université PARIS-SACLAY

Impacts de l'environnement sur les pratiques de sélection paysanne et le comportement des variétés qui en résultent

Impact of the environment on farmers' breeding practices and the resulting varietal behaviour

Thèse de doctorat de l'université Paris-Saclay

Ecole doctorale n° 567 Sciences du végétal : du gène à l'écosystème (SEVE)
Spécialité de doctorat : Agronomie
Graduate School : Biosphera. Référent : Faculté des sciences d'Orsay

Thèse préparée dans l'unité de recherche **GQE Le-Moulon** (Université Paris-Saclay, INRAE, CNRS, AgroParisTech), sous la direction d'**Isabelle GOLDRINGER**, directrice de recherche et le co-encadrement d'**Arnaud GAUFFRETEAU**, ingénieur de recherche

Thèse soutenue à Paris-Saclay, le 3 juin 2024, par

Michel TURBET DELOF

Composition du jury

Membres du jury avec voix délibérative

Hervé MONOD Directeur de recherche, INRAE, UR MaIAGE, Université Paris-Saclay	Président
Nadine ANDIREU Chercheuse HDR, CIRAD, UMR Innovation, Université Montpellier	Rapportrice & Examinatrice
Jacques DAVID Professeur Institut AGRO, UMR AGAP, Université Montpellier	Rapporteur & Examinateur
Cyril FIRMAT Chargé de recherche, INRAE, Université Toulouse	Examinateur

THESE DE DOCTORAT
NNT : 2024UPASB016

université PARIS-SACLAY

ÉCOLE DOCTORALE
Sciences du végétal : du gène à l'écosystème (SEVE)

Titre : Impacts de l'environnement sur les pratiques de sélection paysanne et le comportement des variétés qui en résultent

Mots clés : recherche participative, pratiques de sélection paysanne, diagnostic agronomique, expérimentation à la ferme, évaluation de réseaux d'essais, statistiques bayésiennes

Résumé : L'adaptation des variétés à la diversité des environnements pédo-climatiques ainsi qu'aux usages des agriculteur.rices est un enjeu majeur pour la transition agroécologique des systèmes agricoles. Pour favoriser cette adaptation au contexte local, la sélection paysanne propose de gérer et de sélectionner localement les variétés.

Ma thèse vise à mieux comprendre l'insertion des pratiques de sélection paysanne du blé tendre dans les systèmes de production ainsi qu'à mettre en lien les réponses des variétés paysannes issues de ses pratiques avec des facteurs liés aux environnements de culture. Pour répondre à ces objectifs, j'ai mené une recherche participative impliquant dix paysans, quatre animateur.rices de maisons de semence paysanne et une chercheuse. Ces partenaires ont conduit 29 expérimentations en France et en Belgique en 2022 et/ou 2023 qui ont donné lieu à la collecte de données qualifiant les variétés testées (composantes du rendement, stades phénologiques...) et l'environnement de culture (sol, climat...). Des enquêtes semi-directives auprès des dix paysans ont été menées pour étudier les pratiques de sélection paysannes.

Dans le premier axe de la thèse, nous avons décrit les pratiques de sélection paysanne et cherché à comprendre comment elles s'intègrent dans les systèmes de production. Nous avons identifié 20 pratiques de sélection paysanne, correspondant à deux grandes logiques : une logique de sélection visant à identifier dans la diversité existante, les variétés les mieux adaptées au contexte de la ferme et une logique de création active d'une nouvelle diversité (par des mélanges ou croisements) suivie d'une sélection pour l'adaptation au contexte de la ferme. Nous avons également montré les fortes interactions entre les pratiques de sélection et les autres pratiques agricoles ainsi que le rôle central de l'expérimentation pour mettre à l'épreuve les variétés à la fois sur des critères agronomiques et de valorisation.

Le deuxième axe visait à mieux comprendre les facteurs d'adaptation des variétés à leur environnement de culture. Pour cela, nous avons procédé en 2 étapes. (1) Pour identifier les facteurs environnementaux impactant la production du blé dans chaque essai, nous avons proposé une démarche de diagnostic agronomique participatif qui combine le diagnostic interne de l'expérimentateur.rice et le diagnostic externe de l'équipe de recherche. Cette méthode nous a permis d'identifier les stress spécifiques à chacun des 29 essais et les stress les plus fréquents à l'échelle du réseau d'essais comme le manque d'azote, le déficit hydrique entre épi 1cm et floraison (principalement en 2022) ou la pression adventice (principalement en 2023). (2) Nous avons ensuite pu tester la validité d'une dizaine d'hypothèses sur l'adaptation des variétés paysannes à certains environnements de culture et stress qui s'y expriment.

Enfin le dernier axe consistait à développer et utiliser à l'échelle du réseau d'essais des modèles statistiques bayésiens, plus robustes pour des réseaux très déséquilibrés, visant à expliquer une part de l'interaction génotype-environnement (régression de Finlay-Wilkinson et régression factorielle). La comparaison entre modèles par validation croisée a permis de sélectionner les modèles les plus prédictifs. Ces modèles appliqués aux données expérimentales, ont permis de quantifier l'impact de certains stress sur les réseaux d'essai ainsi que la sensibilité des variétés à ces stress et de compléter l'analyse issue des diagnostics agronomiques participatifs.

Ce travail de recherche s'inscrit dans une logique de recherche-action participative tenant compte autant que possible du contexte spécifique des systèmes de production et s'appuyant fortement sur les savoirs locaux des agriculteur.rices. Il peut contribuer à légitimer certaines pratiques agricoles, notamment de sélection paysanne et montre leur intérêt pour la transition agroécologique.

Title : Impact of the environment on farmers' breeding practices and the resulting varietal behaviour
Keywords : participatory research, farmers' breeding practices, agronomic diagnosis, on-farm experimentation, multi trials evaluation, bayesian statistics

Abstract : Adapting varieties to the diversity of soil and climate environments, as well as to farmers' uses, is a major challenge for the agroecological transition of agricultural systems. To promote this adaptation to the local context, farmer breeding proposes to manage and select varieties locally.

My thesis aims to gain a better understanding of how farmers' selection practices for soft wheat fit into production systems, and to link the responses of farmers' varieties derived from these practices to factors linked to growing environments. To meet these objectives, I carried out participatory research involving ten farmers, four organizers of farmers' seed houses and a researcher. These partners conducted 29 experiments in France and Belgium in 2022 and/or 2023, collecting data on the varieties tested (yield components, phenological stages, etc.) and the growing environment (soil, climate, etc.). Semi-directive surveys of ten farmers were carried out to study their breeding practices.

In the first part of the thesis, we described farmer selection practices and sought to understand how they fit into production systems. We have identified 20 farmer selection practices, corresponding to two main logics : a selection logic aimed at identifying, within existing diversity, the varieties best adapted to the farm context, and a logic of active creation of new diversity (through mixtures or crosses) followed by selection for adaptation to the farm context. We also demonstrated the strong interactions between breeding practices and other agricultural practices, and the central role of experimentation in testing varieties on both agronomic and value criteria. The second aim was to gain a better understanding of the factors involved in adapting varieties to their growing environment. To achieve this, we proceeded in 2 stages : (1) To identify the environmental factors impacting wheat production in each trial, we proposed a participatory agronomic diagnosis approach combining the experimenter's internal diagnosis and the research team's external diagnosis. This method enabled us to identify stresses specific to each of the 29 trials, as well as the most frequent stresses across the trial network, such as lack of nitrogen, water deficit between ear 1cm and flowering (mainly in 2022) or weed pressure (mainly in 2023). (2) We were then able to test the validity of ten or so hypotheses on the adaptation of farmers' varieties to certain growing environments and the stresses associated with them.

Finally, the last axis consisted in developing and using Bayesian statistical models, more robust for highly unbalanced networks, to explain part of the genotype-environment interaction (Finlay-Wilkinson regression and factorial regression). Cross-validation comparisons between models enabled us to select the most predictive models. By applying these models to experimental data, we were able to quantify the impact of certain stresses on the trial networks, as well as the sensitivity of varieties to these stresses, and complete the analysis based on participatory agronomic diagnoses.

This research is part of a participatory action-research approach, taking into account as much as possible the specific context of production systems and relying heavily on farmers' local knowledge. It can help to legitimize certain agricultural practices, notably farmer selection, and demonstrate their relevance to the agro-ecological transition.

Table des matières

I Introduction générale **11**
I. 1 Transitions agroécologiques et pratiques agricoles 11
I. 1.1 Agroécologie : agronomie et écologie 12
I. 1.2 Dimension sociale de l'agroécologie. 13
I. 1.3 Comment décrire les pratiques agricoles 17
I. 2 Sélection des plantes et agriculture 24
I. 2.1 Agroécologie et sélection des plantes 24
I. 2.2 L'évolution d'une variété diversifiée au cours des générations . . 28
I. 2.3 Le blé et son histoire évolutive 32
I. 2.4 Le programme de sélection participative du blé tendre 37
I. 3 L'expérimentation agronomique et l'expérimentation à la ferme. 38
I. 3.1 Principes de l'expérimentation au champ selon Henin 38
I. 3.2 L'expérimentation par les agriculteur.rices 41
I. 3.3 L'expérimentation comparative et méthodes statistiques. 42
I. 4 Questions de recherche et organisation du manuscrit 51
I. 5 Parcours et positionnement de thèse 52
I. 5.1 Parcours 52
I. 5.2 Positionnement de thèse 52

II Construction du fonctionnement collectif **57**
II. 1 Création du groupe collaborant à l'étude 57
II. 2 Les variétés et le dispositif expérimental co-construit 59
II. 2.1 Les variétés à l'étude 59
II. 2.2 Les dispositifs expérimentaux 61
II. 3 Mise en place du fonctionnement du groupe 64
II. 3.1 Animation collective 64
II. 3.2 Dynamiques bilatérales 66

III Insertion des pratiques de sélection paysanne dans les systèmes de production **68**
III. 1 Introduction 68
III. 2 Matériel et méthodes 70
III. 2.1 Le cadre général 70
III. 2.2 Application du cadre général 73
III. 3 Résultats et discussion 75
III. 3.1 Présentation des systèmes de production 75

III. 3.2 Analyse des pratiques de sélection paysanne du blé 82
III. 3.3 Analyse des interdépendances entre les pratiques de sélection paysanne du blé et l'environnement de production 100
III. 4 Conclusion du chapitre III 111

IV Diagnostics agronomiques participatifs des essais de variétés paysannes 115
IV. 1 Introduction 115
IV. 2 Matériels et méthodes 118
IV. 2.1 Principe du diagnostic agronomique participatif 118
IV. 2.2 Mesures, notations qualitatives et indicateurs 123
IV. 2.3 La réalisation des rapports en vue des entretiens 132
IV. 2.4 Traitement statistique des données à l'échelle de la microparcelle ou du quadrat 135
IV. 2.5 Analyse du contenu des diagnostics hybrides 138
IV. 3 Résultats et discussion 139
IV. 3.1 Présentation des résultats qui ont été interprétés durant le diagnostic hybride. 139
IV. 3.2 Résultats issus des diagnostics hybrides 144
IV. 3.3 Vérifications des hypothèses sur l'adaptation des variétés 155
IV. 4 Conclusion du chapitre IV 160

V Modélisation statistique du comportement de variétés paysannes dans un réseau d'essais à la ferme 163
V. 1 Introduction 163
V. 2 Caractériser de la performance et la stabilité des variétés sur un réseau d'essais à la ferme par un modèle de régression de FW 166
V. 3 Matériel et méthodes de l'analyse des données expérimentales 167
V. 3.1 Les données 167
V. 3.2 Les modèles 168
V. 3.3 Implémentation des postériors 171
V. 3.4 Comparaison des modèles 173
V. 3.5 Évaluation des variétés 173
V. 4 Résultats et discussion 174
V. 4.1 Comparaison des modèles 174
V. 4.2 Évaluation de la réponse des variétés 179
V. 5 Conclusion du chapitre V 189

VI Discussion générale 191
VI. 1 Une vision intégrée de la sélection des plantes à la ferme 191
VI. 2 Différentes approches de l'environnement des variétés paysannes 193
VI. 3 Liens entre les pratiques de sélection paysanne et l'expérimentation . . 196
VI. 4 Retour sur la méthode 197
VI. 5 Retour sur la dimension participative de la thèse 197

Références 201

Annexe A Annexes du chapitre II **223**

Annexe B Annexes du chapitre III **227**
B. 1 Guides d'entretien 227
B. 2 Itinéraires d'expérimentation et verbatims 229

Annexe C Annexes du chapitre IV **237**
C. 1 Compléments au protocole 237
C. 2 Exemple de rapport pour le diagnostic hybride 237
C. 3 Les synthèses restantes des diagnostics hybrides 258

Annexe D Annexes du chapitre V **277**
D. 1 Preprint de Peer Communty In mathematical & Computational Biology 277
D. 2 Comparaison des modèles de régression factorielle 302

Cette thèse est dédiée à Pierre Lavaux et Cyril Feidt qui ont su semer de belles graines dans les champs et dans les esprits.

Ainsi qu'à la mémoire de mon cher cousin Nicolas.

Remerciements

Je tiens à remercier en premier lieu mes encadrants de thèse, Isabelle et Arnaud, qui ont bien voulu me faire confiance (en dépit d'un profil pas forcément conforme). Ces derniers ont su, par leurs extraordinaires capacités scientifiques et humaines, me recadrer (suffisamment ?), me conseiller (de façon argumentée), me contredire (de manière tout aussi argumentée), mettre en place une relation conviviale (sinon les trois ans et demi de thèse auraient été sûrement très longs !) et m'encourager (en particulier dans les moments difficiles de la thèse). Je les remercie chaleureusement pour tout cela. Tous les deux resteront pour moi des modèles (en termes scientifiques et humains) pour le métier de chercheur auquel j'aspire. Avec Isabelle, je m'inspirerai de sa gentillesse, de son engagement, de sa force de travail et de sa pertinence tandis qu'avec Arnaud, je m'inspirerai de son sens pédagogique, de son humour, de sa capacité à sortir de sa zone de confort et aussi de sa gentillesse.

Je tiens à vivement remercier les paysans avec qui j'ai pu collaborer pendant cette thèse. Ils m'ont très vite fait confiance (en dépit de la première rencontre zoom où le stress avait fortement attaqué ma crédibilité), permettant ainsi de riches échanges sur les blés, les champs et leur vie à la ferme. Bien que je ne destine pas à devenir paysan (bien que j'y ai songé sérieusement), vous avez aussi été pour moi des modèles, par votre recherche de concordance directe entre votre travail (à la ferme) et vos visions du monde (une recherche de plus en plus rare dans nos sociétés ?). Merci pour votre hospitalité, votre savoir-vivre et votre intérêt pour les blés ! J'en profite pour remercier Vincent Lefèvre, paysan-meunier, qui a accepté de lire ce travail et de participer aux discussions lors de la soutenance.

Je n'oublierai pas l'ensemble des animateur.rices avec qui j'ai travaillé : Audrey, Valentin, Léa, Sophie, Simon, Elsa, Hélène, Pierre et Fred. Merci pour votre implication dans l'accompagnement des collectifs se réappropriant la diversité cultivée et pour votre intérêt pour les questions liées à cette thèse. J'espère pouvoir continuer à collaborer avec vous pour que mon travail de thèse soit davantage mobilisable et qu'il puisse vous aider à continuer de développer l'agriculture paysanne dans vos territoires respectifs.

Je tiens à remercier les stagiaires que j'ai co-encadrés, Louise Perrisseau (collaboration pour le Chap. III), Julia Cohendy (collaboration pour le Chap. VI) et Jean-Marc Le Goff (collaboration pour le Chap. VI), sans qui cette thèse aurait été fortement amoindrie (si on imagine qu'elle puisse aboutir). Merci pour votre patience et votre implication !

Je suis redevable à toutes celles et ceux qui m'ont aidé pour mon travail de terrain : Arnaud et Isabelle, Louise, Julia et Jean-Marc. En particulier, Adrien Amé pour ton appui technique, le choix de restaurants gourmets et ton enthousiasme pour le test de stabilité des agrégats. Merci à Axelle Mabille, Sophie Agostini pour leur super coups de main dans les fermes. J'en profite pour m'excuser pour le choix d'hôtels parfois un peu douteux et tous

mes oublis de matériel dans les fermes. Je remercie tous les mains-d'œuvre qui ont participé à l'analyse des échantillons post-récoltes : Emma, Prisca, Pascale, Maëlys, Yann, Thomas et Odou.

Je tiens à remercier mon jury de thèse qui a bien voulu prendre le temps de se pencher en détail sur mon travail et avec qui nous avons eu de riches discussions durant l'oral. Merci à tous les membres de mon comité de thèse pour vos conseils et retours lors des trois comités : Marion Casagrande, Olivier David, Timothée Flutre, Pierre Rivière et Estelle Kuhn. J'en profite pour remercier Olivier David de m'avoir fait découvrir les statistiques bayésiennes (il y a maintenant 6 ans), merci pour ta patience et tes bons conseils ! J'espère qu'on pourra continuer à collaborer.

J'ai eu la chance d'effectuer ces trois années et demi de thèse dans un cadre de travail sympathique. Merci aux membres de l'équipe DEAP, Jérôme, Timothée et Diala pour leur entrain et les réflexions pointues en génétique ou en statistiques !

Merci à Baptiste pour m'avoir fait découvrir LaTeX(vivement qu'on déguste tes premiers pains paysans).

Merci à Meije pour tous ces moments partagés (vivement qu'on fasse une rencontre entre Gina, Mako et Suki).

Merci à Adrien pour ces belles parties de palet breton.

Merci à Mathilde pour toutes les pauses sur la terrasse durant l'écriture du manuscrit.

Merci à Noa pour les lectures de contes, m'avoir entretenu pendant quelques mois, pour ces belles réceptions de balles dans le bureau et pour ton investissement dans le groupe des joyeux siffleurs.

Merci à Arthuro pour ton humour affûté et ton enthousiasme à faire les 400 coups. Merci à toute l'équipe de GQE Le Moulon : Mathilde, Sacha, Adrien F, Cédric, Augustin, Emma, Xavier, Valérie L, Harry, Yannick, Valérie C...

Je tiens à remercier tout mon entourage qui m'a soutenu pendant ces années de thèse, en particulier mes parents, ma sœur et mon frère qui ont toujours cru en *Michel le blagueur*, encore merci pour les relectures du manuscrit ! Je suis également fortement redevable à l'ensemble de mes colocs : Simon (piquette), Jules (*planche-à-roulette-ou-la-mort* !), Elliot (Mudada Mudada), Charles (jazz !), Bertrand (catane), Mathéo (vélo), Alice (life style !), Johanna (petit feu ?), Maxim (manche de cuillère, et merci pour tes dessins entre les chapitres), Marine (clopinou), Gina (pet the minette), Finet (sors-toi) et enfin Si-Peu (sit down). Je n'oublierai pas toute la clique de l'ENSAIA : Rémi, LM, Yoluène, Coline, Maxime, Mathilde, Sonia, Sarah, Léna, Carolina, Agathe... ; la clique de Brétigny : Marie, Éléonore, Loic, Étienne, Laurianne, Capucine, Vianney, Alexis J-P... ; la clique d'Agronomie-MoBiDiv : Malick, Justine, Mathide C, Maude, Élodie, Lola, Antoine... ; ainsi que les autres : Julien L, Émile D, Dona, Irène, Mathieu, Axelle D, Jérémy D, Oo, Paul TD...

Enfin, je remercie le projet ANR MoBiDiv qui a financé la moitié de ma thèse, le méta-programme INRAE METABIO qui en a financé un quart et le département Biologie et Amélioration des Plantes de l'INRAE qui a financé le dernier quart.

Alors que pour moi, paysan, la plante est un sujet, avec lequel je vis, je rêve, nous échangeons. Cela fait appel à l'Homme dans sa totalité, mobilisant tous mes organes des sens mais aussi mon imaginaire. C'est dans cette relation intime où le temps et l'espace permettent à la plante le dialogue, dans ses allers-retours, que se construit mon imaginaire. Et c'est dans cet imaginaire, accompagné de ma pratique panetière, que naît la représentation de ce que je pourrais appeler l'archétype idéal de la plante auprès de laquelle je veux vivre.

Jean-François Berthellot

Chapitre I

Introduction générale

Dans ce premier chapitre, je présente différents cadres et éléments contextuels importants dans lesquels s'inscrit ma thèse. Ces cadres seront par la suite remobilisés pour répondre à mes questions de recherche qui sont également présentées dans ce chapitre introductif.

I. 1 Transitions agroécologiques et pratiques agricoles

L'agroécologie est un terme très polysémique, dont le sens dépend des situations historiques, institutionnelles ou sociales dans lesquelles il est employé. L'agroécologie peut désigner à la fois une discipline scientifique, un ensemble de mouvements sociaux ou des pratiques agricoles et peut être considérée de l'échelle de la parcelle à celle du système alimentaire (Wezel et al., 2009). L'agroécologie au sens commun évoquerait « *une évolution de l'agriculture jugée positivement : une évolution qui porte l'espoir de*

rompre avec les conséquences négatives de l'agriculture contemporaine —notamment atteintes environnementales et échanges inégaux— tout en assurant aussi bien et si possible mieux qu'elle les objectifs majeurs pour l'humanité que sont l'alimentation et la fourniture de services écosystémiques tels que le stockage de carbone, l'épuration des eaux ou le recyclage des déchets » (Doré et Bellon, 2019 ; p 9).

I. 1.1 Agroécologie : agronomie et écologie

Parmi le foisonnement de visions de l'agroécologie, un des éléments communs est la volonté de baser l'agronomie sur davantage d'écologie. Pour cela Altieri (1995) propose six principes :

1. Favoriser le recyclage de la biomasse en optimisant la décomposition de la matière organique et le cycle des nutriments à travers le temps,
2. Favoriser les mécanismes de régulation naturelle des populations d'adventices, d'insectes et d'agents pathogènes en créant un habitat approprié,
3. Favoriser les conditions de croissance de la plante cultivée par une bonne gestion de la matière organique et en augmentant l'activité biologique du sol,
4. Minimiser les pertes de ressources (sols, eau, ressources génétiques) en favorisant leur régénération ou leur conservation,
5. Diversifier les espèces et les variétés au seins des espèces dans l'agrosystème dans le temps et l'espace à l'échelle du champ et des paysages,
6. Augmenter les interactions biologiques bénéfiques et les synergies entre les composantes de l'agroécosystème et ainsi promouvoir les processus écologiques et les services écosystémiques [1].

Tamburini et al. (2020) a montré dans le cadre d'une méta-analyse l'efficacité de la diversification des pratiques agricoles et des plantes cultivées. Celles-ci augmentent fortement les services rendus par les agrosystèmes en maintenant en moyenne la performance productive.

L'agroécologie en tant qu'option technique peut être vue comme l'adaptation de ces principes aux réalités locales (conditions pédo-climatiques, contextes sociaux-économiques, etc...). Cela implique la production de connaissances sur les mécanismes qui sous-tendent les principes de l'agroécologie et d'étudier la compatibilité des pratiques agricoles existantes (dans leur diversité et en lien avec les environnements de culture dans lesquels elles sont appliquées) avec les principes de l'agroécologie. Par exemple, Fontaine et al. (2024) présentent les principaux mécanismes que l'agriculteur.ice peut favoriser pour permettre une meilleure synchronisation entre la demande des plantes et l'offre du sol. Cette synthèse montre que les pratiques à mettre en œuvre pour favoriser ces mécanismes dépendent fortement des conditions pédo-climatiques locales.

En plus de synthèses scientifiques essayant de faire le lien entre la théorie et la pratique, il est important de mieux connaître les pratiques agricoles existantes et leurs

1. Ces services sont divers, ils sont souvent classiquement regroupés en 4 groupes : approvisionnement, régulation, socioculturel et support. Lorsque les fonctions de l'agrosystème sont perçues négativement on parle de dis-service.

relations avec le contexte local. La reconnaissance des savoirs locaux est un facteur clé pour étudier ces relations (Mariel et al., 2021).

Lorsque que des pratiques semblent en contradiction avec les principes de l'agroécologie, il est alors souhaitable de les faire évoluer. Pour réaliser la transition agroécologique des pratiques, Hill et MacRae (1996) propose trois modes de changement possibles :

— En améliorant l'**efficience** des pratiques actuelles, par exemple en utilisant des outils de l'agriculture de précision pour appliquer un engrais.

— En **substituant** des intrants externes par des intrants plus vertueux, par exemple substituer un insecticide par l'introduction d'insectes ennemis naturels du ravageur ou de substances naturelles perturbant ces ravageurs.

— En **re-concevant** l'agrosystème pour qu'il repose davantage sur les principes agroécologiques. L'un de ces principe est de diversifier les productions en recherchant une complémentarité poly-culture élevage ou en allongeant les rotations.

Néanmoins d'autres dimensions de l'agroécologie semblent importantes à prendre en compte pour permettre des transitions démocratiques et justes.

I. 1.2 Dimension sociale de l'agroécologie.

La dimension socio-politique n'apparaissait pas dans la pensée des précurseurs de l'agroécologie tel que Bezin (Russie puis USA), Azzis (Italie) Hénin (France) cités par Wezel et al. (2009). C'est à la fin des années 70 en Amérique latine que l'agroécologie ré-émerge de manière significative dans le monde agricole. Elle intègre cette fois, en plus de l'agronomie et l'écologie, une dimension sociale et politique (réflexions anthropologiques, éthnoécologiques, de sociologie rurale, sciences politiques, etc) pour mieux prendre en compte la complexité et la dimension humaine de l'agroécologie (Altieri et Nicholls, 2017). Selon les textes et les auteurs, cette dimension sociale et politique est plus ou moins considérée. Par exemple l'Institut National de Recherche Agronomique Français (INRA maintenant INRAE [2]), adopte en 2010 une définition étroite de l'agroécologie : « l'appropriation par l'agronomie des concepts et des méthodes de l'écologie et leur application aux écosystèmes anthropisés gérés par l'agriculture et par l'élevage » alors que le département SAD (Sciences pour l'Action et le Développement) de l'INRA adopte une définition plus large incluant la dimension sociale (Goulet et Meynard, 2012). En 2021, INRAE propose la définition suivante, l' « agroécologie dans sa définition large et englobante, constitue un cadre intégrateur et moteur pour étudier et concevoir les transitions vers des systèmes agricoles et alimentaires durables valorisant les potentialités environnementales, économiques et sociales et respectueux de la santé globale. » [3].

2. Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement.

3. Prospective intitulée « *INRAE 2030. Partageons la science et l'innovation pour un avenir durable* »

I. 1.2.a Agroécologie et mouvements sociaux

Selon Wezel et al. (2009), à partir des années 90 le terme d'agroécologie a commencé à désigner également un mouvement social et politique, qui se développe d'abord en Amérique du Sud et aux USA. Ce mouvement est associé à la défense et la promotion de l'agriculture paysanne.
Par exemple au Brésil, le géographe Mançano Fernandes propose de comprendre les conflits actuels entre mouvements sociaux populaires et régimes agricoles industriels producteurs de biocarburant, à la lumière de la théorie des territoires vus comme objets de contestation (Fernandes, 2009 ; Fernandes et al., 2013). Selon lui, il y a une lutte pour des *territoires matériel et immatériel*. La lutte pour le territoire matériel concerne l'accès à et la gestion des ressources physiques (main d'œuvre, sol, eau, biodiversité...). La lutte pour le territoire immatériel concerne la capacité d'interpréter et de déterminer les définitions et contenus des concepts à enjeux [4]. Cette dernière opposerait d'un côté une rationalité formelle, instrumentale et économique et de l'autre une rationalité alternative qui se réapproprie les savoirs autochtones locaux ou traditionnels (Rosset et Martinez-Torres, 2014). Cette lutte permet d'obtenir des consensus souvent nécessaires pour légitimer le contrôle des territoires matériels.
Les nombreux mouvements sociaux pour la défense et la promotion de l'agriculture paysanne ont réalisé des alliances transnationales pour gagner du poids dans le système alimentaire global. La plus importante de ces alliances est La Via Campesina (Martínez-Torres et Rosset, 2010). Celle-ci considère que l'agroécologie serait une simple option technique si elle n'est pas reliée au concept de souveraineté alimentaire [5] (Rosset et al., 2011).

I. 1.2.b Agroécologie et recherche-action participative

Il est important de considérer les approches participatives pour l'intégration des savoirs et des problématiques locaux, reconnus comme critiques pour la transitions agroécologique. En effet la recherche-action participative (RAP), en plus de produire des connaissances scientifiques, se caractérise par « la volonté d'obtenir un authentique engagement et des contributions de la part des partenaires de la recherche et des partenaires directement concernés, ainsi que par la recherche d'actions transformatives pour traiter les questions d'importances [6] » (Méndez et al., 2017). En agriculture, il

4. Dont les polémiques autour de la signification de l'agroécologie sont un exemple parlant.

5. « La souveraineté alimentaire est le droit des peuples à une alimentation saine, dans le respect des cultures, produite à l'aide de méthodes durables et respectueuses de l'environnement, ainsi que leur droit à définir leurs propres systèmes alimentaires et agricoles. Elle place les producteurs, distributeurs et consommateurs des aliments au cœur des systèmes et politiques alimentaires en lieu et place des exigences des marchés et des transnationales. Elle défend les intérêts et l'intégration de la prochaine génération. Elle représente une stratégie de résistance et de démantèlement du commerce entrepreneurial et du régime alimentaire actuel. Elle donne des orientations pour que les systèmes alimentaires, agricoles, halieutiques et d'élevage soient définis par les producteurs locaux. [...] Elle garantit que les droits d'utiliser et de gérer nos terres, territoires, eaux, semences, bétail et biodiversité soient aux mains de ceux et celles qui produisent les aliments. La souveraineté alimentaire implique de nouveaux rapports sociaux, sans oppression et inégalités entre les hommes et les femmes, les peuples, les groupes raciaux, les classes sociales et les générations » (Déclaration de Nyéléni, Nyéléni, 2007)

6. Notre traduction.

existe une grande diversité de mise en application de cette approche (Farrington et Martin, 1988 ; López-García et al., 2021). Elles diffèrent par le degré de participation des acteur non académiques, la manière de concevoir le projet, de collecter les données, de traiter ces données et de valoriser les connaissances co-produites.
Dans un projet de RAP, deux types de connaissances sont co-produites, des connaissances académiques et des connaissances pratiques. Trois propriétés permettent de caractériser une connaissance pratique (Pastré, 2002), i) elle s'élabore dans l'action, ii) elle permet de guider l'action et iii) elle est reconnue par une communauté professionnelle.
Selon Cerf (2011), les démarches de RAP se caractérisent par des tensions entre connaissances scientifiques et connaissances pratiques. Elle distingue en particulier trois tensions :

1. Une tension sur la légitimité des connaissances, à la fois la légitimité du scientifique à contextualiser ses connaissances dans une démarche transformative et la construction de la légitimité du savoir du partenaire non académique.
2. Une tension sur la reconnaissance des intérêts de chacune des parties prenantes. En effet, si cette reconnaissance n'est pas établie, il y a un risque que les connaissances co-produites ne répondent ni aux intérêts de recherche ni aux intérêts du partenaire non académique.
3. Une tension sur le lien entre connaissances pratiques et connaissances académiques, c'est-à-dire l'enjeu de produire des connaissances pratiques tout en étant capable de faire le lien avec des connaissances scientifiques. Par exemple, est-ce que la méthode de production de connaissances pratiques suffit pour que celles-ci soient valorisées académiquement ? Est-il possible que les connaissances pratiques puissent monter en généricité ?

De plus Cerf (2011) propose aux chercheuses et chercheurs investi.es dans les démarches de RAP d'adopter une posture de "*care*" [7] en ayant une attention constante et une position réflexive orientée vers l'avenir sur l'effet des changements (voulus ou réalisés), sur l'autonomisation du partenaire, sur la reconnaissance de ce qui a été appris etc...
Cerf (2011) ne soutient pas le point de vue selon lequel les chercheur.es et les partenaires non-académiques sont des co-chercheur.es mais plutôt qu'ils doivent entretenir une distinction claire et constructive. Au contraire Camden et Poncet (2014), énoncent que dans un processus de RAP les frontières entre les rôles de chacun s'estompent et que tous les partenaires sont des co-chercheur.es. Ce concept de co-chercheur est pertinent pour insister sur le fait que l'ensemble des partenaires bénéficient de la reconnaissance de leur capacité réflexive. Néanmoins les deux partis prenantes ne sont pas assimilables de telle sorte que leur identité, leur contribution et leur expertise ne peuvent pas être confondues. On peut dire « que chacun a son mot à dire et que les complémentarités dominent » (Callon, 1998).

La recherche-action participative semble très pertinente pour traiter à la fois des questions de recherche et des questions des praticien.nes du monde agricole ; reste à savoir comment créer un vrai espace pour permettre une collaboration fructueuse en

7. Qui peut se traduire de l'anglais en "attention à l'autre".

recherche et société (un « forum hybride » selon la terminologie de Callon et al., 2001).

I. 1.2.c Agroécologie et développement agricole

Il existe beaucoup de littérature et de visions sur les liens entre agroécologie et développement agricole. Je vais juste succinctement présenter un exemple de chacune des deux perspectives dominantes (Fig I.1 Méndez et al., 2013). Pour Sevilla Guzmán et Woodgate (2013) [8] l'agroécologie est un projet de développement en lui-même :

> *[Elle] promeut la gestion écologique des systèmes biologiques par des formes collectives d'action sociale, qui réorientent le cours de la coévolution entre la nature et la société afin de répondre à la « crise de la modernité ». Cet objectif doit être atteint par des stratégies systémiques [...] pour changer [les] modes de production et de consommation humaine qui ont produit cette crise. Au cœur de ces stratégies se trouve la dimension locale, où nous rencontrons un potentiel endogène encodé dans des systèmes de connaissance [...] qui démontrent et promeuvent à la fois la diversité écologique et culturelle. Cette diversité devrait constituer le point de départ d'agricultures alternatives et de l'établissement de sociétés rurales dynamiques et durables.*

Cette vision est représentative d'une perspective "forte" de l'agroécologique (Fig I.1). Pour les promoteurs de l'*intensification durable de l'agriculture* (FAO, 2015 ; Pretty, 2008), l'agroécologie est un moyen parmi d'autres pour le développement agricole. L'intensification durable vise à réduire les externalités négatives de l'agriculture tout en améliorant les rendements. Elle vise à pouvoir nourrir la planète en prenant en compte l'augmentation de la démographie et la crise environnementale. Cette approche a pour principaux leviers :

- Les techniques visant à accroître l'efficacité d'utilisation de l'eau, des nutriments et d'autres intrants (comme l'agriculture de précision).
- L'amélioration du végétal, du bétail et des organismes aquatiques par la sélection, y compris la modification génétique (OGM dont ceux issus de NBT [9]).
- Les pratiques de l'agriculture de conservation du sol (non labour, non travail du sol, couverts végétaux...).
- La lutte intégrée contre les ravageurs (respect de la prophylaxie, lutte chimique raisonnée et lutte biologique comme avec des auxiliaires ou des produits d'origine biologique perturbant le ravageur).
- D'autres pratiques considérées comme agroécologiquement vertueuses (intercultures, culture de légumineuse, cultures intercalaires...).

Cette vision est représentative de la perspective "faible" de l'agroécologie (Fig I.1). Altieri (2012) soutient que cette position n'est pas apolitique mais idéologiquement orientée :

8. Notre traduction

9. Les New Breeding Techniques sont un ensemble de techniques de modification localisée de séquence génomique pour développer de nouvelles variétés.

L'« intensification durable » proposée est idéologiquement soutenue par des projets intellectuels visant à recadrer et à redéfinir l'agroécologie en la vidant de son contenu politique et social et à promouvoir l'idée erronée selon laquelle les méthodes agroécologiques peuvent coexister avec l'expansion agressive des cultures transgéniques et des agrocarburants.

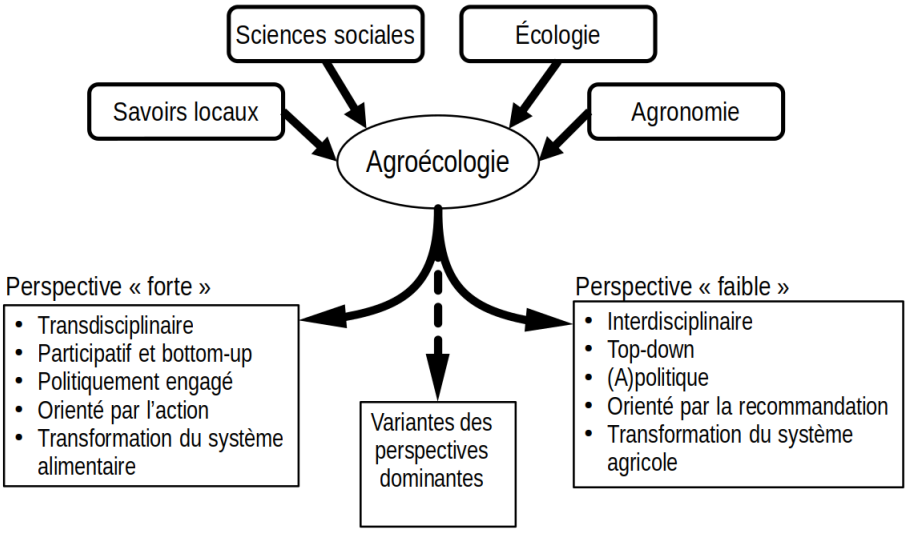


Figure I.1 – Représentation schématique des deux perspectives agroécologiques dominantes (adapté de Méndez et al., 2013).

Il semble important dans le domaine de l'agroécologie [10] qui est une science appliquée, d'avoir une démarche de science impliquée (Coutellec, 2015a). En particulier dans cette démarche invite à davantage expliciter les choix d'orientations de la recherche (l'élaboration des stratégies de recherche et le choix des méthodologies) ainsi que les applications possibles des résultats de la recherche. Ces principes des sciences impliquées visent à « *construire un monde commun dans un contexte de vulnérabilité et d'incertitude plutôt qu'à rajouter du chaos dans une visée corporatiste ou mercantile, effet probant du productivisme scientifique actuel* » (Coutellec, 2015b).

I. 1.3 Comment décrire les pratiques agricoles

I. 1.3.a Éléments généraux sur les pratiques agricoles

Selon le code rural français [11], les activités agricoles correspondent à la maîtrise à la ferme d'un cycle biologique de caractère végétal ou animal et constituant une ou plusieurs étapes nécessaires au déroulement de ce cycle ainsi que les activités exercées par les agriculteur.rices qui sont dans le prolongement de l'acte de production ou qui ont pour support la ferme. Les pratiques agricoles concernent l'ensemble des activités agricoles. Elles seront définies comme les manières concrètes d'agir des agriculteurs et des agricultrices dans un but productif (Teissier, 1979). Landais et al. (1988), distinguent les techniques agricoles, qui sont communicables et théoriques, des pratiques

10. Coutellec (2015a) par son approche, vise aussi les sciences dites fondamentales.
11. Article L311-1

agricoles qui sont dans l'action et associées à un contexte spécifique, les techniques agricoles et pratiques agricoles s'inspirant les unes des autres.
Les pratiques agricoles s'étudient avec des approches qui dépendent des types d'agriculture considérés (Papy, 2000). Si la personne qui met en œuvre les pratiques est aussi celle qui prend les décisions sur la ferme on peut alors utiliser le cadre conceptuel de l'*agriculteur en action* (Cerf et Sebillotte, 1988 ; Sebillotte et Soler, 1988). Si l'agriculteur.rice est seulement l'exécutant.e [12] d'une structure où les décisions sont fortement hiérarchisées, il faudra alors utiliser des cadres moins spécifiques à l'agronomie par exemple ceux issus des théories de l'activité et du management (Engeström, 2011).

Dans le premier cas, on peut représenter une pratique comme étant à la jonction entre le système décisionnel de l'agriculteur.rice et le système opérant (le champs, le matériel agricole...). De cette représentation découle trois manières d'étudier les pratiques agricoles (Fig I.2 Landais et al., 1988). L'étude *des modalités* consiste à décrire les pratiques d'un point de vue externe, l'étude de *l'opportunité* consiste à mieux comprendre les déterminants des pratiques, tandis que l'étude de *l'efficacité* vise à évaluer les effets des pratiques.

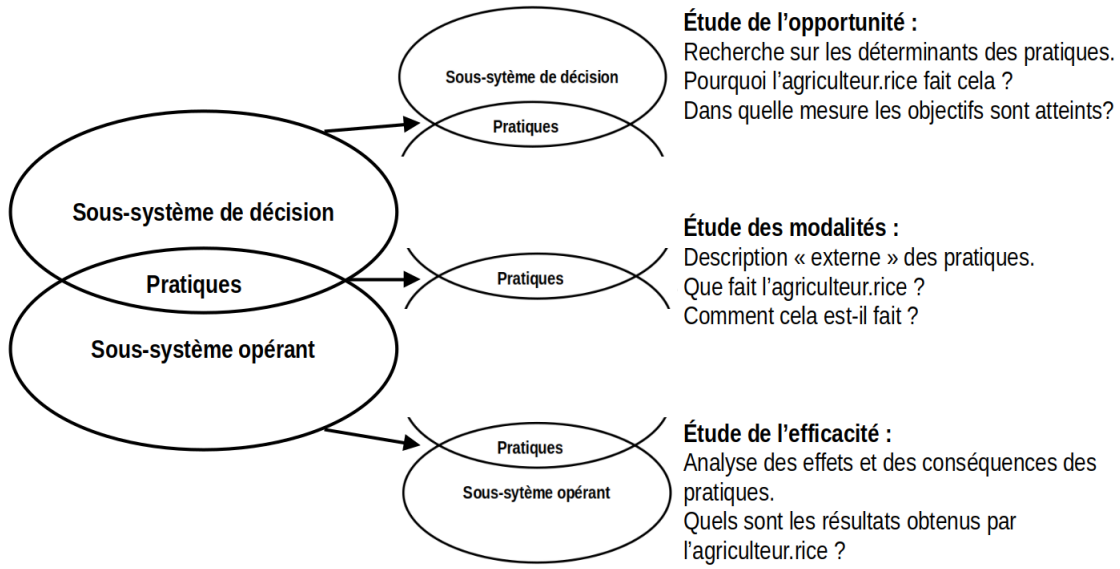


Figure I.2 – Les pratiques à la jonction entre système décisionnel et système opérant, et les trois facettes pour étudier les pratiques (Adapté de Landais et al., 1988)

De nombreuses études ont regardé les pratiques en combinant *les opportunités* et*les modalités*, par exemple pour étudier les systèmes de culture (Aubry et al., 1998 ; Maxime et al., 1995) ou des systèmes de polyculture-élevage (Duru et Charpenteau, 1981). Ce type d'étude permet également d'étudier les changements de pratiques. On peut considérer qu'en France, ces changements de pratiques engagés par les agriculteur.rices sont influencés principalement par :

1. Des connaissances pratiques élaborées pas-à-pas à partir :

12. En France les entreprises à allure de firme emploient 28% des travailleur et travailleuses agricoles et représentent 10% des structures agricoles (Purseigle et al., 2017 ; page 287).

   (a) de la mise à l'épreuve des pratiques sur la ferme, souvent sur plusieurs années (Catalogna et al., 2018, 2022),
   (b) des démarches d'expérimentation collective (Chantre, 2013),
   (c) du partage de connaissances entre agriculteurs et agricultrices (Girard et Magda, 2020),
   (d) des conseils technico-scientifiques issus d'organismes de développement agricole (instituts techniques, chambres d'agriculture... Kockmann et Pouzet, 2022).
2. Des législations et des subventions (Möhring et al., 2020 ; Richard et al., 2018).
3. Des innovations sur l'équipement agricole (Salembier et al., 2020), des innovations variétal (Rolland et al., 2017), ou sur d'autres outils (par exemple des plateformes numériques de capitalisation des connaissances agricoles Quinio et al., 2021).
4. Des débouchés agricoles disponibles (Petit et Aubry, 2016).

Les changements de pratiques s'opèrent souvent de manière progressive selon différentes étapes qui ont été formalisées dans le cadre d'une démarche de conception pas-à-pas Meynard et al. (2023).

Certaines études regardent les pratiques par leurs *modalités* et leur *efficacité*, on peut citer les diagnostics agronomiques pour expliquer l'élaboration des performances productives (Doré et al., 1997 ; Le Bail et Meynard, 2003 ; Meynard et David, 1992) ou les diagnostics agronomiques pour évaluer des performances agro-envrionnementales (Cerf et al., 2019). Les méthodes de diagnostic agronomique évaluent rarement directement l'effet d'une pratique sur un objet d'intérêt mais ont recours à des indicateurs de milieu (Doré et al., 1997). On peut également citer les études globales qui visent à estimer l'impact des pratiques à partir de jeux de donnée très larges (Guilpart et al., 2017) ou bien par la synthèse de nombreuses publications (Tamburini et al., 2020).

La démarche d'agronomie clinique semble pertinente pour étudier les déterminants et/ou les effets des pratiques agricoles. Ces démarches cliniques existent depuis le début de l'agronomie comme science en France (début du 18^{ieme}) et ont ré-émergé dans les années 70 avec les pratiques d'observation *in situ* telles que le tour de plaine ou le profil cultural (Benoit et Knittel, 2017). Celles-ci se caractérisent par trois éléments principaux (Kockmann et al., 2019) :

1. Une relation entre un.e agronome-accompagnant et un.e agriculteur.rice.
2. Une posture caractérisée par i) une implication de l'agronome-accompagnant.e pour comprendre dans sa singularité une situation systémique, souvent complexe, sujette à incertitudes et par ii) une dynamique d'accompagnement [13] des pratiques professionnelles de l'agriculteur.trice.

13. La posture d'accompagnement se caractérise par la mise en place d'un espace de dialogue équilibré et par un apprentissage conjoint entre l'agronome-accompagnant et practicien.ne agricole (Cerf et Maxime, 2006).

3. Un processus dynamique, basé sur l'observation et le raisonnement, visant à articuler théorie et pratique, connaissances et action, structuré en différentes étapes : i) la prise en compte du diagnostic interne de l'agriculteur.rice [14], ii) l'élaboration du diagnostic externe de l'agronome-accompagnant en lien avec les objectifs et contraintes de l'agriculteur.rice et iii) une mise en discussion sur les pratiques pour aboutir à un diagnostic-pronostic partagé.

Comme le résument Hubert et al. (1993) : « C'est la combinaison de ces deux diagnostics qui peut permettre une démarche participative d'"aide à la décision". Ceci ne peut s'envisager sans une certaine communauté d'analyse de la situation. Il s'agit alors pour chaque interlocuteur de comprendre les termes du diagnostic de l'autre. ».

Pour l'instant cette démarche est surtout utilisée pour le développement agricole et peu pour des projets de recherche-action participative. De nombreuses études s'intéressent au diagnostic des agriculteur.rices (Cerf et Sebillotte, 1988 ; Hubert et al., 1993) ou le prennent en compte (lors de l'étape diagnostic préliminaire, Doré 1997) mais peu proposent un diagnostic agronomique partagé (on peut tout de même citer Leclère et al., 2023 ; dont la méthode va dans ce sens). La démarche clinique agricole est intéressante pour la recherche, car elle créé un « forum hybride » dans le domaine agricole, c'est-à-dire un espace de discussion critique et constructive entre chercheur.es et non-chercheur.es : « La mise en débat qui s'instaure dans les forums hybrides [...] démontre que chacune de ces deux catégories d'acteurs détient des savoirs spécifiques (une capacité de diagnostic, une interprétation des faits, un éventail de solutions) qui s'enrichissent et se fécondent mutuellement » (Callon et al., 2001 ; p. 62).

I. 1.3.b Représentation de l'environnement de culture.

Le champ cultivé peut être vu comme un système piloté par des pratiques agricoles (Fig I.3) et l'agriculteur.rice cultivant une parcelle a elle des objectifs variés (quantité, qualité, objectifs environnementaux). Le niveau de réalisation de ces objectifs peut être mesuré par différentes indicateurs : par exemple le rendement en grain pour mesurer le niveau de production, la quantité de grain produite par unité d'eau ou d'azote apportée pour mesurer l'efficience productive de ces intrants (Oweis et Hachum, 2006).

Pour mieux comprendre les déterminant biotechnique ces indicateur Doré et Meynard (2006) propose de représenter le système cultivé avec composé de trois composantes : le sol, l'atmosphère et le peuplement cultivé. Ces compartiments comprennent chacun une composante biologique. Par rapport à la figure de Doré et Meynard (2006), nous avons considéré que le peuplement cultivé a aussi une composante biologique [15]. Nous avons aussi mis davantage en valeur que la place des éléments biotiques dont l'importance est accrue dans les systèmes agroécologiques ayant moins recours aux intrants de synthèse pour la régulation des stress biotiques et abiotiques.

14. Sebillotte (1990) fait la différence entre le diagnostic interne de l'agriculteur.rice et celui extérieur de l'agronome conseillé.ère ou accompagnant.

15. Selon nous, le peuplement cultivé est étroitement associé à d'autres espèces, leur ravageur et leur microbiote, qui sont souvent hébergés dans la plante cultivée. Par exemple Mauger et al. (2021) ont montré que certaines variétés blés tendres sélectionnées récemment ont un microbiote différent de variétés dite "anciennes"

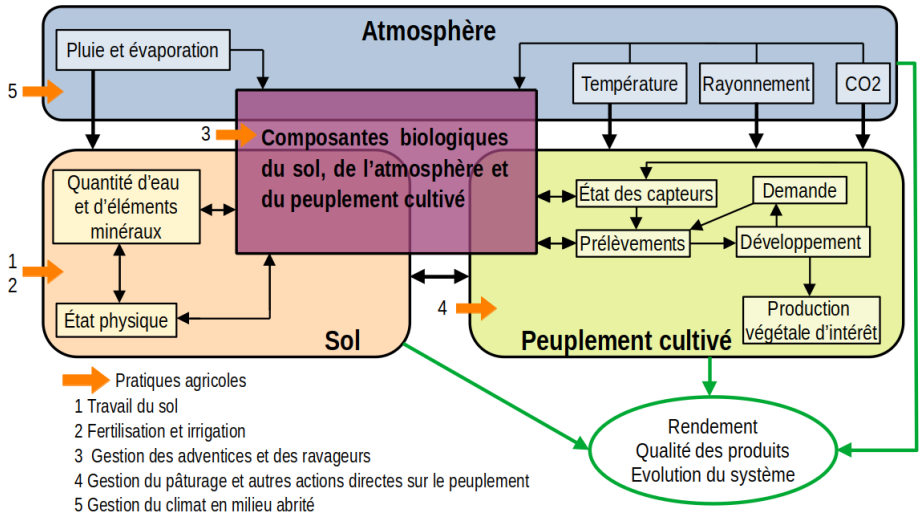


Figure I.3 – Représentation schématique du champ cultivé (adapté de Doré et Meynard, 2006).
L'influence des pratiques d'affectation des sols et d'organisation du foncier n'est pas représentée.

Le peuplement cultivé est représenté par de nombreuses composantes internes en interactions. Tout d'abord, le développement [16] des plantes entraîne une demande en ressources, le prélèvement des ressources se fait en fonction de cette demande et de l'état des capteurs [17] qui favorise le développement des individus du peuplement et ainsi la production. Il y a généralement une forte compétition entre plantes du peuplement cultivé, qui ralentit le développement global des plantes individuelles. Il peut y avoir une relation causale entre diversité intra-variétale et les performances. Cette relation peut-être due à des interactions de complémentarité ou au contraire de compétition entre individus du peuplement, seules les premières favorisant la performance de l'ensemble de la population (Loreau et Hector, 2001). Pour certains stress comme les maladies foliaires, la complémentarité s'exprime davantage lorsque les stress sont forts et permet de meilleurs rendements comme ça a été montré dans la littérature pour les mélanges de variétés (Borg et al., 2018).

Le peuplement cultivé interagit de manière permanente avec son environnement de culture. Il s'enracine dans le compartiment du sol en fonction de l'état physique du sol pour répondre à la demande en eau et en éléments minéraux solubles, ces derniers sont issus d'apports humains ou libérés par le microbiote du sol (Fontaine et al., 2024). Le peuplement développe dans l'atmosphère des organes photosynthétiques transformant l'eau et le CO2 en sucres grâce à l'énergie lumineuse.

Doré et Meynard (2006) proposent trois grandes caractéristiques du champ cultivé :

16. Le développement est la création et la croissance des organes. Le développement initial des plantes est permis par leurs ressources propres (stockées dans des organes de réserves par exemple).
17. Racines, organes chlorophylliens...

— Le champ cultivé est complexe (à cause de nombreuses interactions entre composantes) et en constante évolution (succession d'états).

— Cette complexité est en partie responsable de l'incertitude sur l'effet de la mise en œuvre des pratiques agricoles. Il n'est pas possible de connaître *a priori* l'effet d'une pratique agricole sur un des éléments du système, cet effet dépendant des autres éléments du système.

— Il y a une forte interaction entre pratiques agricoles. D'une part, un état du système peut être obtenu par différentes combinaisons de pratiques et d'autre part une pratique va influencer plusieurs éléments du système (par exemple le passage de la herse-étrille peut en plus de désherber, activer la minéralisation de la matière-organique, et le passage du tracteur peut tasser le sol).

L'une des conséquences importante issue de ces trois caractéristiques est la nécessité pour l'agriculteur.rice d'évaluer certains états du système avant d'agir sur celui-ci à travers ses règles de décision (Cerf et Sebillotte, 1988). La recherche agronomique a développé de nombreuse méthodes pour se représenter l'environnement de culture à partir d'indicateurs de l'état du milieu. Ces derniers influencent *a priori* une performance du peuplement (quantitative, qualitative et/ou environnementales). Selon Hénin (1999 ; p 45), l'agronome afin d'expliquer un phénomène (par exemple le rendement) par un mécanisme explicatif (par exemple la dynamique hydrique du sol), introduit la notion de facteur qui réduit à une dimension le phénomène explicatif (par exemple remplacer la dynamique hydrique du sol par un indicateur de stress hydrique). Ces facteurs dépendrons du stade phénologique du peuplement cultivé (comme représentés pour le cas du blé dans figure I.4).

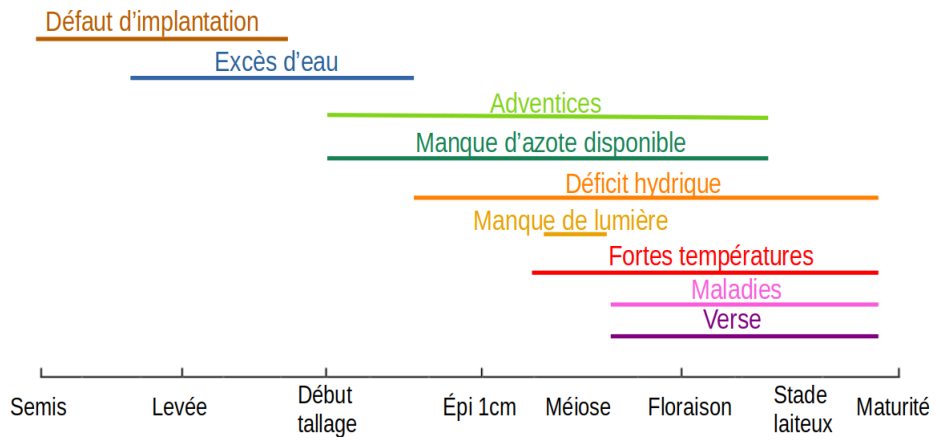


Figure I.4 – Principaux facteurs potentiellement impactant le blé en fonction de son cycle (adapté de Lecomte, 2005 ; figure 2.4)

Les facteurs sont estimés à travers des indicateurs du milieu qui peuvent être décrits de trois façons (Doré et al., 2008 ; Loyce et Wery, 2006) :

— Il sera qualifié d'indicateur **direct** s'il est calculé à partir de mesures réalisées directement sur le peuplement cultivé (plus robuste pour identifier l'impact sur le peuplement) ;

— Il sera qualifié de **spécifique** s'il reflète un seul facteur. Cette caractéristique permet d'éviter les confusions d'effets ; pour être spécifique il faut être *a priori* direct mais la réciproque n'est pas toujours vraie ;

— Il sera qualifié d'indicateur avec de la **mémoire** s'il reflète un stress sur une période de culture longue. Cette caractéristique permet d'éviter de devoir retourner fréquemment au champ pour mesurer l'impact du facteur sur une certaine durée.

Prenons l'exemple, des indicateurs de stress hydrique : (1) le potentiel hydrique de base qui se mesure sur la plante est un indicateur direct spécifique du stress hydrique et a peu de mémoire : (2) le bilan hydrique qui se calcule avec les données des compartiments de l'atmosphère et du sol est un indicateur indirect qui a davantage de mémoire mais est moins spécifique : il peut varier dans une certaine mesure en fonction d'autres facteurs que le stress hydrique, néanmoins cet indicateur peut être bien corrélé au le potentiel hydrique selon Pellegrino et al. (2005). L'indicateur de nutrition azotée lui est spécifique au stress azoté, direct et a de la mémoire (Meynard et al., 1997).

L'indicateur de stress ne suffit pour savoir si le stress a effectivement impacté la performance. De nombreuses méthodes visent à identifier et hiérarchiser les indicateurs réellement impactant un champ cultivé (Doré et al., 2008, 1997 ; Kockmann et al., 2019).
Le blé est une culture ayant une grande importance à l'échelle globale (c'est la culture la plus cultivée avec 219 million d'hectares dans le monde en 2020 FAOSTAT, 2024) mais également une culture ayant une grande importance dans les systèmes alimentaires locales comme par exemple en France (Barbier, 2023).

I. 1.3.c Éléments généraux sur le blé tendre en France.

En France, le blé tendre est cultivé sur environ cinq des 17 millions d'hectares de terres arables, avec un rendements moyen de 70 quintaux par hectare (bien au-dessus du rendement moyen mondial de 30q/ha). Le blé a pris une place importante dans les exploitations céréalières lors de la spécialisation des exploitations et des territoires (Duc et al., 2013). Par exemple dans le bassin de la Seine entre 1970 et 2000, la sole en blé tendre augmente de 50%, les prairies diminuent drastiquement et les rotations telles que pois-blé-betterave-blé sont progressivement remplacées par des rotations plus courtes telles que colza-blé-orge, colza-blé-blé ou blé-blé-orge (Mignolet et al., 2007). Cette simplification des systèmes de cultures a été permise par l'usage des intrants de synthèse qui ont contribué à offrir des solutions à un certain nombre de problématiques (gestion des bioagresseurs, fertilisation) qui étaient historiquement beaucoup traitées par la rotation et l'emploi plus intensif de main-œuvre. En 2017, 98% des surfaces de blé tendre sont traitées par des produits phytosanitaires avec un IFT moyen de 5.1 [18], principalement fongicides et herbicides (Agreste 2020). Vu ses surfaces et ses IFTs, le blé est l'espèce la plus consommatrice en produits phytosanitaires en France avec 35% des doses nationales (Urruty et al., 2016). Depuis

18. L'Indicateur de Fréquence de Traitement (IFT) est obtenu en sommant les ratios entre la dose appliquée et la dose de référence du produit pour la culture et la cible.

2009, l'Union Européenne a pour objectif de réduire les nuisances sanitaires et environnementales associées aux pesticides [19]. Néanmoins depuis cette date les ventes de pesticides n'ont pas diminué (Möhring et al., 2020). En 2017, 98% des surfaces de blé sont fertilisées avec de l'azote de synthèse (164 kilos par hectare [20] en moyenne, Agreste 2020). L'azote de synthèse en plus de participer fortement aux émissions de gaz à effet de serre lors de sa fabrication (ReseauActionClimat, 2018), est une ressource dont le prix, étant indexé sur celui du gaz naturel est extrêmement sensible à la volatilité des prix.
La moitié de la production nationale est exportée. En 2018, sur ce qui n'est pas exporté, 31% du blé tendre récolté est pour l'alimentation animale, 19% pour la panification, 19% pour l'amidonnerie ou la glutennerie et 11% pour l'alcool (y compris le bioéthanol), 8% pour la biscotterie, la biscuiterie et la pâtisserie industrielle et 3% pour les semences (FranceAgriMer, 2020). Le blé est donc une culture destinée majoritairement à des circuits longs, voire très longs.

Nave et al. (2013) ont montré que certaines pratiques agricoles étaient liées à des déterminants économiques et sociaux chez 71 agriculteurs et agricultrices d'Eure-et-Loire : le groupe mettant le plus d'intrants était celui qui avait le moins de main-d'œuvre familiale et qui était davantage informé par les conseillers de la coopérative que par des groupes d'agriculteur.rices en dehors de la coopérative. Les personnes du groupe utilisant le moins d'intrants étaient souvent engagées dans des collectifs ou participaient fréquemment à des groupes de praticien.nes. De plus ces agriculteur.rices étaient davantage sensibilisé.es aux dangers des pesticides pour l'homme et la nature. Enfin Nave et al. (2013) montrent que pour les mêmes débouchés (vente à la coopérative du grain), c'est le groupe à niveau intermédiaire d'intrants qui ont les meilleurs marges économiques car ils ont des rendement aussi forts voir meilleurs que le groupe d'agriculteur.rice utilisant plus d'intrants.

Il reste une grande marge de progrès pour la culture de blé tendre en France afin obtenir des pratiques plus respectueuses de l'environnement et de la santé ainsi que des filières agro-alimentaires plus durables. Un des leviers pour une transition agroécologique réside dans la gestion de la diversité cultivée.

I. 2 Sélection des plantes et agriculture

I. 2.1 Agroécologie et sélection des plantes

I. 2.1.a Quelle sélection face à un accroissement de la diversité des environnements de culture ?

La diversification des pratiques agricoles en agroécologie et le moindre recours aux intrants de synthèse génèrent un accroissement de la diversité des milieux de culture et de leur variabilité interannuelle. Face à cela, l'amélioration des plantes et plus largement la gestion de la diversité cultivée auront un rôle pivot. En effet la sélection

19. Directive 2009/128/EC
20. La quantité moyenne d'azote organique apportée sur le blé est de 9,5 kg/ha

des plantes peut permettre de développer des variétés adaptées à des environnements de culture très variés tels que en particulier :

— des pratiques agricoles spécifiques comme les cultures associées (Haug et al., 2023), l'Agriculture Biologique (Murphy et al., 2007) ou l'agriculture de conservation des sols (Trethowan et al., 2012).

— des conditions pédo-climatiques diverses comme des milieux marqués par des stress hydriques (Ceccarelli et al., 2007) ou des terres à faible potentiel (Ceccarelli, 1994).

Il y a deux stratégies pour l'adaptation des variétés à une situation donnée :

— la première repose sur la sélection indirecte est réalisée dans des environnements favorables et contrôlés. Certains auteurs (Betran et al., 2003 ; Rajaram et al., 2002) affirment qu'une forte réponse aux intrants et un potentiel de rendement intrinsèquement élevé, combinés à des caractères d'adaptation au(x) stress, amélioreront les performances dans les environnements affectés par ce(s) stress.

— dans la seconde, une sélection directe est réalisée dans les conditions les plus proches des environnements cibles (Ceccarelli et Grando, 1991 ; Rathjen, 1994).

Il est attendu que la sélection indirecte soit plus efficace que la sélection directe si la corrélation génétique entre les environnements cibles et les environnements de sélection est forte [21] et si l'héritabilité au sens strict du caractère d'intérêt dans l'environnement de sélection est faible par rapport à celle dans l'environnement cible (Falconer, 1960). Selon Allen et al. (1978) la station de recherche est l'environnement de sélection idéal car elle peut conduire à une plus grande héritabilité liée à un meilleur contrôle de la variabilité expérimentale. Au contraire, selon (Ceccarelli et Grando, 1991), la sélection en milieu favorable peut sélectionner des caractères inadaptés à l'environnement cible. Dans ce cas cela se traduit par de fortes interactions Génétique × Environnement (GxE) négatives entre l'environnement de sélection et l'environnement cible.
Les interprétations des résultats de certaines expérimentations comparant sélections directe et indirecte, peuvent apparaître contradictoires : par exemple pour la sélection du blé en AB, Annicchiarico et al. (2010) et Le Campion et al. (2014) plaident pour une sélection indirecte alors que Ceccarelli (1996), Gevrek et Atasoy (2012) et Murphy et al. (2007) plaident pour une sélection directe.

Ces contradictions peuvent s'expliquer par la combinaison de nombreux facteurs : la diversité variétale à l'étude, les stress en présence dans les environnements cibles et de sélection ou la manière d'interpréter les interactions GxE. Par exemple dans la figure de 2 de (Le Campion et al., 2014) les interactions GxE peuvent être fortes entre environnements bas niveaux d'intrant (de sélection) et environnements en Agriculture Biologique (cibles). Certains auteurs estiment qu'il faut choisir la stratégie en fonction du potentiel productif de l'environnement cible. Par exemple pour la sélection au stress hydrique, Blum (1996) et Panthuwan et al. (2002) estiment que les interactions GxE sont fortes par rapport au rendement moyen lorsque celui-ci est

21. Cela correspond intuitivement à dire que les environnements sont proches par rapport à la réponse de la plante.

en dessous d'un certain seuil. La sélection directe serait donc intéressante pour les milieux à moins forts potentiels de rendement.
Murphy et al. (2005) proposent de faire un travail d'adaptation variétale spécifique aux pratiques des agriculteur.rices sur chacune de leurs parcelles.
Ce débat peut se situer dans un débat plus large sur la recherche agronomique (Farrington et Martin, 1988) : doit-elle se concentrer sur les terres à haut potentiel ou aussi prendre en compte la spécificité des zones dites marginales ?

I. 2.1.b Sélection des plantes pour, avec et par les agriculteur.rices

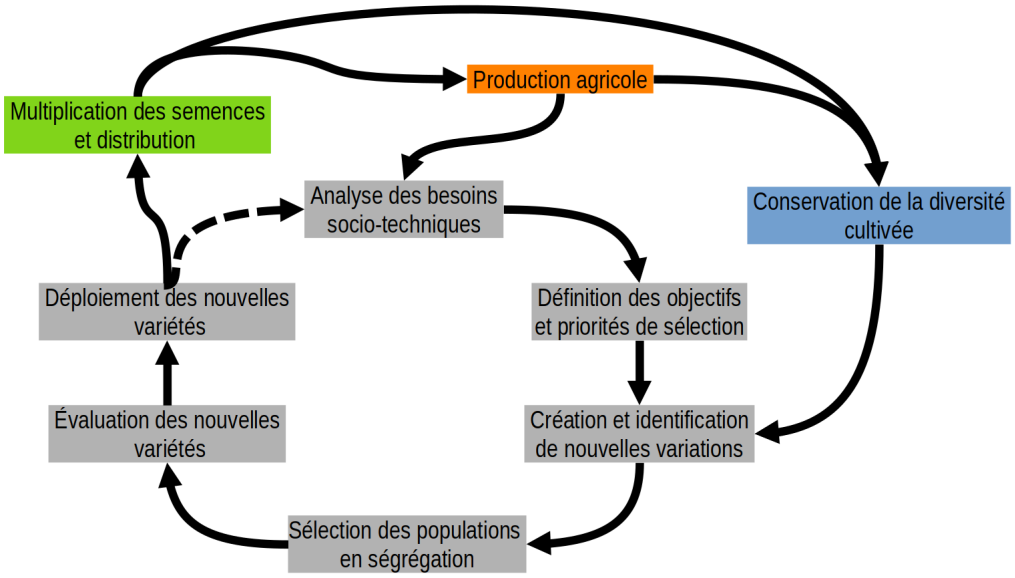


Figure I.5 – Principales étapes d'un programme de sélection (en gris) et autres étapes associées à l'innovation variétale (en couleur, adapté de Ceccarelli et Grando, 2020).

Après la seconde guerre mondiale, dans les pays industrialisés puis dans la plupart des pays ayant vécu la Révolution Verte, un modèle semencier dit "délégatif" s'est implanté dans les régimes agricoles (Bonneuil et Demeulenaere, 2007). Dans ce modèle les fonctions de production agricole, de production de semence, de conservation des ressources génétiques et d'innovation variétale sont séparées selon une logique fordiste. Les agriculteurs et les agricultrices n'ont plus de rôle dans l'innovation variétale et la conservation de la diversité cultivée [22]. C'est à partir des années 90 dans une perspective agroécologique forte (Fig I.1) que les programmes de sélection participative s'institutionnalisent (Becker, 2000 ; Hickey, 2004). Ces approches vont souvent de paire avec des approches participatives de la gestion de la diversité cultivée *in situ* et de la reconnaissance des variétés paysannes comme importantes dans l'innovation (Braun et al., 1997). Les modèles de sélection participative peuvent se définir par la participation des "utilisateurs" des innovations variétales dans toutes les décisions les plus importantes d'un programme de sélection (Ceccarelli et Grando, 2020 ; en gris sur la figure I.5). Les agriculteur.rices collaborent au processus de recherche et de

22. Sauf pour la multiplication des semences qui est réalisée par certain.es agriculteur.ices.

développement permettant une réappropriation de la diversité cultivée par sa gestion et sa sélection (Kloppenburg, 2010) et ainsi une souveraineté semencière. Il existe aussi des programmes de sélection "moins participatifs" où les agriculteur.rices sont impliqué.es uniquement dans les étapes d'évaluation, de déploiement et de multiplication [23] (Weltzien et al., 2003). Ces programmes permettent également de réaliser une partie de la sélection de façon décentralisée (directement dans les environnements cibles). Néanmoins les variétés obtenues ont des taux d'adoption généralement plus faibles, elles sont globalement moins performantes et résilientes, et permettent de créer en moyenne moins de diversité génétique qu'avec un programme de sélection davantage participatif (Ceccarelli et Grando, 2020).

I. 2.1.c Pratiques actuelles de sélection par les agriculteur.rices

Les pratiques de gestion et sélection des plantes ont été beaucoup étudiées selon des points de vue d'ethnologues ou de généticien.nes. Certaines de ces études ont permis d'évaluer l'effet des pratiques de gestion et de sélection paysanne sur la diversité cultivée ou sur des performances d'intérêt (*modalités* et *efficacité*, cf Fig I.2) :

— La grande diversité observée de manioc gérée par les amérindiens Makushi de Guyane est due à leurs pratiques d'introduction d'individus issus de reproduction sexuée [24] associées à la sélection naturelle *diversifiante* [25] et à leurs pratiques d'échanges de semences (Elias et al., 2001).

— Des variétés de riz gérées par les communautés paysannes du delta du Mekong, sont devenues plus tardives, plus uniformes en qualité et moins tolérantes à la sécheresse [26] que les mêmes variétés de riz sorties du centre de ressources génétiques. Les auteur.rices interprètent cela à la fois comme dû à la sélection naturelle et la sélection paysanne en particulier des sélections massales allant jusqu'à la sélection d'une seule plante (Tin et al., 2001).

— La structure génétique des populations de la variété de blé Rouge-de-Bordeaux cultivées par des paysans et paysannes en France est fortement influencée par les échanges de semences, le nombre d'année de culture sur une ferme et les sélections humaines (Thomas et al., 2012).

— Les variétés de blé issues de sélection paysanne en France, peuvent être assez productives lorsqu'elles sont cultivées dans des environnements biologiques favorables (inférieures mais proches des variétés commerciales) mais elles vont surtout bien résister à des conditions défavorables et présentent une bonne stabilité d'une année à l'autre (Goldringer et al., 2020).

— Les sélections massales des paysans et paysannes sur des variétés-populations ont été globalement efficaces en particulier sur le poids de l'épi et le nombre moyen de grains par épi (Frank, 2018 ; Rivière et al., 2015b)

23. Participatory Variety Selection (PVS) en anglais.

24. Les tubercules de manioc se multiplient par multiplication végétative, passer par la voie sexuée est considéré comme une pratique pour la sélection paysanne.

25. Qui dépendent d'une diversité d'environnements ayant chacun un optimum de sélection différent.

26. Le stress est moins présent depuis l'intensification de la production dans les années 90.

D'autres études ont permis de mieux comprendre certains déterminants des pratiques de gestion et de sélection de la biodiversité cultivée (*modalités* et *opportunité* , cf Fig I.2) :

— Selon Johnson (1972), l'expérimentation à la ferme de la diversité cultivée est courante au sein de sociétés agricoles traditionnelles pour choisir le meilleur.

— Selon Rice et al. (1998), les pratiques de sélection du maïs de l'ethnie de Popoluca au Mexique ont évolué suite aux recommandations d'une ONG, avec davantage de sélection sur la plante [27].

— Des combinaisons de traits du manioc sont conservés par sélection pour permettre de continuer de distinguer certains types de variétés (Boster, 1985).

— De nombreuses pratiques de sélection sont influencées par des effets culturels :

1. Les échanges de tubercules de manioc dans des systèmes brésiliens traditionnels sont fortement dépendants des héritages et des mariages (Emperaire et Peroni, 2007) ;
2. Les critères de sélection du sorgho diffèrent selon les groupes ethniques en Ethiopie (Wendmu et al., 2022) ;
3. La manière d'identifier les variétés locales de sorgho diffère en fonction des groupes ethniques du mont de Kenya et de leurs expériences individuelles (Labeyrie et al., 2019).

Très peu d'études ont cherché à étudier d'un point de vue d'agronome les pratiques de gestion et de sélection de la diversité cultivée par les paysannes et paysans en particulier en les reliant au fonctionnement de la ferme (on peut tout de même citer Abay et al., 2008). Ce type d'approche permettrait d'élargir le champs de recherche de l'agronomie en envisageant les pratiques de sélection comme des pratiques agricoles et ainsi de mieux comprendre leur insertion dans la logique productive des fermes.

I. 2.2 L'évolution d'une variété diversifiée au cours des générations

Les variétés de pays, variétés anciennes, variétés commerciales et variétés paysannes [28] diffèrent pour leur diversité intra-variétale. Quelle que soit cette diversité, cultiver une variété dans un environnement et mesurer un trait [29] sur un ensemble de plantes permet de mesurer la variabilité phénotypique de ce trait. Cette variabilité phénotypique intra-variétale recouvre deux dimensions, la diversité génétique et la plasticité (Albert et al., 2011). La diversité génétique correspond aux différences entre génotypes, elle résulte des forces évolutives (dérive génétique, mutation, sélection, migration). La plasticité phénotypique correspond à la capacité de chaque

27. Alors qu'avant leur recommandation, la sélection portait principalement sur les épis récoltés.

28. Ces types de variétés seront définies dans la sous-partie I. 2.3.b.

29. Un trait peut être défini comme une entité mesurable soit à l'échelle d'un individu (comme la hauteur d'une plante) soit à l'échelle de la parcelle (comme le rendement en grain par m^2). Dans ce dernier cas, on peut ramener la mesure à une moyenne de mesures individuelles (par exemple pour le rendement cela correspond à celle du poids moyen de grains des plantes du peuplement ramené à la surface moyenne qu'occupe la plante).

génotype à exprimer des phénotypes différents en réponse aux variations de l'environnement de culture. Une même variabilité phénotypique d'une variété-population peut être due à de nombreux génotypes peu plastiques (par exemple la population p3 dans la figure I.6), peu de génotypes très plastiques (p2) ou un nombre intermédiaires de génotypes ayant une plasticité moyenne (p1). On peut s'attendre à ce que les trois

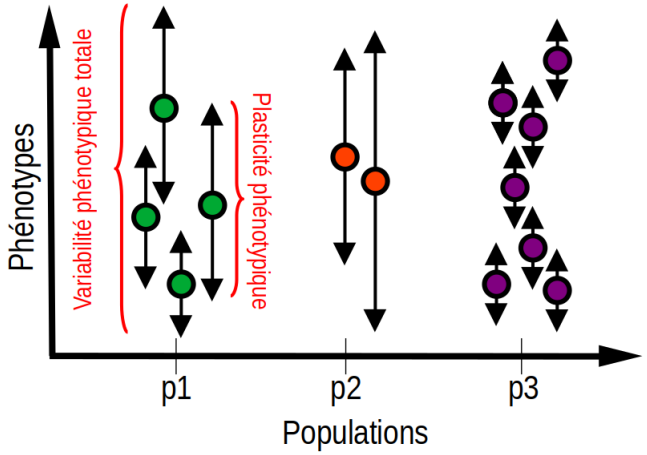


Figure I.6 – Représentation théorique de la variabilité phénotypique intra-variétale dans une gamme d'environnements (adapté de Garnier et Navas, 2013 ; page 124). En abscisse les différentes populations et en ordonnée les phénotypes. Les points de couleur représentent les génotypes et les flèches noires leur plasticité phénotypique.

populations de la figure I.6 n'aient pas les mêmes réponses à des changements environnementaux à court ou long terme. Dans cette partie nous allons donner quelques éléments de compréhension de la sélection de variétés.
Les variétés qui comportent une diversité génétique vont évoluer au cours du temps en fonction notamment (mais pas que) d'une sélection due à leur environnement de culture (Dawson et Goldringer, 2012). La cible de la sélection naturelle est l'organisme dans sa totalité [30], pour qu'il y ait une réponse à la sélection sur un trait entre deux générations, il faut que trois conditions soient remplies (Lewontin, 1970) :

- que les différents individus d'une population aient des valeurs de trait différentes (variation phénotypique) ;
- que les valeurs de trait impliquent des taux de survie et de reproduction différents dans des environnements différents (aptitude différentielle) ;
- qu'il existe une corrélation entre les valeurs de trait des parents et celles des descendants (l'aptitude est héréditaire).

Si l'on applique une sélection humaine, on peut imposer la valeur sélective [31] pour un trait donné, par exemple en sélectionnant uniquement les individus ayant une

30. « Cela signifie que les effets de la recombinaison et de la régulation génétique, tout comme la capacité des phénotypes en développement à répondre à l'environnement, sont aussi importants que l'est la mutation, et même quantitativement plus importants de plusieurs ordres de grandeur » (Mayr et Blanc, 1989 ; page 544). Alors que certains auteurs considèrent la sélection naturelle comme agissant sur un ensemble d'individus ou sur des parties de l'individu (gènes).
31. La contribution d'un individu en nombre de descendants à la génération suivante.

valeur du trait au-dessus d'un certain seuil. On appelle le différentiel de sélection (S) la différence entre la moyenne des valeurs du trait des individus sélectionnés et la moyenne de la population. La réponse à la sélection (R) correspond à la différence entre la moyenne des valeurs du trait des descendants issus de sélection et la moyenne de la population (ensemble de la population de l'année n+1). On peut prédire R en fonction de S grâce au coefficient de régression linaire de l'ensemble des phénotypes des descendants sur les phénotypes des parents d'une population. La prédiction s'écrit alors :

$$R = bS \tag{I.1}$$

Le coefficient de régression linéaire b est aussi un estimateur de l'héritabilité au sens strict h_{ss} c'est l'équation du *sélectionneur*[32].

Tous les sélectionneurs et sélectionneuses sont impliqué.e.s dans un processus d'évolution du vivant mais certaines méthodes de sélection des plantes cultivées sont qualifiées d'*évolutives*[33]. Dans ces méthodes, des populations très hétérogènes génétiquement sont créées et reproduites dans différents environnements année après année (Murphy et al., 2005). La diversité créée peut être sélectionnée de différentes façons. Il s'agit généralement d'enchaîner des cycles de semis-récoltes dans des environnements cibles avec des conditions culturales particulières comme dans l'exemple historique sur l'orge de Suneson (1956).

Il a été montré en station d'essai si une population diversifiée est cultivée sur plusieurs années en différents lieus, il y avait une réduction de la diversité d'une population donnée sur un lieu donnée, car cette population répond à des conditions environnementales particulières, mais la diversité globale pourra être maintenue à l'échelle de l'ensemble des sites (Goldringer et al., 2001 ; Porcher et al., 2004).

Cette approche de sélection évolutive des plantes suppose que les traits d'intérêt comme le rendement sont sélectionnés positivement par la sélection naturelle. Cela a été le cas d'une population d'orge qui a évolué sur 50 générations et qui est devenue plus stable à travers les environnements testés et particulièrement intéressante dans les environnements à faible potentiel (Danquah et Barrett, 2002 ; Soliman et Allard, 1991). Néanmoins selon Dawson et Goldringer (2012), certains traits sélectionnés par la sélection naturelle peuvent influencer négativement le rendement. Par exemple, elles citent la hauteur des plantes qui donne un avantage compétitif au sein de la population hétérogène mais tend à diminuer la production en grain pour un niveau de ressource donné.

Pour maintenir ou sélectionner certains traits désirés,l'*evolutionary plant breeding* peut être combiné avec d'autres pratiques de sélection comme la sélection massale, la sélection récurrente[34], la sélection par filiation monograine[35], suivi de mélanges ou d'autres pratiques de sélection plus complexes (Dawson et Goldringer, 2012).

Des synthèses de la littérature montrent que ces méthodes "*evolutionary plant breeding*" sont appropriées pour des programmes de sélection en collaboration avec des paysans et paysannes et décentralisées dans les fermes. En particulier, les pratiques

32. En anglais *breeder's equation*.
33. En anglais *evolutionary plant breeding*.
34. Enchaîner les cycles de croisement et de sélection massale ou généalogique.
35. Criblage de la diversité en ségrégation dans une panicule ou un épi en semis par graines.

de sélection paysanne permettent de sélectionner des combinaisons de traits adaptées à chaque ferme (Enjalbert et al., 2011 ; Phillips et Wolfe, 2005).

Un projet de sélection participative sur le blé entre le Réseau des Semences paysannes l'équipe DEAP de l'UMR Le-Moulon commencé en 2006. Cette collaboration longe à permis de produire beaucoup de résultats.
En particulier les paysans et des paysannes ont eu la possibilité de vérifier si leur sélection massale effectuée sur des variétés-populations était efficace ou non. Frank (2018 ; page 89) a montré qu'en moyenne la réponse à la sélection R allait bien dans le même sens que le différentiel de sélection S réalisé par des paysans et paysannes (avec R généralement inférieur à S). La réponse à la sélection a été trouvée fortement significative pour deux traits productifs, le poids de l'épi et le nombre moyen de grains par épi.
Dans ce ce même programme de sélection participative, l'effet de la sélection naturelle a été estimé sur quatre traits (la hauteur, le PMG, le poids de l'épi ainsi que la distance entre la base de la dernière feuille et la base de l'épi) lorsque que les variétés-population étaient semées et récoltées sur plusieurs génération (entre 4 et 7) sur une même ferme sans sélection humaine. En utilisant l'équation du sélectionneur sur plusieurs génération et la décomposition quantitative du trait, David et al. (2020) montré que la hauteur des variétés-population a évolué par sélection naturelle et se rapprocherait d'un optimum [36] propre à chaque ferme (Fig I.7).

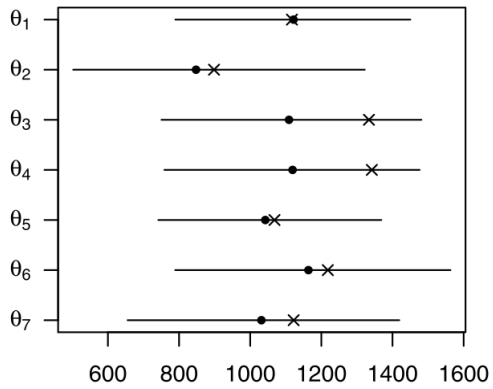


Figure I.7 – Valeurs de hauteur des plantes (mm) pour sept fermes (David et al., 2020). Les points noirs sont les optimums estimés pour la hauteur et les traits noirs correspondent à l'intervalle de crédibilité à 95%). Les croix noires correspondent à la moyenne phénotypique de chaque ferme. Lorsque la valeur phénotypique moyenne est différente de l'optimum alors on s'attend à une évolution du trait par sélection naturelle vers celui-ci. La sélection est supposée stabilisatrice, c'est-à-dire qu'elle favorise les phénotypes proches de la valeur optimale. Les estimations ont été réalisées par un modèle statistique bayésien avec des priors informatifs.

36. Valeur de hauteur vers laquelle convergerait le trait par la sélection naturelle.

I. 2.3 Le blé et son histoire évolutive

La sélection des plantes est un processus d'interaction entre les plantes et l'humanité qui existe depuis plusieurs millénaires mais dont les pratiques et les contextes socio-techniques ont récemment fortement évoluées. Nous allons nous intéresser au cas du blé.

Feldman et Levy (2023) ont résumé les changements historiques des phénotypes des blés en trois "*phases de culture*" : i) la transition de l'habitat sauvage au champ cultivé, ii) les 10 000 ans de culture dans une diversité d'environnements de production puis iii) la sélection professionnelle pour des environnements plus uniformes (Tab I.1). Cette sous-partie vise à présenter des éléments importants de l'histoire évolutive du blé au cours des trois phases. Pour la dernière étape nous nous concentrerons sur la sélection professionnelle en France.

Phase de culture	**Évolution des traits**
Pendant la transition de l'habitat sauvage au champ cultivé	Épi non cassant Augmentation du poids du grain Perte de l'adhérence des glumes (selon les sous-espèces) Perte de la dormance Germination uniforme et rapide Port des plantes érigé Augmentation probable du nombre de grains par épillet Synchronisation de la maturation des différents épis d'une plante
Pendant les 10 000 ans de culture dans une diversité d'environnements de production	Adaptation aux nouveaux environnements régionaux parfois extrêmes Augmentation du tallage (nombre de « tiges » par plante) Augmentation de la taille du blé Développement de la canopée avec des feuilles plus horizontales Augmentation de la compétitivité avec les autres blés et adventices Modification du processus de contrôle des stades de développement (vernalisation...) Augmentation du nombre de grains par épillet Augmentation de la résistance à l'égrainage Amélioration des propriétés du grain
Pendant le siècle dernier par la sélection professionnelle pour des environnements de production plus uniformes	Augmentation du rendement dans des champs densément peuplés et réduction de la compétitivité entre plantes au sein du peuplement Canopée avec des feuilles érigées Réduction de la taille des plantes Augmentation de la réponse aux fertilisants et autres produits de synthèse Augmentation de la résistance à l'égrainage Augmentation de la résistance aux maladies et aux ravageurs Augmentation de la résistance à la verse Augmentation de l'indice de récolte Amélioration des caractères technologiques du grain

Table I.1 – Évolution des blés durant ses trois *phases de culture* (adapté de Feldman et Levy, 2023 ; page 646)

I. 2.3.a Domestication des blés

Généralement, on nomme blé les espèces appartenant au genre Triticum (Tab I.2) de la famille des Poacées. Selon la classification de Van Slageren (1994), ce genre comprend quatre sous-espèces de blé sauvages, 15 sous-espèces domestiquées et une sous-espèce semi-sauvage [37]. Tout les blés sont fortement autogames, c'est-à-dire qu'ils s'autoféconden t. Néanmoins il peut y avoir des fécondations croisées entre différents blés interféconds par exemple pour le blé tendre on estime qu'il y a environ 5% de fécondation croisée (Enjalbert, 1999).
L'amidonnier sauvage est issu d'une hybridation spontanée suivi de doublement chromosomique entre Triticum urartu (génome A) et une sous-espèce (éteinte) d'Aegilops (génome B), il y a environ 800 000 ans (Marcussen et al., 2014). Ce croisement est particulier car le génome tétraploïde de l'amidonnier est stable comme un génome de plante diploïde, seules les chromosomes homologues peuvent s'apparier (Riley et Chapman, 1958), on parle alors de blé allotétraploïde. Avant les premiers signes de domestication [38] il y aurait eu une longue période de cueillette et de culture (avec ensemencement) de céréales sauvages (Willcox et al., 2008). La domestication aurait eu lieu progressivement et de manière diffuse avec de nombreux échanges de gènes avec les parents sauvages (Allaby et al., 2008). On retrouve des traces de l'amidonnier domestiqué il y a environ de 10 500 ans dans la région du Croissant fertile (Zohary et al., 2012). Elle se traduit principalement par la perte de la dormance de graines (empêchant une part des semis de lever), la perte de la capacité de se disperser à maturité grâce à un rachis rigide, une augmentation du poids moyen des grains et des plantes à port plus érigé (première *phase de culture* du blé dans le tableau I.1).
On estime qu'il y a environ 9 000 ans, a lieu une seconde hybridation spontanée suivi d'un doublement chromosomique entre un blé tétraploïde (génome BA), probablement l'amidonnier domestiqué, et l'Aegilops *tauschii* (génome D) (Feldman et Levy, 2023 ; page 478). De cette hybridation est né le grand épeautre et l'ensemble de l'espèce *Triticum aestivum* qui sont allohéxaploides. Le génome D permet une meilleure résistance au froid et aux environnements extrêmes que les blés trétaploïdes (Dubcovsky et Dvorak, 2007). La diffusion des blés cultivées se serait réalisée principalement progressivement avec les migrations des populations humaines (Cavalli-Sforza, 2002) [39]. Selon Feldman et Levy (2023) (page 646) cette deuxième *phase de culture* des blés entraîne de nombreuses adaptations dont l'augmentation de la compétitivité vis-à-vis des autres pieds de blés et des adventices, l'adaptation aux environnements régionaux parfois extrêmes, l'augmentation du nombre de grains par épillet [40], l'adaptation aux usages humains (deuxième *phase de culture* du blé dans le tableau I.1).

37. Le blé de Tibet après avoir été domestiqué s'est réadapté aux conditions sauvages (Shao et al., 1983).
38. Adaptation des traits de plantes à l'agriculture et aux usages humains.
39. Les échanges de semences seraient donc un déterminants moins impactant.
40. Inflorescences sur les épis.

Ploïdie	Espèce	Génome	Sous-espèce	Nom commun
Triticum diploïde ($2n = 14$)	*Triticum monococcum*	A^m	ssp. *aegilopoides*	Engrain sauvage
			spp. *monoccum*	Engrain
	Triticum urartu	A		⊘ (sauvage)
Triticum tétraploïde ($2n = 28$)	*Triticum timopheevii*	GA	spp. *armeniacum*	Timopheevii sauvage
			spp. *timopheevii*	Timopheevii
	Triticum turgidum	AB	spp. *dicoccoides*	Amidonnier sauvage
			spp. *dicoccon*	Amidonnier
			spp. *paleocolchicum*	Blé de Géorgie
			ssp. *durum*	Blé dur
			spp. *turgidum*	**Blé Poulard**
			spp. *polonicum*	Blé de Pologne
			spp. *turanicum*	Blé de Khorassan
			spp. *carthlicum*	Blé de Perse
Triticum héxaploïde ($2n = 42$)	*Triticum zhukovskyi*	GAA^m		⊘ (domestiqué)
	Triticum aestivum	ABD	spp. *spelta*	Grand épeautre
			ssp. *macha*	⊘ (domestiqué)
			ssp. *aestivum*	**Blé tendre**
			ssp. *compactum*	Blé compact hérisson
			spp. *sphaerococcum*	Blé d'Inde
			spp. *tibetanum*	Blé du Tibet (semi-sauvage)

Table I.2 – Classification des blés (adapté de Van Slageren, 1994).
⊘ indique aucun nom commun. En **gras** les blés étudiés dans l'expérimentation de cette thèse.

I. 2.3.b Contexte récent de l'évolution du blé en France

Le blé tendre serait arrivé en France il y a environ 6 000 ans. Matterne (2000) suggère qu'à l'époque romaine il y aurait eu une expansion du blé tendre au détriment des blés vêtus [41] (amidonniers, grand épeautre) en Île-de-France et au Sud de la Picardie, ce qui serait une marque de la romanisation de la Gaule. Il y aurait eu alors une grande diversité de blés de pays en France. Hunault de la Peltrie (1856) recense 17 variétés de blé tendre cultivées rien que dans le Maine et Loire. Certaines variétés de pays étaient remarquablement adaptées aux conditions locales. Sagnier (1888) [42] décrit le « blé de rivière » comme un blé cultivé près de Mâcon« *qui jouit de la propriété particulière de pouvoir, lors des débordements de la Saône, supporter d'être submergé pendant 15 jours et même pendant trois semaines* ». A partir de la fin du XIX^e siècle, des maisons de sélection privées se consacrent à la création et la vente de semences. Ces variétés ont vite un fort succès dans les régions céréalières. En 1927, les variétés issues de ces maisons de sélection couvrent plus du tiers des surfaces de blé en France (Schribaux, 1928).

41. Blé qui ont les glumelles adhérentes au grain. Les glumelles sont des enveloppes foliacées où s'insèrent les barbes s'il y en a.
42. En se référant à un discours d'Henry de Vilmorin.

En 1942 en France, le catalogue officiel devient juridiquement contraignant et le CTPS [43] est créé. L'objectif est d'inciter à l'achat des variétés améliorées et d'assurer la protection du sélectionneur ainsi que de l'usager. Pour un certain nombre d'espèces (initialement le blé, l'orge, la pomme de terre et le maïs), seules les semences des variétés inscrites au catalogue peuvent être commercialisées. Pour être inscrit au catalogue à partir de 1949, les variétés doivent être distinctes des variétés déjà inscrites, présenter des caractéristiques homogènes entre plantes et stables (tous les lots de semences devant présenter les mêmes caractéristiques ce sont les critères DHS : Distinction, Homogénéité, Stabilité). Pour le blé tendre, qui est une espèce autogame la variété développée est la "lignée pure" c'est-à-dire une variété issue de la multiplication d'un individu quasiment homozygote sur l'ensemble de son génome. Ce qui a pour conséquence de « *discipliner la propension foisonnante du vivant à varier et à évoluer entre les mains des paysans afin que ces derniers endossent le rôle de simples utilisateurs d'un phénotype figé développé par le seul sélectionneur* » (Bonneuil et Thomas, 2009 ; p 94).
En 1952 pour le blé tendre, la VAT [44] impose une nouvelle condition pour être inscrit au catalogue. Le blé candidat est évalué sur un réseau d'essais selon un certain nombre de critères [45] et doit obtenir une note globale au-dessus d'un seuil défini réglementairement. Cette évaluation reposait initialement sur six réseaux régionaux et pour chaque région trois types de sols (terres riches, moyennes ou pauvres) soit 18 réseaux. En 1964, elle s'est réduite à deux régions (variétés tardives au Nord, variétés précoces au Sud) sans distinction des types de sol (Bonneuil et Thomas, 2009 ; p 107). Aujourd'hui pour le blé tendre d'hiver, quatre réseaux existent, trois en conduite conventionnelle [46] (tardif au Nord, demi-tardif au centre-Nord et précoce au Centre-Sud) et un sur toute la France en agriculture biologique (AB) [47]. Ces réseaux, qui ont de grandes aires géographiques, ainsi que le système d'évaluation VAT [48] par une note globale, favorisent la stratégie de sélection indirecte, ce sont les variétés adaptées aux conditions de culture des stations (conditions favorables) et présentant une bonne tolérance aux maladies fongiques qui seront avantagées (troisième phase de culture du blé dans le tableau I.1). L'une des conséquences de la mise en place de ce système est que les pratiques agricoles n'agissent plus sur l'évolution de la diversité cultivée comme dans les deux précédentes *phases de culture*. En effet, à court ou moyen terme les nouveaux semis sont réalisés via des semences rachetées. Les pratiques liées à la sélection et la gestion de la diversité cultivée par les agriculteur.rice.s se sont réduites au choix variétal des semences qui est généralement fortement restreint par les organismes en charge de la multiplication et la vente des semences (coopératives et négoces

43. Comité Technique Permanent de la Sélection, organisme public chargé d'inscrire les variétés au catalogue et de définir les règles de contrôle des semences.
44. Valeur agronomique et technologique.
45. Le système de cotation évolue en concertation avec la filière pour définir les traits variétaux d'intérêt.
46. Où en plus de la conduite avec fongicide, une conduite sans fongicide est testée pour évaluer les résistances variétales aux maladies.
47. Depuis 2021.
48. VATE depuis 2012 avec l'ajout de critères environnementaux.

généralement) et à la possibilité de réaliser des mélanges variétaux [49] ou d'espèces. Selon Bonnin et al. (2014), il y aurait eu une diminution de 50% de la diversité génétique des blés sur le territoire Français au cours du siècle dernier. Dans le système semencier français quelques assouplissements du cadre réglementaire ont vu le jour récemment. En particulier depuis 2016, Il est devenu possible d'échanger ou de vendre des semences de variétés non inscrites au catalogue entre agriculteurs dans le cadre de l'entraide agricole. Et depuis 2022, il est devenu possible de vendre des populations hétérogènes et destinées à l'AB si elles sont notifiées en tant que Matériel Hétérogène Biologique. Ces modifications réglementaires pourraient favoriser le déploiement de nouvelles pratiques de sélection à la ferme pour une meilleure adaptation des variétés à la diversité des agrosystèmes.
En s'appuyant sur avec l'histoire évolutive des blés nous définirons quatre catégories de variétés que nous utiliserons par la suite :

— Les variétés de pays qui sont les variétés paysannes cultivées avant 1884 (la première variété issue de croisement contrôlé, Dattel, est créée en 1884) ou bien après mais issues de sélection massale [50] seulement. Selon Harlan (1975), les variétés de pays sont des populations variées et dynamiques, mais toujours reconnaissables.

— Les variétés "anciennes" sont les variétés obtenues entre 1884 et 1950 par sélection généalogique [51]. Ces populations conservent une part de diversité intra-variétale (selon Bonneuil et al., 2012 ; environ un dixième de la diversité intra-variétale des variétés de pays).

— Les variétés commerciales récentes (dites variétés commerciales) sont les variétés obtenues par des entreprises de sélection privées ou publiques et inscrites au catalogue officiel. Comme elles répondent aux critères DHS, elles sont considérées génétiquement fixées et homogènes.

— Les variétés paysannes récentes (dites variétés paysannes). Selon le réseau Semences Paysannes, une variété paysanne est « *un commun inscrit dans une co-évolution entre les plantes cultivées, les communautés et les territoires [...]. Elles sont issues de populations dynamiques reproduites par le cultivateur, au sein d'un collectif ayant un objectif d'autonomie semencière. Elles sont et ont toujours été sélectionnées et multipliées avec des méthodes non transgressives de la cellule végétale et à la portée du cultivateur final, dans les champs, les jardins, les vergers conduits en agriculture paysanne, biologique ou biodynamique. Ces semences sont renouvelées par multiplications successives en pollinisation libre et/ou en sélection massale, sans autofécondation forcée sur plusieurs générations. Les semences paysannes, avec les savoirs et savoirs-faire qui leur sont associés, sont librement échangeables dans le respect des droits d'usage définis par les collectifs qui les font vivre* [52] ». Comme les variétés de pays, les variétés

49. Cette pratique est en constante augmentation depuis les années 2000 et occupe 19.5% de la sole en blé tendre en France.

50. La sélection massale consiste à choisir des individus d'une population diversifiée pour faire une nouvelle population (sélection positive) ou pour les enlever de la population (sélection négative).

51. La sélection généalogique commence par un croisement contrôlé entre deux plantes complémentaires puis la sélection a lieu pendant leur fixation.

52. Définition de 2019, consentie collectivement lors d'une Assemblée Générale du RSP. `https:`

paysannes de blé tendre ont une forte diversité intra-variétale (Frank et al., 2020).

Dans la plupart des mouvements de réappropriation de semences par des paysans et paysanne, le travail de gestion et de sélection est réalisé à partir de diversité cultivée issue de la fin de la seconde *phase de culture* (variétés de pays) ou des variétés du début de la troisième *phase de culture* (variétés anciennes).

I. 2.4 Le programme de sélection participative du blé tendre

Le programme de sélection décentralisée et participative du blé tendre dans lequel s'insère ma thèse a été initié par le Réseau de Semences Paysanne (RSP) et l'équipe Diversité, Évolution, et Adaptation des Populations, DEAP de l'UMR GQE-Le Moulon. Ce projet s'inscrit dans une recherche participative où les paysan.ne.s, les animateur.trices du RSP et les chercheur.euses co-construisent le programme en partenariat. Ils se sont réunis autour de leur intérêt pour la gestion de la diversité du blé, néanmoins ils ont des attentes différentes. Celles des paysan.nes ont été formulées lors d'une réunion au Moulon « *Nous ne sommes pas juste à la recherche de nouvelles variétés. Nous cherchons une démarche permanente, une façon de travailler qui nous permet de cultiver et sélectionner afin d'améliorer les populations de chaque ferme. Le travail de sélection doit donc guider l'évolution des plantes, les aider à se diversifier et s'adapter aux contextes et aux micro-environnements locaux* » (DEAP, 2010). Les chercheur.es sont aussi motivé.e.s par le développement de méthodes et d'outils génériques pouvant être utilisés dans d'autres contextes et/ou par d'autres acteur.ices, ainsi que par la production de connaissances académiques sur l'impact des pratiques de sélection et de des organisations collectives sur l'évolution de la diversité gérée, avec l'objectif de publier les résultats dans des revues scientifiques. Les actrices et acteurs de ce programme se sont entendu.es pour définir trois principaux objectifs :

1. Créer des variétés-populations adaptées aux conditions locales, aux pratiques des paysan.ne.s, à leurs modes de transformation.
2. Développer des méthodes et des outils opérationnels pour la gestion de la biodiversité cultivée et la sélection à la ferme.
3. Renforcer l'apprentissage et l'autonomie des collectifs en matière de gestion et de sélection des semences.

Ce programme a permis de développer de nouvelles variétés populations adoptées par les paysan.nes, d'imaginer de nouvelles manières de s'organiser collectivement (Berthet et al., 2020 ; Rivière et al., 2013), d'étudier l'adaptation locale (David et al., 2020 ; Frank et al., 2020), d'évaluer l'efficacité de la sélection massale (Frank, 2018 ; Rivière et al., 2015b ; p 87), d'évaluer agronomiquement certaines variétés issues de sélection participative (Goldringer et al., 2020) de créer des outils génériques d'aide à la gestion et sélection collective des blés (De Oliveira et al., 2020 ; Frank, 2018 ; Rivière et al., 2015a ; p 31), accompagner des collectifs sur leur pratiques de gestion de la diversité à l'aide de la modélisation participative (Rouger,

//www.semencespaysannes.org/les-semences-paysannes/qui-sommes-nous.html

2022). Cependant, la spécificité des pratiques et des environnements de culture associés aux variétés paysannes n'a pas encore été étudiée alors qu'ils semblent être un des facteurs essentiels pour la sélection décentralisée. De plus, on peut supposer qu'il y a des relations entre les pratiques de sélection à la ferme et leur intégration dans le système de production des fermes. Pour cela il serait important d'évaluer les environnements de culture et les variétés avec l'expertise paysanne ou à l'aide de modèles statistiques adaptés aux dispositifs spécifiques de l'expérimentation à la ferme.

I. 3 L'expérimentation agronomique et l'expérimentation à la ferme.

L'agriculture n'a pas attendu l'institution de la recherche agronomique pour expérimenter. Selon Saad (2001), la posture d'investigation liée à l'expérimentation est l'un des comportements à l'origine de l'agriculture. Cette démarche expérimentale serait de manière consciente ou inconsciente inhérente à l'activité agricole (Johnson, 1972 ; Kummer et al., 2017). Les sciences dites expérimentales comme l'agronomie utilisent et développent des démarches expérimentales souvent sophistiquées pour produire des connaissances.

Nous allons retenir deux définitions de l'expérimentation. Pour Lyon (1996 ; citant Okali et al., 1994), l'expérimentation au sens large est définie par deux aspects essentiels, i) la création de modalités ou le suivi de l'état initial de l'objet à expérimenter et, ii) l'observation et le suivi des résultats ou des effets. L'expérimentation au sens étroit est la démarche d'investigation qui « tente la reproduction du phénomène pour comprendre comment A et B [53] sont liés » (Hénin, 1999 ; page 49).

L'expérimentation (au sens large comme au sens étroit) permet un apprentissage qui peut être représenté par le cycle de Kolb (Fig I.8 Kolb, 1983). L'apprentissage alterne phases d'action et de réflexivité. L'expérience concrète est suivi d'une phase d'observation réflexive conduisant à une conceptualisation des phénomènes intervenues durant l'action permettant d'imaginer de nouvelles hypothèses qui pourront être testées au cours d'une phase d'expérimentation active, source d'une nouvelle expérience concrète qui boucle ainsi le cycle.

I. 3.1 Principes de l'expérimentation au champ selon Henin

Nous avons décrit plus haut certaines spécificités du champ cultivé (partie I. 1.3.b. Hénin (1999) propose de caractériser la démarche expérimentale associée à cette objet. Selon lui (page 46), cette démarche expérimentale est toujours incomplète et à vocation finalisée. Elle est définis par son caractère « *mixte* » c'est-à-dire entre la démarche systématique en conditions naturelles [54] et la démarche en conditions

53. A et B sont deux objets à l'étude.

54. Démarche des sciences naturelles :« on peut citer la géographie botanique, la pédologie, la climatologie : ce sont des sciences où l'on connaît des éléments isolés dont on se propose de faire la synthèse pour créer des "types" » (Hénin, 1999 ; page 44).

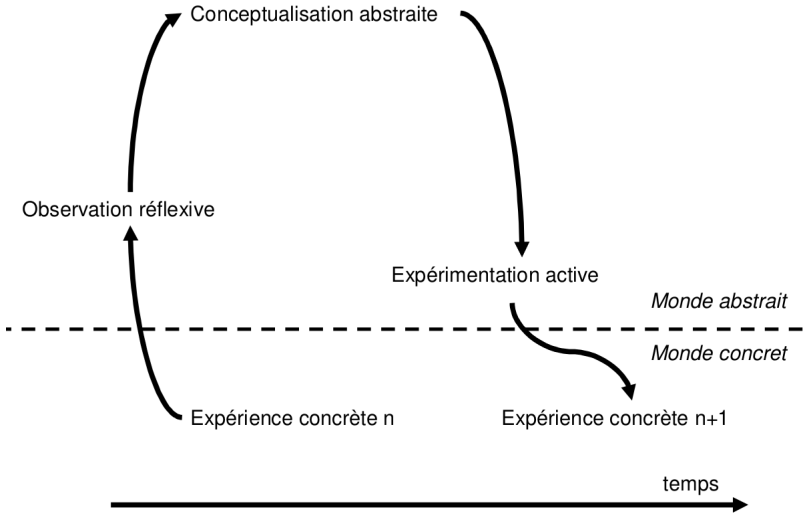


Figure I.8 – Cycle d'apprentissage de Kolb (Chantre, 2011).

contrôlées [55]. Cette démarche serait moins rigoureuse que les deux démarches dont elle est issue, néanmoins, cette démarche incomplète est nécessaire car c'est la seule permettant de répondre aux problèmes pratiques propres au champ cultivé.

En plus de ce caractère « *mixte* » et de sa valeur pratique, l'expérimentation au champs comprend des éléments communs avec l'expérimentation en général. Tout d'abord, des connaissances *a priori* permettent de formuler des hypothèses que l'expérimentation vise à vérifier (Hénin, 1999 ; page 49). Ces hypothèses portent uniquement sur un sous-ensemble (X) de l'ensemble des facteurs (F) intervenant sur l'objet d'étude (Y) :

$$Y = f(F), \quad F = X + W + Z \tag{I.2}$$

Avec F l'ensemble des facteurs qui interviennent sur l'objet d'étude (Y), X les facteurs qui visent à être mis en évidence par l'étude, W les facteurs contrôlés [56] par le dispositif de l'étude et Z les facteurs négligés dans l'étude (Hénin, 1999 ; page 60).

Chaque hypothèse élémentaire vise à comprendre comment un facteur X est lié à l'objet d'étude Y et parfois comment et pourquoi un facteur X est lié à Y.

Pour répondre au « pourquoi » (Hénin, 1999 ; page 94) propose de caractériser les liens entre un facteur X et l'objet à l'étude Y (Tab I.3).

Dans le premier cas du tableau I.3, le facteur X et l'objet d'intérêt Y ont uniquement une relation d'occurrence, si l'un est présent alors l'autre est probablement présent mais aucun lien causal ne les relie, par contre cette forte corrélation qui les relie est sans doute due au fait que X et Y sont sous l'action d'une même cause. Par exemple, il y a souvent une forte corrélation entre le rendement de l'orge (X) et le rendement du blé (Y), néanmoins aucun lien direct ne les relie (Slafer et Savin, 2023)

55. Démarche de l'ingénieur : « on connaît le phénomène complexe [...] mais on veut en faire une analyse plus exhaustive pour s'en rendre parfaitement maître » (Hénin, 1999 ; page 45).

56. Par exemple la conduite culturale si elle est identique pour toutes les modalités ou l'hétérogénéité du sol si l'échantillonnage au sein de la parcelle est approprié.

Nature de la relation	La présence de X par rapport à Y est : Nécessaire	Suffisante	Forme de prévision	Mécanisme de vérification
Covariant strict	-	+	Probable	En agissant directement sur X, on ne modifie pas Y.
Cause partielle	+	-	Plausible	Si X n'existe pas, Y n'existe pas, mais X existe sans Y.
Cause complète	+	+	Certain	Si X n'existe pas, Y existe pas. Si X existe, Y existe obligatoirement.

Table I.3 – Action d'un facteur X sur un objet d'étude Y (adapté de Hénin, 1999)

Le facteur X peut être utile pour la prédiction de Y mais pas pour sa compréhension.

Dans le second cas, X est responsable d'une partie « de la structure » de Y. Il va également y avoir une corrélation entre X et Y. La modification de X entraîne une modification de Y et la présence de X (ou son absence) est nécessaire à Y. On peut par exemple expliquer de manière causale une partie du rendement du blé tendre par l'indice de nutrition azoté (Justes et al., 1994).

Dans le dernier cas, X est nécessaire et suffisant pour arriver à Y. Comme par exemple en laboratoire, lorsque les conditions sont fortement contrôlées, il est possible de connaître avec quasi-certitude les stades phénologiques d'une plante de blé.

Selon Hénin (1999) « ce qui fait la science ce sont les liens directs » (X est nécessaire à Y) étant donné que l'étude de cause complète n'est pas pertinente au champ, c'est l'étude de causes partielles qui est importante pour la création de connaissances en agronomie.

Ensuite Hénin (1999) propose des éléments pour vérifier ces hypothèses malgré le caractère incomplet de l'expérimentation agronomique. Une hypothèse sera vérifiée quand « dans les limites de précision données et pour une extension connue des facteurs, extension fixée expérimentalement [57], toutes les conséquences de l'hypothèse sont vérifiées [58] ». La vérification est toujours approchée par la prise en compte de la précision et par l'approximation du domaine de validité de l'expérimentation. Cette approximation du domaine de validité est la prévision et « n'a de sens que sous forme d'une probabilité ».

Enfin Hénin (1999 ; page 75, 76 et 140) indique que les practicien.nes expérimentant à la ferme, comme les scientifiques, ont une démarche incomplète et que celle-ci par contre est d'avantage subjective et est moins rigoureuse dans leur conceptualisation abstraite. Pourtant, « il ne faut pas perdre de vu que la méthode scientifique donne parfois de moins bons résultats pendant la période de début que la connaissance intuitive du praticien, qui peut correspondre à une analyse moins incomplète des phénomènes ». « Nous voulons dire par là que le praticien paraîtra plus savant et sera plus efficient que le scientifique. [...] Enfin, l'expérience empirique n'est pas

57. Son extension est la délimitation des conditions d'exploration de l'expérimentation

58. C'est le principe de convergence : « si l'hypothèse est vraie on peut en déduire des conséquences, pour valider l'hypothèse il faut valider toutes ces conséquences indépendamment les unes des autre »

communicable [...] L'immense supériorité de la connaissance rationnelle [59] [...] c'est d'être fixée et communicable ».

On peut se demander, si au lien d'opposer praticien.nes et scientifiques expérimentant dans le domaine agricole, il ne serait pas plus constructif de réfléchir à des manières d'hybrider leur savoirs et savoirs-faire.

I. 3.2 L'expérimentation par les agriculteur.rices

Lyon (1996) propose trois formes d'expérimentations agronomique réalisées par des agriculteur.rices. La première est *l'expérimentation par l'action*, elle est analogue à l'expérimentation système, c'est-à-dire un enchaînent d'"essais et erreurs" associés à des objectifs [60]. Le second type d'expérimentation est *l'expérimentation par chance*, c'est-à-dire lorsque les conditions d'observation d'un phénomène sont telles qu'il est possible de déduire une cause expliquant l'observation [61]. Le troisième type est *l'expérimentation comparative*, lorsque volontairement, on teste plusieurs modalités en même temps.

En s'inspirant du cycle de Kolb (1983), Catalogna et al. (2018, 2022) ont introduit deux notions complémentaires pour décrire et analyser l'activité d'expérimentation à la ferme i) la situation agricole qui qualifie la mise à l'épreuve à la ferme d'une pratique, à court terme (par exemple une année donnée) et ii) l'itinéraire d'expérimentation qui représente les combinaisons logiques et chronologique entre situations expérimentales sur plusieurs années autour d'un même thème agroécologique (Fig I.9).

Catalogna et al. (2018) ont repéré et étudié 17 agriculteur.rices dans le Sud-Est de la France ayant déjà réalisé des expérimentations sur leur ferme. Ils ont identifié dix types de situations expérimentales [62] (Tab I.4). Dans cette étude, les situations expérimentales correspondaient principalement à des *expérimentations par l'action* (161/181) et peu à des *expérimentations comparatives* (20/181). Selon eux, cette faible proportion d'expérimentation comparatives est due au fait que les agriculteur.ices n'ont pas suffisamment de temps pour tester plusieurs modalités. Ils et elles préfèrent tester uniquement hypothèses qu'ils considèrent comme les plus prometteuses sur la base des connaissances dont ils disposent au moment d'initier l'expérimentation. *L'expérimentation par chance* étant par définition involontaire, elle est à part et permet en générale de proposer des hypothèses agroécologiques à vérifier par une expérimen-

59. Je ne pense pas qu'on puisse dire que les connaissances des praticien.ces ne sont pas "rationnelles" et je ne pense pas que c'est ce que voulais dire Hénin (1999).

60. L'expérimentation système en recherche peut se distinguer l'expérimentation par l'action des agriculteur.rices par une plus forte explicitation des modifications du système et leur raisons. En particulier, la méthode insiste sur l'analyse critique des objectifs globaux, les stratégies agronomiques pour atteindre ces objectifs ainsi que les règles de décision permettant de mettre en place ces stratégies (Deytieux et al., 2012).

61. Hénin (1999 ; page 47) cite l'exemple de Alexis Millardet qui observe des vignobles proches de la route dans le Médoc qui n'ont pas été touchés par le mildiou alors que le reste est fortement infesté. Il apprend ensuite que les locaux mettent du vert-de-gris sur les feuilles pour éviter les chapardeurs. Il en déduit que le vert-de-gris permet de protéger les vignes du mildiou.

62. La typologie a été réalisée à partir des données d'enquête par une analyse factorielle multiple.

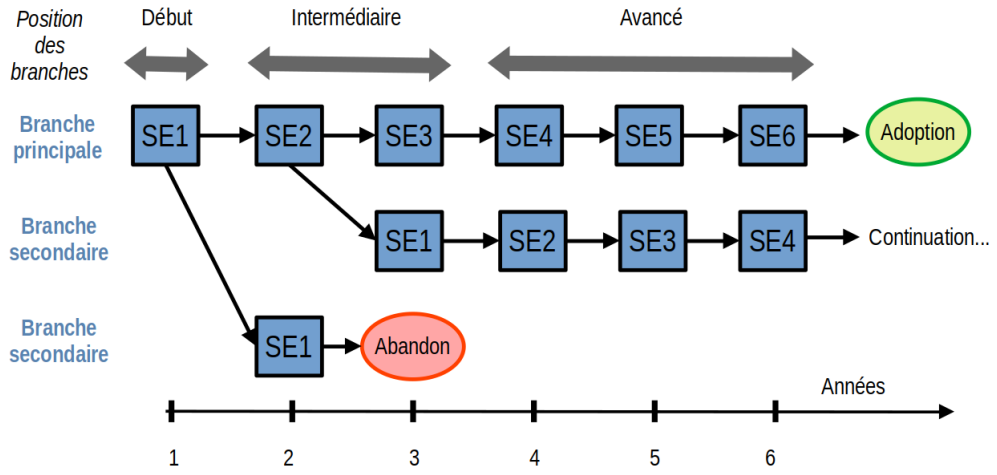


Figure I.9 – Le cadre conceptuel de l'itinéraire expérimental (traduit et adapté de Catalogna et al., 2022).
Les termes "Adoption" et "Abandon" indiquent le moment où la pratique expérimentée est soit adoptée par l'agriculteur, soit abandonnée.

tation volontaire[63] (les itinéraires d'expérimentation décrits par Catalogna et al. (2018 ; annexe 9, ITEs de "JMF") peuvent commencer par cela.

Les changements de pratiques en agriculture sont généralement alimentées non pas par une, mais une série d'expérimentations comme une succession d'essais-erreurs qui conduisent à adopter ou plusieurs pratiques nouvelles. Catalogna et al. (2022) propose le cadre conceptuel de l'itinéraire d'expérimental pour donner à voir et analyser ces dynamiques expérimentales (avec quasiment les même agriculteur.rice). Pour cela ils se sont appuyés sur quatre variables quantitatives[64] et de descriptions qualitatives basées sur leur propre expertise et la représentation visuelle des itinéraires d'expérimentation. Ce cadre permet une compréhension approfondie des interrelations entre les situations expérimentales successives qui n'a jamais été décrites auparavant.

I. 3.3 L'expérimentation comparative et méthodes statistiques.

La démarche d'expérimentation comparative a beaucoup évolué à travers la recherche agronomique. Nous allons présenter une histoire (non-exhaustive) de cette démarche.

Selon Massibot (1945), l'histoire de l'expérimentation comparative en agronomie aurait commencé en 1848 à Rothamstead. Ces première expérimentations étaient côte-à-côte et testaient généralement différentes fumures dans des modalités non répétées. La robustesse des résultats reposait à la fois sur l'expertise des expérimentateur (par exemple M. Lawes « connaissait à fond chacune des particularités de son terrain ») et sur la répétition dans le temps de la même expérimentation sur le même champ

63. Hénin (1999) consacre un chapitre à cela "Chapitre IV, l'observation et sa méthode".
64. Nombre de situations expérimentales, nombre de branches, nombre d'années d'expérimentation et intensité d'expérimentation (c'est-à-dire le nombre de situations expérimentales divisé par nombre d'années d'expérimentation).

Type	Nom	Description
Les expérimentations visant l'amélioration d'une pratique		
1	Améliorer les performances agronomiques d'une pratique	Les agriculteur.rices ont déjà utilisé la pratique testée et tentent maintenant d'améliorer les performances agronomiques.
2	Améliorer les performances en termes économiques ou en termes de confort de travail	Les agriculteur.ices ont déjà testé les processus agroécologiques qu'ils ciblent. Ils adaptent alors les pratiques pour les rendre plus faciles ou moins coûteuses à mettre en œuvre.
3	Pour transposer une pratique	Les agriculteur.ices essaient de transposer la logique expérimentée précédemment à une autre partie du système de culture.
4	Répéter l'expérience précédente à l'identique ou avec des changements mineurs	Les agriculteur.rices testent une pratique précédemment évaluée et répètent l'expérience précédente pratiquement sans changement.
5	Améliorer la faisabilité d'une pratique grâce à un changement mineur	Les agriculteur.ices testent une pratique déjà expérimentée afin d'améliorer leur maîtrise de cette pratique.
Les expérimentations ratées		
6	Faute de pouvoir mettre en œuvre la technique	L'expérience est interrompue avant son terme parce que l'agriculteur.ice rencontre des difficultés techniques pour mettre en œuvre les pratiques comme prévues.
7	Par manque d'efficacité agroécologique	L'expérience est interrompue avant son terme parce que l'agriculteur découvre des défaillances agroécologiques majeures liées à la pratique testée.
Les expérimentations innovantes pour l'expérimentateur		
8	Où une nouvelle logique agroécologique est testée pour la première fois	Une nouvelle logique agroécologique est testée pour la première fois, découverte en dehors de la ferme ou imaginée.
Les expérimentations comparatives		
9	Comparaison de deux ou plusieurs modalités d'une technique	Plusieurs modalités d'une technique sont comparées sur une même parcelle afin d'identifier la meilleure modalité.
10	Une modalité technique comparée à une référence	Une modalité technique est comparée à une référence pour vérifier si elle vaut la peine d'être adoptée.

Table I.4 – Typologie des situations expérimentales de 17 agriculteur.rices dans le Sud-Est de la France (traduit et adapté de Catalogna et al., 2022)

(créant par ailleurs des problèmes agronomiques, par exemple les blés sur le Champ de Woburn passent entre 1877 et 1896 de 8 q/ha à 6.5q/ha en moyenne). Hormis la répétition sur la même parcelle, ce type de dispositif (modalités côte-à-côte et non-répétées) est très proche de ce qui est fait à la ferme dans les systèmes traditionnels (Johnson, 1972) ou dans l'agriculture de pays industrialisés (Catalogna et al., 2018). Holtsmark et Larsen (1905), proposent de mieux prendre en compte hétérogénéité du terrain avec un dispositif où le témoin est répété dans l'essai (toutes les trois, quatre ou cinq micro-parcelles). Les rendements des modalités étaient alors comparés à la moyenne des témoins les plus proches [65].

Ronald Fischer arrive en 1919 à Rothamstead pour y analyser les essais agronomiques. Quelques années plus tard, Fisher (1931) propose trois principes pour les

65. Cette méthode pouvait être efficace si l'erreur de mesure est faible ce qui n'était pas leur cas (Massibot, 1945).

expérimentations comparatives :

- *La répétition* un certain nombre de fois de chacune des modalités dans une même expérience, ceci afin de pourvoir estimer la variabilité résiduelle c'est-à-dire la variabilité qui n'est pas liée aux modalités étudiées.
- *La randomisation* (répartition au hasard) des différentes modalités au sein des différentes microparcelles, ceci afin d'obtenir des estimations non-biaisées de la variabilité résiduelle.
- *Le contrôle local*, il s'agit de pouvoir estimer un effet non-biaisé de la structure du dispositif expérimental, tel que les effets "blocs", ceci afin de diminuer la variabilité résiduelle.

Ces principes permettent de mieux estimer l'incertitude associée aux estimations des effets des modalités à l'étude (facteurs X dans l'équation I.2), ceci en estimant l'erreur expérimentale de manière robuste (facteurs Z dans l'équation I.2) et en augmentant la précision associée à l'expérimentation en estimant explicitement les contrôles locaux (facteurs W dans l'équation I.2). Ces critères liés à l'analyse statistique des données issues de l'essai deviennent très importants pour l'établissement du dispositif expérimental, même s'ils doivent rester un moyen et non une fin, comme le note Eden (1935 ; cité par Massibot, 1945). Ces principes ont grandement influencé les travaux ultérieurs en matière d'expérimentation comparative en agronomie et dans l'ensemble des disciplines expérimentales (Preece, 1990).
L'inférence statistique consiste à *induire* les valeurs qu'aurait les modalité à l'étude sur l'ensemble des microparcelles du champs d'expérimentation [66] à partir des données mesurées sur seulement un échantillon de quelques microparcelles (Fig I.10) [67]. Il sera alors possible de comparer les modalités entre-elles et ces résultats seront valables sur l'ensemble du champs d'expérimentation. Si l'on souhaite généraliser des résultats, il faut étendre son échantillonnages à davantage de champs d'expérimentations (diversité pédologique et parfois diversité de pratiques culturales) et d'avantage d'années (diversité de conditions météorologiques).

Les agronomes se sont appropriés ces outils avec généralement une vision très descendante de la recherche agronomique, un résultat est découvert en milieu contrôlé, ensuite l'expérimentation agronomique permet d'évaluer l'utilité de cette découverte au champ en "banc d'essais" pour enfin la faire adopter par les agriculteur.rices (Massibot, 1945).

Depuis Fischer, de nombreux développement dans les dispositifs expérimentaux et leur analyse ont eu lieu (Dagnelie, 2008). Nous présenterons plus particulièrement deux de ces développements que nous avons mobilisés dans la thèse : i) l'inférence bayésienne ii) l'évaluation variétale multi-locale.

I. 3.3.a L'inférence bayésienne

Bien qu'il fut un féroce critique de cette approche, c'est Ronald Fisher qui introduit l'expression statistique bayésienne (Fienberg, 2006). Cette approche se distingue des

66. Le dispositif expérimental répartie les modalité entre microparcelles.
67. Il est possible d'étendre ou de réduite la population cible à induire.

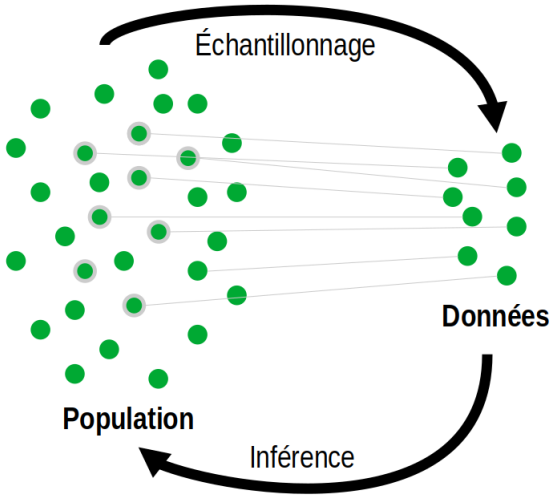


Figure I.10 – L'inférence statistique.
En agronomie, la population peut être la parcelle toute entière, un réseau de parcelles ou un ensemble d'environnements spécifiés appelé population d'environnements cibles (en anglais : *target population of environments*).

approches classiques dites "fréquentistes" par l'utilisation de lois de probabilité sur l'ensemble des objets de l'inférence. Comme son nom l'indique, elle se base sur le théorème de Bayes, avec A et B deux événements :

$$P(A|B) = \frac{P(A) \times P(B|A)}{P(B)} \tag{I.3}$$

où ($P(A|B)$ est la probabilité que A se produise sachant que B s'est produit nommée aussi probabilité conditionnelle.

Avant toute inférence bayésienne, il est nécessaire de définir certaines des distributions de probabilité associées au paramètre que l'ont souhaite inférer θ (ou un ensemble de paramètres mais cela ne change rien au principe) et aux données observées y :

- $P(y|\theta)$ est la vraisemblance des données, c'est-à-dire la distribution de probabilité de y en fonction du paramètre θ.
- $P(\theta)$ est la distribution *a priori* du paramètre à estimer (aussi appelées prior). C'est la représentation probabiliste de nos connaissances sur θ. Il est possible de proposer une distribution visant à minimiser l'information apportée par ce prior ou au contraire à en donner une grande importance.
- $P(y)$ est la densité marginale associée à l'observation, c'est à la dire la vraisemblance des données quelque soit la valeur des valeurs du paramètre θ possibles [68].

En appliquant la formule de bayes (équation I.3) on peut alors inférer la distribution conditionnelle de θ sachant les y observées avec la formule :

68. C'est un concept assez abstrait et en pratique complexe à calculer mais nécessaire à l'inférence bayésienne.

$$P(\theta|y) = \frac{P(\theta) \times P(y|\theta)}{P(y)} \tag{I.4}$$

où $P(\theta|y)$ est nommé la distribution a posteriori ou postérior.

Bien qu'anciennes, les statistiques bayésiennes ont très peu été utilisées en pratique avant les années 80's à cause des difficultés d'implémentation de la méthode bayésienne. En effet la densité marginale associée à l'observation $P(y)$ est un terme compliqué, voir impossible a estimer de manière analytique [69]. Grace à l'augmentation de la puissance des ordinateurs et le développement de méthodes d'échantillonnages efficaces basées sur les algorithmes de MCMC [70] l'approche bayésienne est devenue plus accessible. La méthode bayésienne a le grand avantage de permettre de modifier facilement la forme du modèle aux hypothèse que l'on veut tester. Alors que pour le développement de nouveaux modèle par les méthodes classiques fréquentistes, il est nécessaire d'exprimer explicitement la totalité de la vraisemblance, ce qui peut-être très laborieux avec des modèles complexes.

Exemple de modèles bayésiens. On peut prendre un exemple simple, comme l'estimation de la moyenne des rendements d'une variété par département. Si l'échantillonnage de la variétés les départements est bien représentatif de chaque département, alors on peut estimer les moyennes entre environnements de manière indépendantes avec le modèle non hiérarchique suivant :

$$Y_{ij} = \mu + D_j + \varepsilon_{ij} \text{ avec } \varepsilon_{ij} \sim N(0, \sigma^2) \tag{I.5}$$

où Y_{ij} est le rendement de la variété dans la parcelle i et le département j, μ la moyenne générale, D_j l'effet département et ε_{ij} la résiduelle.

Par contre si l'échantillonnage n'a pas pu être bien représentatif de certains départements, il est recommandé d'utiliser un modèle qui fait l'hypothèse que les effets départements sont reliés par une même loi de distribution. Cette hypothèse permettra d'avoir des estimations des effets département plus robustes et moins sensibles au biais d'échantillonnage. Le modèle sera dit hiérarchique car les effets D_j sont hiérarchisés par une loi conditionnelle. Ce modèle peut s'écrire comme :

$$Y_{ij} = \mu + D_j + \varepsilon_{ij} \text{ avec } D_j \sim N(0, \sigma_D^2) \text{ et } \varepsilon_{ij} \sim N(0, \sigma^2) \tag{I.6}$$

où σ_D^2 est la variance entre D_j sur l'ensemble du territoire considéré. Le modèle I.5 sera lui qualifié de non hiérarchique.

Ces modèles peuvent être représentés par un graphe acyclique orienté [71] pour vi-

69. J'entends par méthode analytique la résolution d'un système d'équations.

70. Avec les méthode de Monte-Carlo avec chaînes de Markov, l'estimation des termes n'est pas exacte comme avec les méthodes analytiques mais approchée. Des indicateurs permettent de vérifier que l'approximation est correct comme la taille effective de l'échantillon des MCMC.

71. *Directed Acylcic Graph* en anglais. Un graphe est dit orienté si les liens entre ces éléments sont tous orientés (représentés par des flèches). Un graphe est dit acyclique si les liens entre éléments ne forment aucun cycle.

sualiser les paramètres à estimer en fonction de leur niveau de hiérarchisation (fig I.11). Cette représentation sera réutilisée dans la suite du manuscrit.

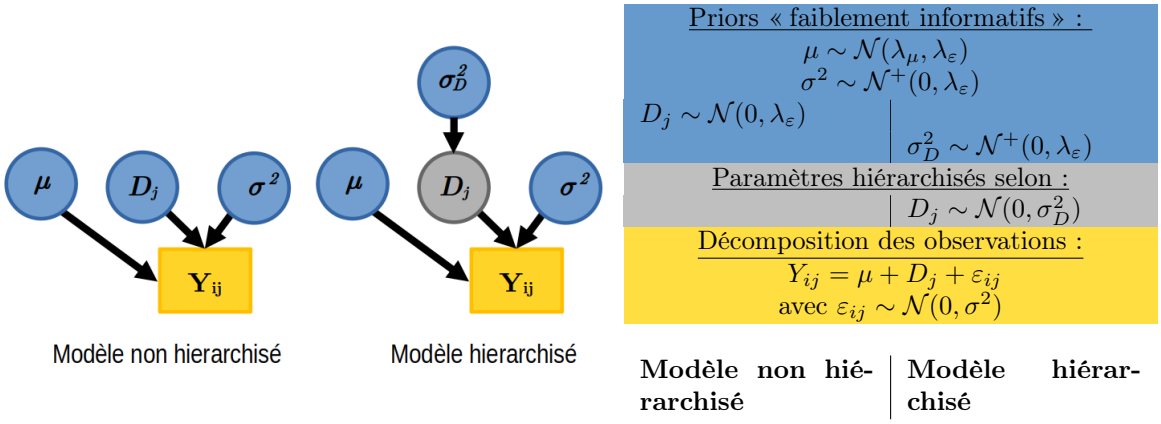


Figure I.11 – Graphe acyclique orienté des deux modèles et équations associées. Un graphe acyclique orienté représentant un modèle bayésien permet de distinguer les données (en jaune), les paramètres inconnues (en bleu) et paramètres hiérarchisés (parfois sur plusieurs niveaux) qui se situe toujours entre les données et les paramètres inconnus (en gris). *Ces entités sont relier par des lois conditionnelles* (représentés par des flèches et explicités par le tableau à droite de la figure). En statistiques bayésiennes, il est nécessaire d'expliciter les priors associés à chaque paramètre inconnue (en haut du tableau à droite de la figure). Dans cette exemple ont été choisis des priors « faiblement informatifs » par rapport aux données c'est-à-dire que la vraisemblance dominera et les piors ne seront pas importants (il est souvent conseillé de faire une analyse de sensibilité pour vérifier l'influence des priors utilisés) ici, λ_ε et λ_μ sont connues (par exemple on peut prendre respectivement la variance et la moyenne empirique de Y).

Les modèles hiérarchiques [72] sont des modèles pertinents lorsque le phénomène que l'on étudie est structuré en différentes échelles et en particulier lorsque l'échantillonnage dans la population cible est complexe (non aléatoire, peu d'échantillons, erreurs de mesures...).

En statistiques fréquentistes le vocabulaire est particulier pour parler des estimations des effets génétiques lorsqu'ils sont hiérarchisé par une loi normale. Ils sont qualifiés de meilleures prédictions linéaires non biaisées [73] ce qualificatif de prédiction (alors que ce n'est pas statistiquement une prédiction mais une estimation) est dû au contexte de sélection animal dans lequel cette méthode a été développée (Henderson, 1977).

72. Les modèles hiérarchiques sont utilisées en statistiques fréquentistes et bayésiennes, néanmoins le terme est généralement associé au statistiques bayésiennes car cette méthode les implémente très facilement et dans une plus grande diversité (hiérarchisation d'effet moyen, d'écart-type...).
73. En anglais *Best Linear Unbiaised Predictor (BLUP).*

I. 3.3.b Évaluation du génotype dans ses environnements

Lorsqu'un trait est mesuré dans plusieurs environnements et pour différents génotypes, on peut décomposer de manière statistique sa valeur (Bradshaw, 1965) en :

$$P_{ijk} = \mu + G_i + E_j + (G{\times}E)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad \text{(I.7)}$$

où P_{ijk} est la valeur du trait du génotype i dans l'environnement j et la micro-parcelle k ; μ est la moyenne générale du trait sur l'ensemble des génotypes et des environnements ; G_i est l'effet du génotype i ; E_j est l'effet de l'environnement j ; $(G{\times}E)_{ij}$ est la déviation au modèle additif $G_i + E_j$ due aux interactions entre le génotype i et l'environnement j ; ε_{ijk} est la déviation à $G_i + E_j + (G{\times}E)_{ij}$ de la micro-parcelle k due au micro-environnement et aux erreurs de mesure.
Cette décomposition de la valeur du trait est statistique, c'est-à-dire que des hypothèses sont faites pour estimer chacun des termes [74]. En fonction des objectifs [75] de l'étude, il faut adapter les hypothèses statistiques et l'échantillonnage des individus (par exemple davantage d'environnements et de répétitions au sein des environnements si l'on veut des prédictions variétales dans de nouveaux environnements plus robustes).
L'agronome peut être intéressé par l'ensemble des termes de l'équation I.7 :

- L'effet G_i : quelles variétés se comportent mieux ou moins bien en moyenne sur l'ensemble des environnements et pour quelles raisons ?
- L'effet E_j : dans quels environnements la valeur du trait est plus haute ou plus basse et et pour quelles raisons ?
- L'effet $(G{\times}E)_{ij}$: identifier certaines variétés qui s'écartent du classement prédit par les effets moyens du génotype G_i et se demander pourquoi ?
- L'effet ε_{ijk} (Sebillotte, 2006 ; page 8) : Notre protocole de mesure est-il robuste ? Pourquoi le comportement moyen des variétés diffère en fonction des zones de l'essai ?

En plus des effets estimés, l'équation I.7 permet d'estimer des indicateurs qui quantifient les différentes sources de variabilité qui s'appliquent au trait d'intérêt. Ainsi la variabilité résiduelle permet de caractériser la précision d'un essai. La précision expérimental d'un essai peut se mesurer par l'écart-type des déviations ε_{ijk} ou écart-type résiduel dans un essai donné. La variabilité environnementale et de l'interaction $G{\times}E$ permettent de caractériser la stabilité d'une variété sur le réseau d'essais.

On peut se placer dans le cadre où l'on classe les environnements en fonction de la productivité moyenne des variétés dans ces environnements. Cela permet de qualifier les variétés en fonction d'une augmentation des potentiels environnementaux.
Des indicateurs de stabilité variétale permettent aussi de qualifier les variétés, les plus connus sont la stabilité statique (Becker et Leon, 1988) S_i^2 [76] et la stabilité dynamique de Wricke (1962) W_i [77] (voir figure I.12). La stabilité statique décrit la

74. Par exemple on peut définir que ε_{ijk} suit une loi normale.
75. Décrire la variabilité, prédire des phénotypes dans certains environnements...
76. Appelée aussi variance environnementale associée à la variété.
77. Appelée aussi écovalence variétale.

manière dont un génotype maintient une performance constante quel que soit l'environnement, tandis que la stabilité dynamique décrit pour une variété l'absence d'écart entre les performances mesurées et les performances attendues (en générale avec le modèle additif). Pour chacune des variétés i, ces indicateurs peuvent être estimés comme des variances (Turbet Delof et al., 2024) [78] :

$$W_i = Var((G{\times}E)_{ij}) \tag{I.8}$$

$$S_i^2 = Var(E_j + (G{\times}E)_{ij}) \tag{I.9}$$

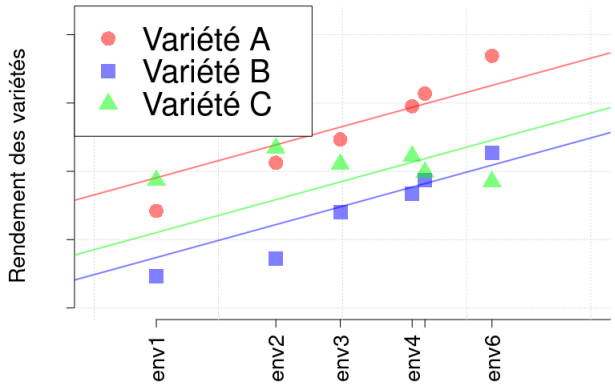


Figure I.12 – Représentation des rendements de trois variétés dans un réseau d'essais fictif. En abscisse sont les moyennes environnementales mises en ordre croissant et en ordonnée les phénotypes des variétés dans chaque environnement. Les droites de couleur représente les estimations du modèle additif. La variété C est statiquement plus stable, car son phénotype varie moins à travers les environnements que les variétés A et B. Les variétés A et B sont dynamiquement plus stables, car elles présentent moins d'écart au modèle additif que la variété C.

Classiquement, on distingue les variétés à adaptation spécifique (adaptées à une gamme étroite de milieux) et les variétés à adaptation large (adaptées une large gamme de milieux Brancourt-Hulmel et Lecomte, 1994). Par exemple, Il y a davantage d'environnement où la variété A est mieux classé que la variété B (figure I.13), on dira qu'elle a une adaptation plus large. La variété B, quant à elle, sera adaptée spécifiquement aux environnements à faible potentiel. La manière de définir l'adaptation large est sujette à polémique, car la largeur du spectre d'adaptation des variétés dépend des environnements d'évaluation (Ceccarelli, 1989). Par exemple dans la figure I.13 si on enlève les deux environnements les plus performant (à 60 et 70q/ha) alors c'est la variété B qui aura une adaptation plus large et la variété A qui sera spécifiquement adapté au milieu à fort potentiel. Les réseaux d'essais variétaux représentent davantage les environnements à forts potentiels, ce qui emmène certains auteurs tels que Ceccarelli (1994) à juger que les variétés généralement définie comme ayant un large spectre d'adaptation sont en fait des variétés plutôt adaptées à des conditions

78. Dans Wricke (1962), W_i n'est pas une variance mais une somme d'écarts quadratiques.

optimales pour la culture.
On peut s'intéresser à l'héritabilité au sein d'un réseau d'essais pour savoir l'effort

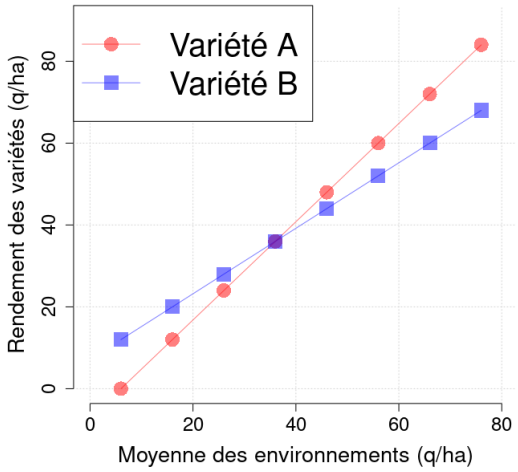


Figure I.13 – Représentation d'interactions génotype × environnement : A et B sont des variétés archétypales sélectionnées respectivement dans des environnements à haut et bas potentiel (adapté de Ceccarelli, 1994).
En abscisse les rendements moyens par environnement en ordonnée les rendements des variétés par environnement.

de sélection à mettre en œuvre pour faire évoluer un trait. L'héritabilité au sens large d'un trait (h^2_{sl}) peut être définie comme la part de variance phénotypique expliquée par la variance génotypique (G_i), ce qui peut s'écrire :

$$h^2_{sl} = \frac{Var(G_i)}{Var(P_{ij})} \tag{I.10}$$

Cet indicateur dépend des variétés à l'étude (l'héritabilité sera nulle s'il n'y a pas de différences entre variétés), du trait (l'héritabilité du rendement sera généralement moins élevée que celle de la hauteur de la plante car le rendement est un caractère génétiquement plus complexe que la hauteur Rivière et al., 2015b), et des conditions environnementales (h^2_{sl} sera d'autant plus faible que l'environnement sera variable).

Selon Lecomte et al. (2010), la plupart des sélectionneurs du blé utilisent en routine ce type de méthodes pour évaluer les variétés dans des réseaux d'essais en particulier pour attribuer les variations de rendement à l'environnement, au génotype, à l'effet des blocs ou à l'erreur expérimentale, et pour évaluer la précision des tests de comparaison entre variétés. Par contre ils utilisent moins la stabilité et surtout l'adaptation des variétés à différents types d'environnements. Dans les programmes de sélection décentralisée et participative, il y a un grand enjeu à analyser l'interaction ($G \times E$) dans le but de sélectionner pour une adaptation locale.

I. 4 Questions de recherche et organisation du manuscrit

Ma thèse s'intéresse à la sélection paysanne. Elle vise à en étudier les pratiques et à évaluer les variétés qui en sont issues en adoptant un point de vue d'agronome. Nous supposons que l'environnement de production et l'expérimentation sont déterminants pour comprendre ces deux objets (pratiques de sélection et comportement des variétés). Cette thèse vise à aborder les cinq questions suivantes :

Q1: Quelles sont les pratiques de sélection paysanne ?

Q2: Comment s'insèrent les pratiques de sélection paysanne dans la logique de fonctionnement des fermes ?

Q3: Quels sont les principaux stress impactant l'élaboration du rendement dans les essais à la ferme ?

Q4: Est-ce que certaines variétés sont mieux adaptées à certains environnements de culture ? Pourquoi ?

Q5: Quelles méthodes d'analyse pour évaluer et caractériser le comportement des variétés dans un réseau d'essais à la ferme ?

Le chapitre II présente le groupe – paysans, animatrices, animateurs, chercheur.e– qui ont collaboré à la thèse, la démarche de recherche participative ainsi que le dispositif expérimental co-construit.
Le chapitre III vise à répondre aux questions Q1 et Q2. Tout d'abord nous décrirons la diversité des pratiques de sélection paysanne à la ferme (ces pratiques comprennent la gestion, la sélection au sens strict, la multiplication et la conservation de la diversité cultivée). Puis nous tenterons de mieux comprendre comment ces pratiques de sélection s'insèrent dans l'environnement de production des fermes. Cette étude se concentrera sur les logiques individuelles des paysans et paysannes bien que ces pratiques soient également influencées par des déterminants sociaux (associations, réseaux d'échanges de semence...). Pour répondre à ces questions, 10 paysans ayant participé à l'expérimentation de la thèse et mettant en œuvre la sélection paysanne sur leur ferme ont été enquêtés.
Le chapitre IV visera à répondre aux questions Q3 et Q4. Pour cela, nous chercherons à expliquer l'élaboration du rendement des variétés paysannes à l'aide d'un diagnostic agronomique participatif qui combine le diagnostic interne de l'expérimentateur.rice et le diagnostic externe de l'équipe de recherche.
Enfin le chapitre V vise à répondre à la question Q4 et Q5. Pour cela nous avons développés des modèles statistiques bayésiens qui sont plus robustes et qui permettent d'expliquer une part de l'interaction génotype-environnement (régression de Finlay-Wilkinson et régression factorielle).

Pour répondre aux question Q3, Q4 et Q5, nous nous appuierons sur une expérimentation collective visant à évaluer des variétés issues de sélection paysanne et à mettre en lien les performances observées avec les spécificités des environnements de culture. 32 expérimentations à la ferme ont été conduites sur les années 2022 et 2023 et ont donné lieu à la collecte de données sur les variétés testées (composantes du

rendement, stades phénologiques...) et à la description des environnements de culture (sol, climat...).

Les enquêtes permettront de mieux comprendre la place de expérimentation dans l'activité de sélection paysanne, mais elle fourniront aussi une description des variétés en expérimentation à l'origine d'hypothèses *a priori* sur leur comportement qui pourront être testées expérimentalement. Le diagnostic agronomique participatif (chapitre IV) ainsi que l'évaluation statique des variétés sur le réseau d'essais (chapitre V) concourent par deux approches différentes à caractériser les variétés. Il sera intéressant de discuter de la contribution de chaque approche à la connaissance des sensibilités des variétés aux environnements de culture.

I. 5 Parcours et positionnement de thèse

I. 5.1 Parcours

J'ai réalisé ma formation d'ingénieur agronome à l'école nationale supérieure d'agronomie et des industrie alimentaire à Nancy (ENSAIA). Cette proximité géographique avec l'un des agronomes les plus connus de France, Mathieu de Dombalse, m'a donné envie de lire le livre d'histoire agronomique de Knittel (2009) sur ce personnage qui a fortement marqué ma vision de l'agronomie. A travers mon stage à la ferme en polyculture-élevage bio de Lorraine, j'ai pu avoir une première expérience du monde de l'agriculture paysanne. Le manque de variétés adaptées à leurs pratiques et terroirs m'a donné envie de travailler pour la sélection des plantes pour ce type d'agriculture. J'ai réalisé mon stage de fin d'étude dans l'équipe d'Isabelle Goldringer sur « la caractérisation des forces de sélection mises en œuvre dans un programme de sélection participative et décentralisée ». J'ai exprimé à la fin de ce stage mon envie de continuer en thèse dans l'équipe. Nous avons alors commencé à réfléchir à un sujet de thèse et des moyens de financement.
J'ai par la suite réalisé deux ans de CDD d'ingénieur de recherche avec Arnaud Gauffreteau pendant lesquels j'ai cherché à caractériser la sensibilité de variétés à différents stress environnementaux et à identifier les traits sous-jacents à partir de performances observées dans un réseau d'essais multi-sites et pluriannuel.
Durant cette période, Arnaud Gauffreteau a bien voulu participer au projet de thèse et nous avons mis l'accent sur la dimension agronomique de la thèse. J'ai pu commencer ma thèse en décembre 2020.

I. 5.2 Positionnement de thèse

Au cours de ma thèse la réflexion sur ma posture a été fortement structurée par le livre de Léo Coutellec *La science au pluriel* (Coutellec, 2015a). Son livre m'a aidé à me positionner dans la diversité des sciences associées à ma thèse et me questionner sur ma responsabilité scientifique.

Cette thèse pour répondre à ses objets d'étude va utiliser plusieurs disciplines i) l'agronomie systémique pour étudier les pratiques agricoles dans les systèmes de pro-

duction, ii) l'agronomie "analytique" pour d'étudier l'élaboration du rendement, iii) la génétique quantitative pour caractériser les sources de variabilité (génétique, environnementale, $G \times E$...) expliquant les réponses des variétés paysannes dans les essais à la ferme, vi) la génétique évolutive pour comprendre l'évolution des variétés et v) les statistiques afin d'estimer de manière robuste des effets et leur l'incertitude.
J'ai utilisé dans cette thèse plusieurs styles de raisonnements scientifiques (Hacking, 1992) comme i) la vérification de modèles hypothétiques par exploration du réel (Chap. III, IV et V), ii) la classification du divers par comparaison (Chap III et IV), iii) l'analyse statistique (Chapitre IV et V) et iv) le style démonstratif par postulat puis déduction des conséquences pour le développement de nouveaux modèles statistiques (Chap V). Cette thèse n'est donc pas centrée sur une théorie disciplinaire ou un style de raisonnement scientifique, mais elle est centrée sur ces deux objets de recherche : les pratiques de sélection paysanne et les comportements de variétés paysannes aux champs [79]. Je pense que cette diversité de voies permet de comprendre les objets étudiés dans davantage de dimensions et de pouvoir l'enrichir par les liens entre les dimensions explorées ainsi que par les liens entre les deux objets. Une étude plus classique aurait permis sans doute d'aller plus loin dans un nombre restreint de dimensions mais moins loin dans la compréhension globale des objets étudiés ce qui était une attente des acteurs et actrices avec qui j'ai pu travailler. Cela pour répondre à la critique de Lacey et Lefèvre (2015) qui reproche aux sciences agronomiques de considérer trop souvent leur objet d'étude par des approches globales sans tenir compte des contextes associés. Ce constat serait selon lui un des freins majeur à une transition agroécologique.

Dans son livre, Coutellec (2015a) invite tous les chercheurs et les chercheuses à assumer leurs valeurs non-épistémiques [80] sous-jacentes à leurs processus de recherche. Par exemple les valeurs d'égalité sociale, de libre accès aux connaissances ou le prestige académique sont des valeurs non-épistémiques qui a priori peuvent impacter le processus de recherche. Ainsi il s'agit d'« *assumer ses options, ses points de vue en les explicitant. Ce serait donc ainsi une forme de contrat social, qui accompagnerait et compléterait le contrat méthodologique de la science* » selon Coutellec (2015a).

Le positionnement de recherche est dispensable pour tout chercheur et chercheuse et de manière d'autant plus évidente pour ceux et celles qui mènent des recherches appliquées à un certain domaine comme ici l'agriculture. Comme tous les chercheurs et chercheuses en agronomie, mon travail consiste principalement à produire des connaissances pour aider l'agriculture. Mais quelle agriculture et quels acteur.rice.s de l'agriculture ?

79. Nous avons vu plus haut comment Hénin (1999) propose de qualifier l'expérimentation au champ comme un objet *mixte* devant être étudié à la fois par des approches systématiques et analytiques.

80. Les valeurs épistémiques sont les valeurs indispensables pour la création de connaissances fiables, selon Ruphy (2006), elles sont constituées d'un ensemble de valeurs universelles (par exemple l'intégration dans le système de connaissances existant) et un ensemble de valeurs qui ne sont jugées pertinentes qu'en fonction d'une discipline et d'un objet (par exemple l'exactitude en mathématiques ou l'adéquation empirique pour les sciences non-mathématiques.

La recherche, elle n'est pas autonome [81]. Ici les questions de recherche Q1 à Q4 intéresse en premier lieu les praticien.nes et agronomes concerné.es par les pratiques de sélection paysanne (je pense qu'ils sont une grande minorité vis-à-vis de leurs pairs) mais elle apportent des connaissances à toutes celles et ceux qui cherchent à faire évoluer les pratiques agricoles vers l'agroécologie.
Q5 répond une question plus générale de méthodologie statistique : quelles modèles statistique est robuste lorsque les données sont fortement incomplètes et que les données extrêmes sont courantes ? Bien que pertinente pour l'expérimentation à la ferme ces méthodes peuvent être utiles pour de nombreuses autres applications.
Q3 répond à des questions méthodologiques d'agronomie clinique qui selon moi sont pertinentes pour contextualiser les études agronomiques et réaliser une recherche-action participative.

Comme toutes les recherches, ma recherche vise à élaborer des connaissances de manière impartiale [82]. Pour cela nous avons utilisé des "critères épistémiques" de différentes disciplines :

— l'utilisation d'un cadre systémique pour tester les hypothèses de l'étude (Chapitre III, IV).

— La prise en compte explicite de l'incertitude des données quantitatives, qui est la spécificité des statistiques (Chapitre IV et V).

— Une démarche de diagnostic [83] analysant les résultats des essais et du réseau d'essais en prenant en compte les connaissances expertes des expérimentateur.rices. (Chapitre IV)

Coutellec (2015a), définit une *impartialité impliquée* qui met l'accent sur l'explicitation du contexte pour montrer son influence sur les résultats obtenus. Nous avons essayé d'avoir une démarche d'impartialité impliquée même si le chapitre V est davantage décontextualisé que les autres chapitre de résultats.

Comme toutes les recherches, ma recherche n'est pas neutre [84]. Elle vise a créer des connaissances pour des acteur.rice dans un type d'agriculture donné : l'agriculture paysanne [85]. Je pense que l'agriculture paysanne actuelle en France est dans une situation similaire à l'agriculture biologique des années 70 en France. Selon Bellon (2022), cette dernière était méconnue et rencontrait peu d'intérêt si ce n'est pas un rejet par la recherche, jusqu'à que des chercheurs pionniers la considère comme un objet légitime et porteur de grandes potentialités (Berthou et al., 1972). Par ailleurs, je suis donc d'accord l'analyse de Ploeg (2014 ; page 46-47) lorsqu'il dit que « *Ce que la science a créé, c'est une image et un modèle d'agriculteur entrepreneur, un modèle qui définit ce que doivent être l'agriculteur, ses pratiques et les relations qu'il*

81. Coutellec (2015a) définie l'autonomie comme le fait de choisir ses objets de recherche sur lesquelles on va s'investir, juste par intérêt scientifique, c'est à dire *une soif de connaissances.*

82. Coutellec (2015a) définie l'impartialité comme la capacité à rendre compte du réel et à s'y soumettre pour la vérification.

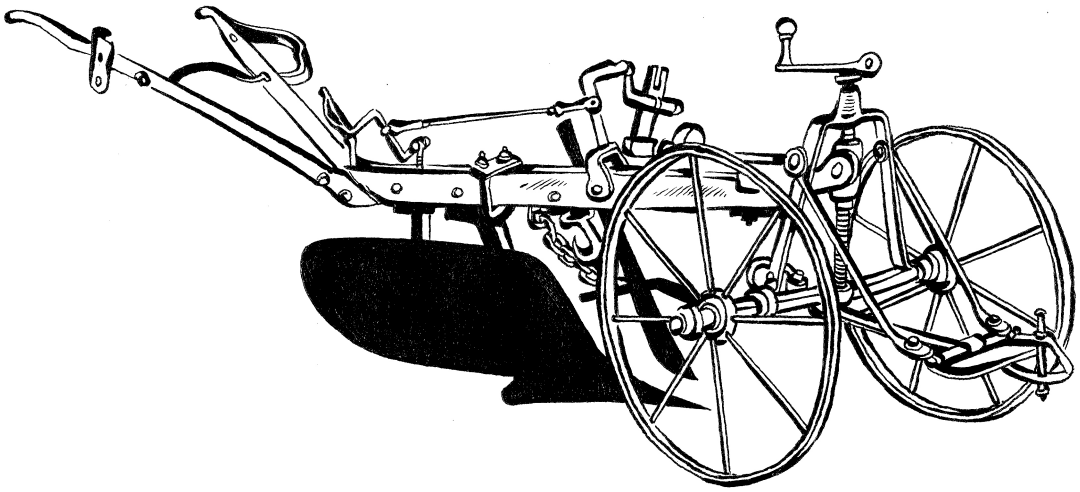
83. La démarche de diagnostic est une démarche dite abductive qui infère les causes selon les "faits" et des connaissances a priori connexe au phénomène étudié (Paavola, 2005).

84. Selon Coutellec (2015a), la neutralité consiste à produire des connaissances qui ont des applications ne favorisant aucun intérêt particulier, elle présuppose l'autonomie de la recherche.

85. Pour une définition de l'agriculture paysanne actuelle voir celle proposée par le sociologue rurale Ploeg (2014).

entretient. [...] C'est pourquoi on estime généralement, notamment dans les zones où les projets de modernisation fonctionnent, que la paysannerie a de facto disparu. » Selon lui, les cadres intellectuels dominants (dans la politique et en recherche) sont « *inadaptées pour appréhender pleinement la présence, l'importance, les problèmes et les potentiels des paysanneries d'aujourd'hui* ».

Enfin mon positionnement vis-à-vis des agriculteurs et animateur.ices avec qui j'ai travaillé, est un positionnement d'agronome clinique comme décrit plus haut (Kockmann et al., 2019). Cette posture s'intègre dans une posture d'accompagnement qui se caractérise en particulier par un apprentissage conjoint entre agronome-extérieur et practicien.ne agricole (Cerf et Maxime, 2006). Cette dynamique est possible si un espace pour dialogue équilibré est mis en place.



S'opposer sans se massacrer et de se donner sans se sacrifier

Marcel Mauss

Chapitre II

Construction du fonctionnement collectif

II. 1 Création du groupe collaborant à l'étude

Lors des précédents projets de sélection participative, plusieurs paysan.ne.s ont montré un intérêt pour la *dimension agronomique des semences paysannes*. Cette thèse s'est fondée sur cet intérêt et a identifié des questions et des approches qui pourraient y répondre. L'objectif était de former un groupe de praticiens et praticiennes intéressés à travailler ces questions. Pour cela, l'équipe de recherche a réalisé un "appel à intérêt" au sein du « groupe blé » [1] du RSP et auprès des paysan.nes issu.es d'autres réseaux pour former un groupe de praticien.nes. Le 23 juin 2021, un mail a été envoyé à l'ensemble du groupe blé dans lequel étaient présentés les objectifs de l'étude et les moyens envisagés pour y répondre : « *[pour] mieux comprendre la réponse des populations selon les contraintes liées aux environnements (climats, sols, enherbement...) et aux spécificités des pratiques de culture et de sélection [...] Nous souhaiterions préparer des entretiens afin de décrire la logique de fermes / environnements de culture / pratiques de gestion et de sélection. Les entretiens pourraient se faire avec des paysans et paysannes de groupes locaux et les résultats mis en débat lors d'ateliers. Nous aimerions enfin co-construire un dispositif d'essais pour suivre les populations* in situ *et caractériser les contraintes environnementales majeures qui impactent la production.* ».

Durant l'été 2021, je suis également allé discuter des envies et des disponibilités directement auprès de paysans et paysannes déjà identifié.es comme intéressé.es ou potentiellement intéressé.es. Ces rencontres ont eu lieu lors de récoltes participatives d'essais chez trois paysans (JUC, EMH, FLM), de visites d'essais de variétés paysannes chez deux paysans (VIL et CHD) ou lors d'une réunion avec les adhérents d'Agrof'île [2].

1. Le groupe blé du RSP rassemble des paysans-boulangers, paysans-meuniers, jardiniers, cultivateurs, boulangers, chercheurs, cuisiniers, techniciens, animateurs de collectifs locaux du RSP et d'autres paysans issus d'autres réseaux. Une liste mail permet de faciliter la communication entre-eux. `https://www.semencespaysannes.org/cultivons-la-diversite/le-groupe-ble-et-autres-cereales-a-paille.html`

2. Agrof'ile est une structure de développement de l'agro-écologie en Île-de-france.

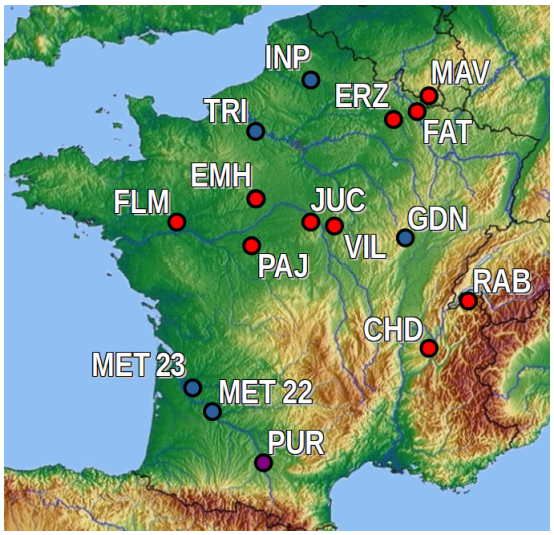


Figure II.1 – Localisation des fermes et des essais. Les points rouges, bleus et violets correspondent respectivement aux dix fermes, aux essais variétaux d'associations et aux essais variétaux de Purpan. Lorsqu'il y a eu une seule année d'essai, l'année est indiquée.

Sigle	Paysan	Association	Recherche
CHD	ARDEAR AURA		
EMH	ARDEAR CVL		
ERZ	Individuel		
FAT	Individuel		
FLM	GAB Anjou		
JUC	ARDEAR CVL		
MAV	Li Mester		
PAJ	ARDEAR CVL		
RAB	ARDEAR AURA		
VIL	Individuel		
INP		Initiative Paysanne	
GDN		Graine de Noé	
MET		Mètis	
TRI		Triticum	
PUR			Purpan

Table II.1 – Les 15 membres du groupe et les structures associées.
ARDEAR : Association Régionale pour le Développement de l'Emploi Agricole et Rural ; AURA : AUvergne-Rhône-Alpes ; CVL : Centre-Val-de-Loire ; Individuel : non adhérent à une association promouvant les variétés paysannes.

Suite aux échanges, une question a été relevée, comment mieux intégrer des paysans et paysannes qui débutent dans leurs pratiques de sélection paysanne. Certains paysans ont été très investis dans les projets de sélection participative ce qui a été très enrichissant pour eux en termes de dynamique et développer des connaissances, mais ont du mal à les transmettre dans leurs collectifs respectifs. En effet au début des projets de sélection participative la dynamique était nationale puis les membres du groupe blé ont augmenté en nombre et les dynamiques régionales ont été priorisées (Demeulenaere et al., 2017). Nous nous sommes alors posé la question de savoir s'il ne serait pas mieux de cibler un ou deux collectif.s pour aider au dynamisme intra-collectif. Néanmoins suite à l'appel à manifestation d'intérêt, aucun collectif n'avait plus de trois participants intéressés alors que à titre individuel beaucoup de paysans ont montré leur intérêt à participer au projet [3]. Durant cette phase, des questions-réflexions sur les sensibilités agronomiques des blés paysans ont émergé et m'ont aidé à construire mes questions de recherche. Par exemple deux paysans avaient noté que

3. Il aurait sans doute fallu avoir plus d'interactions avec le collectif cible pour réussir à susciter un intérêt commun.

souvent lorsque des blés paysans paraissent prometteurs dans les champs et sont soumis à un stress , ils semblent perdre en rendement mais maintient leur qualité, alors que des blés modernes maintenir le rendement avec une moindre qualité des grains (ridés, faibles protéines...). Nous avons donc inclus dans le protocole le suivi de l'aspect des grains et leur teneur en protéines.

Suite au mail et aux rencontres, 15 expérimentateur.ices réparties à travers la France et la Belgique ont été intéressé.es pour participer projet (Fig : II.1). Huit paysan.nes se sont déclarés intéressés et deux autres ont rejoins le groupe suite à des échanges entre pairs. Ces paysans appartiennent à différents groupes régionaux – ce qui montre que le sujet n'intéresse pas un groupe en particulier ni l'ensemble des paysans d'un groupe donné– et ils sont assez diversifiés en termes d'expériences en SP, certains étant des fidèles des projets de recherche participative et d'autres nouveaux. Les dix paysans sont tous en Agriculture Biologique (AB) et neuf sur dix en polyculture-élevage.

Quatre animateur.rices d'associations (Mètis, Graine de Noé, Triticum, et Initiative Paysanne) et une enseignante chercheuse (école d'ingénieur de Purpan) ont également manifesté leur intérêt. Ces quatre associations et l'école de Purpan ont l'habitude de réaliser des essais variétaux pour des objectifs divers (multiplication de semence, vitrine pédagogique, évaluation variétales...). Par la suite je parlerai d'expérimentateur.rices pour parler des membres du groupe gérant une expérimentation variétale (sans distinction selon leur statut) et je parlerai de l'équipe de recherche pour parler des membres de l'équipe DEAP et de l'UMR Agronomie qui ont participe au projet (mes encadrants, un assistant ingénieur, des stagiaires, des main-œuvres et moi). Les paysans et les animateu.rices ont été impliqués dans deux aspects de ma thèse, les enquêtes et l'expérimentation menée sur les campagnes 2021-22 et 2022-23. Néanmoins je n'ai eu le temps de valoriser que les enquêtes réalisées auprès des paysans (Chap. III).

II. 2 Les variétés et le dispositif expérimental co-construit

II. 2.1 Les variétés à l'étude

L'intérêt pour variétés paysannes est le déterminant commun principal qui relie tous les membres du groupe. Les variétés paysannes sont étudiées à la fois au travers des objectifs et attentes des paysans à leur sujet (enquêtes) et par leur mise à l'épreuve dans une diversité d'environnements de culture (expérimentation). Dans les essais nous distinguerons les variétés « communes » qui ont été choisies par le groupe pour être étudiées *au sein et entre* fermes et les variétés « complémentaires » qui ont été choisies par chaque expérimentateur.rice pour être étudiées uniquement *au sein* de la ferme.

La liste de variétés communes a été établie sur la base de propositions faites par chaque expérimentateur.rice. Chacun.e a proposé une ou plusieurs variétés au collectif et une description associée sur la base de sa motivation à la(les) tester économiquement et de la quantité de semence disponible. Cette approche a permis à chaque

expérimentateur.ice de choisir les variétés communes qu'ils souhaitaient tester dans son essai (Tab II.2).

Nom	Type	Obtention	Source	Enquête
Alauda[a]	Variété commerciale	Institut Keyserling (Allemagne)	INP[d]	
Anti-Verse[a]	Variété paysanne	RAB	RAB	Oui
Automne-Rouge-Barbu[a]	Variété de pays		INP[d]	
Barbu-du-Maconnais[a]	Variété de pays		GDN	
Dattel[a]	Variété ancienne	Vilmorin	INP	
Grand-Clesle[a]	Variété paysanne	EMH	EMH	Oui
Inconnu-de-Raphael[a]	Variété de pays	RAB	RAB	
Mottet-Blanc[a]	Variété paysanne	RAB	RAB	Oui
Petanielle-Noire-de-Nice[b]	Variété de pays		MAV[d]	
Petit-Beron[a]	Variété paysanne	CHP[c]	CHP	
Popayon[a]	Variété paysanne	MAV	MAV	Oui
Poulard-d-Australie[b]	Variété de pays		INP[d]	
Pourpayon[a]	Variété paysanne	MAV	MAV	Oui
Rouge-de-Bordeaux[a]	Variété de pays		INP[d]	
Roux-des-Ardennes[a]	Variété de pays		MAV	
Saint-Priest[a]	Variété ancienne		INP[d]	
Savoyon[a]	Variété paysanne	MAV	MAV	Oui
Savoysone[a]	Variété paysanne	RAB	EMH[d]	Oui
Titlis[a]	Variété commerciale	Agroscope (Suisse)	INP	
Trancherie[a]	Variété paysanne	VIL	VIL	Oui

Table II.2 – Variétés mises en commun pour l'expérimentation.
a : blé tendre ; b : blé Poulard ; c : CHP est un paysan qui souhaitait participer à l'étude mais qui finalement a dû quitter le groupe ; d : les expérimentateur.rices ont parfois préféré cultiver leur propre lot de semences au lieu d'utiliser les semences issues de la source en commun. Enquête : indique si la méthode d'obtention de la variété est décrite dans l'analyse des enquêtes (Chap.III). Toutes les variétés paysannes sont issues de pratiques de sélection paysanne réalisées entre 2006 et 2022.

Pour limiter les confusions d'effets, dans la mesure du possible nous avons cherché à fournir à l'ensemble des expérimentations les mêmes semences pour chaque variété la première année d'essai (2021, Fig.II.2). Pour ce faire, les semences pour chacune des variétés communes ont été fournies à l'équipe de recherche par l'expérimentateur.ice ayant proposé la variété. Elles ont ensuite été redistribuées aux expérimentateur.ices intéressés en première année en fonction des variétés choisies et de la densité de semis prévue. Néanmoins certains ont préféré réutiliser leurs propres semences et INP a préféré ne pas accueillir de semences issues des lots communs par crainte de diffusion de la carie du blé. La deuxième année de semis, les expérimentateur.ices ont principalement réutilisé les semences issues de leur récolte (Fig.II.2). Cinq expérimentateur.rices ont eu des problèmes à la récolte (récolte mangée par des oiseaux par exemple) et ont demandé que l'équipe de recherche leur renvoie des semences. Parfois des échanges entre expérimentateur.rices ont eu lieu pour faire l'appoint. Pour les deux années d'expérimentation les variétés supplémentaires étaient facultatives et provenaient directement des stocks des expérimentateur.rices.

Les variétés de blé diffèrent par leur type et leur origine (Tab II.2 pour les 20

variétés en commun et Tab A.1 en annexe pour les 56 variétés supplémentaires).

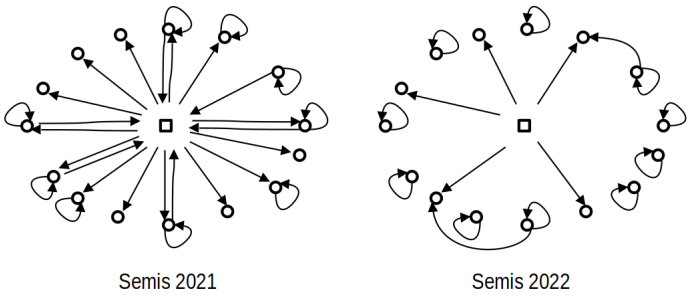


Figure II.2 – Diffusion des semences durant l'expérimentation.
Le carré représente l'équipe de recherche qui a collecté et redistribué en 2021 les lots de semences et les ronds représentent les expérimentateur.rices. Les flèches indiquent les diffusions entre membres du groupe ou l'utilisation de ses propres semences (flèche sur elle même).

II. 2.2 Les dispositifs expérimentaux

Les dispositifs expérimentaux mis en place chez les expérimentateur.rices sont un compromis entre les demandes liées aux objectifs de la recherche et les contraintes et motivations des expérimentateur.rices. L'équipe de recherche a posé certaines contraintes expérimentales :

- disposer d'un nombre minimum de variétés répétées au sein de chaque essai pour estimer la précision de l'essai,
- disposer de variétés répétées entres essais pour faciliter les analyses à l'échelle du réseau d'essais,
- appliquer les même interventions culturales pour toutes les variétés d'un essai,
- inclure dans l'essai un nombre limité de micro-parcelles à évaluer (environ 30) pour éviter des surcharges de travail lors de la campagne de mesures.

Ces contraintes ont globalement été comprises et intégrées dans les dispositifs expérimentaux à quelques exceptions près. Ces exceptions peuvent être dues à des imprévus par exemple chez FAT:2022 certaines micro-parcelles ont malencontreusement été déchaumées juste avant la récolte, chez JUC:2023 certaines micro-parcelles n'ont quasiment pas levé (cases roses sur la Tab II.1). Les expérimentateur.rices avaient la responsabilité de :

- choisir la parcelle de l'essai (souvent l'essai était dans une parcelle de blé),
- choisir les pratiques agronomiques de l'essai. Parfois les experimentateur.rices ont choisi/dû de tester en plus des variétés, une deuxième conduite agronomique,
- choisir le nombre de micro-parcelles,
- choisir le dispositif (notamment issus de travaux antérieurs (Rivière et al., 2013) et qui diffèrent par le nombre de blocs et de variétés répétés, Fig II.3),

— choisir les variétés de la liste commune sachant que cinq variétés étaient priorisées par l'équipe de recherche,

— choisir des variétés supplémentaires.

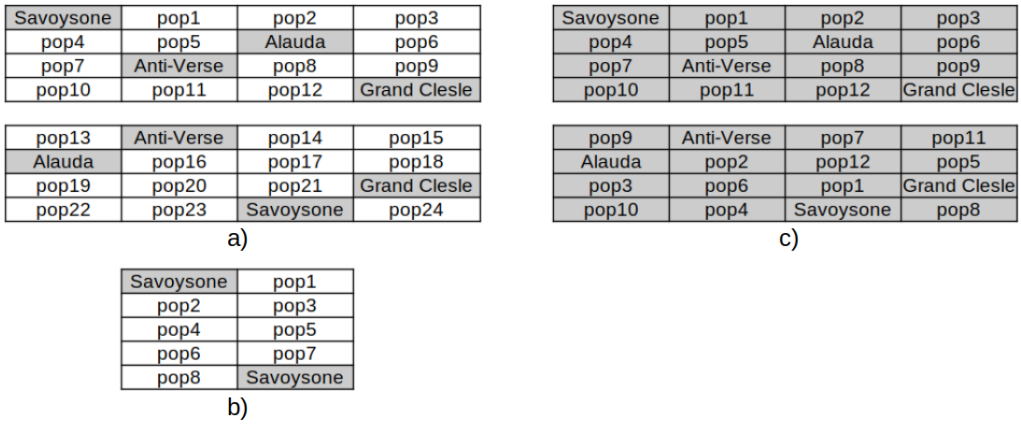


Figure II.3 – Les dispositifs de l'expérimentation.
a) le dispositif "ferme régionale" composé de deux blocs avec au moins 4 variétés répétées entre blocs, b) le dispositif "ferme satellite" composé d'un bloc avec au moins une variété répétée et c) le dispositif en blocs complets répétés avec au moins deux blocs entièrement répétés.

Les essais sont une combinaison d'une année, d'un.e expérimentateur.ice et le cas échéant d'une pratique agronomique. Sur les deux années, 32 essais ont été mis en œuvre (Tab II.3), 25 sont en dispositif *ferme satellite*, cinq en dispositif *ferme régionale* et deux en dispositif *blocs complets répétés*. Le nombre de variétés par essai variait entre 4[4] et 28 (médiane[5] de 9.5 variétés). Même pour les variétés communes, le dispositif est très déséquilibré c'est-à-dire que toutes les variétés ne sont pas dans tous les essais (il y a 56% de déséquilibre[6] et la médiane est de 33%). La variétés la moins répétée en essai est Savoyon et est présente sur seulement 16% des essais. Parmi les variétés en commun, cinq étaient proposées pour être répétées entre fermes. La variété Savoysone, proposée pour être le témoin répété au sein des fermes, était présente sur 91% des essais, Automne-Rouge-Barbu présente à 88%, Grand-Clesle à 81%, Anti-Verse à 75% et Alauda à 75%.

Chez MAV en 2022 et 2023 ainsi que chez GDN 2022, en plus des variétés une pratique agronomique est testée. MAV en 2022 a testé deux densités de semis. MAV en 2023 a comparé une pratique avec un semis précoce (mi-septembre) à faible densité et déprimage par ses vaches, et une conduite classique (semis mi-octobre et densité normale). GDN en 2022 a réalisé des semis à deux dates, une ordinaire (mi-octobre) et une tardive (mi-novembre). Les autres essais ont été menés avec une seule conduite culturale.

4. Après soucis de levée.
5. La médiane est la valeur séparent la distribution en deux, de sorte que la moitié des valeurs sont au-dessus (ou en-dessous) de la médiane.
6. Cela correspond aux cases vides du tableau II.3.

Expérimentateur.rice	CHD		EMH		ERZ	FAT		FLM		GDN			INP		JUC		MAV				MET		PAJ		PUR		RAB		TRI		VIL		Essais
Année	22	23	22	23	23	22	23	22	23	22		23	22	23	22	23	22		23		22	23	22	23	22	23	22	23	22	23	22	23	
Pratique agronomique										P1	P2						P1	P2	P1	P2													
Savoysone	2	2	2	2	2	1	2	2	2		2	2	2	1	2	2			1	1	2	2	2	2	1	2	2	2	1	2	2	2	29
Automne-Rouge-Barbu	1	2	1	1		1	2	1	1	2		1		1	2	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	28
Grand-Clesle	1	1	1	1	1		1	1	1		1	1			1	1			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	26
Alauda	1		1	1	1		1	1	1		1	1	3	2			1	1			1		1	1	1	1	2	2	1	2	1	1	24
Anti-Verse		1	1	1	1		1	1	2		1	1			1				1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	2	1	1	24
Rouge-de-Bordeaux		1	1	1	2	1	1	2	1	1		1	2	2	1								1	1			1	1	2	2			19
Roux-des-Ardennes	1	1			1	1	1			1		1		1			1	1	1	1							1	1	1	2			16
Pourpayon	1	1				1	2	1	1						1			1	1	1	1	1						1	1				14
Titlis	1	1	1	1									2		1												1	1	2	2	1	1	12
Petanielle-Noire-de-Nice		1								1		1							1	1			1	1		2	1	1		2			11
Popayon	1	1													1	1					1	1					1	1			1	1	10
Trancherie							1								1						1	1					1	1	1	2	1	1	10
Barbu-du-Maconnais		1			1					1		1			1												1	1	1	2			9
Inconnu-de-Raphael			1	1		1	1	1	1						1												1	1					9
Saint-Priest		1						1					3	2			1	1	1	1										2			9
Petit-Beron							1								1						1	1					1	1	1	2			8
Dattel													2	1	1												1	1	2	2			7
Mottet-Blanc	1	1													1												1	1	1	2			7
Poulard-d-Australie										1		1	2	1												2			1	2			7
Savoyon									1								2	2	2	2													5
Placettes de var. communes	10	15	9	9	9	6	14	11	11	7	5	11	16	11	16	5	6	7	10	10	10	8	8	8	5	10	21	21	18	32	9	9	
Microparcelle de var. supplémentaires	0	2	0	0	2	0	0	1	4	0	0	0	0	0	6	1	7	8	5	5	0	0	0	2	0	0	11	11	1	0	7	9	
Variétés communes	9	13	8	8	7	6	11	9	9	6	4	10	7	8	14	4	5	6	9	9	9	7	7	7	5	7	17	17	14	16	8	8	284
Variétés supplémentaires	0	2	0	0	2	0	0	1	3	0	0	0	0	0	6	1	7	8	5	5	0	0	0	2	0	0	11	11	1	0	6	9	80
Dispositif	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	B	R	R	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	R	R	R	B	S	S	

Table II.3 – Nombre de répétitions de chaque variété pour les 32 essais (Année x Expérimentateur x Pratique).
Les chiffres indiquent le nombre de microparcelles ayant été récoltées et les cases roses indiquent qu'au moins une microparcelle prévue n'a pas pu être récoltée à cause d'un incident. Année 22 et 23 correspondent respectivement aux années 2022 et 2023. P1 la pratique témoin et P2 la pratique alternative. Essais : nombre de fois où la variété est répétée sur l'ensemble des essais ; Microparcelle de var. communes (resp. supplémentaires) : le nombre de micro-parcelles contenant les variétés issues de la liste commune (resp. supplémentaires) ; Variétés issues de la liste commune(resp. supplémentaire) : le nombre de variétés communes (resp. supplémentaires) testées dans chaque environnement ; S, R et B correspondent respectivement aux dispositifs en ferme Satellite, ferme Régionale et blocs complets répétés.

II. 3 Mise en place du fonctionnement du groupe

Pour assurer de bonnes interactions avec les expérimentateur.ices, j'ai été amené à mettre en place deux formes d'animation : une animation collective et une animation bilatérale avec chaque expérimentateur.rice.

II. 3.1 Animation collective

Pour impulser et entretenir une dynamique groupe, nous avons organisé plusieurs réunions où l'ensemble du groupe a été convié (Fig II.4). Le taux de présence à ces réunions était souvent modeste (entre 4 et 8 présents). La moitié des réunions étaient en présentiel et coïncidaient avec d'autres rencontres optimisant ainsi les déplacements des participants. Elles avaient comme principales fonction de :

— mieux se connaître et proposer un espace de discussion entre membres du groupe,

— co-construire un cadre de bon fonctionnement,

— discuter du protocole,

— préparer les semis des essais,

— discuter des résultats des enquêtes et des expérimentations.

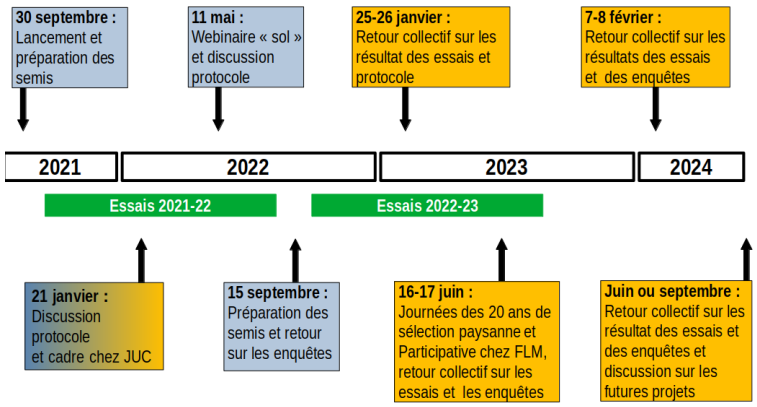


Figure II.4 – Réunions collectives durant le projet.
En bleu les réunions en visio-conférence et en jaune les réunions en présentiel (La réunion bicolore était en format mixte)

Les premières réunions ont permis d'établir un cadre de collaboration et de fonctionnement pour le projet. Pour cela nous nous sommes inspirés de la charte de sélection participative du groupe blé (SP-blé, 2017) et du manuel pour les projets collaboratifs sur les semences entre organisations paysannes et institutions de recherche du projet CoEx (CoEx, 2021). Ce cadre prend en compte différents aspects :

Rôle de chacun. Pour la partie enquête, les rôles étaient clairs, l'équipe de recherche avait le rôle d'enquêteur et les expérimentateur.rices avaient le rôle d'enquêté. Les différentes tâches afférentes à l'expérimentation ont été réparties entre équipe de recherche et expérimentateur.ice comme présenté en figure II.5. Beaucoup de tâches

sont partagées, les tâches 1, 4 et 6 concernent la discussion des objectifs, des moyens et des résultats alors que la tâche 2.b concerne les mesures et notation. Les protocoles détaillé menés par l'équipe de recherche et pour les expériemtnatateur.rices seront présentés dans le chapitre IV. Les tâches 3 et 5 étaient spécifiques à l'équipe de recherche et s'appuyer sur leur savoir-faire en gestion de données alors que la tâches 2.a était spécifique aux expérimentateur.rices et s'appuyer sur leur savoir-faire en gestion des plantes cultivées. L'équipe de recherche (et parfois l'animateur.trice référente) s'engageait à aider ceux qui en avaient besoin pour les semis et la récolte. Les moyens pour gérer les essais paysans sont hétérogènes, certain.e.s sont équipé.e.s avec des semoirs et moissonneuses d'expérimentation ou sont aidés par un collectif alors que d'autres réalisent les essais variétaux sans outils d'expérimentation. Les itinéraires techniques

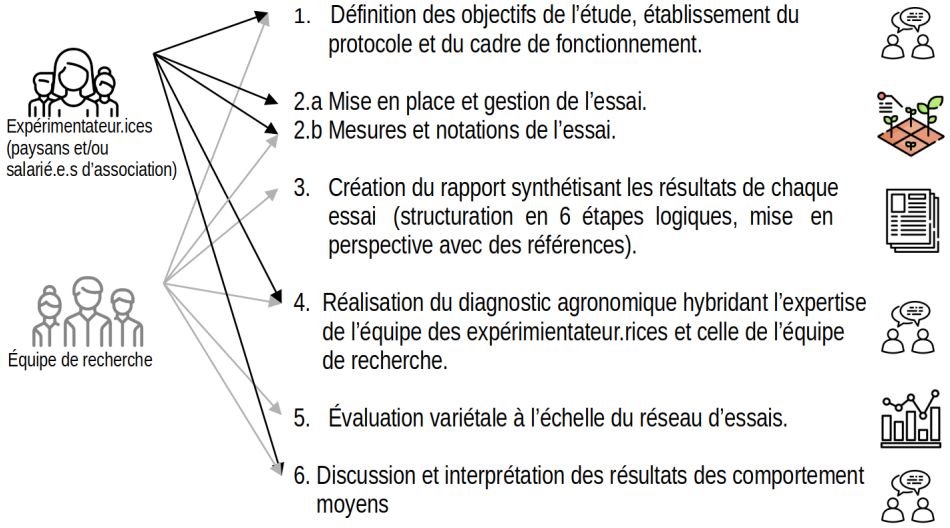


Figure II.5 – Répartition des tâches pour la partie expérimentation entre les expérimentateur.rices et l'équipe de recherche.

n'ont pas été homogénéisées par un protocole, nous avons seulement demandé aux expérimentateur.trice.s de gérer leur parcelle uniformément c'est-à-dire d'éviter de faire des traitements spécifiques en fonction des variétés pour éviter la confusion entre l'effet des pratiques et celui des variétés.
L'équipe de recherche avait pour tâche de mettre en forme et d'analyser les données d'enquête et d'expérimentation. Elle s'engageait à réaliser de nombreux retours : des retours personnalisés des résultats de l'essai à chaque expérimentateur.rice, des retours à l'ensemble du groupe pour discuter de résultats généraux et des retours plus larges dans les collectifs locaux ou au sein du groupe blé du RSP sur les résultats plus globaux.

Données et accès aux résultats. Les données seront conservées dans SHiNeMaS (De Oliveira et al., 2020), cet outil permet de conserver et organiser les données produites depuis 2008 par les précédentes actions de recherches sélection participative. Les données sont accessibles par les membres du groupe à la demande, les collectifs ou personnes qui le souhait peuvent recevoir une formation à l'utilisation de SHiNeMaS par l'équipe ABI Soft de GQE Le-Moulon et l'utiliser directement. Des formations

à son usage ont déjà été faites mais la plupart des animateur.trices l'ayant suivi ont depuis quitté leur structure.
Les données produites dans le cadre de cette étude ne sont pas publiques. Toutefois la possibilité de mettre à disposition librement certaines données anonymisées sera discuté au sein du groupe au terme du projet.
Pour les entretiens nous avons rédigé une notice d'information et de consentement éclairé indiquant la manière dont les informations issues des entretiens seront utilisées et les droits et devoirs des parties prenantes (Annexe A).

Accès aux semences. L'accès aux semences est un sujet important pour les membres du groupe, il est associé à des questions de valeurs : leur diffusion est généralement désirée mais en évitant une appropriation par des personnes ou des sociétés. Nous nous sommes mis d'accord pour que les semences soient accessibles au sein du groupe.

Processus de prise de décisions. Les décisions se prennent en réunion plénière. Néanmoins vu la complexité pour organiser ces réunions, nous avons proposé une démarche flexible pour adapter le processus de décision aux contraintes du groupe :

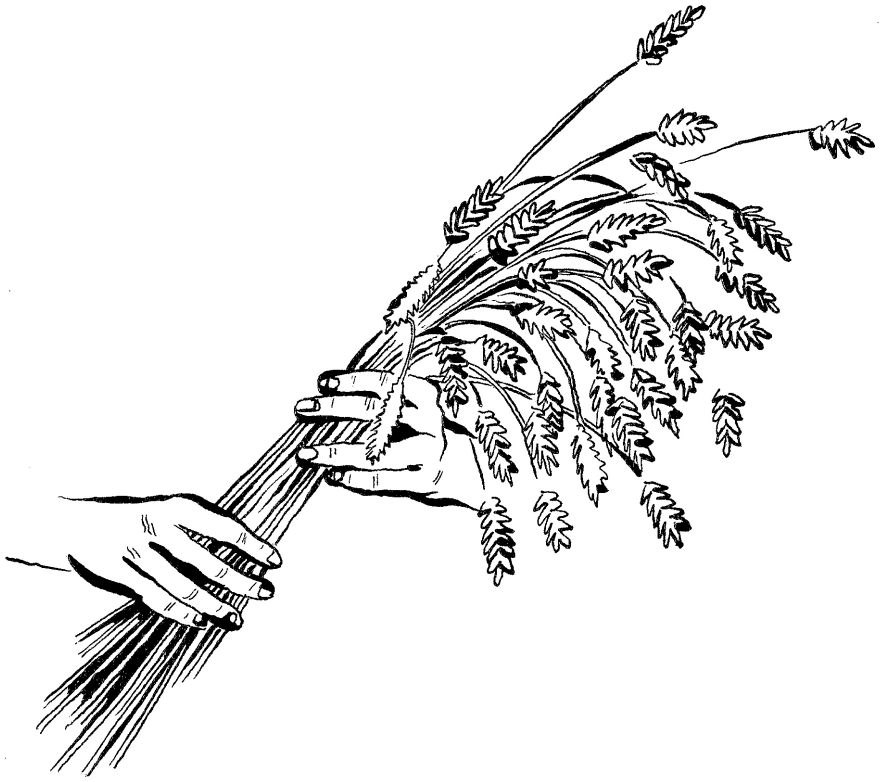
- un mail est envoyé avec le relevé de décision fait par les présents (avec en pièce jointe le compte rendu complet de la réunion) ;
- les membres ont 15 jours pour réagir au relevé de décision et/ou au compte rendu. Sans réponse dans les 15 jours le relevé de décision est considéré comme accepté ;
- Si besoin, une réunion est organiser en distanciel pour ajuster une décision.

Financement. Nous avons présenté le budget disponible. Un dédommagement est prévu pour le temps et l'énergie mis dans les essais liés à cette étude. Ce dédommagement comprend une part fixe et une part proportionnelle au nombre de micro-parcelles dans l'essai.

II. 3.2 Dynamiques bilatérales

Les interactions bilatérales entre l'équipe de recherche et chaque expérimentateur ont été nombreuses au cours de la thèse. Elles ont été entretenues par de nombreux échanges dans le cadre :

- de l'organisation de l'expérimentation,
- des visites de l'équipe de recherche sur les essais et souvent le partage d'un repas (3 visites sur chaque essai par campagne expérimentale),
- des enquêtes (en distanciel),
- des diagnostics agronomiques participatifs (1 fois à la fin de la campagne expérimentale).



Si tu ne peux pas le déraciner,
domestique-le.

Ursula K. Le Guin

Chapitre III

Insertion des pratiques de sélection paysanne dans les systèmes de production

III. 1 Introduction

Les variétés paysannes sont définies par leurs pratiques d'obtention et de gestion. Ces pratiques sont régies par des règles d'usage définies par un collectif et qui font des variétés paysannes des « communs [1] ». Ces pratiques de gestion, de sélection (au sens strict), de multiplication et de conservation de la diversité cultivée en production seront abrégées par la suite en "pratiques de Sélection Paysanne" (SP). A notre connaissance dans les pays où l'agriculture est fortement industrialisée comme la France, aucune étude agronomique ne s'est intéressée à ces pratiques. Par exemple dans le livre "Les pratiques agricoles à la loupe" (Guyomard et al., 2017), les pratiques liées à la gestion de la diversité cultivée et au renouvellement des semences se limitent à ces activités :

— Le choix variétal en fonction de certains traits agronomiques ou technologiques.
— La possibilité de cultiver différentes variétés soit sur plusieurs parcelles (portefeuille variétal) soit sur une seule parcelle (mélange variétal).
— La réalisation d'associations de cultures (pouvant être gérées sur le long terme comme les méteils).
— La réalisation de semences de ferme [2].

1. Les communs peuvent être définis comme des systèmes de gestion collectifs de ressources communes, principalement définis par les règles qu'une communauté (le plus souvent locale, mais qui peut être en réseau à des échelles nationales voire internationales, à condition d'être bien délimitée), se donne pour exploiter ces ressources en vue d'en assurer la mise en valeur optimale et durable (*Vidéo Thomas F.* 2020).

2. La pratique de semences de ferme est courante pour le blé tendre, elle est réalisée sur environ 55% de la surface emblavée (Guyomard et al., 2017). Celle-ci consiste à produire les semences à la ferme en utilisant la récolte précédente. Cela demande en général un triage pour enlever les graines d'adventices ou les grains cassés, souvent réalisé par des trieurs à façon. Cette pratique depuis 1994 n'est possible qu'en payant la Contribution Volontaire Obligatoire pour rémunérer l'obtenteur de la variété utilisée.

Les pratiques spécifiques aux agriculteurs-sélectionneurs ne sont pas mentionnées. Vu la rareté des agriculteur.rices qui mettent en œuvre ces pratiques en France, elles peuvent être qualifiées de singulières, d'hors-normes et d'innovantes. Certaines études se consacrent à découvrir et connaître les pratiques des agriculteur.rices considérées comme innovantes. Salembier et al. (2021) montrent que ces études s'organisent chronologiquement selon cinq étapes : définir les objectifs de l'étude, identifier les praticien.nes pertinent.es, identifier les pratiques innovantes, étudier ces pratiques selon certains points de vue et rendre compte de manières de réutiliser certains résultats de l'étude par d'autres acteur.rices. Notre étude a mis en œuvre ce type d'approche.
Les pratiques de sélection paysanne ont surtout été étudiées d'un point vue d'ethnologue, dans lequel le système technique est regardé au prisme du système social ou du « point de vue » des acteur.rices appartenant à un groupe ethnique (Blanc-Pamard et al., 1992). Par exemple, il a été montré que des groupes ethniques cultivant le sorgho diffèrent dans leurs pratiques de sélection paysanne en Éthiopie (Wendmu et al., 2022) ou dans leurs représentations des variétés [3] dans la région du mont Kenya (Labeyrie et al., 2019). A notre connaissance, l'approche agronomique a peu été utilisée pour étudier les pratiques de sélection des plantes dans les fermes. L'approche agronomique vise à étudier l'effet des pratiques agricoles sur des performances d'intérêts ou comprendre les déterminants des pratiques agricoles dans le contexte spécifique de la ferme (Blanc-Pamard et al., 1992). Nous avons noté Abay et al. (2008) qui se sont intéressés aux pratiques de sélection paysanne sur orge au Nord de l'Éthiopie avec une dominante agronomique. Ils ont montré que les paysannes et paysans sélectionnaient à la fois selon des objectifs agronomiques [4] et de valorisation. En particulier les paysans et paysannes étudié.es reconnaissaient des traits variétaux intéressants en culture (précocité, résistances aux maladies, taille de l'épi) et en valorisation (qualité de la paille, couleur du grain [5], qualité pour la fabrication de *injera* [6]).
Ce chapitre de thèse à deux objectifs principaux :

— Décrire les pratiques paysannes de gestion, sélection, multiplication et conservation de la diversité cultivée mis en œuvre par les paysans et paysannes (pratiques de Sélection Paysanne, SP),

— Comprendre l'insertion de ces pratiques dans les environnements de production.

La description dynamique des pratiques en lien avec l'expérimentation à la ferme permettra également de mieux comprendre la manière dont ont été obtenues huit [7] des 21 variétés expérimentées durant la thèse et ainsi aider à l'interprétation de leur comportement sur le réseau d'essais.
Ce chapitre s'adresse à un public à la fois académique et d'acteurs et actrices du monde agricole. Nous envisageons de publier une version remaniée dans une revue française telle que Innovation agronomique ou Agronomie, Environnement et Société.

3. La manière dont ils considèrent la variété selon leur point de vue.
4. Au sens strict, l'agronomie désigne la discipline qui s'intéresse au champ cultivé et aux agricultrices et agriculteurs qui les cultivent.
5. Ce trait est pour eux un marqueur de la qualité culinaire.
6. Pain fermenté traditionnel
7. Savoysonne, Mottet-Blanc, Anti-Verse, Popayon, Pourpayon, Savoyon, Grand-Clesle et Trancherie.

III. 2 Matériel et méthodes

III. 2.1 Le cadre général

Cette sous-partie vise à proposer un cadre agronomique pour comprendre l'insertion des pratiques de sélection paysanne de la diversité cultivée dans le système de production. Contrairement aux techniques qui sont génériques, les pratiques s'ancrent dans un contexte spécifique qu'il est nécessaire de décrire pour mieux comprendre leurs déterminants (Landais et al., 1988). Ce contexte est le système de production et son environnement socio-économique. La figure III.1 représente la place des pratiques de sélection paysanne dans ce contexte de production. Le système de production sera représenté comme un ensemble organisé, combinant plusieurs types de ressources (naturelles, foncières, immobilières, humaines, financières, etc.), composé de sous-systèmes de production (production de fromage, production des céréales par exemple) également organisés et ayant des fonctions spécifiques (Guyomard et al., 2017 ; page 33). De plus, le système de production est en interaction avec son environnement socio-économique qui lui permet en particulier d'obtenir des débouchés et de profiter des structures liées au développement des activités pertinentes à la ferme (formations auprès d'une structure de développement agricole, groupes d'agriculteurs et d'agricultrices...). Notre cadre se concentre sur les logiques individuelles des paysannes et paysans bien que, les déterminants collectifs (échanges d'expérience par exemple) puissent influencer les pratiques de sélection paysanne. Les pratiques agricoles sont définies comme les manières concrètes d'agir des agriculteurs et des agricultrices dans un but productif (Tessier 1979). Le système de production ainsi que les sous-systèmes de production ont une composante décisionnelle [8] et une composante biotechnique. Les pratiques sont considérées comme étant à la jonction de ces deux composantes parce qu'elles mobilisent les composantes biotechniques selon les normes du système décisionnel (Landais et al., 1988). Parmi les différentes composantes du système de production, on s'intéresse plus particulièrement aux sous-systèmes de production (SSP). Un sous-système de production (SSP) est basé sur la finalité d'une production donnée (par exemple la vente de fromage à une filière locale ou la vente de grain à une coopérative). Pour notre représentation du processus de production végétale, nous avons choisi d'adapter celle de Landais et al. (1988) car elle prend en compte la valorisation de la production à la ferme (contrairement à Guyomard et al. (2017) par exemple qui l'excluent car considérée comme non strictement agricole). Un SSP d'une culture peut être constitué de plusieurs unités de gestion de la production que l'on nomme ateliers de production (par exemple le SSP du blé d'une ferme peut comprendre l'atelier cultural, l'atelier de tri et stockage, l'atelier de meunerie et l'atelier de boulange). Le SSP d'une culture a deux orientations (Fig III.2) : i) la consommation après transformation ou non du grain récolté sur la ferme ou la vente via différents marchés, et ii) le maintien opérationnel du système biotechnique –renouvellement des semences, gestion de la fertilité du sol, gestion des infrastructures agro-écologiques– (représenté par la boucle de flèches vertes et bleues). Le processus

8. Par exemple cette composante comprend : les objectifs du sous-système, l'organisation du chantier de travail, les règles de fonctionnement et des indicateurs d'états du milieu permettant l'atteinte des objectifs (Cerf et Sebillotte, 1988)

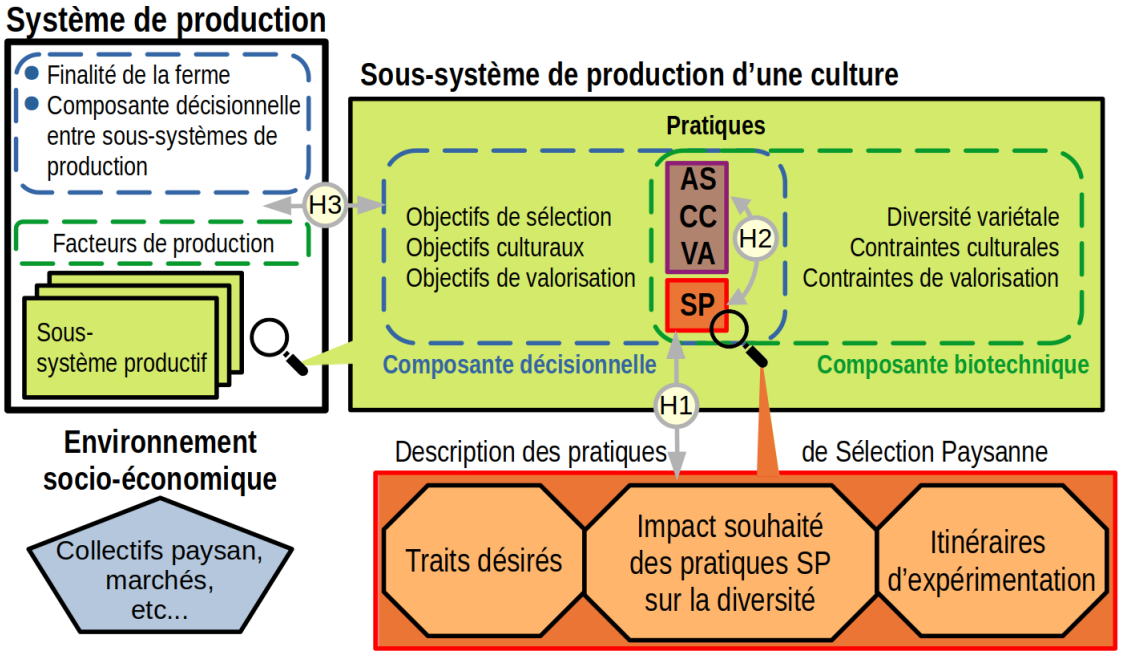


Figure III.1 – Représentation schématique du cadre pour étudier les déterminants des pratiques de sélection paysanne de la diversité.
SS : sous-système ; AS, CC, VA, SP correspondent respectivement aux groupes de pratiques d'Affectation des Sols, de Conduite de Cultures, de VAlorisation, et de Sélection Paysanne de la diversité.
Les numéros au sein des flèches correspondent aux hypothèses associées au cadre conceptuel.

de production végétale est piloté par cinq groupes de pratiques :

- les pratiques d'Organisation Foncière (OF), qui définissent les modes d'appropriation du sol[9], le parcellaire, la gestion des infrastructures agroécologique, etc ;
- les pratiques d'Affectation des Sols (AS) qui concernent le choix des usages de chaque parcelle (cultures de rente, cultures destinées à être transformées sur la ferme, cultures fourragères...) ;
- les pratiques liées à la Conduite Culturale (CC) (travail du sol, semis, fertilisation, gestion des adventices, récolte...) ;
- les pratiques de VAlorisation de la production (VA) qui comprennent le tri, le stockage, les transformations et la commercialisation des produits agricoles à la ferme ;
- les pratiques de Sélection Paysanne (SP) qui peuvent être réalisées à différents moments du processus de production (récolte, tri du grain, choix d'affectation des sols, etc...). Nous avons choisi de les positionner avant la nouvelle année de culture car en dernier lieu elles permettent le renouvellement des semences.

Les pratiques OF sont à l'échelle de l'ensemble de la ferme. Les pratiques AS ont une position particulière, car elles sont à la fois à l'échelle de la ferme et à l'échelle d'une

9. Achats, locations ou autres.

production donnée (compromis pour l'affectation des sols des différentes productions agricoles). Nous réutiliserons certains des concepts de Maxime et al. (1995) pour raisonner les pratiques d'AS, notamment les concepts sole [10], zone cultivable [11] et délai de retour [12].
Le SSP d'une culture [13] comprend donc la production au sens strict et sa valorisation (soit les pratiques AS, CC, SP et VA).

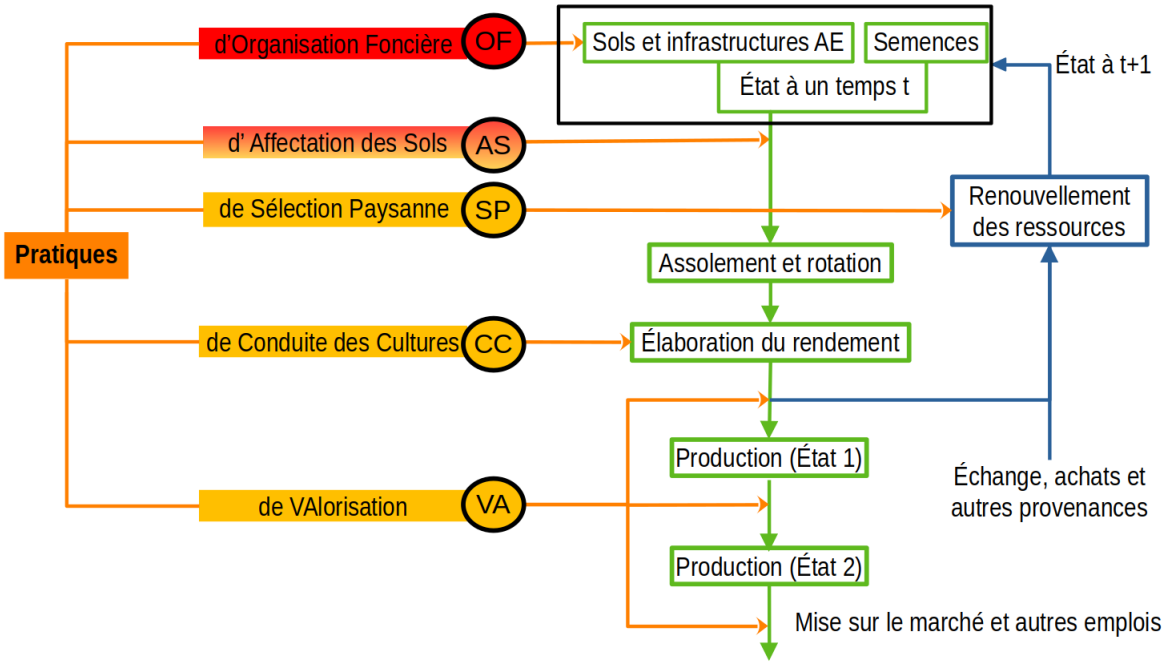


Figure III.2 – Processus de production végétal et les cinq groupes de pratiques permettant de le piloter (adapté de Landais et al., 1988).
AE : agroécologique. Par rapport à la figure originale (entre autres), la méta-pratique « sélection paysanne de la diversité » a été rajoutée, celle-ci prend en compte les pratiques de gestion, de sélection et de multiplication de la diversité cultivée. En jaune foncé, les pratiques associées à un sous-système de production d'une culture (toutes sauf OF considérées comme des pratiques à l'échelle du système de production).

Les pratiques de SP peuvent être décrites par les traits recherchés, par l'impact souhaité des pratiques mises en œuvres sur la diversité cultivée et par les itinéraires d'expérimentation des variétés dans le contexte de la ferme (Fig. III.1). Les paysans et paysannes qui mettent en œuvre des pratiques de SP ont une idée des traits désirables pour certaines fonctions dans leur système de production (voir par exemple les traits cités plus haut dans Abay et al. (2008). La combinaison des traits désirés peut être vue comme un idéotype variétal (Donald, 1968) propre à la ferme. De plus, nous pensons que ces pratiques peuvent être caractérisées par rapport à leur impact souhaité sur la

10. La sole d'une culture est la surface consacrée à une culture donnée, une année donnée.
11. Zone cultivable est l'ensemble des parcelles susceptibles de recevoir une culture donnée.
12. Le délai de retour est le nombre d'années qui séparent le retour d'une culture sur une parcelle.
13. Cette culture peut être plurispécifique si les pratiques (AS,CC, VA ou SP) se réalisent sur un ensemble d'espèces (par exemple le SSP d'un méteil ou d'un mélange de blés tendres et de blés Poulards).

diversité initiale (par exemple on attend une augmentation de la diversité suite à un mélange variétal). Enfin, la connaissance progressive du comportement des variétés dans le contexte de la ferme peut être appréhendée par les concepts de situation expérimentale et d'itinéraire d'expérimentation (Catalogna et al., 2018, 2022). La situation expérimentale est la mise à l'épreuve d'une pratique, à court terme (par exemple une année donnée et sur une surface donnée). L'itinéraire d'expérimentation (ITE) permet de représenter les situations expérimentales successives et les liens entre situations expérimentales uniquement pour une ferme donnée (c'est le paysan ou la paysanne qui décide des situations expérimentales à mettre en œuvre). Dans notre cas, nous admettrons que chaque ITE est associé à une variété-population définie par son nom et le cas échéant l'ensemble des ITEs des variétés-populations qui la composent. Nous admettrons aussi que les mises à l'épreuve d'une variété-population sont liées entre elles par les pratiques de SP (multiplication, sélection...). Celles-ci peuvent aboutir à la modification de la diversité, à la mise en production de certaines variétés ou au rejet d'autres. Nous considérons que le paysan et la paysanne mettent en situation d'expérimentation une variété pour mieux la connaître sur une parcelle et une conduite de culture données, pour ensuite pourvoir mettre en œuvre des pratiques de SP adaptées.

Le cadre proposé vise à étudier les déterminants de ces pratiques de SP. Nous l'avons structuré autour de 3 hypothèses :

H1: Les variétés paysannes choisies et/ou obtenues sont le résultat i) de pratiques de SP actives et passives [14] des paysans et paysannes qui modifient la diversité cultivée et, ii) d'une prise de connaissance progressive du comportement qu'a cette diversité dans leurs conditions d'usage, prise de connaissance dont l'expérimentation est le moyen privilégié.

H2: Les pratiques de sélection paysanne de la diversité cultivée font partie de l'ensemble des pratiques qui permettent de piloter la production. Les modalités de leur réalisation sont interdépendantes des autres pratiques de production.

H3: Les pratiques de SP peuvent aussi s'expliquer par le contexte de production dans lequel elles sont intégrées.

III. 2.2 Application du cadre général

Nous avons étudié les pratiques de sélection paysanne du blé tendre [15] chez 10 paysans. Le choix de l'échantillon des individus enquêtés est expliqué dans la partie (Chap. II). Ces personnes sont toutes responsables du sous-système de production des blés paysans dans leur ferme, sauf PAJ qui ne l'est plus carc jeune retraité depuis décembre 2019 mais participant encore aux travaux de la ferme. Étant donné le nombre d'enquêtés et la profondeur de compréhension souhaitée, l'analyse sera qualitative. Les enquêtés étaient volontaires pour collaborer à une expérimentation participative

14. Pratiques non dédiées à l'évolution de la diversité cultivée.

15. Chez les paysans enquêtés, des pratiques de sélection paysanne ont été observées sur d'autres espèces : orge, avoine, mais, seigle, lin, lupin, sur des espèces du genre Triticum (en particulier, le blé Poulard, l'engrain, le grand épeautre, blé de Khorasan et l'amidonnier) et sur des espèces d'élevage (l'élevage paysan semble plus fréquent en France que la démarche de sélection/valorisation paysanne des espèces de grande culture Porcher, 2011).

évaluant certaines de leurs variétés paysannes. Cette expérimentation a duré deux années culturales et l'enquête a été réalisée au cours de la première année. Les enquêtes ont duré environ 1h30 et ont été réalisées entre le 4 et le 27 avril 2022. Elles ont été menées par Louise Perrisseau (stage de M2) et moi-même. Nous avons choisi de faire des enquêtes semi-directives. Les questions étaient principalement ouvertes et s'il nous manquait des éléments de réponse, des questions plus spécifiques étaient posées. Cela a permis à l'enquêté de pouvoir exprimer les logiques associées à ses pratiques. Par contre, sur un sujet donné, les enquêtés ne donnaient que les principales informations qui leur venaient à l'esprit et pas l'ensemble des informations qui auraient été obtenues avec une liste à questions fermées.
Le guide d'entretien a été organisé en trois parties, du plus général au plus spécifique : i) la ferme et la place du SSP du blé paysan dans celle-ci (dont leur valorisation) ii) un approfondissement sur les pratiques d'affectation du sol et de conduites des blés paysans, iii) un approfondissement sur les pratiques de sélection paysanne (Annexe B. 1). Pour des raisons de temps, la partie de l'enquête sur la description des conduites du blé paysan a fait l'objet d'un détail plus important que la partie valorisation.
En novembre et décembre 2023, j'ai posé des questions ciblées à l'ensemble des enquêtés pour acquérir les informations manquantes (Tab B.1 dans l'annexe B. 1). J'ai réalisé un autre entretien avec RAB sur la base d'un guide inspiré de celui de Catalogna et al. (2022) afin de mieux comprendre les dynamiques temporelles de mise en œuvre des pratiques de SP et d'apprentissage sur les variétés en se représentant leurs itinéraires d'expérimentation (cette notion n'était pas maîtrisée par les enquêteurs lors des premières enquêtes). Nous voulions initialement réaliser ces enquêtes d'approfondissement auprès des 5 paysans qui sont engagés en pratiques de SP et qui mettent en œuvre des pratiques de SP depuis plus longtemps mais pour des raisons de temps, l'enquête n'a été réalisée qu'auprès d'un seul paysan. Chaque verbatim du chapitre est référencé avec un identifiant unique, par exemple EMH-1a. Cet identifiant est composé du sigle du paysan, d'un chiffre correspondant au questionnaire associé (1 : première enquête, 2 : questions complémentaires, et 3 : seconde enquête) et d'une lettre pour que l'identifiant soit unique. Tous les verbatims utilisés dans ce chapitre sont également en annexe dans le tableau B.2.

Toutes les enquêtes ont été enregistrées et retranscrites de manière littérale sauf celle de MAV dont l'enregistrement a été défaillant [16]. L'analyse du contenu des entretiens a été réalisé par thématique (par exemples la thématique "les motivations des pratiques de sélection paysanne"). Ces thématiques ont été analysées soit transversalement, c'est-à-dire en cherchant une cohérence à travers l'ensemble des enquêtés, soit en passant en revue chaque enquêté sur la thématique, c'est-à dire cherchant une cohérence par enquêté. Cette seconde méthode a été réalisée uniquement pour présenter les itinéraires d'expérimentation des paysans.
Dans la partie III. 3 "Résultats et discussion", nous commencerons par introduire les fermes étudiées. Puis nous analyserons les pratiques de SP afin d'explorer l'hypothèse **H1**), d'abord de manière transversale puis selon la dynamique d'expérimentation variétale de chaque ferme. Ensuite nous analyserons l'interdépendance entre ces pratiques de SP et les autres pratiques de production de blé paysan afin d'explorer

16. Seules les informations issues des notes prises au cours de l'entretien ont été analysées.

H2, ainsi qu'avec les organismes de développements de l'agriculture paysanne pour explorer **H3**.

III. 3 Résultats et discussion

III. 3.1 Présentation des systèmes de production

Dans cette partie nous exposons transversalement les informations importantes issues des entretiens concernant la compréhension générale des systèmes de production.

III. 3.1.a Les fermes, leurs modes de production et leurs finalités

Les fermes sont gérées soit familialement (ERZ, RAB, VIL, FAT, EMH, JUC), soit collectivement (FLM, MAV, CHD, PAJ). Elles emploient entre 1 et 6 équivalents temps plein dans des régimes juridiques variés (Tab III.1). Toutes les fermes à l'étude sont en Agriculture Biologique (AB) [17]. Trois paysans ont choisi d'arrêter la pratique du labour. Tous les paysans pratiquent une sélection paysanne à la ferme depuis 2 à 18 ans.
Nous avons regroupé les réponses concernant les grandes finalités de la ferme en neuf catégories. La plupart des paysans ont mentionné comme finalité d'être davantage autonome vis-à-vis des filières agro-alimentaires conventionnelles (9/10). Cela signifie être moins dépendant des organismes en amont de la ferme (vendeurs d'engrais, d'alimentation animale, de semences...) ainsi que des organismes en aval de la ferme (débouchés en circuits longs), on peut illustrer cette finalité par la citation suivante :

> *L'objectif, moi, c'est de ne pas passer par tous les organismes qui sont en place. [...] J'ai envie de retrouver de l'autonomie au maximum.* FAT-1a

Beaucoup ont mentionné l'objectif d'adapter le système de culture aux conditions pédo-climatiques de la ferme (7/10). Il s'agit d'adapter ses pratiques agricoles aux principes d'une agriculture en accord avec les convictions (AB, agriculture paysanne, respect de la vie du sol), mais également d'améliorer la production dans le cadre de contraintes environnementales choisies et non choisies. Comme exemple du second point on peut citer :

> *c'est [...] des sols qui sont sensibles à l'excès d'humidité d'hiver et sensibles à l'excès de sécheresse au printemps. [...] Donc je suis plutôt passionné par essayer de voir comment, j'appelle ça un système sous contrainte, on peut essayer de s'y adapter.* VIL-1a

Certains ont mentionné l'objectif de produire des aliments bons et sains (6/10), à travers la maîtrise de l'ensemble du procédé de production d'un aliment (pain, fromage, viande...), et par la recherche de certaines races ou types de variétés qui seraient meilleures d'un point de vue gustatif ou nutritionnel. Cette deuxième modalité est illustrée par la citation suivante :

> *On a des objectifs en termes de goût. On va plutôt raisonner en termes de variétés de blé, de boulangerie avec qui on travaille.* JUC-2a

17. Le SSP porcin de FAT n'est pas AB car il achète des porcelets à un ami naisseur non AB.

Augmenter la diversité sur la ferme a été aussi mentionné (4/10). Cette diversité recouvre autant la diversité cultivée ou élevée que la diversité "non-cultivée" de la ferme. Ce deuxième élément peut être illustré par :

> *On a un objectif en termes de biodiversité. On voudrait qu'il y ait autant de biodiversité que dans une réserve naturelle.* JUC-2b

Les objectifs de développer de nouveaux ateliers sur la ferme (4/10) et faire vivre du monde grâce à la ferme en embauchant ou en intégrant de nouveaux associé.es (3/10) ont aussi été mentionnés :

> *Il y a une 5^{ieme} personne en cours d'association. Et pour réussir à servir tout le monde sur la table, il y a des demandes à la création d'un atelier pain, pour faire du pain à partir de la farine.* FLM-1a

Les finalités d'alléger le travail sur la ferme (3/10) et de bien transmettre la ferme (2/10) ont été mentionnées dans une moindre mesure. Elles sont parfois liées comme illustré ci-dessous :

> *L'objectif aujourd'hui est de se ménager sur la charge de travail. C'est pour ça qu'on a embauché un salarié depuis un an. [...] Après si on se projette un peu plus à moyen terme, sur les 4 associés, on est 3 à avoir plus de 50 ans. Donc on se projette un peu sur la fin de carrière. On est des anciens du GAEC. [...] On aimerait bien accueillir des gens sur la ferme. On va préparer le futur départ.* CHD-1a

Deux paysans ont évoqué un objectif de viabilité économique car ils considèrent cet objectif comme non acquis aujourd'hui. JUC évoque en particulier le contexte économique actuel difficile :

> *Et on aimerait bien en vivre aussi [...] j'avais mis des investissements très ambitieux, mais le problème, c'est que tout a augmenté dans les coûts des matières premières, dans les travaux, dans le coût de l'argent, du crédit. Là, on voit bien que ça a explosé. L'énergie, je n'avais pas anticipé autant d'augmentation.* JUC-2c

Toutefois on peut supposer que cet objectif est partagé par l'ensemble des autres paysans. En effet, on peut penser que c'est un objectif évident qu'ils oublient de citer et que probablement certains des autres enjeux concourent aussi à cette viabilité (développer un nouvel atelier, s'adapter à l'environnement, être plus autonome etc).

III. 3.1.b Les sous-systèmes de production (SSP)

Les fermes ont en moyenne huit cultures différentes et ont des SAU totales allant de 45 à 460 ha (ERZ gère provisoirement deux structures agricoles). Toutes les fermes combinent des SSP de cultures pour nourrir les animaux (fourrages) et des SSP de cultures destinées à d'autres usages (vente du produit récolté, vente du produit transformé, restitution au sol... Tab III.2). Une seule ferme (VIL) n'a pas de SSP d'élevage, mais elle est reliée à l'élevage indirectement : en effet VIL vend le foin produit par ses prairies à des agriculteur.rices voisin.e.s. Les SSP du blé paysan et les liens qu'ils entretiennent avec les autres SSP sont résumés dans la figure III.3. Il y a une forte complémentarité entre cultures et élevage, la paille des cultures est mise à disposition pour les litières, le fumier est transformé en compost ou directement épandu dans

	Structure	ETP	Mode de production	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
CHD	GAEC	5	AB>10 ans, SP 17ans	X		X				X	X	
EMH	EI	1	AB>10ans, SP 8ans					X		X		
ERZ	2 SCEA	3	AB 8ans, NL>10ans, SP 7ans	X	X		X		X			
FAT	EARL	1	AB 3ans, NL>10ans, SP 2ans	X	X		X		X			
FLM	GAEC	4	AB>10ans, SP 18ans	X	X	X	X		X			
JUC	EI	2	AB 4ans, SP 4ans	X	X	X	X	X				X
MAV	Régime belge	2	AB>10ans, NL>8ans, SP 12ans	X	X	X				X	X	
PAJ	EARL	6	AB>10ans, SP 12ans	X		X					X	
RAB	EARL	4	AB>10ans, SP 17ans	X	X	X		X				X
VIL	EI	2	AB>10ans, SP 11ans	X	X			X				

Table III.1 – Caractéristiques générales et finalités des fermes.
ETP : équivalent temps plein, AB : agriculture biologique, NL : non labour, SP : pratique de sélection paysanne sur le blé. GAEC : Groupement Agricole d'Exploitation en Commun, EI : Entreprise Individuelle, SCEA : Société Civile d'Exploitation Agricole, EARL : Exploitation Agricole à Responsabilité Limitée.
F1 : Être plus autonome vis-à-vis de la filière.
F2 : Rendre le système de culture plus adapté aux conditions pédo-climatiques.
F3 : Produire avec des aliments bons et sains.
F4 : Développer les ateliers de la ferme.
F5 : Augmenter la biodiversité sur la ferme.
F6 : Faire vivre du monde grâce à la ferme.
F7 : Alléger le travail sur la ferme.
F8 : Bien transmettre la ferme.
F9 : Être économiquement viable.

les cultures. Les fourrages ont une SAU allant de 17 à 195 ha. Ils sont pour tous les cultures-pivots [18] de la rotation. Elles ont le double enjeu de nourrir les bêtes et de contrôler un certain nombre de bioagresseurs, principalement les adventices. Le retour à la culture-pivot est généralement réalisé en fonction de la pression adventice et le cas échéant pour assurer une certaine surface de prairie proche de la ferme. Toutes les fermes ont un atelier de triage du grain en particulier du blé, c'est la première étape de la valorisation des récoltes. Les grains triés peuvent servir de semences ou être moulus en farine ; ils sont mieux conservés et répondent au cahier des charges des coopératives (en AB les récoltes sont souvent plus sales). Toutes les fermes ont un grand nombre d'ateliers sur la ferme (en général plus de 4 ateliers, Tab III.2). De manière générale, la plupart des produits des fermes sont vendus en circuits courts. Seul ERZ, ne possède que trois ateliers (laiterie, engraissage bovin et production végétale) qui ont pour débouchés des circuits longs. Il prévoit la création d'un moulin pour faire de la farine et d'une fromagerie pour faire des yaourts qu'il espère valoriser en circuit court. L'autoconsommation est très présente, elle permet l'autosuffisance alimentaire des animaux et dans une moindre mesure un apport non négligeable pour l'alimentation sur la ferme. Chaque paysan a des particularités pour ses conduites de la culture du blé. En particulier FLM, VIL, FAT cultivent leur blé en association (FLM avec une

18. La culture-pivot est la première culture de la succession culturale, en AB elle a une fonction assainissement des sols.

prairie, VIL avec de la féverole et FAT avec féverole pour le blé qui succède à un blé). MAV à deux conduites pour ses blés, un semis à la mi-octobre à densité normale et un semis en septembre à plus faible densité avec un possible déprimage par ses vaches si la fin de l'automne est trop doux. Quatre paysans cultivent des blés commerciaux en plus de leurs blés paysans ; cependant parmi eux, ERZ et FAT aimeraient cultiver uniquement des blés paysans.

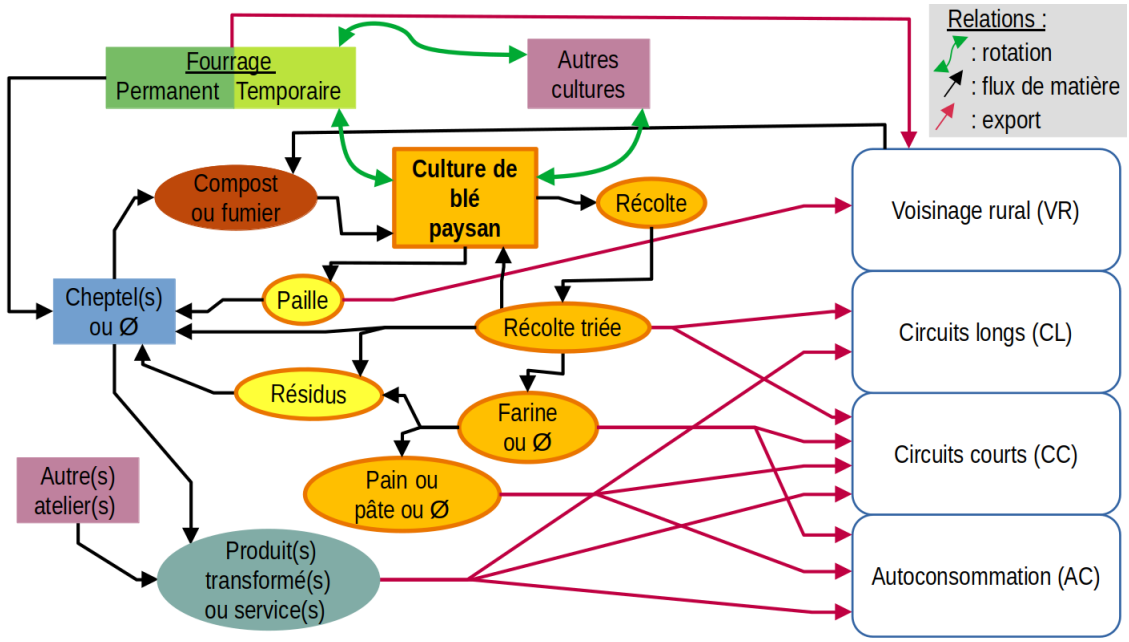


Figure III.3 – Schéma de synthèse du SSP du blé paysan dans le système de production des paysans enquêtés.
Les rectangles (resp. les ovales) représentent les ateliers (resp. des produits) agricoles. Les ateliers et les produits du sous-système de production de blé paysan sont encadrés en orange foncé. ⊘ indique l'absence de l'atelier ou du produit.

III. 3.1.c Les motivations liées aux blés paysans et aux pratiques de sélection paysanne

Les motivations mentionnées par les paysans pour cultiver et sélectionner des blés paysans sont très diverses (Tab III.3). Nous avons identifié 17 motivations différentes que nous avons regroupées en six thèmes. *Les motivations économiques* correspondent au souhait de répondre à une demande de produits issues des blés paysans (grains, farine, pain et pâte). Tous les paysans ont cité ce thème, parfois en le traduisant sous la forme de noms de variété comme PAJ :

> *Et puis, l'aspect débouché aussi [...] Tous les paysans boulangers veulent du Rouge-de-Bordeaux.* PAJ-1a

L'adaptation des variétés aux objectifs du SSP pour obtenir des variétés plus efficientes selon leurs critères de production propres. Ces critères peuvent être par rapport au comportement agronomique (10/10) ou sur la valorisation de la production (6/10). Pour cet aspect agronomique on peut citer VIL qui aimerait obtenir des variétés plus rustiques :

	Nb cultures	Cheptel(s)	SAU (ha)				Ateliers et débouchés	
			Tot	Labourable	Blé paysan	Fourrage	Présents	Prévus
CHD	4	63 chèvres laitières, 3 cochons	50	35	11	30	Moulin, boulangerie (CC) , NE-caprin, laiterie, fromagerie (CC), E-cochon (AC), paille contre compost (VR)	
EMH	8	100 brebis	78	75.5	3	25	NE-ovin (CC, CL), revente de farine (CC), legumes (CC, CL), PV (CL)	
ERZ	10	68 vaches laitières, 35 bœufs	460	260	6	195	Laiterie (CL), NE-bovin (CL), PV (CL),	Fromagerie 2023 (CC), moulin (CC)
FAT	8	6 vaches allaitantes, 150 cochons, 100 poules pondeuses	230	230	3	50	E-cochon (CC, AC), NE-bovin (CC, AC), œufs (CC, AC), PV (CC,CL)	Moulin 2024 (CC), boulangerie (CC)
FLM	4	27 vaches laitières 12 cochons	92	92	10	80	Moulin (CC) laiterie, fromagerie (AC, CC), E-bovin (CC), E-cochon (CC, AC)	boulangerie 2023 (CC)
JUC	9	20 ruches, 10 chevaux	133	133	30	46	Moulin (CC, AC), miellerie (CC, AC), pension à chevaux	Transformation en biscuit ou en pâtes 2024 (CC)
MAV	7	50 vaches allaitantes 4 cochons	45	19	3	39	Moulin (CC), moulin à huile (CC), boulangerie (AC) E-cochon (AC), bois (AC, CC), E-bovin (CC)	
PAJ	5	108 chèvres laitières, 20 cochons	95	92	16	17	Moulin (CC), Extrudeuse[a] (CC), NE-caprin, laiterie, fromagerie (CC), E-cochon (CC, AC), PV (CC), paille contre fumier (VR)	
RAB	8	45 vaches laitières	157	47	12	50[b]	Moulin (CC), NE-bovin, laiterie (CC, CL), bois (AC, CC), vergers (AC, CC), E-bovin (CL)	
VIL	13		220	210	29	75	Moulin (CC), PV (CL), fourrage (VR)	

Table III.2 – Caractéristiques des systèmes de production
[a] : l'extrudeuse pour la réalisation de pâte appartient à un collectif dans lequel PAJ est inséré. [b] : RAB a en plus 60ha d'Alpage.
Nb nombre, Tot total, SAU surface agricole utile, AC autoconsommation, CC circuits courts, CL circuits longs, VR voisinage rural, NE naisseur-engraisseur, E engraisseur, PV productions végétales.

> *C'est de se dire que si j'arrive à sélectionner du matériel qui s'adapte dans des contraintes très difficiles pour moi, c'est un matériel qui s'adaptera partout sur ma ferme. Donc beaucoup plus robuste, beaucoup plus polyvalent que les variétés du commerce.* VIL-1b

Pour l'aspect valorisation on peut citer ERZ qui aimerait pour obtenir des variétés

Thèmes	Motivations	CHD	EMH	ERZ	FAT	FLM	JUC	MAV	PAJ	RAB	VIL
La motivations économiques	Répondre aux demandes des boulangers			X	X		X	X	X	X	X
	Répondre à la demande de l'atelier boulangerie de la ferme	X				X					
	Répondre aux demandes en vente locale (ferme et magasins)							X		X	X
	Autonomie économique		X								X
Adapter les variétés aux objectifs du SSP	Objectifs agronomiques (meilleur comportement au champ)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Objectifs de valorisation (meilleur comportement en valorisation)	X		X		X		X	X	X	
Connaître la diversité	Reconnaître les variétés	X				X		X			
	Connaître les comportements agronomiques des variétés dans leur environnement de production			X		X	X	X	X		X
	Connaître les comportements des variétés en valorisation dans leur environnement de production		X	X		X	X	X	X		X
	Connaître l'histoire de la diversité					X				X	
Faire partie d'un groupe	Être en lien avec la recherche	X	X				X				
	Être en lien avec des groupes paysans	X	X	X	X		X			X	X
Participer à la diversité en soi	Conserver				X				X		X
	Créer					X		X			X
	Épanouissement personnel	X			X	X	X	X	X	X	X
Motivations politiques	Participer à un mouvement politique pour l'agriculture paysanne et l'autonomie semencière				X		X			X	
	Diffuser les variétés paysannes					X			X	X	

Table III.3 – Motivations mentionnées par les paysans pour cultiver et sélectionner des variétés paysannes.
Les X signalent les éléments correspondant à chaque motivation et identifiés à partir des réponses aux questions ouvertes. Le double trait noir au sein du tableau sépare les motivations directement reliables aux objectifs du SSP du blé des autres motivations.

avec une meilleure qualité pour les boulangers :

> *Voir si demain on pouvait, je n'aime pas le mot, mais se servir de telle ou telle variété pour donner un genre de référence auprès des boulangers.*
> ERZ-1a

Ces deux premiers groupes de motivations (économique et adaptation aux objectifs de production) peuvent être directement reliés aux objectifs productifs du SSP du blé. Le troisième thème, *Connaître la diversité* des blés cultivés s'applique à différentes dimensions de la diversité : la diversité morphologique, phénologique, qui permet de reconnaître les variétés, la diversité des comportements dans les environnants de production et de valorisation et la diversité historique. Le quatrième thème, *Faire partie d'un groupe* (7/10) recouvre les objectifs de partager des connaissances (pratiques et académiques) au sein d'une communauté. Le cinquième thème, *Participer à la diversité en soi* (8/10) consiste à être acteur de la gestion paysanne des blés et est souvent relié à l'épanouissement personnel. Pour cette motivation on peut citer :

> *Finalement au départ dans les années 2008-2010 c'était vraiment de la curiosité. Et puis je suis un peu tombé sous le charme de cette diversité, de me rendre compte que les blés c'était pas homogène comme on a l'habitude de les voir sur les bords des routes.* VIL-1c

Nous pensons en particulier que cette motivation par définition singulière pour chaque paysan.ne est importante à prendre en compte lors de réflexions sur les manières d'étendre les pratiques de SP à d'autres agriculteurs. « La passion et le plaisir » sont aussi parmi les premières motivations citées dans Bonneuil et Demeulenaere (2007). Enfin le sixième thème, *Motivations politiques*, consiste à cultiver et travailler les blés paysans pour des idéaux sociaux-politiques. Il s'agit de proposer un modèle cohérent d'agroécologie paysanne comme le dit RAB :

> *mais il y a aussi un truc un peu politique, quoi, c'est de prouver aussi que l'agroécologie, ça peut marcher, et puis qu'on a plein de choses à dire de ce côté-là, et qu'on n'a pas besoin d'OGM pour nourrir le monde.* RAB-3a

Cette dimension politique est parfois associée à une obligation sociale comme le révèle PAJ :

> *Je pense qu'on a un devoir nous paysans, c'est de continuer à les conserver, à les multiplier à les transmettre, à les distribuer, à les partager.* PAJ-1b

Souvent les motivations peuvent être directement liées aux grandes finalités de la ferme par exemple la finalité de sélectionner des variétés rustiques (Finalité F2 dans Tab III.1, citation VIL-1a) et la finalité d'adapter le système de culture aux conditions pédo-climatiques (VIL-1b), ou bien la finalité de créer un atelier boulangerie FLM-1a et les motivations pour connaître et adapter les blés pour la valorisation. Certains thèmes peuvent être reliés de manière indirecte aux objectifs du SSP du blé comme conserver et créer de la diversité ou connaître la diversité dans les conditions de la ferme, car la connaissance de cette diversité peut être utilisée pour la sélectionner ou directement l'intégrer au SSP. Au contraire, l'épanouissement personnel et les motivations politiques sont des motivations qui débordent des objectifs productifs du SSP du blé. Cependant, le fait que tous les paysans interrogés, en plus de motivations d'ordre économiques, expriment également des motivations plus personnelles liées au sensible[19] ou de la curiosité et de l'intérêt pour l'observation et la connaissance de

19. Liée à la perception du blé qui souvent est représenter comme lui même sensible, "qui rigole", "qui souffre"...

la diversité et/ou pour la démarche scientifique, et se sentent investis d'un rôle vis-à-vis de la diversité et de la diffusion modèle agroécologie paysanne, montre déjà de multiples dimensions des pratiques de SP.

III. 3.2 Analyse des pratiques de sélection paysanne du blé

Cette sous-partie vise à mieux comprendre la diversité des pratiques de SP et la logique qui sous-tend leur mise en œuvre. Pour cela nous commencerons en présentant les traits désirés et les pratiques de SP (Sous-partie { III. 3.2.a }). Ensuite nous analyserons en détail les dynamiques d'expérimentation d'une ferme que nous comparerons avec les dynamiques des autres fermes dans le but de mieux comprendre les liens entre les pratiques de SP et expérimentation (Sous-partie { III. 3.2.b }).

III. 3.2.a Vue transversale sur les pratiques de sélection

Dans cette sous-partie, nous regardons sur l'ensemble des fermes i) les traits désirés des variétés paysannes et ii) les pratiques de sélection paysanne.

Les traits variétaux désirés

Sur l'ensemble des enquêtes réalisées nous avons recensé 22 traits recherchés par les paysans présentés en Table III.4. Nous avons associé à chaque trait une fonction en lien avec l'objectif recherché par le paysan. Ces traits variétaux peuvent concerner i) le peuplement en culture (sensibilité à la verse, peuplement dense et couvrant...), ii) les résultats de récolte (rendement en grain et en paille, PMG [20]), iii) la transformation (rendement farine, potentiel de panification) ou iv) l'alimentation (goût, digestibilité). Le rendement et ses composantes ont été souvent cités, ces traits sont directement liés aux fonctions productives du blé. En fonction des environnements de culture, certaines composantes peuvent être à privilégier, par exemple MAV recherche des variétés à forte capacité de tallage pour des semis précoces à faible densité. Six traits sont directement associés à l'adaptation à des environnements culturaux spécifiques (les six fonctions commençant par "adaptation", Tab III.4). Ces adaptations peuvent être regardées du point de vue de la productivité mais aussi d'autres points de vue comme la gestion du stock semencier des adventices (pouvoir couvrant, forte biomasse paille), l'adaptation à des conditions de culture particulières (résistance à la verse et aux maladies, rusticité, phénologie)... Par exemple MAV cherche des blés qui ont une montaison tardive (pour éviter que les épis soient présents pendant les périodes de froid). VIL quant à lui recherche des blés très rustiques (voir la citation VIL-1b). Certains recherchent des variétés capables de maîtriser les adventices, comme l'explique PAJ :

> *L'avantage de ces variétés anciennes, c'est que tu as un développement végétatif qui fait que ça asphyxie les adventices.[...] Ça j'en ai pour preuve quand j'avais encore des variétés à paille courte dites modernes, quand on est passé en bio et que je voyais les adventices se développer dans les parcelles de blé, mais c'était considérable. Quand on mettait une variété de*

20. Poids de mille grains.

Principales fonctions	Traits d'intérêts	CHD	EMH	ERZ	FAT	FLM	JUC	MAV	PAJ	RAB	VIL
Capacité de rattrapage	Capacité à taller	X		X				X			
	Taille des épis	X		X						X	X
	Gros grains										X
Augmentation de la productivité	Rendement					X	X	X	X	X	
Adaptation aux fortes pressions adventices	Pouvoir couvrant					X			X		X
Adaptation aux fortes pressions adventices et intérêt pour l'élevage	Forte biomasse paille					X					X
Adaptation à des milieux riches	Résistance à la verse	X	X		X	X	X	X		X	X
	Résistance aux maladies							X		X	
Adaptation à des milieux pauvres	Rusticité	X						X			X
Adaptation aux semis précoces	Forte demande en vernalisation							X			
Adaptation aux semis tardifs	Pas trop tardif à floraison	X									
Traits morphologiques (indirectement liés à des fonctions d'intérêts)	Distance entre la dernière feuille et la base de l'épi			X							
	Couleur de l'épi									X	
	Barbes									X	X
	Courbure de l'épi	X								X	
	Couleur du grain							X			
Traits liés à la transformation	Potentiel de transformation		X	X		X			X	X	
Traits liés à l'alimentation	Goût				X		X	X	X	X	
	Qualité nutritionnelle				X			X			
	Digestibilité									X	
Aspects culturels	Blés beaux	X				X		X		X	
	Typicité						X	X			

Table III.4 – Traits et caractère d'intérêts mentionnés et leurs principales fonctions Les X signalent les éléments correspondant à chaque trait identifiés à partir des réponses aux questions ouvertes.

> *blé ancienne dans cette parcelle d'essai, les adventices étaient vachement plus limitées.* PAJ-1c

La résistance à la verse est fréquemment mentionnée (8/10). Ce trait est d'autant plus important que le milieu est à fort potentiel. De manière moins fréquente (5/10), certains traits morphologiques sont désirés car les paysans les associent indirectement à des fonctions d'intérêt. Par exemple MAV est intéressé par la couleur du grain et de la farine qui selon lui pourrait être liée à la qualité nutritionnelle et ERZ est intéressé par la distance entre la dernière feuille et l'épi qu'il pense être liée aux résistances aux maladies. RAB pense que la couleur de l'épi est associée à des fonctions d'adaptation :

> *On dit que les variétés rouges supportent mieux les terres légères, alors que les blés blancs supportent bien les terres lourdes.* RAB-1a

Cinq traits sont associés à la valorisation du blé soit pour les qualités de transformation, soit pour les qualités alimentaires. L'évaluation de ces traits est plus complexe et demande de disposer de quantités de grains suffisantes. On peut citer par exemple un des tests variétaux qu'a réalisés PAJ pour la transformation de la farine en pâte :

> *on faisait des tests à l'aveugle, [...] on avait une grille de notation, [...] la couleur de la pâte, la tenue de la pâte, la structure en bouche, il y avait pas mal de critères, je me souviens, et puis jusqu'au goût.* PAJ-1d

Enfin certains ont mentionné des traits non directement liés au SSP que nous avons qualifiés de culturels. 4/10 ont mentionné des critères esthétiques et certains aiment bien les blés atypiques (2/10). Comme dans Abay et al. (2008) les traits désirés sont nombreux, pour des fonctions variées et dépendent de chaque ferme (sur les 22 traits présentés seule la verse a été mentionnée par plus de 5 paysans). La littérature sur les traits désirés est très grande (Adu et al., 2021 ; Daudi et al., 2018 ; Wendmu et al., 2022). La typicité morphologique (couleur, forme de l'épi...) des variétés est souvent maintenue activement par les communautés paysannes pour des raisons culturelles (Boster, 1985 ; Labeyrie et al., 2019 ; Louette et al., 1997). L'ensemble des traits que nous avons identifiés sont proches de ceux identifiés par Vindras-Fouillet (2014 ; tableau 24) qui a enquêté auprès de 11 paysan.es en France sur leurs critères de sélection (les critères d'adaptation des variétés sont moins détaillés et les critères sociaux sont différents).

Les pratiques de sélection paysanne sur les 10 fermes

Nous avons regroupé les pratiques de sélection paysanne en cinq catégories (Tab III.5) selon l'impact attendu de la pratique sur la diversité cultivée. Les pratiques de *Circulation de la diversité variétale* consistent à introduire des semences de l'extérieur ou exporter ses propres semences. Tous les itinéraires d'expérimentation [21] d'une variété population commencent par cette pratique. Les pratiques de *Sélection directe sur la plante ou sur les produits transformés* consistent à sélectionner des variétés ou des individus au sein d'une variété en fonction des traits désirés (Tab III.4), notamment à partir de connaissances issues d'observation. Les pratiques de *Création de diversité variétale* consistent à augmenter la diversité variétale de manière directe en choisissant les composantes à assembler dans un mélange ou un croisement, ou bien de manière indirecte en identifiant une diversité nouvelle (épi issu de croisement spontané ou variété qui a changé par rapport à la variété initiale). Les pratiques de *Sélection de la diversité variétale par le choix des conditions environnementales* consiste à faire des cycles de semis-récoltes d'une variété diversifiée dans des conditions environnementales particulières. Ce groupe de pratiques se base sur l'idée que si une variété est diversifiée génétiquement, les individus les plus adaptés aux conditions choisies seront avantagés et laisseront plus de descendants. Les pratiques de *Maintien et de multiplication de la diversité* consistent à essayer de conserver une variété telle qu'elle est et le cas échéant de multiplier le nombre de semences. Tous les paysans ont des pratiques dans toutes les catégories sauf quatre paysans qui n'ont pas mentionné de pratiques de création variétale. De plus ce sous-groupe de paysans ne pratique pas la sélection

21. Nous supposons que les pratiques de sélection paysanne s'insèrent dans une démarche d'expérimentation à la ferme.

Catégories	n°	Pratiques	CHD	EMH	ERZ	FAT	FLM	JUC	MAV	PAJ	RAB	VIL
Circulation de la diversité variétale	p1	Échange avec un ou une paysan.ne	X		X	X	X	X	X	X	X	X
	p2	Récupération de variétés historiques directement à un paysan ou une paysanne									X	
	p3	Vente de semences à un ou une paysan.ne		X		X				X		
	p4	Demande à un centre de ressources biologique ou auprès d'une association qui développe l'agriculture paysanne	X				X	X			X	X
Création de diversité variétale	p5	Création d'un mélange à partir de différentes composantes	X	X			X		X		X	X
	p6	Insertion systématique de diversité issue de son essai dans son mélange de ferme	X								X	
	p7	Choix de parents pour un croisement	X				X		X		X	
	p8	Identification d'un croisement spontané en champs					X					
	p9	Nouveau nom suite à l'identification de la différentiation vis-à-vis de la population initiale							X			
Sélection directe sur la plante ou sur les produits transformés	p10	Sélection des variétés suite à un ou plusieurs tests en essai paysan	X	X	X		X	X	X	X	X	X
	p11	Sélection des variétés suite à un ou plusieurs tests de valorisation	X				X			X	X	
	p12	Sélection massale	X				X		X		X	X
	p13	Tri selon une taille de grain désirée										X
Sélection de la diversité variétale par le choix des conditions environnementales	p14	Suite de semis-récolte d'une population diversifiée dans les conditions culturales de la ferme	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	p15	Suite de semis-récolte d'une population diversifiée dans de différentes conduites de culture							X			X
	p16	Suite de semis-récolte d'une population diversifiée dans une position particulière de la succession des cultures	X								X	X
	p17	Suite de semis-récolte d'une population diversifiée dans des parcelles ayant certaines conditions pédologiques particulières au sein de sa ferme					X	X				
Maintien et multiplication de la diversité variétale	p18	Multiplication des variétés	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	p19	Réinsertion systématique des variétés à petit grain après le triage d'un mélange diversifié	X				X	X			X	
	p20	Élimination des contaminations (variétés non désirées)	X				X		X	X	X	

Table III.5 – Pratiques de sélection paysannes identifiées durant l'enquête.
Les X signalent les éléments correspondant à chaque pratique de SP identifiées à partir des réponses aux questions ouvertes.

massale ou intra-variétale (p12) alors que tous les autres (sauf EMH) le pratique. Il sera intéressant de mieux comprendre les distinctions entre ces deux sous-groupes de paysans.
Au total nous avons identifié 20 pratiques numérotées de p1 à p20. Parmi elles, certaines pratiques de SP qui visent explicitement à s'approcher des traits désirés réper-

toriés dans le tableau III.4 sont :

- Les deux pratiques de mélange (p5 et p6). *A priori* le mélange aura des valeurs des traits diversifiées correspondant aux composantes. L'ITE d'une variété peut finir par cette pratique si la variété est intégrée au mélange de production et n'est plus cultivée ailleurs.
- Le choix des parents pour un croisement (p7). *A priori* la population issue de croisement aura des valeurs de traits distribuées autour des valeurs parentales, certains individus issus du croisement pouvant combiner les traits d'intérêt des deux parents.
- Les quatre pratiques de sélection directe (p10, p11, p12 et p13) selon des traits agronomiques ou de valorisation.
- Les quatre pratiques de sélection par le choix des conditions environnementales (p14, p15, p16 et p17). Celles-ci agissent *a priori* uniquement sur des traits agronomiques.

Les pratiques de SP les plus mentionnées sont les échanges entre paysans (p1, 9/10), la création de mélanges (p5, 6/10) la sélection de variétés suite aux observations dans un essai (p10, 9/10), l'enchaînement de semis-récolte d'une population [22] dans les conditions culturales de la ferme (p14, 10/10), la multiplication en parcelles dédiées (p18, 10/10).
Certaines pratiques n'ont été mentionnées que chez un seul paysan comme l'identification de croisements spontanés (p8, cf ITE de FLM dans l'annexe B. 2) ou l'identification de changements notables entre la version initiale d'une variété et la version cultivée depuis plusieurs années dans sa ferme (p9), par exemple MAV note que sa version de Savoysone n'a que des épis roux alors que la version initiale en a des roux et des blancs (Fig III.4, cf ITEs de MAV dans l'annexe B. 2). On observe que les paysans qui ont commencé la sélection paysanne depuis plus longtemps ont aussi mis en œuvre davantage de pratiques de sélection (Fig III.5). Il sera intéressant de mieux comprendre comment ces pratiques de SP se mettent en œuvre et les liens entre pratiques de SP. Dans la littérature, les pratiques de sélection décrites correspondent principalement aux catégories du *Maintien et multiplication de la diversité variétale* (Abay et al., 2008 ; Perales et al., 2005), de la *Sélection directe des plantes ou sur les produits transformés* (Abay et al., 2008 ; Jarvis et Hodgkin, 1999 ; Louette et Smale, 2000) et de la *Circulation de la diversité variétale* (Leclerc et Coppens d'Eeckenbrugge, 2011 ; Pautasso et al., 2013). La *Création de diversité variétale* est moins fréquente (sauf par la recombinaison naturelle chez les plantes allogames Jarvis et Hodgkin, 1999), de même que la sélection par le choix des conditions environnementales, bien que certains paysans éthiopiens pour régénérer la vigueur germinative de leurs variétés d'orge les sèment dans des conditions très particulières (Abay et al., 2008) ou Zohary et al. (2012) qui considère que la sélection par l'environnement lors de sa domestication est inconsciente. Il a été montré sur des populations hétérogènes expérimentales de blé que l'enchaînement de cycles de semis-récoltes dans des conditions pédo-climatiques diverses conduisait à une évolution des traits de la population initiale, et certaines évolutions dépendant des environnements (Enjalbert

22. Souvent appelé population dynamique par les paysan.nes.

Figure III.4 – Photo de Savoysone (à gauche) et Savoyon (à droite) dans l'essai de FLM en juillet 2023, montrant la capacité d'évolution des variétés populations.

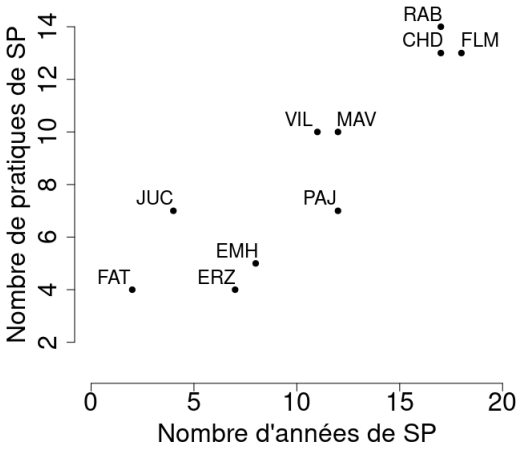


Figure III.5 – Nombre de pratiques de SP en fonction du nombre d'années en le sélection paysanne.

et al., 2011). Par exemple en quelques années, les populations cultivées dans des environnements méridionaux devenaient plus précoces (Goldringer et al., 2006). Ceci suggère que ces pratiques de SP par le choix des conditions environnementales peuvent dans certains cas induire une adaptation à ces conditions et en relativement peu d'années de culture. Comme nous le verrons par la suite ce sont souvent des combinaisons de pratiques de sélection qui sont mises en œuvre selon certaines logiques.

III. 3.2.b Analyse des dynamiques de mise en œuvre des pratiques de SP et d'expérimentation variétale

Dans la partie *Matériel et méthodes*, nous avons défini l'ITE comme étant associé à une variété-population définie par son nom et le cas échéant l'ensemble des ITEs des variété-populations qui la composent et que les mises à l'épreuve d'une variété-population [23] sont liées entre elles par les pratiques de SP (multiplication, sélection...). L'expérimentation des variétés dans les fermes semble un élément important pour la sélection paysanne. Certains comme JUC, VIL ou RAB ont expérimenté les blés avant de s'installer, EMH quant à lui prolonge un travail de SP qui a été commencé par son père, les autres ont commencé l'expérimentation paysanne au cours de leur activité agricole.
Dans cette partie, nous présenterons en détail un sous-ensemble des ITEs de RAB (dans les encadrés gris), les ITEs des neuf autres paysans sont décris plus succinctement en annexe B. 2. Lors l'analyse des ITEs, les ITEs de RAB seront comparés avec ceux des autres paysans pour avoir un aperçu de la diversité des logiques de sélection paysanne.
La figure (Fig III.6) présente graphiquement certains ITEs de RAB et complète leur représentation narrative présentée dans les encadrés ci dessous.

23. Dans l'essai variétal ou en test de valorisation.

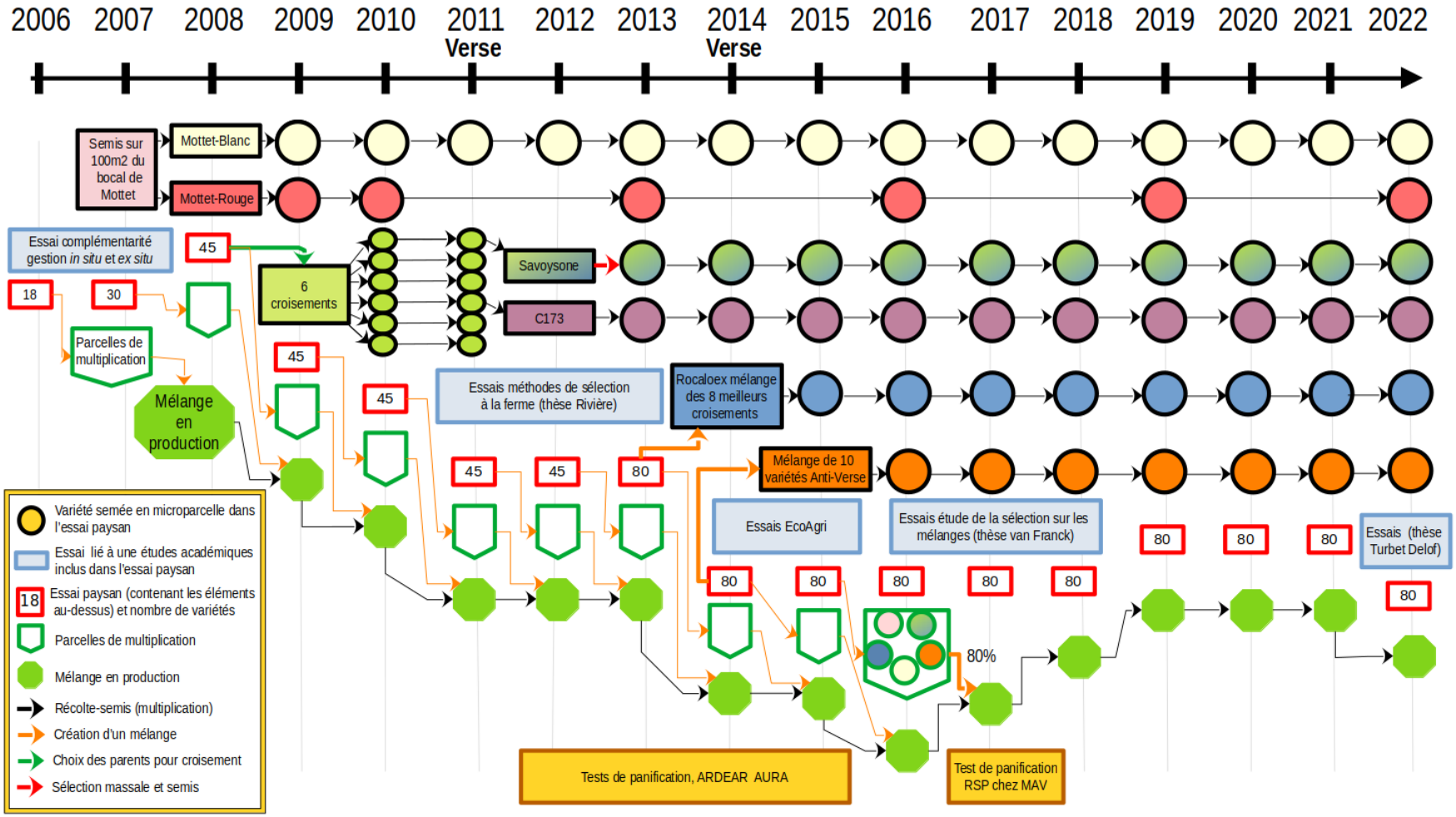


Figure III.6 – Représentation schématique d'une partie des itinéraires d'expérimentations (ITE) de RAB.
Un ITE est associé à une variété-population définie par son nom et le cas échéant l'ensemble des ITEs des variétés-population qui la composent ou dont elle est issue (par exemple ITE complet de Mottet-Blanc est associé aux ronds blancs de Mottet-Blanc et le carré rose de Mottet-Blanc et Mottet-Rouge).

Encadré III.1 : **Contexte à l'expérimentation et aux pratiques de SP de RAB**

RAB commence à s'intéresser aux variétés paysannes en 2001 en BTS, grâce à un de ses professeurs qui avait récupéré une variété de pays de Seigle (le seigle de Chautagne). Il a ensuite continué à s'intéresser aux variétés paysannes à travers le travail de l'ARDEAR Rhône-Alpes. Avec ce groupe, ils ont fait un voyage chez un agriculteur pionnier en Lot et Garonne (JFB) en 2005. RAB est revenu convaincu et a souhaité faire des essais dans sa ferme pour obtenir deux populations adaptées à ses deux types de sol (sol séchant et sol hydromorphe). A l'automne 2005, a lieu une réunion du RSP à Lyon, un petit programme d'essais débute avec 10 variétés qui sont réparties dans différentes fermes. Il s'est porté volontaire pour accueillir une plateforme avec ces 10 variétés qu'il a complétée par le seigle de Chautagne et 8 variétés de la région récupérées au centre de ressource biologique (CRB). Suite à ce premier essai, RAB a réalisé des essais de variétés paysannes chaque année.
Comme l'explicite RAB, ces essais permettent de comparer ces variétés entre elles dans l'environnement de culture du blé sur sa ferme :

> *Dans l'essai, je regarde comment les blés se tiennent, comment ils poussent, comment ils sont beaux ou pas, ceux qui donnent envie. J'essaie de passer de mettre un peu des notes, même pour moi, quand il y a des trucs un peu notables. Par exemple, les années où il y a beaucoup de verse, je vais mettre une note de verse pour tout le monde. [...] certaines années, je ne le mets pas, parce que tout le monde se porte bien. Du coup, c'est moins remarquable.* RAB-3b

Mais son essai a d'autres objectifs :

- La conservation *in situ*, pour ne perdre pas « *les vieux blés de pays* »
- Présenter une vitrine (à des boulanger.ères, pour la formation de praticien.nes , à des client.es...)
- Faire partie des éléments "identitaires" de la ferme. « *Ça fait un peu partie de l'identité de la ferme.* » RAB-3c

En plus de son essai variétal, RAB a souvent de plus grandes parcelles pour la multiplication (pour mettre dans son mélange en production, pour diffuser ou pour faire des tests de panification).
Plusieurs variétés que l'on peut nommer variétés « témoins », sont semées chaque année pour aider à interpréter les essais et dans un but pédagogique. En particulier RAB a utilisé la variété commerciale Renan [a] comme témoin :

> *le Renan, il est vachement pédagogique, et quand on reçoit des groupes et tout [...] Enfin, c'est un blé moderne [...] c'est souvent sur celui-là qu'on reste le plus longtemps pour discuter.* RAB-3d

Les répétitions sont surtout pour les essais en lien avec la recherche car il dit qu'il arrive à voir l'hétérogénéité du terrain sans les répétitions (même s'il reconnaît que celles-ci peuvent l'aider). Les parcelles étaient de 10 m^2 au début et depuis

2010 elles sont de 5 m^2 afin d'économiser en place et en travail. Il fait varier le choix de la parcelle où est installé la collection :

> *[tu mettais en général tes collections dans les endroits un peu les plus difficiles de tes champs ?] Oui, mais pas que. Avant, je faisais vachement ça [...] C'était aussi pour les renforcer. Avec l'idée que s'ils arrivent à faire leur cycle dans les endroits les pires, les endroits où ça va bien, ils vont rigoler*[b]*. [...] Mais là, maintenant, ils sont plutôt, je vais dire, dans des endroits représentatifs.[...] quelque part en mémoire et ils enregistrent qu'il peut se passer différentes choses. Il faut être capable de mettre de la racine si une année est sèche et puis être capable de supporter l'eau si une année est humide.* RAB-1b

a. Renan est inscrite en 1989 mais encore très cultivée en AB.
b. Expression fréquente dans le groupe de paysans

L'encadré III.1 permet de :

— connaître l'origine des premières variétés testées dans ses essais variétaux (projet de recherche et demande auprès d'un centre de ressources génétique) ;

— identifier certaines motivations pour les blés paysans : sensibilisation grâce à sa formation, dynamique collective avec des paysans et paysannes de l'ARDEAR, envie d'obtenir deux variétés paysannes adaptées chacune à un type de terre de sa ferme ;

— décrire les fonctions qu'il attribue à l'expérimentation : évaluation des variétés, conservation *in situ*, vitrine vers l'extérieur, élément de l'identité de la ferme ;

— connaître les manières dont il expérimente : comparaison entre micro-parcelles de blé, mise en place de témoin et parfois de répétitions, choix des parcelles où mettre l'essai.

Tous les paysans ont déjà fait des essais variétaux à la ferme[24]. Ces essais consistent à tester plusieurs variétés dans des micro-parcelles (généralement entre 5 et 15 m^2) dans les conditions de la ferme (pratiques et pédo-climat). Six des 10 paysans font des essais variétaux chaque année (CHD, FLM, JUC, MAV, RAB et VIL), les autres font des essais en fonction des besoins.
Les ITEs commencent par l'arrivée de lots de semence issus d'origines diverses (p1 à p4 dans le tabeleau III.5), puis les variétés sont testées et multipliées dans les essais. Néanmoins certains paysans (MAV, JUC, EHM, FAT, ERZ) ont mentionné avoir déjà utilisé directement en production une variété paysanne issue d'un échange de plusieurs kilos, qu'ils peuvent retravailler par la suite.

24. Pour FAT, 2022 est la date de son premier essai.

Encadré III.2 : **représentation narrative des ITEs de RAB (1/4)**
ITE du « bocal de Mottet »

Suite à des recherches historiques, RAB apprend que 90% de la sole en blé de sa région était cultivée par des blés de type Mottet en 1912. Malheureusement, cette variété n'est pas dans les listes du CRB. En 2006, il rencontre un vendeur de produits agricoles qui connaît une dame dans son village qui en cultivait pour ses poules. Il parvient à récupérer un bocal d'1 kg de grains vieux d'environ 10 ans qu'il sème sur 100 m^2 en 2006. Seulement 10 grains germent et donnent 9 plantes blanches et une plante rouge, qu'il nomme Mottet-Blanc et Mottet-Rouge. Il se rend rapidement compte que la variété Mottet-Blanc est plus intéressante que Mottet-Rouge. Il l'a rapidement multipliée en plus grande parcelle (2008) et intégrée dans son mélange (2009). La succession des semis-récoltes dans l'essai et les tests de panification confirment son intérêt (« Tient debout, assez productif, farine correcte » RAB-3). RAB est intéressé également par la valeur patrimoniale et historique du Mottet-blanc comme le montre la citation suivante :

> *Quand il y a le plus grand public, entre guillemets, qui vient voir les blés, c'est important de leur montrer celui du coin. On a la vache d'Abondance, on a la chèvre de Savoie, [...] il y a des cépages de vignes qui ne sont pas ailleurs, tout le monde les connaît, mais par contre, pour les céréales à la paille, rien du tout [...] du coup, c'est important de leur montrer et de le faire connaître [...] Et puis je les ai diffusés aussi le plus vite possible, pour être sûr qu'ils vivent, qu'ils ne disparaissent pas.* RAB-3e

Le Mottet-Rouge quant à lui n'est ni abandonné ni intégré à la production, il est semé dans l'essai variétal dans un but de conservation.

L'ITE du "bocal de Mottet" présenté dans l'encadré III.2 peut être schématiquement décomposé en pratiques p2, p10 puis p11 (TabIII.5), la population de Mottet est directement récupérée chez un paysan (sans jamais passer par un centre de ressources génétiques), est sélectionnée pour ses qualités agronomiques puis de panification. Cet ITE montre l'intérêt de RAB pour des variétés historiques de la région dans un but à la fois patrimonial et agronomique. Il suppose qu'elles pourraient être adaptées à ces conditions environnementales (ce qui a été confirmé pour Mottet-Blanc mais pas pour Mottet-Rouge par exemple). Il fait attention à ce que ces variétés ne soient pas perdues en les partageant avec d'autres paysans et paysannes. Pour cette raison de conservation, les ITEs de certaines variétés se prolongent sur un certain nombre d'années sans intégration en production ni abandon.
Tous les paysans sont influencés par cette dimension historique et ont dans leur essai des variétés de leur région respective, par exemple MAV a le Roux-des-Ardennes, ERZ le Blé-d-Argonne, EMH des blés issues du Beauceron, CHD la Touselle-Rouge-des-Hautes-Alpes, JUC le Blé-du-Gâtinais, PAJ le Poulard-Blanc-Velu-de-Touraine... Ces blés ne sont pas tout le temps intégrés en production (comme Mottet Rouge chez RAB).

Encadré III.3 : **représentation narrative des ITEs de RAB (2/4)**
ITE des descendances des croisements de RAB

En 2008 dans le cadre d'un projet de sélection participative, RAB envoie six couples de variétés intéressantes et complémentaires à Isabelle Goldringer (INRAE) pour réaliser des croisements. Ces variétés sont Mottet-Rouge, Mottet-Blanc, Alauda, Saissette-de-Provence, Blanc-de-Saône, Rouge-de-Bordeaux et Inconnu-de-Raphaël (une variété dont le nom est perdu, ayant les caractéristiques d'une variété de pays). En 2009, 2010 et 2011 il multiplie les grains issus des 6 croisements. L'année de culture 2012-2013 il remarque deux populations qui sortent du lot, Inconnu-de-Raphaël x Blanc-de-Saône (renommée par Raphaël Savoysone) et Rouge-de-Bordeaux x Blanc-de-Saône. Il a réalisé un peu de sélection massale négative [a] dans le Savoysone en 2012. Les deux populations deviennent des variétés paysannes et sont cultivées chaque année dans l'essai et rapidement mises en parcelles de multiplication et intégrées dans le mélange de ferme. De plus, Savoysone a réussi les tests de panification. Elle est distribuée assez largement et devient le témoin commun des essais de sélection participative en 2014. Les quatre autres populations issues des croisements sont parfois réintroduites dans l'essai pour être conservées :

> *Des fois ils versent un peu, il y a rien qui motive à mettre beaucoup d'énergie dessus.* RAB-3f

a. En enlevant les individus non désirables.

Dans l'encadré III.3, plusieurs pratiques de SP s'enchaînent (Tab III.5) : le choix des parents (p7), puis trois années de multiplication (p18) puis une sélection entre variétés (p10) et une sélection massale (p12). Chez les paysans enquêtés, la sélection massale est généralement réalisée sur des variétés issues de croisement (contrôlé ou spontané), cette sélection massale est alors souvent négative, c'est-à-dire que sont enlevés les individus non-désirés. Parfois la sélection massale est positive c'est-à-dire en ne retenant que les individus désirés, l'intensité de sélection est alors plus forte. On peut citer comme exemple l'obtention de la variété Pourpayon par MAV. Dans ce cas, il y a eu d'abord récupération d'un croisement auprès d'un paysan (p1), puis plusieurs cycles de semis-récoltes (p14), suivis d'une sélection massale positive (p12) pour ne garder que les grains pourpres de la population issue de croisement.

Encadré III.4 : **représentation narrative des ITEs de RAB (3/4)**
ITE de la méthode de « Japhabelle »

RAB décrit la création de son mélange Rocaloex comme un « plagiat de Japhabelle » c'est-à-dire avec une approche similaire à la méthode qui a permis à JFB d'obtenir sa variété Japhabelle. En 2008, JFB et son fils ont choisi de manière indépendante les 22 meilleures populations issues de croisements parmi 90. En s'inspirant de cette méthode sur son essai en 2014, RAB a sélectionné

7-8 populations parmi 14 populations issues de croisements (12 croisements de JFB et Savoysone et C173). Le mélange obtenu a été nommé Rocaloex et a été, dès 2015, mis en parcelle de multiplication. En 2016, il passe en parcelles de multiplication de 2000 m^2 puis est intégré dans son mélange. RAB a également testé ce mélange en panification en 2017.
Cet exemple montre un autre enchaînement de pratiques de SP pour valoriser différemment des croisements variétaux (Tab III.5) : sélection entre variétés (p10) puis création d'un mélange (p5).

ITE du mélange Anti-Verse.

En 2011 et 2014 chez RAB, beaucoup de variétés ont versé (suite à de forts orages). Il a alors noté les variétés de l'essai sur ce critère. En 2014, il a créé un mélange de variétés selon un seul critère :

> *C'était les dix variétés qui n'étaient pas versées alors que toutes les autres l'étaient.* RAB-1c

Selon le test de panification de 2017 et les retours des boulangers, le mélange serait également très adapté à la panification. Il est chaque année dans l'essai et multiplié pour être intégré dans le mélange de ferme en 2016.

Le premier ITE présenté dans l'encadré III.4 montre que des enchaînements de pratiques peuvent être inspirés d'autres paysans (le paysan qui a obtenu Japhabelle avec son fils est paysan pionnier faisant partie du groupe blé du RSP). L'ensemble montre différentes stratégies pour réaliser un mélange, une sélection des composantes peut se faire à partir de l'évaluation globale du peuplement variétale (comme pour Rocaloex) ou à partir d'une évaluation sur seulement un ou deux critères (par exemple seulement la verse pour Anti-Verse). Ces enchaînements de pratiques peuvent se résumer en p10 et/ou p11 c'est-à-dire sélection des composantes puis mélange (p5). Comme critères de sélection spécifiques avant mélange ont été mentionnés la résistance à la verse (Anti-Verse chez RAB et Grand-Clesle chez EMH), la capacité de tallage combinée à une montaison tardive (Popayon chez MAV), une floraison pas trop tardive (Mélange en production de CHD).

Encadré III.5 : **représentation narrative des ITEs de RAB (4/4)**
ITE du mélange en production, le mélange de Loex.

A l'automne 2007, le mélange constitué uniquement de variétés de pays est semé sur 600 m^2. Par la suite, chaque année RAB intègre des variétés après criblage dans son essai :

> *Du coup, chaque année, j'ai rajouté des variétés qui me plaisaient. Il y a certaines variétés qui ont été en très grosses proportions rajoutées. Et puis il y en a d'autres qui ont eu tendance à disparaître. Mais je pense qu'il y en a plus d'une centaine qui sont dans le mé-*

> *lange à la base. Après, il y en a certainement qu'on voit disparaître complètement. Mais il y a aussi certainement d'autres qui sont apparues, des croisements spontanés qui se sont faits.* RAB-1d

RAB est capable de reconnaître la plupart des types de variétés de son mélange et dans certains cas de savoir si une variété disparaît du mélange.

> *Et il y a eu des années, genre 2014, où il y avait beaucoup de grains germés aussi. Il y a eu certaines variétés qui étaient germées à pas loin de 100%. Il y a une variété qui a disparu quasiment cette année-là. [...] Je l'avais mise pas mal dans le mélange. [..] C'était le blé-de-l-Himalaya. Il est facile à reconnaître. Il est rouge avec des grains rouges, rouges écarlates.* RAB-3g

Le mélange Loex a aussi été échangé avec d'autres paysans et paysannes :

> *Il a vécu aussi pas mal. J'en ai filé à différentes personnes, surtout dans la région. Et puis souvent, ces gens-là me l'ont redonné au bout de 2-3 ans. Et puis vu qu'il a passé 2-3 ou 5 ans dans d'autres fermes, sur d'autres climats, d'autres types de sols, il a pris de la mémoire ailleurs et il a souvent été enrichi encore par des variétés que je n'ai même pas ici.* RAB-1e

RAB dédie toujours une parcelle pour la semence, parcelle qu'il choisit généralement avec un bon précédent. Il récupère environ 50kg de semences et peut alors ajouter des variétés issues de multiplication ou directement de sa collection en contrôlant les proportions. En 2016, Mottet-Blanc, Alauda, Rocaloex, Anti-Verse, Savoysone sont en grandes parcelles de multiplication. En 2017 il les introduit dans son mélange et elles constituent alors 80% de son mélange. Selon lui, il n'a plus trop évolué depuis ce gros changement de 2017.
Son objectif initial d'obtenir deux variétés adaptées aux deux types de sol de sa ferme n'a pas été atteint néanmoins selon lui :

> *Le principal, c'est d'avoir une farine chouette à proposer. Avec beaucoup de gens qui viennent chercher de la farine, qui sont malades, qui ont des problèmes de santé, puis qui digèrent les pains, qui se font à partir de la farine là, du coup. [...] On se dit qu'on n'est pas tout à fait dans le faux, quoi.* RAB-3h

Les mélanges en production peuvent être vus comme un ITE, car chaque année, le paysan ou la paysanne peut choisir de maintenir en production son mélange ou de l'abandonner. L'encadré III.5 montre bien l'aspect dynamique de l'intégration des variétés dans le mélange de ferme de RAB, modifiant fortement en une année le travail de plus de 10 ans. En effet on observe tout d'abord la fondation du mélange (p5, Tab III.5) puis une succession d'ajout de composantes sélectionnées chaque année dans le mélange (p6) et en fin en 2016, un dernier mélange qui va transformer le mélange de Loex en profondeur (les nouvelles composantes constituent 80% du mélange).
Cela montre aussi que RAB adapte les quantités récoltées pour pouvoir contrôler de manière précise la composition de son mélange, montrant ainsi l'importance de cette

pratique.
Cet exemple nous montre que les paysans sont capables d'observer la disparition de certaine composantes dans leurs mélanges (par exemple le blé-d'Himalaya pour RAB ou les blés Poulards pour VIL). Cette compétence peut être utile pour la gestion des mélanges dans le temps. On note aussi l'importance du choix de la parcelle pour l'essai variétal et pour le renouvellement des semences des variétés en production (citation RAB-1b) afin de favoriser l'adaptation locale des variétés (pratique p14 dans le tableau III.5) et même l'adaptation "multi-locale" (comme le montre l'encadré ci-dessus avec les pratiques d'échange (p1) de son mélange de production avec des paysan.nes de la région). On peut mentionner trois ITEs d'autres paysans qui mettent en œuvre des variantes de la pratique p14 :

— le mélange de Trancherie de VIL est issu d'un mélange de 30 variétés parmi 35 (p10, p5) de suivi de cinq cycles semis-récoltes dans des parcelles en fin de rotation (p16) puis de trois cycles semis-récoltes en semis direct avec du trèfle et de la luzerne (p15) ;

— le mélange Popayon de MAV est issu d'un mélange (p5) de 11 variétés suivi de cinq cycles semis-récoltes dans des conduites et des parcelles particulières (p15, semis en précoce à faible densité avec davantage de binage et parfois un déprimage [25] par ces vaches) ;

— le blé Compact-Hérisson a été demandé par JUC auprès d'une association de développement de l'agriculture paysanne (p4) puis sélectionné parmi ses variétés (p10) pour être ensuite cultivé principalement dans ses terres les plus pauvres (fin de rotation, terres sableuses et acides, p16 et p17).

Synthèse sur les dynamiques de mises en œuvre des pratiques de SP et d'expérimentation variétale
A partir de l'analyse de ces ITEs, on peut identifier quelques éléments importants sur les pratiques de SP.
On peut d'abord proposer différents statuts des variétés en fonction des règles de création et de gestion paysanne qui leur ont été appliquées :

— Les variétés gardées uniquement dans un but de conservation et d'échange.

— Les variétés témoins, semées chaque année dans l'essai. Elles sont bien connues par les paysan.ne.s et peuvent avoir des fonctions pédagogiques.

— Les variétés nouvelles dans l'essai ou mal connues qui seront l'objet d'une attention particulière.

— Les variétés sélectionnées par les paysan.ne.s par une pratique de SP particulière :

1. pour un croisement,
2. pour un mélange,
3. pour être cultivées en parcelle de multiplication afin d'être intégrées dans le mélange en production.

25. Le déprimage est la pratique de faire pâturer ces blés avant de début de la montaison.

— Les variétés en production.

L'ensemble des ITEs analysés nous permet de montrer un gradient intéressant sur la manière de sélectionner. Certains (FLM, VIL, MAV CHD et dans une moindre mesure EMH) ont des dynamiques proches de celles de RAB concernant leurs mélanges en production, ils sélectionnent les composantes pour des mélanges diversifiés (ou pour des croisements) puis essayent de les adapter à certaines conditions. Alors que PAJ, JUC FAT et ERZ sélectionnent les variétés et les cultivent sans les mélanger pour garder leurs spécificités. Cette stratégie n'implique pas forcément de ne pas cultiver une forte diversité en production (par exemple JUC a sept variétés différentes en production). Ces derniers choisissent les meilleures options disponibles, alors que les premiers créent des alternatives aux possibilités existantes. Ces deux stratégies de sélection à la ferme nous semblent complémentaires et pertinentes.

Ces exemples nous ont permis d'identifier un certain nombre de combinaisons de pratiques de SP montrant le côté créatif et l'opportunisme (dans le bon sens du terme) des paysans et paysannes pour profiter de façon pragmatique et astucieuse des circonstances et des événements qui se produisent.

Retour sur l'hypothèse H1. La première partie de l'hypothèse H1 est que les variétés paysannes choisies et/ou obtenues sont le résultat de pratiques de SP actives et passives sur la diversité cultivée. Nous avons répertorié 20 pratiques de sélection paysanne différentes (Tab III.5). La quasi-totalité sont des pratiques pour lesquelles le paysan a une idée de leur impact sur la diversité. En particulier les pratiques de sélection de variétés diversifiées par le choix de l'environnement de culture sont faites dans le but de favoriser l'adaptation à cet environnement (RAB-1a, le fait que FLM et VIL appellent leurs variétés "pop-dynamique" [26]).
La première partie de l'hypothèse H1 est qu'il y a une prise de connaissance progressive du comportement des variétés dans les conditions d'usage et que l'expérimentation en est le moyen privilégié. Nous avons vu que l'expérimentation des variétés se fait par les essais variétaux au champ et par des tests sur les qualités pour la valorisation. Les paysans attribuent à l'expérimentation certaines fonctions importantes pour leur processus de sélection :

— l'essai variétal facilite l'observation et la comparaison des variétés ;

— l'essai variétal permet de créer, conforter ou au contraire remettre en cause des connaissances sur les variétés (en particulier les variétés nouvelles dans l'essai ou mal connues) ;

— l'essai variétal est le lieu où sont mis en œuvre des pratiques de SP (Tab III.5), il s'agit principalement des pratiques de multiplication des semences (p18), d'élimination des contaminations (p20), de sélection massale (p12) et d'identification de nouvelle diversité (p8 et p9) ;

26. Le nom de "Popayon" est aussi en référence à l'expression "pop-dynamique"

— l'essai variétal et les tests de valorisation permettent de choisir les variétés à sélectionner soit pour les conditions générales de la ferme, soit pour des conditions spécifiques :

1. Le choix des variétés sélectionnées est souvent basé sur la succession de mises à l'épreuve par expérimentation permettant des consolidations ou au contraire des remises en cause des connaissances sur le comportement moyen des variétés dans l'essai, sur une ou plusieurs années (par exemple Mottet-Blanc, Savoysone, C173, les composantes de Rocaloex sont toutes jugées se comportant mieux que les autres variétés de l'essai ou pour RAB, la plupart des variétés sont validées pour la panification et Anti-Verse sort positivement du lot de variétés testées de cette façon).
2. Le choix des variétés sélectionnées peut être issu de connaissances sur la réponse des variétés dans des conditions particulières (mélange Anti-Verse sélectionné par RAB grâce aux informations issues de 2 années à forte verse ou Popayon sélectionnée spécialement pour une nouvelle conduite culturale testé dans la ferme de MAV puis cultivé uniquement dans cette conduite culturale en production).

Selon Lecomte (2005 ; page 39), cette forme d'apprentissage par l'observation plusieurs années dans des essais variétaux est également très présente chez les sélectionneurs en France [27].
Néanmoins les connaissances obtenues par l'expérimentation ne sont pas suffisantes pour expliquer l'ensemble des pratiques de SP. Par exemple certains paysans intègrent des variétés dans le SSP avant de les tester dans leur essai ou seulement après peu d'années dans l'essai variétal. On peut supposer qu'avant de regarder les différences entre variétés paysannes chez eux, ils se sont basés sur les (plus grandes) différences entre variétés paysannes et variétés du catalogue (c'est le cas par exemple EMH, MAV ou PAJ, citation PAJ-1c). Ces informations ont sans doute été suffisantes pour les conduire à abandonner (parfois pas totalement) les variétés du catalogue. On peut supposer aussi qu'ils ont un *a priori* sur certaines variétés dû à des échanges de connaissances en dehors des connaissances produites par l'expérimentation (bibliographie, partage d'expériences...). De plus les essais paysans sont souvent utilisés pour des rencontres entre paysans et paysannes pour le partage de connaissances pratiques, mais ces suggestions dépassent notre hypothèse H1.

Les difficultés de l'expérimentation

Les difficultés mentionnées par rapport aux essais variétaux sont regroupées en deux catégories : les difficultés liées au manque de temps (pour l'observation ou pour gérer l'essai) et celles liées au manque de moyens (matériels, méthodologiques ou organisationnels, Tab III.6). On peut supposer que ces deux principales difficultés sont liées, le problème de temps pouvant être dû à un manque de moyens. Nous avons rencontré trois grandes façons de pallier ces difficultés :

27. « Les sélectionneurs acquièrent la connaissance initiale sur les génotypes, par l'observation année après année des lignées en cours de sélection, et par la mémorisation progressive de leurs caractéristiques, sans que cette connaissance soit intégralement retranscrite, ou retranscrite d'une façon communicable ».

Catégories	Difficultés	CHD	EMH	ERZ	FAT	FLM	JUC	MAV	PAJ	RAB	VIL
Manque de temps	Pour observer	X						X		X	
	Pour gérer l'essai	X	X	X			X	X			X
Manque de moyens	Manque d'aide				X			X			
	Manque de rigueur expérimentale									X	
	Matériel inadapté	X			X		X		X	X	X
	Difficultés à valoriser des données					X				X	
	Charge mentale										X

Table III.6 – Difficultés rencontrées par les paysans.
Les X signalent les éléments correspondant à chaque difficulté identifiée à partir des questions ouvertes.

— partager certaines tâches de l'essai paysan avec un organisme de développement de l'agriculture paysanne,

— réaliser des investissements collectifs dans du matériel,

— réaliser des investissements (en argent ou en temps) individuels dans du matériel,

— garder une taille d'expérimentation modeste (peu de micro-parcelles testées).

Seul FLM partage les tâches avec un organisme (le GAB d'Anjou). Des mesures sont réalisées par un service civique et FLM coordonne les chantiers participatifs de récolte. Il considère qu'il ne passe pas trop de temps sur l'essai, sur une année il passe 2 jours pour les semis (un jour de préparation des parcelles et 1 jour de semis), deux jours pour les visites d'essai, environ 5h de moissonneuse pour lancer le chantier participatif (sur 25h de moisson en moyenne). RAB, MAV, CHD ont investi avec leur collectif dans une moissonneuse d'expérimentation. FAT aimerait investir à titre personnel dans du matériel. VIL s'est équipé d'un semoir et d'une moissonneuse d'expérimentation :

> *Depuis l'année dernière, j'ai investi dans une moisse-bat' expérimentale. C'est mon papa qui m'a construit un semoir expérimental. Ça m'ouvre une possibilité incroyable. Le frein matériel était fortement présent sur la ferme.* VIL-1d

EMH, ERZ et JUC n'ont pas mentionné un désir de plus s'équiper. EMH manque de temps pour la récolte mais a trouvé un fonctionnement assez efficace car avec peu de micro-parcelles. Il arrive que des essais paysans soient en situation d'échec :

> *À toutes les étapes, il peut y avoir des échecs. Cette année par exemple on a failli ne pas réussir à semer.* RAB-3i

Retour sur les concepts de situations expérimentales et d'itinéraires d'expérimentation.

Nous pensons que les pratiques de SP et les essais variétaux paysans peuvent être décrits par les cadres de Catalogna et al. (2018, 2022). Néanmoins quelques spécificités à notre cas d'étude sont à noter et quelques adaptations de ces cadres peuvent être proposés.
A partir de la typologie des situations expérimentales (SE) (cf Fig I.4 Catalogna et al., 2018), l'essai variétal paysan peut être vu à la fois comme la comparaison de plusieurs modalités entre elles (type 9 de SE selon Catalogna et al., 2018), comme la

comparaison à une référence (type 10) et comme une répétition de l'expérimentation d'année en année (type 4). Des échecs expérimentaux peuvent arriver (type 6). Dans Catalogna et al. (2022), les situations expérimentales d'un ITE sont reliées par des liens thématiques : on teste la même pratique agroécologique (dans des conditions que l'on veut similaires ou différentes). Dans notre cas, les liens entre essais variétaux sont elles-mêmes des pratiques SP ce qui peut créer une grande complexité pour suivre l'histoire d'une variété tel qu'un mélange de ferme. La base de donnée SHiNeMaS permet de prendre en compte une partie de ces liens sur la ferme et dans le réseau de ferme (De Oliveira et al., 2020).
De plus nous avons vu que pour chaque ferme les variétés cultivées n'ont pas le même statut. Nous avons identifié cinq statuts (variétés pour la conservation, témoins, en test car potentiellement intéressantes, mise dans un processus sélection car identifiées comme intéressantes, en production). De plus le choix la variété paysanne à cultiver sur une surface donnée est à la fois une pratique agricole mais aussi une pratique de sélection modifiant la proportion des génotypes et des allèles différents dans la population (Tab III.5 le choix de parcelles où multiplier les blés : p14, p15, P16, p17, p18). Comme beaucoup réalisent des essais variétaux chaque année (6/10), les ITE ne se terminent souvent pas lors de l'intégration de la variété en production, la variété peut continuer à être cultivée dans l'essai paysan.
Ceci montre la place particulière des pratiques liées à la diversité cultivée par rapport à l'ensemble des pratiques agroécologiques testés par Catalogna et al. (2018) qui sont surtout liées aux conduites culturales (pouvant être décrit par des outils techniques et des opérations selon certaines règles).
Comme dans Catalogna et al. (2022), il est possible de décrire la structure des ITEs même si les ITEs de chaque ferme sont uniques et parfois très complexes à décrire. Par exemple nous ne disposons pas de l'ensemble des ITEs de RAB. Nous n'avons pas identifié toutes les formes des ITEs, mais on peut noter quatre formes majeures :

— la forme linéaire pour les variétés qui ne sont ni mélangées ni croisées (par exemple Mottet-Blanc, Fig III.6).

— la fusion de formes linéaires pour les variétés issues de croisements bi-parentaux (par exemple l'ITE de Savoysone, Fig III.6)

— une forme linéaire suivi d'une émission de branches linéaires lors de l'identification d'une différentiation au champ (comme Savoyon, Fig III.4)

— une forme arborescente inversée pour les variétés issues de mélange (par exemple de mélange de Loex, Fig III.6).

En plus de la forme des ITEs, Catalogna et al. (2022) proposent des indicateurs quantitatifs pour comparer les ITEs. Nous proposons d'adapter au cas de la sélection paysanne son indicateur d'intensité d'expérimentation qui correspond au nombre de situations expérimentales par an. Nous proposons l'indicateur d'intensité variétale qui correspond au nombre de parcelles où une variété est présente soit toute seule soit comme une composante d'un croisement ou d'un mélange, par an. Cet indicateur permettrait de quantifier l'intérêt d'un.e paysan.ne pour cette variété, par exemple, la variété Savoysone chez RAB aurait depuis son obtention une intensité variétale de plus en plus forte (témoin des essais variétaux de RAB, composante importante de Rocaloaex et son mélange en production). Le nombre de situations expérimentales

par an [28], associées à une variété dépend de l'intérêt du paysan. Elle est égale à 1 pour les variétés jugées intéressantes ou choisies comme témoin et parfois même supérieure à 1 pour les variétés répétées (pour la multiplication ou pour l'essai en lien avec la recherche). L'intensité d'expérimentation est inférieure à 1 pour les variétés uniquement remises dans l'essai par souci de conservation (par exemple chez RAB Mottet-Rouge est semé une année sur trois pour renouveler son pouvoir germinatif).
Enfin, nous proposons une adaptation du cadre de Catalogna et al. (2018), il s'agit d'intégrer le fait que les situations expérimentales ne se réalisent pas uniquement au champ mais également dans des ateliers de transformation pour évaluer les variétés pour leur comportement en valorisation.

III. 3.3 Analyse des interdépendances entre les pratiques de sélection paysanne du blé et l'environnement de production

Les pratiques de SP peuvent être liées à de nombreux éléments, nous nous limiterons à analyser l'importance des pratiques de SP au sein du SSP du blé paysan (sous-partie { III. 3.3.a }) puis à identifier des interdépendances entre pratiques de SP et des structures de recherche et de développement pour l'agriculture paysanne (sous-partie { III. 3.3.b }).

III. 3.3.a Interdépendances entre les pratiques de SP et des autres pratiques du SSP du blé paysan

Nous avons vu dans la partie précédente que certaines pratiques de SP visent à adapter la diversité cultivée par sélection directe en fonction des traits désirés ou par le choix de l'environnement de sélection (Tab III.4 et Tab III.5). Dans cette partie nous allons souligner les synergies qu'il peut y avoir entre pratiques de SP et les autres pratiques du SSP du blé paysan. Comme nous avons défini le SSP en fonction des finalités de la production, nous structurerons notre analyse de la valorisation à la production.

Pratiques de SP et valorisation du blé.
Les règles d'usage des collectifs paysans incluent des règles sur les pratiques de valorisation des blés paysans. La plupart des collectifs mettent une limite sur les moyens de commercialisation et favorisent la multiplication de marchés de niches et filières locales (circuits courts, lien direct avec des boulangers). On observe aussi au-dessus de la Loire, la création de filières plus longues valorisant les blés paysans (Coopératives Cocébi ou ProBioLor par exemple).
La part du chiffre d'affaires liée au SSP du blé paysan varie de moins de 3% à 50%. Le blé paysan a une grande importance dans la diversification des débouchés des fermes à travers les différents ateliers de transformation. Neuf paysans sur 10 ont ou souhaiterait avoir un moulin pour valoriser les blés paysans. Certains souhaitent aussi à court ou moyen terme créer un atelier de boulangerie. Ces ateliers n'auraient pas été réalisés sans le caractère "paysan" du blé. À la fois à cause de la nécessité de valoriser

28. Aussi nommé intensité d'expérimentation par Catalogna et al. (2022).

	CHD	EMH	ERZ	FAT	FLM	JUC	MAV	PAJ	RAB	VIL
Part du chiffre d'affaires (%)	50	< 3	< 3	< 3	15	40	20	15	14	15
Produits vendus	Pain	Récolte triée	Récolte triée	Récolte triée	Farine	Farine	Farine	Farine, semences	Farine	Farine
Récolte destinée à l'élevage	Non	Oui (faible)	*	Non	Non	Non	Non	Non	Oui 50%	Non
Résidus destinés à l'élevage	*	*	*	*	Son	Son (VR)	Résidu de tri, son	*	*	*
Paille destinée à l'élevage	Oui et VR	Oui	*	*	Oui	*	Oui	Oui et VR	Oui	*

Table III.7 – Valorisation dans le SSP du blé paysan. VR : voisinage rural, * : information non mentionnée.

mieux un blé qui produit moins ou qui serait moins en phase avec les attentes d'une filière bio industrielle et aussi la possibilité qu'offre ce type de blé de développer de nouveaux ateliers de transformation à la ferme. Dans le premier cas la transformation répond à une contrainte, dans le second c'est une opportunité. Cette opportunité de valorisation des blés paysans est exprimée par FAT :

> *J'ai [pour] objectif aussi, (mon moulin est déjà commandé), de monter un atelier de farine, farine pour vendre aux gens, et dans un premier temps, dans 3-4 ans, monter un four à pain, pour valoriser aussi les céréales au maximum sur la ferme. Je ne voulais pas monter cet atelier-là en restant avec du blé classique. Ça ne m'intéressait pas.* FAT-1b

Cette opportunité est aussi exprimée par VIL et EMH qui cultivent des blés commerciaux en plus de blés paysans, mais ne valorisent en farine quasiment que les blés paysans [29]. EMH est le seul paysan sans moulin sur sa ferme et sans le souhait d'en acheter un. Il vend la majorité de son blé à une coopérative agricole qui ne distingue pas les blés AB commerciaux et des blés AB paysans sauf pour leur teneur en protéine [30].

> *Mais là non c'est un peu gâchis que ça parte là-bas, même. C'est un peu une question de simplicité. [...] Par contre, on a plus de protéines sur le blé. Sur le blé paysan. Là, j'étais à 12,5 je crois cette année contre 10,5 pour les autres. Mais on peut avoir plus que ça, je crois que c'est plutôt 13.5 d'habitude.* EMH-1a

29. De manière assez marginale pour EMH qui fait moudre une partie de sa récolte chez un paysan-boulanger et revend la farine au boulanger de son village. Certains boulangers demandent à VIL de la farine de blé commerciaux (environ 5% de sa production en farine).

30. Le prix dépend de la teneur en protéine moyenne et à moins de 10% le blé est déclassé en fourrager.

Le travail de SP de EMH n'est valorisé que par une plus grande sécurité du prix de vente mais cela reste pour EMH une valorisation décevante. FAT et ERZ quant à eux, profitent pour l'instant d'une filière « blé BIO paysan » de leur coopérative BIO.
De plus l'essai paysan en mettant en valeur la diversité des blés paysans peut aider à créer des liens de confiance pour avoir des débouchés stables. Comme exemple pour ce paysan-meunier :

> *ça permet de discuter, de me présenter, de parler d'énormément de choses aux gens qui viennent visiter. Avec la collection comme support, quoi [...] Ça fait des liens d'amitié. Et puis de confiance, aussi. Alors, du coup, je pense que ça aide aussi à... Tu sais, comme en ce moment, il y a quand même une crise sur la bio, un peu de surproduction et tout. Il y a des gens qui ont du mal à trouver des débouchés. Nous, on n'a pas ce problème-là. Mais parce qu'il y a une forme un peu de reconnaissance de la part des boulangers, surtout, mais aussi des gens qui viennent à la ferme ou les gens qui connaissent, qui vont chercher la bio.* RAB-3j

Nous avons vu dans la partie précédente, les pratiques de SP incluent des tests pour sélectionner les variétés sur leur potentiel en valorisation (qualité en panification, goût, couleur des grains et du pain). Les tests de qualité sont faits le plus souvent dans un second temps comme l'explique FLM ici :

> *Disons que les variétés, elles ont toutes été validées dans le niveau agronomique. Après, maintenant, c'est la deuxième étape, c'est parmi les meilleurs au niveau agronomique, on prend les meilleurs pour la qualité.* FLM-1b

De plus le blé ou les "sous-produits" du blé peuvent être valorisés par l'élevage (Tab III.7).
On voit ainsi qu'il y a bien une interdépendance entre pratiques de SP et pratiques de valorisation. L'adoption de blé paysan transforme l'environnement de valorisation et les critères de valorisation transforment les pratiques de SP.
Abay et al. (2008) ont également montré des liens entre pratiques de SP et de valorisation, ils ont par exemple montré que les paysans et paysannes sélectionnaient pour des traits associés à des fins culinaires. De plus, la valorisation de l'orge est mentionnée en deuxième position pour la gestion de la sole en orge après les enjeux agronomiques.

Pratiques de SP et objectifs de production en grain.

Les objectifs de rendement et les rendements moyens dépendent de chaque ferme (Fig III.7). Les rendements moyens des blés paysans varient entre 12 et 28 q/ha. Ces rendement sont relativement bas [31] , cela peut s'expliquer par les débouchés visés (plus rémunérateurs), les terres souvent difficiles sur lesquelles sont cultivés ces blés et leur pratiques culturales (parfois en fin de rotation parfois en association avec une autre culture...). Les objectifs de rendement sont en moyenne atteints pour trois fermes sur 10, mais il peut y avoir de fortes variations inter-annuelles (Fig III.7). Pour les sept autres fermes les rendements annuels moyens sont en dessous des objectifs. Les

31. En 2021 les rendements moyens en blé tendre bio s'élevaient à 39 q/ha et à 41 q/ha en 2022 (Agreste, 2020).

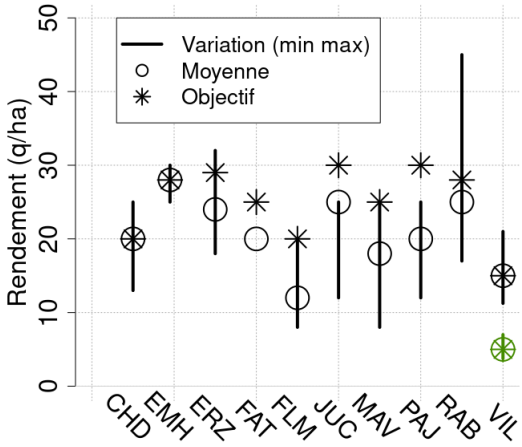


Figure III.7 – Rendements annuels des blés paysans en production.
Le trait vertical correspond à la gamme de variation entre le minimum et le maximum du rendement observé par le paysan enquêté (FAT n'avait pas assez de recul). En vert sont les valeurs pour la féverole qui est associée au blé paysan chez VIL

Stress	CHD	EMH	ERZ	FAT	FLM	JUC	MAV	PAJ	RAB	VIL
Hydromorphie	X	D	X		X	D			D	X
Adventices	X	X	X	X		X	X	X	X	
Carences nutritives	X				X		X	X		X
Chaleur et eau	D						D		D	X
Verse		X				X				
Maladies							D			

Table III.8 – Principaux stress des blés paysans en production.
X (respectivement D) : pour l'ensemble (respectivement une partie) des parcelles où le blé est cultivé

variations inter-annuelles du rendement sont associées par les paysans à l'expression de stress variés (Tab III.8). Ce sont surtout les adventices (8/10), les carences nutritives (5/10) et les problèmes d'hydromorphie en hiver et début de printemps (4/10 sur toutes les parcelles et 3/10 sur les parcelles sensibles). Les maladies foliaires n'ont jamais été mentionnées comme stress important, par contre la carie du blé qui est une maladie du grain a été mentionnée (MAV a eu une année une forte présence de carie sur une parcelle). Pour maîtriser les adventices dans leurs parcelles, l'usage du désherbage mécanique (4/10 par herse-étrille, 1/10 par binage) ou du faux de semis est fréquent (5/10) et le cas échéant, ils ont tous la possibilité de retourner à la culture-pivot. Pour limiter les carences nutritives, en plus des 2 à 4 ans de cultures-pivot, ils épandent du compost (4/10) [32] ou du fumier (1/10) sur leur blé ou broient et insèrent dans la terre une culture intercalaire (engrais vert, 2/10) avant les semis.
La surface de la sole de blé paysan va de 3 ha à 30 ha (Tab : III.9). Le délai de retour du blé est plus court que celui de la culture pivot pour huit fermes sur 10. De plus quatre paysans sur 10 cultivent parfois un blé derrière un blé. La zone cultivable du blé est généralement large, elle est limitée par l'importance de terres proches de la ferme pour les pâturages et par des conditions pédologiques extrêmes. Ces trois derniers indicateurs montrent l'importance du blé dans les fermes.
En plus des contraintes non choisies telles que les caractéristiques pédo-climatiques des parcelles (Tab III.8), les objectifs de production sont fixés en fonction d'autres éléments, qui eux, ont été choisis, qu'ils soient environnementaux (AB, non labour) ou liés à la qualité de production recherchée (par exemple le choix de Alauda chez PAJ qui est moins productive mais mieux valorisable en pâtes). Tous espèrent d'atteindre

32. FLM épand son compost sur la prairie avant le blé.

leur objectif de rendement chaque année, pour cela ils peuvent rechercher des variétés qui produisent plus en moyenne et/ou qui sont plus stables et ainsi chutent moins en rendement les années difficiles. Parfois, les objectifs de rendement sont peu flexibles à cause de la nécessité d'alimenter une filière de production locale et/ou de rentabiliser un outil de production. C'est le cas de CHD qui est paysan-boulanger et dans en moindre mesure pour les paysan-meuniers (JUC, MAV, FLM et VIL). Par exemple CHD a besoin de 20 tonnes de blé par an pour être autonome pour l'atelier boulangerie.

> *C'est marginal, mais ça arrive régulièrement qu'on ne boucle pas en blé, qu'on achète quelques tonnes pour faire la soudure.* CHD-1b

Les paysans placent les blés paysans souvent uniquement en début de rotation [33] (4/10), ou parfois uniquement en fin de rotation (1/10).
De nombreuse pratiques peuvent aider à atteindre leurs objectifs de production. Nous ne nous intéresserons qu'aux pratiques d'affectation des sols et de conduite culturale qui sont en synergie avec les pratiques de SP. Nous les présentons en 6 points :

1. Des essais variétaux pour évaluer les variétés dans les conditions de la ferme.
2. Recherche de variétés fortement compétitives vis-à-vis des adventices.
3. Stabiliser les rendements grâce à la diversité.
4. Adapter les variétés aux conduites culturales.
5. Ajouter des précédents possibles en travaillant la rusticité.
6. Choisir les variétés de la sole en fonction de leur adaptation à un terroir.

1. Des essais variétaux pour évaluer les variétés dans les conditions de la ferme. Afin de relier les essais variétaux aux comportements en production, l'ensemble des paysans a mentionné qu'ils essayaient de réaliser leurs essais paysans dans des conditions proches des cultures en production (qu'elles représentent en moyenne l'ensemble des environnements culturaux ou qu'elles restreintes à certains environnements comme chez VIL). Néanmoins il y a certains écarts. Tout d'abord le semis de l'essai se fait généralement après les semis des cultures de production (quelques jours à une semaine pour RAB et CHD). Les méthodes de semis diffèrent parfois (semis à la volée pour CHD, RAB, JUC et FAT).
La représentativité de l'essai par rapport à la production est une problématique complexe. Pour éviter de perdre des variétés et pouvoir mieux comparer les variétés évaluées entre elles, FLM sème son essai dans deux champs sains, proches de la ferme et ayant de meilleurs potentiels que le reste de ses champs. Il pense plus tard mettre l'essai dans des conditions plus représentatives (choix des parcelles et conduite culturale).

> *Et donc dans les essais, en fait, on se facilite la tâche pour bien voir les variétés, pour bien circuler dedans. Pour assurer que ça fonctionne bien. [...] [je souhaiterais que] les essais, ils soient en conditions plus réelles. pas trop, déconnectés, pourquoi pas de semer les essais de blé avec de la prairie* [34]*. C'est un truc qui me trotte dans la tête depuis 2-3 ans.* FLM-1c

33. Après la culture pivot.
34. FLM sème la majorité de sa production de blé avec une prairie.

2. Recherche de variétés fortement compétitives vis-à-vis des adventices. Les paysans recherchent des variétés à forte vigueur végétative (cf Tab III.4). Ce choix est directement relié au besoin de maîtriser les adventices (Tab III.8, citation PAJ-1c), ainsi qu'au besoin d'autonomie en paille pour l'élevage. Pour cela ils commencent leur travail de sélection à partir de variétés n'ayant pas l'idéotype des variétés commerciales conceptualisée initialement par Donald (1968), soit à partir des variétés de pays, de variétés anciennes ou parfois variétés issues de sélection pour l'agriculture biologique (AB) ou la biodynamie. Les paysans enquêtés ont choisi de réaliser leurs pratiques de SP à partir d'une diversité fortement éloignée de l'idéotype de Donald (1968 ; cf Tab I.1), qui correspond à des variétés adaptées à une conduite à fort apport en fertilisants grâce à une faible compétitivité entre plantes et une forte résistance à la verse (cf Tab I.1).

3. Stabiliser les rendements grâce à la diversité. Les blés paysans sont souvent jugés avoir des résultats plus stables dans les conditions de la ferme comme l'indique JUC :

> *Après je trouve que ces blés anciens sont très stables dans les rendements, c'est pas folichon mais c'est très stable, qu'ils aient chaud, froid, et même en sécheresse ils sont beaux, même quand c'est humide ils sont beaux, c'est ça qui est intéressant.* JUC-1a

De plus la stabilité agronomique est souvent liée à la diversité cultivée, par exemple :

> *Il faut que j'arrive à la promotion de la biodiversité, pour moi c'est essentiel dans le système où je suis. Si je veux trouver de la résilience, une stabilité, il faut absolument que j'aie une vingtaine de cultures. Il faut absolument que j'aie aussi de la diversité cultivée intra-spécifique, en termes de variétés et intra-variétale.* VIL-1e

Néanmoins les pratiques de SP ne sont pas forcément suffisantes pour stabiliser les rendements. Par exemple CHD a réalisé un mélange très diversifié, mais il est contraint de rallonger sa rotation et de raccourcir un peu le délai de retour du blé (Tab III.9) :

> *Je triche un peu pour rallonger ma rotation.* CHD-1c

Dans ce cas, le potentiel de rendement est moins important que la capacité globale à fournir chaque année la quantité demandée et cela donne une importance particulière à la notion de stabilité.

4. Adapter les variétés aux conduites culturales. Tous les paysans font évoluer des variétés diversifiées dans des conditions culturales spécifiques à leur ferme. Nous avons deux exemples où des paysans utilisent différentes pratiques culturales pour cela. MAV a deux conduites culturales pour ses blés paysans [35], les critères de sélection directe ont été différents et il espère que le fait de faire évoluer ses populations dynamiques avec des conduites différentes va renforcer leur adaptation à la conduite.

VIL a obtenu le mélange Trancherie en le cultivant dans des conditions très stressantes en particulier en association avec de la luzerne et du trèfle.

35. Japhayon qu'il sème en octobre à densité normale et Popayon qu'il sème en septembre à densité plus faible et avec un déprimage par ses vaches en février si l'automne est trop doux.

5. Ajouter des précédents possibles en travaillant la rusticité. L'intérêt des variétés paysannes est parfois de pouvoir accroître la part de blé dans la rotation en valorisant des conditions et des précédents à plus faibles potentiels. VIL cultive des blés commerciaux majoritairement pour la vente des semences AB [36], derrière trois ans de luzerne, car cela lui assure une bonne valorisation du précédent. Il insère deux ans ses blés paysans cultivés avec de la féverole en fin de rotation. Ses pratiques de SP lui permettent de raccourcir son délai de retour du blé (Tab III.9). Comme le montre la citation suivante :

> *Les variétés du commerce, je peux les mettre que derrière la luzerne. Sinon, ce n'est même pas la peine. Sinon, c'est une infestation d'adventices. Sinon, c'est des rendements ridicules.* VIL-1f

6. Choisir les variétés de la sole en fonction de leur adaptation à un terroir. Il est aussi possible de choisir l'affectation de sa sole en blé tendre en fonction de leur d'adaptation à un terroir particulier. JUC choisit des espèces ou des variétés de blé qui conviennent à des terres très difficiles :

> *[Et concernant tes petites terres, ou tes terres en fin de rotation ? [...] C'est juste que je ne mets pas la même chose, donc là pour la première année on a mis le compact hérisson, qui est un blé censé être très résistant à la sécheresse, et très performant malgré tout sur des terres séchantes, pauvres, un peu comme le petit épeautre.* JUC-1b

Il essaye aussi de trouver une variété adaptée à ses terres très hydromorphes.
L'interdépendance entre pratiques d'un même SSP est courante dans les systèmes de production plus autonomes vis-à-vis de la filière agro-alimentaire conventionnelle. Par exemple Hubert et al. (1993), montrent dans les systèmes d'élevage ovin préalpins, les fortes interactions entre pratiques d'élevage au sens strict (intervention directe sur les animaux, dont les pratiques de renouvellement du troupeau et de valorisation de la production), les pratiques fourragères et les pratiques de gestion du pâturage.
En plus d'une adaptation aux impératifs exogènes (exigences des collecteurs : taux de protéine, AB, blé paysan), il y a des impératifs endogènes issus de la création de débouchés sur la ferme. Comme dans Aubry et al. (1998), on peut représenter la place du blé dans un système de contraintes : zones cultivables, place dans l'assolement et précédents possibles, impératifs exogènes et endogènes... Les impératifs endogènes rendant les objectifs de rendement peu flexibles n'étaient pas cités par ces auteurs.

III. 3.3.b Analyse des liens entre les pratiques de SP avec les structures de recherche et développement des variétés paysannes

Les pratiques de SP et l'expérimentation à la ferme peuvent être influencées par des démarches collectives accompagnées par des structures de recherche et de développement des variétés paysannes.

36. Qui est un SSP différent de son SSP de vente de farine de blé paysan.

	Zone cultivable BT	**Précédents principaux** BT	**DR** (année)		**Sole** (ha)		**TL** (ha)
			BT	CP	BP	BC	
CHD	Évite les potentielles pâtures proches de la ferme et les zones trop humides	Après une prairie (début de rotation) ou une culture de légumineuses (fin de rotation)	*2.5 ou 4*	6 ou 8	11	0	35
EMH	Évite les potentielles pâtures proches de la ferme	Après une prairie, un légume, ou des haricots verts (en début, milieu ou fin de rotation)	2.3	10	3	22	75.5
ERZ	Ensemble des TL	Après une prairie (début de rotation)	*5.5*	7.5	6	24	260
FAT	Évite les zones trop humides	Après une prairie (début de rotation)	*7.5*	9	3	37	230
FLM	Évite les potentielles pâtures proches de la ferme	Après une prairie ou une culture pâturée (en début ou fin de rotation très courte)	5	5	10	0	92
JUC	Teste la zone cultivable pour les blés paysans	Après une luzerne (début de rotation)	4	5	30	0	133
MAV	Évite les zones trop humides	Après une prairie (début de rotation)	6	6	3	0	19
PAJ	Terres ni trop acides, ni trop caillouteuses	Après une prairie (début de rotation) ou une culture de légumineuses (fin de rotation)	3	5.5	16	0	92
RAB	Évite les potentielles pâtures proches de la ferme et les zones trop humides	Après une prairie de 3 ans (début de rotation) ou une prairie de 1 an (fin de rotation)	*4.5 ou 8*	9 ou 11,5	12	0	47
VIL	Ensemble des TL	Fin de rotation pour les blés paysans, début de rotation pour blés commerciaux	2.5	7	29	41	210

Table III.9 – Place du blé dans l'affectation des sols.
TL : total des terres labourables, DR : délai de retour, BT : blé tendre, CP : culture pivot, BP : blé paysan, BC : blés commerciaux.
Les délais de retour sont entourés de * lorsque qu'il y a succession de deux blés dans la rotation type.

Pratiques de SP et associations pour le développement des variétés paysannes.
Avec la forte augmentation du nombre de paysan.nes investi.es en sélection participative de variétés de blé dans le cadre du RSP, la dynamique à l'échelle nationale a été supplantée par des dynamiques régionales animées par des collectifs (Demeulenaere et al., 2017). Ces collectifs ont des gouvernances diverses (Mazé et al., 2021).

Sept paysans sur dix (tous sauf VIL, FAT et ERZ) ont mentionné être adhérents d'une structure de développement de l'agriculture paysanne et/ou de la biodiversité cultivée et accompagnant la réappropriation des variétés paysannes (*ARDEAR*

AURA, *ARDEAR Centre Val de Loire*, *GAB d'Anjou* et *Li Mester*). Certains ont des liens avec des collectifs dont ils ne sont pas adhérents comme JUC et VIL qui ont obtenu des semences de respectivement *Graine de Noé* et *Les jardins d'hier et de demain.*

Les paysans ont mentionné ce qu'apportent ces structures pour stimuler les pratiques de SP. Il est sujet de :

- L'animation d'une dynamique de groupe par i) l'organisation de "tournées des essais paysans" dans une région, moment privilégié pour discuter des pratiques en lien avec les variétés paysannes de leur sélection à leur valorisation (RAB, CHD) et par ii) l'animation de réunions pour établir les règles d'usages associées aux variétés paysannes (RAB, CHD, FLM).
- La formation sur des pratiques de SP (FLM, RAB, CHD) et le soutien matériel par la mise à disposition de moyens matériels surtout pour les moissons, mais parfois pour le semis ou le stockage des semences (RAB, CHD, FLM, MAV, PAJ).
- L'aide à la diffusion des variétés paysannes par i) l'organisation de temps d'échange de semences entre paysans (RAB, CHD, EMH, JUC, FLM, MAV) et ii) la mise à disposition de semences issues de plateformes d'essais (VIL, JUC).
- L'organisation de tests pour évaluer les variétés pour leur potentiel en panification (RAB, CHD, JUC, FLM, MAV),
- l'aide à la création de filières locales paysannes de valorisation (MAV, JUC, PAJ).
- L'accompagnement d'expérimentation collective sur différentes thématiques agronomiques (RAB, CHD, FLM).

Ces organismes permettent de mutualiser les forces pour la conduite d'expérimentations collective ou l'acquisition de matériels.

Par exemple FLM mentionne que son collectif s'est fixé trois axes pour les expérimentations collectives :

> *Un des aspects, c'est comment mieux cultiver ces variétés-là. Quand est-ce qu'il faut les semer ? à quelle densité ? tout ça.*
> *L'autre axe de travail, c'est d'explorer des modes de culture différents. Par exemple, sans labour, semis très précoce, blés associés avec de la prairie [...] dans quelle mesure il faut sélectionner des variétés particulières pour le genre d'utilisation.*
> *Troisième chose, c'est continuer le travail d'être un réservoir de biodiversité, et récupérer de nouvelles variétés, faire des croisements, faire des tests de planification pour la qualité, des choses comme ça. De continuer à mieux connaître les variétés. Et de les rendre accessibles, de les multiplier de les sauvegarder, qu'elles soient accessibles à plus que 100 grammes mais quelques dizaines de kilos.* FLM-1d

Le troisième axe concerne à la fois le rôle de multiplication des semences par l'expérimentation collective et le rôle de mise à disposition des variétés issues de pratiques de SP réalisées dans une dynamique collective ou individuelle.

Pratiques de SP et recherche académique.

Seuls trois paysans (JUC, ERZ et FAT) sur 10 n'ont pas mentionné avoir collaboré à un projet de recherche académique lié aux variétés paysannes avant l'expérimentation participative de ma thèse. Ces projets de recherche-action participative ont un objectif transformatif qui vise à traiter de questions qui préoccupent les paysans et paysannes autour de la gestion et la sélection des variétés paysannes. L'encadré III.6 permet d'illustrer certaines interactions entre le développement des connaissances et des pratiques de SP de RAB et la recherche. Cet encadré se base sur les essais que RAB à mis en œuvre en lien avec la recherche (fig III.6).

Les paysan-ne-s qui participent depuis longtemps au programme de sélection participative du blé tendre, en sont très satisfaits mais les connaissances et démarches de SP sont difficiles à transmettre aux autres membres des collectifs locaux, comme le révèle la CHD :

> *Moi, ça a été personnellement vraiment enrichissant[...] Ça m'a ouvert sur plein de trucs. Très concrètement sur la sélection. [...] Sur les aspects plus négatifs, c'est plutôt au niveau collectif [...] On a eu du mal à en faire profiter les autres. [...] Le fait est que pour les gens qui sont dans les associations locales et dans les groupes avec des paysans, les jeunes en formation, c'est des choses qui paraissent hyper inaccessibles [...] "C'est sympa, ça a l'air bien, mais ce n'est pas pour nous". [...] C'est un peu dommage. Je ne sais pas comment on aurait pu faire autrement.* CHD-1d

Il reste donc de forts enjeux à rendre les pratiques de SP et la démarche d'expérimentation variétale à la ferme plus accessible.
La collaboration avec la recherche permettrait aussi de légitimer les semences paysannes auprès de la société comme suggère RAB :

> *C'est aussi pour jouer le jeu par rapport à la recherche. On a besoin de gens comme vous qui sont un peu de notre bord aussi. [...] Si ça peut nous aider à défendre les semences paysannes en général en prouvant scientifiquement qu'elles ont des intérêts et tout. Ça nous aidera à les propager.* RAB-1f

Les paysans ont pu mentionner leurs principales attentes concernant l'expérimentation collective avec la recherche et en particulier vis-à-vis de la partie expérimentale de ma thèse. Ces attentes sont d'obtenir des connaissances scientifiques et pratiques sur les variétés paysannes ou les pratiques de SP (10/10), d'être en relation avec un groupe (6/10), d'améliorer ses pratiques de SP durant le programme (3/10), et de pouvoir légitimer des pratiques (1/10).

En plus de ces attentes, ces projets permettent :

1. de faire circuler des variétés, comme les variétés en commun (témoin entre fermes...) ;
2. de pouvoir évaluer l'impact de certaines pratiques sur la diversité cultivée (par exemple évaluer l'impact les sélections massales effectuées, encadré III.6) ;
3. de se mettre en lien avec d'autres paysans et paysannes ;

Attentes	CHD	EMH	ERZ	FAT	FLM	JUC	MAV	PAJ	RAB	VIL
Apprendre sur les variétés	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Être en relation à travers un groupe		X		X	X	X			X	X
Modifier ses pratiques de SP	X						X		X	
Légitimer la démarche de sélection paysanne									X	

Table III.10 – Attentes vis-à-vis de l'expérimentation de cette thèse.
Les X signalent les éléments correspondant à chaque attente identifiées à partir des réponses aux questions ouvertes.

4. d'obtenir des connaissances plus génériques sur les blés paysans (par exemple sur les pratiques de sélection sur les mélanges , encadré III.6) ;
5. d'obtenir des méthodes et des outils pour aider aux pratiques de sélection paysanne (protocoles d'observation, retours de résultats pouvant influencer les pratiques de SP, possibilité de faire faire un croisement à INRAE...).

Encadré III.6 : **Interactions avec la recherche dans le développement des connaissances et des pratiques de SP de RAB**

En 2005 et 2006, RAB accueille les essais sur l'étude des « complémentarités entre modes de gestion dynamique (à la ferme ou en station) et statique à partir du cas du blé tendre » (Demeulenaere et al., 2008). Les 10 variétés testées dans le cadre de cette étude au CRG INRA de Clermont-Ferrand ont ensuite continué d'être cultivées dans ses essais et certaines ont intégré le mélange de LOEX.
L'évolution d'une de ces 10 variétés, le mélange de Touselles a été étudié à l'échelle d'un réseau de fermes (Thomas et al., 2015). Cette étude a permis de montrer une différenciation génétique rapide entre populations et un maintien de la diversité génétique à l'échelle de l'ensemble des populations du Mélange de Touselles sur le réseau de fermes. En 2007, après seulement deux années de culture chez RAB, les proportions des composantes de son mélange de Touselles ont évolué, par exemple la Touselle-Anone a disparu et la Touselle-Sans-Barbe a augmenté en proportion.
Entre 2011 et 2014, RAB a participé au projet de sélection participative associé à la thèse de Pierre Rivière (présenté en introduction). C'est au cours de ce projet que ses essais ont changé de structure en adoptant le dispositif dit « régional » où au moins 4 variétés sont répétées dans 2 blocs. C'est également à cette période que des fiches de suivi pour les paysans et paysannes expérimentateur.rices ont été co-construites. De plus, RAB a participé au protocole pour évaluer l' efficacité des sélections massales qu'il a effectuées sur les variétés issues de croisements (ses croisements et ceux d'autres paysans et paysannes, Frank, 2018). Les retours de résultats ont pu influencer ses pratiques.
Entre 2013 et 2015, le projet EcoAgri visait à évaluer les premières variétés-populations issues du travail paysan de sélection, à la fois pour leur comportement agronomique mais aussi leurs qualités nutritionnelles, sensorielles et leur diversité génétique (Frank et al., 2020 ; Goldringer et al., 2020). Pour ces

deux années culturales, RAB a intégré dans son essai un dispositif avec deux blocs complets pour évaluer 12 variétés. En plus de connaître la diversité génétique de Savoysone, Rocaloex et Renan (He=0.29, 0.38 et 0.00 respectivement) [a], cela a par exemple permis à RAB de connaître leur comportement pour la stabilité inter-annuelle des rendements sur le réseau d'essais : Savoysone est plus stable que Rocaloex qui est plus stable que Renan (seule la différence avec Renan est significative Frank et al., 2020).
Entre 2015 et 2018, RAB a participé à une étude pour évaluer 3 pratiques de sélection pour obtenir des mélanges performants (Frank, 2018). Cette expérimentation collective à permis de savoir entre autres i) que les mélanges se comportaient globalement mieux que la moyenne de leurs composantes et ii) que la sélection sur le mélange entraînait une réponse [b] plus importante qu'une sélection en amont sur les composantes, cette dernière permettant de mieux maintenir la diversité.
Enfin, RAB participe à l'expérimentation associée à cette thèse et a là encore choisi le dispositif en ferme régionale, dont les attentes ont été présentées dans le tableau III.10).

a. He est l'indicateur de l'hétérozygotie (il caractérise la diversité génétique intra-population et est compris entre 0 et 1) attendue à partir des fréquences alléliques moyennes de la population

b. La réponse à la sélection est la différence pour un caractère entre les descendants issus de l'échantillon sélectionné et les descendants issus d'un échantillon aléatoire.

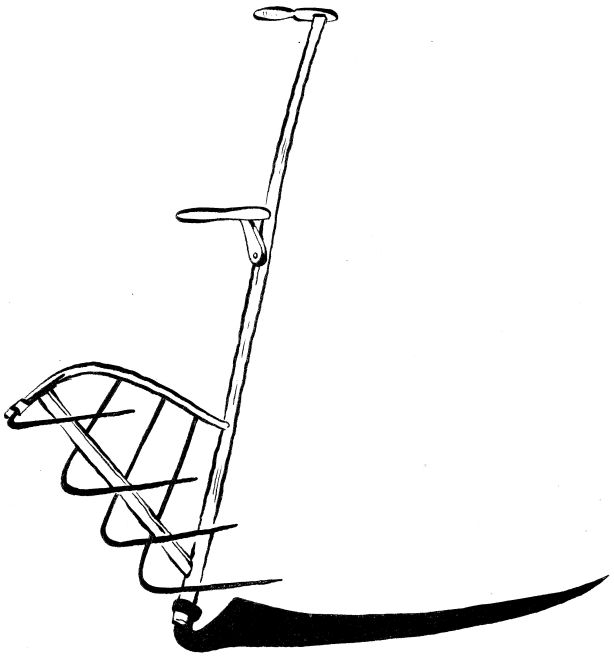
Retour sur l'hypothèse H3 L'hypothèse H3 implique que les pratiques de SP peuvent s'expliquer par le contexte de production. Nous avons limité notre propos aux structures de recherche et développement des variétés paysannes. Par leur démarche d'accompagnement, elles permettent bien de favoriser les pratiques de SP. Néanmoins dans certains cas, les logiques collectives peuvent présenter certaines contradictions avec les logiques individuelles (par exemple FLM qui choisi ces parcelles d'essai dans des terres plus adaptées à l'expérimentation et moins représentatives de ces champs, citation FLM-1c). Parfois les dynamiques individuelles sont stimulées par des dynamiques collectives à l'échelle nationale, mais ont du mal à être partagés dans les collectifs locaux (comme le révèle CHD concernant certains projets de recherche participative, citation CHD-1d.)

III. 4 Conclusion du chapitre III

Ce chapitre s'est intéressé à des systèmes de production particuliers, tous en AB, très diversifiés (majoritairement en polyculture-élevage avec nombreux ateliers de production) avec beaucoup de valorisation en circuit courts. En plus de cela, ils se distinguent de la majorité des systèmes de production par la mise en œuvre de pratiques de sélection paysanne.

Ce chapitre a permis de mettre en évidence une diversité de pratiques de sélection du blé paysan. Contrairement aux pratiques de sélection des plantes des sélectionneurs professionnels, ces pratiques s'insèrent dans le fonctionnement d'un système de production et en particulier de la production du blé au même titre que les pratiques d'affectation du sol, les pratiques culturales ou les pratiques de valorisation de la production. Les pratiques de sélection paysanne mises à jour sont même fortement liées à ces autres pratiques.
Nous avons d'abord montré que les motivations pour se réapproprier les blés paysans sont multiples, à la fois d'ordre économique et agronomique mais aussi d'ordre plus personnel ("devoir paysan", curiosité, revendications politiques, sensibilité au vivant...). Nous avons ensuite montré qu'il y avait une diversité de pratiques de sélection paysanne et une diversité de traits désirés par les paysans et paysannes. En particulier, nous avons identifié 20 pratiques de sélection paysanne, regroupées en 5 groupes (circulation, création, sélection directe, sélection par le choix de l'environnement et maintien/multiplication de la diversité variétale). Par l'analyse de certains enchaînements de pratiques de sélection paysanne associées à la mise à l'épreuve des variétés en essai paysan ou en test de valorisation, nous avons montré différentes logiques aboutissant à la création de nouvelles variétés paysannes présentant des intérêts dans le contexte de chaque ferme, comme ceux visant à favoriser l'adaptation locale des variétés (en réalisant des mélanges diversifiés puis en le soumettant durant plusieurs générations à une conduite culturale ou à des choix d'affectation du sol spécifiques).
Par la suite nous avons montré qu'il pouvait y avoir une forte interaction entre ces pratiques de sélection paysanne et les pratiques de valorisation, d'affection des sol et de conduite culturale. Ces interactions peuvent se comprendre comme une adaptation à double sens : une adaptation des variétés aux pratiques de production (des pratiques de production souvent innovantes comme les cultures associées, le semis précoce, le non labour, le déprimage...) et une adaptation des pratiques de production aux variétés paysannes (développement des pratiques de valorisation à la ferme, mise en culture des blés paysans en fin de rotation...). Pour cette adaptation des variétés paysanne au contexte de la ferme, nous avons identifié deux grandes manières de faire, en choisissant les meilleures options parmi les variétés disponibles ou en créant de nouvelles possibilités avec la création de nouvelles variétés populations.
Ce travail montre aussi que les pratiques de sélection paysanne sont des pratiques agricoles singulières et peut-être moins facilement appropriables que d'autres pratiques agricoles. Ces pratiques, pour être mises en œuvre, nécessitent une connaissance du comportement des diverses variétés (notamment les connaissances issues d'expérimentations à la ferme) et le nombre de pratiques de sélection paysanne testées dans une ferme semble proportionnel au nombre d'années d'expérience en sélection paysanne. Ces pratiques nécessitent de la créativité et du pragmatisme pour travailler dans l'incertitude à partir d'une diversité cultivée donnée, des connaissances incomplètes et un système de production singulier. Nous avons enfin montré que les dynamiques associées aux pratiques de sélection paysanne pouvaient être fortement stimulées par des structures collectives de développement agricole ou les collaborations créées lors de projets de recherche participative. Si ces pratiques agricoles sont jugées intéressantes pour la transition agroécologique, il reste encore à réfléchir à la manière dont ces pratiques pourraient être mieux connues et partagées, et aux façons dont le monde

agricole pourrait davantage se les approprier.



Mais la vérité est que la graine est une machine bien plus perfectionnée que toutes les machines inventées par les hommes. Les boulons qui en assemblent les parties et assurent le jeu de l'ensemble sont d'une souplesse et d'une force inimaginables.

Jean Giono

Chapitre IV

Diagnostics agronomiques participatifs des essais de variétés paysannes

IV. 1 Introduction

Dans un programme de sélection décentralisée et participative, les agriculteur.rices et les chercheur.es vont collaborer pour répondre aux objectifs fixés. L'un des principaux objectifs de ce type de programme est une adaptation des variétés aux environnements de production de chaque ferme qu'ils soient agronomiques (adaptation au champ cultivé) ou de valorisation (adaptations aux pratiques de valorisation et aux demandes des clients). Dans le programme de sélection participative blé en France, le collectif de recherche a d'abord étudié l'adaptation des variétés paysannes en comparant des variétés sélectionnées localement et d'autres sélectionnées ailleurs (Frank et al., 2020) ou à travers une analyse de l'adaptation des variétés au potentiel de production des environnements via la régression de Finlay Wilkinson (Turbet Delof et al., 2024). Néanmoins, les connaissances produites sur les variétés testées sont difficilement extrapolables à d'autres situations de culture car les causes de leur adaptation ou inadaptation aux environnements de culture ne sont pas identifiées.

Il est aussi possible d'étudier l'adaptation des variétés à un stress explicite comme cela a été fait dans d'autres projets de sélection participative et décentralisée pour le stress hydrique (Ceccarelli et al., 2007). Néanmoins, dans les champs cultivés, de nombreux stress et leurs interactions peuvent impacter le comportement des cultures lors d'une même saison (Doré et Meynard, 2006).

Afin d'identifier les stress et pratiques à l'origine des variations de performances observées au sein d'un réseau de parcelles agricoles, les agronomes ont proposé un ensemble de méthodes qui sera qualifié par la suite de *diagnostic agronomique*. Des diagnostics agronomiques ont été appliqués pour expliquer les variations de différentes variables d'intérêt comme le rendement (David et al., 2005 ; Rapidel et al., 2006), la qualité de la production (Casagrande et al., 2009 ; Leclère et al., 2021), la performance agro-environnementale (Cerf et al., 2019). Nous limiterons notre propos aux diagnostics agronomiques qui étudient l'établissement du rendement.

Les connaissances et les raisonnement mobilisés pour le diagnostic permettent de distinguer différents diagnostics agronomiques. Nous avons distingué trois types de diagnostic, les diagnostics agronomiques oraux (DAO), les diagnostics agronomiques "classiques" (DAC) et les diagnostics agronomiques automatiques (DAA) [1]. Les diagnostics agronomiques oraux (DAO) sont réalisés par entretien avec les agriculteur.rices sur la base des observations qu'ils ou elles ont réalisées durant la saison culturale et de leur expertise locale. L'équipe de recherche synthétisera alors leur expertise (Abdourahamane Harouna et al., 2020) parfois dans le cadre d'une démarche participative (Leclère et al., 2018 ; Singh, 2003). Ces diagnostics ont le grand intérêt d'être peu chers, rapides à réaliser (pas de mesures nécessaires) et ils permettent d'explorer une grande diversité de pratiques ou de facteurs. Leur défaut est de ne pas être assez objectifs en basant l'analyse uniquement sur les observations et les interprétations de l'agriculteur.rice, ce qui peut compliquer le partage de connaissance par la suite.
Doré et al. (1997) proposent une méthode de diagnostic agronomique que nous qualifions de diagnostic agronomique classique (DAC) [2], qui contrairement au DAO se base sur l'interprétation externe de l'agronome permise par un protocole de mesures aux champs [3]. Cette approche se situe à la jonction entre une approche systémique et une approche analytique (Landais et al., 1988). Les DAC reposent sur un ensemble d'hypothèses constituant un modèle conceptuel que l'agronome, cherchera à vérifier. L'interprétation du phénomène à l'étude s'appuiera sur un faisceau d'indices concordants mis à jour. Ce type de diagnostic agronomique fait des allers-retours entre l'échelle de la parcelle et celui du réseau de parcelles (voir par exemple Meynard et David, 1992). Le DAC ne relie pas directement la pratique au rendement. La première étape du DAC est d'expliquer de manière causale le rendement en fonction d'indicateurs du milieu pertinents (c'est-à-dire qui parviennent à représenter les variables du modèle conceptuel). Pour ce faire, l'agronome peut : i) comparer deux parcelles différant uniquement par un facteur, ii) décomposer l'élaboration du rendement en composantes mises en place au cours du temps et mises en regard d'indicateurs qualifiant le milieu et, iii) évaluer les indicateurs (du peuplement et du milieu) au regard de références pertinentes (Doré et al., 1997). La seconde étape consiste à identifier les pratiques ayant impacté les indicateurs du milieu responsables des variations du rendement. Cette décomposition en deux étapes vise à réduire le risque d'avoir des conclusions hâtives à partir de corrélations entre rendements et pratiques qui peuvent être fortuites (Davidson et Ramsey, 2000 ; Doré et al., 1997). Au final, on peut proposer un nouveau modèle conceptuel mis à jour par le diagnostic (par exemple Rapidel et al., 2006). Les DAC présentent plusieurs limites, il sont lourds à mettre en place, ils testent peu d'indicateurs (Rapidel et al., 2006 en explorent 5 ; Meynard et David, 1992 en explorent 6) et l'expertise paysanne est mise de coté pour l'interprétation des

1. Cette classification diffère de celle proposée par Doré et al (2008) qui est principalement basée sur les types de données caractérisant l'environnement de culture (indicateurs de l'état de peuplement et pratiques agricoles, expertise interne des agriculteur.rices ou pratiques agricoles seules).

2. Au sein des diagnostics qui se qualifient de "régionaux", distinguons deux types d'expertises principalement mobilisées (DAC et DAA).

3. Dans le DAO les mesures ne sont pas nécessaires, des observations qualitatives peuvent suffire.

résultats [4], alors qu'elle permettrait d'avoir une vision moins incomplète des parcelles à l'étude.
Le diagnostic agronomique automatique (DAA), comme le DAC, utilise un modèle conceptuel et des données issues de mesures aux champs. Dans le DAA, les indicateurs peuvent être nombreux et sont tous traités de manière identique (un indicateur n'aura pas une place particulière). L'analyse statistique a une place centrale, car elle permet de sélectionner (automatiquement) les indicateurs qui expliquent le mieux le rendement à l'étude. Ces indicateurs peuvent être des indicateurs de l'état du milieu (Davidson et Ramsey, 2000 ; De Bie, 2004) ou directement les pratiques (De Ponti et al., 2012). L'intérêt de cette méthode est qu'elle permet de quantifier les effets moyens des pratiques ou des indicateurs du milieu et d'explorer un grand nombre de sources de variation (par exemple Gouache et al., 2015 explorent 250 indicateurs et Lecomte, 2005 en explore 63)). Les défauts du DAC s'appliquent aussi au DAA (lourdeur des mesures, peu de place à la connaissance des praticiens et praticiennes). L'expertise de l'agronome est mobilisée ici principalement dans la phase de conception du modèle conceptuel (choix des indicateurs et du lien avec les variables d'intérêt) et l'identification des causes de variation se base uniquement sur la confiance que l'on a sur le modèle conceptuel, les données récoltées et l'analyse statistique associée. Les liens entre rendement et indicateurs sont établis uniquement à l'échelle du réseau de parcelles ce qui interdit l'adaptation du modèle à chaque situation de production et limite donc la finesse de l'analyse réalisée à l'échelle de la parcelle (confusion d'effets entre pratiques ou entre indicateurs de l'état du milieu, occultation des pratiques agricoles ou des causes de variation peu représentées). Cette méthode a cependant été utilisée dans le cadre d'études participatives (Lairez et al., 2020 ; Leclère et al., 2021). Elle a aussi été appliquée à l'étude de réseaux variétaux de blé tendre et de pois (Lecomte, 2005 ; Lecomte et al., 2023) ; dans ce dernier cas Lecomte (2005) ont automatisé une méthode de DAC en utilisant la régression linéaire multiple stepwise (Steyerberg et al., 1999) pour sélectionner les indicateurs du milieu qui expliquent le plus la perte relative de rendement (c'est-à-dire la différence entre le rendement observé et le rendement potentiel [5]) d'un génotype révélateur [6] (Brancourt-Hulmel et al., 1999).
Certains auteurs (Loyce et Wery, 2006) proposent un autre type de diagnostic, le diagnostic à partir d'un modèle numérique de fonctionnement des cultures qui consiste à confronter les données observées au champ avec des références issues de modèles de culture (Affholder et al., 2003 ; Colbach et al., 2019). Nous ne les considérons pas comme un type de diagnostic à part mais plutôt un moyen d'obtenir des références pouvant être utiles pour les autres diagnostics.
L'ensemble de ces méthodes ne permettent pas d'établir un certain. Mais il est possible de discuter les arguments justifiant les conclusions du diagnostic. Le DAO est plus difficile à discuter, car il y a moins de prises objectives permettant une critique constructive. Le DAC et encore plus le DAA négligent trop souvent la connaissance

4. Les agricutleur.rices sont souvent enquêté.es dans la phase préliminaire de l'étude pour aider à constituer le modèle conceptuel.

5. C'est-à-dire le rendement maximum estimé (ici, par une procédure de bootstrap) sur le réseau d'essais.

6. Qualifié de révélateur car "révélant" les principaux stress agissant sur le réseau d'essais.

de l'agriculteur.ice de son environnement de culture et des spécificités de l'année, qu'elles soient techniques ou environnementales, ce qui a pour conséquence de perdre en finesse d'interprétation à l'échelle de la parcelle d'essais, il est alors possible que l'agriculteur.rice n'adhère pas aux conclusions proposées.
Selon nous, pour pouvoir mieux identifier les spécificités de chaque parcelle, il est nécessaire d'inclure l'expertise paysanne dans la phase d'interprétation. C'est le principe de la *démarche d'agronomique clinique* d'accompagner la compréhension d'une situation agricole spécifique d'un agriculteur ou d'une agricultrice dans un processus d'observation et de raisonnement mêlant le diagnostic interne de l'agriculteur.rice et le diagnostic externe de l'agronome-accompagnant.e (Kockmann et al., 2019). Par exemple, ce type de démarche clinique a permis d'accompagner quatre agriculteurs-expérimentateurs testant des pratiques pour la culture de la cameline à formaliser et analyser les connaissances issues de leurs essais. Pour cela, l'équipe de recherche a notamment mené des enquêtes, réalisé des mesures du rendement et organisé pour chaque expérimentateur une rencontre dans la parcelle d'essai (Leclère et al., 2018). Inspirés par cette démarche agronomique clinique, nous avons choisi de combiner le diagnostic interne des expérimentateur.rices avec un diagnostic agronomique "classique" (DAC). Nous avons nommé cette démarche "diagnostic agronomique participatif" (DAP). Elle se base sur une appropriation progressive par l'agriculteur.rice de l'expertise proposée par les agronomes-accompagnants pour interroger, compléter, renforcer ou faire évoluer le diagnostic interne de l'agriculteur.ice et faciliter par la suite les échanges entre pairs sans perdre la spécificité des situations de production. A notre connaissance ce type de démarche n'a jamais été décrite dans la littérature. Dans notre cas, le diagnostic est réalisé sur des essais de variétés paysannes avec deux objectifs :

1. Vérifier les hypothèses des expérimentateur.ices ainsi que les hypothèses d'un modèle conceptuel sur les facteurs impactant l'élaboration du rendement ;
2. Vérifier les hypothèses sur l'adaptation des variétés paysannes à certains environnements de culture.

IV. 2 Matériels et méthodes

IV. 2.1 Principe du diagnostic agronomique participatif

Notre diagnostic agronomique participatif peut se résumer en cinq étapes (Fig IV.1) :

1. L'équipe de recherche propose un modèle conceptuel à partir de la littérature existante et de son expérience sur le terrain. Ce modèle sélectionne des facteurs environnementaux dont on pense qu'ils impactent fréquemment et souvent fortement le comportement du blé. Ils seront étudiés par le protocole d'expérimentation ;
2. L'expérimentateur.rice qui a conduit l'expérimentation, formule des hypothèses sur les causes qui ont impacté le rendement de son essai ;
3. Par une discussion entre l'expérimentateur.rice et l'équipe de recherche les hypothèses sur les facteurs du milieu impactant l'élaboration du rendement sont

validées ou non et parfois des liens entre facteurs sont établis. Cette discussion s'appuie sur un rapport présentant de manière systématique les valeurs des facteur-hypothétiques du modèle conceptuel. De plus l'expérimentateur.rice est invité.e par une discussion structurée à proposer ses propres références et interprétations puis à les mettre au regard des informations apportées par le rapport permettant un co-diagnostic avec l'équipe de recherche. Cette hybridation des diagnostics, sera par la suite appelé *diagnostic hybride* ;

4. Des hypothèses sur les raisons pour lesquels certaines variétés semblent mieux adaptées à certains environnements sont identifiées par l'expertise des expérimentateur.rices et de l'équipe de recherche. Ces propositions peuvent avoir été influencées par les diagnostics hybrides ;
5. À l'échelle du réseau d'essai, l'équipe de recherche propose une synthèse des connaissances issues des diagnostics hybrides pour valider ou non ces hypothèses.

Nous supposons que chaque diagnostic hybride est suffisant pour identifier les principales causes (hormis le choix de la variété) expliquant l'élaboration du rendement sur l'ensemble des essais (étapes 1, 2, et 3). Par contre nous supposons que pour étudier l'adaptation des variétés aux conditions du milieu, il est nécessaire de réunir l'information du réseau d'essai (étapes 4 et 5). La démarche est donc en deux temps comme dans la méthode proposée par (Doré et al., 1997). Tout d'abords, l'identification des causes impactant le rendement en s'appuyant sur des indicateurs de l'état du milieu (le diagnostic hybride), puis l'impact de la pratique (ici le choix variétal) sur la performance des cultures en fonction des environnements de culture.

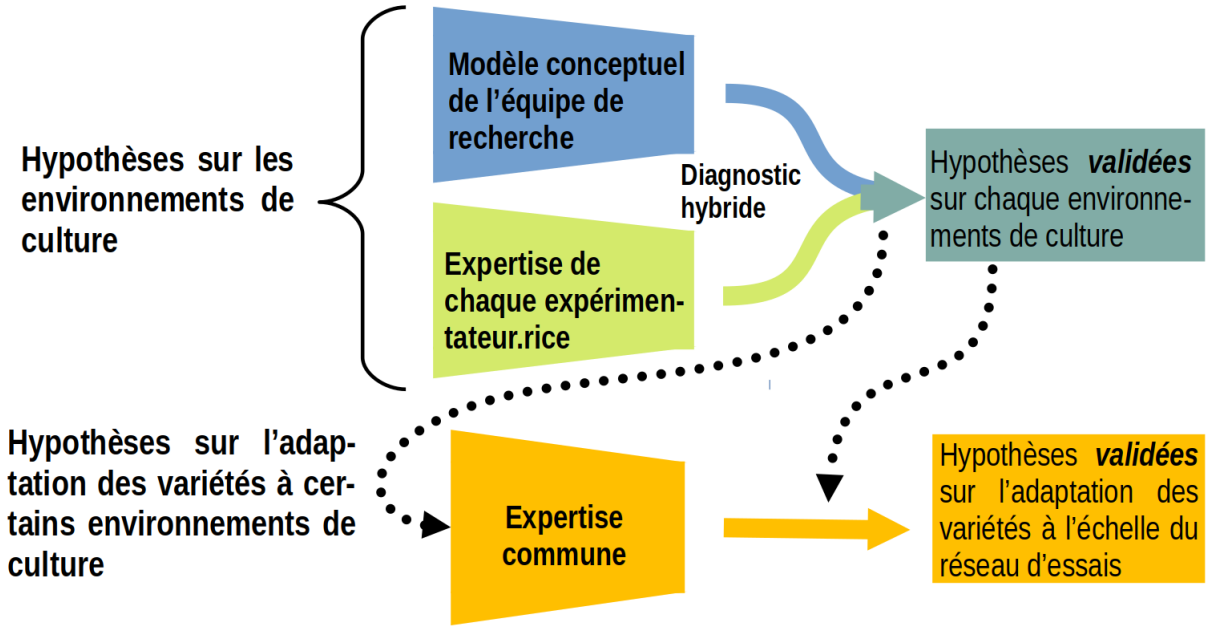


Figure IV.1 – Schématisation de la démarche du diagnostic agronomique participatif.
Les flèches pleines représentent la sélection des causes de l'élaboration du rendement. Les flèches en pointillé représentent les connaissances mobilisées.

IV. 2.1.a Identification des principaux indicateurs environnementaux ayant impacté la performance de l'essai

Les différentes informations pour la réalisation du diagnostic. Pour réaliser nos diagnostics agronomiques, nous avons utilisé différents informations issues de l'essai que nous pouvons regroupés de la façon suivante :

- Les informations sur le contexte de l'essai (conditions pédo-climatiques et conduite culturale de l'essai) dont la connaissance préalable est nécessaire pour le diagnostic de l'essai mais aucune des ces informations prises individuellement ne permet *a priori* de savoir son effet sur l'élaboration du rendement ;
- Les indicateurs de l'état du milieu qui sont des proxis de facteurs-hypothétiques du modèle conceptuel de l'élaboration du rendement ;
- Les indicateurs de l'état du peuplement autres que les composantes du rendement (% de grains mal remplis, teneur en azote des grains...). Ceux-ci nous aideront au diagnostic car ils peuvent parfois être sensibles aux mêmes causes que celles qui influent sur les composantes du rendement.
- Le rendement estimé comme la masse de graines par unité de surface et ses composantes. Ce sont les variables à expliquer, rendement et composantes sont reliés par l'équation IV.1.

$$RDT = NP_m^2 \times NE_P \times NG_E \times PMG \tag{IV.1}$$

où RDT est le rendement, NP_m^2 est le nombre de plantes par m^2, NE_P est le nombre d'épis par pied, NG_E est le nombre de grains par épi et PMG est le Poids de Mille Grains.

Le modèle conceptuel. Notre modèle conceptuel de l'élaboration du rendement considère que dix facteurs hypothétiques peuvent impacter une ou plusieurs composante(s) de rendement (Fig IV.2). De plus ces composantes peuvent être le cas échéant influencées par la composante par m2 précédente. Le fait de considérer les composantes du rendement et non directement le rendement permet de prendre en compte l'aspect dynamique de l'élaboration du rendement (chaque facteurs hypothétiques est associé à une ou plusieurs période(s) de développement du blé) et de considérer les phénomènes de compétition ou de rattrapage entre composantes au sein du peuplement.
D'autres indicateurs de peuplements peuvent être impactés par les facteurs hypothétiques et ainsi servir au diagnostic agronomique. Ces indicateurs dont certains ont été proposés par les expérimentateur.ices sont des indicateurs de défaut d'élaboration du rendement (en vert sur la figure IV.2) ou correspondent à d'autres traits du peuplement comme sa hauteur, la biomasse paille, le rendement protéine...

Des indicateurs de l'état du milieu ont été choisis pour représenter ces facteurs hypothétiques et des indicateurs de l'état du peuplement ont été choisis pour représenter les performances du peuplement (la manière d'obtenir ces indicateurs est décrite plus loin dans la matériels & méthodes IV. 2.2).

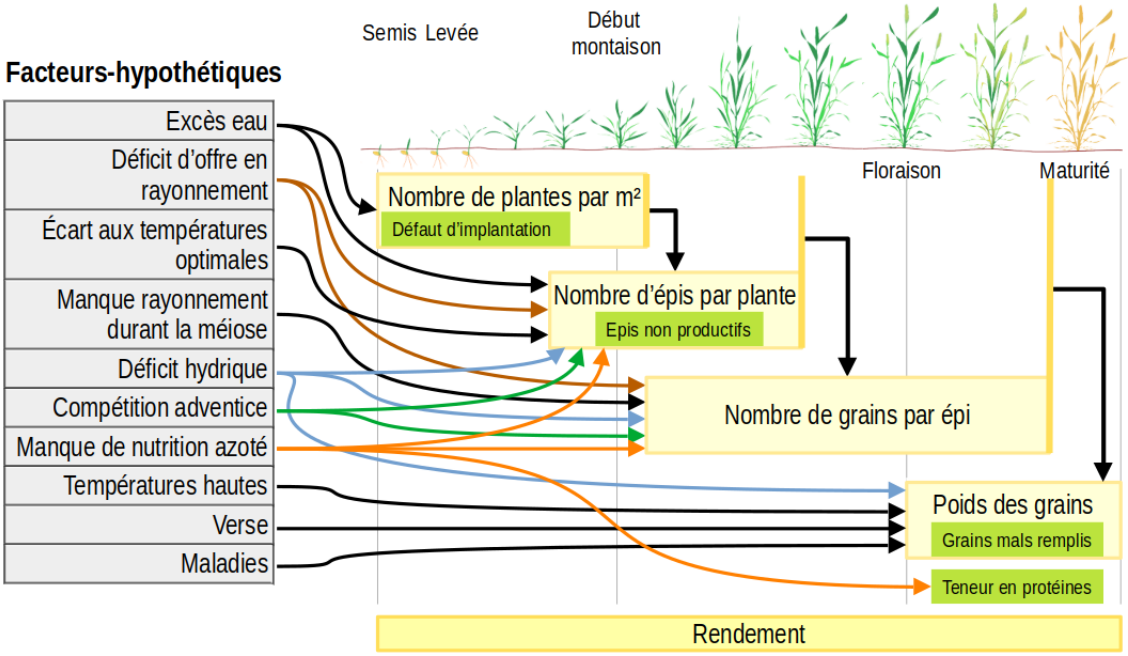


Figure IV.2 – Facteurs hypothétiques impactant l'élaboration du rendement du blé (encadrés en jaune) et d'autres caractères du peuplement (encadrés en vert). Les flèches entre composantes du rendement, représentent l'effet de chaque composante par m^2 sur la composante individuelle suivante. La représentation des plantes de blé est adaptée d'une représentation d'Arvalis©.

Hybridation des diagnostics. Durant le diagnostic hybride, l'équipe de recherche propose d'alimenter la réflexion de l'expérimentateur.rice par la présentation progressive et structurée des informations sur l'essai pour identifier les facteurs ayant affecté l'élaboration du rendement (Fig IV.3). Les informations que présente l'équipe de recherche sont structurées en trois types (informations de contextualisation, composantes du rendement et les autres indicateurs –de l'état du milieu et de l'état du peuplement–). A la fin ou parfois pendant chaque temps de présentation de l'équipe de recherche, les expérimentateur.rices sont invité.es à énoncer ou ajuster leurs hypothèses ainsi que partager leurs connaissances permettant d'aider au diagnostic. Cette structuration vise à éviter d'enfermer l'expérimentateur.rices dans les cadres proposés par l'équipe de recherche (les indicateurs explicatifs du modèle conceptuel sont présentés à la fin) et de progressivement intégrer des informations susceptibles d'enrichir le diagnostic hybride.

Validation des hypothèses sur les facteurs impactant l'environnement de culture. Durant le diagnostic hybride, quatre manières différentes de vérifier les hypothèses ont été utilisées :

— Par comparaison de deux environnements différant d'un seul facteur (date de semis, densité de semis...), on peut ainsi constater l'effet de ce facteur sur les variables suivies. Cela peut correspondre aux analyses entre deux conduites sur le même essai ou à la comparaison par l'expérimentateur.rice des performances de l'essai avec celles d'une parcelle à proximité.

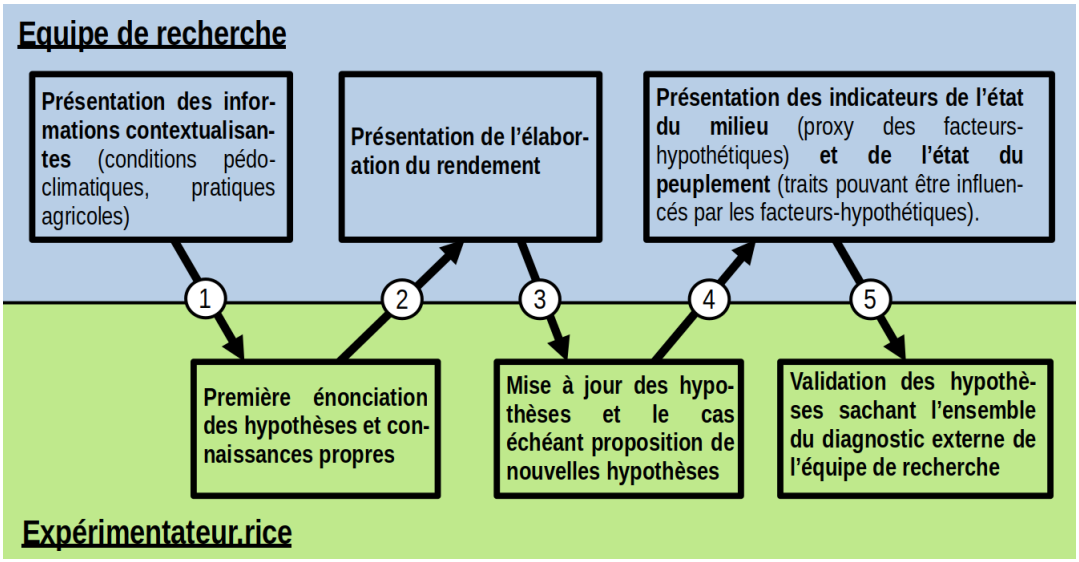


Figure IV.3 – Alimentation de l'expertise des expérimentateur.rices pour identifier les facteurs impactant l'élaboration du rendement.

— En sélectionnant les facteurs hypothétiques en fonction de leur temporalité. Tous les facteurs sont associés à une phase plus ou moins précise du développement du blé et donc d'une de ses composantes (Fig IV.2). Cela cela permet de réduire les facteurs hypothétiques à ceux de la période considérée.

— En comparant la valeur de l'indicateur de l'essai à des références variées :

1. La moyenne des indicateurs à l'échelle du réseau d'essais, l'année considérée (quasiment systématiquement) ;
2. La variabilité des indicateurs à l'échelle du réseau d'essais pour pouvoir positionner les résultats de l'essai par rapport à l'ensemble des résultats du réseau d'essais (uniquement pour les composantes du rendement et les indicateurs agro-climatiques) ;
3. Les seuils issus de la bibliographie (pour des caractéristiques du sol et certains indicateurs de l'état du milieu) ;
4. Les références historiques de la ferme sur les 20 dernières années (uniquement pour les indicateurs agroclimatiques) ;
5. Les références et connaissances propres de l'expérimentateur.rice historiques ou locales.

— en utilisant le principe de *convergence*[7] qui consiste à conforter un résultat par plusieurs informations indépendantes et convergentes (par exemple si le PMG est faible cela peut-être dû à un un stress hydrique associé à de hautes températures et ces stress seront aussi responsables de grains mal remplis qu'il faut vérifier) ou lorsque que les hypothèses formulées par les expérimentateur.rices

7. « On peut accroître la probabilité du résultat par une série de mesures portant sur des caractères indépendants ; c'est le principe de convergence. Dans cet esprit par exemple, le médecin ne décrit non pas un caractère d'une maladie mais un ensemble de caractères, un syndrome » (Hénin, 1999 ; page 137 et 138).

convergent avec les résultats de l'analyse des indicateurs de l'état du milieu.

Les trois premières manières de valider les facteurs hypothétiques sont issues de Doré et al. (1997). Notre méthode donne plus de place à l'expertise des expérimentateur.ices en espérant ainsi mieux intégrer les spécificités de chaque situation agricole à l'étude.

IV. 2.1.b Vérification des hypothèses sur l'adaptation des variétés aux différents environnements de culture.

A la fin de chaque diagnostic hybride, l'équipe de recherche présente l'élaboration du rendement par variété, à l'expérimentateur.rice qui est alors invité.e à partager ses impressions sur les variétés sur la base de ses observations au champ et de ses connaissances préalables. Cette dernière étape du diagnostic hybride permet de i) conclure sur les variétés qui se sont le mieux comportées dans l'essai en prenant en compte la précision de l'essai et ii) potentiellement formuler de nouvelles hypothèses permettant d'expliquer les performances observées.
Après la réalisation de l'ensemble des diagnostics hybrides, l'équipe de recherche a recensé l'ensemble des hypothèses sur l'adaptation des variétés aux conditions environnementales issues des diagnostics hybrides, des enquêtes réalisées (Chap. III) et d'autres moments d'échanges au cours de la thèse. Les hypothèses qui ont pu être testées étaient :

H1: Alauda est plus sensible à l'échaudage car tardif.

H2: Alauda fonctionne bien dans les terres très riches.

H3: Trancherie a été sélectionnée pour tolérer la compétition entre plantes.

H4: Petit-Béron est adapté aux terres riches (son terroir d'origine).

H5: Inconnu-de-Raphaël fait trop d'épi et donc serait sensible au stress hydrique.

H6: Barbu-de-Mâconnais est sensible à l'échaudage.

H7: Popayon a un bon potentiel de tallage.

H8: Titlis préfère les milieux à fort potentiel.

Nous avons cherché à vérifier ces hypothèses. Pour cela nous avons utilisé une méthode quantitative qui nécessitait d'abord de traduire l'hypothèse formulée en terme de composante du rendement impacté et de stress impliquée puis ensuite de tester l'hypothèse en prenant en compte l'identification des stress dans chaque essai.

IV. 2.2 Mesures, notations qualitatives et indicateurs

IV. 2.2.a Mesures, échelles et périodes des notations

Le dispositif expérimental et la répartition des principales tâches de chacun.e ont été présentés dans le chapitre II. Notre dispositif comporte 32 essais (ferme x année x pratique). 77 variétés ont été évaluées dont 20 répétées dans plus de quatre environnements.

Chaque essai était composé de microparcelles ayant une surface allant de 4 m^2 à 20 m^2 (la médiane est de 10 m^2). Ces essais étaient généralement semés au sein d'un

champ de blé. Lors de son premier passage en sortie d'hiver, l'équipe de recherche a délimité un quadrat [8] au centre de la microparcelle (Fig IV.4), en évitant les zones présentant des problèmes d'implantation le cas échéant. Les dimensions des quadrats étaient de 50 × 50 cm en 2022 et 50 × 75 cm en 2023 [9]. La surface à laquelle pouvait être ramenée les notations réalisées dans le quadrat dépendait du mode de semis. Dans le cas d'un semis en ligne la surface du peuplement du quadrat a été considérée comme égale au nombre de lignes au sein du quadrat fois l'interligne fois la longueur du quadrat (50 cm en 2022 et 75 cm en 2023) dans le cas d'un semis à la volée cette surface était égale à la surface du quadrat.

Nous avons réparti les mesures et observations sur l'essai entre équipe de recherche et expérimentateur.ices (Tab IV.1). Il y a eu quatre périodes de notation : les notations d'automne après la levée, les notations de sortie d'hiver en février-mars, les notations de printemps vers l'épiaison et les notations d'été à maturité. Les notations réalisées par les expérimentateur.rices se sont beaucoup basées sur les fiches co-construites lors de projets précédents (Riviere, 2014). Ces notations étaient qualitatives [10] alors que l'équipe de recherche a réalisé à la fois des mesures quantitatives et des notations qualitatives. Il arrivait souvent que les notations de l'expérimentateur.rice et de l'équipe de recherche soient réalisées conjointement (Fig IV.5). Un certain nombre d'analyses ont été effectuées sur les prélèvements (Tab C.1 de l'annexe).

Figure IV.4 – Comptage de plantes dans un quadrat chez FLM en 2023 (Michel Turbet Delof©).

En plus des notations de stades phénologiques au printemps, l'équipe de recherche a mesuré les dates "épi 1 cm" à partir d'un essai réalisé sur la plateforme expérimentale GQE-Le Moulon. Ce choix a été fait pour éviter les déplacements car la phénologie du stade épi 1 cm est un caractère très héritable (Bennett et al., 2012).

IV. 2.2.b Les informations contextuelles

Les descriptions des parcelles et des pratiques par les expérimentateur.ices. A l'automne, l'expérimentateur.rice était invité.e à remplir une fiche donnant des in-

8. Surface dédié aux mesures.
9. Décision prise à la rencontre du groupe le 25-26 janvier 2023.
10. Sauf parfois lorsque l'expérimentateur.rice était un animateur d'une association ou dans un organisme de recherche, dans ce cas, notre expérimentation s'insérait dans leur protocole spécifique.

Figure IV.5 – Réalisation des observations et mesures au printemps 2023 par l'équipe de recherche et l'expérimentateur EMH (Julia Cohendy©).

	Échelle	Automne	Sortie d'hiver	Printemps	Été
Peuplement cultivé	Quadrats		Nombre de pieds[b], pourcentage de couverture du sol par le blé[b]	Nombre d'épis[b]	Prélèvement de la biomasse aérienne du quadrat[b]
	50 × 50 cm			Prélèvement du peuplement aérien[b] sur Savoysone	
	Micro-parcelles fermes	Qualité de la levée[a]	Note globale[a], port de la plante[a], reprise de croissance[a]	Note globale[a], tallage[a], vigueur végétative[a], maladies[a,b], stades phénologiques[b]	Note globale[a], verse[a,b], rendement en grain[a], hauteur des plantes[b]
	Quelques plantes GQE Le-Moulon		Mesure de la distance entre plateau de tallage et le sommet de l'épi[b] pour estimer la date du stade épi 1 cm		
Adventices	Quadrats		couverture du sol par les adventices[b]	Identification des adventices[b], estimation de leur nuisibilité[b]	
	Essai		Identification des adventices[b] et estimation de leur prévalence[b]		
Sol	Essai	Caractérisation générale[a]	Prélèvement de deux horizons de sol[b], test des agrégats[b], test bêche[b], test du coton (dépôt)[b]	Test du coton (récolte)[b]	

Table IV.1 – Principales mesures et notations réalisées sur les essais.
a : réalisée par l'expérimentateur.rice ; b : réalisée par l'équipe de recherche. Les notes globales sont des notes subjectives évaluant le peuplement d'une microparcelle dans son fonctionnement global.

formations générales sur la parcelle d'essai comme les caractéristiques du sol (drainant hydromorphe, terre froide ou chaude, sol caillouteux ou non...), le précédent et les pratiques de préparation du sol et des semis.

Les analyses et observations des propriétés du sol. Des analyses de sol classiques ont été réalisées pour chaque essai à deux horizons (0-30 cm et 30-60 cm). Ces analyses ont permis en particulier de renseigner la texture du sol (granulométrie 5 fractions), l'état organique (azote, carbone, taux de matière organique), la disponibilité des minéraux solubles (pH , CEC, calcaire).

Nous avons réalisé des tests bêches (Peigne et al., 2016) pour connaître la structure du sol de l'horizon 0-30cm (et donc un potentiel d'enracinement) et obtenir quelques autres éléments de description utiles (traces d'hydromorphie, résidus de culture...). Ce test a été réalisé sur chaque essai, avec deux répétitions en 2021-22 et une seule en 2022-2023 [11].

Nous avons réalisé un test slake [12] pour connaître la stabilité des agrégats du sol dans l'eau. La stabilité des agrégats peut-être associée à la résistance à l'érosion, la capacité d'infiltration du sol et à la matière organique du sol (Herrick et al., 2001).

Enfin nous avons réalisé un test de dégradation d'une bande de coton (Harrison et al., 1988) comme indicateur de la capacité du sol à dégrader la matière organique. La bande a été déposée en sortie d'hiver et récoltée au printemps. En 2022-23 nous avons ajouté une bande supplémentaire pour mieux représenter la variabilité de l'essai [13].

La conduite culturale. A l'automne, l'expérimentateur.rice était invité.e à indiquer les pratiques de travail du sol et les pratiques de semis. Tandis qu'en fin de saison, il ou elle était invité.e à indiquer les interventions réalisées durant toute la culture.

Les notations sur le climat par les expérimentateur.ices. Au moment du remplissage de chaque fiche (automne, sortie d'hiver, printemps et été) l'expérimentateur.rice était invité.e à indiquer son évaluation des conditions météorologiques, en particulier si la pluie ou les températures lui semblaient correspondre, ou non, aux normales saisonnières.

IV. 2.2.c Indicateurs de peuplement du blé

Le rendement et ses composantes. En sortie d'hiver, le nombre de plantes par m^2 (NP_m^2) a été mesuré dans les quadrats. A maturité, le rendement (RDT), le poids de mille grains (PMG) et le nombre d'épis par m2 (NE_m^2) ont été déterminés à partir du prélèvement de l'ensemble des plantes dans les quadrats. Le RDT et le PMG sont exprimés à 15% d'humidité. NE_m^2 ne comprend que les épis ayant participé à

11. Étant donné notre usage uniquement informatif et les faibles surfaces des essais, un seul test bêche semblait suffisant.

12. Ce test consiste à mesurer le temps de dégradation dans l'eau de petits agrégats du sol (i) ajout d'eau ii) période sans agitation puis iii) agitation de l'eau).

13. Cela nous a permis de constater que la dégradation du coton pouvait fortement varier entre répétitions.

l'élaboration du rendement (nous avons enlevé les épis immatures, les épis avec moins de 4 épillets ou les épis sans grain). Les autres composantes du rendement ont été estimées à partir de ces mesures selon les équation ci-dessous :

$$NE_P = \frac{NE_m^2}{NP_m^2} \tag{IV.2}$$

$$NG_m^2 = \frac{RDT}{PMG} \tag{IV.3}$$

$$NG_E = \frac{NG_m^2}{NE_m^2} \tag{IV.4}$$

où NE_P est le nombre d'épis par plante, NG_E le nombre de grains par m^2 et NG_E le nombre de grains par épi.

Le rendement sur l'ensemble de la microparcelle a été mesuré par les expérimentateur.rice dans la plupart des cas (pesée des sacs de chaque microparcelle après un tri si le grain est sale).

Les autres indicateurs du peuplement. *Le défaut d'implantation* et *le rapport entre épis productifs et épis totaux* ont été estimés à partir des composantes du rendement et d'autres informations sur le peuplement.

$$\text{Défaut d'implantation} = \frac{NP_m^2}{NGS_m^2} \times 100 \tag{IV.5}$$

$$\text{Rapport épis productifs sur épis totaux} = \frac{NE_m^2}{NET_m^2} \times 100 \tag{IV.6}$$

où NGS$_m^2$ est le nombre de grains semés par m^2, NP$_m^2$ le nombre d'épis par m^2, NE$_m^2$ le nombre d'épis productifs par m^2 et NET$_m^2$ le d'épis totaux dans le quadrat. *Le pourcentage de grains mal remplis* a été estimé visuellement à partir d'un échantillon de grains collecté dans les quadrats d'après une échelle de notation élaboré par Jonard (1951 ; cf annexe Fig C.1).

Les expérimentateur.rices ont qualifié l'état du peuplement de l'ensemble de l'essai en automne après la levée par :

- la vitesse de levée (lente ou rapide).
- la régularité de la levée (régulière ou irrégulière)
- l'état général du peuplement (peu vigoureux, normal, très vigoureux) et si nécessaires des commentaires.

La biomasse paille sèche a été déterminée à partir des prélèvements réalisés dans les quadrats à maturité. *La teneur en protéine* et *l'humidité du grain* ont été déterminés par NIRS (Perkin Elmer FT9700 [14]). *La hauteur de la base de la plante au haut de l'épi* a été mesurée sur 10 brins maîtres pris au hasard dans chaque microparcelle (en évitant les bordures). *La verse* a été mesurée à maturité à l'échelle de la microparcelle

14. https://www.perkinelmer.com/fr/product/ft-9700-bench-top-ft-nir-instrument-perft

en notant le pourcentage de blé de la microparcelle versé et l'inclinaison moyenne des tiges (de 1 droit à 5 à plat). *Le rendement en protéines* a été obtenue en multipliant le rendement (15% d'humidité) par la teneur en protéine et *l'indice de récolte* par le ratio entre la masse de grain et la somme de la masse de grain et de la biomasse paille issues du quadrat.

IV. 2.2.d Les indicateurs agroclimatiques

Le choix des indicateurs agroclimatiques permettant de mesurer l'importance de différents stress abiotiques ont été tirés et légèrement adaptés de la méthode DIAG-VAR (Gauffreteau et al., 2009 ; Lecomte et al., 2009).

Les indicateurs agroclimatiques ont été calculés par phase de développement chaque phase de développement étant délimitée par 2 stades phénologiques (levée tallage entre la levée et épi 1 cm, phase montaison entre épi 1 cm et floraison et remplissage du grain entre floraison et maturité physiologique) ainsi que quelques phases de sensibilité spécifiques comme le déficit de rayonnement autour de la méiose. Une seule mesure au printemps des stades phénologiques a été réalisée dans les fermes, et pour estimer les dates des stades phénologiques clés, nous avons utilisé des relations empiriques en degré-jour [15] (dj) (Fig IV.6). Ces relations empiriques font des hypothèses fortes sur l'absence de variabilité génétique pour les composantes de la précocité [16].

Estimation de la date épiaison. A son passage au printemps, l'équipe de recherche a estimé le stade phénologique de chaque microparcelle [17]. Les stades variaient entre gonflement de l'épi et début de remplissage du grain. A partir de ces stades phénologiques observés et des relations de la figure IV.6, nous avons estimé *la date d'épiaison* pour chaque micro-parcelle par l'équation suivante :

$$dj_epi = dj_date + 75 \times pc_gonf\ (+0 \times pc_epi) - 145 \times pc_flo - 430 \times pc_stl \quad \text{(IV.7)}$$

où dj_epi et dj_date sont respectivement la somme de degré-jour depuis le semis jusqu'au stade épiaison et depuis le semis jusqu'à la date de notation des stades phénologiques au printemps ; pc_gonf, pc_epi, pc_flo et pc_stl sont respectivement le pourcentage des plantes au stade gonflement, épiaison, floraison et stade laiteux. Les facteurs multiplicatifs correspondent à l'écart moyen en dj entre les stades considérés et l'épiaison (Fig IV.6).

Pour pouvoir comparer les indicateurs agroclimatiques entre essais, nous avons estimé la moyenne par essai de la date d'épiaison en dj par un traitement statistique (voir la sous-partie ci-dessous modèle M2). Cela nous a permis d'estimer les indicateurs agroclimatiques moyens par environnement pour les années 2021-22 et 2022-23. Pour estimer les indicateurs agroclimatiques des 20 années précédentes nous avons fait l'hypothèse forte que les dates de semis et les dates d'épiaison moyennes par essai étaient les mêmes chaque l'année (par exemple si la date de semis de 2023 est le 25 octobre alors la date de semis de 2003 sera aussi le 25 octobre).

15. Ils correspondent au cumul sur une période donnée des températures moyennes journalières en base 0.

16. Alors que Gate (1995) reprend des études qui prennent en compte cette variabilité génétique.

17. Les variétés étudiées étant des populations une variabilité de la phénologie était souvent observée.

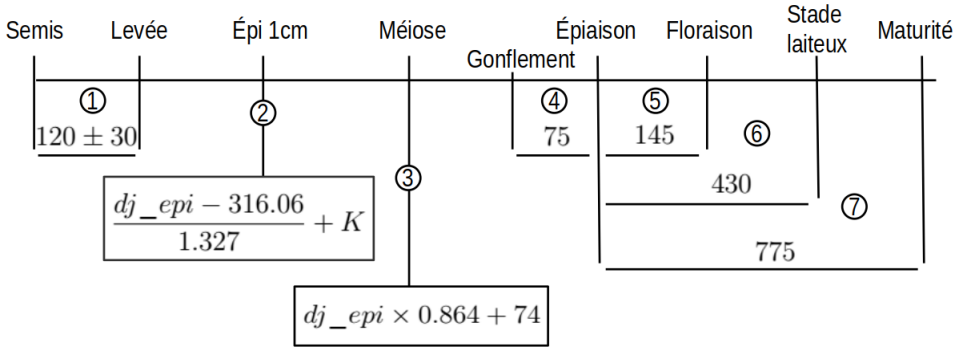


Figure IV.6 – Relations en degré-jour entre stades phénologiques.
dj_epi est la somme de dj entre semis et épiaison. 1) : La levée a été estimée à 90 dj après le semis, si la levée était considérée par expérimentateur.rice comme rapide, à 120 dj après le semis si la levée était considérée comme normale (Gate, 1995 ; page 73) et à 150 dj après le semis si la levée était considérée comme lente.
2) : Par à rapport l'équation de Lecomte (2005), nous avons ajouté une quantité K proportionnelle à la précocité variétale au stade épi 1 cm mesurée à GQE Le-Moulon (allant de − 60 dj pour les variétés très précoces et à + 60 dj pour les variétés très tardives).
3) : Gate (1995 ; page 133)
4) : Estimation du nombre de degrés jour entre stade gonflement et épiaison.
5) : Lecomte (2005)
6) et 7) : Gate (1995 ; page 153)

Obtention des données météo. Pour chaque ferme nous avons récupéré cinq données climatiques journalières (température maximale, température minimale, précipitation, rayonnement global et évapotranspiration potentiel) sur les 20 ans par la plateforme SICLIMA [18] d'INRAE. Cette plateforme nous a permis d'accéder aux données climatiques SAFRAN [19], qui sont extrapolés sur des mailles de 8 km×8 km réparties sur toute la France [20] à partir de l'ensemble des données Météo-France.

Excès d'eau. L'excès d'eau peut affecter l'implantation de la culture entre semis et tallage. L'année de culture 2021-2022, *l'indicateur d'excès d'eau* a été estimé par la somme des différences journalières positives entre pluie et évapotranspiration potentielle [21] entre semis et épi 1 cm (Lecomte, 2005). Suite aux échanges avec les expérimentateurs cet indicateur, nous a semblé peu fiable. Ces derniers ont suggéré de mieux prendre en compte les propriétés du sol. L'année de culture 2022-2023, nous

18. Système d'information de données climatiques maillées.
19. Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques À la Neige (SAFRAN) dispose de données météorologiques journalières historiques, elles sont disponibles depuis le 1er janvier 1959 et sont réactualisées en continu par Météo-France.
20. Pour MAV qui était à la frontière avec franco-belge, nous avons choisi la maille la plus proche (à moins de 8 km entre le centre de la maille et la ferme).
21. L'évapotranspiration est une mesure des pertes d'eau par retour à atmosphère à partir du sol ou du couvert végétale. L'évapotranspiration potentielle ne dépend que du climat et est estimé à partir du rayonnement net, du déficit de saturation de la vapeur de l'air et de la résistance du transfert de l'eau à partir du sol et d'un peuplement végétal de référence.

avons pris comme indicateur d'excès d'eau la somme des pluies lorsque la capacité de rétention en eau du sol est saturée entre semis et épi 1 cm (Gouache et al., 2015), et lorsque la parcelle était drainée nous avons fixé l'indicateur à 0.

Offre en rayonnement. Pour mesurer *l'indicateur de l'offre en rayonnement*, nous avons utilisé le quotient photothermique (Fischer, 1985). Celui-ci a été calculé comme le ratio entre la somme des rayonnements globaux et la somme des température sur deux périodes de croissance végétative : entre levée et épi 1 cm et entre épi 1cm et floraison.

Écarts aux températures optimales. Entre épi 1 cm et floraison nous avons estimé *l'indicateur d'écart aux températures optimales* comme la somme des écarts à 15°C (température de croissance optimal du blé durant cette période Gate, 1995 ; page 212).

Déficit de rayonnement durant la méiose. Ce déficit est estimé par *l'indicateur de rayonnement* est estimé par la somme des rayonnements globaux journaliers durant les 10 jours autour de la méiose. Le manque de rayonnement durant cette période peut entraîner des problèmes de méiose pollinique (Demotes-Mainard et al., 1996) et donc des défauts de nombre de grains par épi.

Déficits hydriques. *Les indicateurs de déficits hydriques* ont été calculés par un bilan hydrique en sommant les différences journalières positives entre ETM [22] et ETR [23] (Lecomte, 2005). Pour réaliser le bilan hydrique, nous avons considéré que la capacité du réservoir hydrique était vide en août et la réserve utile a été estimé en fonction de la texture du sol et de la profondeur d'enracinement (Jamagne et al., 1977). Nous avons estimé cet indicateur sur trois périodes, i) entre épi 1 cm moins 150 dj et épi 1 cm + 350 dj, ii) entre épi 1 cm et floraison et iii) entre floraison et maturité. L'année de culture 2021-22 nous avions estimé le déficit hydrique entre épi 1 cm moins 150 dj et épi 1 cm + 350 dj par la somme des différences positive entre ETP et pluie. Suite à aux échanges avec les expérimentateurs, l'année de culture suivante nous avons estimé cet indicateur comme les autres avec l'ETR pour prendre en compte la texture du sol et la profondeur du sol.

Températures hautes. *L'indicateur de températures hautes* a été estimé entre floraison et maturité du grain par la somme des températures supérieures à 25°C (Gate, 1995 ; page 215).

22. ETM est l'évapotranspiration maximale. Elle est calculée en à partir de l'ETP et du coefficient cultural du blé en fonction de ses stades de développement. Il correspond à la demande en eau du peuplement de blé.

23. ETR est l'évapotranspiration réelle calculée à partir de la connaissance de la réserve en eau dans le sol et l'ETM. Il correspond à l'offre en eau du sol resituée à l'atmosphère.

IV. 2.2.e Les autres indicateurs de l'état du milieu

Manque d'azote. Lors de son passage au printemps l'équipe de recherche a réalisé un prélèvement de biomasse aérienne sur chaque répétition de la variété témoin Savoysone [24] sur une surface de 50 × 50 cm afin d'estimer *l'indicateur de nutrition azotée à floraison*. Ces prélèvements ont été séchés, pesés puis broyés. Un échantillon a été analysé pour estimer la teneur en azote par la méthode Dumas (Carlo-Erba NA 1500 Analyzer). Nous avons ensuite calculé l'indice de nutrition azoté a partir de la courbe de de dilution critique de l'azote (Justes et al., 1994).

Adventices En sortie d'hiver, nous avons identifié les principales adventices présentes dans l'essai et réalisé une note de couverture du sol par les adventices dans chaque quadrat.

Au printemps nous avons identifié les trois principales adventices présentes dans chaque quadrat et observé leur nuisance vis-à-vis du peuplement sur une note de 1 (peu de nuisance) à 3 (forte nuisance). Cette nuisance est évaluée sur la base du volume occupé par les adventices de la même espèce. Nous avons limité l'effet subjectif de la notation en étant au minimum deux personnes à réaliser cette observation. Cette méthode est inspirée de la fiche 3 de Sicard et al. (2013). Ensuite nous avons estimé *l'indicateur de nuisibilité adventice* de la façon suivante :

$$\sum_{i=1}^{3} Nui_i^{obs} \times Nui_i^{theo} \tag{IV.8}$$

où $\sum_{i=1}^{3}$ est sommes des trois principales adventices, Nui_i^{obs} la nuisibilité observée de l'adventice i (varie entre 1 et 3) ; Nui_i^{theo} : nuisibilité théorique spécifique à l'adventice i (qui varie entre 1 et 3 dont le détail est en annexe C.2). Cet indicateur varie théoriquement de 0 (aucune adventice) à 27 (3 adventices repérées avec des niveaux de nuisances observée et théorique maximales de 3). Toutefois, la compétition entre adventices rend impossible cette note de 27 et dans la pratique nous considérons que 3, 6 et 9 représentent des niveaux de nuisibilité modérées, fortes et très fortes.

Les maladies. Étant donné que lors des échanges avec les expérimentateur.rices les maladies du feuillage n'étaient pas une préoccupation majeure, nous n'y avons pas consacré beaucoup d'effort. Au printemps l'équipe de recherche a seulement identifié les principales maladies sur les trois dernières feuilles et attribué une note de 1 (non impactant) à 3 (très impactant).

IV. 2.2.f Les notations uniquement utilisées pour comparer les variétés

D'autres indicateurs de peuplement ont été relevés par les expérimentateur.ices à l'échelle de la microparcelle pour comparer les variétés entre elles (en plus des indicateurs du peuplement déjà cités qui sont tous obtenus à l'échelle de la variété).

En sortie d'hiver, il s'agit de :

24. Sauf pour MAV, où la variété répétée était Savoyon et chez GDN:2022:$P1$, où c'était Automne-Rouge-Barbu.

— une note du port de la plante (1 dressé à 5 étalé),

— une la note de reprise (1 les parties aériennes ne se sont pas développées depuis la fin de période de froid à 5 les parties aériennes ont doublé depuis la fin de la période de froid),

— une note globale (1 moche à 5 magnifique) et des commentaires sur le peuplement.

Au printemps, il s'agit de :

— une note de tallage (1 faible à 3 fort),

— une note de vigueur végétative (de 1 peu de biomasse végétative à 5 très étouffant),

— une qualification de la couleur (de 1 vert claire à 3 vert foncé), cette notation devait être réalisée au début montaison pour observer des carences en azote.

— une note globale (1 moche à 5 magnifique) et des commentaires sur le peuplement.

En été, il s'agit de :

— une note de verse [25],

— une note globale (de 1 moche à 5 magnifique) et commentaires sur le peuplement.

IV. 2.3 La réalisation des rapports en vue des entretiens

Suite à la récolte de données chaque année, l'équipe de recherche a réalisé un rapport spécifique à chaque expérimentation (au total 29 rapports, dont celui de EMH 23 est donné en annexe C. 2). Ils synthétisent les résultats de l'essai et sont organisés en vue d'un diagnostic hybride entre l'équipe de recherche et l'expériemntateur.rice. Le diagnostic hybride est structuré en une partie à l'échelle de l'essai et une partie à l'échelle des variétés dans l'essai (Tab IV.2). A l'échelle de l'essai, le rapport présente les informations de manière séquentielle en les entrecoupant de questions ciblées visant à affiner l'analyse de l'expérimentateur.rice comme présenté en figure IV.3. Cette présentation séquentielle des informations à l'expérimentateur.rice permet une analyse de l'apport de l'expertise des expéripmentateur.rices et de celle de l'équipe de recherche pour le diagnostic.

Le diagnostic à l'échelle des variétés était descriptif et a consisté à décrire l'élaboration du rendement de chaque variété en prenant en compte la variabilité entre répétitions (à partir du modèle Rivière et al., 2015a ; et une représentation graphique de l'élaboration du rendement). Cette étape a permis aux expérimentateur.ices et à l'équipe de recherche d'exprimer des hypothèses sur l'adaptation des variétés à des stress spécifiques.

Les analyses et la création du rapport ont été effectuées avec le logiciel *R*. Le package *officer* (Gohel, 2020) a été utilisé pour créer les documents (sous format Word 2007-365).

25. Ce caractère est mesuré à la fois par l'équipe de recherche et les expérimentateur.rices car jugé important.

1. Principe de diagnostic hybride
2. Diagnostic à l'échelle de l'essai
2.1. Contextualisation de l'essai
Tab 1 : Descriptif du sol, **Tab 2 :** Descriptif des pratiques culturales, **Tab 3 :** Commentaires généraux, **Tab 4 :** Descriptif du climat et des accidents, **Tab 5 :** Dates des stades phénologiques moyens, **Photo 1 :** Sortie hiver, **Photo 2 :** printemps, **Photo 3 :** été. **Q1 :** Selon vous y-a-t-il des choses à ajouter pour compléter le contexte de culture ? **Q2 :** Avant de lire la suite, pouvez-vous nous indiquer si l'élaboration du rendement s'est réalisée normalement (adéquation entre potentiel du terroir et rendements de cette année) ? Si non, selon vous qu'est-ce qui a pêché ?
2.2. Composantes du rendement
Tab 6 : Composantes de rendement, **Fig 5 :** Représentation synoptique des composantes du rendement à l'échelle de l'essai. **Q3 :** Comment interprétez-vous l'élaboration du rendement ? **Q4 :** Avez-vous des hypothèses sur les causes ? **Q5 :** (uniquement si deux conduites sont testées) **:** A quelle période de développement du blé, les différentes conduites du blé se sont différenciées ?
2.3. Indicateurs de l'état du milieu et du peuplement
Fig 6 : Indicateurs agroclimatiques, **Tab 7 :** Indicateurs agroclimatiques, **Tab 8 :** Indicateur de l'état du milieu et du peuplement. **Q6 :** Est-ce que cela confirme vos hypothèses ?
3. Diagnostic à l'échelle des variétés
3.1 Information sur les variétés
3.2 Analyse des différents comportements variétaux
Fig 7 : Représentation synoptique de l'élaboration du rendement sur chaque microparcelle, **Tab 10 :** Composante du rendement par variété (le cas échéant dans chaque conduite). **Tab 12 :** Notation qualitative des variétés, **Tab 13 :** Notation quantitative des variétés, **Tab 14 :** Dates des stades phénologiques des variétés, **Tab 15** (uniquement en 2023) **:** Moyennes des composantes du rendement sur le réseau d'essai. **Q7 :** Qu'est-ce que vous pensez de ces résultats, correspondent-ils à ce que vous avez observé sur le terrain ? **Q8 :** Quelles variétés ont retenu votre attention ?

Table IV.2 – Structure du rapport pour le diagnostic hybride.

Représentation des informations. Le temps pour ce diagnostic était court et il fallait parvenir à donner à voir et à comprendre [26] l'information de la façon la plus synthétique possible. Pour cela nous avons choisi différentes manières de représenter les résultats (voir l'exemple complet du rapport de EMH 23 en Annexe C. 2)
Les informations qualitatives (commentaires des expérimentateurs ou de l'équipe de recherche, certaines caractéristiques du sol...) étaient directement retranscrites dans des tableaux. Les résultats quantitatifs ont été représentées de diverses manières :

— Des tableaux présentant les différents indicateurs avec la valeur de l'essai et une valeur de référence (moyenne du réseau d'essai et parfois une valeur seuil issue de la bibliographie).

— Des tableaux présentant les indicateurs par variété avec une identification (par couleur) des groupes de variétés significativement différentes deux à deux.

26. Beaucoup du temps du diagnostic hybride est consacré à expliquer les indicateurs et les figures.

— Nous avons proposé deux types de figures pour représenter la variabilité d'indicateurs, soit à l'échelle de l'essai soit à l'échelle des variétés :

1. La représentation synoptique des composantes de rendement a permis de suivre la dynamique d'élaboration du rendement en se comparant à la variabilité de chacune des variables (à l'échelle du réseau, Fig IV.7, ou des variétés dans l'essai).
2. La représentation des distributions des indicateurs agroclimatiques sur les 20 dernières années en présentant les seuils qualifiés de critiques (Fig IV.8). Le sens du stress potentiel est indiqué par une flèche. Les seuils critiques correspondent aux quantiles 25% ou 75% (en fonction du sens de la flèche) à l'échelle de l'essai (représenté par la base de la flèche) et à l'échelle du réseau d'essais [27] (représenté par un rectangle rouge).

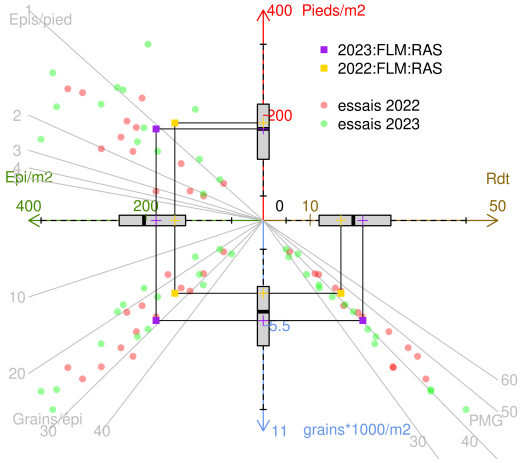


Figure IV.7 – Représentation synoptique de l'élaboration du rendement du réseau d'essais pour le diagnostic de l'essai de FLM. Chacun des 3 cadrants représente une composante du rendement par m² en fonction de la composante par m² précédente et les droites grise représentant la composante individuelle correspondante.

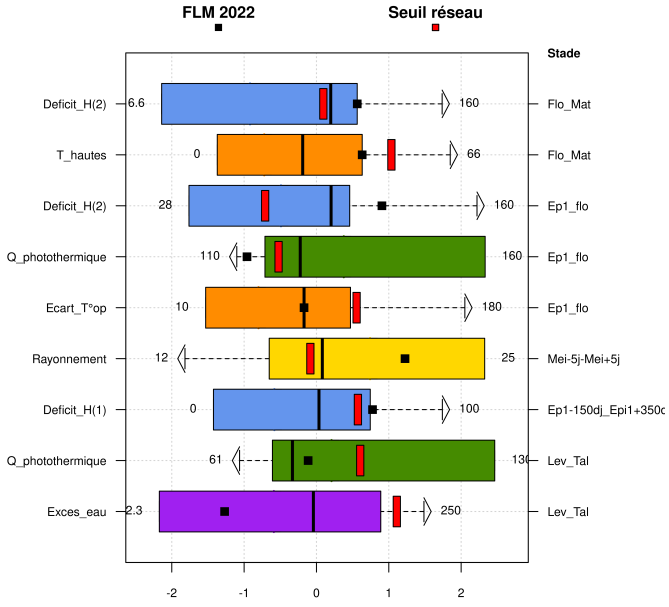


Figure IV.8 – Le sens du stress potentiel est indiqué par une flèche. En abscisse les valeurs centrées et réduites des différents indicateurs. Les seuils critiques correspondent aux quantiles 25% ou 75% (en fonction du sens de la flèche) à l'échelle de l'essai (représenté par la base de la flèche) et à l'échelle du réseau d'essais (représenté par un rectangle rouge). La médiane à l'échelle de la ferme est représenté par le trait noir dans les rectangles de couleurs.

27. La distribution des indicateurs de chaque essai du réseau sur les 20 dernières années.

IV. 2.4 Traitement statistique des données à l'échelle de la microparcelle ou du quadrat

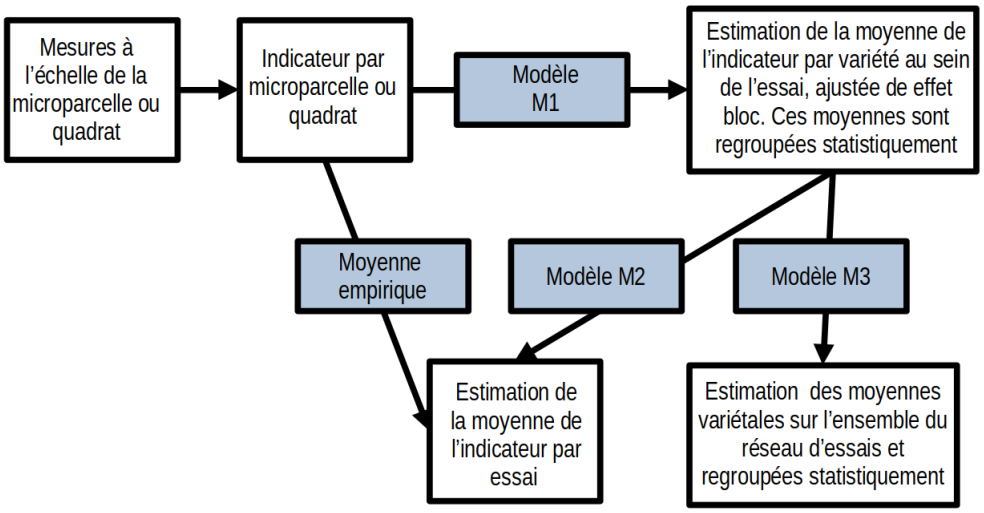


Figure IV.9 – Traitement des données à l'échelle de la microparcelle ou du quadrat.

Des traitements statistiques ont été effectués pour trois objectifs principaux (Fig : IV.9) :

1. Comparer les variétés au sein de l'essai en prenant en compte la variabilité résiduelle et l'effet bloc le cas échéant (M1) ;
2. Comparer les essais entre eux en prenant compte le fait que les variétés testées entre essais sont différentes (M2) ;
3. Comparer les performances ou les classements des variétés au sein de l'essai à aux moyennes dans le réseau d'essais (M3).

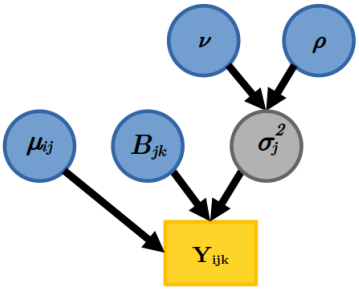
Seules les composantes du rendement et certains indicateurs du peuplement (teneur en protéine, hauteur, biomasse paille, indice de récolte, date d'épiaison en degré jours) ont été analysés avec les trois modèles (Fig : IV.9).

Pour tous les autres indicateurs, les indicateurs bruts ou la moyenne empirique des indicateurs sur l'essai étaient présentées dans les rapports.

Inférences des moyennes variétales au sein de chaque essai. *Pour comparer les variétés au sein de l'essai en prenant en compte la variabilité résiduelle et l'effet bloc le cas échéant*, nous avons utilisé le modèle bayésien de Rivière et al. (2015a) (package *ppbstat* Riviere et al., 2020 ; Fig IV.10). Ce modèle a été spécifiquement développé dans le cadre du programme de sélection participative du blé et a la particularité d'estimer la variance résiduelle de chaque essai en prenant en compte les variétés répétées dans l'essai ainsi que l'information sur la distribution des variances résiduelles sur l'ensemble du réseau. Cela permet d'obtenir une estimation plus robuste de cette variance résiduelle à l'échelle de l'essai en particulier pour les dispositifs

en fermes satellites. Cette estimation de la variance résiduelle est importante pour ensuite identifier au sein de chaque essai les variétés qui sont significativement différentes les-unes des autres.

Comme dans tous les modèles bayésiens les paramètres à « l'extérieur » du graphe acyclique orienté (Fig IV.10) sont assignés à une distribution *a priori*. Dans ce modèle ces priors sont dits « vagues » c'est-à-dire qu'ils ont une distribution très large et apportent une information négligeable par rapport aux données [28].



Priors « vagues » :
$\mu_{ij} \sim \mathcal{N}(\lambda_j, 10^6)$
$B_{j1} \sim \mathcal{N}(0, 10^6)$
$\nu \sim Uniforme(2, 10)$
$\rho \sim Gamma(10^6, 10^6)$

Paramètres hiérarchisés selon :
$\sigma_j^2 \sim Inverse{-}gamma(\nu, \rho)$

Contraintes supplémentaires :
$B_{j1} = -B_{j2}$

Décomposition des observations :
$Y_{ijk} = \mu_{ij} + B_{jk} + \varepsilon_{ijk}$
avec $\varepsilon_{ijk} \sim \mathcal{N}(0, \sigma_j^2)$

Modèle : M1

Figure IV.10 – Graphe acyclique orienté du modèle de Rivière et al., (2015) où Y_{ijk} est la valeur de la variété i dans l'essai j et le bloc k, μ_{ij} la moyenne de la variété i dans l'essai j, B_{jk} est l'effet bloc k de l'essai j (si ce dernier en a), ε_{ijk} est la résiduelle du modèle, σ_j est la variance résiduelle de l'essai j et, ν et ρ sont des paramètres de la loi inverse-gamma suivie par les paramètres σ_j, et λ_j est la moyenne empirique de l'essai j.

Dans le modèle de Rivière et al. (2015a) (Fig IV.10), les paramètres μ_{ij} et B_{jk} ne sont pas hiérarchisés [29] alors que les écarts-types des environnements sont hiérarchisés, σ_j qui suit une loi commune à l'ensemble du réseau d'essais (la loi inverse-gamma).

Inférence des moyennes variétales et environnementales à l'échelle du réseau d'essai. *Pour comparer les essais entre eux en prenant compte le fait que les variétés testées entre essais sont différentes*, nous avons utilisé un modèle mixte fréquentiste [30] (package lme4 Bates et al., 2015 ; Fig IV.3). Dans ce modèle nous avons posé que l'effet variété suit une loi normale permettant d'éviter d'estimer des effets variétaux trop extrêmes qui pourraient être uniquement dûs au déséquilibre des données.

En 2022-23, *pour comparer les performances ou les classements des variétés au sein de l'essai aux moyennes dans le réseau d'essai*, nous avons utilisé un modèle bayésien

28. Rivière et al. (2015a) indiquent que si le nombre d'environnements est inférieur à 20, les priors ν et ρ apporteront une information significative (priors informatifs).
29. Variable soumis à une loi statistique spécifique.
30. Le modèle M3 aurait été plus adapté à cela mais il n'était pas encore opérationnel pour les analyses des données de 2021-2022.

Modèle : M2
Paramètres hiérarchisés selon : $V_i \sim \mathcal{N}(0, \sigma_V^2)$
Contraintes supplémentaires : $E_1 = -\sum_{i=2} E_i$
Décomposition des observations : $Y_{ij} = \mu + E_j + V_i + \varepsilon_{ij}$ avec $\varepsilon_{ij} \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2)$

Table IV.3 – Modèle pour estimer la moyenne de l'essai (E_j).
où Y_{ij} est la valeur de la variété i dans l'essai j, μ la moyenne générale du trait, E_j est de l'essai j V_j est l'effet de la variété i, ε_{ij} est la résiduelle du modèle, σ_V est la variance variétale et, σ est la variance des résidus.

proche du modèle fréquentiste précédent (Fig C.3 en annexe). Cette méthode permet de grouper les variétés non-significativement différentes à partir d'un paramètre en hiérarchisé (ici V_i) [31] La modélisation bayésienne permet de facilement grouper les effets hiérarchisés (ici, les V_i non significativement différentes). Entre ces deux modèles (M2 et M3), les principales différences sont que dans le modèle M3

— l'effet environnement est soumis à une loi normale permettant d'obtenir des estimations des effets environnementaux plus robustes.

— les résidus sont soumis à une loi de Student. Cette loi permet que les estimations soient moins sensibles aux données extrêmes (Turbet Delof et al., 2024).

Les modèles bayésiens seront davantage décrits et étudiés dans le chapitre V. Le modèle M2 n'est plus nécessaire mais nous l'avons conservé pour garder la même méthode sur les deux années.

Vérification des hypothèses sur l'adaptation spécifique des variétés. Pour vérifier les hypothèses obtenues sur l'adaptation spécifique des variétés aux stress identifiés lors du diagnostic hybride, nous avons utilisé deux méthodes :

1. Pour vérifier les tolérances ou sensibilités à un stress spécifique de la variété i, nous avons comparé l'effet variétal moyen dans l'ensemble des essais où le stress a été identifié (l'ensemble Φ_i) à l'effet variétal moyen dans l'ensemble des essais où le stress n'a pas été identifié (l'ensemble Ψ_i). Cette méthode pour être mise en œuvre doit comporter un certains nombre d'essais où le stress et présent et où le stress n'est pas présent [32]. Les effets moyens variétaux dans les essais stressés et non-stressés ont été estimés avec les formules suivantes :

$$\omega_i^s = \frac{1}{N_\Phi} \sum_{j \in \Phi} \mu_{ij} - E_j \quad \text{et} \quad \omega_i^{ns} = \frac{1}{N_\Psi} \sum_{j \in \Psi} \mu_{ij} - E_j \tag{IV.9}$$

où ω_i^s et ω_i^{ns} sont respectivement les effets variétaux moyens dans les essais où le stress a été identifié (l'ensemble Φ_i) et ceux où le stress n'a pas été identifié

31. Cela est devenu possible en fréquentiste en utilisant des méthodes de Monte-Carlo (Gamage et al., 2013).

32. Cette méthode se distingue de l'étude de la sensibilité des variétés dans des essais dits "factoriels" où *toutes choses sont égales par ailleurs.*

(l'ensemble Ψ_i), N_Φ et N_Ψ sont le nombre d'essais appartenant à leur ensemble respectif, μ_{ij} est le posterior [33] correspondant à la moyenne de la variété i dans l'essai j issue du modèle M1, E_j est la moyenne de l'essai j issue de modèle M2. Nous avons traduit l'hypothèse de tolérances d'une variété i en $\omega_i^s > \omega_i^{ns}$ (ou l'inverse si hypothèse d'une sensibilité variétale). Nous avons estimé la fréquence P_H où la différence $\omega_i^s - \omega_i^{ns}$ était supérieure à 0 (ou inférieure à 0 si hypothèse d'une sensibilité variétale).

2. Pour vérifier l'adaptation d'une variété à la verse ou aux maladies, nous avons directement calculé la fréquence pour laquelle ils ont été visibles et où la variété a une note de stress supérieure à la moyenne de l'essai.

IV. 2.5 Analyse du contenu des diagnostics hybrides

Les diagnostics hybrides ont duré entre 1h30 et 2h. Pour la campagne 2021-2022 ils ont été réalisés entre février et mars 2023 et pour la campagne 2022-2023 entre novembre et décembre 2023. Nous avons également invité au diagnostic les agriculteurs qui accueillaient les essais de Mètis, Triticum et Initiative Paysanne à la fois pour bénéficier de leur expertise paysanne mais aussi car cela pouvait les intéresser.

Les diagnostics hybrides ont ensuite été analysés selon l'approche suivante :

— Pour chaque diagnostic hybride, un texte synthétise les éléments expliquant l'élaboration du rendement à l'échelle de l'essai. Cette synthèse récapitule les différentes hypothèses énoncées et validées qui ont permis d'expliquer la construction du rendement au cours du temps. Les différentes origines possibles pour l'information sont présentées avec des couleurs (en bleu les informations sachant le contexte, en orange les informations sachant le contexte et le composantes du rendement, en vert les informations sachant l'ensemble du rapport et en noir les données du rapport) et du gras pour ce qui est considéré comme de l'expertise de l'expérimentateur.

— Pour nous aider à évaluer notre méthode, nous avons classé les hypothèses discutées durant le diagnostic hybride en 10 types :

A. Les hypothèses proposées par l'expérimentateur.rice sans apport significatif de l'équipe de recherche (après présentation du contexte) :

1. Confirmées par l'information issue :
   a. des composantes du rendement (A1a) ;
   b. des indicateurs du milieu (A1b) ;
2. Infirmées par l'information issue :
   a. des composantes du rendement (A2a) ;
   b. des indicateurs du milieu (A2b) ;
3. Que l'expérimentateur.rice maintient en dépit de contradictions avec :

33. Nous prenons l'ensemble de la distribution du posterior pour pouvoir conserver l'incertitude de l'estimation liée à hétérogénéité de terrain et l'erreur expérimentale.

   a. les composantes du rendement (A3a) ;
   b. les indicateurs du milieu (A3b) ;
  4. Que les échanges avec l'équipe de recherche n'ont ni permis de confirmer ni d'infirmer (A4) ;
- B. Hypothèses émergeant durant l'échange avec l'équipe de recherche durant la présentation et étant confirmée par :
   a. les composantes du rendement (Ba) ;
   b. les indicateurs du milieu (Bb) ;
- C. Alors que l'estimation de l'indicateur du milieu suggérait un stress, les expérimentateur.rices n'y ont pas adhéré (C).

A la fin du diagnostic hybride, nous avons collecté les hypothèses et savoirs locaux sur les variétés paysannes. Après le diagnostic hybride, nous avons cherché cherché à vérifier les hypothèses d'adaptation spécifique à des stress avec l'information des facteurs limitant dans le réseau d'essai.

IV. 3 Résultats et discussion

IV. 3.1 Présentation des résultats qui ont été interprétés durant le diagnostic hybride.

Les variétés ont été testées dans 32 essais (ferme × année × pratique) et 29 expérimentations (ferme × année). Celles-ci recouvrent une diversité de contextes en termes de zones géographiques (Fig II.1, chapitre II), de texture de sol (10 types de sol différents), de profondeurs (de 30 cm à 120 cm) ou de capacités à retenir l'eau (Tab IV.4). La variabilité observé des rapports C/N [34] de la MO et des précédents laissent supposer une variabilité entre expérimentation dans la dynamique et le niveau de minéralisation de l'azote organique. Les pratiques culturales sont également très variables avec des semis entre le 13 septembre et le 15 décembre à des densités allant de 55 à 444 grains par m^2. Un tiers des expérimentations ont été fertilisées et seulement quatre avec de l'azote rapidement utilisable pour la plante (fumier). Aucune pratique de désherbage n'a été appliquée dans la moitié des essais (16 essais sur 32).

34. Plus l'indicateur C/N est faible plus le potentiel de minéralisation de la matière organique est fort.

n°	Code	Année	Pratique	Texture[a]	Profondeur (cm)	MO %	C/N	Type de sol[b]	Précédent	Date de semis	Densité de semis (g/m²)	Fertilisation[c] (t/ha)	Nb de désherbage
1	CHD	22		LAS	60	4.5	8.7	2	Seigle	26/10	150	4 Fu	0
2	CHD	23		AC	60	4.9	8.3	2	Prairie	31/10	333		0
3	EMH	22		AL	120	3.2	8.8	2	Pomme de terre	24/11	300		0
4	EMH	23		AL	70	2.9	9.3	1	Prairie	14/11	300		0
5	ERZ	23		LS	50	3.5	9.5	1	Triticale pois	29/10	266	10 Fu	0
6	FAT	22		LA	60	3.3	9.3	2	Féverolle blé	30/10	300	10 Co	0
7	FAT	23		LAS	80	4.2	9.7	2	Prairie	25/10	300	10 Co	0
8	FLM	22		LAS	60	4.0	8.5	3	Cartame	11/11	300		0
9	FLM	23		SL	50	2.8	9.2	3	Prairie	11/11	288	6 Co	1
10	JUC	22		SL	30	1.5	10.5	3	Poulard	23/11	400		0
11	JUC	23		L	50	2.0	8.5	1	Prairie	01/10	355		0
12	MAV	22	P1	SA	60	2.7	9.6	2	Prairie	24/10	244	20 Co	3
13			P2								178		
14	MAV	23	P1	S	60	2.4	9.5	3	Prairie	28/10	112	12 Co	2
15			P2							13/09	55		3
16	PAJ	22		LAS	60	3.9	9.6	3	Prairie	05/11	300		0
17	PAJ	23		LS	30	2.2	9.5	3	Prairie	18/10	350		0
18	RAB	22		A	40	5.5	9.0	3	Seigle	20/10	444	10 Co	1
19	RAB	23		AC	80	6.1	8.4	1	Prairie	20/10	444		1
20	VIL	22		LAS	30	2.9	9.7	1	Amidonnier féverole	12/11	390		0
21	VIL	23		LAS	30	3.2	10.2	1	Avoine	02/11	400		0
22	GDN	22	P1	AC	110	4.0	8.3	2	Luzerne	24/10	250		1
23			P2							24/11			
24	GDN	23		AC	60	4.3	9.6	2	Blé tendre	07/11	225		2
25	INP	22		LA	100	2.7	9.2	2	Tritical trèfle	28/10	350	20 Fu	3
26	INP	23		L	80	2.4	8.9	3	Pomme de terre	28/10	350		2
27	MET	22		AL	70	2.9	9.0	1	Jachère	19/11	377		0
28	MET	23		AC	50	4.2	10.8	3	Tournesol	07/11	333		2
29	PUR	22		LS	60	2.7	10.1	3	Blé tendre	15/12	377		1
30	PUR	23		A	120	2.8	8.9	1	Luzerne	10/11	377		1
31	TRI	22		LS	100	2.9	9.3	2	Lentilles	10/11	250		0
32	TRI	23		LS	80	2.6	8.0	2	Orge de printemps	28/10	200	4 Fu	1

Table IV.4 – Principales informations contextuelles des 32 environnement d'essais à la ferme. MO : matière organique ; C/N : rapport carbone sur azote ; a : A argile, L limon, S sable et C calcaire ; b : 1 sol hydromorphe, 2 sol intermédiaire et 3 sol séchant ; c : Fu fumier et Co compost ; Nb : nombre.

n°	Expé	Année	Pratique	NP_m2	NE_P	NE_m2	NG_E	NG_m2	PMG	Rdt (q/ha)	D_IMP (%)	R_EP (%)	INN	GMR (%)	GTMR (%)	Verse (%)	Maladies (1-3)	TP (%)	ADV (0-27)
1	CHD	22		56	2.21	125	31	3.7	45.1	16.6	63	80	0.25	10	2	3	1.3	11.9	3
2	CHD	23		253	1.04	248	20	4.75	41	19.2	24	87	0.33	16	6	6	1	11.4	3.6
3	EMH	22		189	1.24	233	21	4.84	41.7	20.3	37	89	0.7	8	0	57	1.6	13.9	5.1
4	EMH	23		221	1.25	277	25	6.48	37	23.9	26	95	0.41	15	3	0	1	11.2	1.1
5	ERZ	23		176	1.15	203	19	3.54	33.4	12	34	76	0.16	12	4	0	1	10.3	6.3
6	FAT	22				161	18	2.81	42.1	11.9		51	0.31	7	4	0	1	12.4	3.9
7	FAT	23		216	1.99	352	27	8.87	40.7	35.8	28	84	0.43	16	4	0	1	12	2.5
8	FLM	22		186	0.8	151	26	3.82	43.9	16.7	38	73	0.45	6	2	0	1.2	12.3	1.7
9	FLM	23		174	1.12	183	28	5.26	40	21.3	40	88	0.34	18	4	0	1.1	11.1	6.7
10	JUC	22		70	0.59	67	28	1.65	33.8	5.6	82	51	0.25	6	1	0	1.1	12.5	12.2
11	JUC	23				54	34	1.79	44.2	7.5		90	0.21	17	6	0	1	12.4	18
12	MAV	22	P1	177	1.26	216	28	5.81	47.2	26.9	27	85	0.43	8	1	16	1.9	13.3	0.7
13	MAV	22	P2	131	1.86	222	32	7.11	48	33	26	91	0.45	7	2	19	1.9	13.4	1.1
14	MAV	23	P1	116	0.98	109	25	2.82	32.5	9.2	20	90	0.22	11	3	0	1	11.2	3.7
15	MAV	23	P2	51	2.47	102	31	3.37	35.8	11.8	22	95	0.33	9	3	0	1	10.8	3.8
16	PAJ	22		233	0.89	208	21	4.46	38.6	17.1	22	68	0.29	6	1	0	1.1	9.2	3.6
17	PAJ	23		248	0.99	240	20	4.41	40	17.4	29	75	0.41	16	4	0	1	12.5	4
18	RAB	22		47	2.3	102	30	2.78	39.9	11.1	89	77	0.28	9	1	0	1	13.9	4.3
19	RAB	23		155	2.83	379	25	8.94	40.4	35.8	65	96	0.49	18	8	19	1	12.7	4.1
20	VIL	22		108	1.25	141	25	3.57	44.3	15.5	72	82	0.31	6	1	0	1.2	10.8	6.4
21	VIL	23		131	1.41	181	23	4.02	36.7	14.8	67	77	0.33	15	3	0	0.9	10.6	2.3
22	GDN	22	P1	136	2.2	276	28	7.64	36.1	27.6	45	89	0.63	27	11	67	2.4	17.1	0.7
23	GDN	22	P2	56	3.84	183	33	5.04	41.6	21.1	78	91	0.74	22	1	0	2.5	16.1	1.5
24	GDN	23		78	1.09	74	24	1.49	32.9	4.8	65	75	0.21	26	10	0	1	12.1	2.3
25	INP	22		243	1.26	309	25	8.24	42.6	34.4	31	78	0.48	10	6	1	1.7	9.8	0.3
26	INP	23		281	1.37	358	27	9.84	44.8	43.1	20	87	0.37	11	4	23	1	10.3	1.3
27	MET	22		250	1.35	334	24	7.75	36	28	34	84	0.65	18	6	45	1.1	12.6	3.3
28	MET	23		211	0.57	117	16	1.96	27.5	5.6	37	86	0.25	24	8	0	1	12.6	3.9
29	PUR	22		159	0.52	88	41	3.46	18	6.4	58	39	0.26	26	2	0	1.1		6.8
30	PUR	23		335	0.64	200	24	5.69	38.6	22.2	11		0.67	9	2	18	1	13.2	4.3
31	TRI	22		158	1.53	243	31	6.65	47.2	30.8	37	91	0.42	6	2	0	1.5	10.8	2.4
32	TRI	23		150	1.52	214	28	6.06	39.1	23.9	25	90	0.23	15	3	10	1	11.2	2.6
Moy		22		147	1.53	192	28	4.99	40.3	20.3	49	76	0.43	11	3	9	1.5	12.7	3.6
Moy		23		186	1.36	206	25	4.96	37.8	19.3	32	86	0.32	15	5	5	1	11.6	4.4

Table IV.5 – Valeurs moyennes par essai des indicateurs du peuplement mesurés sur les quadrats et des indicateurs du milieu (E_j modèle M2).
NP_m2 : nombre de plantes par m^2 ; NE_P : nombre d'épis productifs par plantes ; NE_m2 : nombre d'épis productif par m^2 ; NG_E : nombre de grains par épi ; Ng_m^2 nombre de grains par m^2 (divisé par 1000) ; Rdt : rendement ; D_IMP : défaut d'implantation ; R_EP : rapport épis productif sur épis totaux ; INN : indice de nutrition azoté ; GMR : grains mal remplis ; GTMR : grains très mal remplis ; TP : teneur en protéines ; ADV : indicateur de nuisibilité adventice ; **Moy** : moyenne.

Expé	Année	Exe_eau 22	q 75%	Exe_eau 23	q 75%	QPT lev-epi1	q 25%	DH epi1 22	q 75%	DH epi1 23	q 75%	RAY meio	q 25%	ETO epi1-flo	q 75%	QPT epi1-flo	q 25%	DH epi1-flo	q 75%	TH flo-mat	q 75%	DH flo-mat	q 75%
CHD	22	142	299			163	109	59	40			25	16	49	106	123	111	131	43	67	55	75	75
CHP	22	104	234			103	84	34	57			23	17	72	55	107	106	34	13	80	59	107	87
EMH	22	41	135			98	92	63	76			22	18	27	89	128	122	17	1	42	42	77	64
FAT	22	81	261			143	130	76	79			24	20	25	92	153	134	85	44	30	40	121	93
FLM	22	63	209			80	70	69	68			21	16	73	103	115	118	113	99	41	41	113	113
GDN	22	92	201			121	99	62	66			24	18	39	76	125	115	14	5	79	69	68	49
INP	22	214	312			87	73	99	70			22	17	56	135	142	126	28	0	20	18	86	40
JUC	22	61	161			145	111	86	58			24	19	41	95	140	127	159	92	43	47	73	99
MAV	22	102	270			134	117	74	78			23	20	26	115	154	135	139	86	28	36	127	110
PAJ	22	29	195			92	81	57	69			23	17	57	112	118	130	87	61	57	53	103	104
PUR	22	11	54			111	102	50	65			25	19	92	52	105	105	135	87	90	74	117	121
RAB	22	156	332			208	190	37	37			28	20	55	141	143	145	93	61	65	46	87	91
TRI	22	198	274			87	82	62	49			16	16	18	113	124	115	7	0	40	27	69	43
VIL	22	137	202			132	110	68	65			25	19	36	128	139	133	120	73	43	43	70	97
CHD	23			264	353	110	114			0	15	17	17	52	88	119	107	1	26	29	64	47	79
EMH	23			0	0	80	88			0	8	17	16	53	88	123	123	11	50	60	56	116	96
ERZ	23			0	0	78	91			0	35	29	19	55	74	127	116	77	72	57	57	64	93
FAT	23			202	300	114	124			0	7	31	22	64	81	152	132	36	35	44	44	129	94
FLM	23			217	250	74	74			2	50	20	16	44	87	127	116	80	99	49	47	80	114
GDN	23			0	0	100	112			0	11	22	19	43	60	115	111	33	59	63	71	110	94
INP	23			304	375	76	84			0	0	27	18	84	99	136	121	10	5	26	23	91	54
JUC	23			54	183	76	77			0	0	15	18	141	162	143	136	0	0	44	46	45	46
MAV23P1				232	272	118	66			0	0	33	18	65	868	153	157	119	77	41	17	127	96
MAV23P2				235	332	90	97			0	51	29	21	128	140	156	137	121	115	41	41	128	119
MET	23			111	291	84	84			0	1	17	17	45	59	116	109	10	27	47	58	63	101
PAJ	23			185	260	68	76			0	26	15	18	86	105	124	125	32	84	52	57	121	108
PUR	23			23	121	94	96			0	0	17	17	35	62	104	117	0	4	45	59	4	75
RAB	23			0	0	150	188			0	0	21	21	70	114	135	138	1	11	30	55	82	79
TRI	23			339	337	67	75			0	0	23	16	65	115	128	115	9	7	40	29	68	63
VIL	23			0	0	93	107			0	33	19	19	102	124	140	133	35	55	50	49	103	95
Q 2022			224				95		63				18		107		120		62		49		95
Q 2023					268		86				12		18		112		120		58		50		93

Table IV.6 – Indicateurs agroclimatiques et seuils critiques (quantiles).
q 75% (resp. 25%) : quantile 75% (resp. 25%) de l'indicateur sur la ferme durant les 20 dernières années (*seuil ferme*) ; **Q 2022** (resp. **Q 2023**) : quantile de l'indicateur sur les sites de l'année 2022 (respectivement 2023) sur les 20 dernières années (*seuil réseau d'essais*) ; lev-epi1 : entre levée et épi-1 cm ; epi1-flo : entre épi 1 cm et floraison ; flo-mat : entre floraison et maturité ; Exe_eau 22 (resp. 23) : indicateur d'excès d'eau 2022 (resp. 2023) en mm ; QPT : quotient photothermique en $(J/cm^2)/°C$; DH : indicateur de déficit hydrique en mm ; RAY : rayonnement en J/cm^2 ; ETO : écart aux températures optimales en °C ; TH : indicateur de températures hautes en °C.

Une grande gamme de variation des composantes du rendement a été observée dans le réseau d'essais à la ferme : le nombre de pied par m² allait de 47 à 335, le nombre d'épis productifs par pied varie entre 0.52 et 3.87, le nombre de grains par épis entre 16 et 41, le PMG entre 18 et 47.2 et enfin le rendement entre 4.8 et 43.1 q/ha (Tab IV.5). Il y a également une variabilité des autres indicateurs liés au rendement que nous avons observé : des défauts d'implantation allant de 21% à 89%, une productivité épi allant de 39 à 91% et des grains mal et très mal remplis allant respectivement jusqu'à 27% et 11%. Tous les essais ont des indices de nutrition azoté en dessous de 0.8 (la valeur sous laquelle on considère généralement qu'il y a un manque d'azote Jeuffroy et Bouchard, 1999). La verse a couché plus de 5% du peuplement sur neuf essais et l'indicateur de maladies foliaires a été supérieur à 2 sur seulement un essai (note entre 1 et 3). L'indicateur adventice est supérieur à 3 (impact modéré) deux tiers des essais.
Les indicateurs agroclimatiques et seuils critiques utilisés dans les diagnostics hybrides sont présentés dans le tableau IV.6. Certains indicateurs ont des valeurs qui semblent fortement dépendre de l'année. Par exemple l'indicateur de déficit hydrique entre épi 1 cm et floraison est plus fort en 2022 (au dessus de 60 mm dans 9 essais) alors qu'il est seulement deux fois au-dessus de 60 mm en 2023. De même en 2023, le rayonnement à méiose est plus faible qu'en 2022 (RAY 6 fois en dessous [35] de 18 J/cm² en 2023 et une fois en 2022). Les seuils critiques du réseau d'essais (Q 2022 et Q 2023) n'apportent pas la même information que les seuils critiques à l'échelle de la ferme (q 75% et q 25%). Les seuils de la ferme sont différents les uns des autres, et s'il est intéressant de resituer le niveau d'un indicateur sur la base des 20 années précédentes sur le même site, il peut aussi être intéressant de comparer l'indicateur aux seuils historiques moyens calculés sur le réseau d'essais. Par exemple INP est dans la région d'Arras, où les pluies sont nombreuses et fréquentes au printemps. Son indicateur DH flo-mat est à 0 sur les 20 dernières années donc le seuil ferme aussi. Pour EMH 22, le déficit hydrique entre floraison et maturité est de 77 mm, supérieur au seuil ferme (indiquant que la valeur de l'indicateur est extrême par rapport aux 20 dernières années sur la ferme) mais inférieur au seuil critique du réseau en 2022, 95 mm (indiquant que l'indicateur n'est pas extrême par rapport au réseau d'essais sur les 20 dernières années). D'autres informations que l'indicateur et ses seuils sont nécessaires pour savoir si un stress lié au manque d'eau a impacté le remplissage du grain (comme des informations sur l'état du grain, la concordance de l'indicateur avec les propriété du sol...).
Par rapport au diagnostic de Lecomte (2005) portant sur un réseau de 29 essais variétaux, notre cas d'étude comporte moins de pratiques culturales différentes comparées au sein d'un site et moins de sources de variabilité étudiées (13 [36] contre 63) mais davantage de sites (16 sites contre 5) et une plus grande diversité de pratiques culturales entre sites. De plus notre réseau d'essais est déséquilibré.
Par rapport au diagnostic agronomique de David et al. (2005) portant sur un réseau de 24 parcelles de blé conduit en AB, notre cas d'étude s'intéresse à une plus grande aire géographique (et davantage de types de sol), et à des expérimentations ayant

35. Plus la valeur est basse plus cela indique un stress fort. C'est pour cela qu'avec le quotient photothermique, le seuil est le quantile 25% et pas le quantile 75%).

36. Nous cherchons a vérifié neuf indicateurs agroclimatiques et 4 indicateurs de l'état du milieu.

moins recours à la fertilisation et au désherbage. Dans notre cas d'étude, nous testons davantage de variétés, de pratiques culturales et de source de variabilité (13 contre 10 [37]).

IV. 3.2 Résultats issus des diagnostics hybrides

IV. 3.2.a Analyse de trois diagnostics hybrides

Tous les diagnostics hybrides ont été résumés dans des textes de synthèses (Annexe C. 3). Nous présenterons ici trois exemples en détail (encadrés IV.1, IV.2 et IV.3). Dans ces encadrés et ceux des annexes un code couleur permet de savoir le moment du diagnostic où l'information a émergé (bleu après la présentation du contexte, orange après la présentation des composantes du rendement et vert après la présentation des autres indicateurs). Les informations issues des connaissances propres de l'expérimentateur.rice sont notées **en gras**.

Encadré IV.1 : **Synthèse du diagnostic hybride de l'essai de FLM 2022**

L'essai est semé dans une des meilleures parcelles de la ferme même si cette parcelle est séchante (42,8 % de sable grossier) **et de faible profondeur (30 cm puis beaucoup de cailloux).** Par contre la matière organique est plutôt élevée (4,0%) . **La culture précédente devait être une prairie mais comme elle ne s'est pas bien implantée (problème de ravenelle), une culture de cartame fourrager a été semée par dessus. Les semis de l'essai ont été dans certaines microparcelles irréguliers (ce qui pourrait expliquer des différences de rendement entre parcelles et quadrats). A partir de janvier, tous les mois, il y a eu moitié moins de pluie que les normales saisonnières. Au printemps, il y a eu un manque d'eau entraînant un stress physiologique** (indicateur au-dessus des deux seuils critiques)**et causant : i) des épis avortés** (l'équipe de recherche a aussi noté beaucoup d'épis ayant les épillets apicaux non fécondés) ; **ii) des plantes de blé beaucoup plus courtes que d'habitude dans cette parcelle** (88 cm sur son essai< 112 en moyenne sur le réseau d'essais en 2022) ; **iii) peu de minéralisation donc un manque d'azote , le peuplement n'était pas jaune mais pas très foncé non plus à montaison** (INN=0,45 <0 ,8 la référence, 12,3 % **de protéine alors qu'il est habitué à 13-14 %**) ; **iv) un mûrissement plus précoce ,** quotient photothermique bas « **peut expliquer des choses** » (en dessous des deux seuils critiques) ; **v) un faible enherbement** à cause du manque d'eau.
Pas d'échaudage (malgré des indicateurs de déficit hydrique et de température haute au-dessus des seuils critiques) **car la pluie est arrivée au bon moment et peu d'endroits où ça a échaudé dans la région** (grains mal

37. David et al. (2005) identifient les stress de manière automatique tout en ayant réduit fortement *a priori* les facteurs hypothétiques de leur modèle conceptuel.

remplis = 6 % < 11 la moyenne en 2022) **Les blés n'ont pas compensé les manques de peuplements** en particulier au tallage (0,8 épis par pied chez lui < 1,6 en moyenne dans le réseau d'essai en 2022) **puis les blés se sont mis « en position de sécurité » donc rendements décevants (même en pleins champs) avec finalement** 17 qt, **inférieur aux objectifs de la parcelle (20 25 q/ha en moyenne)**

« Plutôt "moins à manger" qu'un manque d'eau » semble vrai au début du cycle mais dès la montaison c'est le manque d'eau qui semble prépondérant pour l'explication du rendement.

Dans l'encadré IV.1, on voit qu'avec seulement ses connaissances et les informations du contexte (en bleu), FLM arrive à être très juste dans son analyse (les indicateurs du milieu corroborent ses hypothèses). Les hypothèses expliquant le rendement sont donc majoritairement de type A1 [38] (manque d'eau au printemps A1ab, manque d'azote tout au long du cycle A1ab, mûrissement précoce A1b). L'échaudage n'a pas été mentionné comme stress alors que les indicateurs de stress hydrique et températures hautes à remplissage sont au-dessus de certains seuils critiques (Fig IV.8). Cependant, ces indicateurs ne sont pas corroborés par les indicateurs de peuplement (le PMG et les indicateurs de grains mal remplis sont normaux) et les références locales de FLM (indiquant peu d'échaudage dans la région). Stress de hautes températures et de déficit hydrique entre floraison et maturité sont donc de type C [39] Dans ce cas, notre démarche a permis d'objectiver l'expertise paysanne et de se mettre d'accord sur les liens entre stress (Fig IV.11) en les hiérarchisant (principalement un manque d'éléments nutritifs en début de cycle et déficit hydrique associé à un déficit de rayonnement au printemps).

Encadré IV.2 : **Synthèse du diagnostic hybride de l'essai de MET 2022**

L'essai est semé dans un sol agrilo-limoneux et une zone hydromorphe mais plutôt riche en matière organique (2,9%). **Le précédent était une jachère. Le semis (à la volée) a été trop dense pour ce terroir (377 grains par m²). C'est une mauvaise année pour le blé car :**
-pas assez de froid pour le tallage (peuplement cependant important car semis dense),
-stagnation d'eau en hiver (l'indicateur ne dépasse pas les seuils critiques, ce qui est logique car l'estimation ne tient pas compte de l'hydromorphie) [a].
-sécheresse précoce affectant peu le nombre de grain par épis (27,3 grains par épi ∼ 27,5 en moyenne sur le réseau d'essai en 2022) finalement ce serait probablement surtout dû à la compétition pour les ressources (l'indicateur de stress hydrique en épi 1 cm et floraison ne dépassent que le seuil critique sur la ferme et pas le seuil sur le réseau)

38. Hypothèse proposée par l'expérimentateur.rice sans apport significatif de l'équipe de recherche et confirmée par les composantes du rendement (a) et/ou les indicateurs du milieu (b).
39. Estimation d'indicateur jugée non adéquat.

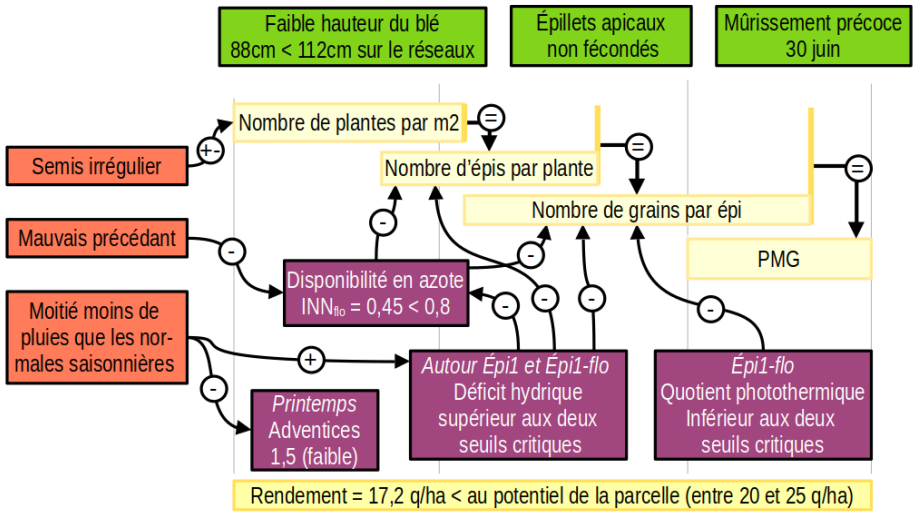


Figure IV.11 – Schéma de l'élaboration du rendement de FLM 2022.

Sécheresse affectant probablement le remplissage du grain : en effet le PGM indique de petits grains (36,1 < 40 la moyenne sur le réseau) ce qui est corroboré par les indicateurs de hautes températures et de déficit hydrique (les deux dépassent les 2 seuils critiques) et le pourcentage de grains mal remplis (18 % > 11 % en moyenne sur le réseau).
Pas de souci de nutrition azoté (INN = 0,65 assez proche de la 0,8 la référence) **cette valeur haute aurait sans doute été influencée par le voisin qui aurait envoyé quelques « croquettes d'azote » dans l'essai en fertilisant le champ à coté.**
Récolte beaucoup plus précoce que d'habitude (blé mûr le 22 juin). **Blé sec à cause de la sécheresse mais pas par un mûrissement physiologique normale Verse** (48,5 % de blé couché > 11 % en moyenne sur le réseau) **car problème de semis et beaucoup d'épis par m²** (337 épis par m² > 193 en moyenne sur le réseau) mais n'aurait pas beaucoup influencé le rendement car tardive par rapport à la maturité du grain.
Le rendement de l'essai (27,5) est supérieur à celui des voisins (environ 20q/ha), sans doute dû à la densité de semis. **« Si on compare le rendement en farine, je ne suis pas sûr que mon rendement soit supérieur aux autres »** (la conduite à densité normale aurait un meilleur rendement farine).

a. Parmi les deux répétitions de Savoysone, celui en bas de la parcelle a un rendement bien moindre que celui d'en haut (13q/ha contre 40q/ha). Ce qui va dans le sens qu'il y a bien un gradient d'hydromorphie de haut en bas.

L'encadré IV.2, nous donne un autre exemple de diagnostic hybride. Le paysan accueillant l'essai, nous indique que l'excès d'eau en hiver a été impactant bien que l'indicateur ne dépasse pas les seuils critiques (seuil de la ferme et seuil du réseau). En plus du fait que la parcelle est en bas d'une colline, notre indicateur de 2022 ne

prenait pas en compte la texture du sol [40]. Cette proposition a été maintenue dans le diagnostic (A3b) [41]. Au contraire, la sécheresse précoce proposée par MET a été finalement infirmée avec les informations issues des différents indicateurs (A2ab). La sécheresse durant le remplissage été proposée et confirmée par les différents indicateurs (A1ab). L'indice de nutrition azoté indiquant un stress azoté (inférieur à 0.8) et la verse ont été jugés inadéquats pour expliquer le rendement (C). Ce diagnostic hybride permet de montrer la critique constructive entre expertise paysanne et expertise externe. Le schéma explicatif de l'élaboration du rendement est présenté figure IV.12.

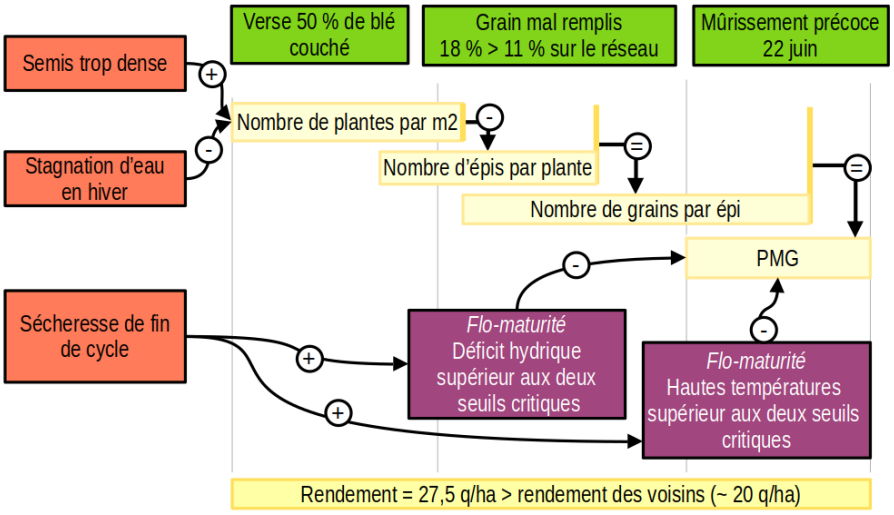


Figure IV.12 – Schéma de l'élaboration du rendement de MET 2022.

Encadré IV.3 : **Synthèse du diagnostic hybride des deux essais de MAV 2022**

L'essai a été semé dans une parcelle sablo-limoneuse (65 % de sables) **plutôt riche en MO** (2,7%) [a] **, ayant pour précédent 3 ans de prairie temporaire (luzerne, trèfle et graminées) et sans labour depuis 6 ans. Deux pratiques testées (avec les mêmes variétés) : P1 semis à 110 kg/ha (240 grains par m²) et P2 semis à 80kg/ha (180 grains par m²).** On retrouve la différence de densité dans le nombre de pieds par m² (P1 : 176 pieds par m² et P2 : 128 m²) Les blés de la pratique P2 ont davantage tallé (P2 : 1,9 épis par pied contre 1,2 pour la pratique P1)et fait davantage de grains par épi (P2 : 30,8 grains par épis contre 27,8 pour la conduite P1) Le PMG est équivalent pour les deux conduites (48 > 40,2 en moyenne sur le réseau) et finalement le rendement est meilleur pour la conduite P2 (P2 : 31,1 q/ha contre 27,1 pour la conduite P1). **« Ce que je crois c'est que *le blé est l'ennemi du blé,* quand on sème plus clair il y a moins de compétition et plus de bien-être. Si les conditions sont mauvaises, le blé est encore plus ennemi du blé, car il y a plus de compétition (nourriture et eau, pour**

40. Ce qui a été modifié pour les diagnostics des essais de 2023
41. Proposition maintenue malgré les informations issues des indicateurs du milieu.

le développement racinaire pour descendre plus bas...) » **MAV a été surpris que les rendements soient si élevés.** Le stress azoté semble avoir été légèrement différent entre pratiques (INN P1 : 0,43 et P2 : 0,48) ce qui va dans le sens de l'interprétation de MAV sur la compétition pour les ressources. **Printemps chaud et sec** (indicateur de stress hydrique au-dessus des deux seuils critiques) **En été, pluies en mi-juin (100mm) qui ont fait du bien aux blés.** **MAV n'est pas convaincu du stress hydrique à maturité** (bon PMG bien que l'indicateur de stress hydrique soit au-dessus des deux seuils critiques). La rouille jaune a été bien visible au centre de la parcelle avec l'humidité du mois de juin (note 1,8 /3 pour les deux pratiques contre 1,5 en moyenne sur le réseau). La verse a été légèrement plus visible sur la conduite P2 que la conduite P1 (P2 : 12,3 % de couché contre 9,7 % sur la conduite P1). **MAV est surpris que la pratique P2 ait fait plus de biomasse paille que la pratique P1** (P2 : 57,4 q/ha contre 37 sur la pratique P1)

a. Il est souvent difficile d'accumuler de la matière organique dans des parcelles sableuses.

L'encadré IV.3 présente la synthèse du diagnostic hybride de l'expérimentation de MAV 2022 qui a testé les variétés avec deux densités de semis (P1 : 240 grains par m^2 et P2 : 180 grains par m^2). En plus de l'identification de stress impactant l'ensemble de l'expérimentation, le diagnostic hybride permet d'identifier l'impact des pratiques de MAV. Deux stress communs aux deux pratiques ont été identifiés : un déficit hydrique entre épi 1 cm et floraison (A1b) et la rouille jaune (Bb). L'hypothèse d'un déficit hydrique entre floraison et maturité a été infirmée malgré des indicateurs ayant des valeurs extrêmes (C). La différence entre pratiques a montré une forte compétition entre composantes (plante par m^2 et épi par m^2) pour une même disponibilité en ressources –en particulier l'azote– pour la conduite P1. Le schéma explicatif de l'élaboration du rendement des deux pratiques est présenté figure IV.13.

IV. 3.2.b Synthèse de la vérification des facteurs hypothétiques

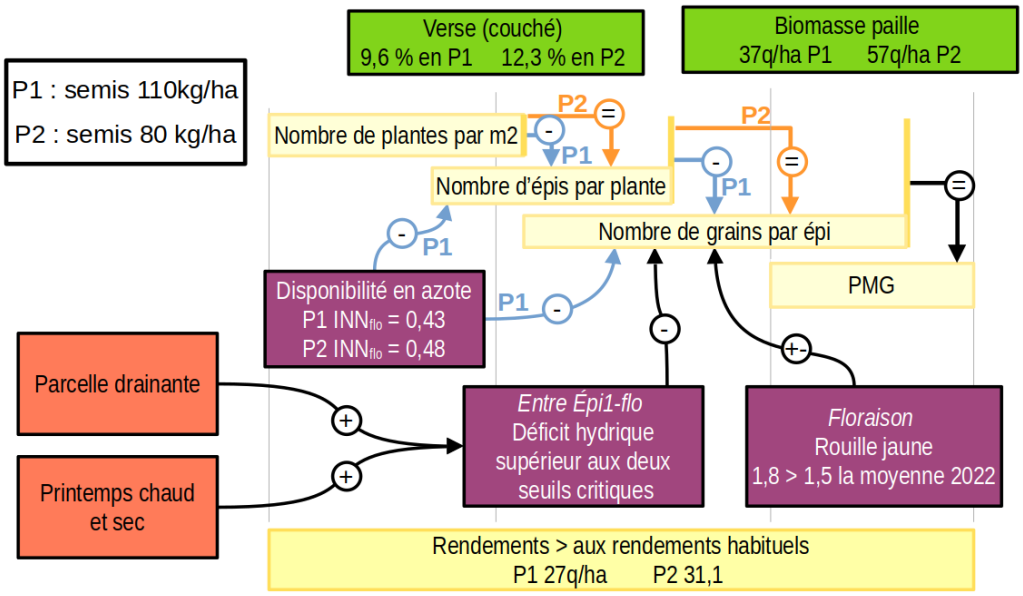


Figure IV.13 – Schéma de l'élaboration du rendement des essais de MAV 2022.

Expé Année	Pratiques	PB_IMP	Ex_eau	DH epi1	DH epi1-flo	DH flo-mat	TH flo-mat	ADV	Co_compo	ETO epi1-flo	Mazote	Mray lev-epi1	Mray epi1-flo	Mray meio	Maladies	Verse	Pb_Q_sol	Germ_pied	Tassement	Réc_préc	Froid_meio	Ombrages	Souf_gel	Gel_lev	D_anim
CHD 22	A1ab			A1ab		A1b				A1ab															A4
CHD 23							Bb	Ba		Bb			Bab			A1a						A4		
EMH 22	A1ab					Bab	Bb			C					A1b			A4						
EMH 23		A3b			A1ab	A1ab				C	C													
ERZ 23							Bab			Bab	Bb													
FAT 22	A1ab			A1b			A1ab			Bb														
FAT 23	A1ab				A2ab				A2b	C														
FLM 22				A1ab	C	C				A1ab		A1b												
FLM 23							A1ab			Bab	Bab													
JUC 22	A1ab			A1ab	A1b		A1b			A1ab						A1ab							A4	
JUC 23	A1ab	A3b					Bb			Bb														
MAV 22 P1				A1b	C			Ba		Ba				Bb										
MAV 22 P2				A1b	C					C				Bb										
MAV 23 P1				A1b	A1ab		A1b	Ba		A1ab														
MAV 23 P2				A1b	A1ab		A1b			A1ab														A4
PAJ 22				A1ab	A1b		A1b			A1ab		A1b								A4				
PAJ 23					A1b		Bb	Ba		Bab			Bab			A1a								
RAB 22	A1ab			A1b	A1b	A1b	A1b			Bb									A4					
RAB 23	A1ab									C					Bab						A1a			
VIL 22	A1b			A2a			A1b			A1ab														
VIL 23					A1b	A1b	A3b			A1ab			C											
GDN 22 P1					A1ab	A1ab		Ba		C				A1b	A1ab									A4
GDN 22 P2	A1ab				A1ab	A1ab	Ba			C				A1b										A4
GDN 23	A1ab				Bb	Bb	A3b			A1ab	Bb													
INP 22			C							A1b														
INP 23										C					A1b		A4							
MET 22		A3b		A2ab	A1ab	A1ab		Ba	A2b	C					C									
MET 23							Bab			Bb						A1ab								
PUR 22	A1ab			A1b	Ba	Bb		Ba		Bb		Bb												
PUR 23							A1b	Ba		C	Bb	C		A3b										
TRI 22				A2a			A3b			C														
TRI 23		Bb			Bb					Bb	C							A1a						
Verif 22	8	1	1	9	7	7	8	4	0	10	0	3	0	4	2	1	0	1	1	1	0	0	1	3
Verif 23	4	3	0	2	7	3	11	4	0	11	4	0	2	1	2	3	1	1	0	0	1	1	0	1

Table IV.7 – Vérification des facteurs-hypothétiques de chaque essai.
La typologie des vérifications est présentée dans le M&M. Vérif : nombre de cas vérifiés ; lev-epi1 : entre levée et épi-1 cm ; epi1-flo : entre épi 1 cm et floraison ; flo-mat : entre floraison et maturité ; PB_IMP : problème d'implantation, Exe_eau : excès d'eau ; DH : déficit hydrique ; TH : températures hautes ; ADV : Compétition adventice ; Co_compo : compétition entre composantes ; ETO : écart aux températures optimales ; Mazote : manque d'azote ; Mray : manque de rayonnement ; Pb_Q_sol : problème de la qualité du sol ; réc_prec : récolte trop précoce ; Souf_gel : déchaussage du blé à cause de gels répétitifs (terre soufflée) ; D_anim : dégâts animaux.

Pour chaque essai, les facteurs hypothétiques ont été vérifiés en alimentant l'expertise des expériemtateur.rices par les informations structurées dans le rapport. Les résultats des vérifications des facteurs-hypothétiques sont présentés dans le tableau IV.7. Le processus suivi pour vérifier ou infirmer une hypothèse est indiqué par les codes (A1a, A1b...) définis dans la section IV. 2.5. Parmi l'ensemble des 97 hypothèses formulées par les expérimentateur.rices sans apport significatif de l'équipe de recherche (type A), 74 ont été confirmées (soit 4 A1a, 32 A1b et 39 A1ab), 6 ont été infirmées (soit 2 A2a, 2 A2b et 2 A2ab), 7 maintenues malgré l'information du rapport (tous de type A3b) et 10 n'ont pas pu être confirmées ou infirmées sachant les informations du rapport (A4).

43 facteurs-hypothétiques ont émergés au cours de la discussion du rapport (type B), soit 11 Ba, 22 Bb et 10 Bab.

20 fois les expérimentateur.rices n'ont pas adhéré à la suggestion de stress proposée par la valeur des indicateurs (type C).

Les autres cas (cases blanches) n'ont pas été l'objet d'attention durant les diagnostics hybrides.

Ces informations quantitatives donnent une idée de l'apport de la démarche du diagnostic agronomique participatif. Elle permet en grande partie d'objectiver le diagnostic interne des expérimentateur.rices (70 de type A1) et d'identifier d'autres facteurs (43 de type B). Néanmoins dans ce dernier cas, il reste un doute sur le fait que le facteur explicatif n'ait pas été mentionné avant par l'expérimentateur.rice à cause d'une ignorance ou simplement à cause d'un oubli. Cette hybridation des diagnostics permet aussi une critique constructive de chacune des propositions réalisées par chacun des interlocuteurs : elle permet d'infirmer de manière argumentée les propositions des expérimentateur.rices (6 types A2) et de critiquer les indicateurs du milieu proposés (20 type C et 7 de type A3).

Il est possible de reproduire l'analyse précédente sur la nature des informations à la base des conclusions du diagnostic par indicateur de stress. Chaque stress est caractérisé par une proportion de A1, A2, A3, B et C :

— Les stress identifiés principalement par A1 sont les problèmes d'implantation (PB_IMP) et de qualité de sol (Pb_Q_sol). Ces stress semblent plus évident pour les expérimentateur.rices. La méthode "externe" de l'équipe de recherche conforter le diagnostic de l'expérimentateur.rice.

— Les stress initialement proposés puis souvent infirmés (A2) sont le déficit hydrique entre épi 1 cm et floraison (DH epi1-flo) et l'écart aux températures optimales entre épi 1 cm et floraison (ETO). Pour ces deux stress, souvent le méthode "externe" de l'équipe de recherche a permis d'aider l'expérimentateur.rice modifier son diagnostic.

— Les stress souvent maintenus en dépit des suggestions des indicateurs (A3b), sont l'excès d'eau (Ex_eau) et les adventices (ADV). Pour ces deux stress, souvent l'expertise des expérimentateur.rice a permis montrer une insuffisance dans notre méthode d'estimation des indicateur du milieu. Selon nous, l'indicateur d'excès d'eau ne reflétait pas bien l'excès d'eau à cause de la non prise en compte de la

texture du sol en 2022 (MET 2022) [42] et à cause de la spécificité de la topologie (l'essai de MET 22 est en bas d'une colline et l'essai de ERZ 23 a une nappe d'eau à moins de 2 m de profondeur). Cet indicateur a quand même permis d'aider à identifier l'excès d'eau de l'essai de TRI 23. Concernant l'indicateur de nuisibilité adventice, il n'a pas pris en compte le fort désherbage pour GDN 23 et il y a eu un problème dans le protocole de mesure [43] pour TRI 22.

— Les stress qui ont surtout émergé durant le diagnostic hybride sont le manque de rayonnement entre levée et épi 1 cm (M ray lev-épi1) et la compétition entre composantes (Co_compo). La méthode "externe" de l'équipe de recherche a permis d'éviter d'omettre ces stress.

— Le manque d'azote est un stress fréquent identifié dans 21 cas sur 32 mais dont l'indicateur a été le plus remis en question (C) par les expérimentateurs (11/32 des cas, et en particulier le postulat que INN < 0.8 implique un manque d'azote Jeuffroy et Bouchard, 1999). Selon nous, il y a deux raisons principales qui expliqueraient ces contestations :

1. la courbe de dilution de l'azote serait inadaptée aux variétés paysannes. Justes et al. (1994) indiquent que pour le blé, la courbe de dilution critique est valable pour une grande gamme de conditions pédoclimatiques et de variétés, mais les variétés sur lesquelles elle a été établie sont assez différentes de variétés paysannes étudiés : gènes de nanisme d'un côté et variétés à très forte biomasse végétative et avec une demande en azote potentiellement inférieure ;
2. dans des conditions à azote non limitant, les variétés paysannes ont de forts risques de verser ce qui augmente les risques d'un mauvais remplissage du grain. C'est pour cela que les références multifactorielles des expérimentateur.rices peuvent être différentes et le seuil 0.8 peut paraître trop élevé.

— Certaines propositions de facteurs explicatifs n'étaient pas prises en compte par notre modèle conceptuel (récolte trop précoce, déchaussage du blé à cause de gels répétitifs ou dégâts animaux). Ces facteurs n'ont en général pas pu être corroborés par les informations du rapport (type A4).

En moyenne 4.1 stress par essai ont été identifiés (min 1, max 7). Les stress les plus fréquemment identifiés sont le manque d'azote (21/32), la compétition adventice (19/32) et le déficit hydrique entre floraison et maturité (14/32). Cette méthode a permis de différencier certains stress en fonction des années comme le déficit hydrique entre épi 1 cm et floraison (9 en 2022 et 2 en 2023), les hautes températures entre floraison et maturité (7 en 2022 et 3 en 2023) et dans une moindre mesure la compétition vis-à-vis adventices (8 en 2022 et 11 en 2023).

Parmi les six stress les plus fréquemment identifiés dans le réseau d'essai, les performances moyennes des essais stressés diffèrent des performances moyennes des essais non impactés par le stress (Tab IV.8).

On constate que pour tous les stress les essais ayant subi le stress ont en moyenne un nombre de plantes par m^2 (NP_m^2) inférieur aux essais non impactés par le stress

42. La méthode de calcul de l'indicateur a changé en 2023 pour éviter ce biais.
43. La note de nuisance avait été oubliée et a été réalisée à partir de photo des microparcelles.

	PB_IMP	DH epi1-flo	DH flo-mat	TH flo-mat	ADV	Mazote
Rdt S	16	14.9	15.7	17.4	14.4	14.5
Rdt nS	21.9	21.9	22.1	20.8	25.7	27.4
PMG S	38.8	38.7	35	36.6	38.5	37.9
PMG nS	39.3	39.3	41.6	40.3	39.9	40.9
NG_m² S	4.07	3.73	4.37	4.7	3.64	3.72
NG_m² nS	5.48	5.51	5.3	5.06	6.43	6.74
NG_E S	28	28.9	28.3	28	25.3	26.3
NG_E nS	25.1	24.9	24.9	25.4	27.2	26
NE_m² S	163.3	134.4	167.1	187	152.9	149.7
NE_m² nS	219.3	227.3	217	203.4	249.7	269.2
NE_P S	1.79	1.45	1.63	1.75	1.42	1.27
NE_P nS	1.28	1.45	1.33	1.31	1.49	1.69
NP_m² S	113	110	122	132	144	140
NP_m² nS	193	191	196	184	189	201
TP S	12.8	12.4	12.7	13.3	12.1	11.7
TP nS	11.7	12	11.8	11.6	12.1	12.7
GMR S	14.2	9.8	16.5	17.5	13	13.2
GMR nS	12.8	15	11.4	11.4	13.8	13.6
GTMR S	3.3	2	3.9	4	3.5	3.6
GTMR nS	3.8	4.4	3.4	3.5	3.8	3.6
R_EP S	0.75	0.73	0.8	0.8	0.81	0.77
R_EP nS	0.85	0.85	0.82	0.82	0.81	0.87
D_INP S	-0.64	-0.43	-0.48	-0.56	-0.45	-0.44
D_INP nS	-0.29	-0.39	-0.36	-0.33	-0.36	-0.35

Table IV.8 – Valeurs moyennes du rendement, des composantes du rendement, de la teneur en protéines et d'autres variables permettant de juger de l'état du peuplement par groupe d'expérimentations établis sur la base de l'identification des six principaux stress identifiés par le diagnostic hybride.
S : essais où le stress a été identifié ; nS : essais où le stress n'a pas été identifié ; NG_m² nombre de grains par m² (divisé par 1000) ; NG_E : nombre de grains par épi ; NE_m² : nombre d'épis productif par m² ; NE_P : nombre d'épis productifs par plantes ; NP_m² : nombre de plantes par m² ; TP : teneur en protéines ; GMR : pourcentage de grains mal remplis ; GTMR grains très mal remplis ; R_EP : ratio épis productifs sur épis totaux ; D_IMP : défaut d'implantation (indicateur) ; PB_IMP : défaut d'implantation (stress), DH : déficit hydrique ; TH : températures hautes ; ADV : Compétition adventice ; Mazote : manque d'azote

et cela d'autant plus que le stress intervient tôt dans le développement. Ceci est cohérent pour le stress problème d'implantation (PB_IMP). Pour les autres stress, cela traduit peut-être le fait que les stress subis sont liés à des conditions globales du sol qui sont précocement défavorables à la culture du blé comme des sols hydromorphes (par exemple CHD 22, JUC 23 ou ERZ 23), des sols séchants (par exemple PUR 22, MAV et FLM 22 et 23), un sol acide (JUC 22). Cela créé quand même un risque de confusion d'effets que nous pensons pouvoir traiter en analysant en détail l'élaboration du rendement en fonction des stress.

Les six principaux stress ont des profils moyens de l'élaboration du rendement différents :

— Le groupe d'essais présentant des problèmes d'implantation (colonne PB_IMP

de la Tab IV.8) 64% des graines n'ont pas germé en moyenne (contre 29% dans les essais sans le stress). Les essais avec problèmes d'implantation ont leurs composantes par m^2 toujours en moyenne inférieures à ceux sans problème d'implantation, le rattrapage s'est opéré durant le tallage et la montaison (avec des NE_P et des NG_E plus forts sur la modalité S), mais pas à remplissage (où sont observés des PMG semblables).

— Le groupe d'essais ayant subi un stress hydrique entre épi 1 cm et floraison rattrape la différence de plantes par m^2 par le nombre de grains par épi sans parvenir à compenser l'écart de rendement. Gate (1995 ; pages 238) indique qu'entre épi 1 cm et floraison le déficit hydrique peut entraîner une régression des talles et des épillets ainsi qu'un avortement des fleurs. Dans notre cas, étant donné la forte différence de plante par m^2, le déficit hydrique aurait surtout empêché le rattrapage par le nombre d'épis à cause de régression de talles. En effet, le ratio d'épis productifs (R_EP) est de 0.73 avec déficit hydrique et de 0.85 sans déficit entre épi 1 cm et floraison.

— Pour le stress hydrique et les températures hautes entre floraison et maturité, les profils composantes sont semblables. Les essais affectés par les stress ont eu en moyenne un tallage supérieur (NE_P), un nombre de grains par épi (NG_E) supérieur et un PMG inférieur que leur référence sans le stress en question. De plus les grains sont visuellement moins bien remplis dans les expérimentation ayant subi le stress (GMR et GTMR). Ces résultats sur le PMG se retrouvent dans Gate (1995 ; pages 239-240 et 216).

— Le groupe d'essais ayant subi une forte compétition des adventices a en moyenne un tallage légèrement inférieur, un nombre de grains par épi légèrement inférieur et un PMG semblable à ceux du groupe sans forte compétition des adventices. Dans son diagnostic, David et al. (2005) ont aussi trouvé que les adventices ont un impact significatif sur le nombre de grains par m^2. Il n'y a pas de différence pour la teneur en protéines alors que Casagrande et al. (2009) avait trouvé un impact positif (bien que faible) de la teneur en protéine par les adventices.

— Malgré des composantes par m^2 toujours inférieures pour le groupe d'essais ayant subi un stress azoté, nous n'observons pas de compensation sur le nombre d'épis fertiles par pied (NE_P) notamment du fait d'une plus faible proportion d'épis productifs (R_EP), sur le nombre de grains par épis (NG_E) ou sur le PMG, ce qui atteste bien d'un stress précoce dont l'impact s'est fait ressentir tout au long du cycle cultural. David et al. (2005) ont aussi trouvé que le manque d'azote avait un fort impact sur le nombre de grains par m^2. C'est le seul stress qui impacte la teneur en protéines négativement, ce qui corrobore les résultats de Casagrande et al. (2009).

Cette analyse des observations faites sur le peuplement en fonction de la présence ou non des principaux stress identifiés sur le réseau d'essais est cohérente avec l'expression de ces stress attendus dans la littérature.

IV. 3.3 Vérifications des hypothèses sur l'adaptation des variétés

IV. 3.3.a Informations variétales issues des diagnostics hybrides.

La présentation des résultats par variété à la fin de chaque diagnostic hybride a permis de discuter de la variabilité des rendements au sein de l'essai et de classer les variétés selon leurs performances productives dans l'essai (cf annexe C. 2).
Les essais ont été conduits dans une diversité de dispositifs (deux dispositif en blocs complets répétés, 5 dispositifs *en ferme satellite* et 25 dispositifs *en ferme régionale*) et une diversité de types de semis (à la volée, à la main en ligne ou au semoir). Une hétérogénéité de l'essai a pu être induite par la présence de zones sensibles à l'excès d'eau (MET 22, TRI 23), de zones moins exposées au soleil (RAB 23) ou de problèmes au semis (FLM 22). Les estimations des écarts-types résiduels pour le rendement sont présentées dans la figure IV.14, ils varient de 5.4 q/ha (INP 22) à 8.3 q/ha (MET 22) [44]. Nous avons également cherché à expliquer les écarts entre les rendements estimés à l'échelle du quadrat par l'équipe de recherche et ceux estimés à l'échelle de la microparcelle par l'expérimentateur.rice. Les écarts étaient dûs principalement à des difficultés de récolte à cause de la verse (EMH 22, GDN 22, RAB 23) ou à des problèmes d'implantation au sein de la microparcelle (RAB 22, JUC 22, FLM 22, FAT 23). Nous avons utilisé uniquement les données à l'échelle du quadrat les analyses du manuscrit.
La présentation des résultats variétaux de chaque essai a permis à l'expérimenta-

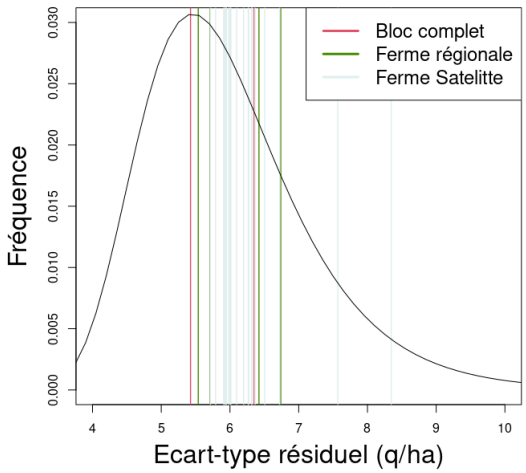


Figure IV.14 – Densité de distribution de la loi commune des écarts-types résiduels du réseau d'essais pour le rendement (modèle M1, $\nu = 6.2$ et $\rho = 216$) et leur valeur estimée.

teur.rice d'énoncer des hypothèses sur le comportement des variétés. Celles-ci ont été élaborées avant l'expérimentation ou ont émergé grâce à l'expérimentation (Tab IV.9). Trois types d'hypothèses ont été formulées, des hypothèses d'adaptation spécifique à un facteur ou une conduite, des hypothèses d'adaptation locale à une ferme ou des

44. Ces valeurs sont plutôt élevés (sans être hors norme) par rapport à la plupart des écarts-types résiduels en station expérimentale.

hypothèses sur le comportement global des variétés. Parmi l'ensemble de ces hypothèses, nous avons cherché à vérifier uniquement celles des variétés communes (présentes dans suffisamment d'essais) ayant trait à l'adaptation spécifiques aux stress les plus fréquemment identifiés dans le réseau d'essais, ainsi que les hypothèses sur la rouille jaune et la verse [45].

45. Qui selon nous sont plus facile à vérifier.

	Hypothèses	Référence	Type	n°
Adaptation spécifique	Alauda est plus sensible à l'échaudage car tardif	CHD 22	A	**H1**
	Alauda fonctionne bien dans les terres très riches	FLM 23	A	**H2**
	Trancherie a été sélectionnée pour tolérer la compétition entre plantes	VIL 22	A	**H3**
	Petit-Béron est adapté aux terres riches (son terroir d'origine)	MET 22 et 23	A	**H4**
	Inconnu-de-Raphaël fait trop d'épis et donc serait sensible au stress hydrique	FLM 23	E	**H5**
	Barbu-de-Mâconnais est sensible à l'échaudage	GDN 22	E	**H6**
	Popayon a un bon potentiel de tallage	MAV Chap. III	A	**H7**
	Titlis préfère les milieux à fort potentiel	É-R	A	**H8**
	Les blés tendres barbus sont plus résistants au stress hydrique	Réunion 07/02/24	A	H9
	Les blés tendres à épis rouges sont plus adaptés aux sols pauvres que les blés tendres à épis blancs	RAB Chap. III	A	H10
	Pétanielle-Noir-de-Nice est adaptée à des semis plus denses que les blés tendres	PUR 23	A	H11
	Pétanielle-Noir-de-Nice préfère être semé tôt	MAV 23	E	H12
	Poulard-d-Australie préfère être semé tôt	MAV 23	E	H13
	Rouge-de-Bordeaux n'a pas besoin d'azote sinon il verse	PAJ 23	A	H14
	Rouge-de-Bordeaux est trop sensible à la carie et au charbon	INP 23	A	H15
	Roux-des-Ardennes est bien pour tenir à l'humidité	INP 23	A	H16
	Roux des Ardennes préfère être semé tôt	MAV 23	E	H17
	Blé-du-Gâtinais est résistant à l'hydromorphie	JUC 23	C	H18
	Barbu du mâconnais est résistant aux excès d'eau en hiver	É-R	A	H19
	Blé-d-Argonne est résistant aux hivers très humides	ERZ 23	A	H20
	Alauda est résistant à la verse	EHM 23	A	**H21**
	Alauda est trop sensible à la rouille jaune	INP 22	E	**H22**
	Poulard-d-Australie est sensible à la rouille	TRI 22	E	**H23**
	Pourpayon est sensible à la rouille jaune	MAV 22	E	**H24**
	Anti-verse est résistant à la verse	RAB Chap. III	A	**H25**
Adaptation locale	Roux-des-Ardennes, il s'en sort bien chez ERZ	ERZ 23	C	H26
	Rouge-de-Bordeaux « marche bien chez moi »	CHD 23	C	H27
	Alauda×Royo et Pop2blé sont adapté aux terres de FLM	FLM 23	C	H28
	Savoyone et Alauda sont de « bonnes variétés »	EMH 23	C	H29
	C35, Vieux-Blé-autrichien, C50, Roux-des-Ardenne sont prometteurs chez MAV	MAV 22	E	H30
	« C242 m'a tapé dans l'œil » et serait bien adapté chez CHD	CHD 23	E	H31
	Grand-Clesle et Savoyon semblent bien se comporter chez FLM « je les garde pour vérifier comment elles se comportent »	FLM 23	E	H32
	Alauda n'est pas du tout adapté chez moi	VIL 23	E	H33
	Alauda fait moins de rendement que Rouge de Bordeaux	PAJ 22	A	H31
	Mottet blanc est adapté chez TRI	TRI	E	H35
	Anti-Verse et Grand-Clesle présentent un bon équilibre entre rendement et verse	GDN	E	H36
Comportement général	Alauda est une variété à gros grain	EMH 22	A	H37
	Saint-Priest est une variété à petit grain	FLM 22	A	H38
	Pétanielle-Noir-de-Nice a des gros grains	PAJ 22	E	H39

Table IV.9 – Les 39 hypothèses recensées ou élaborées durant la thèse sur les variétés paysannes. En **gras** : les hypothèses vérifiées dans ce chapitre ; É-R : équipe de recherche, A : hypothèse antérieure à l'expérimentation ; C : hypothèse antérieure à expérimentation et confirmée par le ou les essais ; E : hypothèse formulée suite à l'expérimentation

IV. 3.3.b Vérification des hypothèses d'adaptation spécifique.

Le tableau IV.10 montre comment nous avons traduit les huit premières hypothèses du tableau IV.9 en choisissant les composantes de rendement affectées et le stress. Par exemple l'hypothèse H4 « Petit-Béron est adapté aux terres riches (son terroir d'origine) » a été traduite en l'effet variétal pour le rendement de Petit-Béron dans les quatre essais où le stress azoté [46] est jugé impactant ($\omega^{s}_{Petit-Beron}$) doit être supérieur à l'effet variétal de Petit-Beron dans les quatre essais où le manque d'azote n'a pas été jugé impactant ($\omega^{ns}_{Petit-Beron}$). Dans ce cas là, la probabilité correspondant a cette hypothèse est de $P_H = 0.85$. Pour la sensibilité au stress hydrique et à l'échaudage (H1, H5 et H6), nous avons choisi de regarder à la fois le PMG et le nombre de grains par m^2 pour être sûr que le résultat ne soit pas uniquement dû à un effet de compensation.

n°	Variété	Performance	Stress	Type	N_Φ	N_Ψ	P_H
H1a	Alauda	PMG	DH et/ou TH flo-mat	S	8	14	0.41
H1b	Alauda	NG_m²	DH et/ou TH flo-mat	S	8	14	0.53
H2	Alauda	Rdt	Mazote	S	11	11	0.39
H3	Trancherie	Rdt	ADV	T	6	4	0.15
H4	Petit-Beron	Rdt	Mazote	S	4	4	0.85
H5a	Inconnu-de-Raphael	PMG	DH flo-mat	S	3	6	0.24
H5b	Inconnu-de-Raphael	NG_m²	DH flo-mat	S	3	5	0.07
H6a	Barbu-du-Maconnais	PMG	DH et/ou TH flo-mat	S	4	5	0.16
H6b	Barbu-du-Maconnais	NG_m²	DH et/ou TH flo-mat	S	4	4	0.79
H7	Popayon	NE_P	Mazote	S	6	2	0.70
H8	Titlis	RDT	Mazote	S	8	4	0.98

Table IV.10 – Traductions et vérification des 8 premières hypothèses sur l'adaptation des variétés à des stress spécifiques.
S : hypothèse de sensibilité au stress, T : hypothèse de tolérance au stress ; NE_P : nombre d'épis productifs par pied ; NG_m² : nombre de grains par m² ; DH : déficit hydrique, TH : températures hautes, flo-mat : entre floraison et maturité, Mazote : manque d'azote, ADV : adventices, N_Φ : nombre d'essais où le stress est identifié et la variété présente ; N_Ψ : nombre d'essais où le stress n'a pas été identifié et la variété est présente ; P_H estimation de probabilité que l'hypothèse soit vraie selon notre méthode.

Trois hypothèses formulées (H1a, H1b, H2) ont une probabilité proche de 0.5, ces hypothèses ne sont ni confirmées ni infirmées. Les hypothèses H3, H5a, H5b et H6a ont des probabilités P_H inférieures à 0.25, ce sont les hypothèses inverses qui semblent être suggérées selon notre méthode (tolérance au lieu de sensibilité et vice-versa). C'est-à-dire que Trancherie serait par exemple plus sensible que la moyenne des autres variétés à la compétition adventice et Inconnu-de-Raphaël serait tolérant au stress hydrique entre floraison et maturité (sur la base des observations de PMG et de nombre de grains par m^2) et Barbu-du-Maconnais serait tolérant à l'échaudage [47] sur la base des observations le PMG. Néanmoins Barbu-du-Maconnais serait sensible à l'échaudage sur la base des observations le nombre de grains par m^2 ($P_H = 0.79$),

46. L'effet variétal est la performance relative aux autres variétés de l'essai, cf Matériels & Méthode.
47. Que nous traduisons en DH et/ou TH flo-mat.

la tolérance sur le nombre d'épis serait juste un phénomène de compensation.

n°	Indicateurs	Variété	Type	N	n	Fréq
H21	Verse	Alauda	T	7	1	0.14
H22	Rouille jaune	Alauda	S	7	7	1
H23	Rouille jaune	Poulard-d-Australie	S	3	0	0
H24	Rouille jaune	Pourpayon	S	3	3	1
H25	Verse	Anti-Verse	T	4	1	0.25

Table IV.11 – Traduction et vérification des hypothèses sur la tolérance à verse et aux maladies.
S : hypothèse de sensibilité au stress, T : hypothèse de tolérance au stress ; N : nombre d'essais où l'indicateur est non nul et la variété présente ; n : nombre de fois où l'indicateur de la variété est supérieur à celui de la variété témoin ; Fréq : est le ratio n/N.

Par ailleurs, les hypothèses H4, H7 et H8 semblent être confirmés.
Notre méthode pour vérifier les hypothèses d'adaptation des variétés à des stress spécifiques a plusieurs biais potentiels. Tout d'abord, la traduction des hypothèses est souvent délicate car il peut y avoir des erreurs d'interprétation (par exemple H2 stipule qu'Alauda fonctionne dans les terres riches mais que signifie terres riches pour FLM) [48] ou des erreurs d'approximation. Toujours sur le même exemple, « fonctionne bien dans les terres riches » a été traduit en « a un meilleur classement des rendements dans des essais avec plus d'azote », ce qui est réducteur par rapport l'ensemble des variables réponses et des facteurs explicatifs pouvant correspondre à l'hypothèse H2. Les stress ont été identifiés par une méthode qui vise à éviter les corrélations fortuites pour se concentrer sur les causes de l'élaboration du rendement. Néanmoins, notre manière d'estimer l'adaptation spécifique des variétés est inductive [49] et peut donc être fortement influencée par des biais d'échantillonnage ; car d'autres stress peuvent influencer la performance en question. Par exemple, la vérification de l'hypothèse H7 « Popayon a un bon potentiel de tallage » –qui a été traduit en Popayon doit mieux taller que les autre variétés dans les essais sans stress azote– repose sur uniquement 2 essais non-stressés pour l'azote (RAB 22 et MET 22, Tab IV.10), RAB 22 était propice au tallage (car peu de plante par m^2) mais pas MET (semis à la volée trop dense) ; notre méthode peut alors sous-estimer la capacité de Popayon à bien taller lorsqu'il n'y a pas de stress azoté. Pour l'instant, nous n'avons pas vérifié au cas par cas dans quelle mesure les autres groupes d'essais stressés et non-stressés sont comparables. Ceci pourrait être réalisé en relevant les essais ayant des stress similaires (ou les essais jugés trop différents).

Le tableau IV.11 montre la traduction des hypothèses sur l'adaptation à la verse et à la rouille jaune ainsi que leur vérification. Toutes les hypothèses sont validées sauf l'hypothèse H23 sur la sensibilité de Poulard-d-Australie à la rouille jaune où aucun cas de rouille jaune notée était supérieur à la moyenne de l'essai.

48. C'est un des objets de recherche des anthropologues de comprendre les représentations de certains groupes sociaux.
49. Ici c'est une généralisation par calcul statistique.

Il est plus facile de valider des hypothèses directement sur les indicateurs explicatifs (ici les notes de verse et la rouille jaune) même si ces deux stress ont peu impacté l'élaboration du rendement mais sont directement observable au champ. Ce qui n'est pas le cas sur le rendement et les composantes de rendement où le lien entre le facteur et la performance est moins évident. De plus ces caractères sont davantage héritables (Afzal et al., 2015). Ces deux raisons expliqueraient pourquoi les hypothèses d'adaptation à la verse et aux maladies ont été davantage validées que celles sur la sensibilité des composantes du rendement des variétés.

IV. 4 Conclusion du chapitre IV

Dans l'introduction nous avons posé les hypothèses que le diagnostic agronomique participatif permettrait d'interroger, de compléter, de renforcer ou de faire évoluer le diagnostique interne de l'expérimentateur.ice, qu'il faciliterait par la suite les échanges entre pairs sans perdre la spécificité des situations de production.

Par l'analyse des diagnostics hybrides, nous avons vu que parmi les 97 des hypothèses formulées par les expérimentateur.rices, 74 avaient été confirmées et six infirmées. Notre méthode a également permis de valider 43 hypothèses non formulées initialement. Les expérimentateur.rices se sont aussi interrogé.es sur certains informations issues de notre méthode.
La première hypothèse est donc validée, notre apport a bien eu un impact sur leur diagnostic, tout en sachant que la réciproque est vraie aussi. Sept hypothèses des expérimentateur.rices ont été maintenues en dépit de l'information du rapport et dans 20 cas, ils et elles n'ont pas adhéré à la suggestion de stress proposée par le rapport. Cette critique constructive permet de voir les limites de l'approche de l'équipe de recherche et les points à améliorer.

Étant donné que le diagnostic hybride est réalisé à l'échelle d'une expérimentation, par construction notre approche ne perd pas la spécificité des situations de production. De plus la conclusion du diagnostic est laissée sous la responsabilité de l'expérimentateur.rice. Cette spécificité peut être illustrée par le fait que l'indicateur de stress azoté suggère que toutes les situations de production sont stressées alors que la conclusion des diagnostics hybrides conclue qu'un tiers des situations n'est pas stressé. Elle peut aussi être illustrée par le fait que certains stress proposés par des expérimentateurs sont spécifiques de leurs situations de production, comme le déchaussement par soufflage dû au gel. Bien qu'il aurait été possible d'aller plus loin, 'hypothèse de prise en compte de la spécifié de l'essai est donc aussi validée.

Si les diagnostics sont réalisés par essai et fortement façonnés par les connaissances des expérimentateurs locaux, on peut légitimement se demander si les résultats du diagnostic sont comparables et si donc s'ils permettent bien une analyse collective. Nous avons montré par la comparaison du rendement et de ses composantes entre groupes d'environnements se différenciant par la présence ou l'absence de six stress majeurs sur le réseau que les résultats étaient très cohérents (Tab IV.8). Ceci conduit à penser que la classification des environnements sur la base des résultats des diagnostics

agronomiques individuels sur quelques stress majeurs est pertinente. Ces diagnostics individuels semblent donc fournir des résultats qui sont comparables et donc valorisables pour une analyse à l'échelle du réseau d'essais.

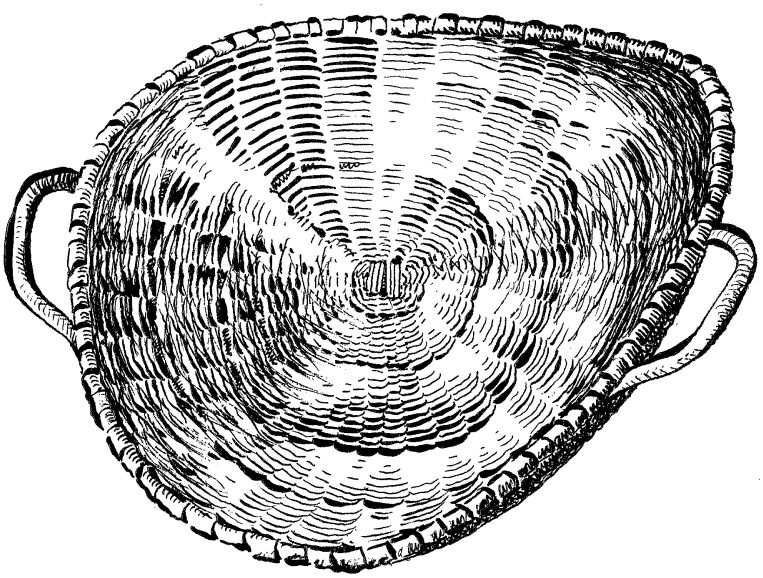
Ce chapitre a également proposé une méthode originale pour valider les hypothèses formulées durant cette thèse sur l'adaptation spécifique de certaines variétés à certains stress. Bien qu'ayant montré des résultats intéressants, nous pensons que la méthode mériterait d'être améliorée pour être plus robuste, par exemple en utilisant certains des procédés statistiques développés dans le chapitre V.

Nous avons identifié trois principales difficultés à mettre en place cette méthode

- le temps nécessaire à l'interaction entre expérimentateur.rice et équipe de recherche, qu'il soit avant, durant ou après l'expérimentation ;
- la complexité du protocole d'expérimentation qui ne facilite pas la remobilisation de cette méthode par des organismes de développement agricole ou les technicien.nes et facilitateur.ices des collectifs locaux ;
- la nécessité d'analyser rapidement une grande quantité de données hétérogènes pour la création des rapports.

En plus de son intérêt pour répondre à des questions agronomiques, cette méthode répond à des questions de démocratisation des sciences en créant une "*communauté d'analyse de la situation*" qui confronte de manière constructive leurs arguments (Hubert et al., 1993). Les connaissances issues du diagnostic hybride sont directement utilisables par les expérimentateur.rice et peuvent être remobilisées sur leur ferme.
A l'époque où les efforts d'innovation pour l'expérimentation sont surtout investis pour les approches "omics" (phénotypage haut débit, génomique), robotique, numérique et les biotechnologies [50], ce chapitre montre qu'il est également pertinent de faire des efforts vers des démarches d'agronomie clinique qui ont pour objet les situations agricoles de la ferme, prennent en compte la complexité des systèmes et mettent en avant l'interprétation des paysan.nes et animateur.rices d'association.

50. Dont les recherches en milieu contrôlé pourraient arriver dans les champs si les variétés issues de NBT deviennent un jour légales en France.



La notion même de milieu est trompeuse : il n'y a de milieu que pour un être vivant qui arrive à intégrer en unité d'action les mondes perceptifs"

Gilbert Simondon

Chapitre V

Modélisation statistique du comportement de variétés paysannes dans un réseau d'essais à la ferme

V. 1 Introduction

Un des objectifs d'un programme de sélection participative et décentralisée est de développer des variétés adaptées localement au contexte spécifique d'une ferme. Cependant il est difficile de démontrer l'adaptation locale de variétés car il faut mettre en place un dispositif multi-site où chaque variété est évaluée localement dans son site d'origine et dans les autres sites. Ce qui est très lourd et intéresse peu les acteurs et actrices impliqué.es. Ce qui serait plus intéressant serait de produire des connaissances sur le comportement de ces variétés qu'il soit général sur l'ensemble d'un réseau de fermes ou spécifique à des essais partageant certaines conditions de cultures (étude des interactions $G\times E$ [1]). Cela permettrait de décrire certaines spécificités de ces variétés vis-à-vis des conditions environnementales. Pour comprendre la réponse différentielle des variétés aux environnements de culture, qui est à la base des interactions $G\times E$, différentes approches statistiques ont été proposées :

— La régression de Finlay et Wilkinson (1963) qui explique une part de l'interaction $G\times E$ par la sensibilité des variétés au potentiel moyen de chaque environnement. C'est le modèle le plus utilisé pour expliquer l'interaction $G\times E$ (Van Eeuwijk et al., 2016).

— Les modèles expliquant l'interaction $G\times E$ par une régression linéaire en fonction de facteurs explicatifs. On peut citer en particulier la régression factorielle (Denis, 1980) où les facteurs sont des indicateurs du milieu (ou parfois du peuplement), et les régressions factorielles où les facteurs sont des éléments génétiques (allèles d'intérêt, QTL... Van Eeuwijk et al., 2016).

— Les modèles expliquant l'interaction $G\times E$ à l'aide d'une transformation ma-

1. Interaction Génotype-Environnement.

tricielle [2] (analyses en composantes principales) de termes de l'équation $Y_{ij} = G_i + E_j + (G{\times}E)_{ij}$. Les plus connus sont le "modèle à effets principaux additifs et effets d'interaction multiplicatifs" [3] (Gauch et Zobel, 1997) où les termes transformés sont $(G{\times}E)_{ij}$ et le "modèle des effets principaux du génotype et des effets d'interaction entre le génotype et l'environnement" [4] (Gabriel, 1971) où les termes transformés sont $G_i + (G{\times}E)_{ij}$.

Appliquer ces méthodes dans le cadre d'expérimentations à la ferme et d'un programme d'une recherche participative présente différents obstacles :

1. les expérimentateur.rices [5] appliqueront des pratiques culturales spécifiques qui ont du sens dans leur contexte : il sera plus difficile d'inférer ou de comprendre les tendances globales sans une description des conditions de culture auxquelles les essais ont été confrontés.
2. les expérimentateur.rices souhaiteront évaluer des variétés dans leur essai des variétés qui les intéressent : le réseau d'essais sera fortement incomplet, car peu de variétés seront répétés entre fermes.
3. les expérimentateur.rices seront contraints à mettre en place un dispositif expérimental simple avec peu de répétitions et peu ou pas de contrôle local [6], ce qui peut conduire à plus de données extrêmes au sein de ce type d'essai et un risque de biais dans les estimations globales.

Pour toutes ces raisons, il est nécessaire d'adapter les modèles statistiques classiquement utilisés en évaluation variétale aux dispositifs des programmes de recherche participative à la ferme.

Dans ce chapitre, nous avons testé des modèles de Finlay-Wilkinson (FW) et des modèles de régression factorielle avec un seul facteur explicatif (indicateur du milieu ou du peuplement). Le modèle de FW est parcimonieux [7] et robuste pour estimer les effets principaux [8] et la stabilité des performances avec des données incomplètes (Finlay et Wilkinson, 1963 ; Pereira et al., 2007). Le modèle de régression factorielle a l'avantage de pouvoir expliquer une part de l'effet E_j et une part de l'interaction $(G{\times}E)_{ij}$ avec un ou plusieurs facteur(s) explicite(s). Les deux méthodes offrent une caractérisation du comportement des variétés. Le modèle de FW renseigne sur la capacité des variétés à valoriser des milieux à plus fort ou plus faible potentiel et la régression factorielle renseigne sur la réponse des variétés vis-à-vis du facteur étudié.

2. La transformation matricielle permet d'ordonner la nouvelle matrice selon les composantes "résumant" le mieux l'information (avec l'aide de la matrice de variance-covariance).
3. En anglais *the additive main effects and multiplicative interaction effects model* (AMMI).
4. En anglais *the genotype main effects and genotype environment interaction effects model* (GGE).
5. Les expériemtateur.rices sont les agriculteur.rices ou des personnes dédiées à l'expérimentation en milieu paysan par une structure pour le développement agricole.
6. Les contrôles locaux sont par exemple la prise en compte de blocs dans le dispositif expérimental.
7. Un modèle est dit parcimonieux s'il a peu de paramètres à estimer.
8. Les effet principaux sont les effets variétaux G_i et les effets environnementaux E_j

L'utilisation de modèles hiérarchiques [9] est le principal moyen d'obtenir des estimations robustes alors que l'échantillonnage des données est biaisé [10] et ainsi obtenir une variation des effets réduite [11]. C'est ce qui a été fait par exemple dans certains modèles de Finlay-Wilkinson fréquentistes où les effets E_j sont supposés hiérarchisés selon une loi normale (Nabugoomu et al., 1999 ; Ng et Williams, 2001 ; Patterson et Silvey, 1980). Des modèles de FW dans lesquels les effets principaux du génotype, les effets principaux de l'environnement et les sensibilités du génotype sont tous hiérarchisés ont été plus récemment mis au point dans une approche bayésienne (Lian et Campos, 2016). Ces modèles peuvent être utilisés avec des données fortement incomplètes (Frank et al., 2019). Concernant les modèles de régression factorielle (Buntaran et al., 2021 ; Theobald et al., 2002) ont montré l'intérêt de hiérarchiser les coefficients de régression avec une loi normale pour obtenir des prédictions plus robustes des performances des variétés dans les réseaux d'essais, les premiers dans un cadre fréquentiste et les seconds dans un cadre bayésien.
Dans les réseaux d'essais, la gestion des données extrêmes est un enjeu important. Elles peuvent provenir i) d'erreurs depuis la notation jusqu'à la mise en forme des données (erreurs de mesure, erreurs d'étiquetage...), ii) d'hétérogénéité au sein de l'essai (en termes de pression adventice ou de fertilité du sol par exemple) ou iii) de l'hétérogénéité des réponses des variétés testées au sein des essais et entre les essais (interaction $G\times E$). Dans les essais testant des variétés paysannes, on peut s'attendre à davantage de contributions des extrêmes de type ii) et iii). Ces données extrêmes peuvent biaiser les estimations réalisées avec une distribution normale. Une solution possible est de retirer des observations mais, sans connaissance agronomique des essais, il est toujours difficile de savoir quelles observations il est légitime d'enlever. De plus si beaucoup d'observations sont à enlever alors la variabilité totale sera sous-estimée et la précision des estimations sera sur-estimée. Une autre approche est d'utiliser des méthodes statistiques robustes vis-à-vis des observations extrêmes (Hampel et al., 2011 ; Huber et Ronchetti, 1981). De nombreuses méthodes ont été développées pour cela, en particulier en supposant que les résidus du modèle suivent une loi de Student. Cette loi est plus robuste vis-à-vis des observations extrêmes que la loi normale, car elle possède de plus longues queues de distribution (Carlin et Polson, 1991 ; Choy et Chan, 2008 ; Lange et al., 1989 ; Rosa et al., 2003). Cette méthode a déjà été utilisée dans un cadre bayésien pour gérer les observations extrêmes à l'échelle d'un essai (Besag et Higdon, 1999 ; Cao et al., 2022 ; Gianola et al., 2018). A notre connaissance, cette méthode n'a jamais été utilisée à l'échelle d'un réseau d'essais.
Ce chapitre a deux principaux objectifs :

1. Déterminer les meilleurs modèles statistiques de Finlay Wilkinson pour caractériser les variétés et leur réponse aux conditions environnementales dans le cadre d'essais paysans ;

9. Le principe de la hiérarchisation de paramètre du modèle a été présenté par un exemple simple en introduction, Fig I.11.

10. L'échantillonnage des données est biaisé si les variétés ne sont pas réparties aléatoirement dans les essais, si le dispositif est incomplet, si toutes les variétés ne sont pas répétées entre blocs...

11. En anglais : *shrunked*. Théoriquement, il est aussi possible de choisir une loi statistique qui au lieu de réduire les effets comme la loi normale, les accroissent. Je ne suis pas sûr que cela ait déjà été mis en œuvre.

2. Déterminer les meilleurs modèles statistiques de régression factorielle pour caractériser les variétés et leur réponse aux conditions environnementales dans le cadre d'essais paysans ;

Les travaux sur le modèle de régression de FW ont été réalisés sur la base de données historiques acquises sur 206 variétés dans le cadre du programme de sélection participative entre 2008 et 2019. Ce travail a donné lieu à un article (Turbet Delof et al., 2024) soumis dans *PCI Mathematical & Computational Biology*. Cet article est présenté en annexe D. 1 et sera résumé en partie V. 2.
Les travaux sur le modèle de régression factorielle nécessitant une description des environnements de culture, ont été réalisés sur la base des données acquises dans le cadre de l'expérimentation de cette thèse, soit 20 variétés expérimentées en 2022 et 2023. Cette seconde analyse sera présentée en détail dans les parties V. 3 et V. 4.

V. 2 Caractériser de la performance et la stabilité des variétés sur un réseau d'essais à la ferme par un modèle de régression de FW

Dans cet article (présenté intégralement dans l'annexe D. 1) nous comparons, via une approche bayésienne, différents modèles statistiques sur des données acquises durant une période de 11 ans au sein du programme de sélection participative du blé tendre France (décrit en introduction en sous-partie I. 2.4). Quatre traits morpho-agronomiques ont été étudiés (la hauteur des plantes, le poids de l'épi, le poids de 1000 grains et la teneur en protéines), correspondant à plus de 1000 combinaisons $G \times E$ provenant de 189 essais à la ferme. Cet ensemble de données était fortement incomplet, plus de 90% des combinaisons $G \times E$ étant manquantes. Nous avons comparé divers modèles bayésiens de Finlay-Wilkinson qui décomposent les observations de la façon suivante :

$$Y_{ij} = \mu + G_i + E_j + S_i E_j + \varepsilon_{ij}$$

où Y_{ij} est la valeur phénotypique d'un trait donné mesuré sur la variété i dans l'essai j, μ est la moyenne générale du trait sur le réseau d'essais, G_i est l'effet la variété i, E_j est l'effet de l'essai j, S_i est la sensibilité de la variété i au potentiel des environnements pour le trait considéré et ε_{ij} est le terme résiduel.
Notre comparaison a permis de constater que le fait de placer des distributions hiérarchiques sur les paramètres du modèle (G_i, E_j et S_i) et de modéliser les résidus à l'aide d'une distribution de Student améliorait conjointement les estimations des effets principaux et des interactions. Ce cadre statistique nous a permis d'estimer deux indicateurs de la stabilité des génotypes (un indicateur statique, la variance du génotype à travers le réseau d'essais et un indicateur dynamique l'écovalance de Wricke, 1962) malgré le déséquilibre élevé des données. Nous avons constaté des différences sur la valeur moyenne des traits et leur stabilité entre les types de génotypes étudiés (variétés commerciales, variétés paysannes issues de mélange, variétés paysannes issue de croisement, variété de pays et variété ancienne). Des tendances moyennes ont été constatées pour la hauteur (celles-ci correspondent à ce qui est attendu selon la littérature) et dans une moindre mesure pour le taux de protéines (les variétés commerciales

ayant en moyenne des valeurs de trait plus faible). Les variétés de pays et les variétés paysannes issues de mélange ont tendance à être plus stables sur le PMG, alors que sur la hauteur les variétés commerciales et les variétés paysannes issues de mélange ont tendance à être plus stables. Ces méthodes développées pourraient être appliquées à une diversité de jeux de données similaires présentant un fort déséquilibre et une variété de dispositifs expérimentaux tels que les données issues d'expérimentations à la ferme, les données acquises dans le cadre de projets de science participative ou par les gestionnaires de centres de ressources génétiques.

V. 3 Matériel et méthodes de l'analyse des données expérimentales

V. 3.1 Les données

Les 227 données étudiées sont issues de 20 variétés, 26 essais, 14 fermes et deux années de culture. Les données sont incomplètes à 57% [12]. Les dispositifs et protocoles expérimentaux ont été présentés dans les chapitres II et IV. Les essais de MET 23, GDN 23, JUC 22, JUC 23, RAB 22 et PUR 22 ont été jugés comme ayant trop d'hétérogénéité entre les microparcelles pour analyser les interactions $G \times E$ sur le rendement [13]. Les essais avaient des coefficients de variation des résidus [14] pour le rendement très élevé (entre 58% et 122% alors que la médiane est à 32%). Pour PUR 22 le coefficient de variation résiduel était non calculable car il n'y avait pas de répétitions au sein l'essai. Les sources d'hétérogénéité ont été présentées en annexe C. 3 et dans le chapitre IV. Ces essais ont donc été retirés du jeu de données.
Seules les 20 variétés communes sont étudiées, car les variétés supplémentaires n'ont pas été pas assez répétées pour estimer des tendances sur le réseau d'essais (il faut que la variété soit présente dans au moins cinq essais Frank et al., 2019). Les facteurs environnementaux correspondent aux indicateurs du milieu moyen par essai (issus du chapitre IV).

Nous avons procédé en deux temps. Dans un premier temps nous avons comparé différents modèles bayésiens. Pour ce faire, nous avons comparé les modèles sur leur capacité prédictive et sur la précision des effets estimés pour quatre traits (le rendement, le PMG, la teneur en protéine et la hauteur de la plante) à partir de 2 facteurs explicatifs : l'indice de nutrition azotée (INN) et l'indicateur de nuisibilité des adventices (ADV). Les stress associés à ces facteurs ont été identifiés dans le chapitre IV comme les plus fréquents dans le réseau d'essais.
Dans un second temps nous avons utilisé le meilleur modèle identifié pour caractériser la réponse des variétés à différents facteurs environnementaux. Nous avons considéré

12. 57% des données sont manquantes par rapport à un réseau d'essais où dans chaque essai les 20 variétés seraient répétée.

13. Si le trait principal de l'étude était le tallage ou la hauteur des plantes, ces essais auraient pu être maintenus.

14. C'est le rapport entre les écarts-types résiduels de l'essai et la moyenne générale de l'essai.

10 traits – le rendement, les six composantes du rendement, la biomasse paille, la teneur en protéines et la hauteur de la plante – et 13 facteurs : les 9 indicateurs agroclimatiques, l'indicateur de verse, l'indicateur de maladies foliaires au printemps, l'indice de nutrition azoté à floraison et l'indicateur de nuisibilité des adventices au printemps. Nous avons également utilisé le meilleur modèle de FW identifié dans (Turbet Delof et al., 2024).

V. 3.2 Les modèles

Nous pouvons exprimer la valeur phénotypique Y_{ij} d'un trait donné Y, observée sur la variété i dans l'essai j de la façon suivante :

$$Y_{ij} = \mu_{ij} + \varepsilon_{ij}$$

où μ_{ij} est le terme d'espérance, et ε_{ij} est le terme résiduel.
Dans l'article méthodologique sur le modèle de FW (Turbet Delof et al., 2024), nous avons montré qu'en hiérarchisant les termes principaux et en utilisant une loi de Student pour gérer les résidus, cela permettait d'améliorer la prédiction d'un modèle de Finlay-Wilkison. L'objectif de cette étude est de vérifier que ces résultats sont aussi valables pour des modèles de régression factorielles. Nous avons comparé ces modèles aux meilleurs modèles additifs et de Finlay-Wilkison identifiés dans Turbet Delof et al. (2024). Nous avons comparé huit modèles (nommés ADHs, FWHs, RFs_A, RFHn_A, RFHs_A, RFs_I, RFHn_I, RFHs_I) selon leur qualité prédictive et la précision des estimations. Ils diffèrent sur la façon dont sont modélisés les termes d'espérance, sur la façon d'estimer les résidus, sur le fait de hiérarchiser ou non les termes d'espérance et le cas échéant sur le facteur testé (Tab V.1).

	Termes d'espérance	Termes résiduels	Hiérarchisation	facteur
ADHs	Additive	Student	OUI	
FWHs	Finlay Wilkinson	Student	OUI	
RFs_A	Régression Factorielle	Student	NON	ADV
RFHn_A	Régression Factorielle	Normal	OUI	ADV
RFHs_A	Régression Factorielle	Student	OUI	ADV
RFs_I	Régression Factorielle	Student	NON	INN
RFHn_I	Régression Factorielle	Normal	OUI	INN
RFHs_I	Régression Factorielle	Student	OUI	INN

Table V.1 – Les huit modèles comparés.
OUI (respectivement NON) signifie que l'ensemble (respectivement aucun) des effets principaux est hiérarchisé.

V. 3.2.a Modélisation des termes d'espérance

Dans le modèle ADHs, le terme d'espérance est modélisé comme additif :

$$\mu_{ij} = G_i + E_j$$

où G_i est la moyenne de la variété i [15], c'est-à-dire la somme de la moyenne générale du trait et de l'effet variété [16]. E_j est l'effet principal de l'essai j.
Le modèle FWHs modélise une part de l'interaction $G\times E$ en utilisant la régression de Finlay-Wilkinson (Finlay et Wilkinson, 1963). Dans ce modèle, le terme d'espérance se décompose comme :

$$\mu_{ij} = G_i + E_j + S_i E_j,$$

où S_i est la sensibilité de la variété i au potentiel de l'environnement (coefficient de régression linéaire , Perkins et Jinks, 1968) [17]. La sensibilité est centrée sur 0, ainsi une variété ayant $S_i > 0$ (resp. $S_i < 0$) a des performances plus fortes qu'attendues par le modèle additif dans les environnements à fort potentiel (resp. à faible potentiel). Le coefficient de Finlay-Wilkinson (S_i) est considéré comme un indicateur statique et dynamique de la stabilité (Becker et Leon, 1988 ; Lin et al., 1986).
Les modèles RFs, RFHn, RFHs, modélisent une part de l'effet essai et une part de l'interaction $G\times E$ par l'effet d'un facteur environnemental et la sensibilité variétale à ce facteur (Denis, 1980). Dans ces modèles, le terme d'espérance s'exprime de la façon suivante [18] :

$$\mu_{ij} = G_i + E_j + C_i X_j,$$

où C_i est le coefficient de régression de la variété i sur le facteur X. Les facteurs X_j ont été centrés et réduits. Nous avons considéré X comme un indicateur de stress : si X est fort cela indique un manque de ressource (nous avons multiplié par -1 les indicateurs de ressource : l'INN ou les indicateurs d'offre en rayonnement). Le coefficient de régression a pour moyenne μ_C la sensibilité moyenne des variétés au facteur X.

V. 3.2.b Modélisation des termes résiduels

Dans le modèle RFn la distribution des résidus est supposée être normale :

$$\varepsilon_{ij} \sim \mathcal{N}\left(0, \sigma_\varepsilon^2\right),$$

où $\mathcal{N}\left(0, \sigma_\varepsilon^2\right)$ est la loi normale d'espérance 0 et de variance σ_ε^2. Cependant, pour limiter l'influence des valeurs extrêmes sur les résultats de l'analyse (Fig V.1), nous avons développé les modèles ADHs, FWHs, RFs et RFHs basés sur la loi de Student :

$$\varepsilon_{ij} \sim t\left(0, \sigma_\varepsilon^2, \nu\right),$$

où $t\left(0, \sigma_\varepsilon^2, \nu\right)$ est la distribution de Student avec pour paramètre de dispersion $\sigma_\varepsilon^2 > 0$ et $\nu > 2$ le nombre de degrés de liberté [19]. Comme dans Turbet Delof et al. (2024), nous avons supposé que $\nu > 2$ pour s'assurer que l'espérance et la variance de ε_{ij} soient bien définis. La variance de ε_{ij} est égale à $\nu\sigma_\varepsilon^2/(\nu-2)$ [20]. La loi normale

15. Ceci est vrai pour l'ensemble des modèles du chapitre.
16. L'effet variété est centré sur 0.
17. Finlay et Wilkinson (1963) ont définis leur coefficient comme $B_i = 1 + S_i$.
18. Les estimations de G_i et E_j de RF ne correspondent pas à celles du modèle de FW et du modèle additif.
19. Ce nombre est considéré non pas comme un entier mais comme un réel.
20. Ceci est une propriété de la loi de Student.

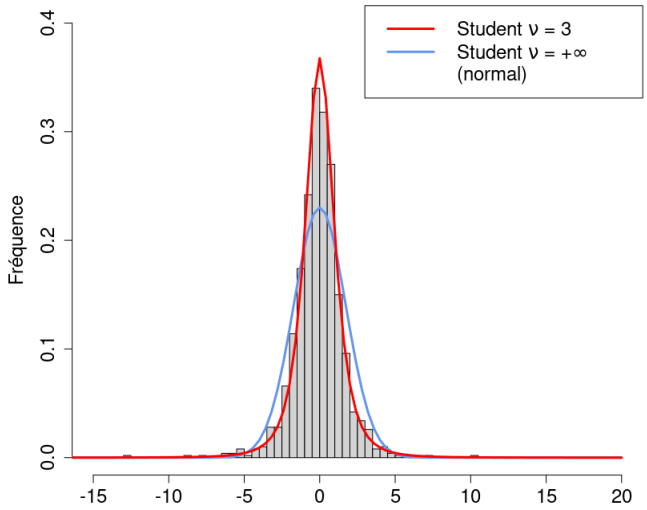


Figure V.1 – Ajustement des données (représentées en gris par l'histogramme) selon la loi de Student avec un nombre de degrés de liberté (ν) égale à 3 et égale à $+\infty$ (loi normale). Les données ont été générées à partir d'une loi de Student de paramètre d'espérance 0, de paramètre de dispersion 1 et de degrés de liberté 3. Les deux distributions ajustées ont une moyenne égale à 0 et une variance égale à 9. Ce graphe montre la sensibilité de la loi normale aux données extrêmes. Choy et Chan (2008) et Rodriguez-Rodriguez et Miramontes (2022) montrent des ajustements similaires avec des données de hauteurs de plante et des données économiques respectivement.

peut être considérée comme une loi de Student avec ν tendant vers $+\infty$. Pour le modèle additif, le terme résiduel contient l'interaction $G\times E$ ainsi que les erreurs (erreurs expérimentales et hétérogénéité de l'essai), alors que pour le modèle de Finlay-Wilkinson et la régression factorielle, le terme résiduel contient la part de $G\times E$ non-expliquée par S_i ou C_i et les erreurs.

V. 3.2.c Choix des priors et hypothèses de hiérarchisation

L'analyse statistique a été menée dans un cadre Bayésien, des distributions a priori ont donc été placées sur les paramètres inconnus. Nous avons placé des priors faiblement informatifs sur σ_ε et ν (Cao et al., 2022 ; Gelman, 2006 ; Juárez et Steel, 2010) :

$$\sigma_\varepsilon \sim \mathcal{N}^+(0, \lambda_\varepsilon^2), \quad \nu \sim \Gamma(2, 0.1),$$

avec $\nu > 2$, et où λ_ε est la valeur fixée[21] de l'écart-type du trait, $\mathcal{N}^+(0, \lambda_\varepsilon^2)$ est la distribution normale restreinte aux valeurs positives ayant pour paramètres 0 et λ_ε^2, et $\Gamma(2, 0.1)$ est la loi gamma avec pour paramètre de forme 2 et pour paramètre de ratio 0.1. Sachant que les données sont fortement incomplètes, nous avons décidé de hiérarchiser certains paramètres. Dans tous les modèles sauf RFs, les paramètres G_i, E_j et S_i ou C_i le cas échéant sont supposés suivre les distributions suivantes :

$$G_i \sim \mathcal{N}\left(\mu_Y, \sigma_G^2\right), \quad S_i \sim \mathcal{N}\left(0, \sigma_S^2\right), \quad C_i \sim \mathcal{N}\left(\mu_C, \sigma_C^2\right), \quad E_j \sim \mathcal{N}\left(0, \sigma_E^2\right),$$

21. Les valeurs choisies sont en Tab V.2.

où μ_Y, μ_C, σ_G, σ_S, σ_C et σ_E sont des paramètres inconnus pour lesquels nous avons défini des priors faiblement informatifs :

$$\mu_Y \sim \mathcal{N}\left(\lambda_\mu, \lambda_\varepsilon^2\right), \quad \mu_C \sim \mathcal{N}\left(0, \lambda_\varepsilon^2\right), \quad \sigma_G \sim \mathcal{N}^+(0, \lambda_\varepsilon^2),$$
$$\sigma_E \sim \mathcal{N}^+(0, \lambda_\varepsilon^2), \quad \sigma_S \sim \mathcal{N}^+(0, 0.75^2), \quad \sigma_C \sim \mathcal{N}^+(0, \lambda_\varepsilon^2),$$

où λ_μ est une valeur fixée [22] de la moyenne du trait Y.
Le modèle RFs n'est pas hiérarchique (c'est le modèle *contrôl*e permettant de tester l'effet de la hiérarchisation des paramètres), nous avons donc directement placé des priors faiblement informatifs sur les paramètres G_i, C_i et E_j :

$$G_i \sim \mathcal{N}\left(\mu_Y, \lambda_\varepsilon^2\right), \quad C_i \sim \mathcal{N}^+(0, \lambda_\varepsilon^2), \quad E_j \sim \mathcal{N}\left(0, \lambda_\varepsilon^2\right).$$

Les graphes acycliques orientés des 5 modèles sont présentés dans les figures V.2 et

Trait	**Moyenne empirique**	**Écart-type empirique**	λ_μ	λ_ε
NP_m²	175	80	200	80
NE_P	1.6	1.0	2	1.1
NE_m²	234	108	200	110
NG_E	26	7.7	30.00	7.7
NG_m²	5.8	2.6	6.0	2.6
PMG	40.1	5.4	40	5.4
Rendement	23.3	11.2	20	11
Biomasse paille	46.6	25	50	25
Teneur en protéines	12.0	1.7	10	1.8
Hauteur de la plante	118.4	18.7	100	19

Table V.2 – Moyenne, écart type et valeurs fixé des paramètres des lois a priori pour les différents traits à l'étude.

V.3.

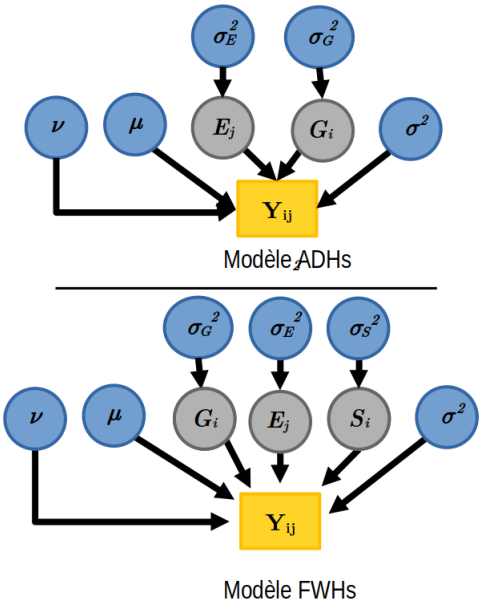
V. 3.3 Implémentation des postériors

L'inférence bayésienne consiste à estimer les paramètres du modèle à partir des données et de la distribution a priori de ces paramètres, il en résulte alors une distribution a prosteriori dite postérior. Cette distribution a été estimée par une méthode de Monte Carlo par chaînes de Marcov (MCMC). Cette méthode génère des chaînes de Markov c'est-à-dire une suite des valeurs des paramètres du modèle dont la distribution converge vers la distribution a posteriori des paramètres (Robert, 2007). La méthode MCMC a été mise en œuvre à l'aide de `R` (Team, 2014) et du paquet `rstan` (TEAM, 2016), qui effectue un échantillonnage de Monte Carlo Hamiltonien (HMC) [23]. Quatre chaînes MCMC ont été exécutées indépendamment pour tester la convergence. Les valeurs initiales de chaque chaîne ont été prises au hasard. Pour chaque chaîne, le *burn-in* [24] a consisté en 200 itérations, puis 5 000 itérations ont été

22. Les valeurs choisies sont en Tab V.2.

23. Cette méthode vise à réduire la corrélation entre les valeurs échantillonnées successives (par rapport d'autres méthodes échantillonnages comme celle de Gibbs) en utilisant une distribution de propositions basée sur la dynamique hamiltonienne (Neal, 2011).

24. Il faut un certain nombre d'itérations avant de converger, ces itérations ne sont pas prises en compte dans les calculs.



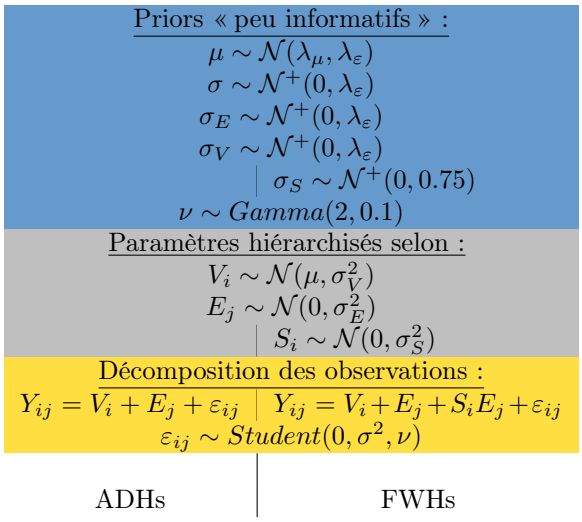
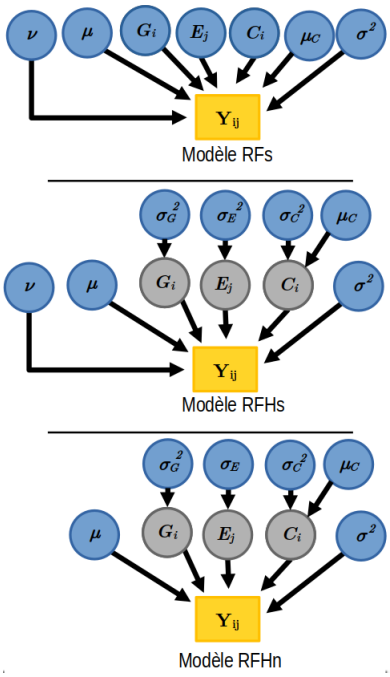


Figure V.2 – Graphes acycliques orientés du modèle additif (ADHs) et de régression de Finlay-Wilkinson (FWHs).



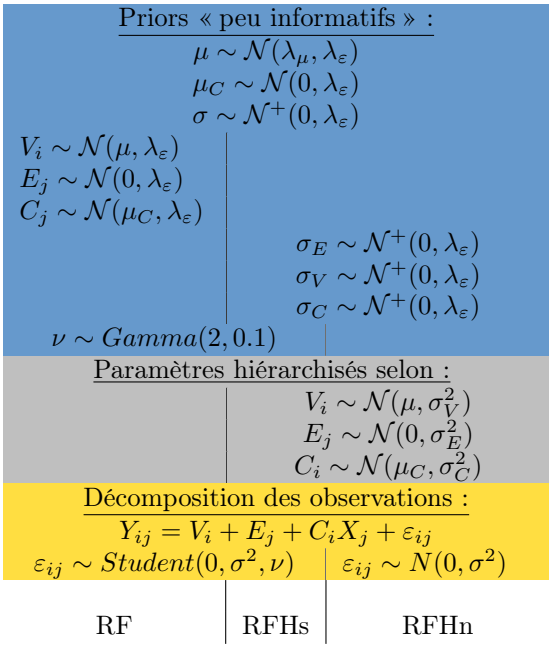


Figure V.3 – Graphes acycliques orientés des modèles de régression factorielle testés.

effectuées pour tous les modèles, à l'exception du modèle RHs où 10 000 itérations ont été nécessaires. Le temps de calcul moyen (pour un caractère donné et un modèle donné) était de 2 minutes et le temps maximum de 6 minutes , avec un ordinateur

intel CORE i7©. Les estimations de la statistique de Gelman-Rubin [25] étaient inférieures à 1.004 et la taille effective [26] de l'échantillon était supérieure à 1395 pour chaque paramètre dans tous les modèles testés.
Un postérieur est la distribution d'un paramètre du modèle, par exemple la distribution de G_i la moyenne de la variété i sur le réseau d'essai. Cette distribution est composée d'un nombre de valeurs égales au nombre d'itérations MCMC après le *burn-in*. Cette distribution est généralement résumée par trois statistiques : sa moyenne μ_{Gi} et ses deux quantiles à 2.5% et 97.5% que l'on nomme intervalle de crédibilité à 95%.

V. 3.4 Comparaison des modèles

Nous avons comparé la capacité prédictive des modèles à l'aide d'une validation croisée de type "leave-one-out". Nous avons estimé la densité prédictive logarithmique attendue à l'aide du package `R LOO` (Vehtari et al., 2017). Ce critère était égal à

$$\text{elpd}_{\text{loo}} = \sum_{(i,j)\in\mathcal{C}} \ln(p(Y_{ij}|Y_{-ij})) \tag{V.1}$$

où Y_{-ij} est l'ensemble de données sans l'observation Y_{ij} , $\mathcal{C}$ est l'ensemble des combinaisons de variétés $\times$ essais à l'étude, et $p(Y_{ij}|Y_{-ij})$ est la densité a posteriori de Y_{ij}. Plus ce critère est élevé, meilleur est l'accord entre le modèle et les données. L'indicateur k de Pareto indique si la validation croisée de la donnée retirée est valide, lorsque k est inférieure à 0.5 la quantité $\ln(p(Y_{ij}|Y_{-ij}))$ sera moins bien prédite et donc le critère elpd_{loo} moins fiable (Vehtari et al., 2017 ; Annexe D.1).
Pour les effets principaux, les sensibilités S et les coefficients de la régression factorielle C, nous avons estimé l'écart-type moyen des estimations, ce qui nous a permis d'avoir une estimation de la précision de ces effets. Afin de pouvoir comparer la précision entre différent traits, pour G, E et C, nous avons estimé le coefficient de variation moyen en divisant cet écart-type par la moyenne générale μ_Y.

V. 3.5 Évaluation des variétés

Seuls les meilleurs modèles ont été retenus pour analyser les données issues des essais variétaux. Ces modèles étaient FWHs et RFHs.

V. 3.5.a Décomposition de la variance

Dans le but de quantifier l'importance des différents paramètres des modèles dans l'explication du trait, la variance des observations a été décomposée. Comme G_i, E_j, ϵ_{ij} et le cas échéant C_i, X_j et S_i sont supposés être indépendants, la variance d'une observation sachant les paramètres inconnus, σ^2_ε et ν, est égale dans le cas du modèle FWHs à [27] :

$$Var(Y_{ij}) = Var(G_i + E_j + S_iE_j + \varepsilon_{ij}) = \sigma^2_G + \sigma^2_E + \sigma^2_S\sigma^2_E + Var(\varepsilon_{ij}).$$

25. Indique si le paramètre a convergé, c'est le cas si la statistique est inférieure à 1.1
26. La taille effective est le nombre d'itérations indépendantes, il est important d'en avoir suffisamment pour explorer l'espace des paramètres du modèle.
27. Car pour Y et X deux variables aléatoires indépendantes de moyennes nulles, $Var(YX) = Var(Y)V(X)$.

Dans le cas du modèle de RFHs [28] :

$$Var(Y_{ij}) = Var(G_i + E_j + C_i X_j + \varepsilon_{ij}) = \sigma^2_G + \sigma^2_E + \mu^2_C + \sigma^2_C + Var(\varepsilon_{ij}).$$

Comme le montrent les résultats ci-dessous (partie V. 4.1), le meilleur modèle implique que les résidus suivent une loi de Student, ainsi $Var(\varepsilon_{ij})$ est égale à $\nu\sigma^2_\epsilon/(\nu-2)$. Les parts de variance expliquées par l'effet principal variétal, l'effet principal de l'environnement et l'effet d'interaction sont égales à :

$$\pi(G) = \frac{\sigma^2_G}{Var(Y_{ij})}, \quad \pi(E) = \frac{\sigma^2_E}{Var(Y_{ij})}, \quad \pi(SE) = \frac{\sigma^2_S\sigma^2_E}{Var(Y_{ij})},$$

$$\pi(CX) = \pi(\mu_C X)+\pi((C-\mu_C)X), \quad \pi(\mu_C X) = \frac{\mu^2_C}{Var(Y_{ij})}, \quad \pi((C-\mu_C)X) = \frac{\sigma^2_C}{Var(Y_{ij})}.$$

$\pi(G)$ est également appelée héritabilité au sens large à l'échelle du réseau. La part de variance $\pi(CX)$ se décompose en une part environnementale $\pi(\mu_C X)$ et une part liée à la sensibilité variétale $\pi((C-\mu_C)X)$. La première correspond à la part de l'effet environnemental moyen expliquée par le facteur et la seconde à la part de la résiduelle (interaction $G\times E$ et erreurs) expliquée par le facteur.

V. 3.5.b Caractérisation des variétés

Pour comparer les estimations des effets liés aux variétés, nous avons réalisé des comparaisons deux-à-deux. Soit deux variétés k et l telles que les moyennes de leurs postériors [29] $\mu_{Gk} < \mu_{Gl}$, le test consistait à vérifier que la différence des postériors $G_k - G_l$ était inférieure à 0.05. Étant donné la multiplicité des tests, Ogle et al. (2019) propose une méthode pour estimer si le seuil a besoin d'être ajusté pour limiter le risque de faux positifs (des différences variétales significatives uniquement à cause de la multiplicité des tests). Nous n'avons pas eu le temps de mettre en œuvre cette approche. En théorie avec des modèles hiérarchiques, les faux positifs liés au nombre de tests réalisés sont bien moins fréquents qu'avec des modèles non-hiérarchiques (Gelman et al., 2012 ; Ogle et al., 2019).
Pour regrouper les variétés en ensembles non-significativement différents à partir des résultats des tests deux-à-deux, nous avons utilisé l'algorithme "insert-et-absorbe" de Piepho (2004).

V. 4 Résultats et discussion

V. 4.1 Comparaison des modèles

Dans cette sous-partie, nous présentons les résultats pour choisir les meilleurs modèles selon la capacité prédictive et la précision des estimations. En plus de cela, nous

28. Car pour Y et X deux variables aléatoires indépendantes avec X ayant un écart-type égale à 1 et Y de moyenne non nulle, $Var(YX) = Var(Y) + E(Y)^2$.

29. Le postérior est la distribution d'un paramètre du modèle, par exemple la distribution G_i la moyenne de la variété i sur le réseau d'essai. Cette distribution est composée d'un nombre de valeurs égales au nombre d'itérations MCMC. Cette distribution a une moyenne μ_{Gi}.

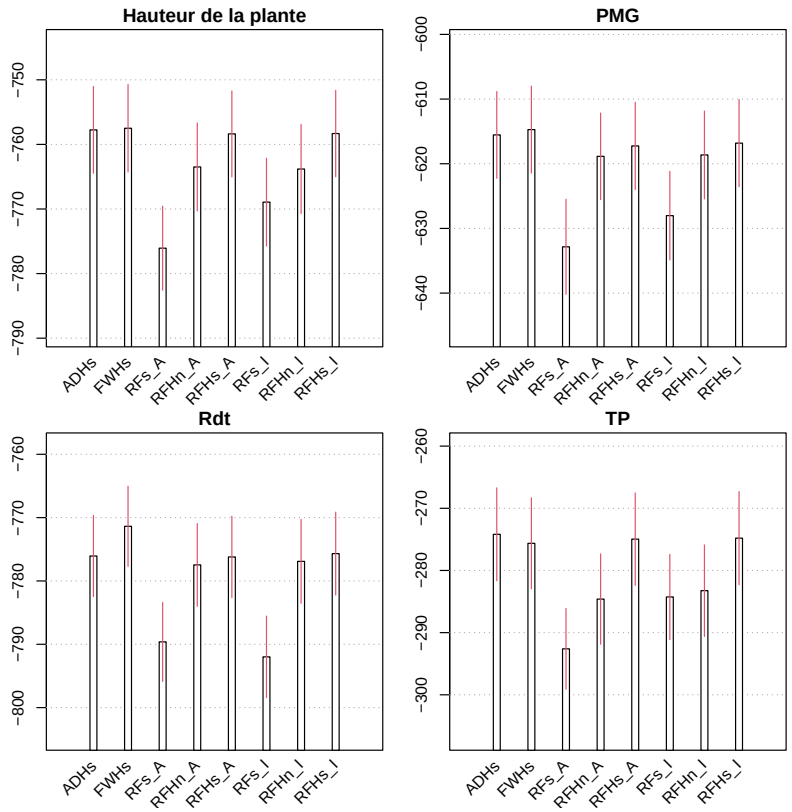


Figure V.4 – Capacité prédictive des modèles. elpd_{loo} et son erreur standard associée pour les 8 combinaisons de modèles × facteurs. ADHs : modèle ADditif Hiérarchique à loi de Student ; FWHs : modèle Finlay-Wilkinson Hiérarchique à loi de Student ; RFs : modèle de Régression Factorielle à loi de Student ; RFHs : modèle de Régression Factorielle Hiérarchique à loi de Student ; RFHn : modèle de Régression Factorielle Hiérarchique à loi de Normal ; _A : nuisibilité adventice ; _I : indice de nutrition azotée.

essayons d'expliquer certaines différences entre ces modèles dans un but de compréhension.

V. 4.1.a Capacité prédictive des modèles

Selon le critère elpd_{loo}, les modèles de régression factorielle sont moins ou aussi prédictifs au modèle de FWHs et au modèle ADHs (Fig V.4). Pourtant lorsque l'on compare le modèle additif (ADHs) au modèle de régression factorielle RHHs_I, on observe que la gamme de variation des effets environnementaux estimés E en particulier pour le rendement et la hauteur ce qui montre que le facteur environnemental (dans ce cas l'indicateur de stress azoté) explique une part de l'effet des environnements, E (annexe, Fig D.1). De même on observe que gamme de variation des effets génotypiques estimés G est aussi réduite pour le rendement et la teneur en protéine (Annexe, Fig D.1), cela s'explique par le fait que comme le dispositif est fortement incomplet, une part de G est expliquée par CX.
Les trois types de modèle factorielle RFs, RFHn et RFHs se classent de la même manière pour les quatre variables : hauteur, PMG, rendement et teneur en protéines et

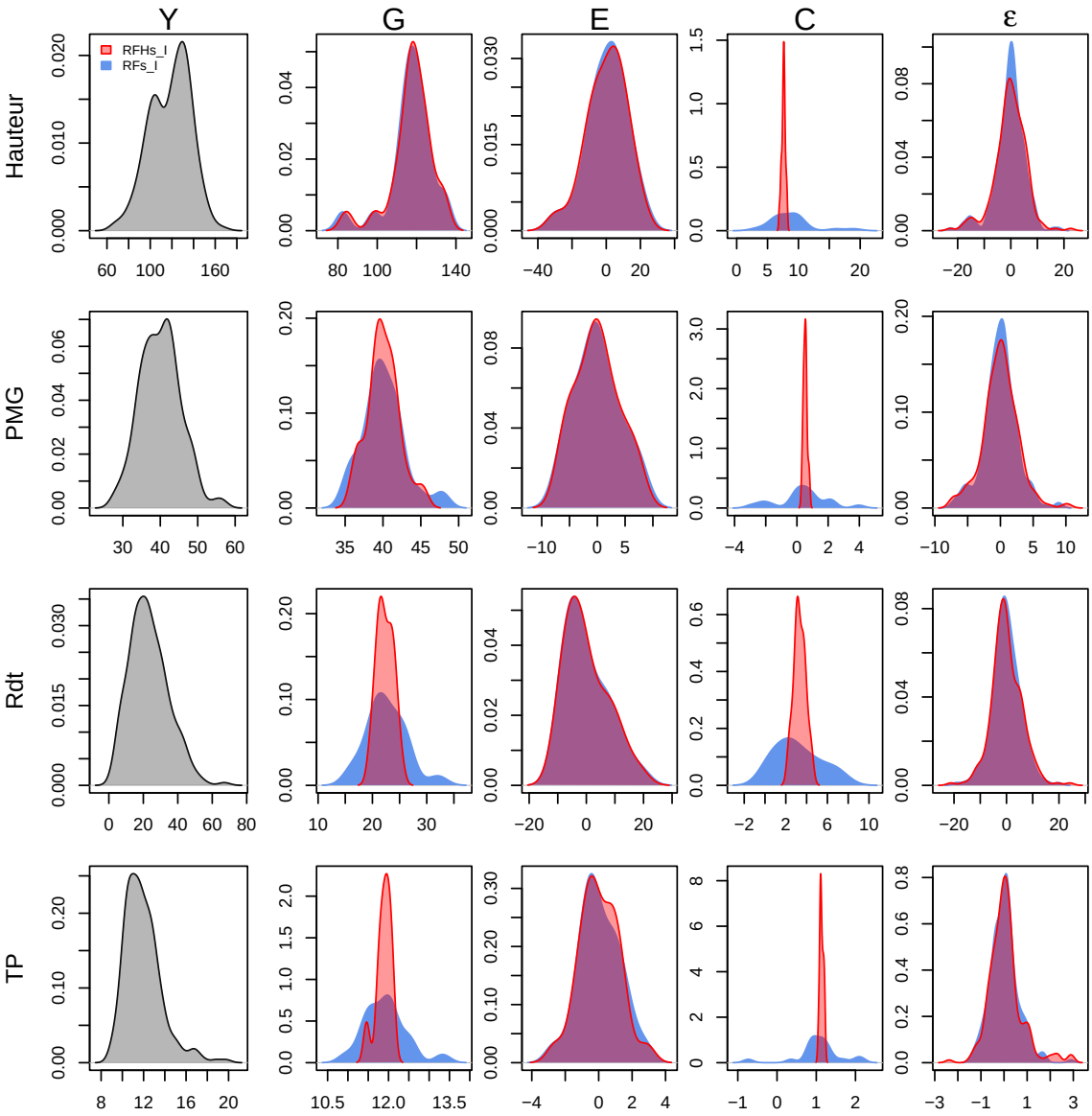


Figure V.5 – La première colonne présente la distribution des traits à expliquer (en gris). Les quatre autres colonnes comparent la version hiérarchique (rouge) et non hiérarchique (bleu) du modèle de régression factorielle avec comme facteur INN et loi de Student pour les résidus (RFHs_I et RFs_I) en montrant les histogrammes lissés des termes d'espérance (G, E et C) et des résidus (ε).

pour les deux facteurs nuisibilité des adventice et INN (Fig V.4).
Le modèle factoriel non-hiérarchique RFs (RFs_A et RFs_I) sont moins prédictifs que les modèles factorielles hiérarchiques RFHs (RFHs_A et RFHs_I). Cette meilleure prédiction peut être associée à une gamme de variation plus faible des estimations de C et de G avec les modèles hiérarchiques (Fig V.5).
Les modèles hiérarchiques avec une loi de Student pour les résidus (RFHs_I et RFHs_A) sont plus prédictifs que les modèles respectifs avec une loi normale (RFHn_I et RFHn_A) de manière plus nette pour les traits de hauteur des plantes et teneur en protéines. Les distributions des résidus entre ces deux modèles sont semblables pour

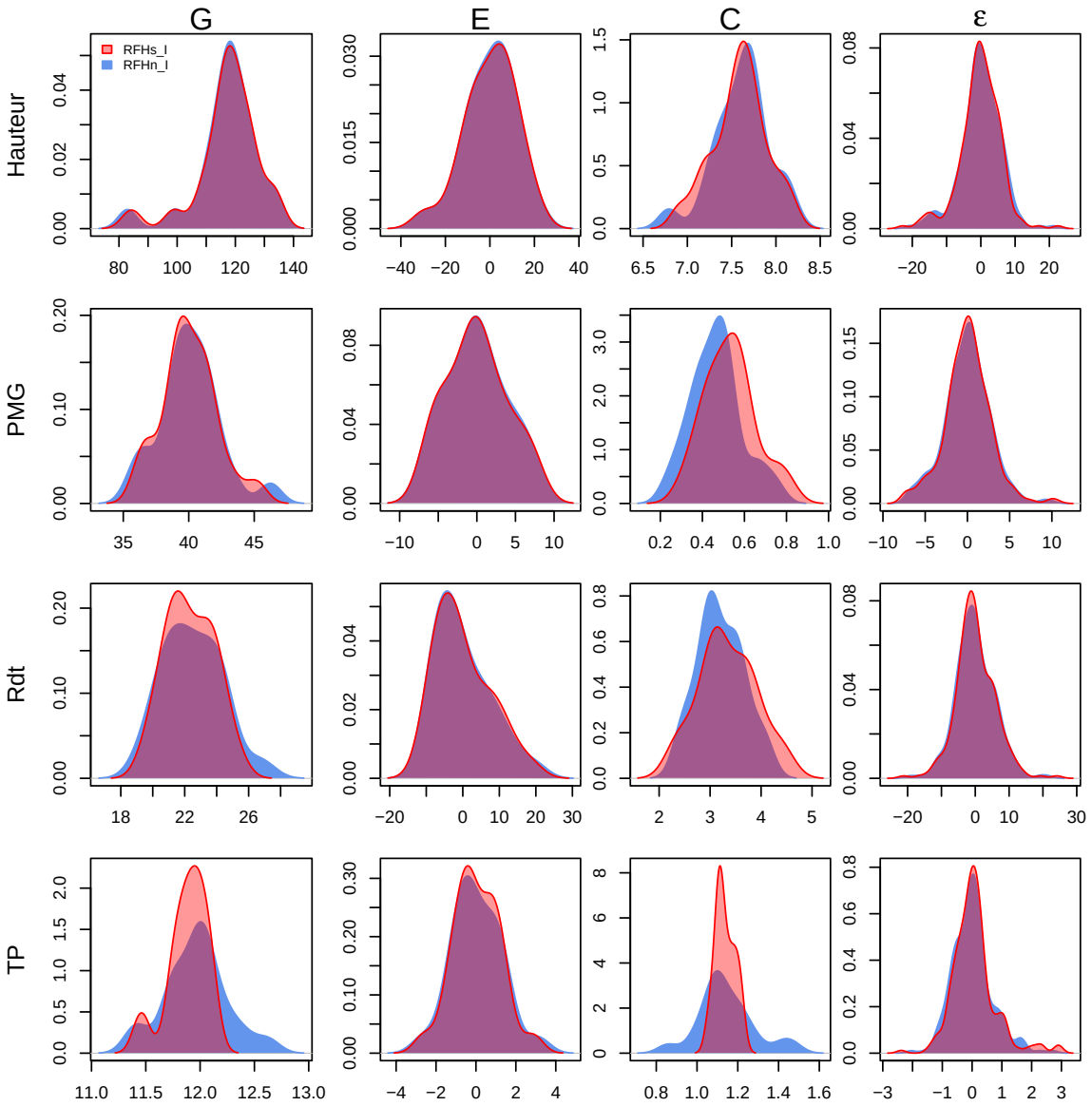


Figure V.6 – Comparaison des modèles de régression factorielle pour INN selon la loi des résidus, celle de Student (rouge) et celle normale en (bleu). Ces graphiques montrent les histogrammes lissés des termes d'espérance (G, E et C) et des résidus (ε).

les différents traits (Fig. V.6) même si on peut noter pour la hauteur de la plante et le rendement des distributions légèrement plus piquées sur 0 et légèrement plus étendues comme attendu lorsque les données contiennent beaucoup de valeurs extrêmes (Fig V.1 Choy et Chan, 2008 ; Rodriguez-Rodriguez et Miramontes, 2022). Considérer une distribution de Student plutôt qu'une distribution normale pour les résidus du modèle impacte les estimations des paramètres du modèle de façon différente selon les traits que l'on considère. Par exemple, la distribution de Student conduit à un accroissement de la gamme de variation des estimations de C dans le cas du rendement et une réduction de cette gamme de variation dans le cas de la teneur en

protéines (Fig. V.6). Rosa et al. (2003) [30] ont observé que la loi de Student diminue la variabilité des termes d'espérance par rapport à une loi de Normale.
Les modèles avec l'INN comme facteur explicatif (RFs_I, RFHn_I et RFHs_I) ont des capacités prédictives similaires aux modèles avec les adventices comme facteur explicatif (RFs_A, RFHn_A et RFHs_A).

V. 4.1.b Précision des estimations et distribution des résidus

Trait	Modèle	Facteur	ν	cv(G)	cv(E)	cv(C)	sd(S)
Hauteur de la plante	ADHs		9.3 (7.2)	3.3	3.2		
	FWHs		8.4 (6.8)	3.3	3.2		0.1
	RFs	ADV	11.6 (9.2)	4.1	4.8	4.2	
	RFs	INN	9.4 (7.9)	3.9	4.8	3.9	
	RFHn	ADV		3.3	4	2.5	
	RFHn	INN		3	3.5	2.2	
	RFHs	ADV	9.5 (7.2)	3.3	3.9	2.5	
	RFHs	INN	9.5 (7.3)	3	3.5	2.2	
PMG	ADHs		12.8 (9.6)	3.3	3.3		
	FWHs		12.8 (9.8)	3.3	3.3		0.15
	RFs	ADV	11 (9.5)	3.8	4.4	4.2	
	RFs	INN	13.2 (10.3)	3.8	4.4	4	
	RFHn	ADV		3.2	3.7	2.1	
	RFHn	INN		3.3	3.8	2.3	
	RFHs	ADV	12.8 (10)	3.2	3.7	2.2	
	RFHs	INN	12.6 (9.6)	3.3	3.8	2.2	
Rendement	ADHs		15.4 (10.6)	10.7	12.2		
	FWHs		17.6 (12.1)	11.3	13.3		0.19
	RFs	ADV	16.6 (11.9)	14.3	16.5	15.3	
	RFs	INN	15.5 (11.6)	14.1	16.1	14.6	
	RFHn	ADV		10.5	13.5	8.3	
	RFHn	INN		10.8	13.8	8.5	
	RFHs	ADV	14.5 (10.3)	10.2	13.4	8.3	
	RFHs	INN	13 (9.4)	10.5	13.8	8.8	
Teneur en protéines	ADHs		4.5 (2.6)	3.3	3.6		
	FWHs		6.6 (5.4)	3.7	4.1		0.15
	RFs	ADV	14.9 (11)	4	4.6	4.1	
	RFs	INN	13.7 (10.2)	3.8	4.5	3.8	
	RFHn	ADV		3.5	4.6	2.9	
	RFHn	INN		3	3.8	2.7	
	RFHs	ADV	4.6 (3)	3.3	4.5	2.8	
	RFHs	INN	4.5 (3)	2.7	3.5	2.2	

Table V.3 – Nombres de degrés de liberté estimés et précisions des estimations. ν : moyenne du nombre de degrés de liberté de la loi de Student et écart type entre parenthèses ; cv(G), cv(E), cv(C) : coefficients de variation moyen des estimations de G, E et C ; sd(S) : écart-type moyen des estimations de S (coefficients de FW).

Pour les modèles avec une distribution Student des résidus, l'estimation du nombre

30. Nous nous sommes trompés dans la version du pre-print (Turbet Delof et al., 2024) et avons dit l'inverse. Il faudra le corriger dans la prochaine version.

de degrés de liberté (ν) varie entre 4,5 et 17.6 [31] (Tab. V.3). La forme de la distribution des résidus dépend du caractère. Ce résultat confirme que le nombre d'observations extrêmes n'est pas négligeable dans nos données et que les modèles avec une distribution de Student des résidus sont plus appropriés. La précision associée aux estimations des paramètres G, E et C est plus faible pour le modèle non hiérarchique (RFs) et équivalente pour tous les autres modèles hiérarchiques (ADHs, FWHsn RFHn et RFHs, Tab. V.3). Ce résultat confirme que les modèles non hiérarchiques ne sont pas adaptés à nos données incomplètes. Les paramètres G, E et C ont été estimés plus précisément (Tab. V.3) pour les modèles de Student (RFHs sur INN et ADV) que pour les modèles normaux (RFHn et RFHn sur INN et ADV) pour le rendement et la teneur en protéines (pour les deux autres traits les valeurs la précision des estimations sont équivalentes entre un modèle considérant une loi de Student et un modèle considérant une loi normale).

V. 4.2 Évaluation de la réponse des variétés

31. Dans la pratique, on peut commencer à approximer la loi de Student en loi normale lorsque ν est supérieur à 20.

		Exe_eau	QPT lev-epi1	DH epi1	RAY meio	ETO epi1-flo	QPT epi1-flo	DH epi1-flo	TH flo-mat	DH flo-mat	Verse (%)	Maladies	INN	ADV
Trait	$\pi(E)$	$\pi(\mu_C X)$												
NP_m²	68.3 (43.2∼82.9)	-	17.4 (1∼38.4)	-	**12.3 (0.2∼32.9)**	-	11.9 (0.2∼31.6)	**13.1 (0.2∼33.4)**	-	-	-	-	-	-
NE_P	-	-	**9.3 (0.4∼25.4)**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NE_m²	54.5 (36.4∼70.4)	-	-	-	-	-	-	**23.5 (6.1∼41.4)**	-	-	8.4 (0.1∼23.7)	-	**11.2 (0.3∼28.1)**	-
NG_E	23.1 (8.8∼41.4)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NG_m²	64.9 (49.9∼77.9)	-	-	-	-	-	-	**19.5 (2.5∼39.5)**	-	-	9.4 (0.1∼25.9)	-	**10.8 (0.2∼28.1)**	**10.5 (0.1∼27.4)**
PMG	53.1 (35.9∼69.7)	-	-	-	-	-	**8.7 (0.1∼24.2)**	-	**15.2 (1.8∼31.8)**	-	-	-	-	-
Rdt	63.2 (47.6∼77)	-	-	-	-	-	-	**11.4 (0.2∼29.3)**	-	-	10.8 (0.2∼27.6)	7.1 (0.1∼20.7)	**10.1 (0.1∼26.9)**	**12.1 (0.5∼29.5)**
BP	71.4 (54.7∼83.9)	-	-	-	-	-	-	**24.1 (4.2∼44.8)**	-	-	25.3 (6∼44.6)	-	**23.2 (4.8∼42.8)**	**10.5 (0.1∼28.7)**
TP	79.1 (61.9∼89)	-	**18.3 (1.3∼39.3)**	-	-	-	-	-	11.5 (0.3∼28.4)	-	15.6 (2∼32.7)	20.8 (5.4∼37.8)	**34.1 (12∼53.1)**	-
HP	55.2 (36.3∼72.9)	-	-	-	-	-	-	**- 18.2 (2.4∼36.8)**	-	-	13.5 (1.3∼29.6)	8.3 (0.2∼21.8)	**15.3 (2.1∼31.5)**	-

Table V.4 – Parts de variance expliquées (en %) par l'effet E du modèle FWHs, $\pi(E)$ en première colonne, et par les coefficients moyens de régression factorielle des modèles RFHs $\pi(\mu_C X)$. Les cases **en gras** indiquent lorsque μ_C est négatif (ce qui est attendu si le facteur indique bien un stress). En dessous des parts de variances expliquées est indiqué l'intervalle de crédibilité à 95% et seules celles ayant un quantile à 2.5% supérieur à 0.1 sont reportées dans la table. Pour rappel, la part de variance expliquée $\pi(\mu_C X)$ (RFHs) est théoriquement inclue dans la part expliquée $\pi(E)$ (FWHs).
NP_m2 : nombre de plantes par m² ; NE_P : nombre d'épis productifs par plantes ; NE_m2 : nombre d'épis productif par m² ; NG_E : nombre de grains par épi ; Ng_m² nombre de grains par m² ; Rdt : rendement ; BP : biomasse paille, TP : teneur en protéines ; HP : hauteur de la plante ; lev-epi1 : entre levée et épi-1 cm ; epi1-flo : entre épi 1 cm et floraison ; flo-mat : entre floraison et maturité ; Exe_eau : indicateur d'excès d'eau ; QPT : quotient photothermique ; DH : indicateur de déficit hydrique ; RAY : rayonnement ; ETO : écart aux températures optimales TH : indicateur de températures hautes ; INN : indice de nutrition azoté ; ADV : indicateur de nuisibilité adventice.

			Exe_eau	QPT lev-epi1	DH epi1	RAY meio	ETO epi1-flo	QPT epi1-flo	DH epi1-flo	TH flo-mat	DH flo-mat	Verse (%)	Maladies	INN	ADV
Trait	$\pi(G)$	$\pi(S)$	$\pi((C-\mu_C)X)$												
NP_m²	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2 [3] (0.1∼6)	-	3.7 [8] (0.8∼9.6)	-
NE_P	-	4.9 [12] (0.2∼16)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NE_m²	4.3 (0.3∼12.5)	7.8 [13] (1.7∼18.5)	-	-	-	2.9 [5] (0.1∼8.9)	-	-	-	-	-	3.8 [6] (0.1∼12.3)	-	5 [2] (0.5∼13.6)	2.7 [3] (0.1∼8.5)
NG_E	19.1 (4.3∼40.5)	-	-	5.1 [6] (0.6∼13.5)	-	-	4.4 [4] (0.2∼12.4)	-	-	-	-	6.3 [7] (0.1∼17.7)	8.3 [10] (1.2∼20.5)	5.8 [9] (0.1∼16.5)	-
NG_m²	3.9 (0.2∼11.1)	3.9 [1] (0.6∼9.9)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PMG	18.8 (7.8∼35.3)	-	-	-	2.5 [4] (0.3∼6.5)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rdt	3.8 (0.1∼12)	5.4 [1] (0.8∼13.8)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.6 [6] (0.2∼7.7)	-	-	-
BP	4.4 (0.7∼11.8)	-	-	-	-	-	-	-	2.3 [10] (0.1∼7.5)	-	-	-	-	-	-
TP	2.1 (0.2∼6.2)	-	-	-	-	-	-	-	2.4 [5] (0.3∼6.7)	-	-	-	-	-	-
HP	32.8 (17∼52.2)	-	-	-	-	1.2 [5] (0.1∼3.5)	-	1.7 [8] (0.3∼4.3)	-	-	1.2 [12] (0.1∼3.9)	-	-	-	-

Table V.5 – Parts de variance expliquées (en %) par les effets G et S du modèle FWHs, $\pi(G)$, $\pi(S)$, et part expliquée par la composante variétale du coefficient de régression factorielle des modèles RFHs $\pi((C-\mu_C)X)$. Les classements (en exposant) comparent le modèle FWHs et les 12 modèles RFHs avec 1 (le meilleur) à 13 (le pire) selon le critère elpd_{loo} (capacité prédictive LOO). Les parts de variances expliquées sont associées à leur intervalle de crédibilité à 95% et seuls ceux ayant un intervalle 2.5% supérieurs à 0.1 sont représentés.
NP_m2 : nombre de plantes par m² ; NE_P : nombre d'épis productifs par plante ; NE_m2 : nombre d'épis productif par m² ; NG_E : nombre de grains par épi ; Ng_m² nombre de grains par m² ; Rdt : rendement ; BP : biomasse paille, TP : teneur en protéines ; HP : hauteur de la plante ; lev-epi1 : entre levée et épi-1 cm ; epi1-flo : entre épi 1 cm et floraison ; flo-mat : entre floraison et maturité ; Exe_eau : indicateur d'excès d'eau ; QPT : quotient photothermique ; DH : indicateur de déficit hydrique ; RAY : rayonnement ; ETO : écart aux températures optimales TH : indicateur de températures hautes ; INN : indice de nutrition azoté ; ADV : indicateur de nuisibilité adventice.

V. 4.2.a Décomposition de la variance

Décomposition environnementale de la variance. La part de variance expliquée par les termes environnementaux des modèles dépend des traits (Tab. V.4). Dans de nombreux cas, il y a une grande incertitude dans ces estimations avec de grands intervalles de crédibilité [32] (dont beaucoup comprenant des valeurs inférieures à 1%). C'est un intérêt de la méthode bayésienne de pouvoir facilement donner l'intervalle de crédibilité des parts de variance expliquée.
L'effet E du modèle FWHs explique une part très significative des variations du rendement, des composantes par m^2 et du PMG : de 53.1% pour le PMG à 64.9% pour le nombre de grain par m^2. Par contre il explique une plus faible part de la variation du nombre de grains par épi (NG_E) et du nombre d'épis par plante (NE_P, ce dernier n'est pas significatif).
Neuf des 13 facteurs environnementaux à l'étude expliquent une part significative des variations du rendement ou d'une de ses composantes. Ce n'est pas le cas de l'excès d'eau en hiver (Exe_eau), les écarts aux températures optimales entre épi 1 cm et floraison (ETO épi-flo) et le déficit hydrique autour d'épi 1 cm et entre floraison et maturité (DH flo-mat). Nous avons vu dans le chapitre IV que notre méthode d'estimation de Exe_eau n'était pas adéquate et que ETO et DH autour du stade d'épi 1 cm n'ont jamais été identifiés comme impactant. Par contre, on aurait pu s'attendre à ce que le DH entre floraison et maturité explique une part significative des variations du PMG. En effet, ce stress a été jugé impactant pour 10 des 32 essais et le PMG moyen estimé sur les 10 essais stressés (35g) était sensiblement plus faible que celui estimé sur les 22 essais non stressés (41.6g, cf chapitre IV). Cela montre donc une limite de cette méthode de régression factorielle, sans doute due à nos méthodes de calcul des facteurs.
Le déficit hydrique entre épi 1 cm et floraison (DH épi1-flo), les températures hautes entre floraison et maturité (TH flo-mat), l'INN et les adventices (ADV) sont des facteurs indiquant des stress qui ont été fréquemment identifiés au chapitre IV. Comme attendu, ces facteurs sont significativement explicatifs des composantes du rendement dans le sens d'un stress (en gras) :

- La variance du nombre d'épis par m^2 est expliquée à 23.5% par l'impact moyen de l'indicateur de DH entre épi 1 cm et floraison et à 11.2% par l'INN.
- La variance du nombre de grains par m^2 est expliquée à 19.5% par l'impact moyen de l'indicateur de DH entre épi 1 cm et floraison et à 10.8% par l'INN, et à 10.5% par l'impact moyen de la nuisibilité adventice. David et al. (2005) ont trouvé que l'INN et l'indicateur de pression adventice expliquaient 53% de la variance du nombre de grains par m^2 relatif [33] dans un réseau de parcelles de blé en agriculture biologique.
- La variance du PMG est expliquée à 15.2% par l'impact moyen de TH entre floraison et maturité. David et al. (2005) ont retenu deux indicateurs de stress thermiques en plus d'un indicateur de tassement du sol et un indicateur de la

32. Les intervalles de crédibilité à 95% donnent les quantiles 2.5% et 97.5% du postérior du paramètre, il est direct d'interprétation.
33. David et al. (2005) n'utilise pas directement le nombre de grains par m^2 mais un nombre de grains par m^2 relatif une valeur variétale dite "seuil".

région géographique pour expliquer le PMG relatif [34].

— La variance du rendement est expliquée à 11.4% par l'impact moyen de l'indicateur de DH entre épi 1 cm et floraison, 10.1% par l'INN et 12.1% par l'impact moyen des adventices.

Trois de ces quatre stress (DH épi1-flo, TH flo-mat, INN et ADV) identifiés comme majeurs lors du diagnostic ont un impact négatif sur la biomasse paille (expliquée par les trois stress), la teneur protéine (expliquée par l'INN, cf chapitre IV et Casagrande et al., 2009) et la hauteur de la plante (expliquée par l'indicateur de DH entre épi 1 cm et floraison et l'INN). Cela corrobore le fait que ces stress ont fortement impacté le comportement des variétés sur le réseau d'essai.

La verse et dans une moindre mesure les maladies expliquent aussi le rendement et ces composantes mais le coefficient de régression factorielle est positif ce qui indique une augmentation de la performance lorsque l'indicateur de stress augmente. Ces résultats indiquent que les essais où l'on observe de la verse et des maladies sont aussi souvent des essais à plus fort potentiel, où les variétés à pailles hautes sont plus susceptibles de verser et qui constituent un environnement favorable au développement de la maladie. Il y a donc là une confusion entre un effet du potentiel productif du milieu et un effet de la verse ou de la maladie.
Le manque de rayonnement entre levée et épi 1 cm semble avoir impacté significativement le nombre d'épis par plantes (9.3%). Dans le chapitre IV nous avons identifié uniquement 2 essais ayant été impactés par ce stress. Soit le facteur est corrélé à d'autres stress, soit nous avons sous-estimé l'impact de ce stress dans le réseau d'essais dans le chapitre IV. De même pour le manque d'offre en rayonnement entre épi 1 cm et floraison qui explique 8.7% du PMG alors qu'il a été identifié comme impactant le nombre de grains par épi dans uniquement 3 essais dans le chapitre IV et ce n'est pas complètement logique qu'un déficit de rayonnement à montaison puisse impacter le PMG. Le risque de confusion d'effet est aussi possible.

Décomposition variétale de la variance. Parmi les composantes du rendement, seules le nombre de grains par épis et le PMG ont une part de variance expliquée par l'effet G supérieure à 5% (G expliquant respectivement 19.1% et 18.8% de la variance de ces traits, Tab V.5). Le nombre d'épis par m^2, de grains par m^2 et le rendement ont une part de variance génétique faible mais non nulle comme la biomasse paille et la teneur en protéine. La hauteur de plantes présente une part de variance génétique de 32.8% ce qui est cohérent avec la forte diversité des variétés choisies pour ce trait et son héritabilité élevée.
La part de variance des traits expliquée par le terme S (la sensibilité au potentiel de l'environnement) est significative pour le rendement et trois des composantes du rendement (nombre d'épis par m^2, le nombre d'épis par plante et le nombre de grains par m^2) expliquant entre 3.9% et 7.8% de la variance totale. Celle-ci est supérieure ou de même ordre de grandeur que la part de variance expliqué par G. Pour ces traits,

34. David et al. (2005) n'utilise pas directement le PMG mais un PMG relatif un maximum variétal.

une part significative de l'interaction $G\times E$ est expliquée par S. Pour les autres traits, $\pi(S)$ n'est pas significativement différent de 0.
Le modèle de FWHs est plus prédictif que les 12 modèles RFHs pour nombre de grain par m^2 et le rendement. Cela indique la pertinence du modèle FWHs pour prédire l'interaction $G\times E$ [35].
La part de variance du rendement et de ses composantes expliquée par la réponse différentielle des variétés aux différents stress testées $\pi((C-\mu_C)X)$ a été significative surtout pour la verse et l'INN et dans une moindre mesure pour le QPT lev-épi 1cm, le DH épi 1 cm, le RAY meio, l'ETO epi1-flo, les maladies et ADV. La variance expliquée varie entre 2 et 8.3%. Nous avons vu au-dessus qu'il y avait pour la verse et les maladies une forte confusion d'effets avec le potentiel de l'environnement. De plus, nous avons vu dans le chapitre IV que le DH épi 1 cm n'avait impacté aucun essai. Les modèles de RFHs où $\pi((C-\mu_C)X)$ est significativement différent de 0, sont rarement parmi les meilleurs modèles prédictifs selon le critère elpd_{loo} sauf pour le modèle expliquant nombre d'épi par m^2 par INN (deuxième). Cela indique que ces modèles de RFHs ont des difficultés à prédire l'interaction $G\times E$ et donc sans doute à obtenir des estimations de sensibilités variétales robustes.
Pour les autres traits, la part de variance expliquée par $\pi((C-\mu_C)X)$ est significativement différent 0 uniquement pour les facteurs climatiques et la part expliquée est très faible, elle varie entre 1.2 et 2.4%. Aucun de ces modèles ne fait partie des meilleurs modèles prédictifs.
Pour les stress identifiés comme impactant dans le cadre du chapitre IV ou de la partie précédente (DH épi1-flo, INN et ADV notamment), le modèle d'analyse ne permet pas de mettre en évidence des réponses contrastées entre variétés sur la base du rendement. l'INN semble toutefois discriminer les variétés que sur leur NE_m^2 et NG_E, ADV sur NE_m^2 et DH épi-flo sur la biomasse paille.

V. 4.2.b Comparaison des variétés

Dans cette sous-partis, les noms de variétés ont été abrégées pour rentrer dans les tableaux : Alauda (Ala) Anti-Verse (A-V), Automne-Rouge-Barbu (ARB), Barbu-du-Maconnais (B-M), Dattel (Dat), Grand-Clesle (G-C), Inconnu-de-Raphael (IdR), Mottet-Blanc (M-B), Petanielle-Noire-de-Nice (PNN), Petit-Beron (P-B), Popayon (Pop), Poulard-d-Australie (PdA), Pourpayon (Prp), Rouge-de-Bordeaux (RdB), Roux-des-Ardennes (RdA), Saint-Priest (S-P), Savoysone (Sa1), Savoyon (Sa2), Titlis (Tit) et Trancherie (Tra).

Les comparaisons des moyennes des variétés deux-à-deux ont permis de regrouper les variétés non significativement différentes en moyenne (Tab V.6). Ce test n'a pas permis de différencier les variétés pour le rendement et le nombre de grains par m^2. On observe certains profils variétaux de l'élaboration du rendement :

— Les poulards (PNN, PdA) et Titlis (Tit) ont moins d'épis par m^2 mais des épis plus lourds. Ces trois variétés ont beaucoup de grains par épi et de gros grains bien que Titlis est génétiquement très différent des poulards. En effet, Titlis est

35. Selon nous, la capacité prédictive des modèles testés est principalement dûe à leur manière dont est prise en compte l'interaction $G\times E$.

	G_i							
	NE_m²	NG_E	NG_m²	PMG	Rdt	BP	TP	HP
PNN	189^{ab}	29.1^{fg}	5.9^{a}	39.6^{cdefg}	23.1^{a}	49.6^{cd}	11.9^{b}	133^{k}
PdA	179^{ab}	32.1^{g}	5.5^{a}	45^{i}	22.8^{a}	46.6^{abcd}	11.2^{ab}	133^{k}
RdA	236^{b}	24.1^{abcd}	5.8^{a}	39.3^{defg}	22.8^{a}	50.8^{d}	11.6^{b}	121^{ghij}
M-B	216^{ab}	23.8^{abcde}	5.4^{a}	43.2^{hi}	22.4^{a}	47.5^{abcd}	11.6^{ab}	119^{defghi}
P-B	220^{ab}	23.9^{abcde}	5.6^{a}	41^{efgh}	22.4^{a}	49.3^{bcd}	11.8^{b}	127^{jk}
Tit	191^{ab}	28.2^{efg}	5.5^{a}	41.5^{gh}	22.1^{a}	39.7^{ab}	11.6^{ab}	85^{a}
S-P	213^{ab}	26.3^{cdefg}	5.9^{a}	35.8^{a}	21.8^{a}	49.3^{cd}	11.8^{b}	115^{cdefg}
Sa1	227^{ab}	23.2^{abc}	5.5^{a}	39.8^{defg}	21.8^{a}	46.1^{abcd}	11.2^{a}	119^{fgh}
RdB	213^{ab}	25^{bcdef}	5.6^{a}	38.7^{bcde}	21.7^{a}	45.7^{abcd}	11.8^{b}	125^{ij}
Sa2	206^{ab}	$25.5^{abcdefg}$	5.3^{a}	40.8^{defgh}	21^{a}	44.4^{abcd}	11.5^{ab}	120^{efghij}
BdM	207^{ab}	25.2^{abcdef}	5.5^{a}	36.6^{abc}	20.9^{a}	47.4^{abcd}	11.9^{b}	117^{cdefgh}
Dat	200^{ab}	25.1^{abcdef}	5.3^{a}	38.2^{abcdef}	20.7^{a}	44.1^{abcd}	11.7^{ab}	110^{cd}
G-C	194^{ab}	24.1^{abcd}	5^{a}	42.2^{hi}	20.5^{a}	45.7^{abcd}	11.5^{ab}	114^{cde}
ARB	220^{ab}	21.6^{a}	5^{a}	41.1^{gh}	20.3^{a}	44.6^{abcd}	11.6^{b}	124^{ij}
Tra	196^{ab}	23.8^{abcde}	5^{a}	41.3^{fgh}	20.2^{a}	40.9^{abcd}	11.5^{ab}	123^{hij}
Ala	194^{ab}	26.8^{defg}	5.2^{a}	39^{cdef}	20.1^{a}	40.2^{a}	11.7^{b}	114^{cd}
A-V	192^{a}	25.7^{cdef}	5.1^{a}	40.4^{defg}	20.1^{a}	42.5^{abcd}	11.7^{b}	116^{cdef}
Pop	206^{ab}	22.7^{abc}	5.1^{a}	39.3^{bcdefg}	19.8^{a}	43.4^{abcd}	11.7^{b}	118^{defgh}
IdR	205^{ab}	23.1^{abcd}	5^{a}	38.1^{abcd}	19.3^{a}	41.8^{abcd}	11.6^{ab}	118^{defgh}
Prp	209^{ab}	25.9^{cdefg}	5^{a}	36.6^{ab}	18.4^{a}	38.8^{a}	11.5^{ab}	99^{b}

Table V.6 – Moyenne variétale (G_i) sur le réseau d'essais (modèle FWHs). Seuls les traits pour lesquels $\pi(G)$ est significativement différent de 0 sont présentés. Les groupes de variétés non significativement différentes les unes des autres sont en exposant. Les variétés en rouge présentent des valeurs de traits significativement supérieures à celles en bleu (cette aide visuelle ne présente pas toute l'information des groupes en exposant). NG_E : nombre de grains par épi ; BP : biomasse paille, TP : teneur en protéines ; HP : hauteur de la plante.

la variété à l'étude se rapprochant le plus de l'idéotype de Donald (1968). Elle est courte [36], moins de compétitivité vis-à-vis des autres plantes du couvert et valorisant bien les apports de fertilisant azoté.

— Roux-des-Ardennes (RdA), Automne-Rouge-Barbu (ARB) et Savoysone (Sa1) ont plus d'épis par m² mais des épis moins lourds.

— Mottet-Blanc (M-B), Petit-Béron (P-B), Grand-Clesle (G-C) et Trancherie (Tran) sont des variétés à gros grains.

— Saint-Priest (S-P), Barbu-du-Mâconnais (BdM) et Pourpayon [37] (Prp) sont des variétés à petits grains.

Les variétés se distinguent également par leur production en paille, leur teneur en protéines et la hauteur des plantes (Tab V.6).

Les variétés n'ont pas toutes les mêmes sensibilités au potentiel de l'environnement (S_i, Tab V.7). Par exemple pour le rendement :

— Poulard d'Australie (PdA), Titlis (Tit) et dans une moindre mesure Saint-Priest (S-P) et Petit-Béron (P-B) ont des sensibilités positives indiquant une adapta-

36. Même si Titlis est considérée par rapport aux variétés commerciales comme une variété haute.

37. Comme il y a eu de forts problèmes de vigueur germinative pour Pourpayon sur la semence de 2022, il est possible que nos résultats sur son profil d'élaboration du rendement soient biaisés.

	S_i				$C_i - \mu_C$			
					INN	ADV	ETO épi1-flo	DH épi1-flo
	NE_P	NE_m²	NG_m²	Rdt	NE_m²	NE_m²	NG_E	TP
PdA	-0.67^{abc}	-0.4^{ab}	0.13^{abcd}	0.53^{d}	12.77^{ab}	-16.32^{ab}	0.06^{a}	0.29^{abcd}
Tit	-0.1^{abcd}	-0.04^{ab}	0.31^{d}	0.44^{d}	-12.02^{ab}	-0.28^{ab}	-0.07^{a}	0.17^{bcd}
S-P	-0.22^{abcd}	0.12^{ab}	0.23^{cd}	0.19^{cd}	-14.44^{ab}	16.09^{ab}	-0.08^{a}	0.5^{d}
P-B	0.5^{cd}	0.38^{ac}	0.14^{abcd}	0.15^{abcd}	-2.31^{ab}	-2.54^{ab}	0.06^{a}	-0.26^{abc}
Sa1	-0.05^{abc}	0.21^{ac}	0.07^{bcd}	0.08^{bcd}	-8.82^{ab}	18.8^{a}	-0.43^{a}	0^{abcd}
PNN	-0.1^{abcd}	-0.37^{b}	0.09^{abcd}	0.04^{abcd}	20.27^{a}	-4.33^{ab}	-0.06^{a}	0.25^{abcd}
BdM	-0.43^{ab}	0.42^{ac}	0.08^{abcd}	0.03^{abcd}	-9.08^{ab}	4.14^{ab}	0.14^{a}	-0.02^{abcd}
Dat	0.1^{abcd}	0.04^{ab}	0.01^{abcd}	0.03^{abcd}	-2.04^{ab}	1.11^{ab}	-0.02^{a}	0.09^{abcd}
M-B	0.6^{d}	0.06^{ab}	-0.08^{abcd}	0.03^{abcd}	-3.45^{ab}	-1.47^{ab}	0.01^{a}	-0.08^{abcd}
Ala	0.16^{bcd}	-0.08^{ab}	0^{abcd}	0^{abcd}	16.98^{a}	-16.15^{b}	-0.04^{a}	-0.09^{abcd}
IdR	0.21^{abcd}	0.04^{ab}	0.02^{abcd}	-0.02^{abcd}	26.75^{a}	10.14^{ab}	0.36^{a}	-0.32^{abc}
RdB	-0.2^{abcd}	-0.03^{ab}	0.01^{abcd}	-0.02^{abcd}	-8.38^{ab}	4.1^{ab}	0.11^{a}	-0.01^{abcd}
Sa2	-0.02^{abcd}	0.12^{abc}	0.01^{abcd}	-0.02^{abcd}	-3.72^{ab}	-1.26^{ab}	0.16^{a}	-0.1^{abcd}
Tra	-0.58^{a}	-0.02^{ab}	-0.07^{abcd}	-0.04^{abcd}	1.46^{ab}	-5.18^{ab}	-0.09^{a}	0.17^{bcd}
Prp	0.52^{bcd}	0.77^{c}	0.16^{cd}	-0.05^{abcd}	-41.68^{b}	7.75^{ab}	-0.2^{a}	-0.19^{abc}
A-V	0.06^{abcd}	-0.14^{ab}	-0.14^{abcd}	-0.14^{abc}	17.86^{a}	-8.67^{ab}	0.23^{a}	-0.24^{abc}
RdA	0.53^{cd}	0.02^{ab}	-0.17^{abc}	-0.17^{abc}	9.39^{ab}	-14.21^{ab}	-0.53^{a}	0.23^{d}
Pop	0.23^{abcd}	0.01^{ab}	-0.18^{abcd}	-0.23^{abc}	5.67^{ab}	4.14^{ab}	-0.03^{a}	0.02^{abcd}
G-C	-0.31^{abc}	-0.37^{b}	-0.27^{ab}	-0.26^{ab}	14.62^{a}	-0.22^{ab}	-0.07^{a}	0.01^{abcd}
ARB	0.08^{abcd}	-0.11^{ab}	-0.29^{a}	-0.31^{a}	-4.41^{ab}	-3^{ab}	0.1^{a}	-0.29^{a}

Table V.7 – Sensibilité variétale sur le réseau d'essais selon le modèle FWHs (S_i) et selon le modèle de régression factorielle ($C_i - \mu_C$). Les S_i positifs et respectivement les $C_i - \mu_C$ négatifs indiquent une sensibilité variétale par rapport à la moyenne des variétés.
Les variétés en rouge présentent des valeurs de traits significativement supérieures à celles en bleu (cette aide visuelle ne présente pas toute l'information des groupes en exposant). NE_P : nombre d'épis productifs par plante ; NE_m² : nombre d'épis productif par m² ; NG_m² nombre de grains par m² ; Rdt : rendement ; TP : teneur en protéines ; HP : hauteur de la plante ; IR : indice de récolte ; DH épi1-flo : déficit hydrique entre épi 1 cm et floraison ; INN : indice de nutrition azoté.

tion aux milieux à fort potentiel. Ces résultats sont en accord avec les hypothèses faites et vérifiées pour Titlis [38] et Petit Béron [39] dans le chapitre IV.

— Grand-Clesle (G-C) Automne-Rouge-Barbu (ARB) et dans une moindre mesure Popayon ont une sensibilité négative indiquant une adaptation aux milieux à faible potentiel.

Pour les autres composantes du rendement les sensibilités peuvent être du même signe comme pour Petit-Béron (toujours positives) ou Grand-Clesle (toujours négatives) mais la plupart du temps elles changent de signe montrant là aussi une diversité dans les profils d'élaboration du rendement. Certaines variétés comme Poulard-d-Australie ou Titlis ont des sensibilités négatives (réagissant peu au potentiel de l'environnement) pour le tallage puis sensibles pour le rendement. Contrairement à Popayon (Pop) et Roux-des-Ardennes (RdA) où on observe une sensibilité positive pour le rendement

38. Hypothèse 8 : Titlis préfère les milieux à fort potentiel
39. Hypothèse 4 : Petit-Béron est adapté aux terres riches (son terroir d'origine).

puis une sensibilité négative pour le rendement. La figure V.7 permet de visualiser ce que signifie graphiquement la sensibilité au potentiel de l'environnement de six variétés et leur ajustement avec les données observées sur le rendement et deux composantes du rendement. On observe entre le nombre d'épis par plante et le rendement des changements de signe pour toutes les variétés sauf Grand-Clesle et Petit-Béron (qui restent respectivement en dessous et au-dessus de la ligne noire en pointillé).
On observe qu'entre le nombre d'épis par plante et le rendement les classements des environnements (en abscisse) varient fortement. Cela indique que le rendement moyen ne permet pas de catégoriser les environnements à lui seul. En considérer l'ensemble des composantes, cela permet d'explorer les différentes dynamiques de mise en place du rendement qui pourraient donner lieu à différentes formes d'adaptation par les variétés.

La sensibilité à l'INN et à la compétition vis-à-vis adventices estimées sur la base du nombre d'épis par m^2 ainsi que la sensibilité au déficit hydrique entre épi-1 cm estimée sur la base du la teneur en protéines ont permis de discriminer les variétés (Tab V.7). Pourpayon apparaît sensible [40] au stress azoté tandis que Grand-Clesle, Anti-Verse, Inconnu-de-Raphaël (IdR), Pétanielle-Noir-de-Nice (PNN) et Alauda (Ala) semblent tolérants. Étant donné que pour le nombre d'épis par m^2, les sensibilités à la nutrition azotée (C) sont fortement corrélées à la sensibilité des variétés selon la régression de FW (S ; r=-0.75), cela suggère que le principal facteur expliquant S en début montaison pourrait être la capacité à bien valoriser l'azote. Titlis a un coefficient $C - \mu_C$ négatif (-12) indiquant une sensibilité au stress azoté comme montré dans le chapitre IV pour le rendement [41]. Alauda, Petit Béron et Popayon qui avaient respectivement 39%, 85% et 70% de chance d'être sensible à l'azote pour le rendement. Bien que le trait soit différent, les doutes se confirment pour Alauda qui apparaît plutôt tolérant au stress à l'azote ($C - \mu_i = 17$) pour le nombre d'épi par m^2, par contre les réponses au stress azoté de Petit-Béron et Popayon apparaissent dans la moyenne.

Étant donné que l'INN ne ressort pas pour expliquer l'interaction $G \times E$ pour le nombre de grains par m^2 et le rendement, on peut supposer soit

- La sensibilité variétale S détectée pour le nombre de grains par m^2 et le rendement est une sensibilité à un ensemble de stress dont le stress azoté n'est pas prépondérant par rapport aux autres stress.
- Au contraire le stress azoté serait prépondérant dans l'explication les sensibilités variétales S détectées pour le nombre de grains par m^2 et le rendement mais notre indicateur ne reflète pas suffisamment bien le stress azoté. En effet nous avons vu dans le chapitre IV que sur les 32 essais, 11 fois le stress a été jugé par le diagnostic agronomique participatif comme non impactant en dépit d'une valeur faible de l'indicateur.

Saint-Priest et Roux-des-Ardennes seraient tolérants vis-à-vis du stress hydrique pour leur teneur en protéine contrairement à Automne-Rouge-barbu qui serait sensible.
Les résultats sur les sensibilités variétales montrent bien que certaines variétés sont plus adaptées à des environnements de culture à faible potentiel et d'autre à fort potentiel (Comme l'ont montré d'autres études Ceccarelli, 1994 ; Costanzo et al.,

40. Cet indicateur se lit à l'inverse de S_i (les sensibles sont négatifs).
41. Hypothèse H8 : *Titlis préfère les milieux à fort potentiel* a été confirmée pour le rendement dans le chapitre IV.

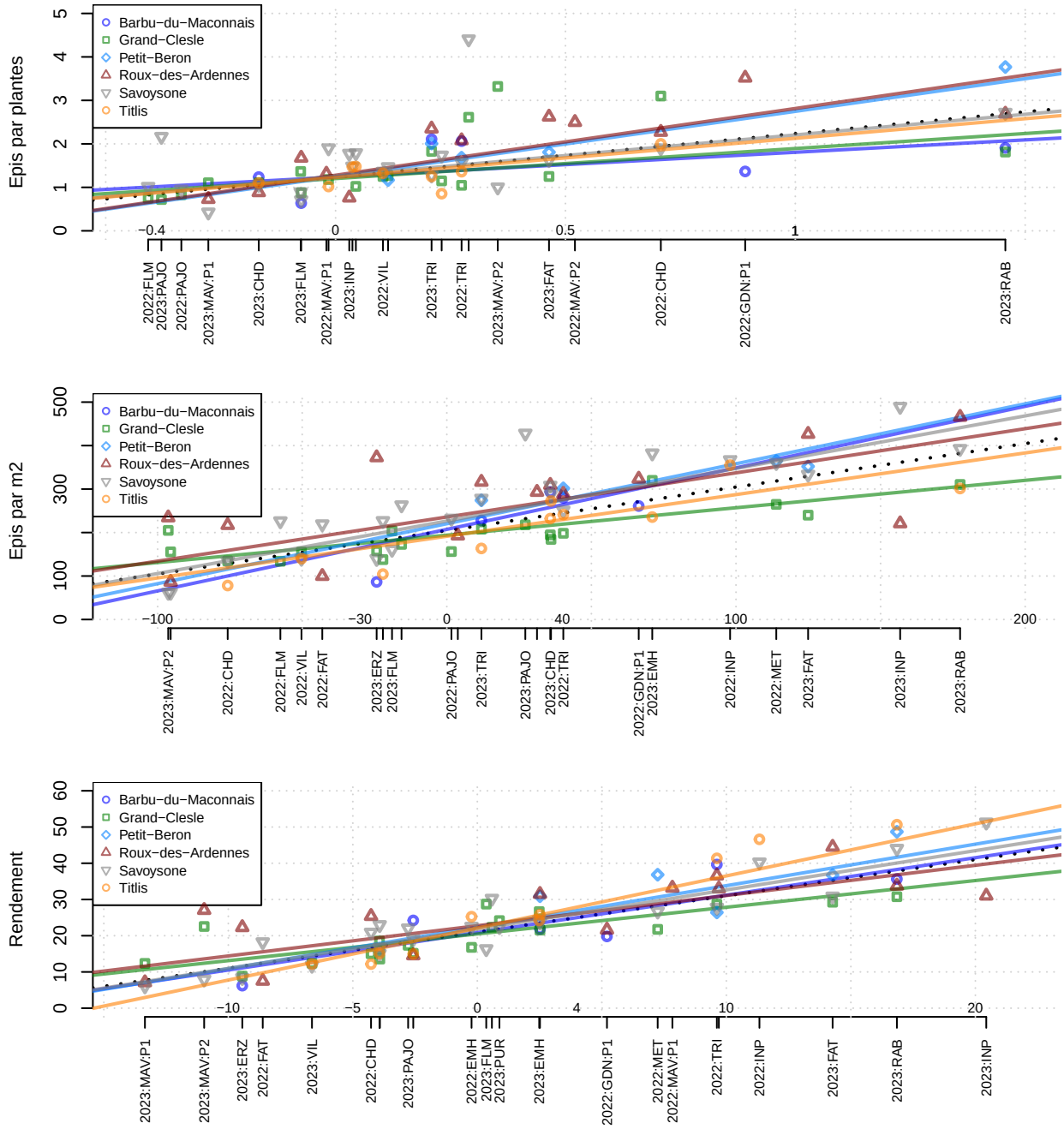


Figure V.7 – Représentation de l'ajustement des données de 6 variétés par le modèle de FWHs. En abscisse sont représentés les effets E_j et en ordonnées sont représentées les données observées. Les droites de couleurs correspondent à l'équation ajustée $Y_{ij} = G_i + E_j + S_i E_j$. La droite noire en pointillé correspond à l'équation $Y_{ij} = \mu_Y + E_j$.

2021).
Finalement la régression factorielle ne permettait pas d'identifier de grandes différences entre les variétés en termes de sensibilités aux stress. On peut identifier différents éléments d'explications à cela :

— Les indicateurs caractériseraient mal les stress spécifiques (déjà discuté précédemment).

— La spécificité des environnements de culture de chaque essai rend les comparaisons variétales entre essais difficiles. Ce phénomène a pour conséquence que le terme de sensibilité expliquera une part d'interaction $G \times E$ plus faible lorsque le nombre d'essais augmente. C'est ce qui a été constaté pour la sensibité de Finlay Wilkinson (S) où Brancourt-Hulmel et al. (1997) ont recensé 23 analyses : le terme S expliquait en moyenne 29% dans les études avec moins de 10 essais et en moyenne de 12% pour celles avec plus de 10 essais.

— le trop fort déséquilibre dans la base de données et des estimations de rendements et de composantes trop peu précises qui conduisent à des intervalles de crédibilités associées aux estimations trop larges pour différencier les variétés sur la base de leur sensibilité

V. 5 Conclusion du chapitre V

Dans ce chapitre nous avons testé une approche régression factorielle bayésienne pour analyser les données issues des deux années d'expérimentation de ma thèse, et nous l'avons comparée au modèle de Finlay et Wilkinson (FW). Nous avons testé comme co-facteurs 9 variables agroclimatiques, l'indice de verse, l'indicateur de maladies foliaires et l'indice de nutrition azoté.

La régression factorielle a permis retrouver les principaux facteurs impactant le rendement identifiés dans le chapitre IV. Dans notre réseau d'essais, les stress correspondants apparaissent assez tôt dans le cycle cultural (dès la montaison). Cette méthode permet de quantifier l'impact des stress sur les traits d'intérêt, mais contrairement au diagnostic agronomique participatif, elle ne permet pas :

1. d'identifier l'ensemble des stress spécifiques à chaque essai car la régression factorielle ne peut détecter que les stress expliquant de fortes variations des traits sur le réseau d'essais, c'est-à-dire des stress qui ont un impact fort et dont l'intensité varie beaucoup sur le réseau. Ce qui exclue bien souvent des stress peu présents mais ayant impacté le rendement dans seulement un ou quelques essais (parfois de manière très forte comme cela a été le cas pour le Rayonnement méiose chez CHD 23 ou PAJ 23). Par ailleurs, la régression factorielle considère aussi le facteur comme indiquant le niveau de stress (la modélisation du indicateur de stress serait faible et son impact sur le peuplement ne dépendrait pas de l'environnement) ce qui est discutable.
2. de remettre en question les valeurs de l'indicateur (comme pour l'INN). Ceci est le corollaire du premier point.
3. de prendre en compte d'autres facteurs que ceux initialement calculés.

Ces deux méthodes nous paraissent complémentaires. Le diagnostic permet une compréhension fine de l'élaboration du rendement dans un essai et l'identification des stress s'étant produits et ceci en intégrant l'expertise paysanne. En plus, il permet

une analyse de vérifier des hypothèses sur sensibilités variétales issues des paysan.nes. Alors que les méthodes statistiques présenté dans ce chapitre amènent plus de rigueur dans les analyses. Nous aurions aimé davantage combiner les deux approches, par exemple en utilisant à la place d'indicateurs du milieu la qualification binaire issue du diagnostic agronomique participatif (stressé - pas stressé) pour les principaux stress identifiés.
Ce chapitre a permis d'identifier deux méthodes robustes pour analyser les réponses des variétés paysannes à l'échelle d'un réseau d'essais à la ferme. En effet, les adaptations statistiques — hiérarchisation des paramètres et utilisation de la loi de Student pour prendre en compte les résidus extrêmes — ont été validées pour le modèle de Finlay-Wilkinson et la régression factorielle. Ces adaptations mettent en évidence qu'il est possible :

1. que les conduites de culture soient choisies par les expérimentateur.rices en particulier les paysans et paysannes qui sont intéressé.es pour analyser les réponses des variétés dans des environnements de culture qui ont du sens dans leur contexte.
2. de caractériser les variétés pour leur performance moyenne, leur sensibilité au potentiel de l'environnement (ensemble du chapitre V) et leur stabilité (Turbet Delof et al., 2024) dans des dispositifs où les données sont fortement incomplètes, car le choix des variétés est fait dans un processus de sélection participative et que les expérimentateurs locaux ne s'intéressent pas nécessairement aux mêmes variétés.
3. que les répétitions au sein des essais soient réduites pour permettre de tester davantage de variétés pour un même effort expérimental.
4. d'estimer l'impact d'un stress bien que le réseau d'essai ne soit pas dédié à l'étude de ce stress [42]. C'est en tout cas l'objectif de la régression factorielle dont les tendances à l'échelle des environnements ont été corroborées par le diagnostic agronomique participatif (Chapitre IV). Les tendances pour expliquer l'interaction $G \times E$ ont été moins marquées mais sont encourageantes.

Cette méthode a pu être confrontée à l'analyse plus complète du diagnostic agronomique participatif. Cela a permis d'aider à l'interprétation des résultats des modèles en gardant le lien avec les contextes agronomiques des essais.
Les sensibilités variétales issues du modèle de régression factorielle sont très peu utilisées dans la littérature (on peut tout de même citer Lecomte et al., 2009) alors qu'elles permettent de faire le lien entre génétique et agronomie. En effet les articles relatifs à la régression factorielle ne cherchent que très rarement une sensibilité à un stress spécifique. En général des variables dites *synthétiques* sont calculées à partir des indicateurs du milieu [43] puis la régression factorielle est réalisée sur ces variables synthétiques (Brancourt-Hulmel et al., 1999 ; Piepho, 2022). Cette méthode permet de pouvoir prendre en compte un grand nombre de facteurs mais ne permet pas d'identifier d'adaptation variétale à des stress spécifiques.

42. Par exemple lorsque qu'une pratique est testée en plus des variétés sur le réseau d'essai.
43. Le plus souvent, elles sont calculées par une analyse en composante principale.

L'homme n'exprime vraiment ce qu'il est qu'en produisant un objet par son travail, et l'objet produit exprimera l'individualité de l'homme ; il sera "son prolongement objectif et tangible".

Jacques Ellul

Chapitre VI

Discussion générale

VI. 1 Une vision intégrée de la sélection des plantes à la ferme

Ma thèse s'est intéressée aux pratiques de sélection paysanne à la ferme et aux comportements des variétés qui en résultent. Bien que les acteur.rices concerné.es par ces pratiques et ces variétés soient minoritaires dans le paysage agricole français, ils proposent une vision de la sélection des plantes singulière et cohérente car directement

intégrée dans des systèmes agricoles et alimentaires spécifiques. Cette thèse a documenté les pratiques de sélection paysanne et leurs liens avec les systèmes de production dans lesquels elles sont mises en œuvre ou auxquels elles participent, et elle a contribué à enrichir la caractérisation des variétés au travers d'une description explicite des environnements dans lesquels elles sont créées, multipliées, testées et sélectionnées. Ce faisant, ce travail de thèse en lien étroit avec les paysans et associations, propose des méthodes adaptées aux contextes de la sélection paysanne, qui combinent diagnostic agronomique, participation des praticiens et praticiennes et analyses statistiques.

Nous avons montré dans le chapitre III que les dix systèmes de production agricole intégrant des pratiques de sélection paysanne étaient particuliers : ils sont tous en AB, majoritairement en polyculture-élevage, avec de nombreux ateliers de production et beaucoup de valorisation en circuit court. Nous avons identifié de nombreuses motivations pour se réapproprier les blés paysans qu'elles soient d'ordre économique (répondre à des demandes territorialisées...), agronomique (meilleur comportement dans le système de culture...) mais aussi d'ordre plus personnel (curiosité, recherche de sens à son métier, revendication politique...). Les pratiques de sélection paysanne identifiées dans ce travail sont toujours liées aux autres pratiques agricoles de la ferme, telles que la conduite culturale ou la valorisation des produits. Ces liens permettent une adaptation des variétés paysannes aux pratiques de production mais ce sont aussi parfois ces variétés paysannes qui permettent une adaptation/évolution des pratiques de production.

Du point de vue de l'agronomie systémique, un apport important de ce travail est d'avoir montré que la sélection paysanne est une pratique agricole au même titre que les pratiques d'affectation du sol, les pratiques culturales ou les pratiques de valorisation de la production à la ferme. La sélection dans le cadre des productions végétales est aujourd'hui souvent considérée comme extérieure à la ferme alors que ce n'est pas le cas en production animale (Landais et al., 1988). L'omission de ce grand groupe de pratiques agricoles fait écho à la difficulté que rencontrent la recherche et les politiques agricoles qui s'intéressent à l'agriculture paysanne « *d'appréhender pleinement la présence, l'importance, les problèmes et les potentiels des paysanneries d'aujourd'hui* » (Ploeg, 2014). Une fois ces pratiques reconnues, il est nécessaire de les étudier pour identifier et évaluer le levier qu'elles représentent pour répondre à un certain nombre de problèmes agronomiques et économiques des systèmes de production végétale. Il ne faut néanmoins pas oublier que ces pratiques de sélection paysanne par nature réclament un investissement plus important que d'autres pratiques agricoles, car elles sont généralement liées à de fortes motivations personnelles, sont mises en œuvre sur plusieurs années et généralement dans le cadre d'une démarche collective.

Un attendu de la sélection décentralisée est de permettre une meilleure adaptation de la variété sélectionnée à son environnement de culture, mais pour autant cet environnement de culture est aujourd'hui peu étudié dans ce contexte de sélection. Le chapitre IV a cherché à comprendre les champs où sont cultivés les blés paysans

en dépit de leur complexité intrinsèque. Pour cela nous avons proposé une démarche dans laquelle les connaissances des praticiens et les connaissances issues de la méthode de diagnostic agronomique "classique" (Meynard et David, 1992 ; Rapidel et al., 2006) sont hybridées. La principale force de cette méthode réside dans sa capacité à identifier les stress à l'échelle de l'essai grâce à une prise en compte minutieuse du contexte spécifique et une confrontation constructive du point de vue de l'expérimentateur.rice et de celui de l'agronome accompagnant.e. Le diagnostic agronomique classique a pu confirmer ou modifier l'expertise des expérimentateurs, tandis que ces derniers ont remis en question certains aspects de la méthode (par exemple par une analyse critique des indicateurs du milieu) et apporter de nombreuses connaissances pertinentes (d'un côté les expérimentateur.rices ont complété le modèle par des indicateurs nouveaux non initialement inclus dans le modèle conceptuel de l'agronome et d'un autre côté, les expérimentateur.rices ont formulé des hypothèses sur les variétés).

En outre, ce chapitre a proposé une méthode originale pour valider les hypothèses sur l'adaptation spécifique des variétés aux stress, bien que des améliorations pour plus de robustesse soient envisagées.

Cependant, nous avons identifié trois principales difficultés à généraliser ce type d'approche i) les moyens nécessaires à la mise en place et au maintien d'interactions fortes et régulières entre les expérimentateurs et l'équipe de recherche, ii) la relative lourdeur du protocole rendant difficile sa réutilisation par les organismes de développement agricole ou les animateurs et animatrices des collectifs paysans et iii) la nécessité d'analyser rapidement une grande quantité de données hétérogènes pour la création des rapports qui sont le support du diagnostic hybride.

Le chapitre V a proposé plusieurs développements statistiques pour évaluer les variétés testées dans des essais à la ferme à l'échelle d'un réseau et ainsi obtenir des estimations de performances moyennes plus robustes et des réponses à différents contextes de productions des variétés paysannes. Ces méthodes permettent de valoriser des réseaux d'essais où les variétés sont peu répétées au sein des essais et où ce sont les paysans et paysannes qui choisissent les variétés à tester (et ainsi des données fortement incomplètes). Cette adaptation des méthodes statistiques aux caractéristiques des objets qu'elles analysent est nécessaire, car comme présenté en introduction (sous-partie I. 3.3), l'analyse statistique doit rester un moyen pour interpréter les réponses des variétés (ici l'évaluation des variétés en milieu paysan) et non une fin qui conditionne les questions de recherche et les dispositifs qui y sont associés (Eden, 1935 et pour un exemple d'une analyse réflexive sur les méthodes GWAS voir Tam et al., 2019).

VI. 2 Différentes approches de l'environnement des variétés paysannes

Les démarches utilisées durant la thèse vont de l'agronomique systémique (chapitre III) à l'agronomie analytique (Chap. V) en passant par un mélange des deux

approches [1] (chapitre IV). Ce cheminement m'a permis de passer progressivement d'une posture compréhensive des systèmes complexes (ici l'étude des pratiques de sélection paysanne en lien avec le fonctionnement des fermes) à une posture finalisée par l'évaluation d'un objet d'étude dans un nombre réduit de dimensions (la comparaison des variétés pour quelques performances).

La notion d'environnement a été fortement structurante pour ces trois chapitres de thèse mais de façon très différente entre chapitres. Dans le chapitre III nous nous sommes intéressés à l'*environnement associé* aux pratiques de sélection paysanne que nous avons considérées comme constituées de nombreux éléments hétérogènes : i. les grands objectifs des fermes (environnement des finalités), ii. les autres pratiques associées à la production de blé paysan (environnement technique) iii. les principaux stress affectant les blés paysans sur la ferme (environnement pédo-climatique) et iv. les organismes de développement et de recherche favorisant les pratiques de sélection paysanne (environnent de connaissance et d'interconnaissances).
Dans le chapitre IV, l'environnement considéré dans chaque diagnostic hybride est l'environnement de culture d'un essai de variétés paysannes dans une parcelle donnée et une année donnée [2]. Bien que réduit par rapport à l'environnement associé aux pratiques de sélections paysannes (Chap. III), cet environnement cultivé reste complexe (Doré et Meynard, 2006). Nous avons donc proposé une méthode de diagnostic agronomique originale pour tenir compte de cette complexité tout en gardant pour finalité l'identification des principaux stress impactant le rendement.

Dans le chapitre V, l'environnement se réduit à des termes quantitatifs qu'ils soient sous la forme d'indicateurs du milieu ou d'estimations de termes environnementaux. Cette vision réduite de l'environnement permet de quantifier une part de l'incertitude associée à l'environnement de culture et de réaliser des prédictions dans des nouveaux environnements de culture.

La notion d'adaptation aux environnements de culture a fortement structuré la thèse. Le chapitre III a mis en évidence des objectifs et des pratiques de sélection paysanne visant une bonne intégration dans le fonctionnement de chaque ferme. Cette bonne intégration comprend la recherche d'une adaptation locale du comportement de la variété aux environnements de culture et une adéquation aux pratiques de valorisation à la ferme (sélection pour les qualités en transformation, mise en valeur du travail de sélection paysanne à travers des visites d'essais...). Alors que c'est l'une des finalités de la sélection paysanne, les chapitres IV et V n'ont pas cherché à évaluer les variétés pour l'adaptation locale [3]. Nous avons plutôt cherché à enrichir la connaissance des adaptations des variétés à des stress spécifiques, en faisant l'hypothèse que cela permettrait d'expliquer l'adaptation locale et aussi probablement d'aider les paysans à

1. Le diagnostic agronomique "classique" est considéré comme un mélange des deux approches par Landais et al. (1988)

2. Cet environnement de culture peut être considéré comme un élément des points ii) et iii) de l'environnement associé aux pratiques de sélections paysannes.

3. Car les méthodes pour estimer l'adaptation locale sont lourdes et présentent plusieurs limites (voir par exemple Frank et al. (2020) pour un cas d'étude et une réflexion critique).

choisir les variétés qu'ils aimeraient expérimenter chez eux. Nous faisons l'hypothèse que les variétés ayant des tolérances aux stress qui sont fréquents sur une ferme donnée pourraient être adaptées à cette ferme. Pour cela il faut être capable d'identifier les principaux stress qui s'expriment dans les fermes (chapitre IV) et d'avoir une méthode robuste pour estimer l'adaptation spécifique des variétés à partir des essais réalisés chaque année par les paysan.nes (chapitre V). Nous nous sommes servis du diagnostic pour identifier les stress à considérer dans l'analyse des réponses variétales mais en gardant pour proxi les indicateurs quantitatifs proposés par la littérature scientifique. Or nous avons vu dans le chapitre IV que pour plusieurs de ces indicateurs, les valeurs proposées n'apparaissaient pas pertinentes à l'expérimentateur qui arrivait à des conclusions non cohérentes avec les valeurs de l'indicateur. Ainsi, il aurait été possible et probablement pertinent de considérer pour l'analyse du comportement des variétés la catégorisation des essais issus du diagnostic participatif en 2 groupes "essais stressés" vs "essais non stressés". En effet, nous pensons qu'avant de pourvoir comparer les essais sur la base d'indicateurs quantitatifs, il est nécessaire de valider la présence de ces stress. En considérant des variables qualitatives à 2 niveaux ("stressés" vs "non stressés"), nous perdrons peut-être en finesse dans la qualification du niveau des stress mais nous gagnerons probablement en justesse et nous offrirons aux expérimentateurs et expérimentatrices une information en phase avec leurs appréciations des essais.

Comme Leclère et al. (2023) qui ont mis en œuvre une démarche participative pour développer une filière Cameline dans le Nord de la France avec un rôle important des connaissances locales (Leclère et al., 2018), cette thèse souligne que l'intégration des connaissances des praticiens et praticiennes est cruciale pour une recherche agronomique juste et innovante (Méndez et al., 2013).

Enfin ma thèse a été fortement structurée par la notion d'expérimentation. En utilisant les concepts de situation expérimentale (sur le court terme) et d'itinéraire d'expérimentation (sur le long terme Catalogna et al., 2018, 2022) le chapitre III a montré l'importance de l'expérimentation en champs d'essai et en test de valorisation de la production pour la sélection paysanne. Nous avons vu qu'il pouvait y avoir de fortes interactions entre les essais de variétés paysannes et les projets de recherche-action participative et cela a été le cas avec les deux années d'expérimentation dans le cadre de ma thèse. Chantre (2013) a identifié ce que l'expérimentation collective apportait aux agricuteur.rices :

— acquisition de références locales solides en répétant des tests dans des environnements pédoclimatiques similaires,

— apprendre des méthodes expérimentales et gagner confiance en leur capacité à tester des changements sur leur ferme,

— favoriser leur autonomie et créer des liens sociaux entre eux, ce qui peut contribuer à une dynamique territoriale

Les échanges avec les expérimentateurs et expérimentatrices ont été nombreux dans le cadre de ma thèse. Il reste tout de même à réaliser un bilan de l'expérimentation afin d'évaluer cette expérimentation collective et en particulier discuter les trois points proposées par Chantre (2013).

VI. 3 Liens entre les pratiques de sélection paysanne et l'expérimentation

Le chapitre III a montré deux grands groupes de paysan.nes en fonction des pratiques de sélection paysanne mises en œuvre, un premier groupe (groupe 1) recherche les variétés les mieux adaptées à leurs contextes parmi les variétés paysannes existantes et un second groupe (groupe 2) a pour objectif de développer à la ferme la ou les variétés qui répondront à leurs attentes. Pour ces deux groupes, les apports liés aux méthodes et aux résultats de l'expérimentation de ma thèse seront sans doute différents.

Pour le groupe 1, le principal intérêt du diagnostic agronomique est d'identifier les stress les plus fréquents sur la ferme pour ensuite choisir les variétés les plus adaptées en s'appuyant sur l'information issue d'une analyse du réseau d'essais dans lesquels ces stress sont caractérisés comme proposé dans le chapitre V par exemple. Pour le groupe 2, en plus de cet intérêt, ils ont besoin d'identifier les stress auxquels leurs variétés sont soumises annuellement lorsqu'elles sont cultivées car ces stress vont contribuer à les faire évoluer [4]. Les stress environnementaux ou facteurs environnementaux auxquels les variétés sont soumises sont donc un élément de caractérisation de celles-ci. C'est par exemple illustré par l'hypothèse H4 : *Petit-Béron est adapté aux terres riches (son terroir d'origine)*. Si le diagnostic agronomique participatif était répété plusieurs années sur une même ferme cela permettrait de pouvoir mieux caractériser les variétés à la fois par les informations sur les environnements de culture ayant façonné la variété (par exemple la variétés a été soumise à tels stress sur X années) et à la fois par la capacité des expérimentateur.rices à vérifier que la variété se comporte bien en dépit de ces stress.

Le chapitre III a montré que certaines variétés paysannes étaient très diversifiées et pouvaient évoluer rapidement dans les fermes comme l'a montré l'exemple de Savoyon issu de Savoysone par multiplication et sélection dans la ferme de MAV (Fig III.4). Néanmoins dans le chapitre IV et V, les variétés sont considérées comme "fixées". En effet, différentes origines de semences ayant le même nom de variété sont regroupées ensemble dans l'analyse. Nous ne prenons pas en compte les possibles évolutions génétiques de ces populations. Les prendre compte nécessiterait de mettre en œuvre des modèles de génétique quantitative estimant les apparentements à partir des histoires des lots de semences (mélanges, croisements, sélections, échanges de semences, division des lots,...) et du calcul des pedigrees entre ces lots. Cette méthode serait le pendant génétique dans l'histoire de la variété, à la caractérisation des environnements dans lesquels elle a été cultivée.

4. Dans une moindre mesure cet intérêt concerne aussi le groupe 1 car la plupart des variétés paysannes ont une diversité intra-variétale forte et peuvent évoluer.

VI. 4 Retour sur la méthode

Étant donné que nos questions de recherche étaient finalisées, nous avons évité les méthodes exploratoires (comme l'analyse de composantes principales). Ces dernière permettent de résumer de grandes quantités d'information et aide à formuler des hypothèses. Nous avons plutôt utilisé des méthodes permettant de vérifier des hypothèses *a priori* que ce soit dans le cadre de l'analyse des enquêtes ou du diagnostic agronomique. Je pense si l'on veut aller loin dans la compréhension, il est nécessaire de s'appuyer sur des connaissances *a priori* quitte à revenir dessus à la fin de l'étude. La notion de boucles itératives d'apprentissage est au cœur de la démarche pas-à-pas en agronomie (Meynard et al., 2023).

Le seul chapitre qui ne s'est pas fortement appuyé sur l'information d'*a priori* est le chapitre V. Néanmoins l'un des intérêts des méthodes bayésiennes est de pouvoir facilement intégrer cette information à l'aide de distributions *a priori*[5]. Cette thèse a permis de créer de nombreuses références pouvant être utilisées comme *a priori* dans ce type d'analyse statistique. Par exemple, il serait possible d'utiliser un prior informatif sur la sensibilité au potentiel de l'environnement d'une variété ayant fait l'objet d'une première caractérisation afin d'améliorer les modèles comme le font (Cotes et al., 2006).

VI. 5 Retour sur la dimension participative de la thèse

Cette thèse a été participative principalement dans sa démarche expérimentale et dans le diagnostic agronomique des essais. En effet, l'initiative de l'enquête a été prise par l'équipe de recherche, de même que le choix et la réalisation des analyses statistiques. Les échanges bilatéraux entre les expérimentateur.rices et l'équipe de recherche ont été prédominants par rapport à la dynamique collective du groupe (Fig VI.1). En effet, les 3 sorties terrains par campagne pour les mesures dans les essais et les entretiens téléphoniques (au total environ 4h30 d'entretien téléphonique par expérimentateur.rice) ont structuré fortement les échanges. À cause de l'éloignement géographique entre fermes et des contraintes de travail, nous avons eu du mal à mettre en place une dynamique collective.

Il reste encore à présenter et discuter de l'ensemble des résultats de ma thèse avec le groupe et ainsi pouvoir réaliser un bilan sur cette collaboration.

Ma posture d'accompagnement s'est inspirée de la démarche d'agronomie clinique (Kockmann et al., 2019). Celle-ci nous a permis de créer un espace de dialogue entre les expérimentateur.rice et l'équipe de recherche autour de la situation singulière de l'essai paysan. Cette posture n'a pas été seulement "extractive[6]" en mobilisant les

5. Dans le chapitre V nous avons utilisé des priors peu informatifs qui apportent une information négligeable par rapport aux données.

6. Bien que le chapitre III soit davantage "extractiviste".

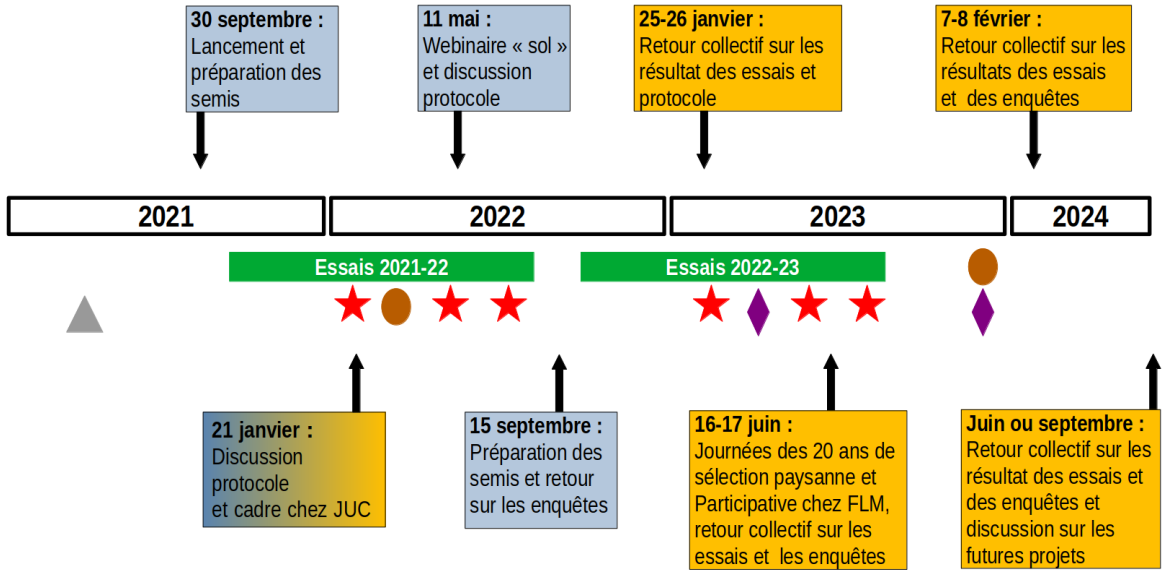


Figure VI.1 – Réunions collectives et échanges bilatéraux dans le cadre de la thèse. Les étoiles rouges correspondent aux sorties terrains sur les parcelles de l'équipe de recherche, le triangle gris aux visites de ferme pour discuter en amont du projet, les ronds marrons aux enquêtes sur les pratiques de sélection paysannes et les losanges violets aux diagnostics hybrides des expérimentations. En bleu (resp. en jaune) sont représentés les réunions collectives en distanciel (resp. en présentiel).

connaissances des expérimentateur.rices au service de la recherche mais mon objectif était clairement de travailler dans une logique de réciprocité. Un enrichissement mutuel du diagnostic était visé par confrontation de connaissances. Cette démarche permet une hybridation des diagnostics des paysan.nes et de l'agronome accompagnant.e et ainsi un apprentissage partagé.

Cette démarche utilisée en recherche est exigeante car elle demande de pouvoir échanger à la fois avec le monde des praticien.nes et avec celui le monde académique. Ce double échange permet ensuite d'atteindre une double validité de la méthode. Nous avons vu par exemple que l'évaluation par les praticien.nes a permis de remettre en question certains aspects de notre méthode. L'évaluation par le monde académique jugera si notre démarche est cohérente et permettra d'en avoir une critique constructive.

Cerf (2011) propose d'associer la recherche-action participative avec la valeur non-épistémique [7] du *care* [8]. Je pense que cette valeur a influé sur notre manière d'interagir en particulier durant l'expérimentation. Cela s'est traduit par exemple par :

1. Le temps avant l'expérimentation pour prendre compte les besoins et créer de l'interconnaissance.
2. La création d'un cadre de bon fonctionnement à la collaboration et des ajustement dans le protocole en fonction des besoins (comme par exemple la proposi-

7. Valeur reconnue comme non indispensable pour la production de connaissance cf introdution sous-partie I. 5.2.
8. Qui peut se traduire de l'anglais comme l'attention à l'autre.

tion d'aide de l'équipe de recherche pour les semis et les récolte).

3. La reconnaissance du travail de recherche des expérimentateur.rices en prévoyant une part du budget de l'expérimentation pour dédommager leur travail [9]
4. Une attention particulière aux temps privilégiés avec les expérimentateur.rices pour échanger de manière informelle (goûters, repas...).

De la valeur du *care* découle une préoccupation de ce qu'il advient du changement que la recherche a potentiellement contribué à produire. Cette valeur dans notre cas nous demande de rester vigilant sur l'impact de ce type de collaboration et se poser des questions comme : « Dans quelle mesure peut-on faire confiance aux résultats du réseau d'essais pour choisir une variété ? » « Est-ce que les variétés diffusées dans le groupe seront bien utilisées selon le cadre [10] que nous avons collectivement mis en place ? »

Le collectif Mètis qui était une des associations qui a collaboré à la thèse propose deux autres valeurs non-épistémiques pour la recherche liée à la sélection paysanne Mètis (2023) : que celle-ci soit conviviale et simple. Selon Illich et al. (1973), la recherche est conviviale si la recherche « est au service de la personne intégrée à la collectivité, et non au service d'un corps de spécialistes. Conviviale est la société où l'homme contrôle l'outil ». Ce qui exige que la recherche académique se mette à disposition de la société civile [11] pour répondre à certains enjeux sociétaux. Une recherche simple est une recherche qui peut facilement être mise en œuvre. Je pense que notre recherche a été conviviale mais n'a pas été simple. La partie expérimentation a utilisé des protocoles assez lourds pour réaliser le diagnostic agronomique. Par exemple, on peut se demander si la mesure de l'indice de nutrition azoté serait réalisable en routine [12] et si ce type de données serait facilement interprétable à la ferme ? Il reste de nombreux enjeux pour la recherche en agronomie "clinique".

9. Même si cette part reste encore symbolique par rapport au temps de travail sur ces essais.
10. Nous avons décidé que si quelqu'un désirait une variété issue d'un travail de sélection paysanne, il devait demander l'accord directement auprès du paysan l'ayant développé.
11. C'est à dire que la recherche académique serait orientée par la société civile (représentée par des associations) contrairement à une recherche colbertiste orientée par les besoins de l'état, d'une recherche libérale orientée par les besoins de grandes entreprises et de la recherche fondamentale orientée par la curiosité scientifique.
12. Cet indicateur est plutôt lourd à mesurer, puisqu'il nécessite de réaliser une pesée de la biomasse aérienne et une analyse de teneur en azote des plantes.

Références

Références

Abay, F, A Waters-Bayer et Å Bjørnstad (juin 2008). « Farmers' Seed Management and Innovation in Varietal Selection: Implications for Barley Breeding in Tigray, Northern Ethiopia ». In : *AMBIO: A Journal of the Human Environment* 37.4. Publisher: Royal Swedish Academy of Sciences, p. 312-320. ISSN : 0044-7447, 1654-7209. DOI : 10.1579/0044-7447(2008)37[312:FSMAII]2.0.CO;2.

Abdourahamane Harouna, M, I Baoua, MM Rabe, AA Saidou, L Amadou et M Tamo (2020). « Étude diagnostique des principales contraintes de la culture du niébé (Vigna unguiculata L. Walp) dans les régions de Maradi et Zinder au Niger ». In : *Afrique Science* 16 (5), p. 1-12.

Adu, GB, B Badu-Apraku, R Akromah, IK Amegbor, DS Adogoba, A Haruna, KA Manigben, PA Aboyadana et AN Wiredu (2021). « Trait profile of maize varieties preferred by farmers and value chain actors in northern Ghana ». In : *Agronomy for sustainable development* 41. ISBN: 1774-0746 Publisher: Springer, p. 1-15.

Affholder, F, E Scopel, J Neto et A Capillon (2003). « Diagnosis of the productivity gap using a crop model. Methodology and case study of small-scale maize production in central Brazil ». In : *Agronomie* 23.4, p. 305-325.

Afzal, F, SK Chaudhari, A Gul, A Farooq, H Ali, S Nisar, B Sarfraz, KJ Shehzadi et A Mujeeb-Kazi (2015). « Bread wheat (Triticum aestivum L.) under biotic and abiotic stresses: An overview ». In : *Crop production and global environmental issues*, p. 293-317.

Agreste (2020). *Enquête pratiques culturales en grandes cultures et prairies 2017 - Principaux résultats*.

Albert, CH, F Grassein, FM Schurr, G Vieilledent et C Violle (20 sept. 2011). « When and how should intraspecific variability be considered in trait-based plant ecology? » In : *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics* 13.3, p. 217-225. ISSN : 1433-8319. DOI : 10.1016/j.ppees.2011.04.003.

Allaby, RG, DQ Fuller et TA Brown (16 sept. 2008). « The genetic expectations of a protracted model for the origins of domesticated crops ». In : *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105.37, p. 13982-13986. ISSN : 0027-8424, 1091-6490. DOI : 10.1073/pnas.0803780105.

Allen, FL, RE Comstock et DC Rasmusson (1978). « Optimal Environments for Yield Testing 1 ». In : *Crop Science* 18.5. ISBN: 0011-183X Publisher: Wiley Online Library, p. 747-751.

Altieri, MA (1995). « Agroecology ». In : *The Scientific Basis of Alternative Agricultnre* 5.

Altieri, MA (2012). « Convergence or Divide in the Movement for Sustainable and Just Agriculture ». In : *Organic Fertilisation, Soil Quality and Human Health*. Sous la dir. d'E Lichtfouse. T. 9. Series Title: Sustainable Agriculture Reviews. Dordrecht : Springer Netherlands, p. 1-9. ISBN : 978-94-007-4112-6 978-94-007-4113-3. DOI : 10.1007/978-94-007-4113-3_1.

Références

Altieri, MA et CI Nicholls (2017). « Agroecology: a brief account of its origins and currents of thought in Latin America ». In : *Agroecology and Sustainable Food Systems* 41.3. ISBN: 2168-3565 Publisher: Taylor & Francis, p. 231-237.

Annicchiarico, P, E Chiapparino et M Perenzin (2010). « Response of common wheat varieties to organic and conventional production systems across Italian locations, and implications for selection ». In : *Field Crops Research* 116.3. ISBN: 0378-4290 Publisher: Elsevier, p. 230-238.

Aubry, C, A Biarnès, F Maxime et F Papy (1998). « Modélisation de l'organisation technique de la production dans l'entreprise agricole: la constitution de systèmes de culture du Bassin Parisien ». In : *Etudes et Recherches sur les Systèmes Agraires et le Développement*, p. 25-43.

Barbier, C (2023). « Ce que la boulangerie paysanne révèle d'un autre rapport au vivant.«L'art de piloter» les entités et matérialités ». In : *Socio-anthropologie* 48. ISBN: 9791035109066 Publisher: Publications de la Sorbonne, p. 91-104.

Bates, D, M Maechler, B Bolker, S Walker, RHB Christensen, H Singmann, B Dai, G Grothendieck, P Green et MB Bolker (2015). « Package 'lme4' ». In : *convergence* 12.1, p. 2.

Becker, HC et J Leon (1988). « Stability analysis in plant breeding ». In : *Plant breeding* 101.1. ISBN: 0179-9541 Publisher: Blackwell Publishing Ltd Oxford, UK, p. 1-23.

Becker, T (2000). « Participatory research in the CGIAR – a discussion paper ». In : NGO-workshop "food for all – farmer first in research".

Bellon, F (2022). « Dynamique des relations entre agriculture biologique et recherche agronomique française : le cas de l'Inra ». In : *La fabrique de l'agronomie : De 1945 à nos jours*. QUAE, p. 312-316. isbn : 978-2-7592-3752-4.

Bennett, D, A Izanloo, J Edwards, H Kuchel, K Chalmers, M Tester, M Reynolds, T Schnurbusch et P Langridge (2012). « Identification of novel quantitative trait loci for days to ear emergence and flag leaf glaucousness in a bread wheat (Triticum aestivum L.) population adapted to southern Australian conditions ». In : *Theoretical and Applied Genetics* 124. ISBN: 0040-5752 Publisher: Springer, p. 697-711.

Benoit, M et F Knittel (2017). « Une brève histoire de l'agronomie clinique depuis le XIXème siècle. Trois pratiques de l'observation in situ : les conférences agricoles, les tours de plaine et les ateliers Terrain ». In : *Agronomie, Environnement & Sociétés* 7.2, p. 13.

Berthet, ET, S Bosshardt, L Malicet-Chebbah, G van Frank, B Weil, B Segrestin, P Rivière, L Bernard, E Baritaux et I Goldringer (jan. 2020). « Designing Innovative Management for Cultivated Biodiversity: Lessons from a Pioneering Collaboration between French Farmers, Facilitators and Researchers around Participatory Bread Wheat Breeding ». In : *Sustainability* 12.2. Number: 2 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, p. 605. doi : 10.3390/su12020605.

Berthou, Y, A Capillon et JM Cordonnier (1972). *L'agriculture biologique: éléments de diagnostic à partir d'une enquête sur 40 exploitations*. Institut National Agronomique.

Besag, J et D Higdon (1999). « Bayesian analysis of agricultural field experiments ». In : *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)* 61.4. _eprint: https://rss.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/1467-9868.00201, p. 691-746. issn : 1467-9868. doi : 10.1111/1467-9868.00201.

Betran, FJ, D Beck, M Bänziger et GO Edmeades (2003). « Genetic analysis of inbred and hybrid grain yield under stress and nonstress environments in tropical maize ». In : *Crop science* 43.3. ISBN: 0011-183X Publisher: Wiley Online Library, p. 807-817.

Blanc-Pamard, C, JP Deffontaines et C Friedberg (1992). « Techniques et pratiques: à la jonction du naturel et du social ». In : *Sciences de la nature, sciences de la societé (M. Jollivet). CNRS Éditions, Paris*, p. 347-355.

Blum, A (1996). « Crop responses to drought and the interpretation of adaptation ». In : *Plant growth regulation* 20. ISBN: 0167-6903 Publisher: Springer, p. 135-148.

Bonneuil, C et E Demeulenaere (2007). « Une génétique de pair à pair? L'émergence de la sélection participative ». In : *Les sciences citoyennes. Vigilance collective et rapport entre profane et scientifique dans les sciences naturalistes*. Publisher: Ed. de l'Aube, p. 122-147.

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. ISBN: 1470-160X Publisher: Elsevier, p. 280-289.

Bonneuil, C et F Thomas (27 oct. 2009). *Gènes, pouvoirs et profits: Recherche publique et régimes de production des savoirs de Mendel aux OGM*. Google-Books-ID: NyKd7_qW5wcC. Editions Quae. 626 p. isbn : 978-2-7592-0161-7.

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. ISBN: 0167-8809 Publisher: Elsevier, p. 183-192.

Borg, J, LP Kiær, C Lecarpentier, I Goldringer, A Gauffreteau, S Saint-Jean, S Barot et J Enjalbert (2018). « Unfolding the potential of wheat cultivar mixtures: A meta-analysis perspective and identification of knowledge gaps ». In : *Field Crops Research* 221. ISBN: 0378-4290 Publisher: Elsevier, p. 298-313.

Boster, JS (1985). « Selection for perceptual distinctiveness: evidence from Aguaruna cultivars of Manihot esculenta ». In : *Economic Botany* 39. Publisher: Springer, p. 310-325.

Bradshaw, AD (1965). « Evolutionary significance of phenotypic plasticity in plants ». In : *Advances in genetics* 13. ISBN: 0065-2660 Publisher: Elsevier, p. 115-155.

Brancourt-Hulmel, M, V Biarnès-Dumoulin et JB Denis (1997). « Points de repère dans l'analyse de la stabilité et de l'interaction génotype-milieu en amélioration des plantes ». In : *Agronomie* 17.4. Publisher: EDP Sciences, p. 219-246. issn : 0249-5627. doi : 10.1051/agro:19970403.

Brancourt-Hulmel, M et C Lecomte (1994). « Sélection et stabilité du rendement chez le blé tendre d'hiver ». In : *Agronomie* 14, p. 611-625.

Brancourt-Hulmel, M, C Lecomte et JM Meynard (1999). « A diagnosis of yield-limiting factors on probe genotypes for characterizing environments in winter wheat trials ». In : *Crop science* 39.6. ISBN: 0011-183X Publisher: Wiley Online Library, p. 1798-1808.

Braun, HJ, S Rajaram et M Ginkel (1997). « CIMMYT's approach to breeding for wide adaptation ». In : *Adaptation in Plant Breeding: Selected Papers from the XIV EUCARPIA Congress on Adaptation in Plant Breeding held at Jyväskylä, Sweden from July 31 to August 4, 1995*. Sous la dir. de PMA Tigerstedt. Developments in Plant Breeding. Dordrecht : Springer Netherlands, p. 197-205. isbn : 978-94-015-8806-5. doi : 10.1007/978-94-015-8806-5_25.

Buntaran, H, J Forkman et HP Piepho (2021). « Projecting results of zoned multi-environment trials to new locations using environmental covariates with random coefficient models: accuracy and precision ». In : *Theoretical and Applied Genetics* 134. ISBN: 0040-5752 Publisher: Springer, p. 1513-1530.

Callon, M (1998). « Des différentes formes de démocratie technique ». In : *Les Cahiers de la Securite Interieure, 38, 4e trimestre*, p. 37-54.

Callon, M, Y Barthe et P Lascoumes (2001). *Agir dans un monde incertain. Essai sur la démocratie technique*. Média Diffusion. isbn : 2-02-115749-0.

Références

Camden, C et F Poncet (2014). « Recherche-action participative: nouvelles perspectives ». In : *Guide pratique de recherche en réadaptation—Méthodes, techniques et outils d'intervention*. Publisher: Éditions De Boeck/Solal, p. 383-421.

Cao, Z, K Stefanova, M Gibberd et S Rakshit (2022). « Bayesian inference of spatially correlated random parameters for on-farm experiment ». In : *Field Crops Research* 281, p. 108477.

Carlin, BP et NG Polson (1991). « Inference for nonconjugate Bayesian models using the Gibbs sampler ». In : *Canadian Journal of statistics* 19.4, p. 399-405.

Casagrande, M, C David, M Valantin-Morison, D Makowski et MH Jeuffroy (déc. 2009). « Factors limiting the grain protein content of organic winter wheat in south-eastern France: a mixed-model approach ». In : *Agronomy for Sustainable Development* 29.4, p. 565-574. issn : 1774-0746, 1773-0155. doi : 10.1051/agro/2009015.

Catalogna, M, M Dubois et M Navarrete (2018). « Diversity of experimentation by farmers engaged in agroecology ». In : *Agronomy for sustainable development* 38.5. ISBN: 1774-0746 Publisher: Springer, p. 50.

Catalogna, M, M Dunilac Dubois et M Navarrete (2022). « Multi-annual experimental itinerary: an analytical framework to better understand how farmers experiment agroecological practices ». In : *Agronomy for Sustainable Development* 42.2. ISBN: 1774-0746 Publisher: Springer, p. 20.

Cavalli-Sforza, LL (2002). « Demic diffusion as the basic process of human expansions ». In : *Examining the farming/language dispersal hypothesis. Cambridge: McDonald Institute for Archaeological Research*, p. 79-88.

Ceccarelli, S (1989). « Wide adaptation: how wide? » In : *Euphytica* 40. ISBN: 0014-2336 Publisher: Springer, p. 197-205.

— (1994). « Specific adaptation and breeding for marginal conditions ». In : *Breeding Fodder Crops for Marginal Conditions: Proceedings of the 18th Eucarpia Fodder Crops Section Meeting, Loen, Norway, 25–28 August 1993*. Sous la dir. d'OA Rognli, E Solberg et I Schjelderup. Developments in Plant Breeding. Dordrecht : Springer Netherlands, p. 101-127. isbn : 978-94-011-0966-6. doi : 10.1007/978-94-011-0966-6_15.

— (1996). « Adaptation to low/high input cultivation ». In : *Euphytica* 92. ISBN: 0014-2336 Publisher: Springer, p. 203-214.

Ceccarelli, S et S Grando (1991). « Selection environment and environmental sensitivity in barley ». In : *Euphytica* 57. ISBN: 0014-2336 Publisher: Springer, p. 157-167.

— (2020). « Participatory plant breeding: Who did it, who does it and where? » In : *Experimental Agriculture* 56.1. ISBN: 0014-4797 Publisher: Cambridge University Press, p. 1-11.

Ceccarelli, S, S Grando et M Baum (2007). « Participatory plant breeding in water-limited environments ». In : *Experimental Agriculture* 43.4. ISBN: 1469-4441 Publisher: Cambridge University Press, p. 411-435.

Cerf, M et M Sebillotte (1988). « Le concept de modele general et l'analyse de la prise de decision technique ». In : *CR Acad. Agric. Fr* 74.4, p. 71-80.

Cerf, M (2011). « Is participatory research a scientific practice? » In : *Journal of Rural Studies* 4.27. ISBN: 0743-0167, p. 414-418.

Cerf, M, V Parnaudeau et R Reau (2019). « Vers un diagnostic agronomique stratégique traitant de questions agro-environnementales ». In : *Agronomie, Environnement & Sociétés* 9.2, p. 27-37.

Cerf, MM et F Maxime (2006). « La coproduction du conseil: un apprentissage difficile ». In : *Conseiller en agriculture*. Sciences en partage. INRA éditions Educagri Editions, 137 à 152. isbn : 2-7380-1223-X.

Chantre, E (2011). « Apprentissages des agriculteurs vers la réduction d'intrants en grandes cultures: Cas de la Champagne Berrichonne de l'Indre dans les années 1985-2010. » Thèse de doct. AgroParisTech.

— (2013). « L'apprentissage Des Agriculteurs En Transition Agroenvironnementale ». In : *Pour* 3, p. 141-150.

Choy, BST et JSK Chan (2008). « Scale mixtures distributions in statistical modelling ». In : *Australian & New Zealand Journal of Statistics* 50.2, p. 135-146.

CoEx (2021). *Ébauche de manuel pour les projets collaboratifs sur les semences entre organisations paysannes et institutions de recherche.*

Colbach, N, S Cordeau, W Queyrel, T Maillot, J Villerd et D Moreau (2019). « Du champ virtuel au champ réel-ou comment utiliser un modèle de simulation pour diagnostiquer des stratégies durables de gestion des adventices et reconcevoir des systèmes de culture? » In : *Agronomie, Environnement & Sociétés* 9.2.

Costanzo, A, D Amos, C Bickler et A Trump (2021). « Agronomic and genetic assessment of organic wheat performance in England: a field-scale cultivar evaluation with a network of farms ». In : *Agronomy for Sustainable Development* 41.4. ISBN: 1774-0746 Publisher: Springer, p. 54.

Cotes, JM, J Crossa, A Sanches et PL Cornelius (2006). « A Bayesian Approach for Assessing the Stability of Genotypes ». In : *Crop Science* 46.6. _eprint: https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/, p. 2654-2665. issn : 1435-0653. doi : 10.2135/cropsci2006.04.0227.

Coutellec, L (2015a). *La science au pluriel: essai d'épistémologie pour des sciences impliquées*. Quae éditions. isbn : 2-7592-2398-1.

— (2015b). « Pour une philosophie politique des sciences impliquées ». In : *Ecologie politique* 51.2. ISBN: 1166-3030 Publisher: Presses de Sciences Po, p. 15-25.

Dagnelie, P (2008). « Le plan d'expérience évolue ». In : *Revue Modulad* 38, p. 13-36.

Danquah, EY et JA Barrett (2002). « Grain yield in composite cross five of barley: Effects of natural selection ». In : *The Journal of Agricultural Science* 138.2. ISBN: 1469-5146 Publisher: Cambridge University Press, p. 171-176.

Daudi, H, H Shimelis, M Laing, P Okori et O Mponda (2018). « Groundnut production constraints, farming systems, and farmer-preferred traits in Tanzania ». In : *Journal of Crop Improvement* 32.6. ISBN: 1542-7528 Publisher: Taylor & Francis, p. 812-828.

David, C, MH Jeuffroy, J Henning et JM Meynard (2005). « Yield variation in organic winter wheat: a diagnostic study in the Southeast of France ». In : *Agronomy for Sustainable Development* 25.2. Publisher: Springer Verlag/EDP Sciences/INRA, p. 213-223.

David, O, G van Frank, I Goldringer, P Rivière et M Turbet Delof (1er fév. 2020). « Bayesian inference of natural selection from spatiotemporal phenotypic data ». In : *Theoretical Population Biology* 131, p. 100-109. issn : 0040-5809. doi : 10.1016/j.tpb.2019.11.007.

Davidson, JA et MD Ramsey (2000). « Pea yield decline syndrome in South Australia: the role of diseases and the impact of agronomic practices ». In : *Australian Journal of Agricultural Research* 51.3. ISBN: 1444-9838 Publisher: CSIRO Publishing, p. 347-354.

Dawson, JC et I Goldringer (2012). « Breeding for genetically diverse populations: variety mixtures and evolutionary populations ». In : *Organic crop breeding*. Publisher: Wiley Online Library, p. 77-98.

De Bie, C (2004). « The yield gap of mango in Phrao, Thailand, as investigated through comparative performance evaluation ». In : *Scientia Horticulturae* 102.1. ISBN: 0304-4238 Publisher: Elsevier, p. 37-52.

Références

De Oliveira, Y, L Burlot, JC Dawson, I Goldringer, D Madi, P Rivière, D Steinbach, G van Frank et M Thomas (23 juill. 2020). « SHiNeMaS: a web tool dedicated to seed lots history, phenotyping and cultural practices ». In : *Plant Methods* 16.1, p. 98. issn : 1746-4811. doi : 10.1186/s13007-020-00640-2.

De Ponti, T, B Rijk et MK Van Ittersum (2012). « The crop yield gap between organic and conventional agriculture ». In : *Agricultural systems* 108. Publisher: Elsevier, p. 1-9.

DEAP (2010). *Compte rendu réunion ferme du Moulon, INRA,*

Demeulenaere, E, C Bonneuil, F Balfourier, A Basson, JF Berthellot, V Chesneau, H Ferté, N Galic, G Kastler, J Koenig, F Mercier, J Payement, A Pommart, B Ronot, Y Rousselle, N Supiot, H Zaharia et I Goldringer (2008). « Étude des complémentarités entre gestion dynamique à la ferme et gestion statique en collection ». In : p. 23.

Demeulenaere, É, P Rivière, A Hyacinthe, R Baltassat, S Baltazar, JS Gascuel, J Lacanette, H Montaz, S Pin et O Ranke (2017). « La sélection participative à l'épreuve du changement d'échelle. À propos d'une collaboration entre paysans sélectionneurs et généticiens de terrain ». In : *Natures Sciences Sociétés* 25.4. ISBN: 1765-2979 Publisher: Cairn/Softwin, p. 336-346.

Demotes-Mainard, S, G Doussinault et JM Meynard (1996). « Abnormalities in the male developmental programme of winter wheat induced by climatic stress at meiosis ». In : *Agronomie* 16.8, p. 505-515.

Denis, JB (1980). « Analyse de regression factorielle ». In : *Biom. Praxim* 20, p. 1-34.

Deytieux, V, C Vivier, S Minette, JM Nolot, S Piaud, A Schaub, N Lande, MS Petit, R Reau et L Fourrié (2012). « Expérimentation de systèmes de culture innovants: avancées méthodologiques et mise en réseau opérationnelle ». In : *Innovations agronomiques* 20, p. 49-78.

Donald, Ct (1968). « The breeding of crop ideotypes ». In : *euphytica* 17.3. ISBN: 0014-2336 Publisher: Springer, p. 385-403.

Doré, T et JM Meynard (2006). « Introduction (de la partie 1). » In : *L'agronomie aujourd'hui*. Synthèses (Quae). Editions Quae, 33 à 41.

Doré, T et S Bellon (2019). *Les mondes de l'agroécologie*. Quae. isbn : 2-7592-3003-1.

Doré, T, C Clermont-Dauphin, Y Crozat, C David, MH Jeuffroy, C Loyce, D Makowski, E Malézieux, JM Meynard et M Valantin-Morison (2008). « Methodological progress in on-farm regional agronomic diagnosis. A review ». In : *Agronomy for Sustainable Development* 28. ISBN: 1774-0746 Publisher: Springer, p. 151-161.

Doré, T, M Sebillotte et JM Meynard (juin 1997). « A diagnostic method for assessing regional variations in crop yield ». In : *Agricultural Systems* 54.2, p. 169-188. doi : 10.1016/S0308-521X(96)00084-4.

Dubcovsky, J et J Dvorak (2007). « Genome plasticity a key factor in the success of polyploid wheat under domestication ». In : *Science* 316.5833. ISBN: 0036-8075 Publisher: American Association for the Advancement of Science, p. 1862-1866.

Duc, G, A Barbottin, M Morison, MB Magrini, C Huyghe, J Abecassis, G Charmet, P Debaeke, A Schneider et MS Petit (2013). « Filières grandes cultures, chapitre 1 ». In : *Filières grandes cultures, chapitre 1, INRA (2013)-978-2-7380-1341-5*. Publisher: INRA.

Duru, M et JL Charpenteau (1981). « The farming system in the Pyrenees: a model of the constitution and utilisation of hay stocks ». In : *Agricultural systems* 7.2. ISBN: 0308-521X Publisher: Elsevier, p. 137-156.

Eden, T (1935). « The development of field experiments in agricultural research. » In : *The Trop. Agriculturist.*

Elias, M, D McKey, O Panaud, MC Anstett et T Robert (2001). « Traditional management of cassava morphological and genetic diversity by the Makushi Amerindians (Guyana, South America): perspectives for on-farm conservation of crop genetic resources ». In : *Euphytica* 120. ISBN: 0014-2336 Publisher: Springer, p. 143-157.

Emperaire, L et N Peroni (2007). « Traditional management of agrobiodiversity in Brazil: a case study of manioc ». In : *Human Ecology* 35.6. ISBN: 0300-7839 Publisher: Springer, p. 761-768.

Engeström, Y (2011). « Théorie de l'Activité et Management ». In : *Revue management et avenir* 2. ISBN: 1768-5958 Publisher: Cairn/Softwin, p. 170-182.

Enjalbert, J (1999). « Diversité et régime de reproduction de populations de blé tendre (Triticum aestivum L.) menées en gestion dynamique ». Thèse de doct. Thèse, Institut National Agronomique Paris Grignon.

Enjalbert, J, JC Dawson, S Paillard, B Rhoné, Y Rousselle, M Thomas et I Goldringer (mai 2011). « Dynamic management of crop diversity: From an experimental approach to on-farm conservation ». In : *Comptes Rendus Biologies* 334.5, p. 458-468. issn : 16310691. doi : 10.1016/j.crvi.2011.03.005.

Falconer, DS (1960). *Introduction to Quantitative Genetics*. Edinburgh/London : Olivier & Boyd.

FAO (2015). *Plant Production and Protection Division: Sustainable Intensification in FAO*. url : https://www.fao.org/agriculture/crops/thematic-sitemap/theme/spi/scpi-home/framework/sustainable-intensification-in-fao/en/ (visité le 28/03/2024).

FAOSTAT (2024). *FAOSTAT Cultures et produits animaux*. url : https://www.fao.org/faostat/fr/#data/QCL (visité le 09/04/2024).

Farrington, J et AM Martin (1988). « Farmer participatory research: A review of concepts and recent fieldwork ». In : *Agricultural Administration and Extension* 29.4. ISBN: 0269-7475 Publisher: Elsevier, p. 247-264.

Feldman, M et AA Levy (2023). *Wheat Evolution and Domestication*. Springer Nature. isbn : 3-031-30175-7.

Fernandes, BM (2009). « Sobre a tipologia de territórios ». In : *Territórios e territorialidades: teorias, processos e conflitos. São Paulo: Expressão Popular*, p. 197-215.

Fernandes, BM, CA Welch et EC Gonçalves (2013). « Agrofuel policies in Brazil: paradigmatic and territorial disputes ». In : *The Politics of Biofuels, Land and Agrarian Change*. Routledge, p. 219-245.

Fienberg, SE (2006). « When did Bayesian inference become" Bayesian"? » In.

Finlay, K et G Wilkinson (1963). « The analysis of adaptation in a plant-breeding programme ». In : *Australian Journal of Agricultural Research* 14.6, p. 742. issn : 0004-9409. doi : 10.1071/AR9630742.

Fischer, RA (1985). « Number of kernels in wheat crops and the influence of solar radiation and temperature ». In : *The Journal of Agricultural Science* 105.2. ISBN: 1469-5146 Publisher: Cambridge University Press, p. 447-461.

Fisher, RA (1931). « Principles of plot experimentation in relation to the statistical interpretation of the results ». In : *Rothamsted Conferences*. T. 13, p. 11-13.

Fontaine, S, L Abbadie, M Aubert, S Barot, JM Bloor, D Derrien, O Duchene, N Gross, L Henneron et X Le Roux (2024). « Plant–soil synchrony in nutrient cycles: Learning from ecosystems to design sustainable agrosystems ». In : *Global Change Biology* 30.1. ISBN: 1354-1013 Publisher: Wiley Online Library, e17034.

FranceAgriMer (2020). *Fiche filière Blé tendre*.

Références

Frank, G van (6 déc. 2018). « Gestion participative de la diversité cultivée et création de mélanges diversifiés de blé tendre à la ferme ». These de doctorat. Université Paris-Saclay (ComUE).

Frank, G van, I Goldringer, P Rivière et O David (20 juin 2019). « Influence of experimental design on decentralized, on-farm evaluation of populations: a simulation study ». In : *Euphytica* 215.7, p. 126. issn : 1573-5060. doi : 10.1007/s10681-019-2447-9.

Frank, G van, P Rivière, S Pin, R Baltassat, JF Berthellot, F Caizergues, C Dalmasso, JS Gascuel, A Hyacinthe, F Mercier, H Montaz, B Ronot et I Goldringer (jan. 2020). « Genetic Diversity and Stability of Performance of Wheat Population Varieties Developed by Participatory Breeding ». In : *Sustainability* 12.1. Number: 1 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, p. 384. doi : 10.3390/su12010384.

Gabriel, KR (1971). « The biplot graphic display of matrices with application to principal component analysis ». In : *Biometrika* 58.3. ISBN: 1464-3510 Publisher: Oxford University Press, p. 453-467.

Gamage, J, T Mathew et S Weerahandi (2013). « Generalized prediction intervals for BLUPs in mixed models ». In : *Journal of Multivariate Analysis* 120. ISBN: 0047-259X Publisher: Elsevier, p. 226-233.

Garnier, E et ML Navas (2013). « Diversité fonctionnelle des plantes ». In : *De Boeck, Bruxelles*.

Gate, P (1995). *Ecophysiologie du blé*. Tec & Doc-Lavoisier. isbn : 978-2-7430-0046-2.

Gauch, HG et RW Zobel (1997). « Identifying Mega-Environments and Targeting Genotypes ». In : *Crop Science* 37.2. _eprint: https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.2135/cropsci1997.00111 cropsci1997.0011183X003700020002x. issn : 1435-0653. doi : 10.2135/cropsci1997.0011183X003700020

Gauffreteau, A, C Lecomte et MH Jeuffroy (2009). *DIAGVAR, IDDN.FR.001.020006.000.R.P.2009.000.30100*. Paris.

Gelman, A (2006). « Prior distributions for variance parameters in hierarchical models ». In : p. 19.

Gelman, A, J Hill et M Yajima (2012). « Why we (usually) don't have to worry about multiple comparisons ». In : *Journal of research on educational effectiveness* 5.2. ISBN: 1934-5747 Publisher: Taylor & Francis, p. 189-211.

Gevrek, MN et GD Atasoy (2012). « Performance of some Bread Wheat Genotypes under Organic and Conventional Production Systems. » In : *International Journal of Agriculture & Biology* 14.4. ISBN: 1560-8530.

Gianola, D, A Cecchinato, H Naya et CC Schön (2018). « Prediction of complex traits: robust alternatives to best linear unbiased prediction ». In : *Frontiers in genetics* 9. ISBN: 1664-8021 Publisher: Frontiers, p. 360177.

Girard, N et D Magda (2020). « The interplays between singularity and genericity of agroecological knowledge in a network of livestock farmers ». In : *Journal of Rural Studies* 73. ISBN: 0743-0167 Publisher: Elsevier, p. 214-224.

Gohel, D (2020). « Officer: Manipulation of microsoft word and PowerPoint documents ». In : *R package version 0.4* 3.

Goldringer, I, J Enjalbert, AL Raquin et P Brabant (2001). « Strong selection in wheat populations during ten generations of dynamic management ». In : *Genetics Selection Evolution* 33 (Suppl 1). ISBN: 1297-9686 Publisher: Springer, S441.

Goldringer, I, G van Frank, C Bouvier d'Yvoire, E Forst, N Galic, M Garnault, J Locqueville, S Pin, J Bailly, R Baltassat, JF Berthellot, F Caizergues, C Dalmasso, P de Kochko, JS Gascuel, A Hyacinthe, J Lacanette, F Mercier, H Montaz, B Ronot et P Rivière (jan. 2020). « Agronomic Evaluation of Bread Wheat Varieties from Participatory Breeding: A Combination of Performance and Robustness ». In :

Sustainability 12.1. Number: 1 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, p. 128. DOI : 10.3390/su12010128.

Goldringer, I, C Prouin, M Rousset, N Galic et I Bonnin (2006). « Rapid differentiation of experimental populations of wheat for heading time in response to local climatic conditions ». In : *Annals of Botany* 98.4. ISBN: 1095-8290 Publisher: Oxford University Press, p. 805-817.

Gouache, D, AS Bouchon, E Jouanneau et X Le Bris (2015). « Agrometeorological analysis and prediction of wheat yield at the departmental level in France ». In : *Agricultural and Forest Meteorology* 209. ISBN: 0168-1923 Publisher: Elsevier, p. 1-10.

Goulet, F et JM Meynard (2012). « Quelle agroécologie pour quelle agriculture? Regards croisés en France et en Argentine et place de la question environnementale ». In : *L'agroécologie en Argentine et en France, Regards croisés*. Publisher: L'Harmattan, p. 225-238.

Guilpart, N, P Grassini, VO Sadras, J Timsina et KG Cassman (2017). « Estimating yield gaps at the cropping system level ». In : *Field crops research* 206. ISBN: 0378-4290 Publisher: Elsevier, p. 21-32.

Guyomard, H, C Huyghe, F Jeuland, J Boiffin, JL Peyraud, H Guyomard, B Coudurier et N Urrety (2017). *Les pratiques agricoles à la loupe: vers des agricultures multiperformantes*. Quae. ISBN : 2-7592-2539-9.

Hacking, I (1992). « 'Style'for historians and philosophers ». In : *Studies in History and Philosophy of Science Part A* 23.1. ISBN: 0039-3681 Publisher: Elsevier, p. 1-20.

Hampel, FR, EM Ronchetti, PJ Rousseeuw et WA Stahel (2011). *Robust statistics: the approach based on influence functions*. John Wiley & Sons. ISBN : 1-118-15068-6.

Harlan, JR (1975). « Our Vanishing Genetic Resources: Modern varieties replace ancient populations that have provided genetic variability for plant breeding programs. » In : *Science* 188.4188. ISBN: 0036-8075 Publisher: American Association for the Advancement of Science, p. 618-621.

Harrison, AF, PM Latter et DWH Walton (1988). *Cotton strip assay: an index of decomposition in soils*. T. 24. ITE. ISBN : 1-870393-06-6.

Haug, B, MM Messmer, J Enjalbert, I Goldringer, T Flutre, T Mary-Huard et P Hohmann (2023). « New insights towards breeding for mixed cropping of spring pea and barley to increase yield and yield stability ». In : *Field Crops Research* 297. ISBN: 0378-4290 Publisher: Elsevier, p. 108923.

Henderson, CR (1977). « Best linear unbiased prediction of breeding values not in the model for records ». In : *Journal of Dairy Science* 60.5. ISBN: 0022-0302 Publisher: Elsevier, p. 783-787.

Hénin, S (1999). *De la méthode en agronomie*. L'Harmattan. ISBN : 978-2-7384-8594-6.

Herrick, JE, WG Whitford, AG De Soyza, JW Van Zee, KM Havstad, CA Seybold et M Walton (2001). « Field soil aggregate stability kit for soil quality and rangeland health evaluations ». In : *Catena* 44.1. ISBN: 0341-8162 Publisher: Elsevier, p. 27-35.

Hickey, S (2004). *Participation: from tyranny to transformation: exploring new approaches to participation in development*. Zed books. ISBN : 1-84277-461-1.

Hill, SB et RJ MacRae (1996). « Conceptual framework for the transition from conventional to sustainable agriculture ». In : *Journal of sustainable agriculture* 7.1. ISBN: 1044-0046 Publisher: Taylor & Francis, p. 81-87.

Huber, PJ et EM Ronchetti (1981). *Robust Statistics, Wiley: New York*. USA.

Hubert, B, N Girard, J Lasseur et S Bellon (1993). « Les systèmes d'élevage ovin préalpins ». In : *Etudes et Recherches sur les Systemes Agraires et le Développement*, p. 351-385.

Références

Hunault de la Peltrie, CA (1856). *Observations théoriques et pratiques sur des semences de céréales cultivées dans le département de Maine-et-Loire par M. le Dr Hunault, de la Peltrie*. J. Lecerf.

Illich, I, L Giard et V Bardet (1973). *La convivialité*. Editions du Seuil Paris. isbn : 2-02-002201-X.

Jamagne, M, R Bétrémieux, JC Bégon et A Mori (1977). « Quelques données sur la variabilité dans le milieu naturel de la réserve en eau des sols ». In : *Bulletin Technique d'Information* 324, p. 627-641.

Jarvis, DI et T Hodgkin (1999). « Wild relatives and crop cultivars: detecting natural introgression and farmer selection of new genetic combinations in agroecosystems ». In : *Molecular ecology* 8. ISBN: 0962-1083 Publisher: Wiley Online Library, S159-S173.

Jeuffroy, MH et C Bouchard (1999). « Intensity and duration of nitrogen deficiency on wheat grain number ». In : *Crop science* 39.5. ISBN: 0011-183X Publisher: Wiley Online Library, p. 1385-1393.

Johnson, AW (1972). « Individuality and experimentation in traditional agriculture ». In : *Human Ecology* 1. ISBN: 0300-7839 Publisher: Springer, p. 149-159.

Jonard, P (1951). « blés tendres (Triticum vulgare Vill.) cultivés en France ». In : Publisher: Institut national de la recherche agronomique.

Juárez, MA et MFJ Steel (1er jan. 2010). « Model-Based Clustering of Non-Gaussian Panel Data Based on Skew-t Distributions ». In : *Journal of Business & Economic Statistics* 28.1. Publisher: Taylor & Francis, p. 52-66. issn : 0735-0015. doi : 10.1198/jbes.2009.07145.

Justes, E, B Mary, JM Meynard, JM Machet et L Thelier-Huché (1994). « Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter wheat crops ». In : *Annals of botany* 74.4. ISBN: 0305-7364 Publisher: Elsevier, p. 397-407.

Kloppenburg, J (2010). « Impeding dispossession, enabling repossession: biological open source and the recovery of seed sovereignty ». In : *Journal of agrarian change* 10.3. ISBN: 1471-0358 Publisher: Wiley Online Library, p. 367-388.

Knittel, F (2009). *Agronomie et innovation*. Presses universitaires de Nancy.

Kockmann, F, A Pouzet, B Omon, L Para-vano et M Cerf (2019). « La démarche clinique en agronomie: sa mise en pratique entre conseiller et agriculteur ». In : *Agriculture, Environnement et Société* 9.2.

Kockmann, F et A Pouzet (2022). « Contribution du système de développement agricole à la dynamique de l'agronomie ». In : *La fabrique de l'agronomie : De 1945 à nos jours*. QUAE, p. 363-408. isbn : 978-2-7592-3752-4.

Kolb, DA (1983). *Experiential learning: Experience as the source of learning and development*. FT press. isbn : 0-13-389250-6.

Kummer, S, F Leitgeb et CR Vogl (2017). « Farmers' own research: organic farmers' experiments in Austria and implications for agricultural innovation systems ». In : *Sustainable Agriculture Research* 6.1. ISBN: 1927-0518.

Labeyrie, V, JI Kamau, C Dubois, X Perrier et C Leclerc (2019). « So close yet so different: Cultural differences among farmers in Central Kenya affect their knowledge of sorghum (Sorghum bicolor [L.] Moench) landrace identification ». In : *Economic Botany* 73. ISBN: 0013-0001 Publisher: Springer, p. 265-280.

Lacey, H et M Lefèvre (2015). « Agroécologie: la science et les valeurs de la justice sociale, de la démocratie et de la durabilité ». In : *Ecologie politique* 51.2. ISBN: 1166-3030 Publisher: Presses de Sciences Po, p. 27-39.

Lairez, J, S Lopez-Ridaura, D Jourdain, GN Falconnier, P Lienhard, B Striffler, C Syfongxay et F Affholder (2020). « Context matters: Agronomic field monitoring and participatory research to identify criteria of farming system sustainability in South-East Asia. » In : *Agricultural systems* 182. ISBN: 0308-521X Publisher: Elsevier, p. 102830.

Landais, É, JP Deffontaines et M Benoit (1988). « Les pratiques des agriculteurs point de vue sur un courant nouveau de la recherche agronomique ». In : *Etudes rurales*. ISBN: 0014-2182 Publisher: JSTOR, p. 125-158.

Lange, KL, RJ Little et JM Taylor (1989). « Robust statistical modeling using the t distribution ». In : *Journal of the American Statistical Association* 84.408, p. 881-896.

Le Bail, M et JM Meynard (jan. 2003). « Yield and protein concentration of spring malting barley: the effects of cropping systems in the Paris Basin (France) ». In : *Agronomie* 23.1, p. 13-27. issn : 0249-5627, 1297-9643. doi : 10.1051/agro:2002029.

Le Campion, A, FX Oury, JY Morlais, P Walczak, P Bataillon, O Gardet, S Gilles, A Pichard et B Rolland (2014). « Is low-input management system a good selection environment to screen winter wheat genotypes adapted to organic farming? » In : *Euphytica* 199.1. ISBN: 0014-2336 Publisher: Springer, p. 41-56.

Leclerc, C et G Coppens d'Eeckenbrugge (2011). « Social organization of crop genetic diversity. The G× E× S interaction model ». In : *Diversity* 4.1. ISBN: 1424-2818 Publisher: MDPI, p. 1-32.

Leclère, M, AR Lorent, MH Jeuffroy, A Butier, C Chatain et C Loyce (2021). « Diagnosis of camelina seed yield and quality across an on-farm experimental network ». In : *European Journal of Agronomy* 122. ISBN: 1161-0301 Publisher: Elsevier, p. 126190.

Leclère, M, C Loyce et MH Jeuffroy (2018). « Growing camelina as a second crop in France: A participatory design approach to produce actionable knowledge ». In : *European Journal of agronomy* 101. ISBN: 1161-0301 Publisher: Elsevier, p. 78-89.

— (2023). « A participatory and multi-actor approach to locally support crop diversification based on the case study of camelina in northern France ». In : *Agronomy for Sustainable Development* 43.1. ISBN: 1774-0746 Publisher: Springer, p. 13.

Lecomte, C (27 oct. 2005). « L'évaluation expérimentale des innovations variétales. Proposition d'outils d'analyse de l'interaction génotype - milieu adaptés à la diversité des besoins et des contraintes des acteurs de la filière semences. » Thèse de doct. INAPG (AgroParisTech).

Lecomte, C, L Prost, M Cerf et JM Meynard (2010). « Basis for designing a tool to evaluate new cultivars ». In : *Agronomy for sustainable development* 30. ISBN: 1774-0746 Publisher: Springer, p. 667-677.

Lecomte, C, L Prost et A Gauffreteau (2009). « Présentation d'une méthode pour améliorer la connaissance des aptitudes variétales, intérêt des modèles, besoins de développements nouveaux ». In : *Colloque CIAG-Variétés nouvelles et modes de culture adaptés*. np.

Lecomte, C, V Richer, A Gauffreteau, MH Jeuffroy, M Bouviala, C Brun, C Buridan, A Klein, FX Lantoine et D Marchand (2023). « Combining a multi-environment trial and a diagnosis method to assess potential yield and main limiting factors of three highly different pea types ». In : *European Journal of Agronomy* 146. ISBN: 1161-0301 Publisher: Elsevier, p. 126823.

Lewontin, RC (1970). « The units of selection ». In : *Annual review of ecology and systematics* 1.1. ISBN: 0066-4162 Publisher: Annual Reviews 4139 El Camino Way, PO Box 10139, Palo Alto, CA 94303-0139, USA, p. 1-18.

Lian, L et G de los Campos (1er mars 2016). « FW: An R Package for Finlay–Wilkinson Regression that Incorporates Genomic/Pedigree Information and Covariance Structures Between

Environments ». In : *G3 Genes/Genomes/Genetics* 6.3, p. 589-597. ISSN : 2160-1836. DOI : 10.1534/g3.115.026328.

Lin, CS, MR Binns et LP Lefkovitch (1986). « Stability analysis: where do we stand? 1 ». In : *Crop science* 26.5. ISBN: 0011-183X Publisher: Wiley Online Library, p. 894-900.

López-García, D, M Cuéllar-Padilla, A de Azevedo Olival, NP Laranjeira, VE Méndez, SP y Parada, CA Barbosa, CB Salas, M Caswell et R Cohen (2021). « Building agroecology with people. Challenges of participatory methods to deepen on the agroecological transition in different contexts ». In : *Journal of Rural Studies* 83. ISBN: 0743-0167 Publisher: Elsevier, p. 257-267.

Loreau, M et A Hector (2001). « Partitioning selection and complementarity in biodiversity experiments ». In : *Nature* 412.6842. ISBN: 0028-0836 Publisher: Nature Publishing Group UK London, p. 72-76.

Louette, D, A Charrier et J Berthaud (1997). « In situ conservation of maize in Mexico: genetic diversity and maize seed management in a traditional community ». In : *Economic botany*. ISBN: 0013-0001 Publisher: JSTOR, p. 20-38.

Louette, D et M Smale (2000). « Farmers' seed selection practices and traditional maize varieties in Cuzalapa, Mexico ». In : *Euphytica* 113. ISBN: 0014-2336 Publisher: Springer, p. 25-41.

Loyce, C et J Wery (2006). « Les outils des agronomes pour l'évaluation et la conception de systèmes de culture ». In : *L'agronomie aujourd'hui*. Synthèses (Quae). Editions Quae, 78 à 83.

Lyon, F (1996). « How farmers research and learn: The case of arable farmers of East Anglia, UK. » In : *Agriculture and Human values* 13. ISBN: 0889-048X Publisher: Springer, p. 39-47.

Marcussen, T, SR Sandve, L Heier, M Spannagl, M Pfeifer, IWGS Consortium, KS Jakobsen, BB Wulff, B Steuernagel et KF Mayer (2014). « Ancient hybridizations among the ancestral genomes of bread wheat ». In : *science* 345.6194. ISBN: 0036-8075 Publisher: American Association for the Advancement of Science, p. 1250092.

Mariel, J, SM Carrière, E Penot, P Danthu, V Rafidison et V Labeyrie (2021). « Exploring farmers' agrobiodiversity management practices and knowledge in clove agroforests of Madagascar ». In : *People and Nature* 3.4. ISBN: 2575-8314 Publisher: Wiley Online Library, p. 914-928.

Martínez-Torres, ME et PM Rosset (2010). « La Vía Campesina: the birth and evolution of a transnational social movement ». In : *The Journal of Peasant Studies* 37.1. ISBN: 0306-6150 Publisher: Taylor & Francis, p. 149-175.

Massibot, JA (1945). « Historique de l'expérimentation culturale ». In : *Fruits* 1.3. ISBN: 0248-1294, p. 67-73.

Matterne, V (2000). « Agriculture et alimentation végétale durant l'âge du Fer et l'époque gallo-romaine en France septentrionale ». Thèse de doct. Paris 1.

Mauger, S, C Ricono, C Mony, V Chable, E Serpolay, M Biget et P Vandenkoornhuyse (2021). « Differentiation of endospheric microbiota in ancient and modern wheat cultivar roots ». In : *Plant-Environment Interactions* 2.5. ISBN: 2575-6265 Publisher: Wiley Online Library, p. 235-248.

Maxime, F, JM Mollet et F Papy (1995). « Aide au raisonnement de l'assolement en grande culture ». In : *Cahiers Agricultures* 4.5. ISBN: 1777-5949, 351-362 (1).

Mayr, E et M Blanc (1989). « Histoire de la biologie: diversité, évolution et hérédité ». In : *Paris: Fayard*.

Mazé, A, A Calabuig Domenech et I Goldringer (juin 2021). « Commoning the seeds: alternative models of collective action and open innovation within French peasant seed groups

for recreating local knowledge commons ». In : *Agriculture and Human Values* 38.2, p. 541-559. ISSN : 0889-048X, 1572-8366. DOI : 10.1007/s10460-020-10172-z.

MÉNDEZ, VE, CM BACON et R COHEN (2013). « Agroecology as a transdisciplinary, participatory, and action-oriented approach ». In : *Agroecology and Sustainable Food Systems* 37.1. ISBN: 2168-3565 Publisher: Taylor & Francis, p. 3-18.

MÉNDEZ, VE, M CASWELL, SR GLIESSMAN et R COHEN (2017). « Integrating agroecology and participatory action research (PAR): Lessons from Central America ». In : *Sustainability* 9.5. ISBN: 2071-1050 Publisher: MDPI, p. 705.

MÈTIS (2023). *Quelles manières prometteuses de faire de la recherche*.

MEYNARD, JM, C AUBRY, E JUSTES et M LE BAIL (1997). « Nitrogen Diagnosis and Decision Support ». In : *Diagnosis of the Nitrogen Status in Crops*. Sous la dir. de G LEMAIRE. Berlin, Heidelberg : Springer, p. 147-161. ISBN : 978-3-642-60684-7. DOI : 10.1007/978-3-642-60684-7_9.

MEYNARD, JM, M CERF, X COQUIL, D DURANT, M LE BAIL, A LEFÈVRE, M NAVARRETE, J PERNEL, A PÉRINELLE et B PERRIN (2023). « Unravelling the step-by-step process for farming system design to support agroecological transition ». In : *European Journal of Agronomy* 150. ISBN: 1161-0301 Publisher: Elsevier, p. 126948.

MEYNARD, JM et G DAVID (1992). « Diagnostic de l'élaboration du rendement des cultures ». In : *Cahiers Agricultures* 1.1. ISBN: 1777-5949, 9-19 (1).

MIGNOLET, C, C SCHOTT et M BENOÎT (2007). « Spatial dynamics of farming practices in the Seine basin: Methods for agronomic approaches on a regional scale ». In : *Science of the total environment* 375.1. ISBN: 0048-9697 Publisher: Elsevier, p. 13-32.

MÖHRING, N, K INGOLD, P KUDSK, F MARTIN-LAURENT, U NIGGLI, M SIEGRIST, B STUDER, A WALTER et R FINGER (2020). « Pathways for advancing pesticide policies ». In : *Nature food* 1.9. ISBN: 2662-1355 Publisher: Nature Publishing Group UK London, p. 535-540.

MURPHY, K, D LAMMER, S LYON, B CARTER et SS JONES (2005). « Breeding for organic and low-input farming systems: An evolutionary–participatory breeding method for inbred cereal grains ». In : *Renewable Agriculture and Food Systems* 20.1. ISBN: 1742-1713 Publisher: Cambridge University Press, p. 48-55.

MURPHY, KM, KG CAMPBELL, SR LYON et SS JONES (juin 2007). « Evidence of varietal adaptation to organic farming systems ». In : *Field Crops Research* 102.3, p. 172-177. ISSN : 03784290. DOI : 10.1016/j.fcr.2007.03.011.

NABUGOOMU, F, RA KEMPTON et M TALBOT (1999). « Analysis of Series of Trials Where Varieties Differ in Sensitivity to Locations ». In : *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics* 4.3. Publisher: [International Biometric Society, Springer], p. 310-325. ISSN : 1085-7117. DOI : 10.2307/1400388.

NAVE, S, F JACQUET et MH JEUFFROY (2013). « Why wheat farmers could reduce chemical inputs: evidence from social, economic, and agronomic analysis ». In : *Agronomy for sustainable development* 33. ISBN: 1774-0746 Publisher: Springer, p. 795-807.

NEAL, RM (2011). « MCMC using Hamiltonian dynamics ». In : *Handbook of markov chain monte carlo* 2.11. Publisher: Chapman and Hall/CRC, p. 2.

NG, M et E WILLIAMS (2001). « Joint-regression Analysis for Incomplete Two-way Tables ». In : *Australian & New Zealand Journal of Statistics* 43.2. Publisher: Blackwell Publishers Ltd, p. 201-206. ISSN : 1369-1473. DOI : 10.1111/1467-842X.00165.

NYÉLÉNI, B (2007). « Declaration of Nyéléni ». In : *Forum for Food Sovereignty*.

Références

Ogle, K, D Peltier, M Fell, J Guo, H Kropp et J Barber (2019). « Should we be concerned about multiple comparisons in hierarchical Bayesian models? » In : *Methods in Ecology and Evolution* 10.4. ISBN: 2041-210X Publisher: Wiley Online Library, p. 553-564.

Okali, C, J Sumberg et J Farrington (1994). *Farmer participatory research: rhetoric and reality.* isbn : 1-85339-252-9.

Oweis, T et A Hachum (2006). « Water harvesting and supplemental irrigation for improved water productivity of dry farming systems in West Asia and North Africa ». In : *Agricultural water management* 80.1. ISBN: 0378-3774 Publisher: Elsevier, p. 57-73.

Paavola, S (2005). « Peircean abduction: instinct or inference? » In : *Semiotica* 2005.153. ISBN: 1613-3692, p. 131-154.

Panthuwan, G, S Fokai, M Cooper, S Rajatasereekul et JC O'Toole (2002). « Yield response of rice genotypes to different types of drought under rainfed lowlands. Part 1: grain yield and yield components ». In : *Field Crop Res* 41, p. 45-54.

Papy, F (2000). « Farm models and decision support: a summary review ». In : *Research on Agricultural Systems: Accomplishments, Perspectives and Issues, New York, Nova Science Publishers*, p. 89-107.

Pastré, P (2002). « L'analyse du travail en didactique professionnelle ». In : *Revue française de pédagogie*. ISBN: 0556-7807 Publisher: JSTOR, p. 9-17.

Patterson, HD et V Silvey (1980). « Statutory and recommended list trials of crop varieties in the United Kingdom ». In : *Journal of the Royal Statistical Society: Series A (General)* 143.3. ISBN: 0035-9238 Publisher: Wiley Online Library, p. 219-240.

Pautasso, M, G Aistara, A Barnaud, S Caillon, P Clouvel, OT Coomes, M Delêtre, E Demeulenaere, P De Santis et T Döring (2013). « Seed exchange networks for agrobiodiversity conservation. A review ». In : *Agronomy for sustainable development* 33. ISBN: 1774-0746 Publisher: Springer, p. 151-175.

Peigne, J, Y Gautronneau, JF Vian, P Achard, M Chignier-Riboulon, L Ruffe et C Vaskou (2016). *Test Bêche. Guide d'ultilisation.* Publisher: ISARA Lyon.

Pellegrino, A, E Lebon, M Voltz et J Wery (2005). « Relationships between plant and soil water status in vine (Vitis vinifera L.) » In : *Plant and Soil* 266. ISBN: 0032-079X Publisher: Springer, p. 129-142.

Perales, HR, BF Benz et SB Brush (2005). « Maize diversity and ethnolinguistic diversity in Chiapas, Mexico ». In : *Proceedings of the National Academy of Sciences* 102.3. ISBN: 0027-8424 Publisher: National Acad Sciences, p. 949-954.

Pereira, DG, JT Mexia et PC Rodrigues (2007). « Robustness of joint regression analysis ». In : *Biometrical Letters* 44.2, p. 105-128.

Perkins, JM et JL Jinks (1968). « Environmental and genotype-environmental components of variability ». In : *Heredity* 23.3, p. 339-356.

Perrisseau, L (2022). *Caractérisation des environnements et des pratiques dans un dispositif de recherche participative à la ferme.*

Petit, C et C Aubry (2016). « Typology of organic management styles in a cash-crop region using a multi-criteria method ». In : *Organic Agriculture* 6.3. ISBN: 1879-4238 Publisher: Springer, p. 155-169.

Phillips, SL et MS Wolfe (2005). « Evolutionary plant breeding for low input systems ». In : *The Journal of Agricultural Science* 143.4. ISBN: 1469-5146 Publisher: Cambridge University Press, p. 245-254.

Piepho, HP (2004). « An algorithm for a letter-based representation of all-pairwise comparisons ». In : *Journal of Computational and Graphical Statistics* 13.2. ISBN: 1061-8600 Publisher: Taylor & Francis, p. 456-466.

— (2022). « Extending Finlay-Wilkinson regression with covariates ». In : *bioRxiv*. Publisher: Cold Spring Harbor Laboratory, p. 2022.12. 14.520390.

Ploeg, JD van der (2014). *Les Paysans du XXIe Siècle: Mouvements de repaysanisation dans l'Europe d'aujourd'hui*. Fondation Charles Leopold Mayer. ISBN : 2-84377-183-8.

Porcher, E, T Giraud, I Goldringer et C Lavigne (2004). « Experimental demonstration of a causal relationship between heterogeneity of selection and genetic differentiation in quantitative traits ». In : *Evolution* 58.7. ISBN: 0014-3820 Publisher: Wiley Online Library, p. 1434-1445.

Porcher, J (2011). *Vivre avec les animaux. Une utopie pour le XXIe siècle*. La Découverte. ISBN : 2-7071-6900-5.

Preece, D (1990). « RA Fisher and experimental design: a review ». In : *Biometrics*. ISBN: 0006-341X Publisher: JSTOR, p. 925-935.

Pretty, J (12 fév. 2008). « Agricultural sustainability: concepts, principles and evidence ». In : *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 363.1491, p. 447-465. ISSN : 0962-8436, 1471-2970. DOI : 10.1098/rstb.2007.2163.

Purseigle, F, G Nguyen et P Blanc (2017). *Le nouveau capitalisme agricole. De la ferme à la firme*. Sciences Po (Les Presses de). ISBN : 2-7246-2135-2.

Quinio, M, P Salazar, A Gardarin, MS Petit et MH Jeuffroy (2021). « Capitaliser les connaissances avec les acteurs pour concevoir des systèmes agroécologiques ». In : *Revue AE&S* 11.2.

Rajaram, S, NE Borlaug et M Van Ginkel (2002). « CIMMYT international wheat breeding ». In : *Bread wheat improvement and production. FAO, Rome*, p. 103-117.

Rapidel, B, C Defèche, B Traoré, J Lançon et J Wery (1er mai 2006). « In-field development of a conceptual crop functioning and management model: A case study on cotton in southern Mali ». In : *European Journal of Agronomy* 24.4, p. 304-315. ISSN : 1161-0301. DOI : 10.1016/j.eja.2005.10.012.

Rathjen, AJ (1994). « The biological basis of genotype× environment interaction: its definition and management ». In : *Proceedings of the Seventh Assembly of the Wheat Breeding Society of Australia, Adelaide, Australia*, p. 13-17.

ReseauActionClimat (2018). *Émissions de gaz à effet de serre et fertilisation azotée : initiatives collectives et territoriales*.

Rice, E, M Smale et JL Blanco (1998). « Farmers' use of improved seed selection practices in Mexican maize: Evidence and issues from the Sierra de Santa Marta ». In : *World Development* 26.9. ISBN: 0305-750X Publisher: Elsevier, p. 1625-1640.

Richard, A, M Casagrande, MH Jeuffroy et C David (2018). « An innovative method to assess suitability of Nitrate Directive measures for farm management ». In : *Land Use Policy* 72. ISBN: 0264-8377 Publisher: Elsevier, p. 389-401.

Riley, R et V Chapman (1958). « Genetic control of the cytologically diploid behaviour of hexaploid wheat ». In : *Nature* 182.4637. ISBN: 0028-0836 Publisher: Nature Publishing Group UK London, p. 713-715.

Riviere, P, G Van Frank, O DAVID, F Muñoz, B Rouger, C Vendras, M Thomas et I Goldringer (2020). *PPBstats: An R package to perform analysis found within PPB programmes regarding network of seeds circulation, agronomic trials, organoleptic tests and molecular experiments. Version 0.26*.

Références

Riviere, P (15 jan. 2014). « Méthodologie de la sélection décentralisée et participative : un exemple sur le blé tendre ». These de doctorat. Paris 11.

Rivière, P, JC Dawson, I Goldringer et O David (2015a). « Hierarchical Bayesian Modeling for Flexible Experiments in Decentralized Participatory Plant Breeding ». In : *Crop Science* 55.3. _eprint: https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.2135/cropsci2014.07.0497, p. 1053-1067. issn : 1435-0653. doi : https://doi.org/10.2135/cropsci2014.07.0497.

Rivière, P, I Goldringer, JF Berthellot, N Galic, S Pin, P De Kochko et JC Dawson (avr. 2015b). « Response to farmer mass selection in early generation progeny of bread wheat landrace crosses ». In : *Renewable Agriculture and Food Systems* 30.2, p. 190-201. issn : 1742-1705, 1742-1713. doi : 10.1017/S1742170513000343.

Rivière, P, S Pin, N Galic, Y De Oliveira, O David, J Dawson, A Wanner, R Heckmann, S Obbellianne et B Ronot (2013). « Mise en place d'une méthodologie de sélection participative sur le blé tendre en France ». In : *Innovations agronomiques* 32, p. 427-441.

Robert, C (27 août 2007). *The Bayesian Choice: From Decision-Theoretic Foundations to Computational Implementation*. Google-Books-ID: 6oQ4s8Pq9pYC. Springer Science & Business Media. 620 p. isbn : 978-0-387-71598-8.

Rodriguez-Rodriguez, N et O Miramontes (2022). « Shannon Entropy: An econophysical approach to cryptocurrency portfolios ». In : *Entropy* 24.11. ISBN: 1099-4300 Publisher: MDPI, p. 1583.

Rolland, B, L Fontaine, A Mailliard, O Gardet, E Heumez, P Walczak, A Le Campion et FX Oury (2017). « From selection to cultivation with the support of all stakeholders: the first registration in France of two winter bread wheat varieties after value for cultivation and use evaluation in organic farming systems ». In : *Organic agriculture* 7. ISBN: 1879-4238 Publisher: Springer, p. 73-81.

Rosa, G, CR Padovani et D Gianola (2003). « Robust linear mixed models with normal/independent distributions and Bayesian MCMC implementation ». In : *Biometrical Journal* 45.5, p. 573-590.

Rosset, P et ME Martinez-Torres (2014). « Mouvements sociaux ruraux,«dialogues des savoirs» et agroécologie ». In : *Agroécologie: enjeux et perspectives Points de vue du Sud* 21, p. 65.

Rosset, PM, B Machín Sosa, AM Roque Jaime et DR Ávila Lozano (2011). « The Campesino-to-Campesino agroecology movement of ANAP in Cuba: social process methodology in the construction of sustainable peasant agriculture and food sovereignty ». In : *The Journal of peasant studies* 38.1. ISBN: 0306-6150 Publisher: Taylor & Francis, p. 161-191.

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.

Ruphy, S (2006). « "Empiricism all the way down": a defense of the value-neutrality of science in response to Helen Longino's contextual empiricism ». In : *Perspectives on Science* 14.2. ISBN: 1063-6145 Publisher: MIT Press One Rogers Street, Cambridge, MA 02142-1209, USA journals-info ..., p. 189-214.

Saad, N (2001). *Farmer processes of experimentation and innovation: a review of the literature*.

Sagnier, H (1888). « Les variétés de blé à cultiver ». In : *Manuel général de l'instruction primaire* 55.24. Publisher: Persée - Portail des revues scientifiques en SHS, p. 133-134.

Salembier, C, B Segrestin, N Sinoir, J Templier, B Weil et JM Meynard (2020). « Design of equipment for agroecology: Coupled innovation processes led by farmer-designers ». In : *Agricultural Systems* 183. ISBN: 0308-521X Publisher: Elsevier, p. 102856.

Salembier, C, B Segrestin, B Weil, MH Jeuffroy, S Cadoux, C Cros, E Favrelière, L Fontaine, M Gimaret et C Noilhan (2021). « A theoretical framework for tracking farmers' innovations to support farming system design ». In : *Agronomy for Sustainable Development* 41.5. ISBN: 1774-0746 Publisher: Springer, p. 61.

Schribaux, E (1928). « Les meilleures variétés de blé à cultiver ou à essayer ». In : *La grande revue agricole* 1.1465, p. 8.

Sebillotte, M (1990). « Les processus de décision des agriculteurs: II. Conséquences pour les démarches d'aide à la décision ». In : *Brossier J, Vissac B, Lemoigne JL, éd. Modélisation systémique et système agraire. Décision et organisation. Éditions INRA, Paris*, p. 103-17.

Sebillotte, M (2006). « Préface, par Michel Sébillotte ». In : *L'agronomie aujourd'hui*. Synthèses (Quae). Editions Quae, 1 à 21.

Sebillotte, M et LG Soler (1988). « Le concept de modele general et la comprehension du comportement de l'agriculteur. » In : *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France 4 (74), 59-70.(1988)*.

Sevilla Guzmán, E et G Woodgate (2013). « Agroecology: Foundations in agrarian social thought and sociological theory ». In : *Agroecology and Sustainable Food Systems* 37.1. ISBN: 2168-3565 Publisher: Taylor & Francis, p. 32-44.

Shao, QQ, CS Li et C Basang (1983). « Semi-wild wheat from Xizang (Tibet) ». In : *Proceedings of the sixth International Wheat Genetics Symposium/edited by Sadao Sakamoto*. Kyoto: Plant Germ-Plasm Institute, Faculty of Agriculture, Kyoto University ...

Sicard, H, J Gainche et L Fontaine (2013). « RotAB Weed toolbox ». In : Publisher: ITAB-Institute for Organic Agriculture and Food ITAB-L'Institut de l ...

Singh, SK (2003). « Genetics of yield components and their relevance to plant ideotype concept in wheat ». In : *Farm Sci. Journal* 12.2, p. 122-124.

Slafer, GA et R Savin (2023). « Comparative performance of barley and wheat across a wide range of yielding conditions. Does barley outyield wheat consistently in low-yielding conditions? » In : *European Journal of Agronomy* 143. ISBN: 1161-0301 Publisher: Elsevier, p. 126689.

Soliman, KM et RW Allard (1991). « Grain yield of composite cross populations of barley: effects of natural selection ». In : *Crop Science* 31.3. ISBN: 0011-183X Publisher: Wiley Online Library, p. 705-708.

Steyerberg, EW, MJ Eijkemans et JDF Habbema (1999). « Stepwise selection in small data sets: a simulation study of bias in logistic regression analysis ». In : *Journal of clinical epidemiology* 52.10. ISBN: 0895-4356 Publisher: Elsevier, p. 935-942.

Suneson, CA (1956). « An evolutionary plant breeding method 1 ». In : *Agronomy Journal* 48.4. ISBN: 0002-1962 Publisher: Wiley Online Library, p. 188-191.

Tam, V, N Patel, M Turcotte, Y Bossé, G Paré et D Meyre (2019). « Benefits and limitations of genome-wide association studies ». In : *Nature Reviews Genetics* 20.8. ISBN: 1471-0056 Publisher: Nature Publishing Group UK London, p. 467-484.

Tamburini, G, R Bommarco, TC Wanger, C Kremen, MG Van Der Heijden, M Liebman et S Hallin (2020). « Agricultural diversification promotes multiple ecosystem services without compromising yield ». In : *Science advances* 6.45. ISBN: 2375-2548 Publisher: American Association for the Advancement of Science, eaba1715.

Team, RC (2014). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*.

Références

TEAM, Sd (2016). *RStan: the R interface to Stan. R package version.*

Teissier, JH (1979). « Relations entre techniques et pratiques, conséquences pour la formation et la recherche, n 38, mars ». In : *Bulletin INRAP* Mars.38.

Theobald, CM, M Talbot et F Nabugoomu (1er sept. 2002). « A bayesian approach to regional and local-area prediction from crop variety trials ». In : *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics* 7.3, p. 403-419. issn : 1537-2693. doi : 10.1198/108571102230.

Vidéo Thomas F. (24 juin 2020). *Théorie(s) des communs appliquée à la diversté agricole*. Avec la coll. de F Thomas. Hanoi (Viet nam).

Thomas, M, E Demeulenaere, JC Dawson, AR Khan, N Galic, S Jouanne-Pin, C Remoué, C Bonneuil et I Goldringer (2012). « On-farm dynamic management of genetic diversity: the impact of seed diffusions and seed saving practices on a population-variety of bread wheat ». In : *Evolutionary applications* 5.8. ISBN: 1752-4571 Publisher: Wiley Online Library, p. 779-795.

Thomas, M, S Thépot, N Galic, S Jouanne-Pin, C Remoué et I Goldringer (juin 2015). « Diversifying mechanisms in the on-farm evolution of crop mixtures ». In : *Molecular Ecology* 24.12, p. 2937-2954. issn : 09621083. doi : 10.1111/mec.13214.

Tin, HQ, T Berg et Å Bjørnstad (2001). « Diversity and adaptation in rice varieties under static (ex situ) and dynamic (in situ) management ». In : *Euphytica* 122. ISBN: 0014-2336 Publisher: Springer, p. 491-502.

Trethowan, RM, T Mahmood, Z Ali, K Oldach et AG Garcia (14 juin 2012). « Breeding wheat cultivars better adapted to conservation agriculture ». In : *Field Crops Research*. Conservation Agriculture in Dry Areas 132, p. 76-83. issn : 0378-4290. doi : 10.1016/j.fcr.2011.10.015.

Turbet Delof, M, P Rivière, JC Dawson, A Gauffreteau, I Goldringer, G van Frank et O David (2024). *Bayesian joint-regression analysis of unbalanced series of on-farm trials. Version1*. doi : hal-04380787.

Urruty, N, T Deveaud, H Guyomard et J Boiffin (2016). « Impacts of agricultural land use changes on pesticide use in French agriculture ». In : *European Journal of Agronomy* 80. ISBN: 1161-0301 Publisher: Elsevier, p. 113-123.

Van Eeuwijk, FA, DV Bustos-Korts et M Malosetti (2016). « What should students in plant breeding know about the statistical aspects of genotype× environment interactions? » In : *Crop Science* 56.5. ISBN: 0011-183X Publisher: Wiley Online Library, p. 2119-2140.

Van Slageren, MW (1994). *Wild wheats: a monograph of Aegilops L. and Amblyopyrum (Jaub. & Spach) Eig (Poaceae)*. Agricultural University Wageningen. isbn : 90-6754-377-2.

Vehtari, A, A Gelman et J Gabry (1er sept. 2017). « Practical Bayesian model evaluation using leave-one-out cross-validation and WAIC ». In : *Statistics and Computing* 27.5, p. 1413-1432. issn : 1573-1375. doi : 10.1007/s11222-016-9696-4.

Vindras-Fouillet, C (2014). « Évaluation de la qualité sensorielle de produits pour la sélection participative en agriculture biologique: cas du blé et du brocoli ». Thèse de doct. Rennes, Agrocampus Ouest.

Weltzien, E, ME Smith, LS Meitzner et L Sperling (2003). « Technical and institutional issues in participatory plant breeding-from the perspective of formal plant breeding: A global analysis of issues, results, and current experience ». In : *PPB monograph*. ISBN: 9586940519.

Wendmu, TA, A Cuni-Sanchez, HT Abebe, HJ de Boer, FA Abera et OT Westengen (2022). « Cultural Effects on Sorghum Varieties Grown, Traits Preferred, and Seed Management Practices in Northern Ethiopia ». In : *Economic Botany* 76.3. ISBN: 0013-0001 Publisher: Springer, p. 233-249.

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. ISBN: 1774-0746 Publisher: Springer, p. 503-515.

Willcox, G, S Fornite et L Herveux (2008). « Early Holocene cultivation before domestication in northern Syria ». In : *Vegetation history and archaeobotany* 17. Publisher: Springer, p. 313-325.

Wricke, G (1962). « Uber eine Methode zur Erfassung der okologischen Streubreite in Feldverzuchen ». In : *Z. Pflanzenzuchtg* 47, p. 92-96.

Zohary, D, M Hopf et E Weiss (2012). *Domestication of Plants in the Old World: The origin and spread of domesticated plants in Southwest Asia, Europe, and the Mediterranean Basin*. Oxford University Press.

Références

Appendices

Annexe A

Annexes du chapitre II

Inconnu-de-FAT	CCP3	Pop-2-J-Bles
Alauda-x-Royo	Champagne-Barbu	Pop-Dynamique-2
Bladette-du-Sud-Ouest	Emmer-Rouge	Poulard-Blanc-Velu-de-Touraine
Blanc-de-Lorraine	Eppweizen	Redon-Glume-Velues
Blé-d-Argonne	Faux-Bordeaux-Inversible	Renan
Blé-du-Gatinais	Fier-du-Hayon	Rocaloex
Blé-du-Roussillon	GE-Shwaben	Rouge-de-Gruyere
Blé-Pourpre-Julien	Gros-Bleu	Rouge-de-Marchissy
Blés-Rabourou	Hatif-Inversable	Rouge-de-Saint-Laud
C242	Helario	Rouge-des-Charmilles
C37	Hybride-de-la-Paix	Rouge-du-Roc
C50	Khorayon	Rouge-Hymalya
CCP1	Mars-Ardennais	Royo-de-Pamplume
CCP1-equilibre	Mélange-VIL1	Trancherie-coll10
CCP2-eq-M14	Melange-VIL2	Trancherie-coll15
CCP2-equilibre	Melange-VIL3	Trancherie-coll17
CCP2-ex-sel	Mottin	Trigo-de-Conderal
CCP2-ex-sel-M11	PNN+blanc-barbu	Vieux-Ble-Autrichien
CCP2-excedentaire	Petit-Rouge-du-Morvan	

Table A.1 – Le nom des 56 variétés de blé dites supplémentaires, prises en compte le cas échéant lors du diagnostic agronomique participatif de chaque essai.

Notice d'information et de consentement éclairé - Enquête de type entretien individuel

Titre du projet : Caractérisation des situations agricoles et des environnements culturales pour mieux évaluer les variétés paysannes et leur évolution . Chercheurs responsables scientifiques du projet :
Michel Turbet Delof, Isabelle Goldringer (INRAE, UMR GQE - Le Moulon) ,
Arnaud Gauffreteau (INRAE, UMR AGRONOMIE)
Organisme porteur de l'enquête : INRAE, UMR GQE - Le Moulon, IDEEV 12 route

128
Nom, Prénom de l'enquêteur et de l'enquêtrice : Michel Turbet Delof et Louise Perrisseau
Adresse électronique : michel.turbet-delof@inrae.fr
Numéro de téléphone : 01 69 15 42 19
But du projet de la recherche : Cette recherche s'inscrit dans la thèse de Michel Turbet Delof. Elle vise i) à caractériser les situations agricoles des blés paysans, ii) à caractériser les environnements de culture pour évaluer les blés paysans (via un diagnostic agronomique participatif), iii) à évaluer des variétés avec des modèles statistiques prenant mieux en compte l'environnement et iv) estimer la différentiation génétique et la sélection naturelle de ces populations de blé.
Ces enquêtes permettront de répondre à l'axe de recherche i), qui vise à caractériser les situations agricoles associées aux blés paysans. En particulier il cherche à :

1. Analyser le fonctionnement des structures qui cultivent et sélectionnent ces blés (fermes des paysans-expérimentateurs et associations autour des semences paysannes) en lien avec leurs différents objectifs (globaux, productifs, de sélection, d'apprentissage).
2. Décrire les pratiques culturales et de sélection ainsi que les contextes pédo-climatiques de ces structures.
3. Identifier des « grandes » logiques d'action pour cultiver et gérer ces blés paysans en fonction de ces situations agricoles.

Financement : Cette thèse est financée à moitié par le projet MoBiDiv (lui-même financé par le Programme Prioritaire de Recherche « Cultiver et protéger autrement » de l'ANR, `https://www6.inrae.fr/cultiver-proteger-autrement/Les-Projets/MOBIDIV`), un quart par le département BAP de l'INRAE et un quart par le méta-programme INRAE METABIO.

Ce à quoi vous vous engagez et vos droits :
Participation à un entretien enregistré : Si vous acceptez de participer à cette enquête, vous prendrez part soit à un entretien téléphonique, soit à un entretien par web-caméra. Vous serez complètement libre des informations que vous souhaitez communiquer ou non. Cet entretien sera fait dans le respect de vos opinions et de votre vécu. L'entretien sera enregistré sous format audio ou vidéo et l'enquêteur prendra des notes. L'enregistrement sera supprimé une fois la thèse terminée.
Vos droits à la confidentialité et à la protection des données :

1. Les données obtenues seront traitées avec la confidentialité la plus entière.
2. Toutes les données seront gardées dans un endroit sécurisé et seul.e.s les chercheur.euse.s associé.e.s à l'étude y auront accès.

Le contrôle de vos données :

1. Votre contribution à cet entretien est volontaire.
2. Vous pourrez vous retirer de la recherche à tout moment.

3. Votre décision de participer, de refuser de participer, ou de cesser votre participation n'aura aucun effet sur vos relations futures avec les structures encadrant l'étude.
4. Vous avez le droit de consulter, corriger et conserver l'ensemble des éléments issus de votre entretien.

Diffusion
Différents supports écrits et communications orales seront développés pour diffuser les résultats globaux du projet, à la fois vers un public professionnel et scientifique.
Dans les documents de diffusion/communication la confidentialité sera garantie (verbatims anonymes ou reformulations, synthèses, agrégations et interprétations des propos recueillis).
Réutilisation des données
Les données issues de votre entretien pourront être mobilisées lors de projets de recherche ultérieurs permettant d'affiner ou consolider les pistes de recherche issues du présent projet (à l'exclusion de toute exploitation à des fins commerciales), dans les mêmes conditions de confidentialité et de sécurité.
Vos droits de poser des questions :
Vous pouvez poser des questions au sujet de la recherche en tout temps (avant, pendant et après votre participation) en communiquant avec les responsables scientifiques du projet, M. Michel Turbet Delof, Mme Isabelle Goldringer et M. Arnaud Gauffreteau, par courrier électronique : michel.turbet-delof@inrae.fr,
isabelle.goldringer@inrae.fr ou arnaud.gauffreteau@inrae.fr.
Consentement à la participation :
En signant le formulaire de consentement, vous certifiez que vous avez lu et compris les renseignements ci-dessus, que l'enquêteur ou l'enquêtrice a répondu à vos questions de façon satisfaisante et qu'il ou elle vous a avisé que vous étiez libre d'annuler votre consentement ou de vous retirer de l'entretien à tout moment, sans préjudice.
A remplir par l'enquêté.e :
J'ai lu et compris les renseignements ci-dessus, en particulier ce à quoi je m'engage et mes droits, et j'accepte de plein gré de participer à cette recherche.
Date, Nom, Prénom, Signature :
À remplir par l'enquêteur ou enquêtrice :
Date, Nom, Prénom, Signature :

Annexe A. Annexes du chapitre II

Annexe B

Annexes du chapitre III

B. 1 Guides d'entretien

Premier guide d'entretien

Questionnaire est semi-directif. En italiques sont les questions posées uniquement pour préciser des éléments que les questions ouvertes n'auraient pas pu fournir.

1) Le fonctionnement global de la ferme et place du blé (30min)
Pouvez-vous me présenter votre ferme ?

- *L'ensemble des activités*
- *Les priorités pour la ferme (objectifs principaux)*
- *Surfaces (cultures , prairies, blés)*
- *Nombre de bêtes (quelle race)*
- *Qui travaille ?*
- *Rapide historique*
- *Collaboration avec acteurs locaux*

Y-a-t 'il eu des grands changements dans votre ferme dans les 10 dernières années ? (Conversion en AB, début/fin d'atelier...)
Avez-vous une rotation type ? Quel est l'assolement type ?
Depuis combien de temps cultivez-vous des blés paysans, que cultivez-vous ? Quelle est la place du blé dans votre ferme ? *(surface, temps , importance dans la viabilité de la ferme, pourquoi vous faites du blé ? Pourquoi vous faites du blé ?).*
Qu'est-ce que vous faite de votre blé (/blés paysans) *(grains, farine, pain, paille, « déchet » (glume, son, résidus du tri) ?* Quel objectif vous recherchez pour vos blés ?
Avez-vous des objectifs quantitatifs de production ? Est-ce qu'il y a des éléments importants qu'on a pas évoqués sur le fonctionnement de votre ferme ?

2 Les environnements de culture des blés (paysans et commerciaux) (30min)
Avez-vous des grands environnements de culture (c'est-à-dire un ensemble de parcelles qui ont des contraintes spécifiques impactant la performance des cultures et vos pratiques) ? Quels sont-ils ? :

- *Caractérisation de sol – profondeur+proportion de cailloux+drainage –*
- *Topographie et éléments paysagés*
- *Difficultés et contrainte particulières associées à chaque environnement de culture (climatiques, propriétés du sol...)*
- *Stress climatiques et biotiques fréquemment rencontrées (anoxie, échaudage, trop humide, vent (verse), maladies, animaux indésirés, adventives...)*
- *Potentialités de l'environnement de culture (par rapport à vos pratiques)*

Comment conduisez-vous votre culture de blé ? (Itinéraire technique du blé, quel précédent et ante-précédent...), ces pratiques sont les mêmes pour toutes les parcelles ?

- *Travail du sol (demander la profondeur du labour)*
- *Fertilisation*
- *Comment choisissez-vous votre date de semis*
- *Désherbage*
- *Carie du blé*
- *Verse*
- *Pratiques de tri*

Vous rappelez vous de circonstances exceptionnelles sur vos cultures de blés (événements météorologiques, infestation par une population biologique (plantes, maladies, animaux...)) ? Si oui pouvez-vous dire les éléments marquants ?
Avez-vous un historique des rendements de culture de blé de votre ferme ? Voulez-vous bien me les partager ? Vos rendements varient entre combien et combien ?
Utilisez-vous les variétés issues de vos essais collection dans vos variétés de production ?

3 Les pratiques de sélection et de gestion des variétés paysannes (30 min)
Depuis quand accueillez-vous des essais/collections paysannes ? Pourquoi cet intérêt pour ce type de variétés ?
Décrire comment au fils des années ils expérimentent ces variétés (question ouverte et à partir de cela approfondir).
Quelles variétés paysannes avez-vous récupérées pour votre collection/essai ? Pourquoi (espèce de blé ?)
D'où viennent vos semences paysannes (échanges réguliers) ? (Dans quel collectif(s) êtes-vous inséré ?)
Qu'est que vous recherchez avec ces variétés (caractéristiques, variétés, pourquoi, et ce que vous recherchez pas) ? Des variétés correspondent à ça (des variétés ne correspondent pas du tout) ?
Quels critères vous semble pertinents pour juger les variétés de blé (en essai ou en champs) ?
Quelles pratiques utilisez-vous pour gérer ces variétés (sélection massale, sélection inter-pop, croisement, mélange, tri, échange...)
Quelles pratiques de tri des blés (hétérogènes) en grande parcelle ? (en particulier que faite

vous des petits grains ? Quel type de grain idéal ? Lien avec la mouture) Cultivez-vous vos essais de la même manière que vos cultures en "production" ? (Choix de la parcelle, dans un champ, date de semis, différence dans l'itinéraire technique, différence dans le tri à la récolte). Utilisez-vous ces essais/collection pour tester de nouvelles pratiques agronomiques (densité, date de semis, fertilisation...) Quelles-sont vos principales difficultés liées à la mise en place et au suivi de vos essais/collections ? Qu'est que vous attendez de l'expérimentation collective ?

Second guide d'entretien

Questionnaire semi-directif sur les itinéraires d'expérimentations.

1. Essais variétaux à la ferme
Début des essais paysans ?
1.1 conception des essais variétaux à la ferme : D'où t'es venu l'idée de faire des essais de variété paysanne ?
Pourquoi ? Qu'est ce que tu attendais ? Est-ce que tu imaginais que cela pouvait rater ?
Combien de var paysans ? Dans quels dispositifs (var témoin, répétition) ?
Est- ce que la conception de ses expérimentations a évolué au cours du temps ?
Quels sont les objectifs sur le long terme et objectifs à court terme ?
1.2 Conduite de l'essai Combien de var paysans en moyenne (cela a-t-il évolué) ?
Qu'est-ce que tu as observé, est que tu prenais des notes, (photo, vidéo) ?
Qu'est-ce qui t'a surpris ? Est-ce qu'il y a eu des problèmes en cours de route ?
1.3 Interprétation Quelles grandes conclusions issues de ces essais ?
Comment faisais-tu tes comparaisons ? Entre variétés ? Entre répétitions ? Entre années ? Entre parcelles de ta ferme ?
Pour toi, de quoi dépend le succès de cet essai ?

2. Focus sur quelques variétés issues de votre travail de sélection
(Pour chaque variété paysanne)
Histoire de son origine jusqu'à maintenant sur la ferme.
pratique de gestion et sélection dont échange avec d'autres fermes
Lien avec la production (le mélange de production).

3 Projets de recherches ?
Dans quels projets de recherche vous avez participé ? Qu'avez-vous appris de ces projets ?

B. 2 Itinéraires d'expérimentation et verbatims

Itinéraires d'expérimentation

Ici sont présentées les représentations narratives des ITEs de neuf paysans issues des informations mentionnées dans les enquêtes avec le premier guide d'entretien (moins détaillés qu'avec le second guide d'entretien).

	CHD	EMH	ERZ	FAT	FLM	JUC	MAV	PAJ	RAB	VIL
Première enquête	04/04 2022	07/04 2022	06/04 2022	06/04 2022	18/04 2022	07/04 2022	27/04 2022	15/04 2022	13/04 2022	07/04 2022
Seconde enquête									01/12 2023	
Questions complémentaires	22/11 2023	20/11 2023	27/11 2023	12/12 2023	06/12 2023	29/11 2023	23/11 2023	30/11 2023	05/12 2023	16/11 2023
Surface en fourrage						T				T
Objectif de rendement annuel blé paysan	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T
Moyenne de rendement annuel	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T
Min de rendement annuel	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T
Max de rendement annuel	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T
Part du chiffre d'affaires blé (paysan, grain,semence , farine, pain)				T				T	T	
SAU totale 90ha ?					T					
Finalités globales de la ferme						T			T	

Table B.1 – Chronologie des enquêtes et questions complémentaires. T indique que la question complémentaire a été posée.

ITEs mentionnés par MAV. En 2009 MAV est allé à une rencontre sur les blés paysans chez JFB. Il y a récupéré 25 blés de pays qu'il a semés sur 50 ares, juste à côté de ses blés modernes. Ils étaient 1/3 plus hauts et étaient plus compétitifs vis-à-vis des coquelicots qui lui posaient problème à cette époque. Suite à cela MAV a réalisé des essais variétaux paysans jusqu'en 2023, ce qu'il lui a permis d'enrichir son panel de variété. En 2010 il choisit la variété Japhabelle pour sa production. Au bout de quatre ans il observe une diminution de la diversité intra-variétale. Il découvre avec la thèse de Pierre Rivière une dizaine de variétés qu'il introduit dans son mélange de production en 2015. Il renomme ce mélange Japhayon. Puis, suite à l'accueil d'un grand nombre de variétés pour la fête du RSP de 2017 il introduit certaines variétés dans son mélange de production.
En 2017, MAV réalise des semis précoces et à basse densité (5-15 kg/ha), il observe 11 variétés avec une capacité de tallage et à montaison tardive. Il les mélange et forme alors le mélange Popayon qu'il a intégré en production et qu'il ne sème qu'avec une conduite spécifique (qui est différente de ces autres blé en production), en semis précoce et à basse densité.
En 2017, il repère des grains pourpres qui sont apparus dans le croisement C42 (Pollux x Blé-des-Hautes-Pyrénées). Il multiplie alors cette sous-population qu'il nomme Pourpayon. La variété Pourpayon présente un comportement agronomique moyen, un bon rendement en meunerie et un bon pain (à la mie bleutée). Pourpayon est alors ajouté au portefeuille variétal de MAV en plus de Japhayon et Popayon.
En 2022, MAV observe que la variété Savoysone qu'il cultivait en essai depuis 2014, a changé. Les épis, qui étaient à maturité initialement partagés entre le blanc et le roux, ne

sont chez lui plus que roux. Il la rebaptise Savoyon [1] (Fig III.4).

ITEs mentionnés par VIL. VIL a commencé à réaliser des essais variétaux en 2010 (trois ans avant la reprise de la ferme de son père) avec une 30aine de variétés issues de deux épis chacune, épis obtenus de l'association *Les jardins d'hier et de demain* et d'un paysan de l'Aude. En 2013, il demande une 50aine de variété de pays au CRB (variétés historiquement de sa région). De 2015 à 2018 il continue les demande au CRB et à d'autres centres en Angleterre et Allemagne. Il utilise en production trois populations. Il y a la population issue du mélange de la collection de 2010 (il lui a fallu environ cinq ans pour en obtenir un hectare), une sélection de 60 variétés sur 80 réalisées en 2015 et le mélange que nous avons nommé Trancherie dans cette thèse. Trancherie est issue du premier mélange mais a ensuite été cultivée dans une succession d'environnements très stressants (semis direct, en association avec du trèfle et la luzerne) contrairement au premier mélange. Il a observé que certaines composantes du mélange disparaissaient (par exemples les blés Poulards).

ITEs mentionnés par JUC. En 2017, JUC commence ses essais variétaux paysans avec des semences issus de l'association Graine de Noé, soit un an avant son installation. Il cultive dès 2018 en production le mélange diversifié Guichard. Suite à ses observations dans ses essais et multiplications, il a gardé en production sept variétés : Gros-bleu, Compact-Hérisson, Rouge-de-Bordeaux, Rouge-du-Roc, Touselle, blé-pop-de-Gaudry et un mélange de blés de printemps.

ITEs mentionnés par PAJ. PAJ a commencé à faire de petits essais variétaux de blé et de maïs dans les années 2005. En 2010, PAJ passe en AB et commence à cultiver Rouge-de-Bordeaux en production (blé qui a été validé dans ces essais). En 2015, il cofonde un collectif pour produire des pâtes à partir du blé tendre. Ils effectuent des tests avec différentes variétés et différents moulins. Ils retiennent Alauda et le moulin Astrier pour la fabrication artisanale de pâte. PAJ réalise certaines années des essais paysans en lien avec l'ARDEAR. Il lui arrive souvent d'y inclure des variétés que d'autres paysan.ne.s lui demandent de tester/multiplier. En particulier en 2017, il réalise un essai avec 22 variétés répétées. La même année, il fait un échange de 100 kg d'Alauda contre le Mélange-Suisse. La ferme depuis cultive en production Alauda, Mélange-Suisse et Rouge-de-Bordeaux.

ITEs mentionnés par CHD. CHD a débuté les essais variétaux en 2005 avec huit des 10 variétés sur l'étude de la complémentarité gestion *in situ* et *ex situ*. Quand il fallut récolter il a tout mélangé et cela a constitué son mélange de départ. L'année suivant il a pu récupérer plusieurs kilos de Touselle-Rouge-des-Hautes-Alpes qu'il a d'abord cultivée en pur puis associée à son mélange. En parallèle CHD a fortement augmenté le nombre de populations dans ses essais (jusqu'200 populations). Tous les deux ans il rajoute le surplus de sa collection dans ce mélange en production. Néanmoins il fait attentions à ne pas insérer les populations trop tardives à floraison (qui ne seraient pas matures à la récolte). De plus en 2017, CHD a réalisé un nouveau mélange avec une trentaine de populations mélangées à parts égales. Elles sont issues du travail d'observation de sa

1. J'ai personnellement participé à la suggestion du nom.

collection et en particulier de variétés issues de croisements du programme de sélection participative, souvent sélectionnées massalement par CHD.

ITEs mentionnés par FLM. FLM a commencé à s'intéresser aux variétés paysannes à la formation au GAB en 2004. En 2005 il commence ses propres essais variétaux et crée son premier mélange en production qu'il nommera plus tard Pop-Dynamique-1. Il s'est vite équipé avec un semoir et une moissonneuse-batteuse expérimentale. Il a déjà eu plus de 400 variétés dans ses essais. En 2010, FLM réalise Pop-Dynamique-2 à partir de trois variétés de pays et Saint-Priest [2] et Alauda. C'est son mélange en production. En juillet 2012, FLM observe un épi roux non barbu bizarre dans Pop-Dynamique-2. Il le sème en ligne l'année d'après et observe une variabilité de plantes (avec ou sans barbe, plus ou moins haut...). Il suppose que c'est le croisement spontané entre Alauda et Saint-Priest qu'il nomme Chamdamour. En 2017 il réalise une sélection massale de Chadamour sur la taille de l'épi mais n'a pas observé de réponse à sa sélection.

ITEs mentionnés par EMH. A la reprise de la ferme fin 2018, EMH a continué faire des essais variétaux à la ferme en lien avec l'ARDEAR et INRAE. La ferme cultive en production depuis 2014 un mélange diversifié (le mélange Guichard). En 2019, EMH rajoute 3 variétés pour qu'il soit moins sensible à la verse (1/3 du mélange initiale). En 2020, EMH mélange les variétés les moins sensibles à la verse de son essai (surtout deux variétés issues de croisement avec des blés de Beauce mais aussi Pop-Dynamique-2 et Savoysone), pour la thèse nous avons nommé ce mélange Grand-Clesle.

ITEs mentionnés par ERZ. En 2017, un ami d'Aveyron lui donne une centaine de kilos du Rouge-de-Bordeaux qu'il cultive maintenant en production en plus de variétés commerciales. Il a également fait une série d'essais variétaux paysans et a observé que le Blé-d-Argonne et Roux-des-Ardennes sembleraient plus adaptés aux sols hydromorphes que d'autres variétés comme le Blé-de-Reims. Ces deux variétés en 2022 n'ont pas été intégrées à sa production par ERZ.

ITEs mentionnés par FAT. FAT récupère en 2020 par une paysanne, quelques kilos de Savoysone qu'il teste en grande parcelle. En 2021 FAT réalise son premier essai variétal paysan en lien avec l'expérimentation liée à cette thèse (il ajoute quelques variétés qu'il aimerait tester/multiplier).

Verbatims du chapitre

ID	Verbatim
CHD-1a	L'objectif aujourd'hui est de se ménager sur la charge de travail. C'est pour ça qu'on a embauché un salarié depuis un an. [...] Après si on se projette un peu plus à moyen terme, sur les 4 associés, on est 3 à avoir plus de 50 ans. Donc on se projette un peu sur la fin de carrière. On est des anciens du GAEC. [...] On aimerait bien accueillir des gens sur la ferme. On va préparer le futur départ.

2. Selon les recherches personnelles de FLM, Saint-Priest n'est pas une variété de pays comme supposé initialement mais issue de la variété suédoise Progress (1947).

CHD-1b	C'est marginal, mais ça arrive régulièrement qu'on ne boucle pas en blé, qu'on achète quelques tonnes pour faire la soudure.
CHD-1c	Je triche un peu pour rallonger ma rotation
CHD-1d	Moi, ça a été personnellement vraiment enrichissant[...] Ça m'a ouvert sur plein de trucs. Très concrètement sur la sélection. [...] Sur les aspects plus négatifs, c'est plutôt au niveau collectif [...] On a eu du mal à en faire profiter les autres. [...] Le fait est que pour les gens qui sont dans les associations locales et dans les groupes avec des paysans, les jeunes en formation, c'est des choses qui paraissent hyper inaccessibles [...] "C'est sympa, ça a l'air bien, mais ce n'est pas pour nous". [...] C'est un peu dommage. Je ne sais pas comment on aurait pu faire autrement.
EMH-1a	Mais là non c'est un peu gâchis que ça parte là-bas, même. C'est un peu une question de simplicité. [...] Par contre, on a plus de protéines sur le blé. Sur le blé paysan. Là, j'étais à 12,5 je crois cette année contre 10,5 pour les autres. Mais on peut avoir plus que ça, je crois que c'est plutôt 13.5 d'habitude.
ERZ-1a	Voir si demain on pouvait, je n'aime pas le mot, mais se servir de telle ou telle variété pour donner un genre de référence auprès des boulangers.
FAT-1a	L'objectif, moi, c'est de ne pas passer par tous les organismes qui sont en place. [...] J'ai envie de retrouver de l'autonomie au maximum.
FAT-1b	J'ai [pour] objectif aussi, (mon moulin est déjà commandé), de monter un atelier de farine, farine pour vendre aux gens, et dans un premier temps, dans 3-4 ans, monter un four à pain, pour valoriser aussi les céréales au maximum sur la ferme. Je ne voulais pas monter cet atelier-là en restant avec du blé classique. Ça ne m'intéressait pas.
FLM-1a	Il y a une 5e personne en cours d'association. Et pour réussir à servir tout le monde sur la table, il y a des demandes à la création d'un atelier pain, pour faire du pain à partir de la farine
FLM-1b	Disons que les variétés, elles ont toutes été validées dans le niveau agronomique. Après, maintenant, c'est la deuxième étape, c'est parmi les meilleurs au niveau agronomique, on prend les meilleurs pour la qualité.
FLM-1c	Et donc dans les essais, en fait, on se facilite la tâche pour bien voir les variétés, pour bien circuler dedans. Pour assurer que ça fonctionne bien. [...] [je souhaiterais que] les essais, ils soient en conditions plus réelles. pas trop, déconnectés, pourquoi pas de semer les essais de blé avec de la prairie. C'est un truc qui me trotte dans la tête depuis 2-3 ans
FLM-1d	Un des aspects, c'est comment mieux cultiver ces variétés-là. Quand est-ce qu'il faut les semer ? à quelle densité ? tout ça. L'autre axe de travail, c'est d'explorer des modes de culture différents. Par exemple, sans labour, semis très précoce, blés associés avec de la prairie [...] dans quelle mesure il faut sélectionner des variétés particulières pour le genre d'utilisation. Troisième chose, c'est continuer le travail d'être un réservoir de biodiversité, et récupérer de nouvelles variétés, faire des croisements, faire des tests de planification pour la qualité, des choses comme ça. De continuer à mieux connaître les variétés. Et de les rendre accessibles, de les multiplier de les sauvegarder, qu'elles soient accessibles à plus de 100 grammes mais quelques dizaines de kilos.
JUC-1a	Après je trouve que ces blés anciens sont très stables dans les rendements, c'est pas folichon mais c'est très stable, qu'ils aient chaud, froid, et même en sécheresse ils sont beaux, même quand c'est humide ils sont beaux, c'est ça qui est intéressant.
JUC-1b	[Et concernant tes petites terres, ou tes terres en fin de rotation ? [...] C'est juste que je ne mets pas la même chose, donc là pour la première année on a mis le compact hérisson, qui est un blé censé être très résistant à la sécheresse, et très performant malgré tout sur des terres séchantes, pauvres, un peu comme le petit épeautre.
JUC-2a	On a des objectifs en termes de goût. On va plutôt raisonner en termes de variétés de blé, de boulangerie avec qui on travaille.
JUC-2b	On a un objectif en termes de biodiversité. On voudrait qu'il y ait autant de biodiversité que dans une réserve naturelle.
JUC-2c	Et on aimerait bien en vivre aussi [...] j'avais mis des investissements très ambitieux, mais le problème, c'est que tout a augmenté dans les coûts des matières premières, dans les travaux, dans le coût de l'argent, du crédit. Là, on voit bien que ça a explosé. L'énergie, je n'avais pas anticipé autant d'augmentation.
PAJ-1a	Et puis, l'aspect débouché aussi [...] Tous les paysans boulangers veulent du Rouge-de-Bordeaux.

PAJ-1b	Je pense qu'on a un devoir nous paysans, c'est de continuer à les conserver, à les multiplier à les transmettre, à les distribuer, à les partager.
PAJ-1c	L'avantage de ces variétés anciennes, c'est que tu as un développement végétatif qui fait que ça asphyxie les adventices.[...] Ça j'en ai pour preuve quand j'avais encore des variétés à paille courte dites modernes, quand on est passé en bio et que je voyais les adventices se développer dans les parcelles de blé, mais c'était considérable. Quand on mettait une variété de blé ancienne dans cette parcelle d'essai, les adventices étaient vachement plus limitées.
PAJ-1d	on faisait des tests à l'aveugle, [...] on avait une grille de notation, [...] la couleur de la pâte, la tenue de la pâte, la structure en bouche, il y avait pas mal de critères, je me souviens, et puis jusqu'au goût.
RAB-1a	On dit que les variétés rouges supportent mieux les terres légères, alors que les blés blancs supportent bien les terres lourdes.
RAB-1b	[tu mettais en général tes collections dans les endroits un peu les plus difficiles de tes champs ?] Oui, mais pas que. Avant, je faisais vachement ça [...] C'était aussi pour les renforcer. Avec l'idée que s'ils arrivent à faire leur cycle dans les endroits les pires, les endroits où ça va bien, ils vont rigoler. [...] Mais là, maintenant, ils sont plutôt, je vais dire, dans des endroits représentatifs.[...] quelque part en mémoire et ils enregistrent qu'il peut se passer différentes choses. Il faut être capable de mettre de la racine si une année est sèche et puis être capable de supporter l'eau si une année est humide.
RAB-1c	C'était les dix variétés qui n'étaient pas versées alors que toutes les autres l'étaient.
RAB-1d	Du coup, chaque année, j'ai rajouté des variétés qui me plaisaient. Il y a certaines variétés qui ont été en très grosses proportions rajoutées. Et puis il y en a d'autres qui ont eu tendance à disparaître. Mais je pense qu'il y en a plus d'une centaine qui sont dans le mélange à la base. Après, il y en a certainement qu'on voit disparaître complètement. Mais il y a aussi certainement d'autres qui sont apparues, des croisements spontanés qui se sont faits.
RAB-1e	Il a vécu aussi pas mal. J'en ai filé à différentes personnes, surtout dans la région. Et puis souvent, ces gens-là me l'ont redonné au bout de 2-3 ans. Et puis vu qu'il a passé 2-3 ou 5 ans dans d'autres fermes, sur d'autres climats, d'autres types de sols, il a pris de la mémoire ailleurs et il a souvent été enrichi encore par des variétés que je n'ai même pas ici.
RAB-1f	C'est aussi pour jouer le jeu par rapport à la recherche. On a besoin de gens comme vous qui sont un peu de notre bord aussi. [...] Si ça peut nous aider à défendre les semences paysannes en général en prouvant scientifiquement qu'elles ont des intérêts et tout. Ça nous aidera à les propager.
RAB-3a	mais il y a aussi un truc un peu politique, quoi, c'est de prouver aussi que l'agroécologie, ça peut marcher, et puis qu'on a plein de choses à dire de ce côté-là, et qu'on n'a pas besoin d'OGM pour nourrir le monde
RAB-3b	Dans l'essai, je regarde comment les blés se tiennent, comment ils poussent, comment ils sont beaux ou pas, ceux qui donnent envie. J'essaie de passer de mettre un peu des notes, même pour moi, quand il y a des trucs un peu notables. Par exemple, les années où il y a beaucoup de verse, je vais mettre une note de verse pour tout le monde. [...] certaines années, je ne le mets pas, parce que tout le monde se porte bien. Du coup, c'est moins remarquable.
RAB-3c	[L'essai de variétés paysanne] ça fait un peu partie de l'identité de la ferme
RAB-3d	le Renan, il est vachement pédagogique, et quand on reçoit des groupes et tout [...] Enfin, c'est un blé moderne [...] c'est souvent sur celui-là qu'on reste le plus longtemps pour discuter
RAB-3e	Quand il y a le plus grand public, entre guillemets, qui vient voir les blés, c'est important de leur montrer celui du coin. On a la vache d'Abondance, on a la chèvre de Savoie, [...] il y a des cépages de vignes qui ne sont pas ailleurs, tout le monde les connaît, mais par contre, pour les céréales à la paille, rien du tout [...] du coup, c'est important de leur montrer et de le faire connaître [...] Et puis je les ai diffusés aussi le plus vite possible, pour être sûr qu'ils vivent, qu'ils ne disparaissent pas
RAB-3f	Des fois ils versent un peu, il y a rien qui motive à mettre beaucoup d'énergie dessus.
RAB-3g	Et il y a eu des années, genre 2014, où il y avait beaucoup de grains germés aussi. Il y a eu certaines variétés qui étaient germées à pas loin de 100%. Il y a une variété qui a disparu quasiment cette année-là. [...] Je l'avais mis pas mal dans le mélange. [..] C'était le blé-de-l-Himalaya. Il est facile à reconnaître. Il est rouge avec des grains rouges, rouges écarlates

RAB-3h	Le principal, c'est d'avoir une farine chouette à proposer. Avec beaucoup de gens qui viennent chercher de la farine, qui sont malades, qui ont des problèmes de santé, puis qui digèrent les pains, qui se font à partir de la farine là, du coup. [...] On se dit qu'on n'est pas tout à fait dans le faux, quoi.
RAB-3i	À toutes les étapes, il peut y avoir des échecs. Cette année par exemple on a failli ne pas réussir à semer
RAB-3j	ça permet de discuter, de me présenter, de parler d'énormément de choses aux gens qui viennent visiter. Avec la collection comme support, quoi [...] Ça fait des liens d'amitié. Et puis de confiance, aussi. Alors, du coup, je pense que ça aide aussi à... Tu sais, comme en ce moment, il y a quand même une crise sur la bio, un peu de surproduction et tout. Il y a des gens qui ont du mal à trouver des débouchés. Nous, on n'a pas ce problème-là. Mais parce qu'il y a une forme un peu de reconnaissance de la part des boulangers, surtout, mais aussi des gens qui viennent à la ferme ou les gens qui connaissent, qui vont chercher la bio.
VIL-1a	c'est [...] des sols qui sont sensibles à l'excès d'humidité d'hiver et sensibles à l'excès de sécheresse au printemps. [...] Donc je suis plutôt passionné par essayer de voir comment, j'appelle ça un système sous contrainte, on peut essayer de s'y adapter
VIL-1b	C'est de se dire que si j'arrive à sélectionner du matériel qui s'adapte dans des contraintes très difficiles pour moi, c'est un matériel qui s'adaptera partout sur ma ferme. Donc beaucoup plus robuste, beaucoup plus polyvalent que les variétés du commerce.
VIL-1c	Finalement au départ dans les années 2008-2010 c'était vraiment de la curiosité. Et puis je suis un peu tombé sous le charme de cette diversité, de me rendre compte que les blés c'était pas homogène comme on a l'habitude de les voir sur les bords des routes
VIL-1d	Depuis l'année dernière, j'ai investi dans une moisse-bat' expérimentale. C'est mon papa qui m'a construit un semoir expérimental. Ça m'ouvre une possibilité incroyable. Le frein matériel était fortement présent sur la ferme.
VIL-1e	Il faut que j'arrive à la promotion de la biodiversité, pour moi c'est essentiel dans le système où je suis. Si je veux trouver de la résilience, une stabilité, il faut absolument que j'aie une vingtaine de cultures. Il faut absolument que j'aie aussi de la diversité cultivée intra-spécifique, en termes de variétés et intra-variétale
VIL-1f	Les variétés du commerce, je peux les mettre que derrière la luzerne. Sinon, ce n'est même pas la peine. Sinon, c'est une infestation d'adventices. Sinon, c'est des rendements ridicules.

Table B.2 – Les verbatims utilisés dans le chapitre.

Annexe B. Annexes du chapitre III

Annexe C

Annexes du chapitre IV

C. 1 Compléments au protocole

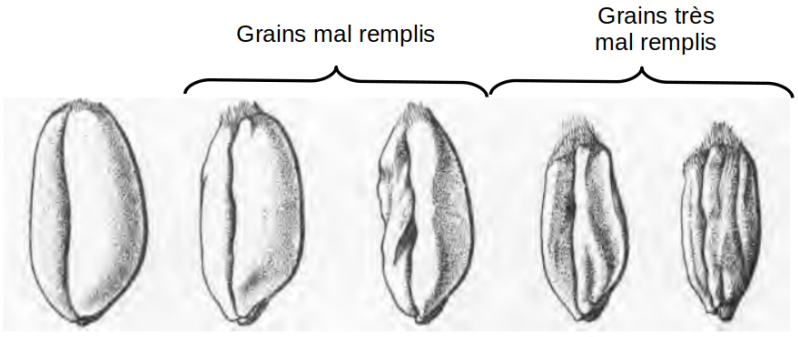


Figure C.1 – Notations visuelle du remplissage du grain (adapté de Jonnard 1951).

C. 2 Exemple de rapport pour le diagnostic hybride

Rapport pour le diagnostic hybride

Rapport de l'essai de EMH (2022-2023), pour le diagnostic hybride

Avec la collaboration de :

Rapport pour le diagnostic hybride

Rapport pour le diagnostic hybride

1. Principe du diagnostic agronomique hybride

1.1. Objectifs et étapes

L'objectif est d'expliquer l'élaboration du rendement des variétés testées sur la ferme.

- La première étape vise à identifier des facteurs environnementaux, qui ont joué dans l'élaboration du rendement à l'échelle de l'essai. De nombreux facteurs environnementaux sont potentiellement impactants, mais votre expertise et la méthode du diagnostic agronomique vont nous permettre de sélectionner les plus pertinents.

- La seconde étape consiste à mieux comprendre le comportement des différentes variétés sachant les principaux stress affectant l'essai.

Les objectifs et les étapes sont représentés dans la figure 1.

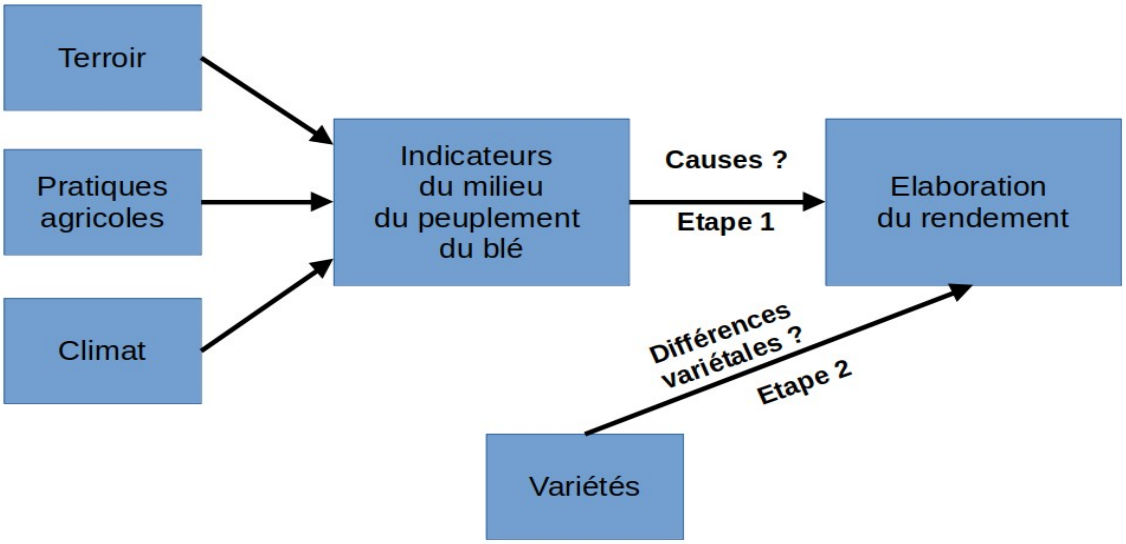


Figure 1: Schéma conceptuel du diagnostic

- Une troisième étape consistera à considérer le comportement des variétés dans l'ensemble du réseau d'essais en tenant compte de la spécificité de chaque essai.

1.2. Méthode du diagnostic

Nous allons étudier les composantes de rendement (nb_pieds/m2, nb_épis par pied, nb_grains par épi et poids d'1 grain) pour pouvoir identifier les périodes où les stress ont été le plus impactants (figure 2).

Ensuite, nous allons relier les composantes ces rendements et des indicateurs du milieu sur ces différentes périodes (figure 3).

Pour chaque indicateur peut être comparé des références permettant de savoir si la valeur observée durant la saison 2022-2023 est plutôt élevée ou plutôt faible. Quand c'est possible nous prendrons comme référence la moyenne de l'indicateur calculée sur la ferme pendant les 20 dernières années. Si ce n'est pas possible nous prendrons comme référence la moyenne de l'indicateur mesuré dans les autres essais ou des références issues de la littérature (technique ou scientifique). Ces références sont

complétées des références propres à l'expérimentateur.rice (Figure 4). Les terroirs et pratiques pouvant être très différents entre essais, il faut cependant être prudent en comparant les résultats obtenus sur deux fermes différentes.

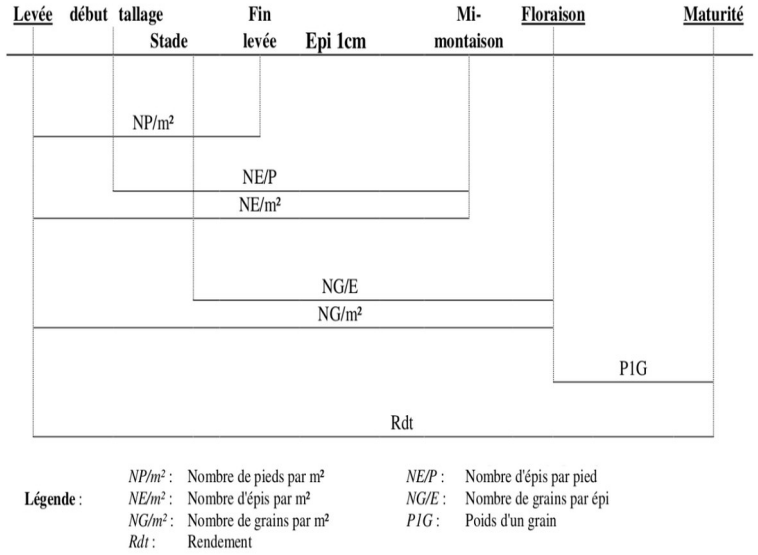


Figure 2: Phases de formation des différentes composantes du rendement (Lecomte, 2005).

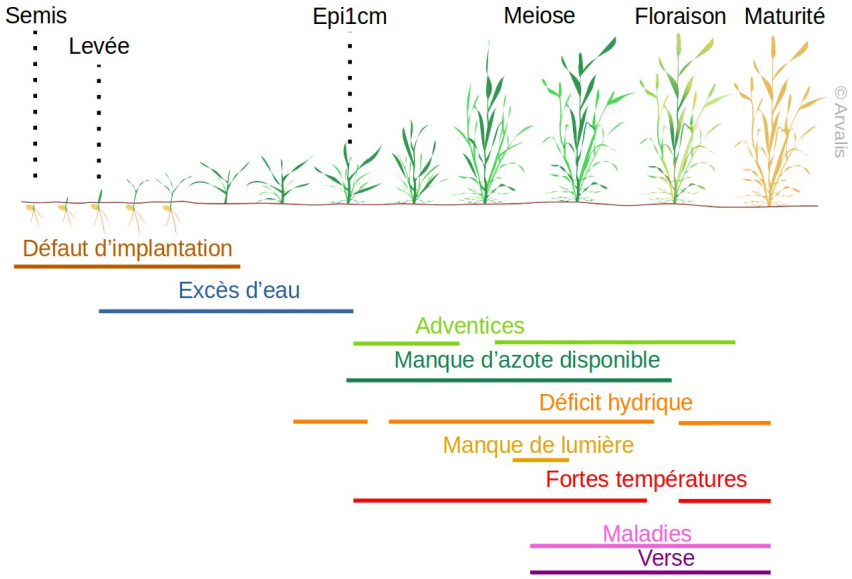


Figure 3: Stress pouvant impacter le rendement en fonction des stades de développement du blé. Les lignes en discontinues symbolisent la décomposition dans le temps des stress effectuée dans ce diagnostic.

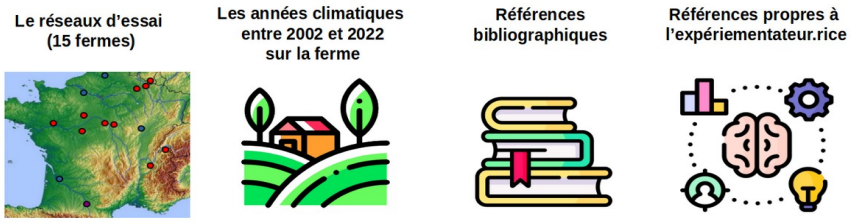


Figure 4: Les quatre types de références utilisées pour le diagnostic.

2. Diagnostic à l'échelle de l'essai

2.1. Contexte de l'essai paysan

Dans cette partie nous décrivons le contexte de l'essai : les spécificités du sol et de la météo, les pratiques culturales, les dates des principaux stades de développement des blés et les commentaires globaux sur l'essai. Quelques photos nous aideront à nous replonger dans l'essai

Dans le tableau 1, nous présentons les caractéristiques de la parcelle d'essai. Cette présentation est basée sur la fiche automne, une analyse de sol et trois tests simples réalisés par l'équipe de recherche: (i) un test bêche à deux endroits de l'essai pour qualifier la structure du sol (sol ouvert ou compact); (ii) le niveau de dégradation d'une bande coton (enterrée en sortie d'hiver et retirée au printemps) pour qualifier la décomposition du carbone; (iii) enfin un test pour connaître la stabilité des agrégats du sol (parties élémentaires du sol).

Dans le tableau 2, nous donnons une description des pratiques culturales en se basant sur la fiche automne

Tableau 1: Descriptif du sol de la parcelle.

Variables	Valeur	References	Sources
Nom_parcelle	Le Triangle		Fiche automne
Topo	Plaine avec Pente < 3%		Fiche automne
Hydrologie	hydromorphe		Fiche automne
Drainage	oui		Fiche_automne
Temperature_sol	froides		Fiche automne
Battance	non		Fiche automne
Argile	32.7		Analyse sol
Limon_fin	25.7		Analyse sol
Limon_grossier	27.9		Analyse sol

Variables	Valeur	References	Sources
Sable_fin	5.3		Analyse sol
Sable_grossier	8.4		Analyse sol
Calcaire	Non		Analyse sol
Type_sol_exp	Argile à Silex		Fiche automne
Type_sol_analyse	AL		Analyse sol
Profondeur	70 cm	Moyenne reseau = 71 cm	Fiche automne
Cailloux	très caillouteux		Fiche automne
pH	7.3	6.9 < pH conseillé < 7.5	Analyse sol
Capacite_echange_cationique	élevée	C'est le 'réservoir' en cation (CA,K, Mg, H)	Analyse sol
Matiere_organique	29.4	faible si < 20, forte si > 30	Analyse sol
CsurN	9.3	Forte minéralisation C si < 8.5, fort si >12	Analyse sol
Degradation_C	60 %	décomposition du coton, moyenne réseau 52.8 %	exp: entre sortie hiver et printemps
Stablite_surface	2.61	faible si < 3	exp sortie hiver
Stablite_profondeur	4.78	faible si < 3	exp sortie hiver
Potentiel_enracinement_hiver	1	1 structure compacte, 3 structure poreuse	exp sortie hiver
Vers_de_terre	1	0 non visibles, 1 visibles	exp sortie hiver
Residus_cultures	1	0 non présent, 1 présent	exp sortie hiver

Tableau 2: Descriptif des pratiques culturales.

Variable	2023:EMH
Nom_essai	2023:EMH
Pratiques	Une seule pratique cultural (RAS)
Densite_grains.m2	300
Type_semis	volée
Date_semis	14/11/2022

Rapport pour le diagnostic hybride

Variable	2023:EMH
Profondeur_semis	2à3
Labour	oui
Precedant	Prairie Trèfle-RGA-Luzerne
Fertilisation	
Interventions	

Tableau 3: Commentaires généraux de l'essai

Variable	2023:EMH
info_parcelle	Parcelle peu productive. Terre argileuse et grasse.
commentaire_semis	A cette date, bonnes conditions de semis. Hétérogénéité entre populations, mais bonne levée
commentaire_s_hiver	bonne levée, l'eau s'infiltre bien derrière prairie (bonne structur du sol). à gauche Grand Clesle / droite mélange d'essai. 50 cm beaucoup de cailloux
commentaire_ete1	essai a bien marché (précédent conduite) bien debaut

Tableau 4: Descriptif du climat et des accidents.

Variable	2023:EMH
pluie_automne	faible
temperature_automne	chaudes
climat_accident_automne	aucune sauf le gel de décembre
commentaire_automne	Pluviométrie conséquente en janvier
pluie_hiver	normales jusqu'à mi-janvier, février sec
temperature_hiver	normales
pluie_printemps	faibles
temperature_printemps	froides
note_climat_printemps	très bonne conditions de semis, précédent prairie favorable

Tableau 5: Stades phénologiques moyens.

Rapport pour le diagnostic hybride

Stade	Date	Identification
Semis	14-novembre-2022	observation
Levée	29-novembre-2022	calcul
Epi1cm	07-avril-2023	calcul
Meiose	17-mai-2023	calcul
Epiaison	26-mai-2023	observation
Floraison	03-juin-2023	calcul
Maturité	03-juillet-2023	calcul

Photo 1 : le 14-février-2023

Photo 2 : le 25-mai-2023

Photo 3 : le 20-juillet-2023

Question 1: selon vous y-a-t'il des choses à rajouter pour compléter le contexte de culture?

-
-
-
-

Question 2: Avant de lire la suite, pouvez-vous nous indiquer si l'élaboration du rendement s'est réalisée normalement (adéquation entre potentiel du terroir et rendements de cette année)? Si non, selon vous qu'est-ce qui a pêché?

-
-
-
-

2.2. Composantes du rendement

Les composantes du rendement moyennes sont présentées dans le tableau 4 avec comme référence les moyennes du réseau d'essai. Nous vous proposons une visualisation graphique de l'élaboration du rendement pour pouvoir observer toutes les composantes de manière synoptique (figure 5).

Les mesures des composantes ont été réalisées dans les placettes de 0.25m2. Nous avons mesuré le nombre de plantes par m2 en sortie d'hiver, le nombre de épi par m2, le PMG et le poids à récolte. Dans le nombre d'épi nous avons différencié ceux qui étaient 'productifs' de ceux qui étaient vides ou immatures.

Tableau 6: Composantes du rendement.

Rapport pour le diagnostic hybride

Variable	2023:EMH:RAS	Moy_reseau	Unité	Période
Nb_pied_m2	221	186		Semis à Epi1cm
Nb_epis_par_pied	1.2	1.4		Levée à Mi-montaison
Nb_epi_par_m2	277.3	205.7		Levée à Mi-montaison
Nb_Grains_par_epi	24.7	24.7		Avant-Epi1cm à Floraison
Nb_grain_par_m2	6480	4950	grains m2	Semis à Floraison
PMG	37	37.8	gramme 1000 g	Floraison à Maturité
Rdt	23.9	19.3	q/ha	Semis à Maturité

Rapport pour le diagnostic hybride

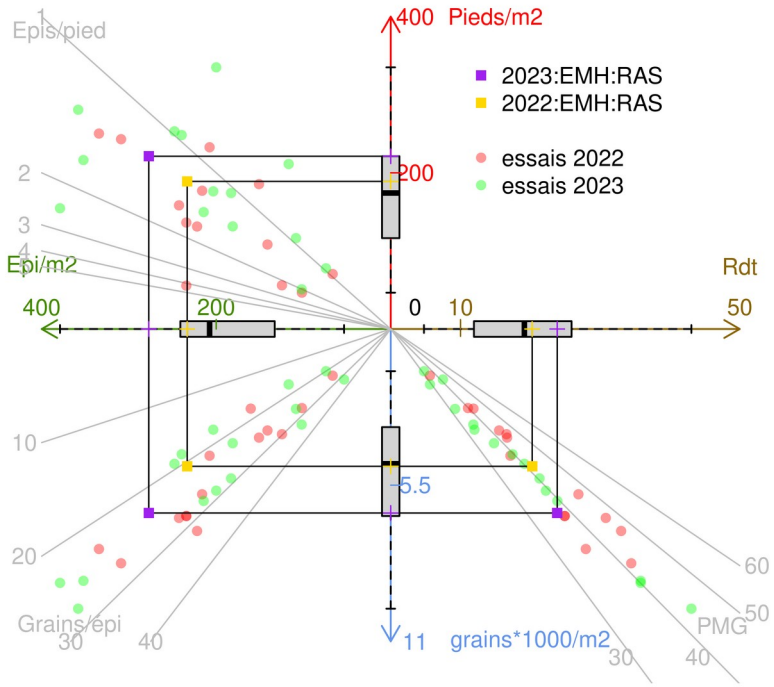


Figure 5: représentation synoptique des composantes du rendement à l'échelle de l'essai

Légende figure 5: Le cadrant en haut à gauche représente le nombre de pieds levées par m2 en fonction du nombre d'épis par m2. Et les droites en gris représentent le nombre de talles productifs (entre 1 et 5 talles par pied). Le cadrant en bas à gauche représente le nombre d'épis par m2 en fonction du nombre de grains par m2 Et les droites en gris représentent le nombre de grains par épi (entre 10 et 30). Le cadrant en bas à droite représente le nombre de grains par m2 en fonction du rendement (q/ha). Et les droites en gris représentent le PMG (entre 20 et 60). Le carré violet représente des valeurs de ton essai en 2023 et celui en jaune ton essai en 2022 Les ronds vert et jaune représentent les moyennes des autres essais selon les années (avec une méthode permettant d' ajuster cette moyenne en fonction des variétés pour pouvoir comparer les essais entre eux).

Question 3: Comment interprétez-vous l'élaboration du rendement?

-
-
-
-

Question 4: Avez-vous des hypothèses sur les causes?

-

-
-
-

2.3. Indicateurs qualifiant les environnements de culture des peuplements

Certains des indicateurs ont été mesurés à partir des données météorologiques (en prenant en compte la phénologie et la réserve en eau du sol), ils sont comparés avec les données météorologiques sur la ferme entre 2002 et 2021 (tableau 5). Les autres ont été mesurés sur le terrain et sont comparés aux données moyennes du réseau (tableau 6).

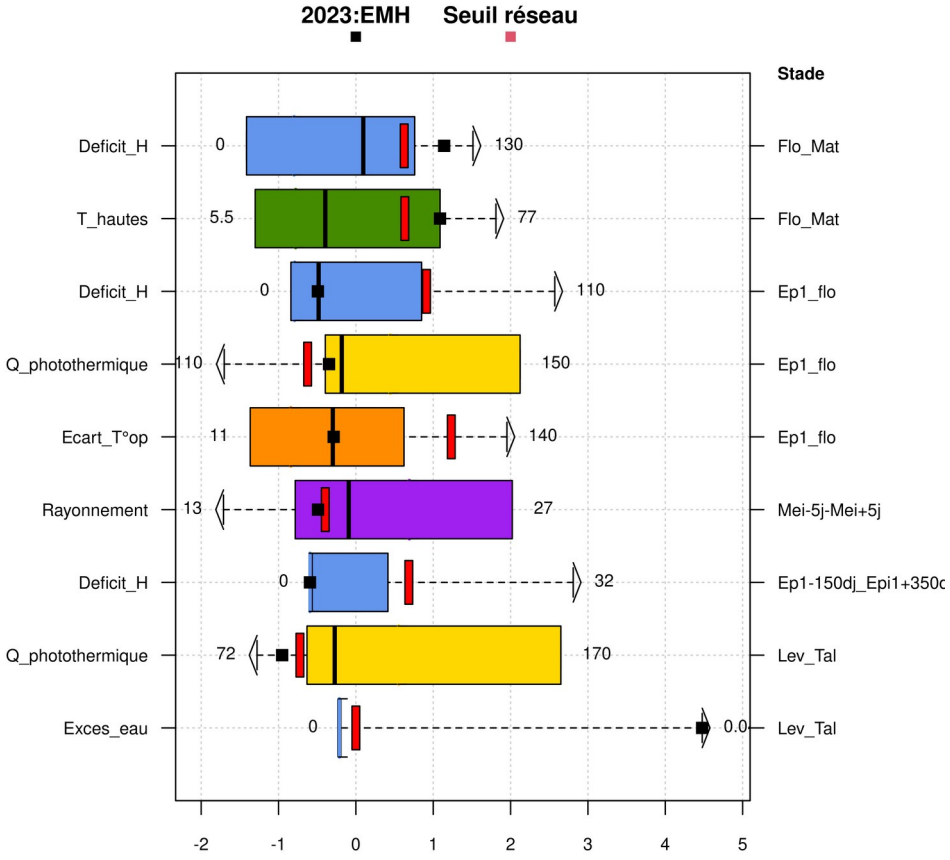


Figure 6: indicateurs pedo-climatiques (diagVar).

Légende figure 6: La figure se lit de bas en haut, indicateur par indicateur. Les rectangles de couleur représentent la variabilité 'ordinaire' de l'indicateur sur les 20 dernières années (le trait au sein du rectangle est la valeur médiane). Les traits en pointillé représentent la variabilité 'extraordinaire' de l'indicateur. Le rectangle rouge représente le seuil à partir duquel les valeurs d'indicateur de stress sont 'extraordinairement' fortes par rapport au réseau. Et le carré noir représente la valeur de l'indicateur pour votre essai en 2022.

Tableau 7: indicateurs pedo-climatiques (diagVar).

Stress	Methode	unité	Sens_du_stress	Stade	Seuil_reseau	Seuil_ferme	2023	Extreme_ferme	Extreme_ferme_an
Exces_eau	Somme des (pluie>ETR+RU) positives journalière	mm	Si hautes	Levée à Epi1cm	268	0	0	0	2023
Q_photothermique	Quotient entre l'offre en lumière et offre en T°	(J/cm²)/°C	Si basses	Levée à Epi1cm	86	88	80	72	2018
Deficit_H	Somme des (ETM-ETR) journalières positives	mm	Si hautes	Epi1cm -150°j à Epi1cm -350°j	12	8	0	32	2003
Rayonnement	Somme des rayonnements globaux journaliers	J/cm²	Si basses	Meiose-5jours à Meiose-5jours	18	16	17	13	2016
Ecart_T°op	Somme des écarts à 15°C	°C	Si hautes	Epi1cm à floraison	112	88	53	141	2021
Q_photothermique	Quotient entre l'offre en lumière et offre en T°	(J/cm²)/°C	Si basses	Epi1cm à floraison	120	123	123	110	2018
Deficit_H	Somme des (ETM-ETR) journalières positives	mm	Si hautes	Epi1cm à floraison	58	50	11	112	2011
T_hautes	Somme des T° sup à 25°C	°C	Si hautes	Floraison à Maturité	50	56	60	77	2005
Deficit_H	Somme des (ETM-ETR) journalières positives	mm	Si hautes	Floraison à Maturité	93	96	116	133	2004

Tableau 8: indicateurs du milieu.

Rapport pour le diagnostic hybride

Variable	2023:EMH:RAS	Moy_reseau	Période	Methode
Retard_levee	rapide		Semis à Levée	
Regularite_levee	oui		Semis à Levée	
Vigeur_levee	Vigoureuse		Semis à Levée	
Deficit_semis_levee	-26.2 %	-31.5 %	Semis à Levée	% perte
Adventice_sortie_hiver	2.9 %	11.7 %	Levée à Epi1cm	% du sol
Sol_nu_sortie_hiver	64.3 %	54.1 %	Semis à Epi1cm	% du sol
Nutrition_azote_floraison	0.41	0.32	Epi1cm à Floraison	Stress en dessous de 0.8
Rapport_epis_productifs	96 %	86 %	Levée à Mi-montaison	% d'épis productif
Adventices_principales_printemps	folle_avoine & poaceae_spp		Levée à Floraison	
Nuisibilite_adventice_printemps	1.1	4.4	Levée à Floraison	0 non impactant, 12 très impactant
Hétérogénéité_adv_print	2.1	2.5	Levée à Floraison	Hétérogénéités des notes de nuisibilité adventice entre les différentes placettes de l'essai
Taux_proteine	11.2 %	11.6 %	Floraison à Maturité	
Rdt_proteine	2.7	2.2	Floraison à Maturité	en q/ha
Indice_recolte	36 %	32 %	Floraison à Maturité	Poids des grains sur poids de la gerbe totale
Biomasse_paille	38.4	40.5	semis à récolte	en q/ha
Grain_mal_rempli	15 %	15.35 %	Floraison à Maturité	cf figure ci-dessous
Grain_très_mal_rempli	3 %	4.6 %	Floraison à Maturité	cf figure ci-dessous
Verse	0 %	4.7 %	Floraison à Maturité	% de blés couchés ou à plat
Maladie	rouille & septo & rouille jaune		Floraison à Maturité	

Variable	2023:EMH:RAS	Moy_reseau	Période	Methode
Note_maladie	1	1	Floraison à Maturité	entre 1 et 3

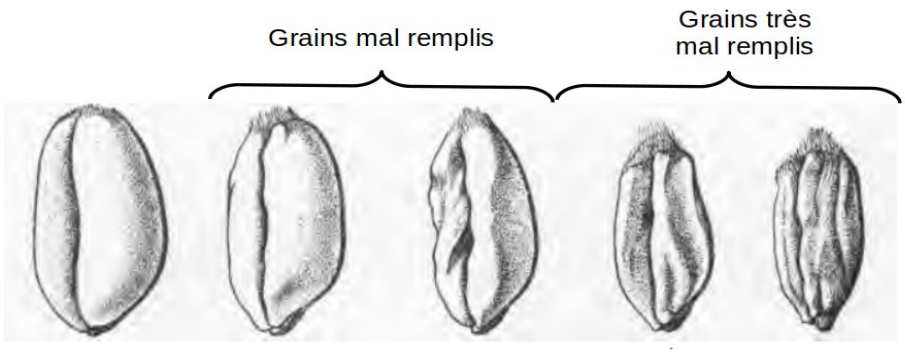


Figure 7: Classements des grains (Jonard 1951).

Question 6: Est-ce que cela confirma vos hypothèses?

-
-
-
-
-
-
-
-

3. Diagnostic à l'échelle des variétés

3.1. Analyse des différents comportements variétales

Les variétés testées et certaines de leurs caractéristiques sont présentées dans le tableau 9. L'élaboration du rendement est présenté de manière synoptique dans la figure 7, et les performances de variétés ainsi que le test permettant de savoir si les variétés sont différentes sont présentées dans le tableau 10. Ce test prend en compte l'hétérogénéité du terrain et l'erreur expérimentale (la variabilité non-variétale) estimées à partir des variétés répétées sur l'essai et de la variabilité non-variétale de l'ensemble du réseau d'essais (modèle statistique spécifique à la sélection participative développé durant la thèse de Pierre Rivière). Pour une variable donnée, les variétés en bleu sont significativement différentes de celles en rouge.

Tableau 9: les variétés à l'essai.

Population	Description	Référence	espèce	commune
Alauda	Issue d'un travail de sélection participative entre un groupe de paysan.ne.s et 2 sélectionneurs allemands biodynamistes (Berthold et Birgit HEYDEN)	institut Keyserling	Variété inscrite au catalogue	Oui
Anti-Verse	Mélange sélectionné contre la verse par RAB	RAB	Mélange	Oui
Automne-Rouge-Barbu	Originaire des bords du Rhin. Rustique, assez productive et peu sensible aux maladies (ni rouille ni du charbon). Peut s'égrener un peu trop facilement à la maturité; talle passablement; il convient surtout aux terres d'alluvion et aux sols légers, sains et perméables; il s'accommode assez bien des terrains sablonneux, pourvu qu'ils ne manquent pas de fraîcheur. (Vilmorin) blé tendre originaire d'Alsace bon tallage, résistance au gel céréales fine (tige et feuille étroite) très bon goût pour le pain (MAV)	MAV, Vilmorin	Variété de Pays	Oui
Grand-Clesle	Mélange de majoritairement deux croisements (C207 et C185) et en moindre proportion (C205,C217, Population Dynamique n°2, Savoysone) [généalogie: - C185 : Beauceron x C14 (croisement de 2006 par Jean-François Berthellot entre Poncheau et Alauda) - C217 : Moulin Neuf x Alauda - C207 : Maître Pierre x Vilmorin blé de Nuisement - C205 : Maître Pierre x C14]	EMH	Mélange	Oui
Inconnu-de-Raphael	Variété remarquée par RAB (dans une collection en Haute-Provence) mais perte de l'étiquette. Certainement une variété de pays. Tige haute mais solide. Épi non barbu, rouge brique, assez long.	RAB	Variété de pays ?	Oui
Rouge-de-Bordeaux	Sélection dans Noé, sensible au froid, épiaison moyenne,tallage herbacé et épi moyen, résistance à la verse mauvaise JONARD 1951. Peu exigeante sur la nature du sol et résistant très bien à la verse. Réussit bien dans les terres argileuses et dans les terres franches; un sous-sol calcaire lui est très propice. Il réussit bien en semis de printemps, mais la maturité en est alors un peu tardive.	Vilmorin Jonard	Sélection dans une variété de pays	Oui

Population	Description	Référence	espèce	commune
	VILMORIN			
Savoysone	Population issues du croisement entre blanc de Saone et Inconnu de Raphaël	RAB	Croisement	Oui
Titlis	Variété suisse (2002), sensible au froid, tardive à épiaison, blé améliorant	Arvalis	Variété au catalogue	Oui

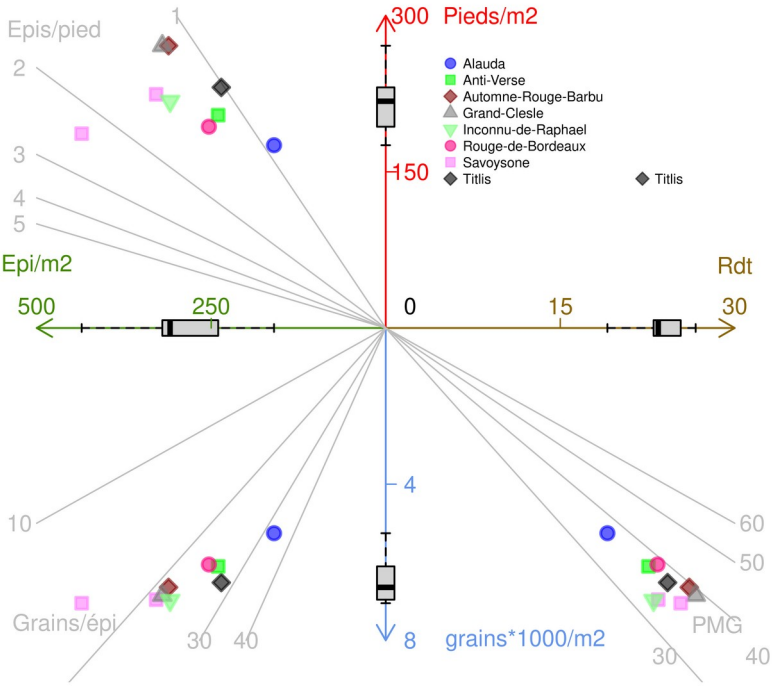


Figure 7: représentation synoptique des composantes du rendement de chaque microparcelle

Légende figure 7: Le cadrant en haut à gauche représente le nombre de pieds levées par m2 en fonction du nombre d'épis par m2. Et les droites en gris représentent le nombre d'épis par pied. Le cadrant en bas à gauche représente le nombre d'épis par m2 en fonction du nombre de grains par m2 Et les droites en gris représentent le nombre de grains par épi. Le cadrant en bas à droite représente le nombre de grains par m2 en fonction du rendement (q/ha). Et les droites en gris représentent le PMG.

Rapport pour le diagnostic hybride

Tableau 10 : Composantes du rendement des variétés et test de comparaison.

variete	Pieds_m2	Epis_pied	Epis_m2	Grains_epi	Grains_m2	PMG	Rdt_parcelle	Rdt_placette
Grand-Clesle	271	1.2	320	21.4	6.8	38.9		26.6
Automne-Rouge-Barbu	271	1.1	311	21.4	6.6	39.3		26.1
Savoysone	206	1.9	382	18.7	7.0	34.8		24.4
Titlis	231	1.0	236	27.7	6.5	37.2		24.2
Rouge-de-Bordeaux	193	1.3	253	23.9	6.1	38.6		23.4
Inconnu-de-Raphael	218	1.4	309	22.6	7.0	33.0		23.0
Anti-Verse	204	1.2	240	25.4	6.1	37.0		22.6
Alauda	176	0.9	160	32.9	5.3	36.3		19.1

Question 7: Qu'est ce que vous pensez de ces résultats, correspondent-ils à ce que vous avez observé sur le terrain?

-
-
-
-

Tableau 12 : des moyennes variétales sur le réseau d'essais (2022-2023)

germplasm	density_m2	epi_pied	epi_m2	grain_epi	nb_grain	pmg	rdt_15
Titlis	168	1	161.06	28.8	4.49	39.7	17.9
Savoysone	170	1	187.51	23.7	4.49	39.2	17.8
Rouge-de-Bordeaux	169	1	177.19	24.7	4.52	38.4	17.8
Grand-Clesle	169	1	168.42	24.5	4.34	41.3	17.5
Anti-Verse	168	1	167.08	26.3	4.40	39.6	17.4
Automne-Rouge-Barbu	171	1	183.29	22.5	4.35	39.9	17.4
Alauda	169	1	168.24	27.0	4.43	38.5	17.3
Inconnu-de-Raphael	168	1	177.36	23.9	4.38	38.4	17.2

Rapport pour le diagnostic hybride

Dans ce tableau ne sont présentées que les valeurs moyennes sur le réseau d'essais, dans la thèse de Michel seront aussi étudiées les sensibilités moyennes des variétés à différentes conditions.

Question 8: Quelles variétés ont retenu votre attention?

-
-
-
-

Tableau 12 : Notations qualitatives des variétés.

Variete	Coment_hiver	Coment_print	Adventice (0à12)	Maladies (1sain 3malade)	Coment_été
Alauda	tardif ? Clair, semence ? Tassé au pied par son père?		6 (folle_avoine, Laiteron_rude)	1	Moins penché que savoysone
Anti-Verse		cailloux	0 (liseron_des_champs)	1	bien droit
Automne-Rouge-Barbu		feuillage plus fin	0 (Laiteron_rude, folle_avoine)	1	petit épis verse
Grand-Clesle		cailloux	0 (poaceae_spp)	1	
Inconnu-de-Raphael		feuillages plus fin, cailloux	0 (poaceae_spp)	1	
Rouge-de-Bordeaux		cailloux	3 (poaceae_spp)	1	versé
Savoysone	semé à 2 contrairement aux autres	cailloux	0 (veronique_sp)	1	
Titlis			0 (chardon, Laiteron_rude)	1	gros épis par rapport à Automne R barbu, court

Tableau 13 : Notations quantitatives des variétés.

Rapport pour le diagnostic hybride

Variete ()	Note_Hiver (1moche 5beau)	Reprise_hiver (1tardif 5précoce)	Port_p_hiver (1dressé 5 étalé)	Note_print (1à5)	Tallage (1faible 5 fort)	Vigeur_print (1à5)	Epis_productifs (%)	Biomasse_paille (q/ha)	Indice_recolte (%)	Hauteur (cm)	Note_ete (1à5)	Teneur_proteine (%)	Verse (% couché)
Alauda	1	1	3	3	2	2	97	27.3	37.8	112	5	11.5	0
Anti-Verse	2	1	1	4	2	3	96	33.8	36.7	109	5	11.4	0
Automne-Rouge-Barbu	5	5	1	3	3	3	95	59.6	27.6	120	2	11.1	0
Grand-Clesle	4	4	2	5	3	4	98	42.8	35.1	112	5	10.8	0
Inconnu-de-Raphael	3	2	5	3	2	2	95	36.8	35.2	117	4	11.3	0
Rouge-de-Bordeaux	4	4	3	5	4	4	92	31	39.6	123	2	11.8	0
Savoysone	3.5	2.5	4.5	3	3.5	3	96	37.3	36.3	116	4.5	10.6	0
Titlis	3.5	3	1	4	3	2	95	29.9	41.3	85	4	11.5	0

Tableau 14 : phénologie des variétés.

Variétés	Date épi 1cm	Date épiaison
Savoysone	07-avril-2023	26-mai-2023
Automne-Rouge-Barbu	07-avril-2023	26-mai-2023
Titlis		26-mai-2023
Grand-Clesle	10-avril-2023	26-mai-2023
Rouge-de-Bordeaux	08-avril-2023	26-mai-2023
Alauda	07-avril-2023	27-mai-2023
Inconnu-de-Raphael	10-avril-2023	27-mai-2023
Anti-Verse		27-mai-2023

Nous avons estimé une date épi 1cm sur votre essai à partir uniquement de variétés mesurées au Moulon en 2023.

Question 9: Plus généralement, quelles variétés vous semblent prometteuses dans votre système et les-quelles au contraire, peu prometteuses? Pour quelles raisons?

-

-

C. 3 Les synthèses restantes des diagnostics hybrides

Synthèse des diagnostics hybrides à l'échelle de l'essai

Noir : information issue du rapport
Bleu : issue de la question Q2 (sachant le contexte)
Orange : issue des questions Q3, Q4 et Q5 (sachant en plus les composantes de rendement)
Vert : issue des questions Q6 (sachant les autres indicateurs de l'état du système)
En gras : Information issue de l'expertise de l'expérimentateur.rice

RAB 2021-2022

Le semis à la volée après hersage a été réalisé dans de mauvaises conditions : il s'est fait en fin de rotation. Les mesures de pH sont pour RAB étonnamment basiques (8,13)**. Les nombreux cailloux ont compliqué ce semis entraînant une mauvaise levée. L'agriculteur a réalisé un ajustement de la densité de semis, car il y avait un manque de grains pour certaines variétés. En plus, certaines semences avaient plus de 5 ans. Il y a eu une mauvaise levée sur l'ensemble de l'essai** (-88,6% de déficit entre semis-levée contre une moyenne de -48,9%)**. De plus cela a entraîné et favorisé le développement du vulpin** (la note de couverture du sol en sortie d'hiver 11,4% contre 10,3% , l'indicateur de nuisibilité printemps est de 4,5 contre une moyenne de 3,5 sur le réseau)**. La concurrence des adventices est majoritairement sur l'azote disponible car le vulpin est très compétitif sur cette ressource. Ça aurait été bien mieux si l'année avait été « poussante » et s'il y avait moins eu d'adventices** (tallage, nombre de grains par m² légèrement au-dessus de la moyenne du réseau PMG en dessous,). Ce **stress azoté est identifié par le paysan à travers la couleur du blé au printemps** (INN =0,28 < 0,8 la référence)**. Le printemps a en effet connu de très faibles pluies: entre janvier et avril, il y a eu -40 % d'eau** (l'indicateur de stress hydrique durant les stades épis1cm jusqu'à floraison) **.Le Printemps a de chaudes températures (il y a eu + 1,6°C par rapport à la normale) et le climat de l'été a aussi été chaud et sec** (l'indicateur de hautes températures durant les stades floraison-maturité est au-dessus des deux seuils critiques).. Le rendement est de 11,1 contre 20,3 en moyenne. Si le PMG est un peu faible (39,3 contre 40,1), **c'est peut-être dû à un ramassage un peu tôt**

CHD 2021-2022

Parcelle de terre froide assez caillouteuse (roche mère moraine) riche en MO (4,5%). La levée issue du semis à la main a été hétérogène (plus long que

d'habitude longue car semé assez profond et froid après semis, en effet faible peuplement en sortie de l'hiver avec 56 pieds/m² (< 148 en moyenne en 2022).

Fort déficit hydrique sur mars avril mai malgré des terres profondes (Indicateur stress hydrique au-dessus des deux seuils critiques)
Manque d'azote (blé jaune, INN = 0,25 < 0,8 la référence, teneur en protéine faible 11,8 < 12,6 en moyenne en 2022) car mauvaise minéralisation du sol entraînant faible tallage et hauteur de paille fiable. Finalement le tallage n'est pas mauvais (2,2 > 1,6 en moyenne sur le réseau en 2022). Globalement il y a une tendance de rattrapage par compensation permettant de sauver le rendement (16,8 < 20,3 en moyenne en 2022)
Pluies fin printemps qui ont sauvé le rendement
Été très chaud

FAT 2021-2022

Parcelle de limon un peu caillouteuse.
Sol qui a tendance à se compacter, sensible à la battance et hydromorphe
Le semis à la volée a été réalisé dans de mauvaises conditions.
Entraînant la levée de graminées (20 % en sortie d'hiver > 10 % en moyenne en 2022 et **encore sous-estimé selon FAT**) **qui ont impacté le nombre de grains par épi** (17,6 grains par épi < 27,5 en moyenne en 2022) **et qui ont été compétitive vis-à-vis de l'azote** (INN 0,31 < 0,8 la référence)
Le stress hydrique en montaison et floraison a impacté le rendement et les adventices (indicateur au-dessus des deux seuils critiques) **mais pas d'échaudage** (beau grain)
Rendement faible (11,6q/ha > 20,3 en moyenne en 2022)

JUC 2021-2022

Parcelle sableuse, avec un sol peu profond ,caillouteuse et à ph acide (5,61) avec peu de matière organique (1,5%).
Semis à la main et hétérogène, lente à cause du temps gel après semis
Manque de nutrition : mauvais précédent, terre pauvre, pas d'apport (INN = 0,25 < 0,8 la référence)
Manque d'eau (autour épi 1cm et entre épi 1cm et floraison, l'indicateur de stress hydrique est au-

dessus des deux seuils critiques)
Beaucoup d'adventice mais pas très concurrentes sauf peut être pour l'eau (indicateur à 12 > 3,5 la référence).
Aucun rattrapage du peuplement **car « rien à manger dans le sol »** et mains beaucoup d'épi improductif (48 % > 25 % en moyenne en 2022).

PAJ 2021-2022

Parcelle argilo-calcaire drainante, riche matière organique (3,9%).
Faim d'azote tout au long du cycle (couleur claire) pas d'apport
Ce faible azote (INN = 0,29 < 0,8 la référence et teneur en protéine à 9,2 < 12,6 % en moyenne en 2022) **a entraîné un faible tallage** (0,9 épis par pied < 1,6 en moyenne en 2022).
Pluviométrie faible tout au long de la saison (indicateur de déficit hydrique entre épi 1cm et floraison inférieures aux deux seuils critiques) **responsable de petits épis** (21 grains par épi < 27,5 en moyenne en 2022). **Ce serait peut-être dû à un froid à méiose également ?**
Arrivé trop vite à épiaison (Quotient photo-thermique inférieur aux deux seuils critiques)
Impace de la compétition vis-à-vis des adventices (3,8 > 3,5 la moyenne en 2022) .
Le faible PMG (38,3 < 40,1 en moyenne en 2022) **est aussi dû au manque d'eau et d'azote et pas d'échaudage.**
Le rendement a principalement été impacté par le manque d'azote (16,9 q/ha < 20,3 en moyenne en 2022)

VIL 2021-2022

Parcelle limono-argileux à silex, en fin de rotation, peu profonde (30cm) à matière organique plutôt élevée (2,9%).
Semis le 12 novembre de blé (sol gras humide et froid) « je pense que les conditions de levée ont été plus perturbantes que le sec » (déficit semis-levée de 71 % > 48 % en moyenne en 2022)
Le 15 mars semis de trèfle incarnat dans l'essai.
Très sec printemps : période de sécheresse très dense entre février et juin (VIL s'attendait à une forte baisse sur rendement et qualité) qui finalement ne semble pas avoir fortement impacté le rendement.
Juin très humide. Il ne semble pas y avoir d'impact du sec et des grosses chaleurs sur la fin de cycle, car il y a eu un bon PMG et un bon nombre de grains
Faible disponibilité en azote, pas de compensation du manque de pied par du tallage (INN= 0,31 < 0,8 la référence)
Forte pression adventice car fin de rotation et écartement du semoir d'essai de 30cm (indicateur 6,3 > 3,5 en moyenne en 2022).

Synthèse des diagnostics hybrides à l'échelle de l'essai

Le nombre de pied par m² est faible (111 pieds par m² < 148 en moyenne en 2022) et l'élaboration du rendement est moyenne (sans rattrapages ni décrochages en moyenne)

Finalement rendement et la qualité sont moyens à bons sur la ferme donc positivement (15,4 q/ha < 20,3 en moyenne en 2022) alors que VIL s'attendait à 10q/ha , sachant que c'est la dernière année de rotation)

TRI 2021-2022

Parcelle limoneuse, riche en matière organique (3%) **ayant un précédent cameline (les mauvaises herbes avaient pris le dessus et le peuplement végétal a été broyé sur place) et étant en fin de rotation.**
Pas de pluie entre fin mars et mi-mai entraînant un stress hydrique. Le sol n'a peut-être pas trop souffert de la sécheresse grâce à une bonne réserve utile (en effet l'indicateur ne dépasse pas les seuils critiques).
Forte pression adventice. (Problème de mesure de l'indicateur par l'équipe de recherche)
L'azote ne semble pas être trop limitant car plutôt bon rendement malgré l'indicateur (INN = 0,42 < 0,8 la référence,) par contre la teneur en protéine est faible (10,6% < 12,6 la référence en 2022) **mais cela semble fréquent sur sa ferme.**
TRI s'attendait à davantage de tallage (1,6 épis par pied, égale à la moyenne en 2022).
Gros PMG (46,5 > 40,1 la moyennes en 2022) **TRI suppose que c'est lié au fait que les PMG été gros au semis.**
Les rendements sont à 33 q/ha (> 20,3 q/ha en 2022). **Historiquement la ferme a de faible rendement à cause des adventices, cette parcelle est plutôt correcte et a des potentiels à 40-45 q/ha sans adventices.**

Autres

INP 2021-2022

Parcelle de limon argileux en agroforesterie ayant pour précédant un triticale trèfle (paille et trèfle broyés). Très bonnes conditions de levée.
Au printemps, manque d'eau mais le bon enracinement a limité les dégâts. Manque d'eau autour d'épi 1cm (indicateur en-dessous des deux seuils critiques).
Le nombre de grains est légèrement plus faible que le réseau (25,3 grains par épi contre 27,5 en moyenne en 2022).
Les passages de herse étrille a fait des parcelles propres
Minéralisation faible azote car peu d'eau en mars malgré un fort reliquat hiver (116 unités minéralisables, INN = 0,48 < 0,8 la référence**) et la teneur en protéine est faible** (9,7 % <12,6 % en

2022). Cette teneur en protéine est cohérente avec celle mesurée par INP 10,2%. Le stress hydrique semble avoir surtout joué sur la disponibilité en azote.
Absence de pluie en été les blés ont mûrit rapidement (13 juillet)
-température élevée
Bon rendement (33,8 < 20,3 sur en moyenne en 2023).

PUR 2021-2022

Les parcelle sont d'anciennes terrassse de la Garonne : limoneuse (40%) et très caillouteuse avec comme précédent un blé.
Forte densité de semis 337 grain par m^2 pour se rapprocher des conditions des agriculteur.rices.
Le semis a été très tardif (15 décembre) et à la main. Mauvaise implantation du blé.
Nombre de pieds par m^2 correct (163 pieds par m^2 > 148 en moyenne en 2022) mais régression des pieds (0,5 épis par pieds < 1,6 en moyenne en 2022) beaucoup de tardillons ont été observée.
Développement trop rapide par rapport à la croissance entre épi-1cm et floraison (Quotient photo-thermique dépasse les deux seuils critiques)
Manque d'eau au printemps (indicateur dépasse les deux seuils critiques)
Compensation par le nombre de grain par épi (40,5 grains par épi > 27,5 en moyenne en 2022)
Mauvais remplissage du grain (PMG =18 < 40 la moyenne en 2022) dû à un manque d'eau (indicateur dépasse le seuil réseau) et donc un manque de nutrition (0,26 < 0,8 la référence).
Forte chaleur à maturité (indicateur dépasse les deux seuils critiques)

très faible rendement finale (6 q/ha contre 20 en moyenne en 2022)

GDN 2021-2022

Parcelle argilo-calcaire assez riche en matière organique (MO=4%). Le précédent est une luzerne.
La parcelle est historiquement « hyperfertilisée » avec de fort potentiel (jusqu'à 60 q/ha avec Renan)
Deux semis réalisés car semences reçues trop tardivement :
P1 : le semis est réalisé le 24 octobre en ligne par le semoir (Automne-Rouge-Barbu en témoin répété).
P2 : le semis est réalisé le 24 novembre en ligne à la main et est un peu plus profond qu'en P1 (Savoysonne en témoin répété) ce qui a entraîné un fort retard par rapport à P1.
Au printemps certaines parcelles se sont fait attaquer par des ragondins.

Un peu de maladie au printemps qui est peut-être lié à la herse-étrille qui a abîmé les feuilles (note printemps 2,5/3 pour les deux pratiques > 1,5/3 en 2022)

Grosse différence de pieds par m^2 entre P1 et P2 (P1 : 146 pieds par m^2 > P2 : 59)

Synthèse des diagnostics hybrides à l'échelle de l'essai

néanmoins ça reste correct et cela peut encore compenser
P2 compense par le tallage (P2 : 3,9 épis par pieds > P1 : 2,2> 1,6 la moyenne en 2022)
Fort nombre de grains par épis (P2 : 31,9 > P1 : 28,6 > 27,5 la moyenne en 2022)
Plus d'azote disponible pour le peuplement P2 que P1 (INN P2 : 0,74 > INN P1 : 0,63 < 0,8 la référence)
Ma- juin très chaud et sec avec un pic caniculaire en juin (> 40°C, indicateur à remplissage qui dépassent les deux seuils critiques)
La verse a impacté le rendement et la qualité des grains.
PMG très faible en P1 (34,9 < P2 :41,3) **: ce serait dû à la verse précoce associée aux chaleurs de juin,** et qui serait aussi responsable des très forts taux de protéine (P1 : 17,1 % > P2 : 15,9 % > 12,6 % en moyenne en 2022) et des grains mal remplis (P1:27 % > P2 22 % > 11 % la moyenne en 2022). **GDN note que Rouge de Bordeaux en P1 a versé plus tardivement que les autres variétés** et a un bon PMG (42). Cela confirme que c'est bien la combinaison forte densité épi (P1 par rapport à P2) + verse + chaleurs + eau qui sont les causes du fort échaudage (cf partie variété).
Plus de compétition adventice dans la conduite P2 (indicateur adventice au printemps P2 : 1,5 > 0,6 en P1).
Le rendement microparcelle (P1 : 28,1 > P2 : 22,7) **est plus faible que le rendement parcelle (40q/ha). Globalement il y a eu un bon rattrapage du semis tardif car bon terroir.**

MAV 2022-2023

Parcelle de sol sableux et très drainante avec une teneur en matière organique moyenne (2,4%). **Deux pratiques testées : P1 semis le 28 octobre à 125 kg/ha et P2 semis le 13 septembre à 60 kg/ha, avec un binage supplémentaire le 29 octobre et un déprimage par ses vaches le 15 février.**

Sources d'hétérogénéité :

- **Le semis de P1 a créé quelques dégâts sur les plantules semées en P2**
- **Dégât de sangliers en octobre surtout sur P2**

Sécheresse en mars-avril, qui semble avoir entraîné un déficit hydrique (indicateur en dessous des deux seuils critiques)

-Trop de lumière (au sol), **blé pas assez dense avec invasion de camomille des champs qui concurrence les blés alors qu'il a eu un fort désherbage (plus de camomille sur P2 car plus clair).**
L'indicateur adventice est bas par rapport à son souvenir (P1 : 3,7 P2 : 3,8 < 4,4 en moyenne 2023)

L'indicateur de nutrition azoté est plus bas pour la conduite P1, car elle partage avec plus de

plantes (P1 : 0,22 et P2 : 0,33 <0,8 la référence) ce qui se retrouve dans le rendement en protéine (P1 : 1,0 et P2 : 1,3 q/ha).

Beaucoup de pluie début mai suivi d'une sécheresse du 15 mai à mi -juillet qui semble également avoir entraîné un déficit hydrique (indicateur en dessous des deux seuils critiques)

Petit PMG (P1: 33, P2: 36) alors que la dernière feuille était belle, ce qui suggère un stress hydrique pendant le remplissage.

Rendement dans l'essai différent entre pratiques (P1: 9,2 et P2 : 11,7 q/ha) **alors que MAV n'a pas noté de différence entre pratiques à l'échelle de l'ensemble du champ autour de l'essai (~ 13q/ha).**

C'est marquant que la technique du semi précoce donne un plus beau grain et plus de rendement **mais cela l'aurait été davantage si les sangliers n'avaient pas fait des dégâts dans P2).**

Le blé est mieux à faible densité car plus de nourriture, plus de racine (semé plus tôt), plus gros épi et plus beau grain, en résumé la plante s'épanouit mieux. Cette méthode donne plus de rendement dans nos terres si on arrive à maîtriser la levée et le désherbage.

RAB 2022-2023

Parcelle à bon potentiel, après 6 ans de prairie, terres lourdes drainées et proches de la ferme où les vaches vont régulièrement pâturer (MO très élevée 6.1 %). **Bonnes conditions de levée.** Un rang de l'essai est plus à l'ombre (bloc A). **Manque de pluie en automne jusqu'au 24 décembre (le drainage fonctionne)**.

Déficit de semis dû à la volée et sa balance peu précise (-65 % entre semis et levée)

Printemps : il y a euexcès d'eau

Bloc A nettement en retard et plus clair → diminution du rendement. Le Bloc B a « bien marché sans engrais ».

Confirmation d'une bonne élaboration du rendement (en particulier le tallage à 2,8 > 1,5 épis par pied en moyenne en 2023, entraînant le plus fort nombre d'épis par m² du réseau sur les deux années avec 380 épis par m2). Quadrat placé dans les endroits pas mauvais.

Gros grains : pas de souci de remplissage (PMG = 40,4 > 37,8 en moyenne 2023)

Après une prairie avec peu d'adventices (5 % de recouvrement en sortie hiver et 4 au printemps)

Blé bien nourri en Azote **même si par rapport aux conduites conventionnelles et**

leur ammonitrate, notre parcelle manquerait d'azote (INN=0,49).

Bon taux de protéine (12,7%)

La verse a légèrement impacté le remplissage (6,7 % bloc A, 8,7 % bloc B et 4,7 % en moyenne 2023).

Je ne suis pas convaincu par l'indicateur de stress hydrique.

Verse le 10 juin (Bloc B pareil que 2012)

CHD 2022-2023

Parcelle à fort MO (MO= 5,9%), proche de la ferme **avec pour précédent 3 ans de prairie pâturée par des chèvres. La parcelle est très retenante de l'humidité et est froide** (18 % argile et 26,5 % limon fin). **CHD a une partie du champ très argileuse où rien n'est récolté. La terre a été soufflée par le gel** (dilatation du sol pouvant déchausser les blés).
Peu de pluies en hiver (très sec).
Le nombre d'épis par m² est plutôt bien (253 > 187 épis par m² en moyenne 2023) puis faible tallage (1,0 <1,4 en moyenne 2023).

Pas assez d'épi ? Fertilité du sol ? Le nombre de grains par épi très faible (19,6 < 24,8 grains par épi en moyenne 2023) : problème de fécondation ou de compétition pour les ressources ? Le problème de fécondation semble s'expliquer par le déficit de rayonnement à méiose (en dessous du seuil critique du réseau d'essais). Est constaté un fort manque d'azote (INN =0,33 < à la référence 0,8) ce qui étonne CHD, car les conditions semblaient bonnes pour la minéralisation (terres trop froides?). Les adventices, surtout la renoncule de champs et la folle avoine, semblent avoir un impact sur le rendement (3,6).

Le rendement n'est pas terrible (19,1 q/ha) mais est dans la moyenne des parcelles de la ferme et du reste de la collection. CHD n'est pas satisfait du rendement (dans ses champs et sa collection). Chez 2 ou 3 paysans (qui ont même mélange) avec des systèmes équivalents ont été observés des problèmes équivalents. Les classements des blés sont différents que d'habitude (par exemple, les grands épeautres sont les meilleurs).

Synthèse des diagnostics hybrides à l'échelle de l'essai

FLM 2022-2023

Bonnes parcelles à céréales de la ferme (malgré son caractère très sableux), où des essais sont semés tous les 2 ans, en alternance avec une prairie annuelle pâturée. Le sol est moyennement sensible à la battance et est naturellement drainé. Le semis est en bonne condition, la levée régulière (semis au 11 novembre qui équivaut à un semis de fin octobre vu la météo chaude et humide).

La densité de l'épi au m² en regard du semis est bonne mais il y a eu peu de talles (1,1 < 1,4 épis par pied en moyenne 2023), Sans doute à cause d'un manque de temps pour s'enraciner (Quotient photothermique > au seuil critique du réseau) trop d'eau ? (non selon l'indicateur d'excès d'eau en hiver), semis trop tardif ?

Pas beaucoup d'épi par m² (182 < 205 épis par m² en moyenne 2023). Problème d'azote (INN=0,35< à la référence à 0,8 et teneur en protéine faible 11 % **alors que 12 % habituellement**),

Beaucoup d'enherbement malgré un binage efficace, mais le temps était propice à l'adventice! (6,7 > à 4,4 en moyenne 2023).

21 qt/ha : **un peu mieux que la parcelle totale**

FLM s'attendait à plus de rendement, de l'ordre de 25-30 mais il y a eu moins de 20qt dans l'ensemble de l'essai

EMH 2022-2023

La parcelle de l'essai est peu productive malgré beaucoup de matière organique (MO=3%). **Terre argileuse et grasse (argile à silex caillouteux), bon précédent (l'eau s'infiltre bien derrière une prairie car il y a une bonne structure du sol et peu d'adventices). Bonne condition de semis et bonne levée.**

Il y aurait eu plus d'épi par m² s'il avait semé à densité normale (inter-rang 30cm pour les essais alors qu'il est de 15cm normalement)

Suffisamment d'azote pour ces variétés (tallage et grains par épi correct malgré un INN = 0,41< à la référence 0,8).

Forte chaleur début juin. PMG faible (37,1) Aurait été entraîné par un déficit hydrique associé à de fortes températures durant le remplissage (ces deux indicateurs sont au-dessus des deux seuils critiques) mais les grains restent beaux (autant de grains mal remplis que le réseau d'essais en moyenne 2023).

Conditions favorables à la culture.

RDT plus faible que prévu (24 au lieu **de 30 qt/ha observé sur Grand Clesle à côté**)

Synthèse des diagnostics hybrides à l'échelle de l'essai

FAT 2022-2023

Bonne parcelle de la ferme, sol profond, peu caillouteux avec beaucoup de MO (4,1%).

Mauvaise implantation car semis à la main mais bien rattrapé.

En mars de grosses amplitudes de température avec gel le matin (l'indicateur des écarts aux températures optimales n'est pas au-dessus de seuils critiques)

Azote a été suffisant pour ces variétés même si plus d'azote aurait fait plus de rendement (INN = 0,43 < 0,8 la référence), teneur en protéines corrects (12%)

Pas mal de pluies en mai

Faible compétition en adventice (précédent prairie, indicateur 2,5).

Grosse chaleur au mois de juin. Pas de trace d'échaudage (PMG = 41, grains mal remplis dans la moyenne du réseau), le stress hydrique à maturité n'a pas été impactant (malgré l'indicateur qui est au-dessus du seuil critique du réseau).

Très satisfait des rendements (35qt/h) **malgré la mauvaise implantation (45q/ha le restant de la parcelle de blé, si l'implantation avait été égale alors il y aurait eu probablement le même rendement).**

JUC 2022-2023

Parcelle très hydromorphe (mauvaise terre poterie), semis participatif à main et précoce (1 octobre) dans de mauvaises conditions : sol non ressuyé.
Année plutôt favorable pour les cultures
Infesté de ray gras (12 au printemps)
Problème de nutrition azotée cause des adventices (INN=0,21 < 0,8 la référence)

PAJ 2022-2023

Parcelle acide (6,2%) très drainante et caillouteuse (sol de perruche, environ 8 % de cailloux). Elle succède à de la prairie.
Printemps plus froid que d'ordinaire

Synthèse des diagnostics hybrides à l'échelle de l'essai

PAJ était content de l'essai (bel essai).
Plutôt propre en adventice
Manque d'eau en hiver
Année favorable pour le blé
Pas beaucoup de tallage (1 <1,4 en moyenne 2023) car le semis était un peu dense (250 pieds par m² > 190 en moyenne 2023).

Faible épi par m² dû à un problème de fécondation à méiose (indicateur sous les deux seuils critiques) .
Peu d'azote en effet INN faible(0,41<0,8 la référence) mais PAJ s'attendait à être au-dessous du réseau en 2023 (0,33) ce qui finalement est cohérent avec la forte teneur en azote dans le grain(12,5 %)
La compétition en adventice est modérée (4< 4,4 en moyenne 2023).
Pas beaucoup d'épi par m² (4400 grains m² < 5000 en moyenne 2023) avec, donc, une compensation sur le poids des grains (40 > 37,8 en moyenne 2023) malgré le stress hydrique durant le remplissage (indicateur au-dessus des deux seuils critiques)
Rendement de l'essai représentatif de celui d'Alauda cultivé autour (17q/ha)

VIL 2022-2023

Parcelle avec 30 cmde profondeur en fin de rotation (précédente culture : avoine). Le condition de semis ont été difficiles mais il y a eu une belle implantation. Semis de trèfles juste avant les blés.
Faible nombre de pied par m² (151 < 181 sur le réseau) : augmenter la densité ? rajouter un rang sur le semoir ?

L'indicateur de manque de luminosité à méiose (en dessous des deux seuils) semble peut impacter le nombre de grains par épi (23,8 < 24,8 en moyenne 2023) mais cela peut expliquer des choses pour le reste de la ferme !

Faible présence d'azote mais cela n'a pas étéressentie à la levée (INN = 0,35 < à 0,8 la référence) **donc faible pression adventive** (sauf le couvert de trèfle qui est impactant) et faible tallage (1,4 = moyenne en moyenne 2023) et faible teneur en protéine (10,6)
Juin sec et chaud (floraison),pas de gros échaudage car PMG correcte (36,8) mais tout de même un léger impact (indicateur de stress hydrique et de chaleur en

dessous des deux seuils critiques)

VIL est satisfait ce qui a eu. 2023 récolte a été pas terrible en rendement grain mais bon en rendement en paille

ERZ 2022-2023

Parcelle hydromorphe, après une culture tritical-pois riche MO (3,5%)

Mauvais enracinement en hiver avec un sol qui ne sèche pas qui serait dû à manque de temps de croissance (Quotient photothermique en dessous des deux seuils critiques)
Beaucoup d'eau fin avril (80mm). Grains par épi faible (19,2 < à 24,8 en moyenne 2023) qui semble confirmer le stress par excès d'eau, ce qui est contradictoire avec l'indicateur de déficit hydrique (au-dessus des deux seuils critiques) **qui ne prend pas en compte que la nappe est à seulement 2m de profondeur sur cette parcelle même en été**.
L'enherbement aurait impacté le grain par épi et le PMG (6,3 > 4,4 en moyenne 2023).
S'il y avait plus d'azote alors il y aurait eu plus de rendement et d'adventices. Le très faible indice de nutrition azoté (INN= 0,16 < 0,8 la référence) n'étonne par ERZ, car il y avait beaucoup d'adventices, le sol était très refermé, ce qui n'a pas aidé à minéraliser, il pense qu'il aurait dû faire un coup de herse-étrille.

Le rendement de l'essai correspond au rendement de la parcelle (12q/ha)

TRI 2022-2023

Parcelle limoneuse et légèrement calcaire (pH= 8,1) avec un précédent d'orge de printemps et un niveau moyen de matière organique (2,6 %). L'essai avait une zone plus tassée retenant l'eau.
L'équipe de recherche a cru voir de la JNO dans la variété Dattel **mais le technicien du GAB n'y croit pas car le semis a été tardif** (ce qui paraît cohérent car finalement Dattel semble avoir eu des problèmes d'implantation cf partie variétale)

Synthèse des diagnostics hybrides à l'échelle de l'essai

Beaucoup de pluies en hiver impactant le tallage (indicateur > aux deux seuils critiques).
Le rattrapage a été bien moins fort que l'année dernière (moins de tallage et de PMG) **à cause du meilleur précédent (lentille) ? Conditions plus froides de début d'année ?**
En effet manque d'azote (INN =0,23 < 0,8 la référence) et déficit hydrique à remplissage (indicateur > aux seuils de la ferme) entraînant une faible teneur en protéine (11,2 < 11,6 en moyenne 2023).

INP 2022-2023

Parcelle limoneuse drainée, intermédiaire en matière organique (2,3%)

Faibles pluies en février, beau et sec en mars, période de pluie en avril puis très sec jusqu'à fin mai (vent du nord)

Le déficit en eau à maturité (indicateur > au seuil critique de la ferme) **n'est pas convaincant par rapport à ce sol et le bon enracinement des blés.**
Tout s'est bien passé sauf la récolte.
L'indice de nutrition azoté est faible (0,37<0,8 la référence)**. INP préfère avoir un stress azoté que trop d'azote car les blés paysans ne répondent pas pareil. Par contre le taux de protéine est très faible** (10,3 %) **: lessivage par la pluie ?**
L'indicateur adventice est faible (1,3 < 4,4 en moyenne 2023)**, ce qui est cohérent avec le précédent et ses désherbages mécaniques.**
3 semaines de pluie entre 14 juillet et 3-4 août, ils n'ont pas pu récolter les parcelles à cause de problèmes de germination sur pied.
Le blé autour (variété Émotion) a fait 47qt/ha et 11,2 de teneur en protéines. Il semblait se comporter de la même manière que l'essai (43,1 q/ha sur l'essai)**.**
Les blés paysans semés sur la parcelle de l'année dernière n'ont pas versé (blé sur blé, moins d'azote).

PUR 2022-2023

Parcelle argileuse, suivant 3 ans de luzerne à MO intermédiaire (2,8%)
Les blés tendres ont été semés à des densités de blé poulard (170 kg par ha) entraînant une forte compétition entre pieds (épis par pied = 0,6 < 1,4 en moyenne

2023) et de l'oïdium.
Le faible quotient photothermique (indicateur < au seuil critique de la ferme) n'a pas aidé pour le tallage. Mais cet indicateur entre épi-1cm et floraison (indicateur > aux deux seuils critiques) n'aurait pas beaucoup impacté le nombre de grains par épi (24,3 < 24,8 de grains par épi en moyenne 2023)
Pas de stress azoté (INN=0,67 < 0,8 la référence), verse à cause du vent et de beaucoup de biomasse (70,4 qt/ha > 40,5 en moyenne 2023).
Hiver favorable
Beaucoup de folle avoine, **indicateur sous-estimant l'impact des adventices** (4,3 < 4,4 en moyenne 2023).
Peut-être un léger échaudage (beaucoup de jours à 30°C)
Verse tardive (en particulier sur les poulard) mais peu d'impact sur le rendement

MET 2022-2023

Parcelle argilo-calcaire séchante et basique, assez hétérogène avec beaucoup de matière organique (4,2%) : ancien chemin communal, 20 ans de pâturage de chevaux sur pâture maigre « on n'aurait pas dû mettre l'essai ici ».
Il y aurait eu un blocage en phosphore et de la MO (infestation de panicaut plante bio-indicatrice et analyse sol : 18 mg/kg de P).
Hiver sec et froid
Fin avril début mai: le ray-grass et le panicaut ont explosé et le blé a stagné. Il y a eu un blocage observé à partir de l'épiaison: densité pas mauvaise mais étouffée: beaucoup de blé qui n'épient pas (0,6 épis par pieds < 1,4 en moyenne 2023), c'est un étouffement (nombre de grains par épi très faible 16,6 < 24,8 en moyenne 2023).

La nutrition en azote est faible **à cause des adventices** (INN=0,25 < 0,8 la référence).
L'indicateur adventice au printemps sous-estime la nuisibilité des adventices (3,9 alors **que selon lui c'est au moins 10**).

Les grains sont davantage mal remplis (23,8 % > 15,4 % grains mal remplies) **également à cause des adventices, pas d'échaudage** (confirmé par l'indicateur de déficit hydrique).

L'année climatique était bonne sur la ferme avec 30 q/ha alors que l'essai à fait 5,4 q/ha : **l'impact des facteurs climatiques est à la marge par rapport à l'histoire de la parcelle.**

Synthèse des diagnostics hybrides à l'échelle de l'essai

GDN 2022-2023

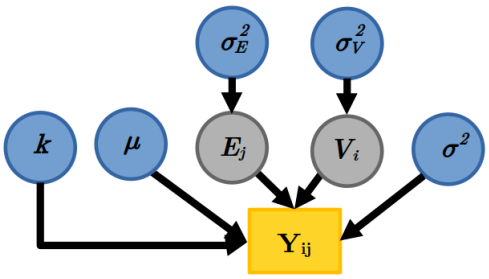
Parcelle argileuse à forte matière organique (4,3%).
Le travail du sol a été mal réalisé et le semis a été réalisé dans des mottes et la qualité germinative des grains a été mauvaise.
Mauvais enracinement (semis en novembre). L'hiver doux et peu lumineux n'a pas aidé à l'enracinement (quotient photo thermique au-delà du seuil critique de la ferme)
Pas mal d'enherbement (vulpin) : indicateur à nuancer, car GDN a pas mal désherbé (2,7 > 2,4 en moyenne en moyenne 2023).
Manque de disponibilité en azote car faible enracinement (INN =0,21 < 0,8 la référence)
Le déficit hydrique et les températures n'ont pas aidé au remplissage (indicateur déficit hydrique au-delà des deux seuils critiques)
Rendements finaux très faibles (4,7 q/ha)

achillée millefeuille	1	chenopode	2	fumeterre officinale	2	passerage des champs	3	ronce sp	3
alchemille des champs	1	chondrille	3	gaillet gratteron	3	paturin commun	3	rumex oseille	2
amarante sp	2	cirse d'angleterre	2	geranium	1	petit pois	2	rumex petite oseille	3
amarante verte	2	cirse sp	2	gesse_sans_feuilles	1	petite cigue	2	rumex spp	3
andryale	1	colza	3	houlque sp	2	petite_pimprenelle	1	scandix_peigne_de_venus	2
anthemis des champs	2	compagnon blanc	2	ivraie sp	3	picride fausse eperviere	1	seigle	3
apiaceae ssp	1	coquelicot	3	Laiteron rude	2	pissenlit officinal	2	senecon commun	2
arabete de thalius	1	crepide sp	2	Lamier pourpre	1	plantain sp	2	sisymbre sp	2
asteraceae spp	2	dactyle_agglomere	1	lampourde glouteron	3	poaceae spp	3	stellaire intermediaire	2
bleuet	1	dicotyledones inconnues	1	lampsane commune	2	pomme de terre	1	trefle spp	1
bouton d'or	3	diplotaxis fausse roquette	2	lentille cultivee	1	porcelle des sables	2	valerianella sp	1
brassicaceae ssp	3	Erodium sp	1	liseron des champs	2	potentille	1	veronique a feuilles de lierre	2
brome sterile	3	euphraise de printemps	3	luzerne spp	1	prele des champs	3	veronique des champs	2
brome_mou	2	fabaceae ssp	1	matricaire sp	2	rapistre rugueux	3	veronique sp	2
camomille des champs	2	faux liseron	2	miroir de venus	2	ravenelle	3	vesce fausse gesce	1
capselle bourse a pasteur	1	faux rapiste blanchatre	2	mouron des champs	1	raygrass	3	vesce sp	2
carotte sauvage	1	fetuque_elevee	2	moutarde des champs	3	renoncule sp	2	viperine	1
caryophyllaceae ssp	2	feverole	2	myosotis des champs	1	renoncule_rampante	3	vulpin sp	3
centauree sp	2	fleole des pres	2	panicaut	3	renouee des oiseaux	3		
ceraiste vulgaire	1	folle avoine	3	papaver sp	2	renouee liseron	3		
chardon sp	3	fromentale	3	paquerette	2	renouee sp	3		

Figure C.2 – Note de nuisibilité théorique des adventices observées dans les essais (Perrisseau, 2022).

	Échelle	Lieu	Méthode
Peuplement cultivé : Biomasse paille	quadrat 1	Ferme	Mesure de la biomasse humide de l'ensemble des pailles dans chaque ferme.
	quadrat 1	GQE Le-Moulon	Mesure d'un échantillon biomasse paille sèche pour estimer la teneur en eau de chaque essai à GQE Le-Moulon
Peuplement cultivé : Élaboration du rendement	quadrat 1	GQE Le-Moulon	Distinction entre épis productifs et non-productifs, mesures du nombre d'épis productifs par m2, du PMG et du rendement par m^2
Peuplement cultivé : mesure sur les grains	quadrat 1	GQE Le-Moulon	Mesures du pourcentage de grain échaudé, l'humidité des grains et de la teneur en protéine
Peuplement cultivé : Indice de nutrition azoté	quadrat 2	GQE Le-Moulon	Séchage, pesée et broyage des biomasses aériennes
	quadrat 2	LAON	Analyse de la teneur en protéine des échantillons broyés
Sol : analyse physico-chimique	Essai	CA Loiret	Analyse de sol classique : granulométrie 5 fractions, N, C, MO, P, K, Ca, Mg, Calcaire, pH et CEC
Sol : test du coton	Essai	GQE Le-Moulon	Estimation visuelle du pourcentage de coton restant

Table C.1 – Analyse des prélèvements.
CA : Chambre d'agriculture, N : azote ; C : carbone ; MO : matière organique ; P : phosphore ; K : potassium ; Ca : calcium ; CEC : capacité d'échange cationique.



Priors « peu informatifs » :
$\mu \sim \mathcal{N}(\lambda_\mu, \lambda_\varepsilon)$
$\sigma_E \sim \mathcal{N}^+(0, \lambda_\varepsilon)$
$\sigma_V \sim \mathcal{N}^+(0, \lambda_\varepsilon)$
$\sigma \sim \mathcal{N}^+(0, \lambda_\varepsilon)$
$k \sim Gamma(2, 0.1)$

Paramètres hiérarchisés selon :
$V_i \sim \mathcal{N}(0, \sigma_V^2)$
$E_j \sim \mathcal{N}(0, \sigma_E^2)$

Décomposition des observations :
$Y_{ij} = \mu + E_j + V_i + \varepsilon_{ij}$
avec $\varepsilon_{ij} \sim Student(0, \sigma^2, k)$

Modèle : M3

Figure C.3 – Graphe acyclique orienté du modèle estimant les effets environnements. où Y_{ij} la valeur de la variété i dans l'essai j, μ la moyenne générale du trait, E_j est l'effet de l'essai j V_j est l'effet de la variété i, ε_{ij} est la résiduelle du modèle, σ_E est la variance environnementale, σ_V est la variance variétale, k est le nombre de degré de liberté de la loi de Student, σ est la variance des résidus, et λ_ε et λ_μ sont respectivement la variance et la moyenne empirique des données.

Annexe D

Annexes du chapitre V

D. 1 Preprint de Peer Communty In mathematical & Computational Biology

L'article est disponible dans dernière version à `https://hal.science/hal-04380787`

Bayesian joint-regression analysis of unbalanced series of on-farm trials

Michel Turbet Delof[1], Pierre Rivière[2], Julie C. Dawson[3], Arnaud Gauffreteau[4], Isabelle Goldringer[1], Gaëlle van Frank[1] & Olivier David[5]

[1] UMR GQE-Le Moulon, Université Paris-Saclay - INRAE - CNRS - AgroParisTech – Gif-sur-Yvette, France
[2] Mètis – Prayssas, France
[3] Department of Horticulture, University of Wisconsin-Madison – WI 53706, USA
[4] UMR Agronomie, Université Paris-Saclay - AgroParisTech - INRAE – Palaiseau, France
[5] Université Paris-Saclay, INRAE, MaIAGE, 78350, Jouy-en-Josas, France

Correspondence: Michel.Turbet-Delof@inrae.fr

Abstract

Participatory plant breeding (PPB) is aimed at developing varieties adapted to agroecologically-based systems. In PPB, selection is decentralized in the target environments, and relies on collaboration between farmers, farmers' organisations and researchers. By doing so, evaluation of new genotypes takes genotype $\times$ environment ($G \times E$) interactions into account to select for specific adaptation. In many cases, there is little overlap among genotypes assessed from farm to farm because the farmers participating in a PPB project choose which ones to assess on their farm. In addition, on-farm trials can often generate more extreme observations than trials carried out on research stations. These features make the estimation of genotype, environment and interaction effects more difficult. This challenge is not unique to PPB, as many breeding programs use sparse testing or incomplete block designs to evaluate more genotypes, however in PPB genotypes are not assigned randomly to environments. To explore methods of overcoming these challenges, this article tests various data analysis scenarios using a Bayesian approach with different models and a real wheat PPB dataset over 11 years. Four morpho-agronomic traits were studied, representing over 1000 $G \times E$ combinations from 189 on-farm trials. This dataset was severely unbalanced with more than 90% of $G \times E$ combinations missing. We compared various Bayesian Finlay-Wilkinson models and found that placing hierarchical distributions on model parameters and modelling residuals using a Student's t distribution jointly improved the estimates of main effects and interactions. This statistical framework allowed us to estimate two indicators of genotype stability (one static and one dynamic) despite the high disequilibrium of the data. We found differences in mean and stability between genotype categories, with mixtures tending to be more stable. The methods developed could be used for evaluation and/or selection within networks of various stakeholders such as farmers, gardeners, plant breeders or managers of genetic resource centres.

Keywords: decentralized participatory plant breeding; bread wheat; $G \times E$ interaction; hierarchical model; Finlay-Wilkinson model; Student's t distribution; varietal stability

1 Introduction

Developing new varieties adapted to Organic Agriculture (OA), agroecological and low input systems is a major concern to achieve improvements in agricultural sustainability (Wolfe et al., 2008). In OA, the use of synthetic inputs (nitrogen, phytochemicals) is not allowed, therefore, cropping environments are not standardized by inputs and varieties grow in more diverse conditions from farm to farm (Dawson et al., 2008). These environments are dependent on pedoclimatic conditions, yearly weather, farmers' management practices and interactions between these factors (Desclaux et al., 2008).

In order to develop varieties adapted to such a diversity of environments two strategies can be used: (i) centralized and indirect selection, or (ii) decentralized and direct selection. The key difference between these approaches is the way they take genotype-by-environment ($G \times E$) interactions into account. These interactions are considered by plant breeders as the main factor limiting the efficiency of the response to selection in breeding programs (Ceccarelli et al., 2001). In centralized and indirect selection, breeding lines are evaluated and selected at a few research stations assumed to represent the target environments. This is efficient if there is a high additive genetic correlation between the trait measured on the station and the same trait measured in the target environment, and if the narrow sense heritability is high in the selection environment (Falconer, 1960).

Decentralized selection can take account of $G \times E$ interactions that are important in OA (Dawson et al., 2008; Murphy et al., 2007). In this approach, the selection and evaluation environments are very close to the target environments (the production environments of farms). Selection then maximizes the use of the reproducible part of G $\times$ E interactions to select for specific adaptations (Annicchiarico et al., 2010). This method is close to direct selection and has been shown to be effective (Annicchiarico et al., 2010; Ceccarelli et al., 2001; Murphy et al., 2007; Smith et al., 2001; Virk et al., 2005).

Many PPB programs have been carried out over the last 20 years targeting low-input farming systems in the Global South and also OA and agroecological systems in Europe and North America (Ceccarelli and Grando, 2020). A few programs tested different experimental designs and specific statistical methods to analyze data taking GxE into account (Mohammadi et al., 2011; Snapp and Silim, 2002). However, few had an extensive dataset with a large number of farms, years and genotypes to allow investigation of the best relevant methods in detail. One program with such data is a wheat PPB program that started in France in 2005, as a collaboration between INRAE GQE-Le Moulon and the Farmers' Seed Network (Réseau Semences Paysannes, RSP). This PPB program had three objectives: (i) develop population-varieties adapted to farmers' practices and needs (organic management, artisanal bread quality ...) using a participatory approach, (ii) develop strategies for preserving genetic diversity through on-farm dynamic management and breeding, and (iii) learn from and improve farmers' individual and collective breeding methods and diffuse successful methods broadly.

In this program, a large number of populations was evaluated over a large network of farms in the RSP (Dawson et al., 2011; Goldringer et al., 2020; Rivière et al., 2015a,b; van Frank et al., 2020). Because of the extensive trial network, the assessment of population performance within an environment could potentially be improved by taking account of the average performance of populations over the network and the stability of their performance, in particular temporal stability, as it determines agronomic and economic risks. Two types of stability assessment have been developed: static and dynamic stability (Becker and Leon, 1988; Lin et al., 1986).

The farmers involved in the program chose which populations to evaluate on their farm, based on prior information about the parents, and characteristics of interest. As very few populations were present in all the trials, the resulting series of trials was very unbalanced, so that the estimation of population average performances and stabilities was difficult. Joint regression is a robust method for estimating genotype main effects and stability with incomplete datasets (Finlay and Wilkinson, 1963; Pereira et al., 2007). It is based on the Finlay-Wilkinson (FW) model, which is parsimonious since the interaction effect between a genotype and an environment is modelled as the product of a genotype stability parameter, called sensitivity, and the

environment main effect. Various Finlay-Wilkinson models have been used in a frequentist framework, which include fixed-effect models and models with random environmental effects (Nabugoomu et al., 1999; Ng and Williams, 2001; Patterson and Silvey, 1980). In the latter models, environmental effects are assumed to come from a common distribution, thereby leading to shrunk estimates. FW models in which genotype main effects, environment main effects and genotype sensitivities are all random effects have recently been developed that can handle unbalanced data and take into account the similarity between some genotypes and the similarity between some environments. These have been implemented in a Bayesian framework and when they include random effects, these are called hierarchical models (Carlin and Louis, 2008; Robert, 2007). Thus far, these models have been used to analyze slightly unbalanced trials (Lian and de los Campos, 2016). Hierarchical joint regression has also been used to analyze very unbalanced simulated data (van Frank et al., 2019). This simulation study has shown that genotypes should be tested in sufficiently many trials in order to estimate their main effects and sensitivities reliably. However, this method had not been used to analyze real and very unbalanced trials. Thus, it was not clear if it could cope with the actual levels of unbalanced data seen in the French PPB on-farm trials and what insight it could give into the behavior of genotypes across environments.

Extreme data is an important issue in data analysis. In multi-environment trials (MET), they may come from either (1) errors between scoring and data formatting (measurement error, wrong labelling, etc.), or (2) environmental heterogeneity in the trial (weed infestation, soil fertility, etc.), or (3) particular environmental conditions that fall outside the normal range of environments under study (poor emergence, extreme weather, strong pest/disease pressure, etc.). In our PPB program, as cultivation environments are less controlled, extreme observations (types 2 and 3) could be more frequent than expected. This could bias estimates based on the normal distribution. Extreme observations could be removed from the dataset to solve this problem, but it is difficult to decide which observations to remove. If too many extreme observations are removed, then the variability of the data may be underestimated and the precision of the statistical analysis overestimated. Alternatively, statistical methods that are robust to extreme observations may be used (Hampel et al., 2011; Huber and Ronchetti, 1981). Various robust methods have been developed in a frequentist or a Bayesian framework, in particular methods consisting in replacing the normal distribution by a Student's t distribution in statistical models. This distribution is more robust to extreme observations than the normal distribution, because it has heavier tails (Carlin and Polson, 1991; Choy and Chan, 2008; Lange et al., 1989; Rosa et al., 2003). It has been used to handle the extreme observations of a single trial in a Bayesian framework (Besag and Higdon, 1999; Cao et al., 2022; Gianola et al., 2018). However, to our knowledge, it has not been used to analyze an unbalanced network of trials.

Recently, participatory variety trials using crowdsourcing has been used in several countries with great success (van Etten et al., 2019). These methods typically use an experimental design called a triadic comparison of technologies (tricot), followed by an analysis of variety ranks (Beza et al., 2017). In the tricot design, large numbers of farmers each compare three variety subsets from the complete set of entries, and provide direct comparison rankings among them for a few traits (i.e. best/middle/worst). By using ranking methods and structuring the entry distribution as an incomplete block design, this allows for comparisons of larger numbers of varieties without overburdening individual farmers. These design options enhance breeders' ability to engage farmers in trialing experimental lines, since on-farm trials are often limited by space and farmers' time. Trialing a few experimental lines, including a check line or variety that is replicated across sites is more realistic for farmers than implementing a fully replicated design. Triadic methods are very useful in many situations, but they are not applicable to more mature networks of farmer breeders such as we have in our PPB program for wheat. The farmers in this network have selected populations over time according to their own rationale, and the populations are not randomly assigned to farmers. In addition, farmers test different numbers of populations, with some only trialing a few and others trialing several dozen. Farmers also want access to quantitative data rather than simple ranks, and so a non-parametric ranking of varieties with no assumptions about distribution will not produce a satisfactory analysis for this purpose.

This article was aimed at improving the assessment of the population-varieties of our program by using

the information at the level of the network. As our dataset was very unbalanced and could include extreme observations, we compared several Finlay-Wilkinson models, in particular hierarchical models and models based on the t distribution. These models were developed in a Bayesian framework, since this framework is rigorous and since it facilitates the implementation of complex models (Carlin and Louis, 2008; Robert, 2007). Finally, the best Finlay-Wilkinson model we obtained was used to analyze our data and characterize the behaviour of our population-varieties across environments.

2 Material and methods

Notation	Meaning
PPB	Participatory plant breeding
OA	Organic agriculture
RSP	French farmers' seed network
MET	Multi-environment trial
$G \times E$	Genotype $\times$ environment interaction
FW	Finlay Wilkinson
MCMC	Markov chain Monte Carlo
LOO	Leave one out
α	Germplasm main effect
θ	Environment main effect
η	Germplasm sensitivity (FW coefficient)
S^2	Germplasm static stability
W	Germplasm ecovalence (a dynamic stability)
elpd_{loo}	LOO expected logarithmic predictive density

Table 1. Main notations.

In our study, we will call a germplasm any biological entity whose individuals are derived from the same breeding process, including varieties registered in the official catalog, landraces, historic varieties, mixtures or populations stemming from crosses. An environment is the combination of a farm and a year.

2.1 Germplasm

We studied 206 germplasm covering different "germplasm types": 98 "cross" germplasm resulting from crosses made either on the farm or at the research station (Rivière et al., 2015b), 50 "landraces", i.e. population varieties grown before 1850, 30 "historic varieties", developed by professional breeding before 1950, 17 "mixtures", which were generally complex, with numerous genotypes from potentially all the other germplasm types. In addition, 11 "registered varieties" after 1950 and widely used in organic farming were included: Maitre Pierre (1954), Poncheau (1956), Renan (1990), Ataro (2004), Pollux (2004), Rubisco (2012), Hendrix (2012), Kampmann selected in Renan, and Hermes (1982), Alauda (2004) and Goldritter (2013), all three selected in Probus (1957).

2.2 Experimental designs and data

2.2.1 Experimental designs

Data were collected between 2008 and 2019. The wheat PPB program followed numerous experimental designs due to the different constraints of farmers, collectives and researchers. The designs have been grouped into 5 classes (Tab. 2).

The "regional farm" and "satellite farm" designs were co-designed to be adapted to the farmer-breeders' constraints and to be used in their agricultural routine. In these designs, the germplasm common to all

farms (control germplasm) were collectively chosen by farmers and researchers, while each farmer individually chose the additional germplasm to be cultivated in his farm. At the beginning the control was a selection in a landrace, and after 2014 it was a germplasm stemming from a cross. Both complete-block and incomplete-block designs were used to address specific research questions such as the study of the evolution of traits (Rivière et al., 2015b), local adaptation (van Frank et al., 2020) or the evaluation of agronomic performance (Goldringer et al., 2020). Some unreplicated trials corresponded to trials with replications but for which measurements could not be performed in some replications.

	Nb of blocks	Nb of repeated germplams	Nb of gemplasms by environment	Nb of environments
Complete blocks	2 to 3	6 to 45	7 to 45	24
Incomplete blocks	3 to 4	3 to 49	6 to 58	11
Regional farm	2	5 to 16	7 to 81	20
Statellite farm	1	1 to 22	5 to 79	102
Unreplicated	1	0	5 to 39	32

Table 2. Experimental designs of the 189 trials used in the statistical analysis. Nb: number, Environment: combination of a year and a location.

2.2.2 Data collected

Four traits were studied, plant height (60% of the data was the average height of 25 individuals and 40% was the overall height of the microplot, mm), spike weight (mean of 25 individual measures, g), protein content of the grain (on the microplot, measured with NIRS technology at INRAE Clermont-Ferrand France, %) and thousand kernel weight (TKW, measured on the microplot, g). These four traits were among those collectively chosen by farmers and researchers to be measured during the PPB program (Table 3). Plant height was measured in the field, while the other traits were measured after harvest at the research station on samples of spikes sent by farmers. The data analyzed were the adjusted means for block effects if these effects were significant, and the empirical means if otherwise. Obvious outliers were excluded.

van Frank et al. (2019) analyzed the sensitivity of the hierarchical FW model to different MET set-ups with simulated data. They found that, in contrast to the environmental effects, the germplasm effects and FW coefficients were difficult to estimate. This is why they recommended that a large number of environments be used and that the germplasm be repeated sufficiently. We have therefore made a selection of the data and kept the environments with at least five germplasm and the germplasm that were present in at least four environments. Thus, the data analyzed comprised 70 to 76% of the initial data, depending on the trait.

The multi-environment data were very unbalanced, with most of the germplasm occurring in a limited number of environments (the median number of replicates across environments was seven, and about 20% of the germplasm were replicated in four environments only). For each trait, the number of observations was between 1300 and 2000 and the measures were spread over more than nine years (Tab. 3).

Trait	Observations	Germplasm	Environments	Disequilibrium	Farms	Years
Plant height	1437	124	117	90	44	11
Spike weight	1804	172	148	93	52	10
Protein	1332	144	111	92	44	9
TKW	1982	177	165	93	58	11

Table 3. Description of the dataset. Disequilibrium: proportion of missing values in the Germplasm x Environment table in %.

2.3 Models

The phenotypic value $Y_{ij} \in \mathbb{R}$ for a given trait Y, germplasm i and environment j was assumed to be equal to

$$Y_{ij} = \mu_{ij} + \varepsilon_{ij},$$

where $(i, j) \in \mathcal{C}$, $\mathcal{C}$ was the set of the germplasm x environment combinations occurring in the data set, $\mu_{ij} \in \mathbb{R}$ was an expectation term, and $\varepsilon_{ij} \in \mathbb{R}$ was a residual term. Five models were developed, which modelled the expectation term, the residual term and the prior distribution differently (Tab. 4).

	Expectation term	Residual term	Prior distribution
ADHn	Additive	Normal	Hierarchical
ADHs	Additive	Student	Hierarchical
FWHn	Finlay Wilkinson	Normal	Hierarchical
FWHs	Finlay Wilkinson	Student	Hierarchical
FWs	Finlay Wilkinson	Student	Weakly informative

Table 4. The five models fitted.

2.3.1 Expectation term

In models ADHs and ADHn, the expectation term was modelled as additive effects of both the germplasm and the environment without interaction:

$$\mu_{ij} = \alpha_i + \theta_j,$$

where $\alpha_i \in \mathbb{R}$ was the main effect of germplasm i, and $\theta_j \in \mathbb{R}$ was the main effect of environment j. Models FWHs, FWs and FWHn modelled genotype-environment interaction using the Finlay-Wilkinson, also called joint-regression, model (Finlay and Wilkinson, 1963). In these models, the expectation term was assumed to be equal to

$$\mu_{ij} = \alpha_i + \theta_j + \eta_i\theta_j,$$

where $\eta_i \in \mathbb{R}$ was the sensitivity of germplasm i to environments (linear regression coefficient, Perkins and Jinks, 1968). Finlay and Wilkinson (1963) defined their coefficient as $b_i = 1 + \eta_i$. As the average sensitivity is equal to 0, a germplasm with $\eta_i > 0$ (resp. $\eta_i < 0$) is more (resp. less) sensitive to environments than a germplasm with the average sensitivity (Nabugoomu et al., 1999). In these models, the interaction between germplasm i and environment j was modelled as a multiplicative term $\eta_i\theta_j$ contributing to the expectation term with the remaining part adding to the residual term. The Finlay-Wilkinson coefficient is considered as both a static and a dynamic indicator of stability (Becker and Leon, 1988; Lin et al., 1986). In this model, statically stable genotypes have a coefficient close to -1. Dynamically stable genotypes have a coefficient close to zero, but having a coefficient close to zero is not sufficient to determine dynamic stability, this also depends on the amount of $G \times E$ variation that remains unexplained by the model.

2.3.2 Residual term

In models ADHn and FWHn, the distribution of the residual term was assumed to be normal:

$$\varepsilon_{ij} \sim \mathcal{N}\left(0, \sigma_\varepsilon^2\right),$$

where $\mathcal{N}\left(0, \sigma_\varepsilon^2\right)$ was the normal distribution with expectation 0 and variance σ_ε^2. However, to limit the influence of extreme values on the results of the analyses, we also developed models based on Student's t distributions. Thus, in models FWHs, FWs and ADHs, the distribution of the error term was assumed to be equal to

$$\varepsilon_{ij} \sim t\left(0, \sigma_\varepsilon^2, \nu\right),$$

where $t\left(0, \sigma_\varepsilon^2, \nu\right)$ was the Student's t distribution with dispersion parameter $\sigma_\varepsilon^2 > 0$ and $\nu > 2$ degrees of freedom. We assumed that $\nu > 2$ to ensure that the expectation and the variance of ε_{ij} were defined and finite. In models FWHs, FWs and ADHs, the variance of ε_{ij} was equal to $\nu\sigma_\varepsilon^2/(\nu-2)$. The normal distribution can be considered as a t distribution with ν tending to $+\infty$. For additive models, the residual combined the $G \times E$ contribution and errors, i.e. experimental errors and environmental heterogeneity in each trial, while for FW models, it combined the part of $G \times E$ not explained by η and errors.

2.3.3 Prior distribution

The statistical analysis was carried out in a Bayesian framework, so that a joint prior distribution was placed on model parameters. We placed weakly informative priors on σ_ε and ν (Cao et al., 2022; Gelman, 2006; Juárez and Steel, 2010):

$$\sigma_\varepsilon \sim \mathcal{N}^+(0, \lambda_\varepsilon^2), \quad \nu \sim \Gamma(2, 0.1),$$

with $\nu > 2$, and where λ_ε was a known prior value of the standard deviation of the trait, $\mathcal{N}^+(0, \lambda_\varepsilon^2)$ was the normal distribution restricted to positive values with parameters 0 and λ_ε^2, and $\Gamma(2, 0.1)$ was the gamma distribution with shape parameter 2 and rate parameter 0.1.

Given the high data disequilibrium and the large numbers of germplasm and environments, we decided to implement a hierarchical Bayesian approach. In all the models except the FWs model, α_i, θ_j and when present η_i were assumed to follow hierarchical distributions:

$$\alpha_i \sim \mathcal{N}\left(\mu_Y, \sigma_\alpha^2\right), \quad \eta_i \sim \mathcal{N}\left(0, \sigma_\eta^2\right), \quad \theta_j \sim \mathcal{N}\left(0, \sigma_\theta^2\right),$$

where μ_Y, σ_α, σ_η and σ_θ were unknown parameters. Then, we placed weakly informative prior distributions on the hyperparameters μ_Y, σ_α, σ_η and σ_θ:

$$\mu_Y \sim \mathcal{N}\left(\lambda_\mu, \lambda_\varepsilon^2\right), \quad \sigma_\alpha \sim \mathcal{N}^+(0, \lambda_\varepsilon^2), \quad \sigma_\theta \sim \mathcal{N}^+(0, \lambda_\varepsilon^2), \quad \sigma_\eta \sim \mathcal{N}^+(0, 0.75^2),$$

where λ_μ was a known prior value of the trait mean. Germplasm main effects, environment main effects, germplasm sensitivities and residuals were assumed to be independent given the hyperparameters, σ_ε and ν. In model FWs, the hierarchical distributions of α_i, η_i and θ_j were replaced by weakly informative prior distributions:

$$\alpha_i \sim \mathcal{N}\left(\mu_Y, \lambda_\varepsilon^2\right), \quad \eta_i \sim \mathcal{N}\left(0, 0.75^2\right), \quad \theta_j \sim \mathcal{N}\left(0, \lambda_\varepsilon^2\right).$$

The values chosen for λ_ε and λ_μ are in Appendix A.1.

2.3.4 Posterior distribution

Bayesian inference is based on the posterior distribution of the model parameters. This distribution was estimated using Markov chain and Monte Carlo (MCMC) methods. These methods simulate the values of the model parameters according to a Markov chain that converges to the posterior distribution of these parameters (Robert, 2007). The MCMC methods were implemented using `R` (R Core Team, 2014) and the package `rstan` (Stan Developpement Team, 2016), that performs Hamiltonian Monte Carlo (HMC) sampling. This method aims at reducing the correlation between successive sampled values by using a proposal distribution based on Hamiltonian dynamics (Neal, 2011). Four MCMC chains were run independently to test for convergence. The initial values of each chain were taken randomly. For each chain, the burn-in consisted of 200 iterations, then 5,000 iterations were performed for all models, except FWs where 8,000 iterations were required. The average calculation time (for a given trait and a given model) was 9 minutes and the maximum time was 22 minutes (with FWs), with a computer *intel CORE i7*©. Estimates of the Gelman-Rubin statistic were smaller than 1.02 and the effective sample size was greater than 400 for each parameter in all tested models.

2.3.5 Model comparison

We compared the predictive ability of models using leave-one-out cross-validation, which seems more appropriate than Bayes factors for selecting models that approximate the process generating the data (Lartillot, 2023). We estimated the expected logarithmic predictive density using the R package LOO (Vehtari et al., 2017). This criterion was equal to

$$\text{elpd}_{\text{loo}} = \sum_{(i,j)\in\mathcal{C}} \ln(p(Y_{ij}|Y_{-ij})),$$

where Y_{-ij} was the dataset without observation Y_{ij}, and $p(Y_{ij}|Y_{-ij})$ was the leave-one-out posterior density of Y_{ij}. The larger this criterion, the better the agreement between the model and the data. The elpd_{loo} criterion was also used to identify extreme observations. The quantity $\ln(p(Y_{ij}|Y_{-ij}))$ can be understood as the contribution of observation Y_{ij} to elpd_{loo}. Observations with low contributions are unlikely and can be considered extreme observations.

For main effects and sensitivities, we estimated the average standard deviation of estimates, which allowed us to have an estimate of the precision of these effects. To be able to compare the precision between traits, for α and θ we estimated the average coefficient of variation by dividing this standard deviation by the general average μ_Y.

2.4 Data analysis

Model parameters were studied using the best model as determined by the methods described above.

2.4.1 Variance decomposition

In order to quantify the influence of model terms on observations, the variance of an observation was decomposed. Since α_i, θ_j, η_i and ϵ_{ij} were assumed to be conditionally independent, the variance of an observation given the hyperparameters, σ^2_ε and ν was equal to

$$Var(Y_{ij}) = Var(\alpha_i + \theta_j + \eta_i\theta_j + \varepsilon_{ij}) = \sigma^2_\alpha + \sigma^2_\theta + \sigma^2_\eta\sigma^2_\theta + Var(\varepsilon_{ij}).$$

As the best model involved the t distribution, $Var(\varepsilon_{ij})$ was equal to $\nu\sigma^2_\epsilon/(\nu-2)$. The proportions of variance explained by the germplasm main effect, the environment main effect and the interaction effect were equal to

$$\pi(\alpha) = \frac{\sigma^2_\alpha}{Var(Y_{ij})}, \quad \pi(\theta) = \frac{\sigma^2_\theta}{Var(Y_{ij})}, \quad \pi(\eta\theta) = \frac{\sigma^2_\eta\sigma^2_\theta}{Var(Y_{ij})}.$$

$\pi(\alpha)$ is also called broad-sense heritability. The proportion of variance explained by the model (coefficient of determination) was equal to

$$R^2 = \pi(\alpha) + \pi(\theta) + \pi(\eta\theta) = \frac{\sigma^2_\alpha + \sigma^2_\theta + \sigma^2_\eta\sigma^2_\theta}{Var(Y_{ij})}.$$

This definition of R^2 ensured that $R^2 \leq 1$ (Gelman et al., 2019). We also estimated the proportion of the variance of $G \times E$ interactions and experimental errors that was explained by the $\eta_i\theta_j$ term, defined by

$$\rho = \frac{Var(\eta_i\theta_j)}{Var(\eta_i\theta_j + \varepsilon_{ij})} = \frac{\sigma^2_\eta\sigma^2_\theta}{\sigma^2_\eta\sigma^2_\theta + Var(\varepsilon_{ij})}.$$

2.4.2 Characterization of germplasm

Germplasm main effects and sensitivities were estimated. In addition, we estimated two stability indicators, the static stability S^2_i (Becker and Leon, 1988) and the ecovalence W_i (Wricke, 1962) which is an indicator of dynamic stability. Static stability describes the response of a genotype that maintains a constant performance across environments, while dynamic stability describes the response of a genotype showing a constant difference with the average response of all genotypes tested in each environment (Annicchiarico, 2002). Due to

data imbalance, the empirical estimates of these indicators were biased. Thus, we defined stability indicators by means of theoretical variances from the Bayesian model described above (Cotes et al., 2006; Piepho, 1999). Using the independence assumptions of the model, we obtained for germplasm i,

$$\begin{aligned} W_i &= Var(\eta_i\theta_j + \varepsilon_{ij}) = \eta_i^2\sigma_\theta^2 + Var(\varepsilon_{ij}), \\ S_i^2 &= Var(\theta_j + \eta_i\theta_j + \varepsilon_{ij}) = (1+\eta_i)^2\sigma_\theta^2 + Var(\varepsilon_{ij}) = (1+2\eta_i)\sigma_\theta^2 + W_i. \end{aligned}$$

The larger these indicators, the less stable the germplasm. Becker (1981) applied the same decomposition with the empirical variances. These stability indicators are approximations of the static stability and ecovalance in a balanced framework.

Moreover, we tested whether the "type" of germplasm (cross, landrace, registered variety, mixture of germplasm and historic variety) had an influence on germplasm parameters (α_i, η_i, S_i^2 and W_i) by running a one-way ANOVA and Tukey–Kramer HSD test with germplasm type as factor.

3 Results

3.1 Model comparison

3.1.1 Predictive capacity of models

According to the $elpd_{loo}$ criterion, the non-hierarchical FWs model was less predictive than the hierarchical FWHs model for all the traits (Fig. 1). Using the latter model shrank the estimates of η and sometimes α (Fig. 2). With the non-hierarchical model (FWs), some estimates (α_i and η_i) seemed to be unreliable, in particular some germplasm means were extreme and some FW coefficients were larger than 1 or smaller than -1.

The hierarchical models with a Student likelihood (FWHs, ADHs) were more predictive than the models with a normal distribution (FWHn, ADHn), all the more as ν was low (Tab. 5). For protein content, ν was equal to 20, so the t distribution was close to a normal distribution. The t distribution reduced the shrinkage of FW coefficients (Fig. 3). Moreover, t models better accounted for extreme data than normal models (Fig. 4). These extreme data mainly came from germplasm that were not replicated in the trials.

The Finlay-Wilkinson models (FWHs, FWHn) were slightly more predictive than the simple additive models (ADHs, ADHn), except for protein content, where the difference was not significant (Fig. 1). This difference was smaller than the differences due to the distribution of residuals and the hierarchization of parameters.

The $elpd_{loo}$ criterion was estimated using Pareto smoothed importance sampling (Vehtari et al., 2017). This method tends to be less precise for models that do not fit the data well. Thus, as expected, estimates of $elpd_{loo}$ were more reliable for the two hierarchical models with a t likelihood (FWHs and ADHs) than for the other models, in particular model FWs (Supplementary Tab. B.1).

3.1.2 Precision of estimates and distribution of residuals

For the models with a t distribution, the estimate of the number of degrees of freedom (ν) varied between 3.8 and 28.2 (close to a normal distribution) (Tab. 5). Thus, the shape of the distribution of residuals depended on the trait. This result confirmed that the number of extreme observations was not negligible in our data, and that models with a t distribution were more appropriate. In the latter case, the variation ranges of residuals were wider but with more residual values close to 0 for the t distribution than the normal distribution (Fig.3). Models had similar estimate precision, except for model FWs, which had less precise estimates. This result confirmed that a basic joint regression, i.e. non-hierarchical model, was not suited to our unbalanced data. Parameters α and θ were estimated more precisely (difference in coefficient of variation between -0.1 and 0.4, Tab. 5) for t models (ADHs and FWHs) than for normal models (ADHn and FWHn). This result was consistent with Fig. 4, where extreme data were better predicted by FWHs than by FWHn, except for protein content.

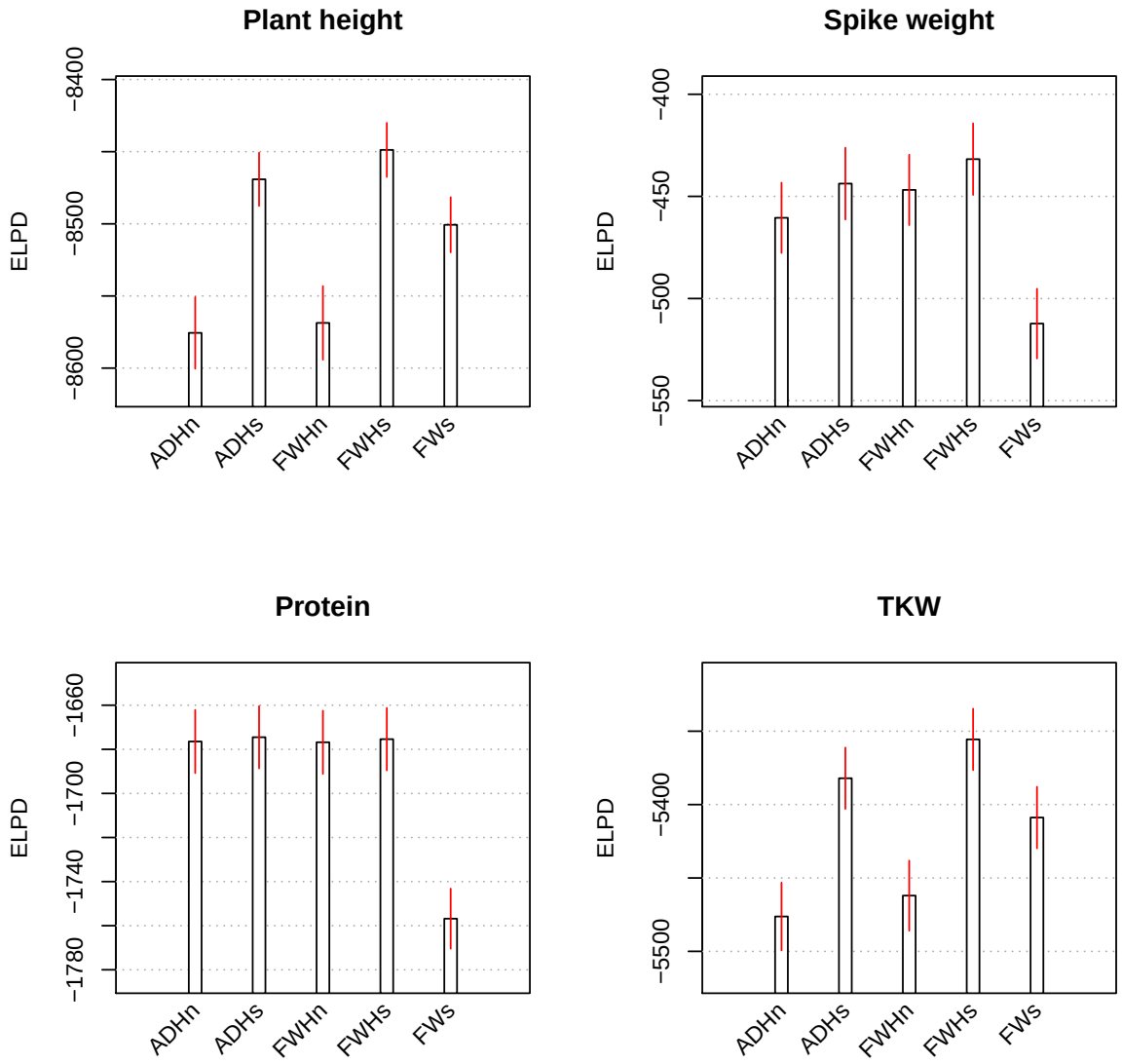


Figure 1. Predictive capacity of models. elpd_{loo} and its associated standard error for the four studied traits.

3.2 Data analysis

In the following, we used the FWHs model which proved to be the best model in terms of prediction and accuracy of the estimated parameters.

3.2.1 Variance decomposition

The proportion of variance explained by each term of the model depended on the trait (Tab. 6). For all four traits, the environment effect was highly explanatory. For height and TKW, a relatively large part of the total variance was explained by the germplasm effect (resp. 23.8% and 16.1%), whereas this part was much smaller for spike weight and protein content (10.9% and 5.6%). The proportion of variance explained by the sensitivity effect η was not significantly different from 0 for protein content and low for the three other traits. It explained 6.5%, 4.8% and 6.9% of the variance of $G \times E$ interactions and experimental errors (ρ parameter) for plant height, spike weight and TKW, respectively.

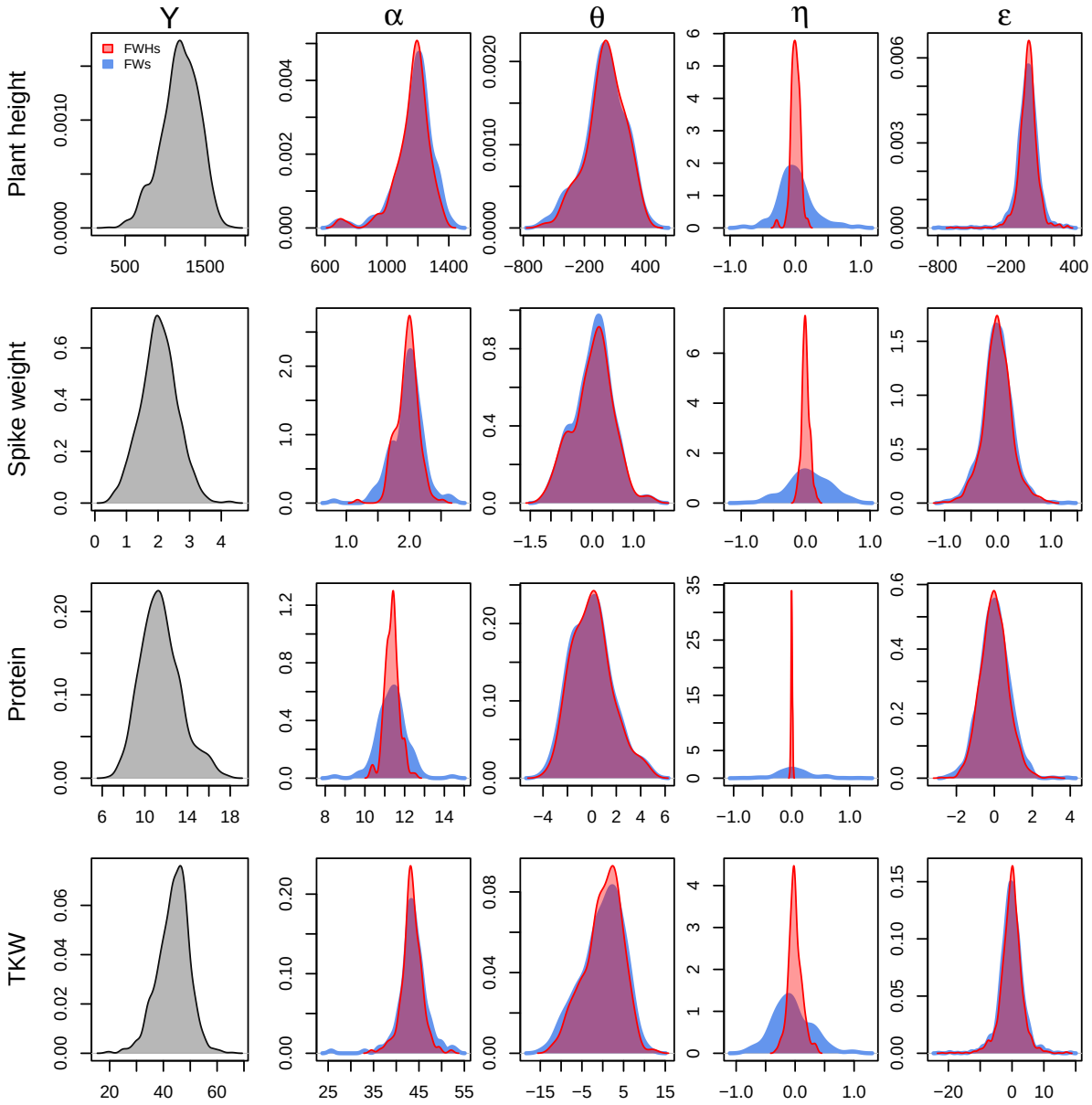


Figure 2. The first column presents the distribution of the trait to be explained (in grey). The last four columns compare the hierarchical (red) and non hierarchical (blue) versions of the FW model with a Student law for the residuals, and show the smoothed histograms of main effects and FW coefficients.

3.2.2 Characterization of germplasm

The correlation between germplasm sensitivity (η_i) and static stability (S_i^2) was very close to 1 for all traits while germplasm sensitivity was poorly correlated to W_i (Tab. 7). The main effect α_i had a low correlation with η_i and S_i^2, except for plant height and spike weight. Correlations between W_i and α_i were low and in most cases not significant.

Plant height was found to depend on the type of germplasm, landraces being taller than historic varieties, which were themselves taller than registered varieties. Registered varieties were significantly more stable (static stability and FW coefficient) than everything other than mixtures, but less stable dynamically (ecovalance). No germplasm parameters were significantly dependent on germplasm type for protein content and spike weight. TKW germplasm main effects did not depend on the type of germplasm, but for this trait landraces and mixtures appeared statically more stable than historic varieties.

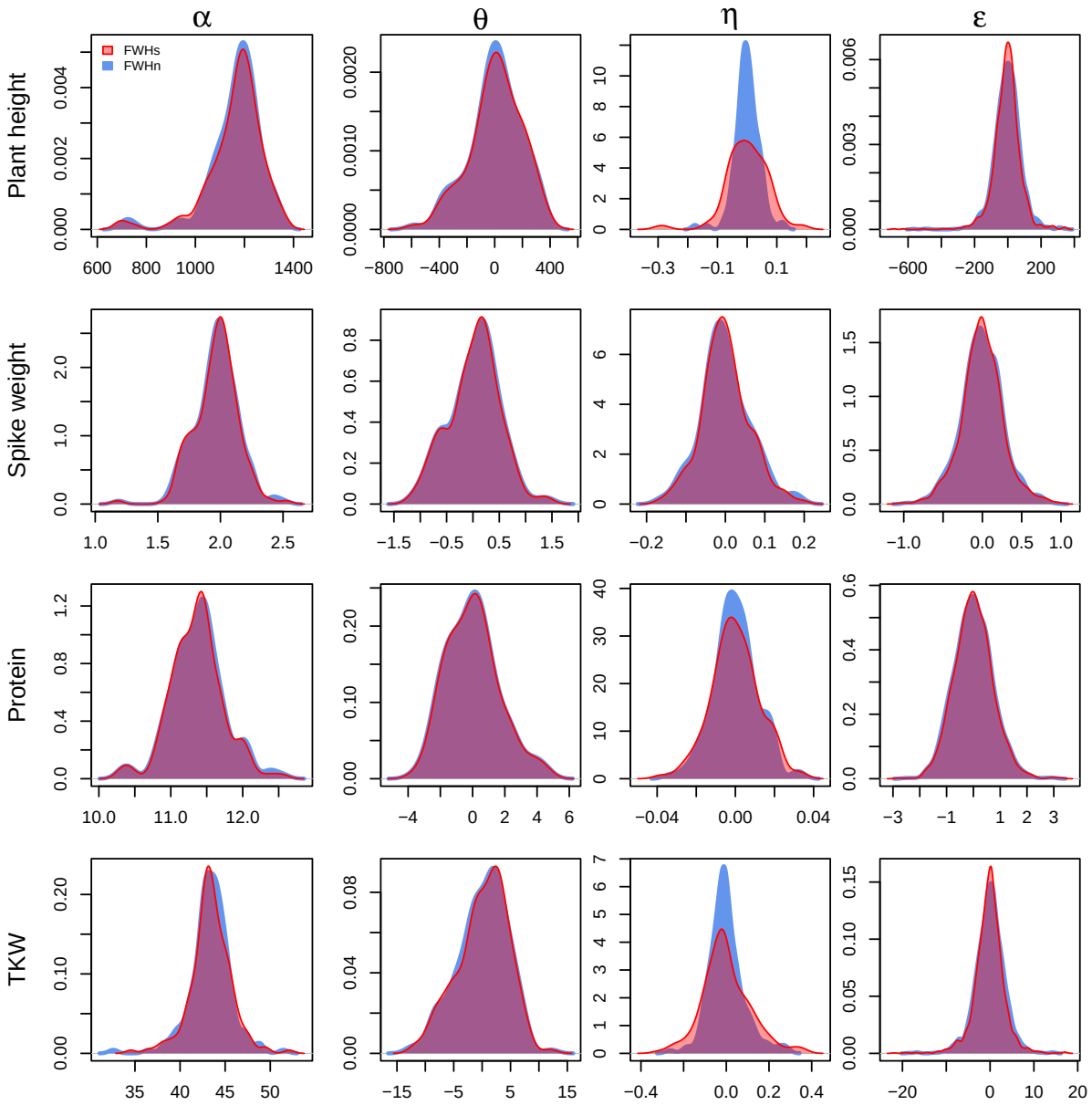


Figure 3. Comparison of hierarchical FW models with different residual laws, the Student (red) and the normal (blue). These graphics show the smoothed histograms of main effects and FW coefficients.

4 Discussion

To fit the characteristics of PPB trials, i.e., few inter-farm replicates and possible extreme data, we developed several models and we found that the hierarchical Finlay-Wilkinson model with t residuals was the best for prediction and parameter precision. Then we compared the performance and stability of different germplasm types.

4.1 Handling the data from a highly unbalanced series of trials

As the farmers of the program chose the germplasm they assessed, the data obtained from the series of trials were very unbalanced, with more than 90% of the $G \times E$ combinations missing. This made the estimation of germplasm main effects and sensitivities difficult. Although the Finlay-Wilkinson model was parsimonious, a basic joint regression with weakly-informative prior distributions (model FWs) was not able to cope with this level of disequilibrium. According to the elpd_{loo} criterion, model FWs was not the best model (Fig. 1). In

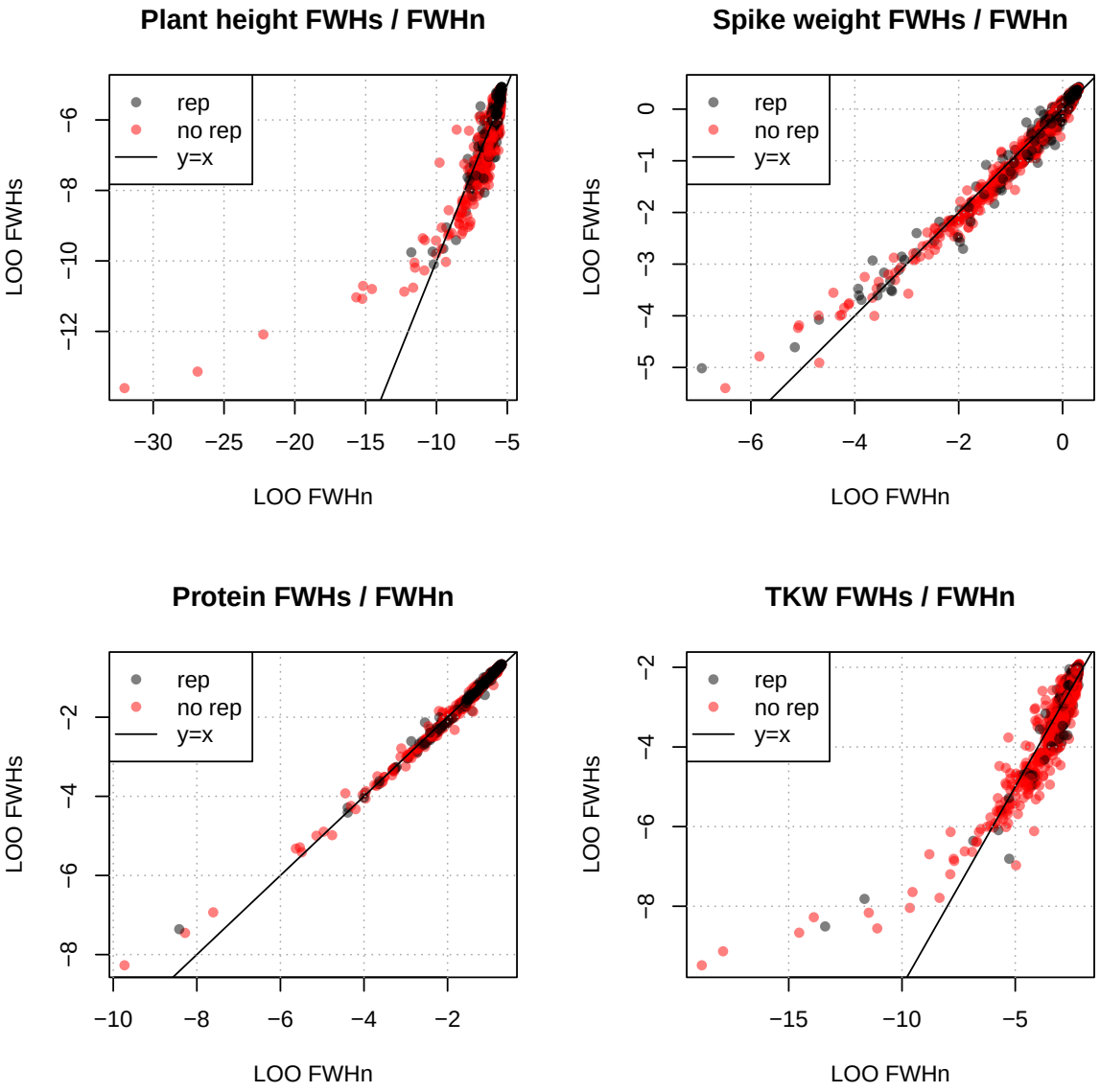


Figure 4. Comparison of t and normal models (FWHs vs FWHn) in terms of the contributions of observations to the elpd_{loo} criterion. Black (resp. red) dots correspond to observations that were measured on germplasm that were replicated (resp. not replicated) within trials.

addition, its estimates had poor precision and it led to extreme sensitivity estimates, with values close to 1 or -1 (Fig.2).

In contrast, hierarchical joint regression appeared more suited to our data structure. Model FWHs had the largest elpd_{loo} values for three traits out of four. Placing a hierarchical distribution on sensitivities constrained estimates and brought them closer to 0. This led to more satisfactory sensitivity estimates, since they were well below 1 in absolute value.

Three strategies have previously been used to manage incomplete $G \times E$ data: i) subset the total dataset to obtain an almost balanced subset for the analysis (Ceccarelli and Grando, 2007), ii) predict missing data with a more or less complex model and use these predictions in the analysis (Kumar et al., 2012; Woyann et al., 2017), and iii) use a model more robust to unbalanced data, provided it complies with model validation conditions (Assis et al., 2018; van Frank et al., 2019). We used the last strategy to maximise the amount of information from the data (less data excluded than in the first strategy) with a one-step process (unlike the second strategy).

Trait	Model	ν	cv(α)	cv(θ)	sd(η)
	ADHn		3.0	2.8	
	ADHs	3.8 (0.5)	2.8	2.6	
Plant height	FWHn		3.1	2.9	0.08
	FWHs	3.5 (0.4)	2.8	2.7	0.09
	FWs	3.3 (0.4)	4.7	4.5	0.20
	ADHn		5.3	5.2	
	ADHs	8.1 (2.2)	5.2	5.0	
Spike weight	FWHn		5.3	5.2	0.12
	FWHs	8 (2.2)	5.3	5.1	0.11
	FWs	10.2 (4.1)	6.8	5.7	0.29
	ADHn		2.7	2.7	
	ADHs	19.9 (9.6)	2.6	2.7	
Protein	FWHn		2.6	2.7	0.05
	FWHs	19.6 (9.6)	2.7	2.7	0.05
	FWs	28.2 (13.4)	4.8	4.1	0.25
	ADHn		2.8	2.8	
	ADHs	4.2 (0.5)	2.6	2.5	
TKW	FWHn		2.8	2.8	0.15
	FWHs	4 (0.5)	2.7	2.5	0.17
	FWs	3.8 (0.4)	3.5	3.2	0.33

Table 5. Number of degrees of freedom and precision of estimates.
ν: posterior means, with posterior standard deviations in parentheses, of the number of degrees of freedom of the t distribution; cv(α), cv(θ): average posterior coefficients of variation of germplasm and environment main effects; sd(η): average posterior standard deviation of germplasm sensitivities (FW coefficients).

	Plant height		Spike weight		Protein		TKW	
	Mean	95% CI	Mean	95% CI	Mean	95% CI	Mean	95% CI
R^2	87.1	82.9∼90.2	78.2	73.8∼82.1	83	79.1∼86.7	69.7	64.1∼74.8
$\pi(\alpha)$	23.8	17.9∼30.7	10.9	7.7∼14.7	5.6	3.7∼8.2	16.1	12∼20.8
$\pi(\theta)$	62.4	54.5∼69.8	66.2	60.1∼71.9	77.2	72∼82	51.4	44.6∼58.1
$\pi(\eta\theta)$	0.9	0.4∼1.6	1.1	0.4∼2.1	0.2	0∼0.8	2.2	1∼3.8
ρ	6.5	2.8∼12	4.8	1.7∼9.3	1.2	0∼4.7	6.9	3.1∼12

Table 6. Variance decomposition.
Estimates were made using model FWHs and are given in %. Mean: mean of the posterior distribution; 95% CI: 95% credible intervals. R^2 is the coefficient of determination. $\pi(\alpha)$, $\pi(\theta)$ and $\pi(\eta\theta)$ are respectively the proportion of variance explained by α, θ and $\eta\theta$. ρ is the proportion of the variance of $G \times E$ and errors explained by $\eta\theta$.

van Frank et al. (2019) investigated the influence of MET design on the evaluation of germplasm using model FWHn and simulations. They found that when data were highly unbalanced, this evaluation was more reliable with at least 100 environments and when some germplasm were replicated over at least 5 environments per germplasm. Therefore, we restricted the analysis to a subset of data that met these conditions. Having 100 environments seems difficult to achieve, but it should be noted that this number combines the number of trials per year and the number of years, which may be achieved by a network of many farmers experimenting over several years.

Cotes et al. (2006) used a Bayesian approach to estimate FW coefficients in a MET study in order to take prior information on germplasm coming from other studies into account. A similar approach was used by Couto et al. (2015), Foucteau and Denis (2001), and Nascimento et al. (2020) and was found to greatly improve the results. Here, we used little prior information. But in the future, previous evaluation studies may provide

Trait	Pearson correlation between					
	$\alpha_i \vert \eta_i$	$\alpha_i \vert S_i^2$	$\alpha_i \vert W_i$	$\eta_i \vert S_i^2$	$\eta_i \vert W_i$	$S_i^2 \vert W_i$
Plant height	0.43***	0.4***	-0.41	0.997***	-0.34	-0.26
Spike weight	0.34***	0.35***	0.24*	0.999***	0.17	0.21
Protein	0.13	0.14*	-0.01	0.999***	-0.01	0
TKW	0.23*	0.23*	0.12	0.996***	0.27	0.36

Table 7. Correlation between germplasm parameters.
*, **, *** : significant at $P = 0.05, P = 0.01, P = 0.001$ respectively.
α_i: germplasm effect, η_i: germplasm sensitivity (FW coefficient), S_i^2: static stability, W_i: ecovalence.

Trait		Registered		Historic		Landrace		Cross		Mixture		P-value
Plant height	α_i		862^{c}		1136^{b}		1221^{a}		1175^{ab}		1189^{ab}	**<0.001**
	η_i	n=6	-0.11^{b}	n=16	-0.01^{a}	n=21	0^{a}	n=74	0.01^{a}	n=7	-0.01^{ab}	**0.001**
	S_i^2		37566^{b}		44170^{a}		44616^{a}		45556^{a}		43911^{ab}	**0.005**
	W_i		8835^{a}		7680^{b}		7678^{b}		7716^{b}		7707^{b}	**<0.001**
Spike weight	α_i		2.03		1.99		1.94		1.96		2.02	0.439
	η_i	n=8	0.02	n=20	0.02	n=40	-0.01	n=89	0	n=15	-0.01	0.297
	S_i^2		0.34		0.34		0.32		0.33		0.32	0.303
	W_i		0.08		0.08		0.08		0.08		0.08	0.712
Protein	α_i		11.1		11.4		11.4		11.4		11.5	0.125
	η_i	n=9	0.001	n=27	0.001	n=34	-0.001	n=62	0	n=12	0.001	0.935
	S_i^2		3.41		3.41		3.39		3.4		3.41	0.951
	W_i		0.61		0.61		0.61		0.61		0.61	0.641
TKW	α_i		43.6		43.9		43.1		43.4		43.9	0.681
	η_i	n=8	-0.03^{ab}	n=20	0.08^{a}	n=42	-0.03^{b}	n=92	0.01^{ab}	n=15	-0.05^{b}	**0.003**
	S_i^2		32.9^{ab}		37.4^{a}		32.7^{b}		34.3^{ab}		31.7^{b}	**0.002**
	W_i		12.7		13		12.8		12.7		12.6	0.081

Table 8. Performance and stability of types of germplasm.
P-values in bold indicate significant differences (P<0.05) between germplasm types for a given trait and different letters indicate significant differences (P<0.05) based on Tukey–Kramer HSD tests.
n: number of germplasm, α_i: mean germplasm effect, η_i:mean sensitivity (FW coefficient), S_i^2: mean static stability and W_i: mean ecovalence.

stronger prior information on germplasm behaviour.

4.2 Extreme observations

Extreme observations were more frequent in our dataset than expected under the normal distribution for three traits out of four (Fig. 4). For these traits, using a t distribution increased elpd_{loo} values, and the estimate of the number of degrees of freedom of this distribution was smaller than 10 (Tab. 5). These extreme observations could occur in our dataset for several reasons: because most of the populations were not replicated within the trials, because cultivation environments were less controlled, or because a non-negligible part of the GxE interaction was not captured by the multiplicative term of the FW model. The normal distribution was appropriate for the trait protein content. It is difficult to explain why this trait had fewer extreme observations. A possible explanation could be that the measurement of protein content is more standardized than other trait measurements. For plant height, extreme values occurred only for non-replicated micro-plots with a global measurement and never with data from the average of 25 plants (Sect. 2.2.2), suggesting that this measurement is less accurate. For TKW, the kernel count could be affected by broken kernels due to over-drying or incorrect threshing settings leading to an overestimation of the number of kernels in the sample. Another possible explanation is that protein content is less variable under different conditions than plant height and

spike weight (Kazakou et al., 2014).

Using a t distribution did not affect the estimates of germplasm and environment main effects. On the contrary, it improved the estimates of sensitivities. It reduced their shrinkage and allowed the multiplicative term of the FW model to better capture $G \times E$ interactions (Fig.3).

The Student distribution is expected to take better account of extreme data and to yield more robust estimates (Besag and Higdon, 1999; Lange et al., 1989; Rosa et al., 2003). Extreme data are more likely to occur when varieties are not replicated within trials, which is frequent in this dataset (Fig. 4). Rosa et al. (2003) found that a normal likelihood underestimated a sex effect compared to a t likelihood. This effect was estimated less precisely with a normal distribution, which is consistent with our results for plant height, spike weight and TKW. A Student likelihood appears to be a good solution for dealing with extreme data, in particular in stability analyses, where extreme observations are sometimes removed (this is justified when they are extreme because of experimental errors, but not when they are due to natural variability). While this distribution has recently been used to implement robust alternatives to BLUP (Gianola et al., 2018) or to handle environmental heterogeneity in a single trial (Cao et al., 2022), to our knowledge, it has not already been used in MET studies.

4.3 Computing time

Series of trials often include many genotypes and environments, leading to large data sets. Thus, their analysis using mixed or hierarchical models is generally computationally demanding (Smith et al., 2005). The computational load can be reduced by using approximate estimation methods (Nabugoomu et al., 1999) or efficient algorithms, such as algorithms based on sparse matrix operations (Gilmour et al., 1995; Thompson et al., 2003). Hierarchical joint regression has already been implemented using Gibbs sampling or Jags (Lian and de los Campos, 2016; van Frank et al., 2020). Our implementation based on Hamiltonian Monte Carlo and Stan was more efficient since it required fewer iterations (Gelman, 2005). It allowed us to analyze large datasets in about 10 minutes.

To reduce computing time, the analyses were carried out in two steps. First, germplasm means were estimated using within-trial analyses. Then, these estimates were gathered and analyzed using a between-trial analysis. Thus, this two-stage approach analyzes $G \times E$ means without taking account of their standard error. Rivière et al. (2015a) developed a flexible method for estimating the experimental variance of trials with low intra-farm replication (farm design presented in Tab. 2). An easy way to integrate the variability estimated in the first stage would be for instance to use the same method as Couto et al. (2015).

4.4 Main effects

For the four traits studied, we found that the environmental part of the variance was large (from 51% for TKW to 77% for protein content, Tab. 6), which is consistent with the diversity of the cropping environments encountered (soil, climate, cropping practices...). Nevertheless, heritability was still significant with plant height $>$ TKW $>$ spike weight $>$ protein. Rivière et al. (2015b) found (with data included in our study) a similar ranking in heritability: plant height $>$ TKW $=$ protein $>$ spike weight. Plant height is known to be quite heritable due to a relatively simple genetic architecture with a few major genes, such as the well known Green Revolution Rht1 and Rht2 genes (Peng et al., 1999). In our study, the presence of both quite recent registered varieties and varieties dating from before the second World War, very likely led to varieties containing different alleles for these loci and increased variability for height. The decrease in plant height from landraces to historic varieties and registered varieties appears very clearly (Tab. 8) as also found in several studies (Bektas et al., 2016; Cantarel et al., 2021).

4.5 Germplasm stabilities

FW coefficients explained a low proportion of the total variance (between 0.2% and 2.2%) and a low proportion of the variance of $G \times E$ interactions and errors (between 1.2% and 6.9%, Tab. 6). We can presume that

the explanation of the interaction by the FW parameter is weaker the greater the number of environments for example, 29% for 12 studies with less than 10 environments, and 12% for studies with more than 10 environments (Brancourt-Hulmel et al., 1997). Other classical models, such as AMMI (additive main effect and multiplicative interaction) or GGE ($G + G \times E$) models, might explain a larger part of GxE interactions.

Missing data estimation methods allow these models to be used when the data is highly unbalanced, with up to from 40% unbalanced data for a MET with less than 20 environments to 60% unbalanced data for MET with at least 40 environments (Woyann et al., 2017; Yan, 2013). However, these datasets are more balanced than ours, and, as found by Rodrigues et al. (2011), FW is more robust than AMMI when the data are highly unbalanced (75%). In our study, most germplasm occurred in a limited number of environments, so that a parsimonious and very simple modelling of $G \times E$ interactions had to be used. An alternative approach would be to better characterize the environments and thus explain the environmental effects and part of the $G \times E$ interaction using environmental variables (Piepho, 2022).

Although sensitivities explained a rather low proportion of variance, HFWs model had larger elpd_{loo} values than additive models for three traits out of four. In addition, for these traits, some sensitivity estimates were not negligible, with values close to 0.2 or 0.3. Interaction effects then represented 20% or 30% of environmental effects. Additive models were appropriate for the protein content trait. It was found that the multiplicative term of the FW model was not significant for protein content, both in a balanced network of 15 environments in Serbia (Hristov et al., 2010) and in 12 environments in Swiss organic trials (Knapp et al., 2017). On the contrary, Mut et al. (2010) found significant FW coefficients for a balanced network of 7 environments in Turkey. These contrasting results could be explained by differences between numbers of environments or between genetic diversities.

For plant height, we found that registered varieties were more statically stable but less dynamically stable (Tab.8). This can be explained by the fact that there are only a few registered varieties in the trials, therefore they have little influence on the average height, which can fluctuate greatly between trials, and therefore the deviation from this average will be greater for this type.

Static and dynamic stabilities were difficult to estimate since our series of trials was very unbalanced. In particular, raw estimates of these stabilities were not reliable, since they were much influenced by the unbalanced nature of the data. By using theoretical variances, the FW model allowed us to calculate simple indicators of static and dynamic stability in the wheat PPB dataset. To our knowledge, the FW model has never been used for this purpose before.

Dependence between stability and mean is widespread (Reckling et al., 2021), but in our case, the correlation was low, which simplified interpretation of the stability analysis. Several studies for different traits and with balanced MET found a very strong correlation between FW coefficient and the static stability (Becker, 1981; Fasahat et al., 2015; Reckling et al., 2021). However, in our case, this relationship was even stronger (Tab. 7), probably because of the assumption that the variance of residuals did not depend on the genotype. As in many other studies, the residual variance was assumed to be independent of germplasm throughout our study. Allowing the residual variance to depend on the genotype could improve the estimates of stability indicators (Cotes et al., 2006; Couto et al., 2015). In particular, the dynamic indicator would be similar to the Shukla Stability Variance, i.e, the varietal variance of $G \times E$ interactions (Cotes et al., 2006). However, estimating a residual variance and a FW coefficient for each germplasm could be difficult in our study, as most of the germplasm appeared in only a few environments.

When relationships were significant, mixtures were always in a more stable (statically and dynamically) statistical group (Tab. 7). This result supports the fact that within-plot diversity stabilizes performances (Döring et al., 2015; Kiær et al., 2012).

In the wheat PPB program, the populations tested were heterogeneous and their genotypic composition could vary over years and farms (David et al., 2020). In this analysis, such variations were considered as part of the response of a population to a given environment for the sake of simplicity. Therefore the $G \times E$ interactions could be overestimated (resp. underestimated) if populations underwent diversifying (resp.

stabilizing) selection pressures within farms.

4.6 Role of statistical methods in the wheat PPB project

This work was developed following the co-construction of an experimental set-up suitable for decentralized on-farm evaluation and selection, and research into the best methods for analyzing the resulting data. It was part of the methodology we set up in a wheat PPB program, which was based on a collaboration between farmers, associations of farmers and researchers (Dawson et al., 2011). The farmers could freely choose the populations they wanted to test, so that a wide genetic diversity could be evaluated in a wide range of environments. There were on average more than 130 environments resulting from the combination of years and farms. The number of genotypes evaluated was large compared to other studies, but it was smaller than in CIMMYT's MET, which involved between 500 and 800 genotypes tested in 12 MET between 1945 and 1986 (Braun et al., 1997).

One aim of the project was to provide farmers with information to help them select new germplasm for testing on their farm. The statistical tools we developed sought to cope with the large degree to which this series of trials was unbalanced. Their objectives were the same as in other MET analyses : (i) estimate and predict germplasm' values for traits of interest for breeding, (ii) study the stability of germplasm over several environments, (iii) select new germplasm to be tested in new locations (Cotes et al., 2006). MET are usually carried out to find stable germplasm that perform well on average over many locations, or to detect special local adaptations to certain environments (Annicchiarico et al., 2005; Gauch et al., 2008). Here, while farmers were mostly interested in selecting the best germplasm adapted to their local pedo-climatic conditions, farming practices and marketing objectives, information retrieved from the farmers' network on new varieties to introduce in their trials could also be useful.

5 Conclusion

The proposed hierarchical model was aimed at improving the estimates of the parameters of the FW model from unbalanced datasets. This model was complex and was easier to implement in a Bayesian framework. Placing hierarchical distributions on model parameters and modelling residuals using a t distribution improved the estimates of main and interaction effects. This model allowed us to estimate static and dynamic stability indicators despite the high level of unbalanced data. Main effects and stability indicators provide information on the behaviour of genotypes in different environments, which farmers could use in their selection process.

Participatory research raises new research questions and contributes to the development of new methods for societal action (Kastenhofer et al., 2011). In PPB programs, all the methodology is based on collective and collaborative work and action between farmers, associations of farmers and researchers (Brac de la Perrière et al., 2011). New statistical methods can contribute to a better use of such complex multi-environment data in the selection process, and more generally to the effectiveness of participatory research (Martin and Sherington, 1997).

6 Acknowledgements

We thank Estelle Serpolet, Nathalie Galic and Sophie Pin for their great help in the measurements on participating farms and research stations. We thank all the farmers and facilitators participating in the project. We thank Gérard Branlard from INRAE Clermont-Ferrand for his time when carrying out NIRS analysis and Jean-Marc Le Goff for this feedback.

7 Fundings

M. Turbet Delof was funded by Program PPR-CPA MoBiDiv (2021–2026) under grant agreement ANR-20-PCPA-0006 and INRAE (program on organic scaling METABIO and *Biologie et Amélioration des Plantes* department).

8 Conflict of interest disclosure

The authors of this article declare that they have no financial conflict of interest with the content of this article. XXX and XXX are recommenders for PCI XXX.

9 Data, script and code availability

Data and script for models are available online: DOI 10.57745/SUTZ9U https://doi.org/10.57745/SUTZ9U .

Supplementary information

A Models

Tab. A.1 provides supplementary information on the prior distribution of model parameters.

	λ_μ	λ_ε	μ_{emp}	σ_{emp}
Plant height	1200	500	1188	234
Spike weight	2.00	0.80	2.03	0.58
Protein	12.0	4.0	11.5	1.9
TKW	45.0	10.0	43.7	5.8

Table A.1. Known values of the parameters of the prior distribution, empirical mean and standard deviation of traits.

B Model comparison

Tab. B.1 provides supplementary information on the estimation of the elpd_{loo} criterion. Fig. B.1 provides supplementary information on the comparison of models FWHs and ADHs. Fig. B.2 provides supplementary information on the comparison of models ADHs and ADHn.

References

Annicchiarico P (2002). *Genotype X Environment Interactions: Challenges and Opportunities for Plant Breeding and Cultivar Recommendations*. Food & Agriculture Org.

Annicchiarico P, F Bellah, and T Chiari (2005). Defining Subregions and Estimating Benefits for a Specific-Adaptation Strategy by Breeding Programs: A Case Study. *Crop Science* 45, 1741–1749. https://doi.org/10.2135/cropsci2004.0524.

Annicchiarico P, E Chiapparino, and M Perenzin (2010). Response of Common Wheat Varieties to Organic and Conventional Production Systems across Italian Locations, and Implications for Selection. *Field Crops Research* 116, 230–238.

Assis TOG de, CTdS Dias, and PC Rodrigues (2018). A Weighted AMMI Algorithm for Nonreplicated Data. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 53, 557–565.

Trait	Model	$k < 0.5$	$0.5 < k < 0.7$	$0.7 < k < 1$	$k > 1$
Spike weight	ADHn	1787	16	1	0
	ADHs	1804	0	0	0
	FWHn	1760	43	1	0
	FWHs	1803	1	0	0
	FWs	1658	129	16	1
Plant height	ADHn	1399	34	2	2
	ADHs	1437	0	0	0
	FWHn	1384	45	7	1
	FWHs	1436	1	0	0
	FWs	1405	22	8	2
TKW	ADHn	1960	21	1	0
	ADHs	1982	0	0	0
	FWHn	1918	56	8	0
	FWHs	1981	1	0	0
	FWs	1928	47	7	0
Protein	ADHn	1312	19	1	0
	ADHs	1331	1	0	0
	FWHn	1308	23	1	0
	FWHs	1331	1	0	0
	FWs	1099	164	67	2

Table B.1. Estimates of tail shape parameters (k) used to estimate elpd_{loo}. The contribution of each observation to elpd_{loo}, i.e., $\ln(p(Y_{ij}|Y_{-ij}))$, was estimated using Pareto smoothed importance sampling (Vehtari et al., 2017). For each observation, the largest importance weights of the importance sampling were smoothed using a generalized Pareto distribution with shape parameter k. Estimates of pointwise contributions with $k > 0.7$ are less reliable.

Becker HC (1981). Correlations among Some Statistical Measures of Phenotypic Stability. *Euphytica* 30, 835–840.

Becker HC and J Leon (1988). Stability Analysis in Plant Breeding. *Plant breeding* 101, 1–23.

Bektas H, CE Hohn, and JG Waines (2016). Root and Shoot Traits of Bread Wheat (Triticum Aestivum L.) Landraces and Cultivars. *Euphytica* 212, 297–311.

Besag J and D Higdon (1999). Bayesian Analysis of Agricultural Field Experiments. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)* 61, 691–746. https://doi.org/10.1111/1467-9868.00201.

Beza E, J Steinke, J Van Etten, P Reidsma, C Fadda, S Mittra, P Mathur, and L Kooistra (2017). What are the prospects for citizen science in agriculture? Evidence from three continents on motivation and mobile telephone use of resource-poor farmers. *PloS one* 12, e0175700.

Brac de la Perrière RA, P De Kochko, C Neubauer, and B Storup (2011). Visions Paysannes de La Recherche Dans Le Contexte de La Sélection Participative.

Brancourt-Hulmel M, V Biarnès-Dumoulin, and JB Denis (1997). Points de repère dans l'analyse de la stabilité et de l'interaction génotype-milieu en amélioration des plantes. *Agronomie* 17, 219–246. https://doi.org/10.1051/agro:19970403.

Braun HJ, S Rajaram, and M Ginkel (1997). CIMMYT's Approach to Breeding for Wide Adaptation. In: *Adaptation in Plant Breeding: Selected Papers from the XIV EUCARPIA Congress on Adaptation in Plant Breeding Held at Jyväskylä, Sweden from July 31 to August 4, 1995*. Ed. by Tigerstedt PMA. Developments in Plant Breeding. Dordrecht: Springer Netherlands, pp. 197–205. https://doi.org/10.1007/978-94-015-8806-5_25.

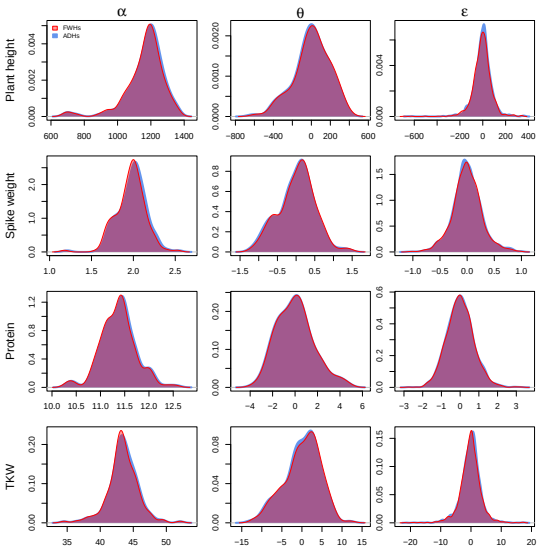


Figure B.1. Comparison of models FWHs and ADHs for the distribution of germplasm main effects (α), environment main effects (θ), FW coefficients (η) and residuals (ε) for each trait. Red: model FWHs; Blue: model ADHs.

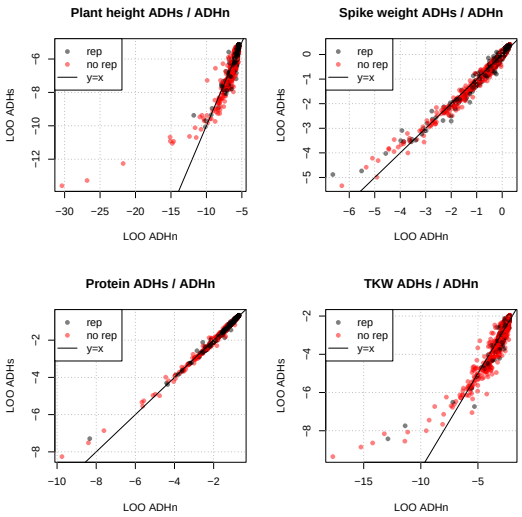


Figure B.2. Comparison of models ADHs and ADHn in terms of the contributions of observations to the elpd_{loo} criterion. Black (resp. red) dots correspond to observations that were measured on germplasm that were repeated (resp. not repeated) within trials

Cantarel AA, V Allard, B Andrieu, S Barot, J Enjalbert, J Gervaix, I Goldringer, T Pommier, S Saint-Jean, and X Le Roux (2021). Plant Functional Trait Variability and Trait Syndromes among Wheat Varieties: The Footprint of Artificial Selection. *Journal of Experimental Botany* 72, 1166–1180.

Cao Z, K Stefanova, M Gibberd, and S Rakshit (2022). Bayesian Inference of Spatially Correlated Random Parameters for On-Farm Experiment. *Field Crops Research* 281, 108477.

Carlin BP and NG Polson (1991). Inference for Nonconjugate Bayesian Models Using the Gibbs Sampler. *Canadian Journal of statistics* 19, 399–405.

Carlin BP and TA Louis (2008). *Bayesian Methods for Data Analysis*. CRC Press.

Ceccarelli S, S Grando, E Bailey, A Amri, M El-Felah, F Nassif, S Rezgui, and A Yahyaoui (2001). Farmer Participation in Barley Breeding in Syria, Morocco and Tunisia. *Euphytica* 122, 521–536. https://doi.org/10.1023/A:1017570702689.

Ceccarelli S and S Grando (2007). Decentralized-Participatory Plant Breeding: An Example of Demand Driven Research. *Euphytica* 155, 349–360. https://doi.org/10.1007/s10681-006-9336-8.

– (2020). Participatory Plant Breeding: Who Did It, Who Does It and Where? *Experimental Agriculture* 56, 1–11.

Choy BST and JSK Chan (2008). Scale Mixtures Distributions in Statistical Modelling. *Australian & New Zealand Journal of Statistics* 50, 135–146.

Cotes JM, J Crossa, A Sanches, and PL Cornelius (2006). A Bayesian Approach for Assessing the Stability of Genotypes. *Crop Science* 46, 2654–2665. https://doi.org/10.2135/cropsci2006.04.0227.

Couto MF, M Nascimento, AT do Amaral Jr, FF e Silva, AP Viana, and M Vivas (2015). Eberhart and Russel's Bayesian Method in the Selection of Popcorn Cultivars. *Crop Science* 55, 571–577.

David O, G van Frank, I Goldringer, P Rivière, and M Turbet Delof (2020). Bayesian Inference of Natural Selection from Spatiotemporal Phenotypic Data. *Theoretical Population Biology* 131, 100–109. https://doi.org/10.1016/j.tpb.2019.11.007.

Dawson J, KM Murphy, and SS Jones (2008). Decentralized Selection and Participatory Approaches in Plant Breeding for Low-Input Systems. *Euphytica* 160, 143–154. https://doi.org/10.1007/s10681-007-9533-0.

Dawson JC, P Rivière, JF Berthellot, F Mercier, P de Kochko, N Galic, S Pin, E Serpolay, M Thomas, S Giuliano, and I Goldringer (2011). Collaborative Plant Breeding for Organic Agricultural Systems in Developed Countries. *Sustainability* 3, 1206–1223. https://doi.org/10.3390/su3081206.

Desclaux D, JM Nolot, Y Chiffoleau, E Gozé, and C Leclerc (2008). Changes in the Concept of Genotype × Environment Interactions to Fit Agriculture Diversification and Decentralized Participatory Plant Breeding: Pluridisciplinary Point of View. *Euphytica* 163, 533–546. https://doi.org/10.1007/s10681-008-9717-2.

Döring TF, P Annicchiarico, S Clarke, Z Haigh, HE Jones, H Pearce, J Snape, J Zhan, and MS Wolfe (2015). Comparative Analysis of Performance and Stability among Composite Cross Populations, Variety Mixtures and Pure Lines of Winter Wheat in Organic and Conventional Cropping Systems. *Field Crops Research* 183, 235–245.

Falconer DS (1960). *Introduction to Quantitative Genetics.* Edinburgh/London: Olivier & Boyd.

Fasahat P, A Rajabi, SB Mahmoudi, MA Noghabi, and JM Rad (2015). An Overview on the Use of Stability Parameters in Plant Breeding. *Biometrics & Biostatistics International Journal* 2, 00043.

Finlay KW and GN Wilkinson (1963). The Analysis of Adaptation in a Plant-Breeding Programme. *Australian Journal of Agricultural Research* 14, 742–754. https://doi.org/10.1071/AR9630742.

Foucteau V and JB Denis (2001). Statistical Analysis of Successive Series of Experiments in Plant Breeding: A Bayesian Approach. *Quantitative genetics and breeding methods: the way ahead. Proceedings of the Eleventh Meeting of the EUCARPIA Section Biometrics in Plant Breeding, Paris, France, 30/31 August - 1 September, 2000*, 49–56.

Gauch HG, HP Piepho, and P Annicchiarico (2008). Statistical Analysis of Yield Trials by AMMI and GGE: Further Considerations. *Crop Science* 48, 866–889. https://doi.org/10.2135/cropsci2007.09.0513.

Gelman A (2005). Analysis of Variance—Why It Is More Important than Ever.

– (2006). Prior Distributions for Variance Parameters in Hierarchical Models (Comment on Article by Browne and Draper). *Bayesian Analysis* 1, 515–534. https://doi.org/10.1214/06-BA117A.

Gelman A, B Goodrich, J Gabry, and A Vehtari (2019). R-Squared for Bayesian Regression Models. *The American Statistician*.

Gianola D, A Cecchinato, H Naya, and CC Schön (2018). Prediction of complex traits: robust alternatives to best linear unbiased prediction. *Frontiers in genetics* 9, 195.

Gilmour AR, R Thompson, and BR Cullis (1995). Average Information REML: An Efficient Algorithm for Variance Parameter Estimation in Linear Mixed Models. *Biometrics*, 1440–1450.

Goldringer I, G van Frank, C Bouvier d'Yvoire, E Forst, N Galic, M Garnault, J Locqueville, S Pin, J Bailly, R Baltassat, JF Berthellot, F Caizergues, C Dalmasso, P de Kochko, JS Gascuel, A Hyacinthe, J Lacanette, F Mercier, H Montaz, B Ronot, and P Rivière (2020). Agronomic Evaluation of Bread Wheat Varieties from Participatory Breeding: A Combination of Performance and Robustness. *Sustainability* 12, 128. https://doi.org/10.3390/su12010128.

Hampel FR, EM Ronchetti, PJ Rousseeuw, and WA Stahel (2011). *Robust Statistics: The Approach Based on Influence Functions*. John Wiley & Sons.

Hristov N, N Mladenov, V Djuric, A Kondic-Spika, A Marjanovic-Jeromela, and D Simic (2010). Genotype by Environment Interactions in Wheat Quality Breeding Programs in Southeast Europe. *Euphytica* 174, 315–324.

Huber PJ and EM Ronchetti (1981). *Robust Statistics, Wiley: New York*. USA.

Juárez MA and MFJ Steel (2010). Model-Based Clustering of Non-Gaussian Panel Data Based on Skew-t Distributions. *Journal of Business & Economic Statistics* 28, 52–66. https://doi.org/10.1198/jbes.2009.07145.

Kastenhofer K, U Bechtold, and H Wilfing (2011). Sustaining Sustainability Science: The Role of Established Inter-Disciplines. *Ecological Economics* 70, 835–843. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.12.008.

Kazakou E, C Violle, C Roumet, ML Navas, D Vile, J Kattge, and E Garnier (2014). Are Trait-based Species Rankings Consistent across Data Sets and Spatial Scales? *Journal of Vegetation Science* 25, 235–247.

Kiær LP, IM Skovgaard, and H Østergård (2012). Effects of Inter-Varietal Diversity, Biotic Stresses and Environmental Productivity on Grain Yield of Spring Barley Variety Mixtures. *Euphytica* 185, 123–138.

Knapp S, C Brabant, M Oberforster, H Grausgruber, and J Hiltbrunner (2017). Quality Traits in Winter Wheat: Comparison of Stability Parameters and Correlations between Traits Regarding Their Stability. *Journal of Cereal Science* 77, 186–193.

Kumar A, SB Verulkar, NP Mandal, M Variar, VD Shukla, JL Dwivedi, BN Singh, ON Singh, P Swain, and AK Mall (2012). High-Yielding, Drought-Tolerant, Stable Rice Genotypes for the Shallow Rainfed Lowland Drought-Prone Ecosystem. *Field crops research* 133, 37–47.

Lange KL, RJ Little, and JM Taylor (1989). Robust Statistical Modeling Using the t Distribution. *Journal of the American Statistical Association* 84, 881–896.

Lartillot N (2023). Identifying the best approximating model in Bayesian phylogenetics: Bayes factors, cross-validation or wAIC? *Systematic Biology* 72, 616–638.

Lian L and G de los Campos (2016). FW: An R Package for Finlay–Wilkinson Regression That Incorporates Genomic/Pedigree Information and Covariance Structures Between Environments. *G3 Genes|Genomes|Genetics* 6, 589–597. https://doi.org/10.1534/g3.115.026328.

Lin CS, MR Binns, and LP Lefkovitch (1986). Stability Analysis: Where Do We Stand? *Crop science* 26, 894–900.

Martin A and J Sherington (1997). Participatory Research Methods—Implementation, Effectiveness and Institutional Context. *Agricultural systems* 55, 195–216.

Mohammadi R, KN Mahmoodi, R Haghparast, S Grando, M Rahmanian, and S Ceccarelli (2011). Identifying Superior Rainfed Barley Genotypes in Farmers' Fields Using Participatory Varietal Selection. *Journal of Crop Science and Biotechnology* 14, 281–288.

Murphy KM, KG Campbell, SR Lyon, and SS Jones (2007). Evidence of Varietal Adaptation to Organic Farming Systems. *Field Crops Research* 102, 172–177. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2007.03.011.

Mut Z, N Aydin, H Orhan Bayramoglu, and H Ozcan (2010). Stability of Some Quality Traits in Bread Wheat (Triticum Aestivum) Genotypes. *Journal of Environmental Biology* 31, 489.

Nabugoomu F, RA Kempton, and M Talbot (1999). Analysis of Series of Trials Where Varieties Differ in Sensitivity to Locations. *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics* 4, 310–325. https://doi.org/10.2307/1400388. JSTOR: 1400388.

Nascimento M, ACC Nascimento, FF e Silva, PE Teodoro, CF Azevedo, TRA de Oliveira, AT do Amaral Junior, CD Cruz, FJC Farias, and LP de Carvalho (2020). Bayesian Segmented Regression Model for Adaptability and Stability Evaluation of Cotton Genotypes. *Euphytica* 216, 30. https://doi.org/10.1007/s10681-020-2564-5.

Neal RM (2011). MCMC Using Hamiltonian Dynamics. In: *Handbook of Markov Chain Monte Carlo*. Ed. by Brooks S, Gelman A, Jones G, and Meng XL. Chapman and Hall/CRC, pp. 113–162.

Ng M and E Williams (2001). Joint-Regression Analysis for Incomplete Two-way Tables. *Australian & New Zealand Journal of Statistics* 43, 201–206. https://doi.org/10.1111/1467-842X.00165.

Patterson HD and V Silvey (1980). Statutory and Recommended List Trials of Crop Varieties in the United Kingdom. *Journal of the Royal Statistical Society: Series A (General)* 143, 219–240.

Peng J, DE Richards, NM Hartley, GP Murphy, KM Devos, JE Flintham, J Beales, LJ Fish, AJ Worland, and F Pelica (1999). 'Green Revolution'Genes Encode Mutant Gibberellin Response Modulators. *Nature* 400, 256–261.

Pereira DG, JT Mexia, and PC Rodrigues (2007). Robustness of Joint Regression Analysis. *Biometrical Letters* 44, 105–128.

Perkins JM and JL Jinks (1968). Environmental and Genotype-Environmental Components of Variability. *Heredity* 23, 339–356.

Piepho HP (1999). Stability Analysis Using the SAS System. *Agronomy Journal* 91, 154–160.

– (2022). Extending Finlay-Wilkinson Regression with Covariates. *bioRxiv*, 2022.12. 14.520390.

R Core Team (2014). R: A Language and Environment for Statistical Computing.

Reckling M, H Ahrends, TW Chen, W Eugster, S Hadasch, S Knapp, F Laidig, A Linstädter, J Macholdt, and HP Piepho (2021). Methods of Yield Stability Analysis in Long-Term Field Experiments. A Review. *Agronomy for Sustainable Development* 41, 1–28.

Rivière P, JC Dawson, I Goldringer, and O David (2015a). Hierarchical Bayesian Modeling for Flexible Experiments in Decentralized Participatory Plant Breeding. *Crop Science* 55, 1053–1067. https://doi.org/10.2135/cropsci2014.07.0497.

Rivière P, I Goldringer, JF Berthellot, N Galic, S Pin, P De Kochko, and JC Dawson (2015b). Response to Farmer Mass Selection in Early Generation Progeny of Bread Wheat Landrace Crosses. *Renewable Agriculture and Food Systems* 30, 190–201. https://doi.org/10.1017/S1742170513000343.

Robert C (2007). *The Bayesian Choice: From Decision-Theoretic Foundations to Computational Implementation*. Springer Science & Business Media.

Rodrigues PC, DGS Pereira, and JT Mexia (2011). A Comparison between Joint Regression Analysis and the Additive Main and Multiplicative Interaction Model: The Robustness with Increasing Amounts of Missing Data. *Scientia Agricola* 68, 679–686.

Rosa , CR Padovani, and D Gianola (2003). Robust Linear Mixed Models with Normal/Independent Distributions and Bayesian MCMC Implementation. *Biometrical Journal* 45, 573–590.

Smith , BR Cullis, and R Thompson (2005). The Analysis of Crop Cultivar Breeding and Evaluation Trials: An Overview of Current Mixed Model Approaches. *The Journal of Agricultural Science* 143, 449–462.

Smith ME, FG Castillo, and F Gómez (2001). Participatory Plant Breeding with Maize in Mexico and Honduras. *Euphytica* 122, 551–563. https://doi.org/10.1023/A:1017510529440.

Snapp SS and SN Silim (2002). Farmer Preferences and Legume Intensification for Low Nutrient Environments. *Plant and soil* 245, 181–192.

Stan Developpement Team (2016). RStan: The R Interface to Stan.

Thompson R, B Cullis, A Smith, and A Gilmour (2003). A Sparse Implementation of the Average Information Algorithm for Factor Analytic and Reduced Rank Variance Models. *Australian & New Zealand Journal of Statistics* 45, 445–459.

van Etten J, K de Sousa, A Aguilar, M Barrios, A Coto, M Dell'Acqua, C Fadda, Y Gebrehawaryat, J van de Gevel, A Gupta, et al. (2019). Crop variety management for climate adaptation supported by citizen science. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116, 4194–4199.

van Frank G, I Goldringer, P Rivière, and O David (2019). Influence of Experimental Design on Decentralized, on-Farm Evaluation of Populations: A Simulation Study. *Euphytica* 215, 126. https://doi.org/10.1007/s10681-019-2447-9.

van Frank G, P Rivière, S Pin, R Baltassat, JF Berthellot, F Caizergues, C Dalmasso, JS Gascuel, A Hyacinthe, F Mercier, H Montaz, B Ronot, and I Goldringer (2020). Genetic Diversity and Stability of Performance of Wheat Population Varieties Developed by Participatory Breeding. *Sustainability* 12, 384. https://doi.org/10.3390/su12010384.

Vehtari A, A Gelman, and J Gabry (2017). Practical Bayesian Model Evaluation Using Leave-One-out Cross-Validation and WAIC. *Statistics and Computing* 27, 1413–1432. https://doi.org/10.1007/s11222-016-9696-4.

Virk DS, M Chakraborty, J Ghosh, SC Prasad, and JR Witcombe (2005). Increasing the Client Orientation of Maize Breeding Using Farmer Participation in Eastern India. *Experimental Agriculture* 41, 413–426. https://doi.org/10.1017/S001447970500270X.

Wolfe MS, JP Baresel, D Desclaux, I Goldringer, S Hoad, G Kovacs, F Löschenberger, T Miedaner, H Østergård, and ET Lammerts van Bueren (2008). Developments in Breeding Cereals for Organic Agriculture. *Euphytica* 163, 323. https://doi.org/10.1007/s10681-008-9690-9.

Woyann LG, G Benin, L Storck, DM Trevizan, C Meneguzzi, VS Marchioro, M Tonatto, and A Madureira (2017). Estimation of Missing Values Affects Important Aspects of GGE Biplot Analysis. *Crop Science* 57, 40–52.

Wricke G (1962). Uber Eine Methode Zur Erfassung Der Okologischen Streubreite in Feldverzuchen. *Z. Pflanzenzuchtg* 47, 92–96.

Yan W (2013). Biplot Analysis of Incomplete Two-way Data. *Crop Science* 53, 48–57.

D. 2 Comparaison des modèles de régression factorielle

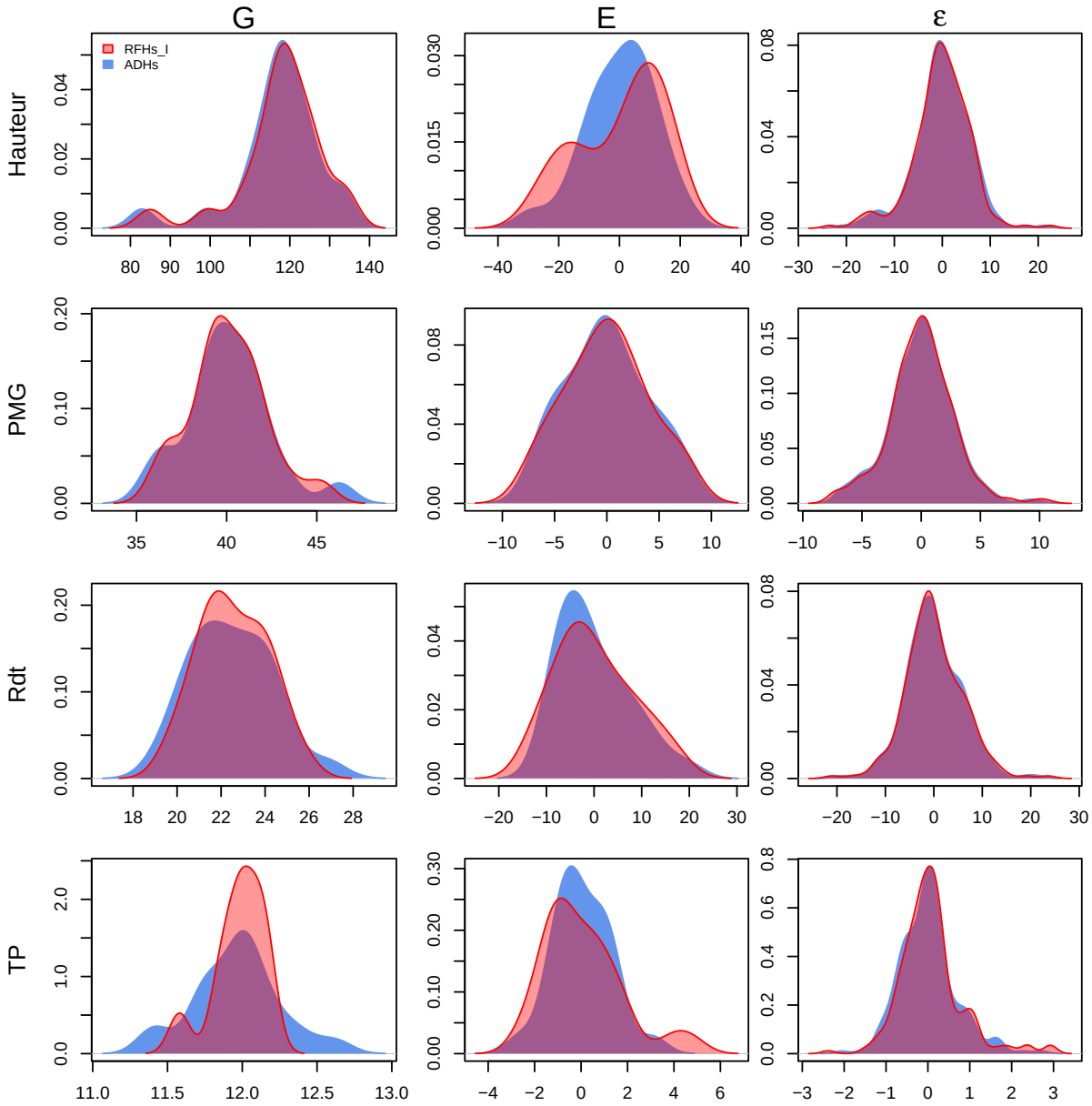


Figure D.1 – Comparaison des modèles hiérarchiques à loi de student pour la régression factorielle selon INN (rouge) et le modèle additif (bleu). Ces graphiques montrent les histogrammes lissés des termes d'espérance et des résidus.

Modèle	Trait	Facteur	k < 0.5	0.5 < k < 0.7	0.7 < k < 1	k > 1
RFHn	HP	ADV	211	12	0	0
RFHn	PMG	ADV	218	17	0	0
RFHn	TP	ADV	209	11	2	0
RFHn	Rdt	ADV	224	6	1	0
RFHn	HP	INN	213	8	2	0
RFHn	PMG	INN	224	10	1	0
RFHn	TP	INN	206	12	4	0
RFHn	Rdt	INN	222	9	0	0

RFHs	NP_m2	ADV	233	1	0	0
RFHs	NE_m2	ADV	233	1	0	0
RFHs	NE_P	ADV	223	0	0	0
RFHs	NG_E	ADV	223	0	1	0
RFHs	HP	ADV	220	3	0	0
RFHs	NG_m2	ADV	227	4	0	0
RFHs	BP	ADV	209	3	0	0
RFHs	PMG	ADV	228	7	0	0
RFHs	TP	ADV	221	1	0	0
RFHs	Rdt	ADV	230	1	0	0
RFHs	NP_m2	Maladies	233	1	0	0
RFHs	NE_m2	Maladies	232	2	0	0
RFHs	NE_P	Maladies	222	1	0	0
RFHs	NG_E	Maladies	221	2	1	0
RFHs	HP	Maladies	273	2	0	0
RFHs	NG_m2	Maladies	227	4	0	0
RFHs	BP	Maladies	206	6	0	0
RFHs	PMG	Maladies	297	4	0	0
RFHs	TP	Maladies	275	6	1	0
RFHs	Rdt	Maladies	283	4	1	0
RFHs	NP_m2	INN	233	1	0	0
RFHs	NE_m2	INN	232	2	0	0
RFHs	NE_P	INN	223	0	0	0
RFHs	NG_E	INN	222	1	0	1
RFHs	HP	INN	223	0	0	0
RFHs	NG_m2	INN	228	3	0	0
RFHs	BP	INN	211	1	0	0
RFHs	PMG	INN	232	3	0	0
RFHs	TP	INN	221	1	0	0
RFHs	Rdt	INN	231	0	0	0
RFHs	NP_m2	QPT epi1-flo	234	0	0	0
RFHs	NE_m2	QPT epi1-flo	234	0	0	0
RFHs	NE_P	QPT epi1-flo	223	0	0	0
RFHs	NG_E	QPT epi1-flo	223	0	1	0
RFHs	HP	QPT epi1-flo	272	3	0	0
RFHs	NG_m2	QPT epi1-flo	231	0	0	0
RFHs	BP	QPT epi1-flo	212	0	0	0
RFHs	PMG	QPT epi1-flo	301	0	0	0
RFHs	TP	QPT epi1-flo	281	1	0	0
RFHs	Rdt	QPT epi1-flo	288	0	0	0
RFHs	NP_m2	QPT lev-epi1	233	1	0	0
RFHs	NE_m2	QPT lev-epi1	234	0	0	0
RFHs	NE_P	QPT lev-epi1	223	0	0	0
RFHs	NG_E	QPT lev-epi1	223	0	1	0
RFHs	HP	QPT lev-epi1	275	0	0	0
RFHs	NG_m2	QPT lev-epi1	231	0	0	0
RFHs	BP	QPT lev-epi1	211	1	0	0
RFHs	PMG	QPT lev-epi1	300	1	0	0
RFHs	TP	QPT lev-epi1	279	3	0	0
RFHs	Rdt	QPT lev-epi1	286	2	0	0
RFHs	NP_m2	DH epi1	233	0	1	0
RFHs	NE_m2	DH epi1	234	0	0	0
RFHs	NE_P	DH epi1	223	0	0	0
RFHs	NG_E	DH epi1	223	0	1	0
RFHs	HP	DH epi1	274	1	0	0
RFHs	NG_m2	DH epi1	229	2	0	0
RFHs	BP	DH epi1	211	1	0	0

RFHs	PMG	DH epi1	296	4	1	0
RFHs	TP	DH epi1	279	3	0	0
RFHs	Rdt	DH epi1	287	1	0	0
RFHs	NP_m2	DH epi1-flo	233	1	0	0
RFHs	NE_m2	DH epi1-flo	234	0	0	0
RFHs	NE_P	DH epi1-flo	223	0	0	0
RFHs	NG_E	DH epi1-flo	223	0	1	0
RFHs	HP	DH epi1-flo	275	0	0	0
RFHs	NG_m2	DH epi1-flo	231	0	0	0
RFHs	BP	DH epi1-flo	211	1	0	0
RFHs	PMG	DH epi1-flo	299	1	1	0
RFHs	TP	DH epi1-flo	281	1	0	0
RFHs	Rdt	DH epi1-flo	287	1	0	0
RFHs	NP_m2	DH flo-mat	233	1	0	0
RFHs	NE_m2	DH flo-mat	234	0	0	0
RFHs	NE_P	DH flo-mat	223	0	0	0
RFHs	NG_E	DH flo-mat	223	0	1	0
RFHs	HP	DH flo-mat	275	0	0	0
RFHs	NG_m2	DH flo-mat	230	1	0	0
RFHs	BP	DH flo-mat	210	2	0	0
RFHs	PMG	DH flo-mat	300	1	0	0
RFHs	TP	DH flo-mat	281	1	0	0
RFHs	Rdt	DH flo-mat	288	0	0	0
RFHs	NP_m2	ETO epi1-flo	234	0	0	0
RFHs	NE_m2	ETO epi1-flo	234	0	0	0
RFHs	NE_P	ETO epi1-flo	223	0	0	0
RFHs	NG_E	ETO epi1-flo	223	1	0	0
RFHs	HP	ETO epi1-flo	274	1	0	0
RFHs	NG_m2	ETO epi1-flo	228	3	0	0
RFHs	BP	ETO epi1-flo	210	2	0	0
RFHs	PMG	ETO epi1-flo	300	1	0	0
RFHs	TP	ETO epi1-flo	282	0	0	0
RFHs	Rdt	ETO epi1-flo	287	1	0	0
RFHs	NP_m2	RAY meio	233	1	0	0
RFHs	NE_m2	RAY meio	234	0	0	0
RFHs	NE_P	RAY meio	223	0	0	0
RFHs	NG_E	RAY meio	223	0	1	0
RFHs	HP	RAY meio	274	1	0	0
RFHs	NG_m2	RAY meio	231	0	0	0
RFHs	BP	RAY meio	211	1	0	0
RFHs	PMG	RAY meio	300	1	0	0
RFHs	TP	RAY meio	282	0	0	0
RFHs	Rdt	RAY meio	287	1	0	0
RFHs	NP_m2	TH flo-mat	233	1	0	0
RFHs	NE_m2	TH flo-mat	233	1	0	0
RFHs	NE_P	TH flo-mat	223	0	0	0
RFHs	NG_E	TH flo-mat	223	0	1	0
RFHs	HP	TH flo-mat	275	0	0	0
RFHs	NG_m2	TH flo-mat	229	2	0	0
RFHs	BP	TH flo-mat	210	2	0	0
RFHs	PMG	TH flo-mat	297	4	0	0
RFHs	TP	TH flo-mat	282	0	0	0
RFHs	Rdt	TH flo-mat	288	0	0	0
RFHs	NP_m2	Verse	232	2	0	0
RFHs	NE_m2	Verse	229	3	2	0
RFHs	NE_P	Verse	223	0	0	0
RFHs	NG_E	Verse	219	4	1	0

RFHs	HP	Verse	274	1	0	0
RFHs	NG_m2	Verse	223	7	1	0
RFHs	BP	Verse	211	1	0	0
RFHs	PMG	Verse	301	0	0	0
RFHs	TP	Verse	281	1	0	0
RFHs	Rdt	Verse	285	3	0	0
RFHs	NP_m2	Exe_eau	233	1	0	0
RFHs	NE_m2	Exe_eau	233	1	0	0
RFHs	NE_P	Exe_eau	223	0	0	0
RFHs	NG_E	Exe_eau	223	0	0	1
RFHs	HP	Exe_eau	275	0	0	0
RFHs	NG_m2	Exe_eau	231	0	0	0
RFHs	BP	Exe_eau	212	0	0	0
RFHs	PMG	Exe_eau	301	0	0	0
RFHs	TP	Exe_eau	282	0	0	0
RFHs	Rdt	Exe_eau	288	0	0	0
RFs	HP	ADV	205	16	1	1
RFs	PMG	ADV	214	18	2	1
RFs	TP	ADV	203	15	4	0
RFs	Rdt	ADV	213	17	1	0
RFs	HP	INN	203	18	2	0
RFs	PMG	INN	214	18	3	0
RFs	TP	INN	202	15	5	0
RFs	Rdt	INN	212	13	6	0
ADHs	HP		223	0	0	0
ADHs	PMG		235	0	0	0
ADHs	TP		221	1	0	0
ADHs	Rdt		231	0	0	0
FWHs	NP_m2		233	0	1	0
FWHs	NE_m2		225	8	1	0
FWHs	NE_P		222	1	0	0
FWHs	NG_E		221	2	1	0
FWHs	HP		221	2	0	0
FWHs	NG_m2		225	6	0	0
FWHs	BP		211	1	0	0
FWHs	PMG		230	5	0	0
FWHs	TP		217	4	1	0
FWHs	Rdt		228	3	0	0

Table D.1 – Estimation des k de Pareto.