



HAL
open science

Évaluation d'un pool génétique de Blé Dur en conditions de stress hydrique et thermique

Adrian Morcillo, Antonin Grau

► **To cite this version:**

Adrian Morcillo, Antonin Grau. Évaluation d'un pool génétique de Blé Dur en conditions de stress hydrique et thermique. [Stage] UM2 Université Montpellier II Sciences et techniques; INRAE / Montpellier SupAgro, 2 place Pierre Viala, 34090 Montpellier; INRAE UE DIASCOPE. 2022, pp.1-45. hal-03811102

HAL Id: hal-03811102

<https://hal.inrae.fr/hal-03811102>

Submitted on 11 Oct 2022

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

The background of the entire page is a photograph of a wheat field under a clear blue sky. In the foreground, several wheat stalks with green heads are in focus. A semi-transparent white horizontal band is overlaid across the middle of the image, containing the title and subtitle. At the bottom, a large, vibrant red poppy flower is in focus, partially overlapping the white band and the wheat stalks.

**HAAV816V - MÉMOIRE DE STAGE
2022**

**EVALUATION D'UN POOL GÉNÉTIQUE DE BLÉ DUR EN
CONDITION DE STRESS HYDRIQUES ET THERMIQUES**

**MOTS CLEFS : TRITICUM DURUM, CLIMAT MÉDITERRANÉEN,
CHANGEMENT CLIMATIQUE, PHÉNOTYPAGE, STRESS HYDRIQUE**
RÉSUMÉ : 309 MOTS - MANUSCRIT : 10 985 MOTS

ADRIEN MORCILLO

ENCADREMENT PAR ANTONIN GRAU - INRAE

Résumé

Evaluation d'un pool génétique de blé dur en condition de stress hydriques et thermiques

Le blé dur est une plante de la famille des monocotylédones à la base de l'alimentation humaine. DUROSTRESS est un projet de recherche soutenu par le FSOV dont l'objectif est de caractériser le potentiel d'adaptation d'un panel de variétés de blé dur face aux stress hydriques et thermiques. DUROSTRESS propose de combiner expérimentalement de multiples scénarios pédoclimatiques à travers la mise en place d'un réseau d'essais européen (Portugal, Italie et France), dans lequel un panel de 50 variétés de blé dur (30 variétés élites et 20 lignées de sélection) a été cultivé sur différents sites sur 2 années consécutives. L'UE DiaScope de l'INRAE, partenaire du projet, a acquis un ensemble de variables nécessaire à la caractérisation de : (i) l'environnement, (ii) de la phénologie du blé et (iii) de la physiologie du blé, afin de répondre à la problématique « ***Au sein d'un pool de 50 génotypes de blé dur quels sont les génotypes les plus performants face à des régimes hydriques limitant ?*** »

D'après l'analyse, SCULPTUR est la variété la plus performante et 8 (MAESTA, EL4X_120, FDN16DW0729, FDN16DW0758, TE1401, EL4X_427, EL4X_464 et EL4X_504) sont les moins performantes. Par conséquent, dans le contexte pédoclimatique donné, il est envisageable d'écarter ces variétés de futurs programmes de sélection. Néanmoins, le facteur bloc étant significatif, il serait imprudent d'écarter ces génétiques élites avant d'avoir reproduit ces résultats. Le programme de sélection proposé par DUROSTRESS, intègre l'élite des génétiques actuellement disponibles en blé dur. Cela pourrait expliquer, en partie, le fait qu'un ensemble de 44 variétés soient performantes et non dissociables. Les données issues de l'essai seront par la suite intégrées dans une méta-analyse avec les données issues des autres sites pour tenter de trouver les variétés de blé dur les plus adaptés aux contextes de production avenir.

Mots clefs : Triticum durum, Climat méditerranéen, Changement climatique, Phénotypage, Stress hydrique.

Remerciements

Je tiens à remercier sincèrement Antonin GRAU, Responsable des essais céréales à paille au sein de l'U.E DiaScope de l'INRA de Montpellier. Je le remercie, bien évidemment, pour m'avoir intégré cet été dans son équipe dans le cadre de mon stage, mais surtout, pour sa pédagogie, sa disponibilité, son encadrement, son soutien, sa confiance et la grande liberté qu'il a su m'octroyer. Je suis convaincu que ces quelques mois passés dans son équipe m'ont permis de consolider mes connaissances en agronomie, en expérimentation végétale, mais surtout en management et en phénotypage. J'ai eu la chance de pouvoir acquérir des connaissances en phénotypage et phénotypage haut débit, notions qui m'étaient en partie manquantes. Antonin a su me confier des responsabilités, ce qui m'a permis de gagner en maturité, en rigueur, en autonomie et en confiance personnelle.

Je remercie également Pascal SARTRE, Responsable de l'UE DiaScope, pour m'avoir permis de réaliser mon stage dans son unité, pour sa grande gentillesse et ses conseils.

Je remercie aussi Romain CHAPUIS, Responsable de la plateforme DIAPHEN, pour sa bonne humeur, sa pédagogie, ses conseils, son partage de connaissances, sa disponibilité et son soutien.

Je remercie Aline ROCHER, Technicienne d'expérimentation, pour son partage de connaissances, sa bienveillance, sa bonne humeur, ses conseils et son soutien.

Je remercie aussi l'ensemble du personnel de la station pour leur intégration, leur bonne humeur, leur soutien et leurs conseils.

Je remercie les différentes équipes d'INRAE, du LEPSE, d'Arvalis avec qui j'ai eu la chance de travailler ; les échanges ont toujours été agréables et formateurs, ce fut un réel plaisir.

Enfin, je tiens à remercier mes proches et tout particulièrement ma mère, son conjoint et ma conjointe pour leur soutien au quotidien, leurs conseils, leur disponibilité, leur bienveillance et leur patience.

Un grand merci à vous tous !

Table des matières

1. Introduction.....	1
1.1. Le blé dur.....	1
1.1.1. Contexte de production.....	1
1.1.2. Elaboration du rendement	1
1.2. Le changement climatique	2
1.2.1. Stress hydrique	2
1.2.2. Stress thermique	3
1.3. Réorienter la sélection.....	3
1.1. Problématique de l'étude.....	4
1.1.1. Le projet DUROSTRESS	4
1.1.2. La station expérimentale DIASCOPE de l'INRAE.....	4
2. Matériel et méthodes.....	5
2.1. Design et traitements	5
2.1.1. Dispositif expérimental.....	5
2.1.2. Caractérisation du contexte pédoclimatique	5
2.1.3. Caractérisation des régimes hydriques	6
2.1.4. Itinéraire technique	6
2.2. Caractérisation du végétal.....	7
2.2.1. Caractérisation phénologique	7
2.2.2. Caractérisation phénotypique.....	7
2.3. Analyses de données	8
3. Résultats	9
3.1. Caractérisation du contexte pédoclimatique	9
3.1.1. Caractérisation environnementale.....	9
3.1.2. Caractérisation du régime hydrique.....	10
3.2. Analyses préliminaires.....	11
3.2.1. Répétabilité des résultats	11
3.2.2. Effet du régime hydrique sur le rendement	11
3.3. Analyse du facteur hydrique sur le blé dur	12
3.3.1. Effet sur la phénologie.....	12
3.3.2. Effet sur la variable phénotypique NDVI	13
3.4. Synthèse	14
3.4.1. Analyse synthétique	14
3.4.2. Discussion et perspectives.....	14

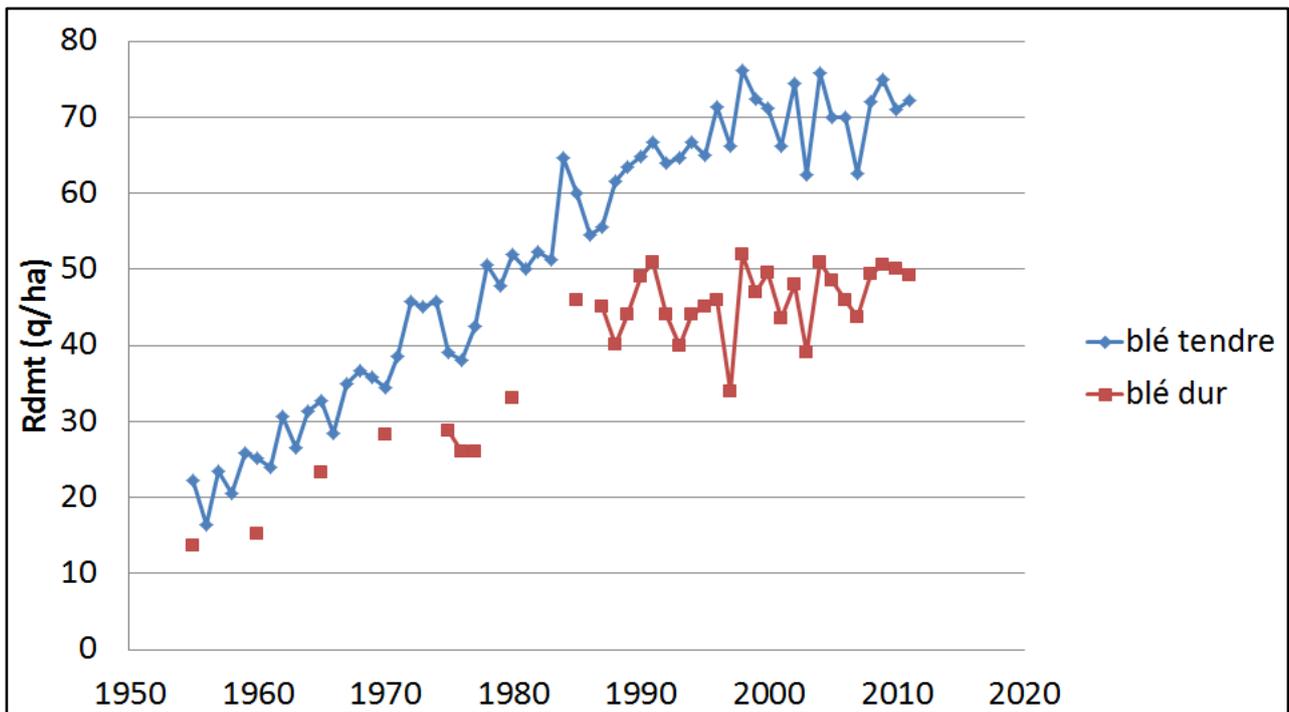


Figure 1 : Evolution du rendement en grains (q/ha) pour les blés dur et tendre en France entre 1950-2010 (d'après Hervé Levesque, 2016).

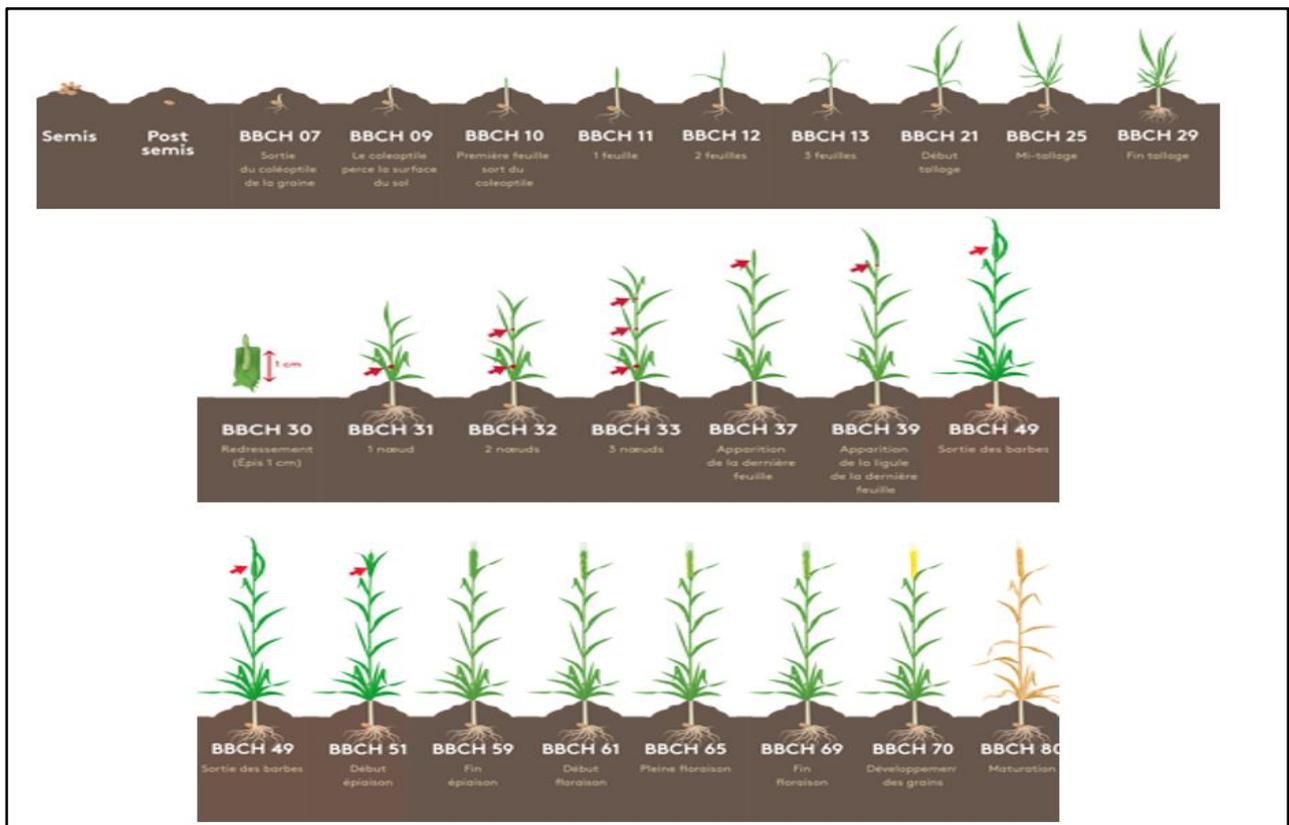


Figure 2: Stades clés de la phénologie du blé. La phénologie est exprimée avec l'échelle universelle BBCH. La première frise caractérise la phase végétative (BBCH 00 à 29), la seconde, la phase de reproduction (BBCH 30 à 69) et la troisième, la phase de remplissage et de maturation du grain (BBCH 70 à 92). Les flèches rouges servent à attirer l'attention sur l'élément caractéristique du stade (d'après ADAMA).

1. Introduction

1.1. Le blé dur

1.1.1. Contexte de production

Le blé dur (*Triticum turgidum* L. subsp. *durum* (Desf.) Husn.) est une plante de la famille des monocotylédones. A la base de l'alimentation humaine, le blé dur se différencie du blé tendre par son grain dur et vitreux.

Contrairement au blé tendre, l'alimentation humaine est l'unique débouché de la production de blé dur. Après la récolte, il est principalement transformé en semoule pouvant directement être consommée ou bien servir de matière première pour la fabrication de pâtes alimentaires. La filière française de blé dur est mondialement reconnue pour la qualité de sa production. Les variétés sélectionnées possèdent un fort pouvoir de valorisation/assimilation de l'azote en condition non limitante ce qui aboutit à une teneur en protéines des grains élevée. Cette haute teneur en protéine permet d'assurer la fabrication de pâtes alimentaires de qualité, notamment en termes gustatifs et de résistance à la surcuisson. Les trois quarts de la production de blé dur française sont exportés et utilisés par les fabricants de semoule et de pâtes du monde entier. En France, la culture du blé dur se concentre sur 4 bassins de production dont 2 se situent autour du pourtour méditerranéen (Occitanie, PACA, Ouest Océan et Centre Val de Loire).

252 000 hectares de blé dur ont été cultivés en 2020. Avec 2,6 % de la surface céréalière et 2,2 % de la production des céréales en France, le blé dur est la 4^{ème} céréale de France après le blé tendre, le maïs grain et l'orge. Avec une production de 1,3 million de tonnes pour la campagne 2020/2021, la France est le 2^{ème} producteur européen de blé dur après l'Italie (passioncéréales). Depuis plus de 30 ans, le progrès génétique apporté par la sélection française est indéniable (**fig.1**). On estime le gain de rendement à environ 1% par an, soit 0.7q/ha/an (GIE Blé Dur). Or depuis une vingtaine d'années nous pouvons constater une stagnation des rendements voire une régression (Porte et al., 2010) (**fig.1**). Par conséquent, le rendement a été et reste le principal critère de sélection (GIE Blé Dur). Néanmoins, les sélectionneurs se préoccupent aussi de la qualité des grains (taux de protéines), de la valorisation des intrants, de la tolérance à la verse et aux bioagresseurs mais aussi de la tolérance aux stress hydriques et thermiques.

1.1.2. Elaboration du rendement

Le rendement en grain s'établit à partir de la combinaison de plusieurs composantes qui peuvent être classés en fonction du stade phénologique (**fig.2**) de la culture en trois phases :

1. La phase végétative (BBCH 00 à 29) comprend la germination, le développement des feuilles et le tallage. Les composantes fixées lors de cette phase sont le *nombre de plantes par m²* et le *nombre de talles par plantes*.
2. La phase reproduction (BBCH 30 à 69) comprend l'élongation de la tige principale (maitre brin), la montaison, l'épiaison et le gonflement. Les composantes fixées lors de cette période sont le *nombre de talles par plantes (ou nombre d'épis par m² à ce stade)*, le *nombre d'épillets par épis*, et le *nombre de grain par épillet*.
3. La phase de remplissage et de maturation du grain (BBCH 70 à 92) comprend le développement et la maturation des grains. La composante fixée lors de cette période est le *Poids de mille grains (PMG)*. C'est aussi à ce moment que la qualité de récolte se fixe (taux de protéine, Poids spécifique) mais elle n'intervient pas en tant que composante de rendement.

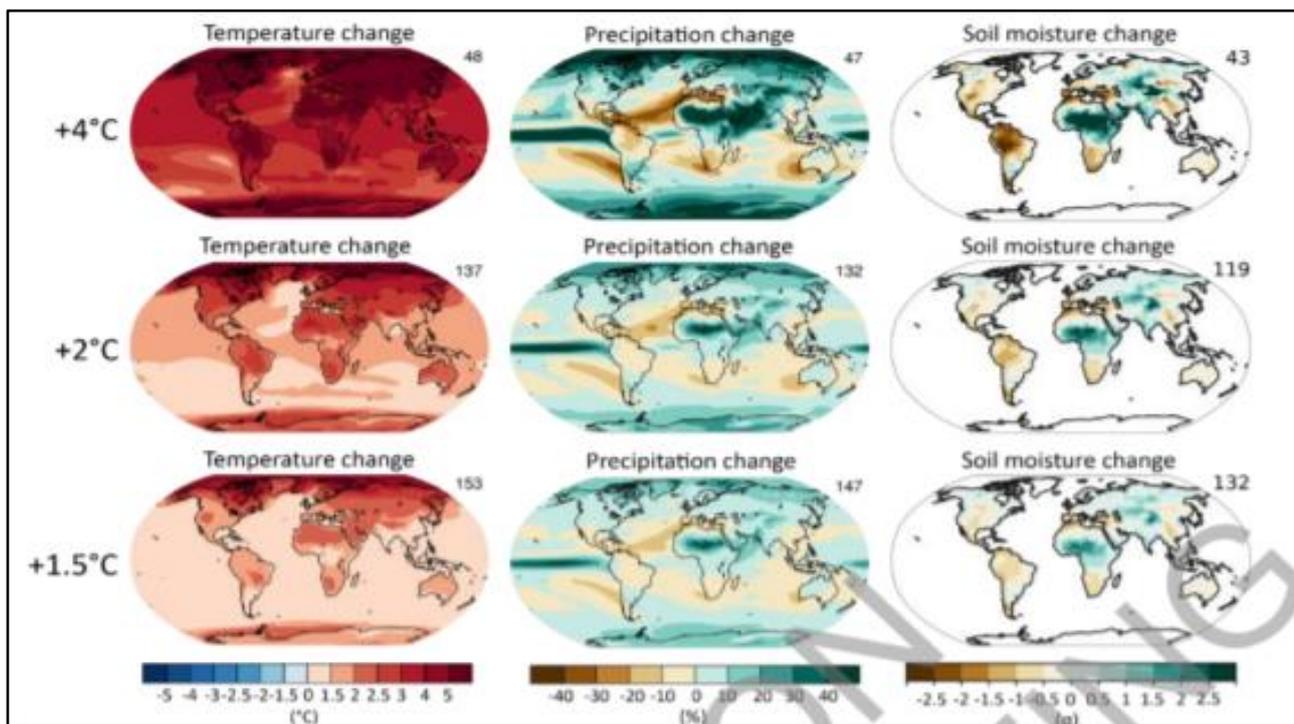


Figure 3: Modèles de réponse au changement climatique : température de l'air à gauche, précipitations au milieu (exprimées en pourcentage de changement) et humidité du sol à droite (exprimée en écart type de la variabilité interannuelle). Trois scénarios de changement climatique sont présentés : supérieur (+4°C), moyen (+2°C) et inférieur (+1,5°C) (adapté de Arias et al. 2021).

1.2. Le changement climatique

Le changement climatique induit une perturbation des normales saisonnières provoquant ainsi une modification de la température de l'air (+1,5 à 4°C suivant les scénarios), des précipitations et de l'humidité du sol (**Fig. 3**). Dans le contexte pédoclimatique, ces changements vont impacter plus ou moins intensément le monde en fonction des zones géographiques (**Fig. 3**). Les régions proches de l'équateur et des pôles verront leurs précipitations augmenter. D'autres régions comme le bassin méditerranéen, l'Amérique centrale et du Sud ainsi que l'Australie subiront une diminution des précipitations pouvant atteindre 40 % dans le pire des scénarios. L'impact des températures est relativement homogène sur tous les continents. L'assèchement des terres arables (**fig. 3**) touchera principalement le bassin méditerranéen, l'Amérique, l'Asie et l'Australie (Arias et al. 2021). En France, au cours des 25 dernières années, le nombre de jours ayant une température journalière moyenne supérieure à 25°C (échaudage) pendant la période critique du remplissage des grains a augmenté de 20% (Gate, 2015). Tous ces aléas climatiques peuvent entraîner de lourdes pertes de production. Lorsque l'on parle de changement climatique, on associe à la fois les stress thermiques et hydriques (Kulkarni M et al., 2017). Bien que ces deux stress aient des mécanismes différents, il est admis que lorsqu'ils sont combinés, leurs effets sont cumulables. Ils vont principalement impacter la phénologie et la physiologie de la plante en perturbant la croissance, la teneur en chlorophylle, l'efficacité de la photosynthèse et donc, la quantité et la qualité de la production (Altenbach et al., 2003).

1.2.1. Stress hydrique

Le stress hydrique est un état physiologique auquel est soumise une plante souffrant d'un manque d'eau. La culture est dite en stress hydrique dès lors que la réserve hydrique du sol (RH) est inférieure à la réserve facilement utilisable (RFU) (Tardieu et al., 1990). La sécheresse, caractérisée par une pluviométrie faible sur une période et un espace donné, conduit à la diminution de la réserve hydrique du sol (Tate et Gustard, 2000). Couplée à la sécheresse, la hausse des températures augmente la demande évaporative, renforçant ainsi les besoins des cultures en eau (Makarovsky, 2019). L'effet de ce stress provoque par la fermeture des stomates, une réduction des taux de transpiration et de fixation du carbone ainsi qu'une stagnation de la croissance du végétal. La limitation de cette croissance est un mécanisme adaptatif, permettant d'adapter sa consommation d'eau en fonction des disponibilités.

Dans le cas où le stress hydrique est modéré, les feuilles s'adaptent afin de maintenir les stomates ouverts. De ce fait, la diminution du rendement observé pourrait s'expliquer par la sénescence des feuilles produites antérieurement au stress et qui ne sont donc pas adaptées à ces conditions contrairement aux feuilles produites après l'apparition du stress (Simmelsgaard, 1976). Dans le cas d'un déficit hydrique extrême, la déshydratation des tissus peut endommager l'appareil photosynthétique (Hsiao 2003). Suivant la période de stress, la croissance de l'appareil reproductif peut également être détériorée, menant ainsi à la stérilité des épis et à un niveau d'assimilation inadéquat des nutriments essentiels au bon développement des graines (Barnabas et al. 2008).

Ce stress abiotique est considéré comme le principal facteur limitant du développement des plantes et de la production mondiale (Yuan et al. 2016). La limitation de l'eau est à elle seule responsable de 59 % des pertes de rendement totales par rapport aux rendements potentiels (Martre et Derory, 2018).

Le stress hydrique va impacter la culture sur ses composantes de rendement et peut être classé en fonction du stade de développement du blé de la façon suivante :

- BBCH 0 à 9 : diminution du taux de germination, pertes à la levée.
- BBCH 10 à 19 : réduction du nombre de plants par m².
- BBCH 20 à 29 : réduction du nombre de talles par plantes (donc d'épis)
- BBCH 30 à 59 : réduction du nombre d'épis par m².
- BBCH 60 à 69 : réduction du nombre de grains par épi (équivalent au nombre d'épillets par épi et le nombre de grains par épillet).
- BBCH 70 à 92 : réduction du PMG

De globalement, l'impact du stress hydrique peut être vu comme une réduction du nombre d'épis au m² lorsqu'il survient de manière précoce, et comme une réduction du nombre de grains par épis / PMG lorsqu'il se présente de tardivement.

1.2.2. Stress thermique

Le stress thermique sur la culture du blé dur peut-être caractérisé (en milieu contrôlé) par une baisse de rendement de 3 à 4% par degré Celsius supérieur à la température journalière de 15°C (Wardlaw *et al.*, 1989). Les stades les plus sensibles aux stress thermiques sont la floraison et le remplissage du grain et pendant la montaison pour les périodes de gel printanières (Fiches Accident Arvalis). Le stress thermique perturbe le transfert des assimilats en diminuant l'activité photosynthétique via la réduction de l'activité de la Rubisco ou en dégradant la chlorophylle et les composants du photosystème II. En réduisant l'activité enzymatique présente dans le grain, le stockage de l'amidon et des autres composés du grain s'en trouve ralenti (Touzy G et al, 2019).

Le stress thermique comprend aussi les dégâts de gel. Le blé est une culture tolérante au gel jusqu'au stade du début ou du milieu du tallage (Deswartre, 2021), période durant laquelle la culture passe l'hiver. Cette tolérance n'est possible que si la chute des températures est progressive, dans le cas contraire le gel entrainera un éclatement irréversible des cellules.

1.3. Réorienter la sélection

Jusqu'à présent focalisés sur le rendement et la qualité du grain, les schémas de sélection doivent aujourd'hui davantage prendre en compte les problématiques environnementales et les mécanismes d'adaptation des variétés aux événements climatiques extrêmes induits par le changement climatique (GIEC). En effet, sous un climat instable, la régularité de la production devient un objectif majeur dans la sélection variétale (Döring et al. 2018). Il est donc nécessaire de sélectionner la capacité d'adaptation de la plante à ces différents stress simultanés (Lobell D et al., 2010).



Figure 4 : Image aérienne du domaine expérimentale de l'UE DIASCOPE. L'image est orientée au Nord. L'ensemble de l'assolement 2021/2022 est visible sur l'image. Les annotations grisées correspondent au nom et à la surface (en ha) de la parcelle. Concernant l'essai DUROSTRESS, il se situe sur la parcelle CA10 (entourée en rouge).

1.1. Problématique de l'étude

1.1.1. Le projet DUROSTRESS

DUROSTRESS est un projet de recherche soutenu par le FSOV (Fonds de Soutien à l'Obtention Végétale) dont l'objectif est de caractériser le potentiel d'adaptation d'un panel de variétés de blé dur face aux stress hydriques et thermiques. Afin d'apporter des éléments de réponse, DUROSTRESS propose de combiner expérimentalement de multiples scénarios pédoclimatiques à travers la mise en place d'un réseau d'essais européen (Portugal, Italie et France), dans lequel un panel de 50 variétés de blé dur (30 variétés élites et 20 lignées de sélection) a été cultivé sur différents sites sur 2 années consécutives. Les sites, désignés sous la responsabilité des partenaires européens du pourtour méditerranéen du projet, sont répartis le long d'un gradient pédoclimatique allant du Sud au Nord, de manière à confronter des environnements divers et sujets aux événements extrêmes induits par le changement climatique. Ainsi, le projet DUROSTRESS compte 8 sites : Un site au Portugal (Elvas-INIAV), en Italie (Foggia - CREA), en France chez les partenaires semenciers RAGT (Montbartier 82123) et Florimond Desprez (Lectoure, 32700), 2 sites de l'institut technique Arvalis (Gréoux les bains, 04800 et Crambade, 31000) et enfin 2 sites de l'INRAE : DIASCOPE (Mauguio, 34130) et AGAP Ge2Pop (Montpellier, 34080). Au sein de chaque site, l'objectif est d'acquérir un socle commun de données phénotypiques afin de caractériser les variétés et obtenir les données environnementales classiques (T°C, HR, pluviométrie, rayonnement). Cependant, chaque site ayant sa propre méthodologie et ses outils spécifiques, leurs données additionnelles viendront donc s'ajouter au tronc commun. Par exemple, en fonction des sites, la caractérisation environnementale est plus ou moins précise et l'UE DIASCOPE est la mieux équipée dans ce domaine.

1.1.2. La station expérimentale DIASCOPE de l'INRAE

J'ai eu l'opportunité d'intégrer l'Unité Expérimentale (UE) DiaScope (Mauguio, 34130) dans le cadre de mon stage de Master 1. Il s'agit d'une UE du Centre INRAE Occitanie-Montpellier rattachée au département Biologie et Amélioration des Plantes (BAP), composée d'une équipe de 16 personnes et qui dispose d'un domaine de 72 Ha de parcelles expérimentales en conditions pédoclimatiques méditerranéennes (**Fig.4**). Sa principale mission est le phénotypage d'espèces de grandes cultures (principalement blé dur, blé tendre et maïs) et d'arboriculture (oliviers et pommiers) cultivés en systèmes de culture conventionnels et agro-écologiques innovants afin de caractériser la réponse des plantes à des contraintes environnementales et ainsi analyser les interactions GxE.

Pour cela, l'Unité Expérimentale (UE) DIASCOPE héberge la plateforme DiaPhen, nœud de l'infrastructure nationale Phenome-EMPHASIS, qui met à disposition des équipes de recherche des méthodologies et des outils d'agriculture de précision (GPS embarqués, dispositifs d'irrigation), de phénotypage à haut débit en plein champ (drones et phénotomobile équipés de capteurs) et en post-récolte (Dispositif Robotisé de Phénotypage Post Récolte), ainsi que de nombreux équipements permettant de caractériser l'environnement (capteurs de température, humidité de l'air et du sol, rayonnement solaire, etc...). DIASCOPE est partenaire du projet DUROSTRESS et accueille à ce titre une expérimentation pour la campagne 2022. Dans ce rapport, nous proposons d'analyser l'impact de 2 scénarios hydriques sur les caractéristiques phénologiques et phénotypiques du panel de diversité du projet DUROSTRESS. Les données ont été recueillies en cours de cycle, puis à l'issue de la campagne (rendement, PMG, PS) ...

Mon sujet de stage est de répondre à la problématique : ***Au sein d'un pool de 50 génotypes de blé dur quels sont les génotypes les plus performants face à des régimes hydriques limitant ?***

FSOV DUROSTRESS

379	380	381	382	383	384
373	374	375	376	377	378
367	368	369	370	371	372
361	362	363	364	365	366
355	356	357	358	359	360
349	350	351	352	353	354
343	344	345	346	347	348
337	338	339	340	341	342
331	332	333	334	335	336
325	326	327	328	329	330
319	320	321	322	323	324
313	314	315	316	317	318
307	308	309	310	311	312
301	302	303	304	305	306
295	296	297	298	299	300
289	290	291	292	293	294
283	284	285	286	287	288
277	278	279	280	281	282
271	272	273	274	275	276
265	266	267	268	269	270
259	260	261	262	263	264
253	254	255	256	257	258
247	248	249	250	251	252
241	242	243	244	245	246
235	236	237	238	239	240
229	230	231	232	233	234
223	224	225	226	227	228
217	218	219	220	221	222
211	212	213	214	215	216
205	206	207	208	209	210
199	200	201	202	203	204
193	194	195	196	197	198
12m bande tampon					
187	188	189	190	191	192
181	182	183	184	185	186
175	176	177	178	179	180
169	170	171	172	173	174
163	164	165	166	167	168
157	158	159	160	161	162
151	152	153	154	155	156
145	146	147	148	149	150
139	140	141	142	143	144
133	134	135	136	137	138
127	128	129	130	131	132
121	122	123	124	125	126
115	116	117	118	119	120
109	110	111	112	113	114
103	104	105	106	107	108
97	98	99	100	101	102
91	92	93	94	95	96
85	86	87	88	89	90
79	80	81	82	83	84
73	74	75	76	77	78
67	68	69	70	71	72
61	62	63	64	65	66
55	56	57	58	59	60
49	50	51	52	53	54
43	44	45	46	47	48
37	38	39	40	41	42
31	32	33	34	35	36
25	26	27	28	29	30
19	20	21	22	23	24
13	14	15	16	17	18
7	8	9	10	11	12
1	2	3	4	5	6

Légende	
	Zone tampon
***	Plots de bordure
	Plots WD répétition 1
	Plots WD répétition 2
***	Plots WW répétition 1
	Plots WW répétition 2
W W	Well watered
W D	Water deficient
***	Plots instrumentés :
	1 couples de tensiometres 30/60cm
	1 sonde capacitive
	1 pluviomètre

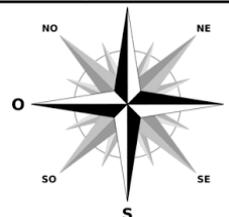


Figure 5: Plan du dispositif expérimental de DUROSTRESS mis en place sur le site de Mauguio

2. Matériel et méthodes

2.1. Design et traitements

2.1.1. Dispositif expérimental

La **Fig.5** présente le dispositif expérimental du projet DUROSTRESS. L'essai a été semé le 22/11/2021 et moissonné le 20/06/2022. L'essai a été implanté sur la parcelle CA10 (43.614346, 3.978805) du domaine de l'UE DIASCOPE de Mauguio. Le sol est un sol brun, profond, limono-argilo-sableux, sensible à l'hydromorphie de profondeur, calcaire ou calcique, peu caillouteux en surface avec horizon caillouteux vers 80 cm, à croute pierreuse à 2 m, sur alluvions du ruisseau du Balaurie.

Le dispositif, construit en blocs complets et randomisés, étudie l'interaction du facteur (1) stress hydrique avec le facteur (2) variétal. Le facteur (1) stress hydrique est composé de 2 niveaux (Well Water (WW) et Water Deficit (WD)) et est piloté par l'intermédiaire d'une rampe frontale. Le facteur (2) variétal contient 52 niveaux (2 références incluses). Chaque traitement (combinaison de facteurs) est répété 2 fois dans l'essai (2 réplifications). Chaque réplification est randomisée par modèle statistique, cela permet de limiter les biais expérimentaux liés au gradient d'hétérogénéité pédologique présent dans la parcelle. Pour apprécier ce gradient (NORD-SUD) présent sur la parcelle, deux variétés témoin sont utilisées, ANVERGUR et CLAUDIO. Cinq plots par variétés de références sont semés par réplification. Deux plots semés avec la variété ANVERGUR servent à l'instrumentation. Ils sont disposés dans l'espace de manière à caractériser précisément l'état hydrique et l'environnement (cf. point suivant Caractérisation Environnementale). Ils permettent aussi le contrôle de l'homogénéité d'irrigation le long de l'axe de la rampe et dans son sens d'avancement.

Ainsi, le dispositif expérimental complet de DUROSTRESS, est de 240 plots étudiés entourés de parcelles de bordures (blé tendre variété GERRY) et peut être vu de la façon suivante :

- 2 modalités (WD / WW) ;
 - 2 réplifications par modalité ;
 - 50 géotypes par réplification (randomisation aléatoire) + 5 ANVERGUR + 5 CLAUDIO (Position déterminée en amont)

2.1.2. Caractérisation du contexte pédoclimatique

➤ Caractérisation environnementale

La caractérisation de l'environnement de l'essai est primordiale pour recontextualiser les résultats. Une station météorologie (station du réseau INRAE CLIMATIK ; à 150m de l'essai) permet de mesurer et d'enregistrer (**Fig.6**):

- La température (degrés Celsius (°C)),
- L'hydrométrie ou humidité de l'air (humidité relative (hr)),
- Le vent (force (km/h) et direction (points cardinaux)),
- Le rayonnement solaire (joules/cm²) ;
- La pluviométrie (mm).

Les données thermiques permettent le calcul du temps thermique (Degrés Jours (°C.j⁻¹)) à partir de la formule suivante : $DJ = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} - T_{base}$ où Tbase est le zéro de végétation de la culture (0°C pour le blé) . Les températures supérieures à 30°C sont plafonnées à cette valeur, correspondant à l'arrêt du métabolisme physiologique. Le temps thermique permet de normaliser le développement phénologique de la culture afin de comparer par la suite les résultats avec d'autres jeux de données provenant de régions et d'environnements contrastés, puisque la phénologie du blé dépend directement des températures.



Figure 6 : Photo de la station météorologie CLIMATIK du réseau INRAE à Mauguio. Les données recueillies sont la température (degrés Celsius (°C)), l'hydrométrie ou humidité de l'air (humidité relative (hr)), le vent (force (km/h) et direction (points cardinaux)), le rayonnement solaire (joules/cm²) et la pluviométrie (mm).

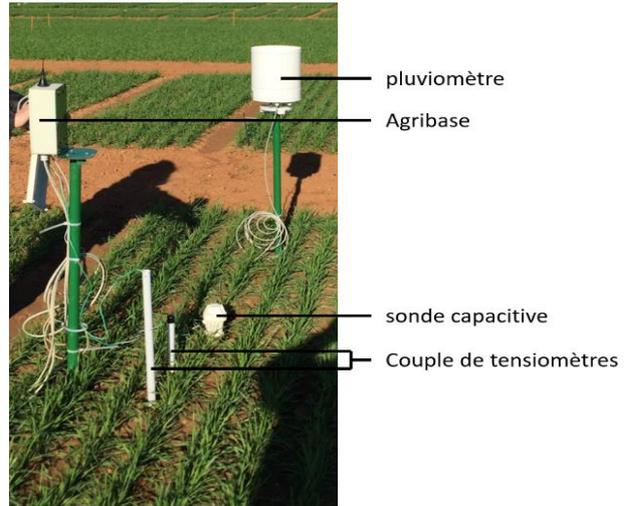


Figure 7 : Photo d'un plot instrumenté sur l'essai DUROSTRESS. Y sont représentés : un pluviomètre, une sonde capacitive, un couple de tensiomètres (30 cm et 60 cm de profondeur) et une agribase.



Figure 8: Image aérienne de l'essai DUROSTRESS prise par drone. Observation des allées centrales après redécoupage, les plots mesurent alors 5 mètres de long. Les plots ANVERGUR instrumentés avec tensiomètres, sondes capacitives et pluviomètres sont également représentés. Les 2 modalités hydriques, WW au SUD en bas de l'image et WD au NORD en haut de l'image sont séparées par une bande tampon de 12 m pour éviter les effets de débordement de l'irrigation permise par la rampe frontale.

➤ Caractérisation du régime hydrique

Au sein de l'essai, dans les microparcelles instrumentées, trois instruments sont mis en place (**Fig.7**) :

- Les tensiomètres (WATERMARK) mesurent la force de tension hydrique du sol en centibars (cbar). Mise en place de 2 tensiomètres par plot instrumenté, un à 30 cm et l'autre à 60 cm de profondeur.
- Les sondes capacitives (Sentek_EnviroSCAN) mesurent la permittivité diélectrique du sol, ce qui informe sur le taux d'humidité du sol (%). Les sondes sont fixes et réalisent des relevés tous les 10 cm sur 90 cm de profondeur.
- Les pluviomètres (PRECIS MECANIQUE 0.5) quantifient les quantités d'eau que les parcelles reçoivent (pluies, irrigations) en millimètre (mm).

Les données recueillies par les outils présentés dans ce point sont transmises par VHF grâce à des centrales d'acquisitions connectées (Agribases, serveur Agriscope) aux serveurs informatiques de l'UE toutes les 3 heures. Ces informations sont visualisées via une application générée par l'intermédiaire du package RSHINY de R-STUDIO pour caractériser finement l'environnement à l'échelle des plots et donc grâce à la présence des 8 plots instrumentés de caractériser l'environnement à l'échelle de l'essai.

2.1.3. Caractérisation des régimes hydriques

Les données issues des tensiomètres sont utilisées pour piloter les irrigations. De plus, pour affiner nos décisions, le logiciel IRRELIS développé par Arvalis qui intègre un certain nombre de paramètres pédoclimatiques est utilisé. Pour répondre à notre problématique, l'objectif est de créer deux scénarios d'alimentation hydrique :

- WW : Modalité irriguée en fonction des besoins de la culture. L'objectif est que la réserve facilement utilisable soit toujours disponible. Cela correspond à une force de tension du sol de comprise 20 et 100 cbars en moyenne.
- WD : Modalité Water-deficit soit en stress hydrique. L'objectif est de ne pas satisfaire totalement les besoins hydriques de la culture. Pour ce faire, l'irrigation a lieu lorsque les tensiomètres mentionnent une force d'environ 200 cbars. En effet, l'équipement utilisé ne permet pas de suivre de manière totalement fiable la tension du sol lorsqu'elle excède 250 cbars.

2.1.4. Itinéraire technique

Chaque plot est constitué d'un seul génotype de blé dur. La culture a été semée avec un semoir en ligne le 22/11/2021. Chaque plot est composé de 8 rangs semés, chacun espacés de 17 cm. Lors du semis, les plots mesurent 7 m de long sur 1,36 m de large, soit 9,52 m². Cependant, la surface récoltée est de 6,8 m² car les plots ont été redécoupés après le semis dans le but de les individualiser et de permettre au tracteur de réaliser les interventions culturales (fertilisation, traitement, désherbage). Ainsi les plots sont finalement séparés par des allées de 2m (**Fig.8**). La culture a été désherbée chimiquement au stade tallage (le 25/02/2022 au stade BBCH29). La fertilisation azotée a été fractionnée en 3 apports (60+60+20 unités/ha) et vient s'ajouter aux reliquats disponibles sur la parcelle (50 unités en moyenne sur la parcelle). La culture bénéficie donc de 190 unités d'azote pour son développement. Aucun traitement phytosanitaire autre que le désherbant n'a été appliqué sur l'essai afin de limiter les Indices de Fréquence de Traitement (IFT), conformément aux récentes directives de l'INRAE. L'ensemble de l'itinéraire technique (ITK) est présenté en annexe dans le **Tab.2**.

2.2. Caractérisation du végétal

Afin de caractériser les variétés, le protocole de l'essai prévoit d'acquies différentes données sur le végétal. Dans un souci d'homogénéisation, les mesures sur les bordures du plot ne sont pas réalisées (50 cm au début et à la fin + les 2 rangs extérieurs de chaque côté). Les variables recueillies sont les suivantes :

2.2.1. Caractérisation phénologique

- **Taux de levée** : Se référer aux méthodes VATE du GEVES
- **Date de montaison (BBCH31)** : Par plot, sélectionner 3 zones d'observation (début, milieu et fin du plot) représentatives de la parcelle. Au sein de chaque zone, observer 10 maitres brins, relever le stade BBCH représentatif des 10 maitres brins. Les 3 zones de prélèvement permettent d'indiquer la présence d'hétérogénéité ou non. Le stade BBCH31 est atteint lorsque 50% des maitres brins de la parcelle ont l'épi à 1 cm du plateau de tallage. Les dates sont données en cumul de degrés jours ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{j}^{-1}$).
- **Date d'épiaison (BBCH 55)** : Par plot, sélectionner 3 zones d'observation (début, milieu et fin du plot) représentatives de la parcelle. Au sein de chaque zone, observer 10 épis, relever le stade BBCH représentatif des 10 épis. Les 3 zones de prélèvement permettent de souligner la présence d'hétérogénéité ou non. Le stade BBCH 55 est atteint lorsque 50% des épis de la parcelle sont sortis à 50 %. Les dates sont données en cumul de degrés jours ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{j}^{-1}$).
- **Date de pleine floraison (BBCH 65)** : Par plot, sélectionner 3 zones d'observation (début, milieu et fin du plot) représentatives de la parcelle. Au sein de chaque zone, observer 10 épis, relever le stade BBCH représentatif des 10 épis. Les 3 zones de prélèvement permettent de souligner la présence d'hétérogénéité ou non. Le stade BBCH 65 est atteint lorsque les épis de la parcelle ont 50 % de leurs anthères de sortis. Les dates sont données en cumul de degrés jours ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{j}^{-1}$).

2.2.2. Caractérisation phénotypique

- **Estimation de la biomasse par NDVI** : Suivi à l'aide d'un Greenseeker connecté à un NOMAD Trimble et d'un drone équipé de caméra multispectrale. La valeur NDVI utilisée pour nos analyses sont des moyennes de 10 valeurs par plot. L'utilisateur a pris soin de réaliser l'acquisition en marchant à la même vitesse et en se positionnant à la même distance du couvert végétale (80 cm). Une mesure d'étalonnage (sol nu) est réalisée avant chaque acquisition.
- **Estimation de la sensibilité aux bioagresseurs et au gel** : En cours de culture, réaliser des notations vis-à-vis des dégâts observés (pathogènes, gel). Se référer aux méthodes CEB et VATE.
- **Hauteur des plants** : Par plot, sélectionner dans 3 zones d'observation (début, milieu et fin du plot) représentatives de la parcelle. Par zone, il convient de mesurer une talle représentative. Les mesures sont prises à l'aide d'un régle et sont données en cm (inspiré du protocole d'expérimentation VATE du GEVES).
- **Nombre d'épis au m²** : Par plot, sélectionner 2 zones de prélèvement représentatives (par exemple au Sud-Est et au Nord-Ouest du plot). Ces zones de prélèvement ne doivent pas être sur les mêmes rangs. Dans chaque zone, placer le régle de 1 m entre deux rangs et compter le nombre d'épis de part et d'autre du régle (soit 2 m linéaire). Les résultats sont donnés en nombre d'épis par m² (nb épis/m²).
- **Rendement (q/ha)** : Le rendement est mesuré directement à la récolte. Il est pondéré en fonction du taux d'humidité (ramené à 15%). Il est donné en quintaux par hectares (Q/Ha) pour chaque plot.
- **Données qualitatives liées au rendement** : En post récolte, ce sont les mesures liées à la qualité de la récolte (PMG, PS) qui sont réalisées.

Dans un souci de synthèse et de clarté, **les variables suivantes seront traitées dans ce rapport** :

- Effet du facteur *hydrique* sur la variable *force de tension du sol* (données tensiométries) et ce à 3 dates (18/03/2022, 05/05/2022, 24/05/2022) ;
- Effet du facteur *réplication* sur la variable *rendement* ;
- Effet du facteur *hydrique* sur la variable *rendement* pour (i) l'ensemble des génotypes (ii) la variété ANVERGUR ;
- Effet du facteur *hydrique* sur la variable *date d'épiaison* (BBCH 55) et *date de floraison* (BBCH 65)
- Effet du facteur *hydrique* sur la variable *NDVI* pour (i) l'ensemble des génotypes (ii) la variété ANVERGUR et ce à 3 dates (18/03/2022, 05/05/2022, 24/05/2022) ;
- Effet de l'interaction entre le facteur variétal et le facteur *hydrique* sur la variable *rendement* pour (i) la variété ANVERGUR (ii) l'ensemble des génotypes ;
- Classement par groupe d'homogénéité des variétés par le *rendement* en fonction du facteur *hydrique*.

2.3. Analyses de données

Les analyses statistiques sont réalisées à l'aide du logiciel R-studio (version R-CRAN 4.1.2). L'essai comportant deux facteurs, le test de **l'ANOVA 2 de type 1** sera utilisé pour expliquer le **rendement** (quantitatif) par le facteur **variétal** (qualitatif) et le facteur **satisfaction hydrique** (qualitatif). Pour réaliser ce test, les conditions suivantes doivent être respectées :

- Le nombre de sujets dans chaque groupe est supérieur ou égal à 30. **OU**
- La variable suit approximativement une loi Normale dans chaque groupe (dans ce cas, la correction de Welch sera intégrée).

Le modèle statistique sera le suivant : $X_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_{ijk} + \epsilon_{ijk}$

Où :

- X_{ijk} : Valeur de la variable X observée

- μ : Moyenne de la population commune aux échantillons

- α_i : Effet différentiel du groupe i, il correspond à la différence entre la moyenne globale et la moyenne marginale des réponses de la modalité i du facteur « stress hydrique »

- β_j : Effet différentiel du groupe j, il correspond à la différence entre la moyenne globale et la moyenne marginale des réponses de la modalité j du facteur « génotype »

- γ_{ijk} : Effet de l'interaction entre les modalités i du facteur « stress hydrique » et j du facteur « génotype »

- ϵ_{ijk} : Résidu aléatoire

Si le jeu de données ne remplit pas les conditions ci-dessus, un test non paramétrique est effectué, à savoir, le test de **Wilcoxon 2**.

Si l'interaction se révèle non significative avec le test de l'ANOVA 2 de type 1, l'ANOVA 2 de type 2 sera utilisée. Dans le cas contraire l'ANOVA 2 de type 3 sera appliqué.

Lorsque le contrôle de l'effet de certains facteurs tel que **la réplication, l'irrigation**, ou tout autre facteur unique expliquant le rendement aura lieu, **l'ANOVA 1 sera réalisée**. Les conditions requises sont les mêmes que pour l'ANOVA de type 2. Si les conditions ne sont pas réunies, le test de **Wilcoxon2** permettra de comparer les deux moyennes. Tous les **seuils de décisions seront fixés à 5 % (0.05)**.

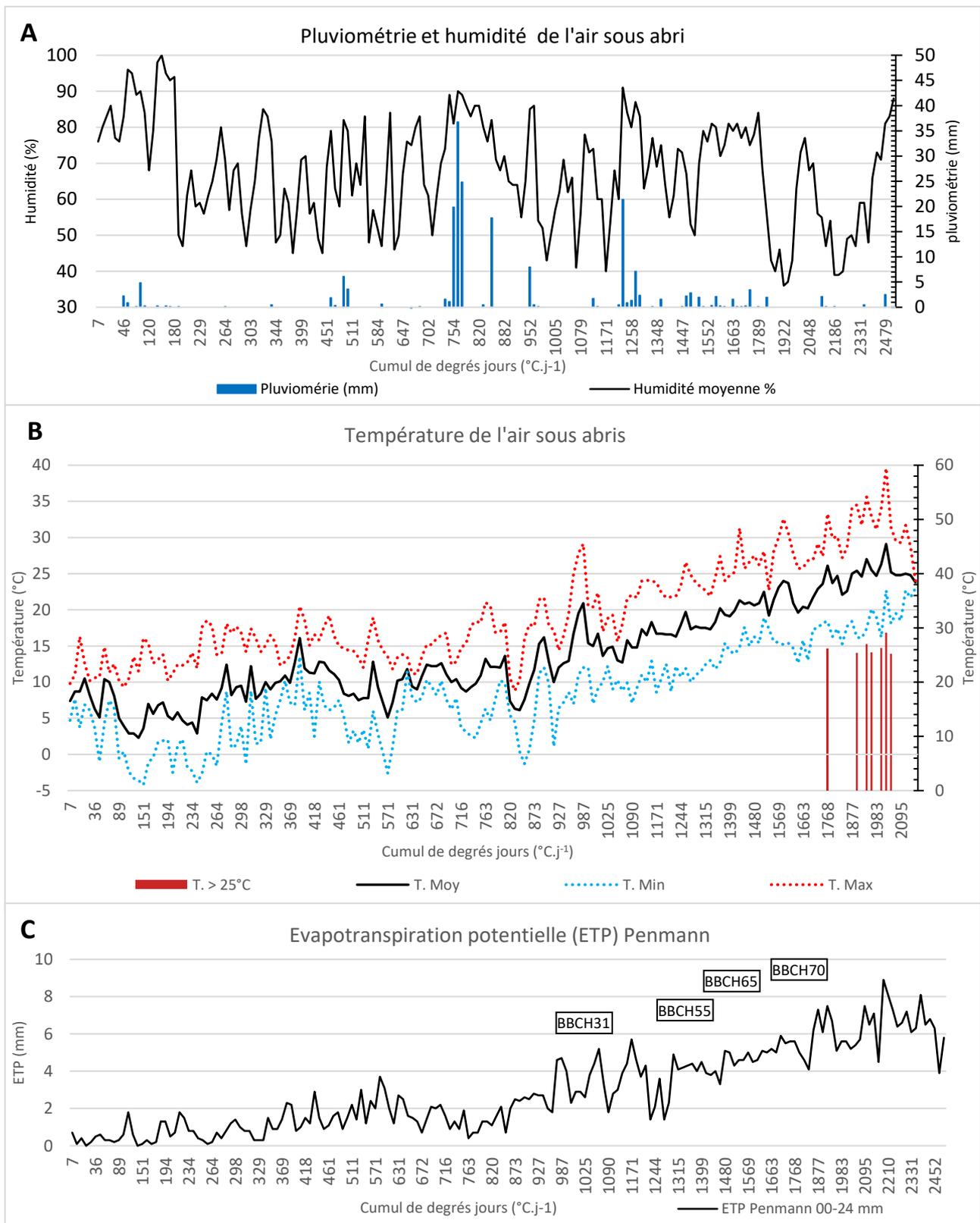


Figure 9 : Synthèse du contexte pédoclimatique présent sur la parcelle CA10 du site INRAE de Mauguio du 01/01/2022 au 20/06/2022. **A** : Graphique de la pluviométrie et de l'humidité sous abri. La pluviométrie (histogrammes bleu) est donnée en mm et l'humidité (courbe rouge) est donnée en humidité relative (hr). **B** : Graphiques des températures (T.) sous abri. Les températures sont données en degrés Celsius ($^{\circ}\text{C}$). Il y est représenté sous la forme de trait bleu hachuré la température minimale (T.Min), sous forme de trait rouge hachuré la température maximale (T.Max), sous forme de traits pleins noir la température moyenne (T.Moy) et sous forme d'histogrammes rouge les températures supérieures à 25°C (T.> 25°C). **C** : Graphique de l'évapotranspiration (ETP) de la culture calculée avec la méthode de Penmann (donné en mm). Les stades BBCH sont replacés par rapport au temps thermique et sont des approximations issues des 52 génotypes.

3. Résultats

3.1. Caractérisation du contexte pédoclimatique

3.1.1. Caractérisation environnementale

Les variables nécessaires à la caractérisation météorologique (détaillé dans la partie 2.1.2) sont présentées en **Fig.9**. Afin de contextualiser les données en temps thermiques, les stades BBCH sont intégrés dans la **Fig.9-C**. Le positionnement de ces stades est réalisé en fonction de l'ensemble des géotypes, leur emplacement est donc approximatif.

Fig.9-A, présente la pluviométrie en mm ainsi que le taux d'humidité de l'air en % observé pendant la campagne. La pluviométrie enregistrée du semis à la récolte est de 194mm dont 57% au cours du mois de mars. La pluviométrie estivale est restée faible jusqu'aux récoltes. Concernant l'humidité relative de l'air, ce taux est fortement variable, et ce quel que soit la période de l'année. Le taux d'humidité moyen lors de l'étude est de 66,3%. La majorité des données se situent entre 50 et 80 %, bien que des extrêmes soient observés (36 et 100%). Le taux d'humidité semble décroître à l'approche de l'été.

Fig.9-B décrit la courbe des températures (°C), il est observable que l'écart entre les températures minimales et maximales se situe en moyenne entre 15°C et 20°C. La température minimale observée est de -4.2°C le 16/01/2022 et la température maximale enregistrée est de 39,6°C en date du 17/06/2022. Les températures sont croissantes entre la période du semis et celle de la récolte avec une température moyenne passant de 6,3°C en janvier à 24,5 °C en juin. Les températures moyennes supérieures à 25 °C, qui correspondent à des températures échaudantes, sont représentées par les histogrammes rouge. Il est observable qu'ils apparaissent tard et de manière groupée dans le cycle cultural (stade BBCH 70 en moyenne).

Fig.9-C représente les pertes en eau de la parcelle en fonction de la période. Le calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP) est réalisé à partir de la méthode de Penmann et exprimé en mm. La croissance régulière au fil des mois de l'ETP est constatée et passe d'un ETP cumulé de 23 mm en janvier à 158mm en mai. Des fluctuations journalières assez marquées sont observées. Ces variations sont explicables par le fait que l'ETP soit calculé à partir de la température et de l'humidité (deux sources de fluctuations).

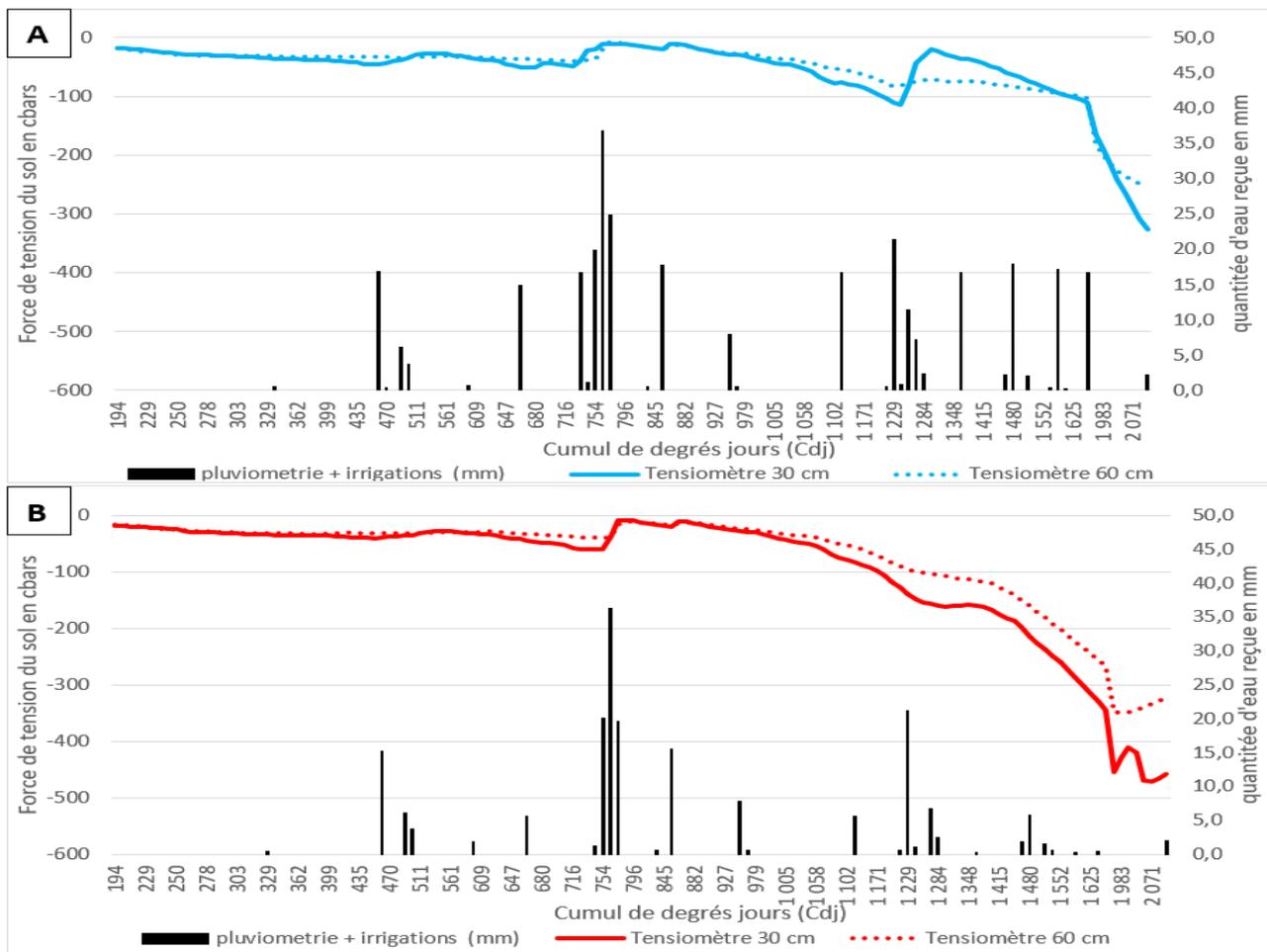


Figure 10: Evolution de l'eau disponible dans le sol en fonction du temps thermique. L'échelle en temps thermique correspond à la période du 06/01/2022 au 06/06/2022. Le panneau **A** correspond à la modalité WW et le panneau **B** à la modalité WD. Pour les panneaux **A** et **B** : Le premier axe Y correspond à la force de tension pour extraire l'eau du sol et est donné en cbars. Le second axe en Y correspond aux entrées d'eau dans la parcelle (pluies et irrigations) et sont données en mm. L'axe des X correspond au temps thermique et sont exprimés en cumul de degrés jours. Pour chaque panneau, les entrées d'eau dans la parcelle sont présentées sous forme d'histogrammes. Les données issues des *tensiomètres* sont présentées sous la forme (i) d'une courbe pleine pour les tensiomètres à 30 cm (ii) et d'une courbe en pointillés pour les tensiomètres à 60 cm.

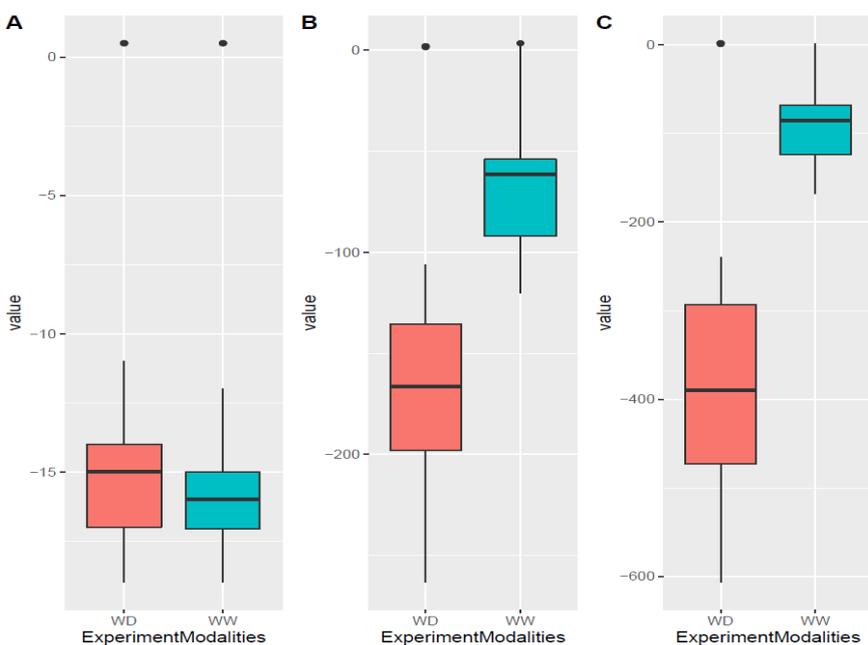


Figure 11: Représentation graphique par boxplot de la force de tension du sol en cbars en fonction de la modalité et de 3 dates. Le panneau A concerne la date du 18/03/2022 (833.5 °C.j-1), le panneau B celle du 05/05/2022 (1463.55 °C.j-1), Le panneau C celle du 24/05/2022 (1832.4 °C.j-1). Les boxplots rouges correspondent à la modalité WD et les boxplots bleus correspondent à la modalité WW. Les données tensiométriques sont issues de la moyenne des tensiomètres installées à 30 cm et 60 cm de profondeur.

3.1.2. Caractérisation du régime hydrique

Les instruments (tensiomètres et pluviomètres) implantés au sein de l'essai permettent de suivre les mouvements d'eau dans le sol. Les données tensiométriques sont principalement utilisées pour piloter les irrigations et mesurer les niveaux de stress des deux régimes hydriques appliqués (cf. 2.1.2.). C'est pourquoi l'attention sera focalisée sur ces données.

La **Fig.10** présente une synthèse des mouvements de l'eau dans le sol sur l'essai DUROSTRESS où le panneau **A** se focalise sur la modalité WW (irriguée) et le panneau **B** sur la modalité WD (carencée en eau). Visuellement, il semblerait que la différence de satisfaction hydrique intervienne autour de 1250 degrés jours, puisque les deux modalités ont des forces de tension qui divergent clairement à cette période. En effet, pour 1250 °C.j⁻¹, la modalité WW remonte à une tension inférieure à 100 cbars, tandis que la modalité WD est proche de 150 cbars, et cette différence continue de s'accroître par la suite. Les courbes de relevés tensiométriques subissent de soudaines hausses, par exemple pour 754 °C.j⁻¹ et 1250 °C.j⁻¹. Ce phénomène s'explique par d'importantes pluies courant mars (102 mm) ou par l'apport décidé d'eau (irrigation). Le printemps pluvieux n'a pas permis de démarrer une différenciation précoce des 2 régimes hydriques. Par la suite, la gestion des 2 régimes hydriques a été possible en réalisant plusieurs apports d'eau sur le WW, mais l'unité expérimentale a été limitée par (i) la capacité de rétention du sol, (ii) l'ETP moyenne, (iii) le risque de verse, (iv) le risque de développement de pathogènes (septoriose, oïdium, rouille brune) et (v) la disponibilité des équipes. La **Fig.11** présente les forces de tension du sol en fonction de la modalité sous forme de boxplot. Pour cette analyse, une comparaison des données issues de l'ensemble des tensiomètres par régime hydrique est effectuée, à savoir, les 4 plots instrumentés et les deux profondeurs (30 cm et 60 cm). Dans la **Fig.11** le panneau **A** se focalise sur la date du 18/03/2022 (soit 772 °C.j⁻¹). Visuellement il ne semble pas y avoir de différence bien que la modalité WW semble plus homogène et détient une force de tension légèrement plus forte. Or d'après le test statistique de Wilcoxon 2 (données non normales), l'observation de la force de tension du sol est explicable par le traitement hydrique (p-value = 1.678⁻¹²) à cette date. Au 18/03/2022 les plantes cultivées dans la modalité WD ont significativement plus d'eau disponible que la modalité WW. Concernant les panneaux **B** (focus au 05/05/2022 (1464 °C.j⁻¹)) et **C** (focus au 24/05/2022 (1832 °C.j⁻¹)) de la **Fig.11** la différence de tension du sol est nettement plus visible. En effet, pour le panneau **B** la force de tension du sol dans la modalité WD semble être 2 fois supérieure à WW et concernant le panneau **C** cette force semble 4 fois supérieure dans la modalité stressée. Par ailleurs, concernant les panneaux **B** et **C**, les valeurs semblent plus homogènes car les quartiles que représentent les boxplot sont plus resserrés. Les valeurs des sondes tensiométriques du 05/05/2022 et du 24/05/2022 diffèrent significativement entre les deux modalités car les p-value sont inférieures à 2.2⁻¹⁶ pour ces deux dates.

Par conséquent, si la différence de force de tension du sol diffère dès le 18/03/2022, cela signifie que le régime hydrique y était déjà différencié et ce, malgré les pluviométries printanières importantes (102 mm en mars). Néanmoins, il faut garder à l'esprit que l'hétérogénéité du sol peut aussi être un facteur explicatif de ces résultats.

Afin de conforter cette hypothèse, ces données sont interprétées via le logiciel de simulation IRRE-LIS (développé par ARVALIS). Il simule le confort hydrique de la culture en fonction des conditions agro-environnementales et de son stade (BBCH). En effet, le logiciel prend en compte dans ses calculs un ensemble de variables telles que le type de sol, la situation géographique, la date de semis et les irrigations. Le logiciel est paramétré avec la variété ANVERGUR à partir du moment où l'installation des capteurs est réalisée. Par ailleurs, le logiciel fait ressortir les périodes où la culture est en stress hydrique (RU<RFU). Enfin, IRRE-LIS simule la phénologie de la culture et propose des dates de passage aux stades clefs (épi 1cm, 2 nœuds, floraison).

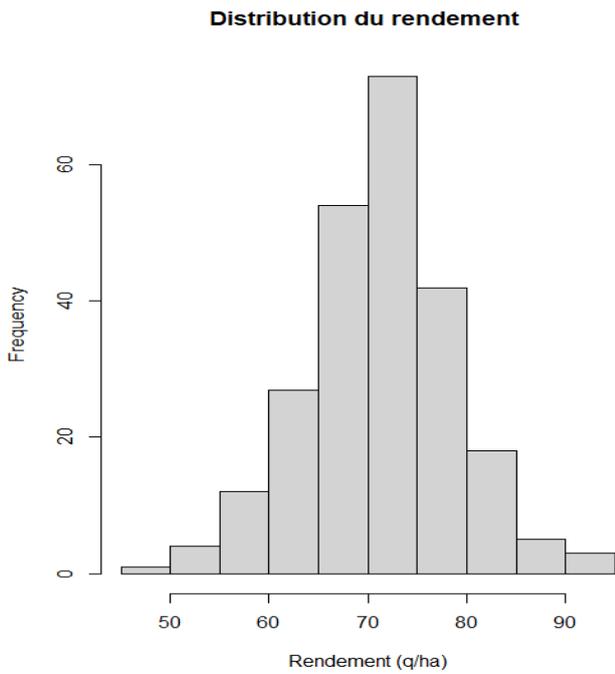


Figure 12 : Représentation de la distribution des données de rendement.

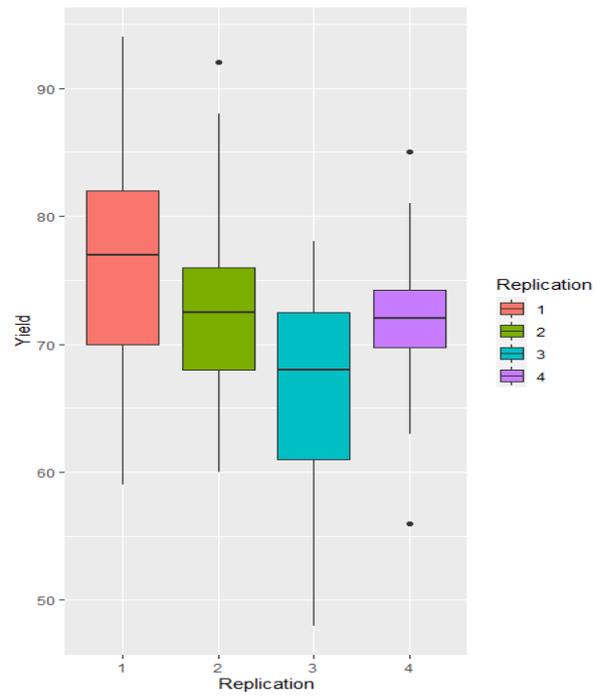


Figure 13 : Boxplot du rendement (q/ha) en fonction de des réplification. Les réplifications 1 et 2 correspondent à la modalité WW et les réplifications 3 et 4 correspondent à la modalité WD.

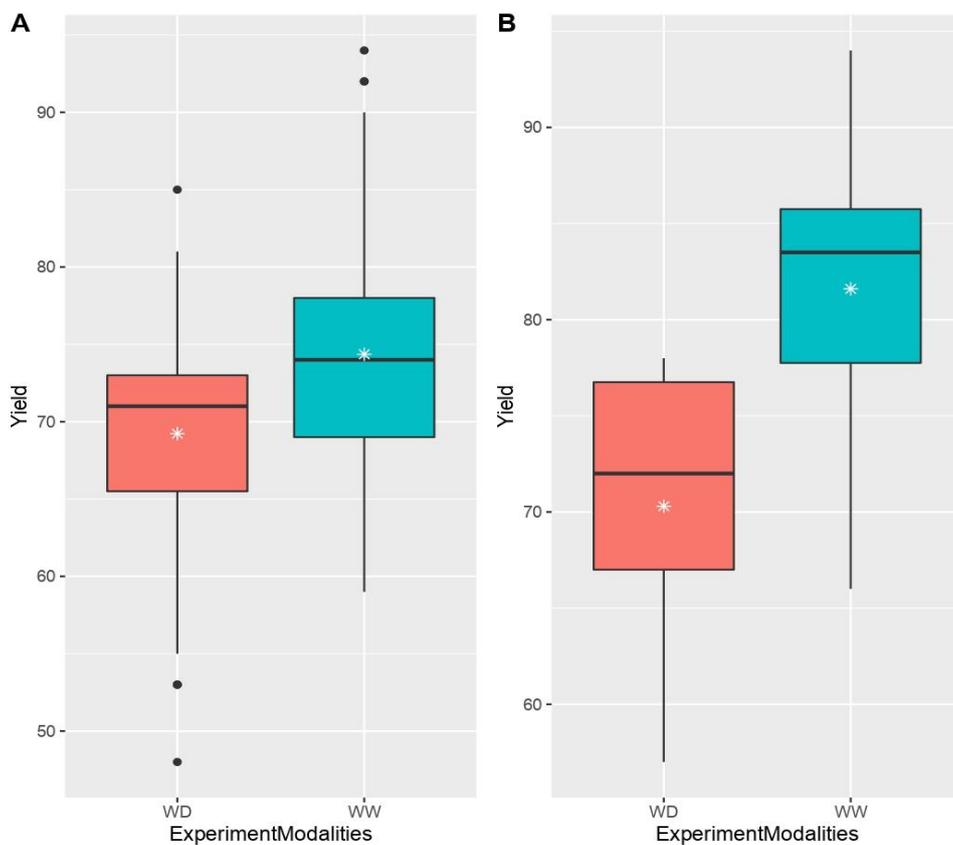


Figure 14: Boxplot du rendement (q/ha) en fonction de la modalité (WW/WD). Le panneau A précise le rendement de l'ensemble des génotypes en fonction du régime hydrique (moyenne des 2 réplifications). Le panneau B précise le rendement de la variété ANVERGUR (témoin) en fonction du régime hydrique (moyenne des 2 réplifications). Les étoiles blanches visibles dans les graphiques correspondent à la moyenne.

3.2. Analyses préliminaires

3.2.1. Répétabilité des résultats

Afin d'analyser si les 2 régimes hydriques contrastés appliqués durant la campagne ont un impact sur le développement de nos parcelles et afin de vérifier si nos données phénotypiques obtenues sont répétables dans l'espace, l'analyse des données du rendement (quintaux/hectares, q/ha) sera établie en fonction de la modalité (WW ou WD) puis en fonction des répétitions (1 et 2 WW, 3 et 4 WD).

La **Fig.12** présente la distribution des rendements de manière globale. L'hypothèse que ces dernières suivent une loi normale centrée réduite est posée mais sera vérifiée statistiquement. Le test de normalité sur le rendement donne une p-value de 0.08148, les données ne s'écartent donc pas significativement d'une loi normale centrée réduite. Néanmoins cette valeur reste très proche du seuil de décision (5 %), ce qui met en garde sur le risque de conclure à tort à une normalité des données.

La **Fig.13** représente le rendement (q/ha) obtenu en fonction des répétitions. Elles sont relativement hétérogènes et le rendement obtenu par répétition fluctue beaucoup au sein d'une modalité. Pour s'assurer de la répétabilité des résultats un test statistique est réalisé pour vérifier l'effet de la répétition sur la variable rendement. Cette analyse montre que les répétitions ne sont pas répétables. Que ce soit pour la modalité WW ou WD les p-values sont très significatives (***) avec comme résultats respectifs 0.0005596 et 1.18×10^{-5} . Ces résultats sont en partie explicables par l'hétérogénéité du terrain et la grande taille (0,44 ha) de l'essai. Néanmoins, l'expérimentateur en charge de l'essai, ayant conscience de cette problématique, a mis en place 2 variétés Témoins répétées 5 fois par répétition, afin de tenir compte au mieux de cette hétérogénéité et de corriger les données pour diminuer l'effet des facteurs aléatoires indépendants de la variété et du scénario hydrique dans l'estimation du rendement. Cette correction des données brutes ne sera pas abordée dans ce rapport.

3.2.2. Effet du régime hydrique sur le rendement

Dans la **Fig.14**, le panneau **A** présente le rendement (q/ha) en fonction de la modalité (WW/WD) en tenant compte de l'ensemble des géotypes. Dans un premier temps il est observé que la modalité irriguée (WW) obtient de meilleurs rendements que la modalité non irriguée (WD). En effet, les valeurs médianes sont de 71 q/ha pour la modalité WD et 74 q/ha pour la modalité WW et leurs moyennes respectives sont de 69,23 q/ha et 74,36 q/ha. Dans un second temps, il est constaté que la variabilité des rendements obtenus sur la modalité non irriguée est moins forte à mesure que le rendement augmente (répartition des quartiles). Le test statistique de l'effet du régime hydrique sur le rendement (modèle linéaire à un facteur) donne une p-value très significative (***) puisqu'elle est de 4.815×10^{-8} .

Le panneau **B** de la **Fig.11** présente le rendement (q/ha) en fonction de la modalité (WD/WW) et ce pour la variété ANVERGUR. L'écart de rendement entre les deux modalités semble plus contrasté que pour l'ensemble des géotypes. Les valeurs médianes sont de 72 q/ha pour la modalité WD et 83,5 q/ha pour la modalité WW et leurs moyennes respectives sont de 70,3 q/ha et 81,6 q/ha. L'interaction du niveau « ANVERGUR » du facteur variétal est significativement lié au facteur hydrique (p-value : 0.004781 (**)). Les rendements sont significativement différents suivant le régime hydrique. De manière plus globale, lorsque le rendement est expliqué par les deux facteurs en interactions et le facteur répétition, un coefficient de variation (CV) de 7,7 est obtenu, ce qui est correct. Par ailleurs, avec le même modèle, l'écart-type résiduel (ERT) est de 5,5, ce qui est aussi correct.

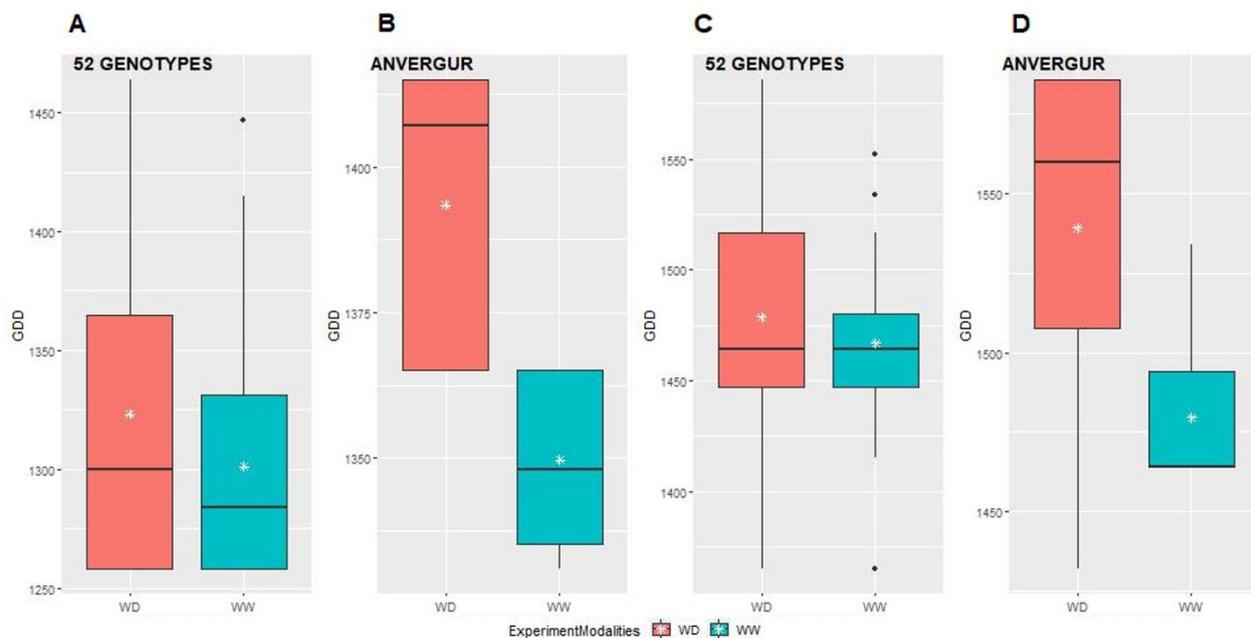


Figure 15 : Boxplots de la période à laquelle la culture atteint le stade BBCH ciblé. Les panneaux A et B correspondent au stade BBCH 55 (épiaison) et les panneaux C et D correspondent au stade BBCH 65 (floraison). Les panneaux A et C correspondent à une analyse intégrant l'ensemble des géotypes et les panneaux B et D correspondent à la variété ANVERGUR. Les boxplots de couleur rouge correspondent à la modalité WD et les boxplots de couleur bleu à la modalité WW. L'axe des X correspond au temps thermique et est donné en cumul de degrés jours ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{j}^{-1}$). Les étoiles blanches situées dans les boxplots correspondent à la moyenne.

3.3. Analyse du facteur hydrique sur le blé dur

3.3.1. Effet sur la phénologie

La **Fig.15** présente la date (en °C. j-1) à laquelle les génotypes atteignent le stade ciblé, à savoir le stade BBCH 55 (épiaison) et BBCH65 (floraison).

La **Fig.15-A** montre que les variétés qui ne subissent pas un stress hydrique (WW) atteignent le stade BBCH 55 (épiaison) de manière plus homogène et légèrement plus précoce. Les médianes sont légèrement plus faibles pour les variétés cultivées sans contrainte hydrique (WW) (WW : 1284 °C.j-1 contre WD : 1300 °C.j-1) tout comme les moyennes qui diffèrent légèrement (WW : 1301 °C.j-1 contre WD : 1323 °C.j-1). Il semblerait donc que le stress hydrique soit responsable d'un léger retard phénologique dans la modalité WD. Le besoin en degrés jours pour atteindre le stade BBCH55 est significativement différent en fonction du régime hydrique puisque la p-value = 0.001262.

Concernant la variété ANVERGUR (**Fig.15-B**) le contraste entre les deux modalités est plus marquant que sur l'ensemble des génotypes. La modalité WW obtient une valeur médiane de 1348 °C.j-1 et une moyenne de 1350 °C.j-1 contrairement à la modalité WD °C.j-1 qui obtient une valeur médiane de 1407 °C.j-1 et une moyenne de 1393°C.j-1. Le besoin en degrés jours d'ANVERGUR pour atteindre le stade BBCH55 est significativement différent en fonction du régime hydrique puisque la p-value = 0,001045.

En ce qui concerne le passage au stade BBCH65 (floraison), la **Fig.15-C** montre que les génotypes conduits dans la modalité WW semblent avoir une floraison plus homogène et très légèrement plus précoces que ceux conduits avec un régime hydrique limitant. Les médianes sont quasiment identiques (1464 °C.j-1) contrairement aux moyennes qui diffèrent légèrement (WW : 1467 °C.j-1 contre WD : 1479 °C.j-1). Statistiquement, le régime hydrique n'a pas d'influence sur la précocité de l'ensemble des génotypes, puisque la p-value est de 0,05396.

Pour la variété ANVERGUR, la **Fig.15-D** montre que le régime hydrique dans la modalité WW semblent plus précoces et plus homogènes que ceux conduits avec un régime hydrique limitant. Les médianes diffèrent fortement (WW : 1464 °C.j-1 contre WD : 1560 °C.j-1) tout comme les moyennes (WW : 1480 °C.j-1 contre WD : 1539 °C.j-1). Le besoin en degrés jours d'ANVERGUR pour atteindre le stade BBCH65 est significativement différent en fonction du régime hydrique puisque la p-value = 0.02123.

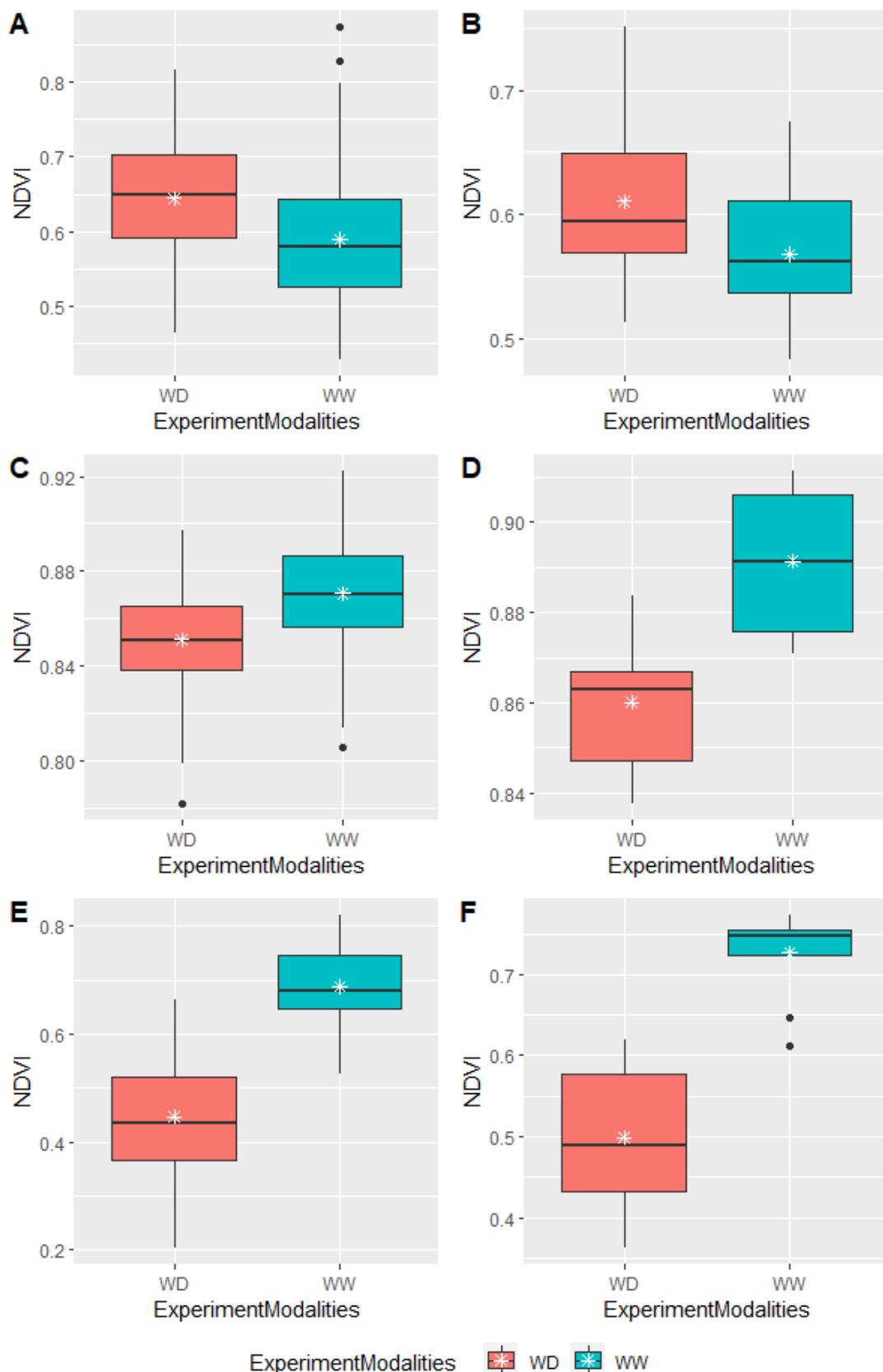


Figure 16 : Comparaison du NDVI en fonction du régime hydrique et de la période pour l'ensemble des géotypes et ANVERGUR. 3 dates sont étudiées : A et B le 18/03/2022 (833.5 °C.j-1), C et D le 05/05/2022 (1463.55 °C.j-1), E et F le 24/05/2022 (1832.4 °C.j-1). Les panneaux A, C et E traitent de l'ensemble des géotypes et B, D et F traitent la variété ANVERGUR. L'axe des X présente la valeur du NDVI. Les étoiles blanches situées dans les boxplots correspondent à la moyenne.

3.3.2. Effet sur la variable phénotypique NDVI

L'acquisition de la variable NDVI permet de suivre la cinétique de croissance et de sénescence du couvert végétal. L'objectif est d'observer s'il existe une différence de développement physiologique entre des variétés de blé dur cultivées sous deux régimes hydriques distincts. La **Fig.16** présente les données de NDVI à 3 périodes clefs du développement de la culture (basé sur la phénologie d'ANVERGUR) ;

- Le 18/03/2022 soit à 834°C.j-1 correspond à la montaison. Panneau **A** et **B**.
- Le 05/05/2022 soit à 1464°C.j-1 correspond à la floraison. Panneau **C** et **D**.
- Le 24/05/2022 soit à 1832°C.j-1 correspond au remplissage du grain. Panneau **E** et **F**.

La **Fig.16-A** montre que le NDVI des variétés cultivées dans la modalité WW est en moyenne plus faible (0,5896) que dans la modalité WD (0,6442). Statistiquement la différence de développement végétatif entre les deux modalités est significative (p-value de 3.688e-07). Visuellement la même tendance est observée en **Fig.16-B** concernant le NDVI de la variété ANVERGUR. Néanmoins, cette différence de développement n'est pas significative (p-value de 0,1629). De manière générale, il semblerait qu'à la sortie d'hiver (BBCH 29), les blés conduits en WD soient plus développés que ceux conduits en WW.

La **Fig.16-C** souligne un inversement de tendance par rapport à la date précédente. Le NDVI des variétés cultivées en WW semble légèrement plus élevé que celui des plantes conduites en WD. En effet, les variétés cultivées en WW ont un NDVI moyen de 0,8706 contre 0,8512 en WD. Cette observation peut être validée statistiquement puisque la p-value du test est de 4.531e-11. La **Fig.16-D** permet d'observer que la variété ANVERGUR est représentative de l'ensemble des variétés puisque la même tendance se dégage au niveau des moyennes (WW : 0,8913 et WD : 0,8601). L'observation est également validée statistiquement (p-value : 0.0003049). Globalement, pendant les floraisons, les variétés cultivées sans stress hydrique ont un NDVI plus important.

La **Fig.16-E** montre que le NDVI des variétés cultivées en WD est inférieur, puisque les moyennes observées sont de 0,4471 contre 0,6864 pour les variétés cultivées en WW. Statistiquement, l'effet du régime hydrique joue un rôle sur l'appareil végétatif de la culture puisque la p-value est inférieure à 2.2e-16. Sur la **Fig.16-F**, il est observable que le NDVI d'ANVERGUR est supérieur lorsqu'il est irrigué (NDVI moyen WW : 0.7266 et WD : 0.4991). A l'aide d'un test statistique, il est démontré que le facteur hydrique a un impact sur la physiologie d'ANVERGUR puisque la p-value associée est de 4.33e-05.

La **Fig.16** semble représentative du développement des variétés observées sur l'essai DUROSTRESS mené sur l'UE DiaScope. En effet, le printemps pluvieux a rendu complexe la différenciation hydrique précoce. Ce phénomène climatique pourrait être la cause de la différence de développement physiologique entre les modalités observées en début de saison. Par la suite, la tendance s'inverse et les plants irrigués sont significativement les plus développés. Il est aussi observable que la variété ANVERGUR est relativement représentative de l'ensemble des génotypes dès lors que son comportement au champ reste similaire à celui des autres variétés.

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
A Variety	51	4875.1	95.59	3.1359	7.979e-08 ***
ExperimentModalities	1	1523.5	1523.50	49.9802	7.927e-11 ***
Replication	2	1376.4	688.18	22.5765	3.617e-09 ***
Variety:ExperimentModalities	51	1464.7	28.72	0.9422	0.5868
Residuals	133	4054.1	30.48		

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
B ExperimentModalities	1	638.5	638.5	13.963	0.0018 **
Replication	2	378.9	189.4	4.143	0.0355 *
Residuals	16	731.6	45.7		

Figure 17 : Interprétation statistique des facteurs explicatifs de la variable rendement par le logiciel R-studio. Le panneau **A** présente une analyse globale prenant en compte l'ensemble des 52 génotypes. Le panneau **B** se focalise sur l'analyse de la variété ANVERGUR. Les facteurs étudiés sont : le facteur variétal (Variety), le facteur stress hydrique (ExperimentModalities), le facteur réplication (Replication) et l'interaction entre le facteur variétal et le facteur stress hydrique (Variety :ExperimentModalities).

Variété	Rendement	Groupe			
SCULPTUR	82	A	PT39_3_20	70,75	ABCD
ENTALIS	79	AB	FURIO CAMILLO	70,5	ABCD
MONASTIR	78,5	AB	EL4X_035	70,25	ABCD
RGT VOILUR	78	AB	PT39_18_20	70	ABCD
SEMIDOU	77,5	ABC	PT27_4_20	69,75	ABCD
NOBILIS	77,25	ABC	RELIEF	69,5	ABCD
CHAM1	76	ABC	PT40_6_20	69	ABCD
PT39_11_20	76	ABC	ICAVEVE	68,5	ABCD
ANVERGUR	75,95	ABC	RGT LEONDUR	68	ABCD
MARCO AURELIO	75,75	ABC	TE1203	68	ABCD
RGT AVENTADUR	75,5	ABC	SIMETO	67,25	ABCD
SARAGOLLA	75	ABC	TIREX	67,25	ABCD
EL4X_428	74,75	ABC	ZHAGARINE2	67	ABCD
MIRADOUX	74,75	ABC	PT40_1_20	66,5	ABCD
ATOUDUR	74,5	ABC	MAESTA	66	BCD
RD16411	74,5	ABC	EL4X_120	65,75	BCD
RD16433	74,5	ABC	FDN16DW0729	65,75	BCD
PLATONE	74,25	ABC	FDN16DW0758	65	BCD
VADIO	74,25	ABC	TE1401	64,75	BCD
FDN17DW0765	74	ABC	EL4X_427	64,25	BCD
KANAKIS	73,5	ABC	EL4X_464	61,25	CD
CER2046	73,25	ABC	EL4X_504	58,25	D
IRIDE	73,25	ABC	Modalité	Rendement	Groupe
RD16421	73,25	ABC	WW	74,33	A
CELTA	73	ABC	WD	69,33	B
RGT BRIKODUR	73	ABC	Réplication		
PT40_3_20	72,25	ABCD	1	76,63	A
FADO	72	ABCD	2	72,08	B
SANTUR	71,75	ABCD	3	71,8	B
CLAUDIO	71,3	ABCD	4	66,61	C

Tableau 1 : Classement des niveaux de facteurs étudiés par groupe d'homogénéité avec le test de Student-Newman-Keuls. Le tableau contient 3 parties présentant respectivement les résultats concernant le facteur variétal, le facteur stress hydrique et le facteur réplication. Seul les groupes ayant des lettres différentes présentent une différence significative.

3.4. Synthèse

3.4.1. Analyse synthétique

La **Fig.17** présente les résultats de l'analyse statistique mettant en évidence l'effet des facteurs ainsi que leurs interactions sur la variable rendement. La **Fig.17-A** montre que le rendement obtenu est significativement différent en fonction du facteur variétal, du facteur stress hydrique et du facteur réplication (p-values <0.01). En revanche, l'interaction entre le facteur variétal et le facteur stress hydrique n'est pas significatif. Cela signifie, que de manière individuelle ces facteurs influencent le rendement, mais que la combinaison de ces facteurs n'est pas explicative du rendement. La **Fig.17-B** se focalise quant à elle sur la variété ANVERGUR. Il est observable que le rendement de cette variété s'explique par le facteur stress hydrique (p-value : 0,0018). En revanche son rendement est aussi explicable par les répétitions (p-value : 0,0355).

Le **Tab.1** classe les niveaux de facteurs en fonction du rendement observé. Peu de variétés sont dissociables car beaucoup ont le même groupe d'homogénéité en commun. D'après ce classement, SCULPTURE est la plus performante (groupe A). La variété EL4X_464 est la seule représentante du groupe CD (< A et AB). La variété EL4X_504, quant à elle, obtient le moins bon classement avec la lettre D. Au vu de ce classement, il est délicat d'identifier les variétés les plus prometteuses en condition de stress hydrique. Par ailleurs, le **Tab.1** montre que les répétitions ne sont pas homogènes. En effet, les répétitions 1 et 2 correspondantes à la modalité WW n'appartiennent pas au même groupe d'homogénéité (A ≠ B), tout comme les répétitions 3 et 4 (WD) n'appartiennent pas au même groupe d'homogénéité (B ≠ C). Il est néanmoins observable que les répétitions 2 et 3 appartiennent de manière surprenante au même groupe d'homogénéité (B) malgré la différenciation hydrique. Cette différenciation hydrique a pourtant bien été soulignée puisque les deux niveaux du facteur hydrique (WW/WD) obtiennent bien des groupes d'homogénéité différents (A ≠ B).

3.4.2. Discussion et perspectives

L'analyse statistique des résultats a permis de contrôler que :

- (i) La quantité d'eau disponible par les plantes était différente dans les deux niveaux du facteur stress hydrique ;
- (ii) La différence de satisfaction hydrique dans les deux niveaux du facteur stress hydrique a ;
 - a. impacté la physiologie des plantes par modalité et pour ANVERGUR
 - b. impacté la phénologie des plantes par modalité et pour ANVERGUR
 - c. impacté le rendement par modalité et pour ANVERGUR

L'analyse statistique a aussi permis de mettre en avant la non-répétabilité des observations au sein des modalités puisque « l'effet bloc » est significatif. L'interprétation des résultats est donc sujette à caution, car même si nos données sont significatives en certains points, le risque de conclure à tort à une différence significative est élevé. Pour améliorer l'interprétation de l'essai, une troisième répétition serait nécessaire mais elle n'a pas pu être mise en place par souci d'espace au champ. L'expérimentateur en charge de l'essai a intégré 2 variétés de références 5 fois par répétition. Un tel dispositif devrait permettre de corriger les données obtenues par modèle statistique.

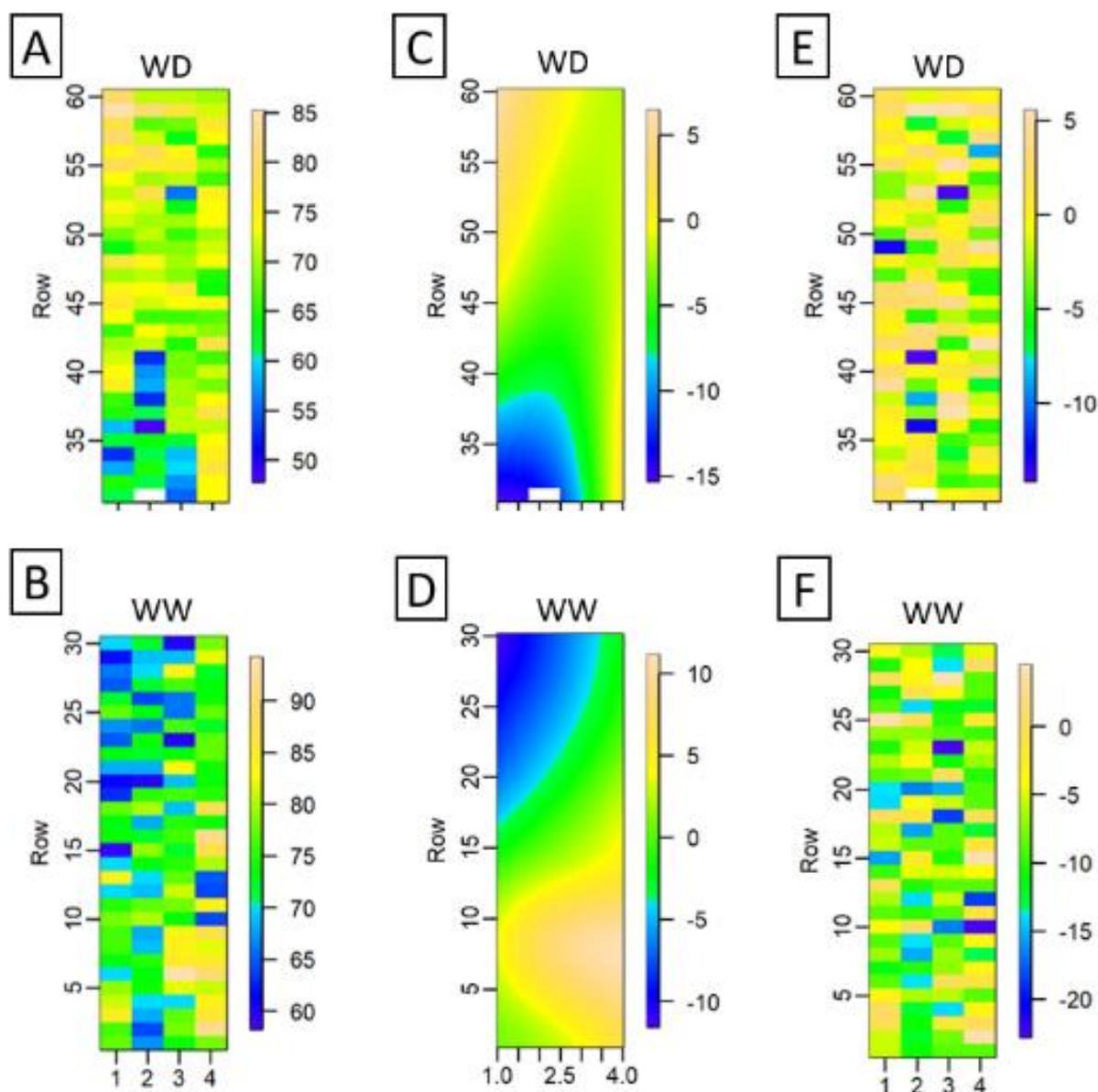


Figure 18 : Carte de fréquentation (heatmap) des rendements (q/ha) de l'essai DUROSTRESS. Pour l'ensemble des panneaux les rendements sont exprimés par un nuancier de couleurs. Le code couleur bleu correspond aux rendements les plus faibles et le code couleur orange pour les rendements les plus élevés. Les panneaux A, C et E traitent le niveau *WD* du facteur *stress hydrique* tandis que les panneaux B, D et F présentent le niveau *WW* du facteur *stress hydrique*. Les panneaux A et B présentent les rendements observés à la récolte de l'essai. Les panneaux C et D font ressortir les tendances de rendement dans l'espace. Les panneaux E et F présentent les rendements corrigés (théorique) par un modèle intégrant la position des plots dans l'espace et l'effet de l'environnement (non désiré) sur le plot.

La **Fig.18** présente une « heat-map », ou carte de fréquentation en français, de l'essai DUROSTRESS. Elle fait correspondre l'intensité d'une grandeur variable (le rendement) à un nuancier de couleurs. En effet, les couleurs les plus froides (bleu) correspondent aux rendements les plus faibles tandis que les couleurs les plus chaudes (orange) représentent les zones les plus productives.

Les **Fig.18 -A** et **Fig.18 -B** sont créés à partir des données réelles de l'essai. Il est observable que le rendement obtenu dépend en partie de la position géographique du plot dans l'essai et que la gestion de la satisfaction hydrique n'intervient que peu sur la variable.

Les **Fig.18 -C** et **Fig.18 -D** font ressortir de manière hypothétique les productions moyennes par zone. Deux zones bleu foncé ressortent et correspondent à l'emplacement des répliques 2 et 3. Ces répliques ont obtenu le même groupe d'homogénéité « B » (cf 3.4.1) malgré la présence de deux modalités. Sur le même principe, il est observable que deux zones plus productives se trouvent aux extrémités de l'essai et présentent des résultats similaires en termes de rendement alors que le régime hydrique était totalement différent.

Les **Fig.18 -E** et **Fig.18 -F** présentent aussi le rendement par plot en fonction de l'espace en intégrant une corrélation du rendement par rapport au positionnement du plot. Il est observable que l'impact du positionnement du plot semble estompé et que le rendement observé semble davantage lié au facteur hydrique et au facteur variétal.

L'objectif n'est pas d'intégrer cette correction statistique dans nos modèles mais plutôt de souligner l'importance d'avoir mis en place, dès la conception de l'étude, un certain nombre de paramètres permettant de corriger l'impact de l'environnement sur les variables observées. L'expérimentation au champ est une étape indispensable pour évaluer et tester les agro-solutions de demain. Le champ n'est pas aussi facilement maîtrisable que le serait une chambre climatique mais lorsque suffisamment d'instruments, de témoins et de mesures sont intégrés, il devient possible d'exploiter correctement les données d'un essai.

D'après l'analyse synthétique (3.4.1), il semblerait que EL4X_504 (groupe D) soit la moins bien classée et qu'elle diffère statistiquement du groupe A et des sous-groupes AB et ABC. Que la variété EL4X_464 (groupe CD) soit plus performante que EL4X_504 mais moins productive que les variétés classées dans le groupe A et le sous-groupe AB. 8 variétés (MAESTA, EL4X_120, FDN16DW0729, FDN16DW0758, TE1401, EL4X_427, EL4X_464 et EL4X_504) sont donc statistiquement différentes de SCULPTUR (groupe A) mais pas des sous-groupes AB, ABC et ABCD.

Par conséquent, dans le contexte pédoclimatique présent il est envisageable d'écarter ces variétés de futurs programmes de sélection. Néanmoins, le facteur bloc étant significatif, il serait imprudent d'écarter ces génétiques élites avant d'avoir reproduit ces résultats. Le programme de sélection proposé par DUROSTRESS intègre l'élite des génétiques actuellement disponibles en blé dur, ainsi que les variétés les plus prometteuses. Cela pourrait expliquer, en partie, le fait que l'ensemble de ces 44 variétés (groupe A) soient performantes et non dissociables.

L'UE DiaScope de l'INRAE est un institut partenaire du projet DUROSTRESS, son rôle est de caractériser un ensemble de variables. Celles-ci sont nécessaires pour déterminer les variétés de blé dur les plus adaptées aux stress hydriques et thermiques afin de répondre au contexte climatique changeant. Les données issues de l'essai n'ont pas vocation à être analysées seules bien que les agents de l'INRAE vérifient leurs exploitabilités. En effet, elles seront par la suite intégrées dans une méta-analyse avec les données issues des autres sites français, italiens et portugais pour tenter de trouver des variétés de blé dur qui conservent un fort potentiel de production en condition de stress hydrique et thermique.

Bibliographie

- Barnabás B, Jäger K, Fehér A (2007) The effect of drought and heat stress on reproductive processes in cereals. *Plant Cell Environ* 0: 11–38
- Porte P, Brisson N, Gouache D (2010) Les causes du plafonnement du rendement du blé en France: d'abord une origine climatique. janvier 2010 17
- Simmelsgaard SE (1976) Adaptation to Water Stress in Wheat. *Physiologia Plantarum* 37: 167–174
- F Tardieu, N Katerji, O Bethenod, P Hamard, P Quétin, et al. (1990). Relations entre l'état hydrique du sol, le potentiel de base et d'autres indicateurs de la contrainte hydrique chez le maïs. *Agronomie*, EDP Sciences, 10 (8), pp.617-626.
- Tate EL, Gustard A (2000) Drought Definition: A Hydrological Perspective. In JV Vogt, F Somma, eds, *Drought and Drought Mitigation in Europe*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp 23–48
- Yuan XK, Yang ZQ, Li YX, Liu Q, Han W (2016) Effects of different levels of water stress on leaf photosynthetic characteristics and antioxidant enzyme activities of greenhouse tomato. *Photosynth* 54: 28–39 (Drought is considered as the main environmental factor limiting plant development and yield worldwide and it becomes increasingly severe in some regions due to the changes in the global climate.)
- Mélanie Makarovsky (2019). Phénotypage de la tolérance aux stress du blé. *Sciences du Vivant [q-bio]*. <dumas-02395749>
- Döring TF, Reckling M (2018) Detecting global trends of cereal yield stability by adjusting the coefficient of variation. *European Journal of Agronomy* 99: 30–36 (Sous un climat instable, la stabilité de la production est un critère important dans la sélection des génotypes adaptés)
- FranceAgriMer (2020) Marché du blé dur - France, Union européenne, Monde (2019-2020). 5-6
- Arvalis institut du vegetal (2013) Teneur en proteines des bles : relever le double defi agronomique et economique.
- Gate, Philippe & Brisson, Nadine & Gouache, David. (2010). Les causes du plafonnement du rendement du blé en France : d'abord une origine climatique. *Comptes-Rendus de l'Académie d'Agriculture de France*. 96. 17.
- Pierre Martre, Jérémy Derory (2018) LE STRESS HYDRIQUE principal facteur limitant en Europe. *PERSPECTIVES AGRICOLES* 40
- Altenbach SB, DuPont FM, Kothari KM, Chan R, Johnson EL, Lieu D (2003) Temperature, Water and Fertilizer Influence the Timing of Key Events During Grain Development in a US Spring Wheat. *Journal of Cereal Science* 37: 9–20
- Araus JL, Cairns JE (2014) Field high-throughput phenotyping: the new crop breeding frontier. *Trends in Plant Science* 19: 52–61
- Ashe P, Shaterian H, Akhov L, Kulkarni M, Selvaraj G (2017) Contrasting Root and Photosynthesis Traits in a Large-Acreage Canadian Durum Variety and Its Distant Parent of Algerian Origin for Assembling Drought/Heat Tolerance Attributes. *Front Chem* 5: 121
- Bowne JB, Erwin TA, Juttner J, Schnurbusch T, Langridge P, Bacic A, Roessner U (2012) Drought Responses of Leaf Tissues from Wheat Cultivars of Differing Drought Tolerance at the Metabolite Level. *Molecular Plant* 5: 418–429

El Keroumi IO Abderrahim, Dihazi A, Naamani K (1970) Use of Morpho-physiological Parameters and Biochemical Markers to Select Drought Tolerant Genotypes of Durum wheat. JPSP 01–07

Kulkarni M, Soolanayakanahally R, Ogawa S, Uga Y, Selvaraj MG, Kagale S (2017) Drought Response in Wheat: Key Genes and Regulatory Mechanisms Controlling Root System Architecture and Transpiration Efficiency. *Front Chem* 5: 106

Maçãs B., Gomes M.C., Dias A.S., Coutinho J. The tolerance of durum wheat to high temperatures during grain filling. In : Royo C. (ed.), Nachit M. (ed.), Di Fonzo N. (ed.), Araus J.L. (ed.). *Durum wheat improvement in the Mediterranean region: New challenges*. Zaragoza : CIHEAM, 2000. p. 257-261. (Options Méditerranéennes : Série A. Séminaires Méditerranéens; n. 40). Seminar on Durum Wheat Improvement in the Mediterranean Region: New Challenges, 2000/04/12-14, Zaragoza (Spain). <http://om.ciheam.org/om/pdf/a40/00600039.pdf>

Lobell DB, Schlenker W, Costa-Roberts J (2011) Climate Trends and Global Crop Production Since 1980. *Science* 333: 616–620

Reeves TG, Thomas G, Ramsay G (2016) Produire plus avec moins en pratique : le maïs, le riz, le blé. Organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture

Arias, A P, Bellouin N (2021) IPCC, Technical Summary. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani]. Cambridge Univ. Press, Cambridge; https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_TS.pdf.

Gate, P. (2015a). Changement climatique L'agriculture au coeur des débats. *Perspectives Agricoles*, 65–66.

Gate, P. (2015b). Changement climatique : des solutions efficaces pour gérer de nouveaux impacts. *Perspectives Agricoles*, 33–35.

Braun Philippe, & Jezequel Stéphane. (2011). Le blé dur malmené, les pratiques doivent évoluer. *Terre Net*. <https://www.terre-net.fr/observatoire-technique-culturelle/strategie-technique-culturelle/article/changement-climatique-ble-dur-impact-rendement-217-68709.html>

Touzy G, Rincent R, Bogard M, Lafarge S, Dubreuil P, Mini A, Deswarte J-C, Beauchêne K, Le Gouis J, Praud S (2019) Using environmental clustering to identify specific drought tolerance QTLs in bread wheat (*T. aestivum* L.). *Theor Appl Genet* 132: 2859–2880

Lobell D, Burke M, eds (2010) *Climate Change and Food Security*. doi: [10.1007/978-90-481-2953-9](https://doi.org/10.1007/978-90-481-2953-9)

Abid M, Tian Z, Ata-Ul-Karim ST, Cui Y, Liu Y, Zahoor R, Jiang D, Dai T (2016) Nitrogen Nutrition Improves the Potential of Wheat (*Triticum aestivum* L.) to Alleviate the Effects of Drought Stress during Vegetative Growth Periods. *Front Plant Sci*. doi: [10.3389/fpls.2016.00981](https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00981)

Martre P, Quilot-Turion B, Luquet D, Memmah M-MO-S, Chenu K, Debaeke P (2015) Model-assisted phenotyping and ideotype design. *Crop Physiology*. Elsevier, pp 349–373

<https://www.passioncereales.fr/dossier-thematique/la-fili%C3%A8re-bl%C3%A9-dur-semoule-p%C3%A2tes-couscous-en-chiffres>

http://www.fiches.arvalis-infos.fr/fiche_accident/fiches_accidents.php?mode=fa&type_cul=1&type_acc=5&id_acc=67#:~:text=A%20partir%20du%20stade%20C3%A9pi,plus%20concern%20C3%A9es%20par%20ce%20risque

Annexes

Opérations	Date	
	WW	WD
Préparation	19/11/2021	19/11/2021
Semis	22/11/2021	22/11/2021
Levée	17/12/2021	17/12/2021
Récolte	20/06/2022	20/06/2022
Longueurs parcelles au semis en m	7	7
Instrumentation	07/12/2021	07/12/2021
	07/12/2021	07/12/2021
Traçage allées	08/04/2022	08/04/2022
	05/05/2022	05/05/2022
Désh. Chim. Atlantis pro : 1,5l/ha Pointer ultra sx : 30g/ha Trs 2 : 0,5l/ha	25/02/2022	25/02/2022
Fertilisation N1 60U (AC Smart 46% 130 kg/ha ; AB Nexus35)	22/02/2022 Smart 46	22/02/2022 Smart 46
Fertilisation N2 60U (AC Smart 41% + 12% Soufre 130 kg/ha)	12/04/2022	12/04/2022
Fertilisation N3 20U Fertimix (37-0-0 + SO3 19)	04/05/2022	04/05/2022

Tableau 2 : ITK mis en place sur l'essai DUROSTRESS

Irrigations DUROSTRESS			
WW			WD
Date	Temps thermique (dj)	Quantité d'eau apportée (mm)	Quantité d'eau apportée (mm)
10/02/2022	460,85	15	15
01/03/2022	663,8	15	5
09/03/2022	722,15	15	0
13/04/2022	1114,75	15	5
22/04/2022	1244	10	0
29/04/2022	1364,75	15	0
06/05/2022	1480,25	15	5
12/05/2022	1586,45	15	0
16/05/2022	1663,3	15	0
20/05/2022	1746,85	20	0
25/05/2022	1854,1	0	15
Total		150	45

Tableau 3: Quantité d'eau (en mm) apportée par rampe d'irrigation en fonction de la modalité et de la date.