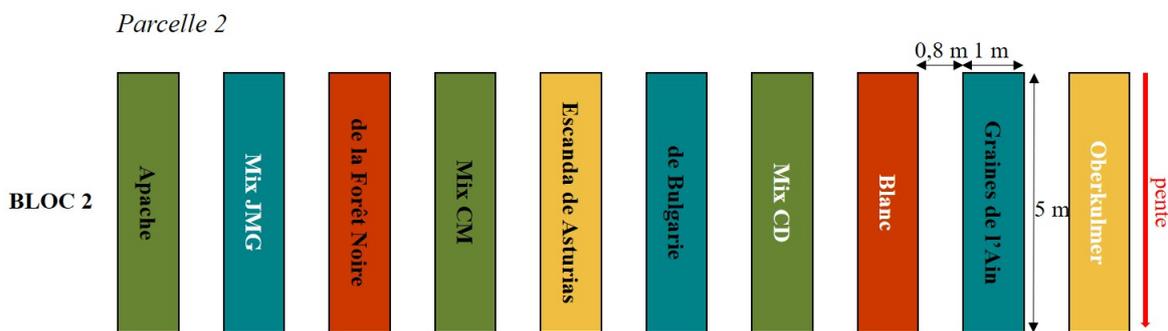
Ferme CD



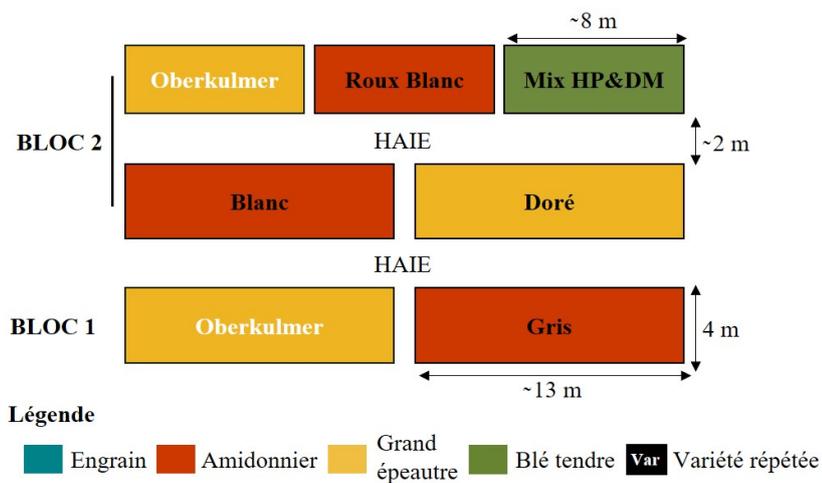
Légende



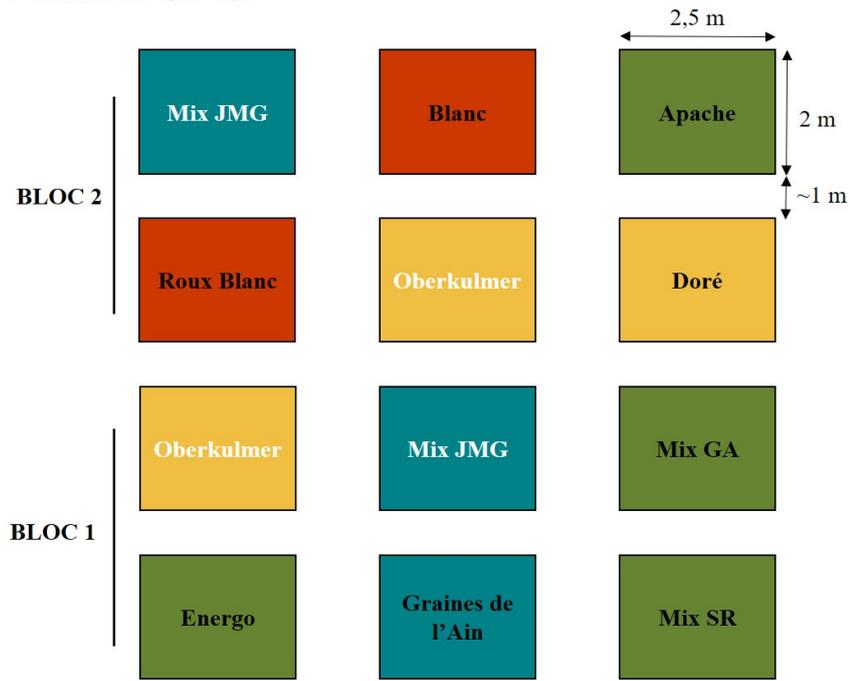
Ferme CM



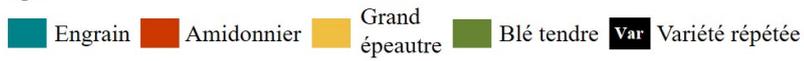
Ferme HP&DM



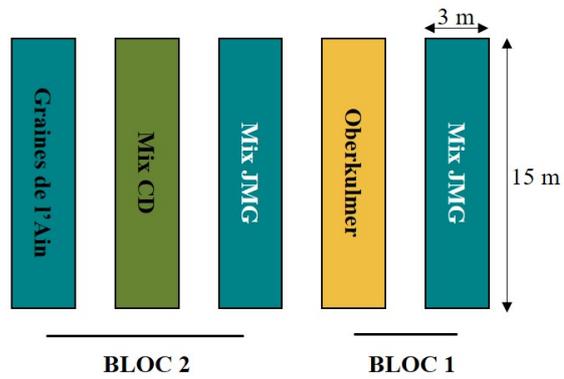
Ferme JPC



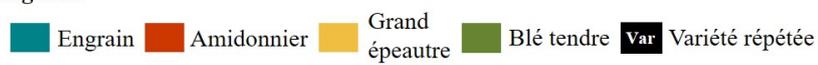
Légende



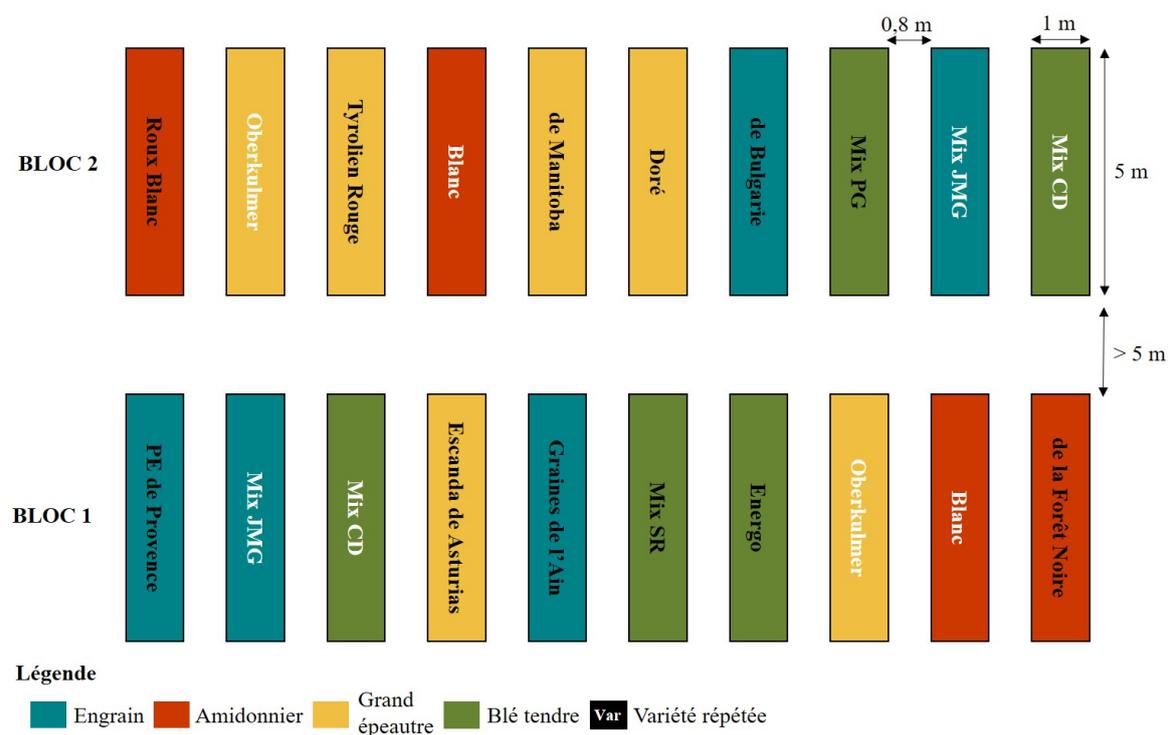
Ferme MPR&PB



Légende



Ferme SR



Résumé

Dans un contexte de crise socio-écologique remettant en question la capacité du système agricole industriel à garantir la sécurité alimentaire et une alimentation de qualité, l'agroécologie émerge comme une alternative de plus en plus crédible. Un des majeurs fondements réside dans la réintroduction de biodiversité cultivée dans les systèmes agro-alimentaires.

Cette thèse s'intéresse à trois espèces de blés marginales, appelées « blés vêtus » : l'engrain, l'amidonnier et le grand épeautre. Elle vise à évaluer leur viabilité agronomique, ainsi que leur qualité nutritionnelle, en particulier la composition en protéines du gluten. Située en région lyonnaise, cette recherche adopte une approche participative. Elle répond ainsi à deux autres principes de l'agroécologie : la relocalisation des systèmes alimentaires et le décloisonnement de la recherche en dehors de la sphère académique.

Au cours de la thèse, nous avons évalué 23 variétés de blés vêtus en comparaison à huit variétés de blé tendre, en collaboration avec un centre de ressources botaniques, une association paysanne et six paysan.ne.s. Il en résulte que l'engrain se distingue des trois autres espèces sur le plan agronomique et sur la composition du gluten. Cette espèce est notamment caractérisée par un potentiel de tallage et une teneur en protéines élevées, et par de faibles proportions de gluténines. L'étude révèle également une forte variabilité intra-spécifique, en particulier pour les variétés d'amidonnier, soulignant l'intérêt de ces espèces comme sources de diversité. Enfin, l'évaluation réalisée au cours de la thèse a permis d'identifier des variétés présentant des caractéristiques notables, tant au niveau agronomique que concernant la composition des protéines du gluten.

Au-delà des résultats d'évaluation des variétés, cette thèse propose une analyse réflexive du processus de recherche participatif. Elle identifie les forces et les limites de l'approche menée, et suggère des pistes d'amélioration.

En conclusion, cette thèse pose les bases pour la poursuite du projet d'évaluation des blés vêtus, tant du point de vue de la méthodologie d'évaluation que de l'approche participative.