

Quelles améliorations des méthodes de sélection du blé tendre d'hiver pour répondre aux contraintes climatiques et à l'interaction G×E ?

Étude de la sénescence de la dernière feuille, de la durée du remplissage du grain et de leurs relations avec le rendement

Encadrants : Rémi Perronne, Bernard Rolland
Equipe MVI



Konilo Zio
Stage M1 (été 2021)





1. Contexte et questions de recherche
 1. Sélection pour le rendement en faibles intrants
 2. Evitement des chaleurs échaudantes



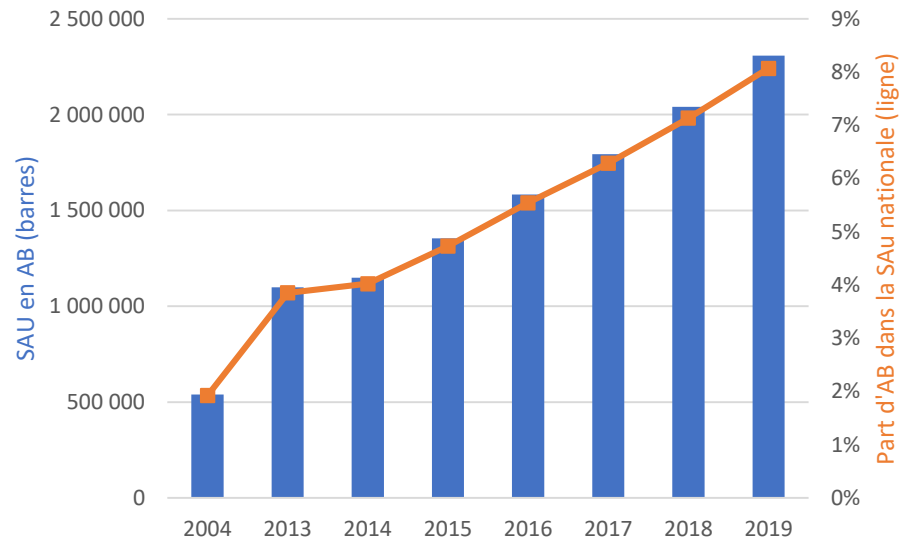
2. Matériel & méthodes



3. Résultats & discussion
 1. Sélection pour le rendement en faibles intrants
 2. Evitement des chaleurs échaudantes



4. Conclusions & perspectives



D'après Agence BIO
(2020b)

- **Demande** croissante en aliments bio

(Agence BIO, 2020a)

- **Actions publiques** favorables à la réduction de l'usage d'intrants de synthèse : plans Ecophyto, retraits de matières actives, etc.

(Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 2013, 2019 et 2021b)

→ **Les systèmes économes en intrants de synthèse se développent**

En systèmes économes en intrants, les intrants ne contrôlent pas autant la **fertilité et les pressions biotiques** qu'en conventionnel



Les **spécificités pédoclimatiques et épidémiologiques locales** transparaissent davantage



Plus d'**hétérogénéité spatiotemporelle**

Problème 1 : Interactions génotype × environnement (IGE) plus prononcées et rendement des variétés plus variables en systèmes économes intrants

- De longues **DVFD** et **DRG** pourraient être favorables au rendement
 - Le **stay green** augmente le rendement en allongeant la période photosynthétique
(Christopher et al., 2016 ; Reynolds et al., 2000 ; Gregersen et al., 2008 ; Gong et al., 2005)
 - Le rendement serait positivement corrélé à la **DRG** selon certains (Almeida et Lidon, 2009 ; Monpara, 2011) mais pas selon d'autres (Mabire, 2014)
- La **sélection indirecte** pourrait alors être permettre de réduire les IGE sur le rendement. Mais plusieurs conditions :
 - **Corrélation** étroite entre caractère secondaire et caractère d'intérêt
 - Caractère secondaire **plus héritable** que le celui d'intérêt
(donc moins affecté par les IGE, d'où l'intérêt de la sélection indirecte)
(Araus et al., 2008 ; Galais, 2015 ; Fischer et al., 2018)

Question 1 : La sélection indirecte du rendement via la DVFD et/ou la DRG pourrait-elle faciliter l'obtention de lignées plus productives ?

Hypothèse 1.1 :

La DRG et la DVFD seules ne permettent pas de sélectionner indirectement pour le rendement car elles ne sont pas assez corrélées au rendement.

Mabire (2014)

Hypothèse 1.2 :

Un modèle de régression comprenant la DVFD et/ou la DRG associées à des covariables (maladies foliaires, notamment) permet d'expliquer davantage le rendement que la DVFD et la DRG seules, autorisant ainsi une sélection indirecte du rendement

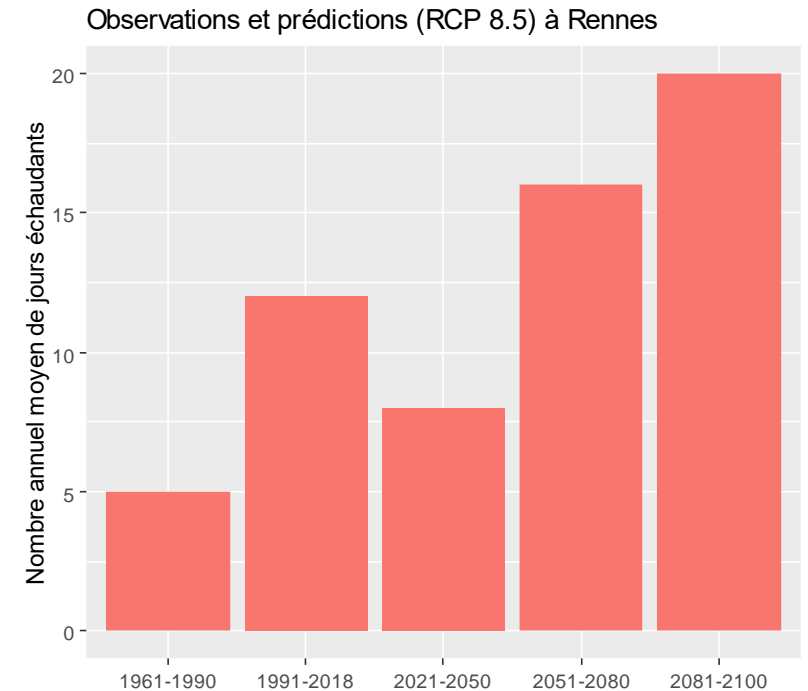
Échaudage thermique :

- Causé par des $T_{max} \geq 25^{\circ}\text{C}$ pendant le remplissage du grain (Gate, 1995)
- **Préjudiciable pour le rendement** via le PMG (Ligneau et al., 2020 ; Beauvais et al., 2019 ; Almeida et Lidon, 2009 ; Dias et Lidon, 2009)
- A causé, avec la sécheresse, des pertes supplémentaires de 1,5 à 2 qt/ha entre 1955-80 & 1981-05 (Gate et al., 2008)

Problème 2 : Le changement climatique pourrait augmenter le nombre de jours échaudants

↳ = nombre de jours à $T_{max} \geq 25^{\circ}\text{C}$ pendant le remplissage

- **Leviers agronomiques limités** (e.g. semis précoces) : risque de salissement, plus grande exposition aux pucerons d'automne, etc.
→ L'évitement temporel permis par des **variétés précoces à maturité** est le 1^{er} levier (Gate et al. 2007 ; Gouache, 2013 ; Beauvais et al., 2019 ; Ligneau et al., 2020)



(Adapté de Ligneau et al., 2020)

Maturité physiologique *stricto sensu* rarement notée (mesures destructives lourdes)



Question 2 : La sélection indirecte de la précocité à maturité physiologique via la DVFD, la DRG ou leurs composantes pourrait-elle participer à l'obtention de lignées capables d'éviter les chaleurs échaudantes actuelles et à venir ?

Hypothèse 2.1 :

Il existe, parmi les lignées à l'étude, des phénotypes suffisamment précoces à maturité physiologique (col jaune) pour éviter les chaleurs échaudantes

Hypothèse 2.2 :

Sélectionner pour une épiaison et/ou une fin de sénescence de la feuille drapeau (FSFD) précoces permet d'aboutir à des variétés précoces à maturité physiologique (col jaune)



Essais à l'étude en 2020-2021 au Rheu

Essais

- 2007, 2012, 2013, 2014, 2021
- 2 à 3 essais IVD par an
- Au Rheu et/ou à Estrées-Mons
- Conduites : T, NT et/ou **FI**, selon l'essai

Matériel végétal

- 1000+ génotypes
- F6, series A1 et A2 (i.e. F9, F10 et F11) et témoins

Mesures et notations retenues

- Épiaison (°C-jours)
 - Fin de sénescence de la feuille drapeau (FSFD) (°C-jours)
 - Col jaune
Indicateur supposé de fin de remplissage et de maturité physiologique (°C-jours)
 - Maladies foliaires (rouille jaune)
 - Hauteur
 - Verse
 - Rendement
- Durée de vie de la feuille drapeau (DVFD)
 - Durée du remplissage du grain (DRG)



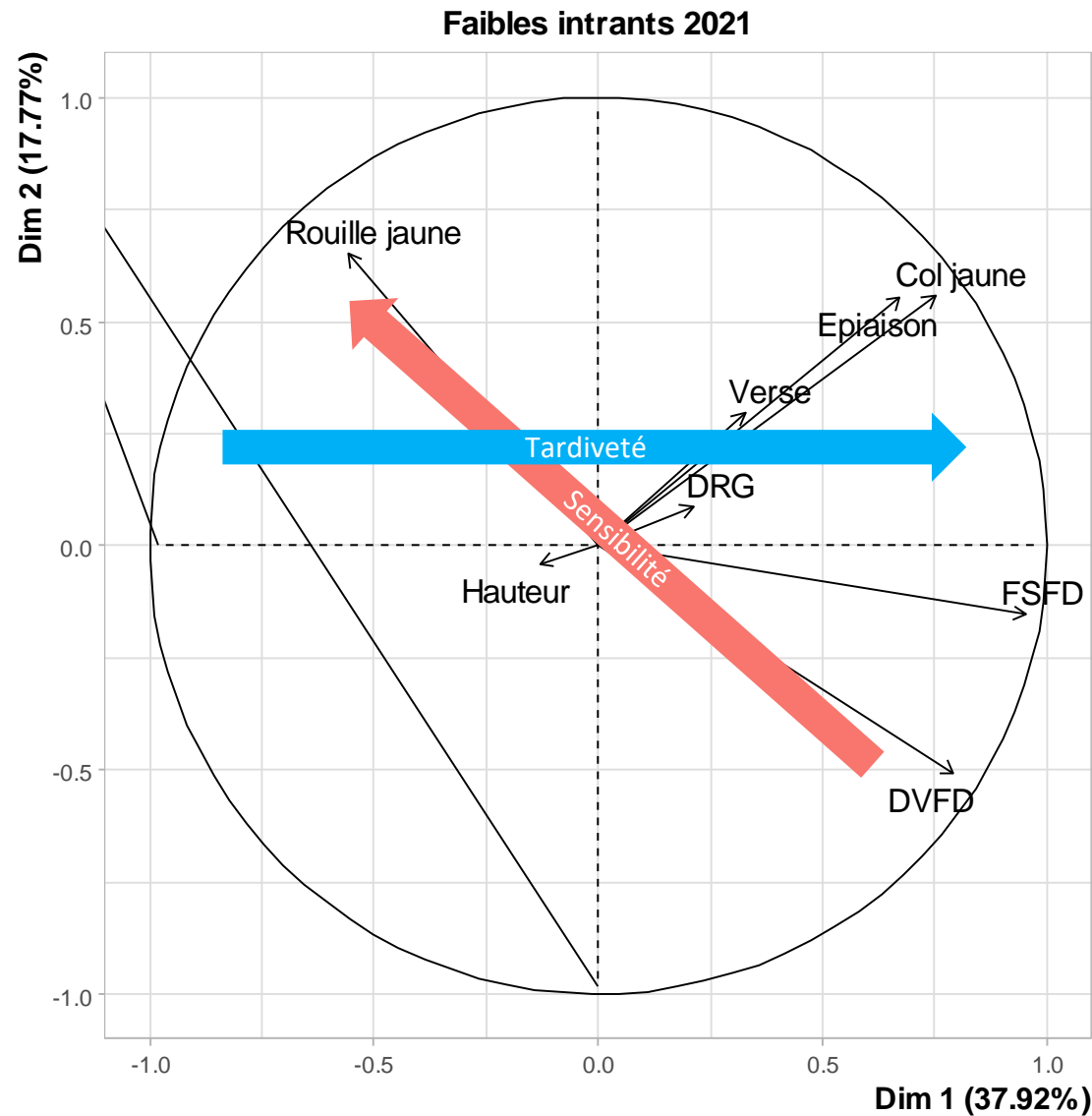
- Col jaune
- FSFD

Héritabilité

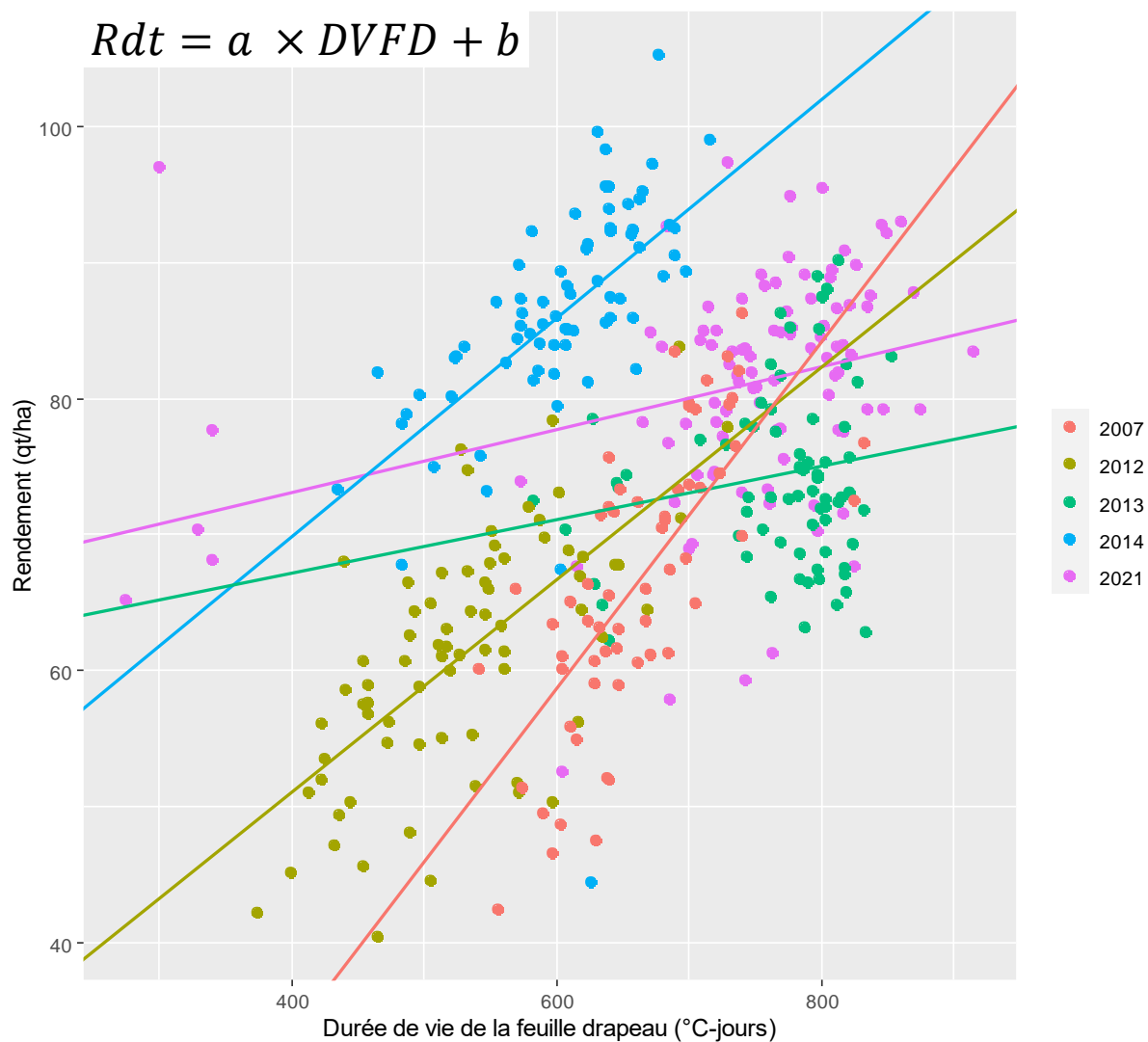
$$h^2 = \frac{\sigma_g^2}{\sigma_g^2 + \sigma_e^2}$$

Données météo réelles et simulées

- Météo 2000-2021 : Station météo INRAE (Le Rheu)
- Simulations 2022-2100 : scénario RCP8.5 (IPCC, 2013) adapté au Rheu par Météo France et le Centre National de Recherches Météorologiques (Météo France et al., 2021)

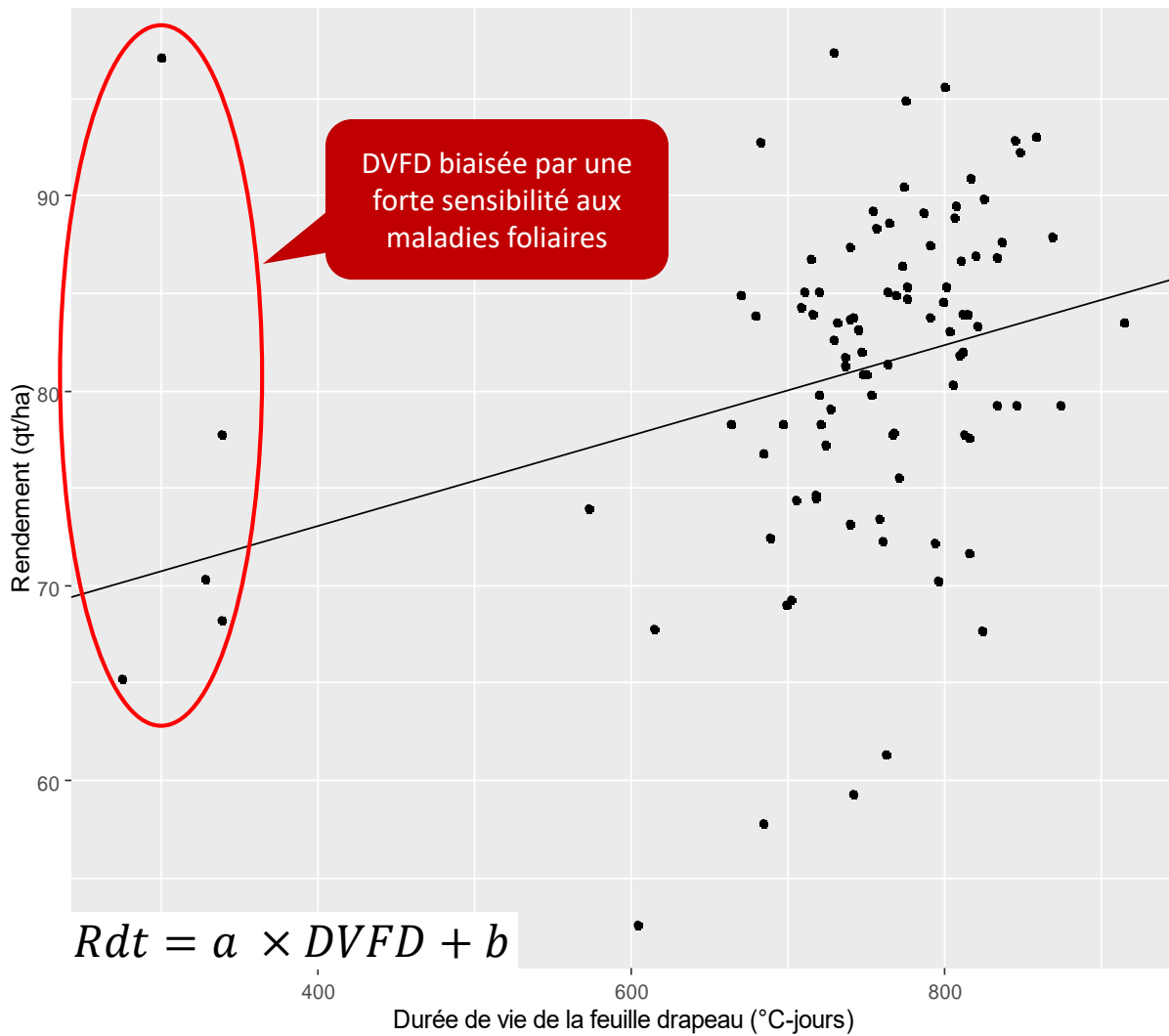


- **Rouille jaune & DVFD** négativement corrélées
- **FSFD & DVFD** positivement corrélées
- Mais pas de lien entre **DVFD & épiaison**
- **Épiaison et col jaune** positivement corrélés
- Hauteur, DRG et verse trop mal représentées

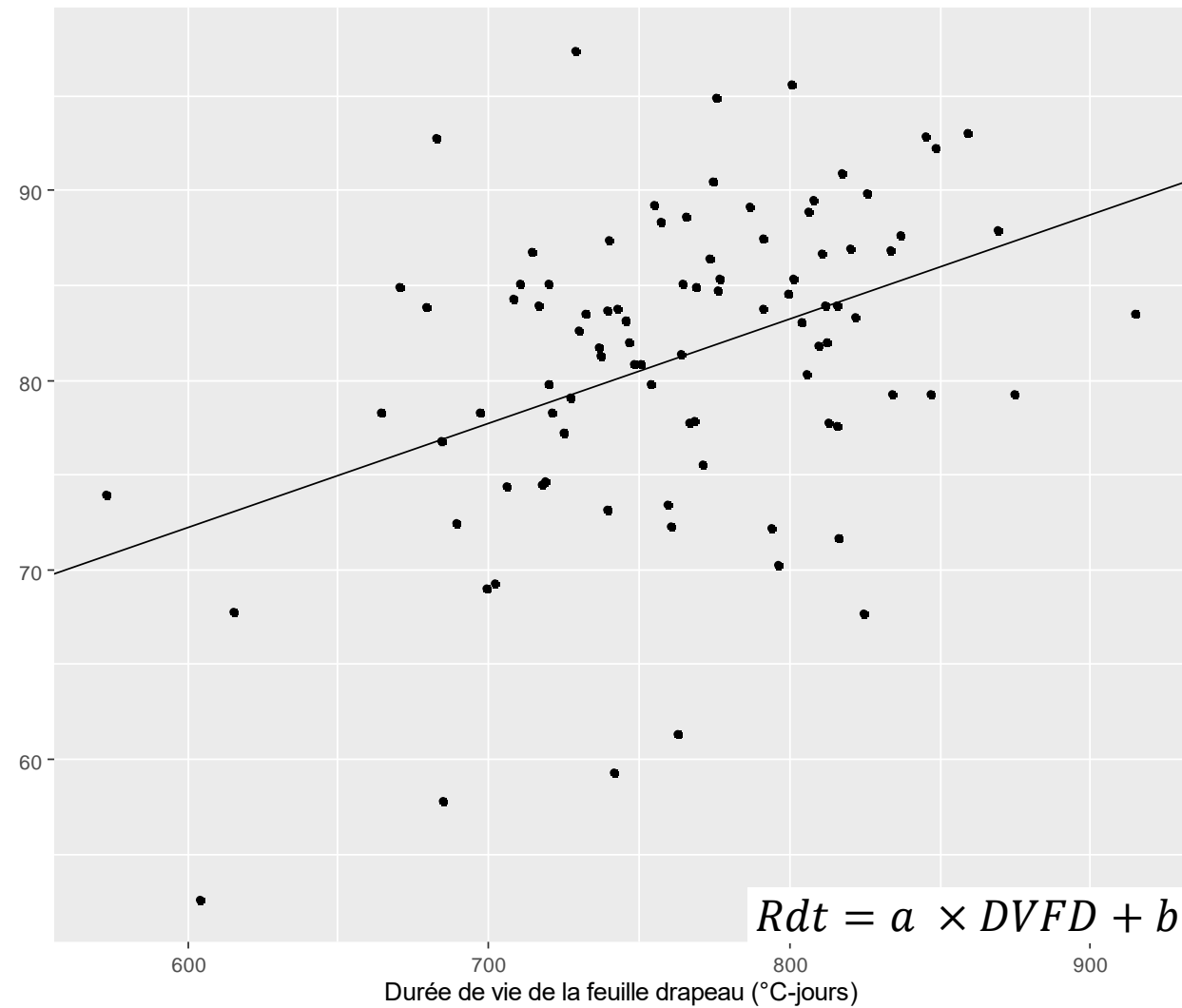


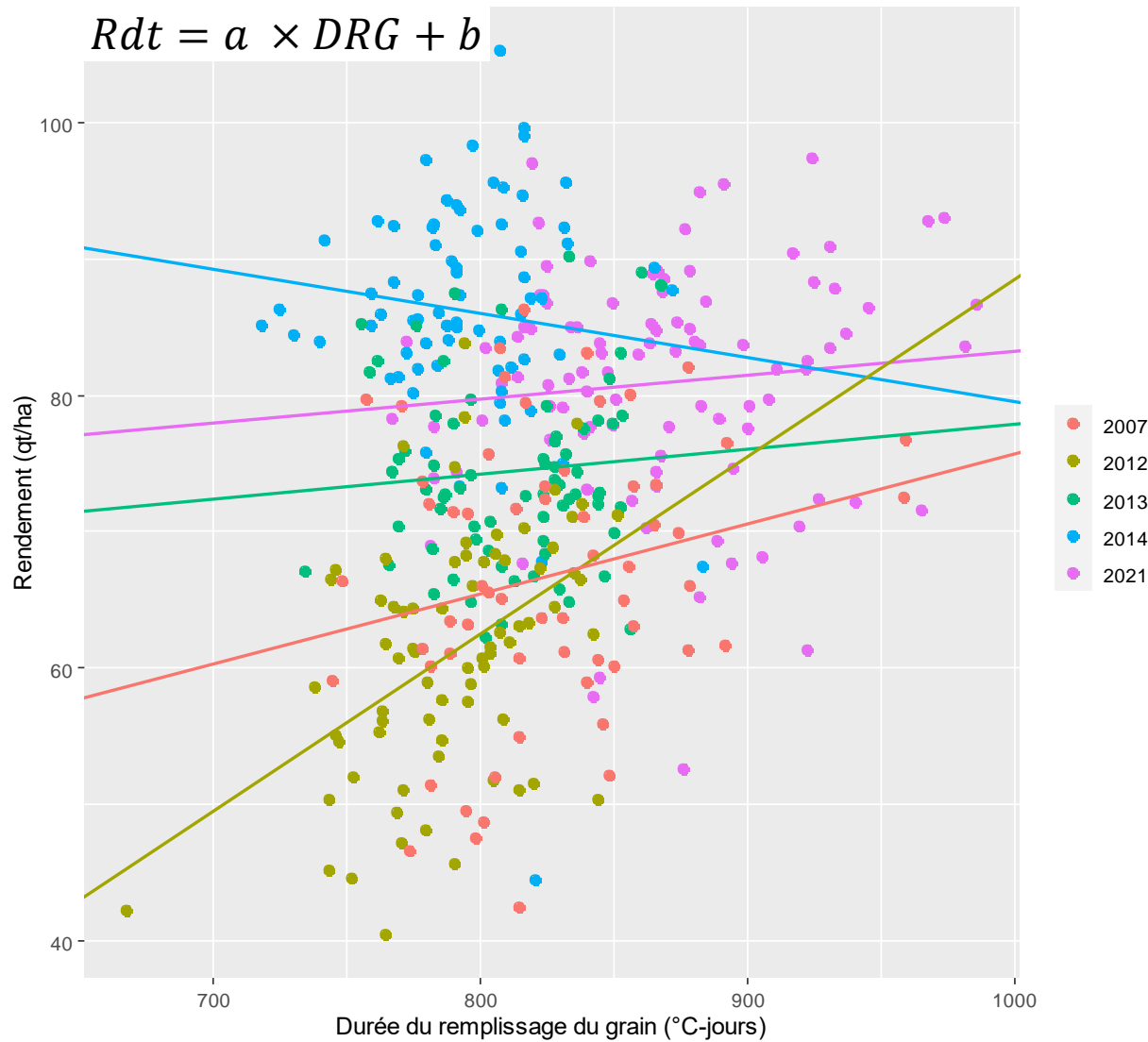
Année	Pente	R ²	p value
2007	0.13	0.51	7.8e-10
2012	0.078	0.42	3.6e-10
2013	0.02	0.029	0.14
2014	0.08	0.31	3.3e-7
2021	0.023	0.098	0.0018

2021, tous génotypes

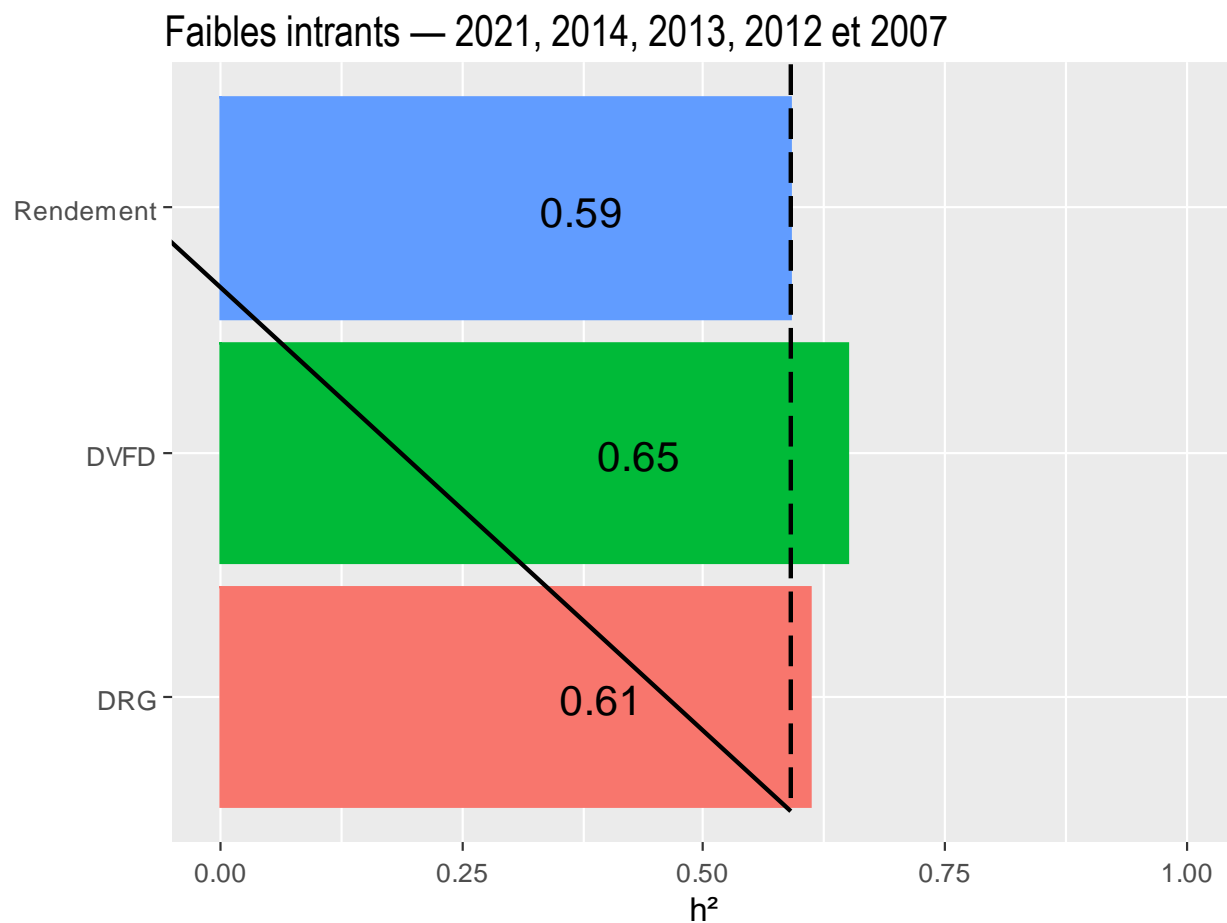
Pente=0.023, R²=0.098, p value=0.0018

2021, génotypes très sensibles aux maladies foliaires retirés

Pente=0.055, R²=0.16, p value=7.5e-05



Année	Pente	R ²	p value
2007	0.051	0.046	0.1
2012	0.13	0.21	4e-5
2013	0.018	0.0069	0.48
2014	-0.32	0.013	0.34
2021	0.017	0.01	0.33



- DRG et DVFD légèrement plus héritable que le rendement

- Héritabilités **légèrement supérieures**
- **DRG mal corrélée** au rendement
- DVFD davantage corrélée, mais **corrélation très variable** ($R^2 = 0.03$ à 0.5)

→ DVFD et DRG seules ne permettent pas une sélection indirecte : **hypothèse 1.1 validée**

Hypothèse 1.2 : Un modèle de régression comprenant la DVFD et/ou la DRG associées à des covariables permet d'expliquer davantage le rendement que la DVFD et la DRG seules, autorisant ainsi une sélection indirecte du rendement (H4)

Faibles intrants

	2007	2012	2013	2014	2021	2021*
R ²	NS	0.51	NS	0.44	0.14	0.16
ΔAIC		46		37	11	14
Modèle (coefficients et p value)						
Epiaison std. et std. ²						
FSFD std. et std. ²						
CJ std.		-0.23 *		-0.27 **		
CJ std. ²		-0.15 **		-0.3 ***		
DVFD std.		0.74 ***		0.52 ***	0.64 ***	0.74 ***
DVFD std. ²					0.13 *	
DRG std. et std. ²						
RJ std. et std. ²	NA	NA	NA	NA		
Hauteur std. et std. ²	NA	NA	NA	NA		
Verse std. et std. ²	NA	NA	NA	NA		

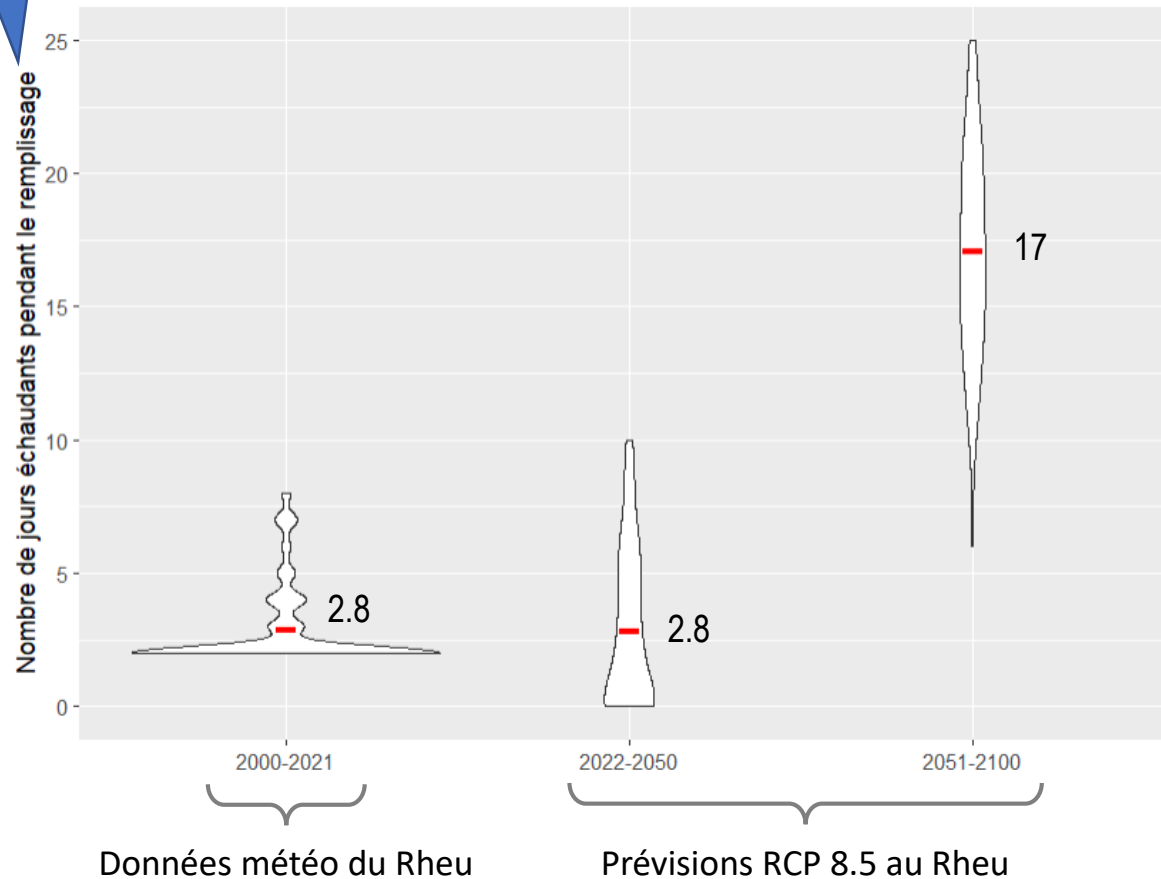
Génotypes très sensibles retirés

- Rouille jaune et DRG non sélectionnées
- Effet inattendu du CJ
- R² très variable interannuellement (0.14 à 0.51)

→ L'adjonction de ces covariables n'améliore pas suffisamment l'explication du rendement :
H1.2 invalidée

À phénologie égale
à celle de 2021

F9-F11 et témoins étudiés au Rheu en 2021



- Pas d'aggravement avant 2050
- Point d'inflexion après 2050
- 3 jours échaudants avant 2050, 17 entre 2051 et 2100

→ Les lignées étudiées auraient la capacité d'éviter les chaleurs échaudantes additionnelles à venir jusqu'à un certain point : **hypothèse 2.1 partiellement validée**

Hypothèse 2.2 :

Sélectionner pour une épiaison et/ou une fin de sénescence de la feuille drapeau (FSFD) précoces permet d'aboutir à des variétés précoces à maturité physiologique (col jaune)

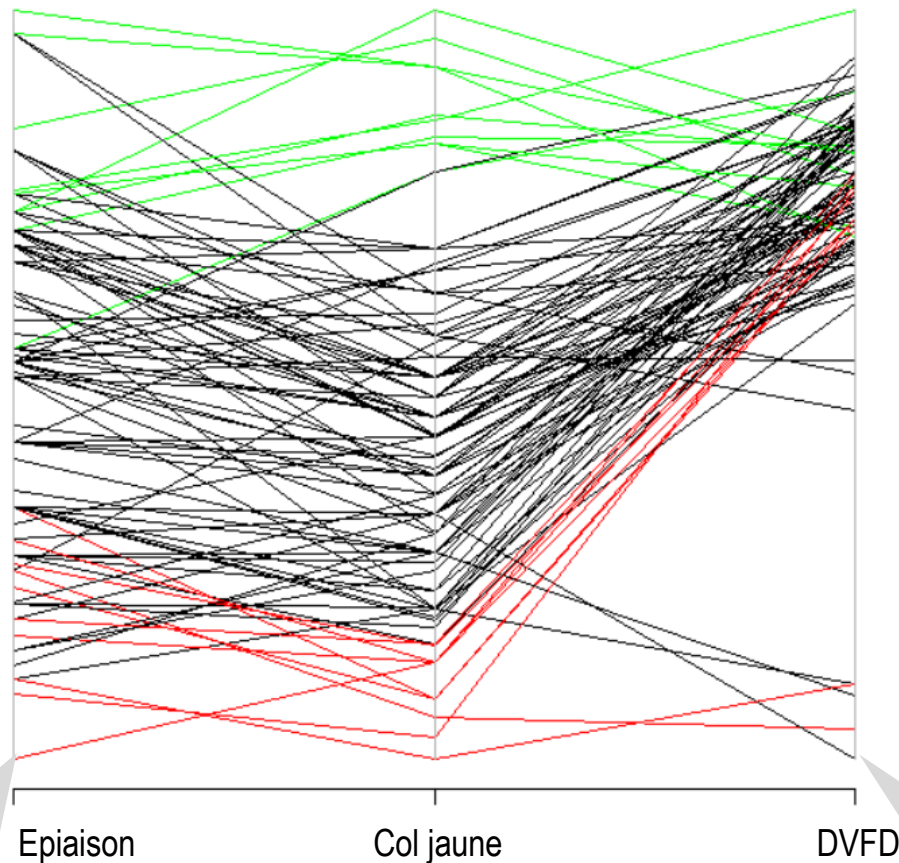
Caractère	Corrélation avec le col jaune r de Pearson (<i>p</i> value)
Épiaison	0.757 ***
FSFD	0.584 ***
DVFD	0.286 **
Hauteur	NS
Rouille jaune	NS
Verse	NS

Sélection de modèle de RLM via le C_p de Mallows

	R ²	0.6
	F	72
Modèle (coefficient, <i>p</i> value)	Epiaison	0.79 ***
	FSFD	
	DVFD	0.1 *

Faibles intrants, 2021

Faibles intrants, 2021



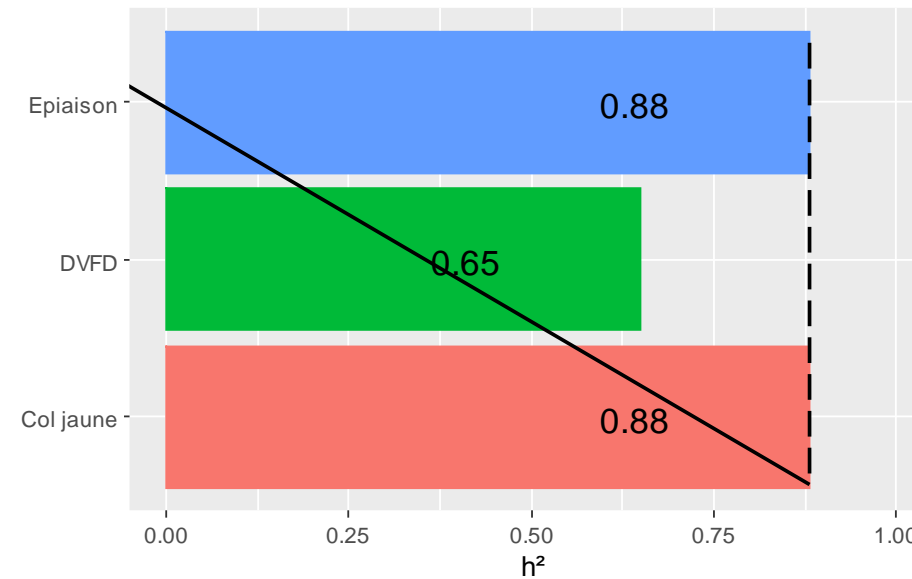
5 des 10 plus précoces au CJ font partie des 10 plus précoces à épiaison

PASS

2 des 10 les plus précoces au CJ font partie des 10 génotypes à la DVFD la plus courte

FAIL

Faibles intrants — 2021, 2014, 2013, 2012 et 2007



→ Une sélection indirecte du col jaune via l'épiaison semble possible : hypothèse 2.2 validée

Sélection pour le rendement en faibles intrants

- OK DVFD et DRG légèrement plus héritable que le rendement
 - X Mais pas assez bien corrélés au rendement
 - X Les covariables adjointes n'augmentent pas suffisamment l'explication du rendement
- En faibles intrants, la sélection directe du rendement reste à privilégier

Evitement des chaleurs échaudantes

- A phénologie constante, les génotypes étudiés subiront 17 jours échaudants en 2051-2100 vs. 3 aujourd'hui
- ⚠ Impact du changement climatique sur la phénologie à estimer
- La sélection indirecte de la précocité au col jaune via la précocité à épiaison semble envisageable
- ⚠ Précocité à épiaison et à maturité physiologique sont défavorables au rendement → compromis entre évitement et rendement ?

Dans les deux cas

Développer un **indicateur** fiable et facile d'accès de la **maturité physiologique** (col jaune ou autre ?)

Références

- Agence BIO. 2020a. « Le Bio, acteur incontournable de la souveraineté alimentaire ». <https://www.agencebio.org/wp-content/uploads/2021/07/AGENCE-BIO-JUILLET2021-V08-interactif.pdf>.
- . 2020b. « Les chiffres clés ». <https://www.agencebio.org/vos-outils/les-chiffres-cles/>.
- Almeida, Ana, et Fernando Lidon. 2009. « Evaluation of Grain Filling Rate and Duration in Bread and Durum Wheat, under Heat Stress after Anthesis ». *Journal of Agronomy and Crop Science* 195 (janvier) : 137-47. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2008.00347.x>.
- Araus, José Luis, Gustavo A. Slafer, Conxita Royo, et M. Dolores Serret. 2008. « Breeding for Yield Potential and Stress Adaptation in Cereals ». *Critical Reviews in Plant Sciences* 27 (6) : 377-412. <https://doi.org/10.1080/07352680802467736>.
- Beauvais, François, Olivier Cantat, Philippe Madeline, Patrick Le Gouée, Sophie Brunel-Muguet, et Mohand Medjkane. 2019. « Quelles conséquences du changement climatique sur le blé tendre en Normandie aux horizons 2050 et 2100 ? - Étude d'impact prospective à partir du modèle ALADIN-Climat ». *Climatologie* 16 : 129-60. <https://doi.org/10.4267/climatologie.1414>.
- Christopher, JT, MJ Christopher, AK Borrell, S Fletcher, et K Chenu. 2016. « Stay-green traits to improve wheat adaptation in well-watered and water-limited environments. » *Journal of Experimental Botany* 67 (17) : 5159-72. <https://doi.org/10.1093/jxb/erw276>.
- Dias, A. S., et F. C. Lidon. 2009. « Evaluation of Grain Filling Rate and Duration in Bread and Durum Wheat, under Heat Stress after Anthesis ». *Journal of Agronomy and Crop Science* 195 (2) : 137-47. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2008.00347.x>.
- Fischer, R. A., G. J. Rebetzke, R. A. Fischer, et G. J. Rebetzke. 2018. « Indirect selection for potential yield in early-generation, spaced plantings of wheat and other small-grain cereals: a review ». *Crop and Pasture Science* 69 (5) : 439-59. <https://doi.org/10.1071/CP17409>.
- Gallais, André. 2015. *Comprendre l'amélioration des plantes : Enjeux, méthodes, objectifs et critères de sélection*. Editions Quae. <http://univ.scholarvox.com/catalog/book/docid/88828933/>.
- Gate, Philippe. 1995. *Ecophysiologie du blé : De la plante à la culture*.
- Gate, Philippe, Anne Blondlot, David Gouache, Olivier Deudon, et Laurent Vignier. 2008. « Impacts du changement climatique sur la croissance et le développement du blé en France - Quelles solutions et quelles actions à développer ? » *Oléagineux, Corps gras, Lipides* 15 (5) : 332-36. <https://doi.org/10.1051/ocl.2008.0221>.
- Gate, Philippe, David Gouache, et Cécile Garcia. 2007. « Revoir dates et densité pour éviter la sécheresse ». *Perspectives Agricoles*, 2007. https://www.perspectives-agricoles.com/file/galleryelement/pj/82/fc/05/f0/337_6497531899562656901.pdf.
- Gong, Y.-H., J. Zhang, J.-F. Gao, J.-Y. Lu, et J.-R. Wang. 2005. « Slow Export of Photoassimilate from Stay-green Leaves during Late Grain-Filling Stage in Hybrid Winter Wheat (*Triticum aestivum* L.) ». *Journal of Agronomy and Crop Science* 191 (4) : 292-99. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2005.00173.x>.
- Gouache, David. 2013. « Etude sur les stratégies de lutte contre les stress climatiques dus au réchauffement par le biais de la précocité variétale », juin. https://www.researchgate.net/publication/240918775_Etude_sur_les_strategies_de_lutte_contre_les_stress_climatiques_dus_au_rechauffement_par_le_biais_de_la_precocite_varietale.
- Gregersen, P. L., P. B. Holm, et K. Krupinska. 2008. « Leaf senescence and nutrient remobilisation in barley and wheat ». *Plant Biology* 10 (s1) : 37-49. <https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.2008.00114.x>.
- IPCC. 2013. « AR5 Climate Change 2013: The Physical Science Basis ». Consulté le 16 août 2021. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>.
- Ligneau, Laurence, Sylvain Tilly, Franck Baraer, Vincent Dubreuil, et Bonnardot Valérie. 2020. « Observatoire du changement climatique pour l'agriculture : résultats préliminaires en Bretagne ». Dans *Changement Climatique et Territoires*. Sous la direction de Bonnardot V et Quénot H, 427-32. Changement Climatique et Territoires. Rennes, France : LETG UMR 6554 CNRS. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02936761>.
- Mabire, Clément. 2014. « Quelles améliorations des méthodes de sélection du blé tendre d'hiver pour répondre conjointement aux besoins des systèmes économes en intrants ? » ESITPA. Météo France, IPSL, CERFACS, et CNRM. 2021. « DRIAS, Les futurs du climat ». 2021. <http://www.drias-climat.fr/>.
- Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation. 2013. « Le plan Ecophyto 2018 ». 2013. <https://agriculture.gouv.fr/ministere/le-plan-ecophyto-2018>.
- . 2019. « Retraits des substances préoccupantes utilisées en agriculture en 2018 ». 2019. <https://agriculture.gouv.fr/retraits-des-substances-preoccupantes-utilisees-en-agriculture-en-2018>.
- . 2021. « Le plan Écophyto, qu'est-ce que c'est ? » 2021. <https://agriculture.gouv.fr/le-plan-ecophyto-quest-ce-que-cest>.
- Monpara, B A. 2011. « Grain filling period as a measure of yield improvement in bread wheat ». *Crop Improv.*, 7.
- Reynolds, M. P., M. I Delgado B, M Gutiérrez-Rodríguez, et A Larqué-Saavedra. 2000. « Photosynthesis of wheat in a warm, irrigated environment: I: Genetic diversity and crop productivity ». *Field Crops Research* 66 (1) : 37-50. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(99\)00077-5](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(99)00077-5).
- Rolland, Bernard, Antonin Le Champion, et François-Xavier Oury. 2012. « Pourquoi sélectionner de nouvelles variétés de blé tendre adaptées à l'agriculture biologique ? » *Courrier de l'environnement de l'INRA* 62 : 16.

Merci pour votre attention !

Des questions ?

Contact

konilo.zio@inrae.fr

LinkedIn



Konilo ZIO

Étudiant ingénieur agronome

UMR GQE | Agrocampus Ouest



[View profile](#)

Merci à mes encadrants, Rémi Perronne et Bernard Rolland, ainsi qu'à toute l'équipe MVI !



Annexes

Idéotype

- Stay green → + de photosynthèse
- Lorsque les stress abiotiques ne permettent plus la photosynthèse :
 - Remobilise rapidement → évite les accidents hydriques et thermiques avant la fin du remplissage du grain
 - Remobilise efficacement → indice de récolte élevé
- Remobilisation correcte même en l'absence de stress

Annexes

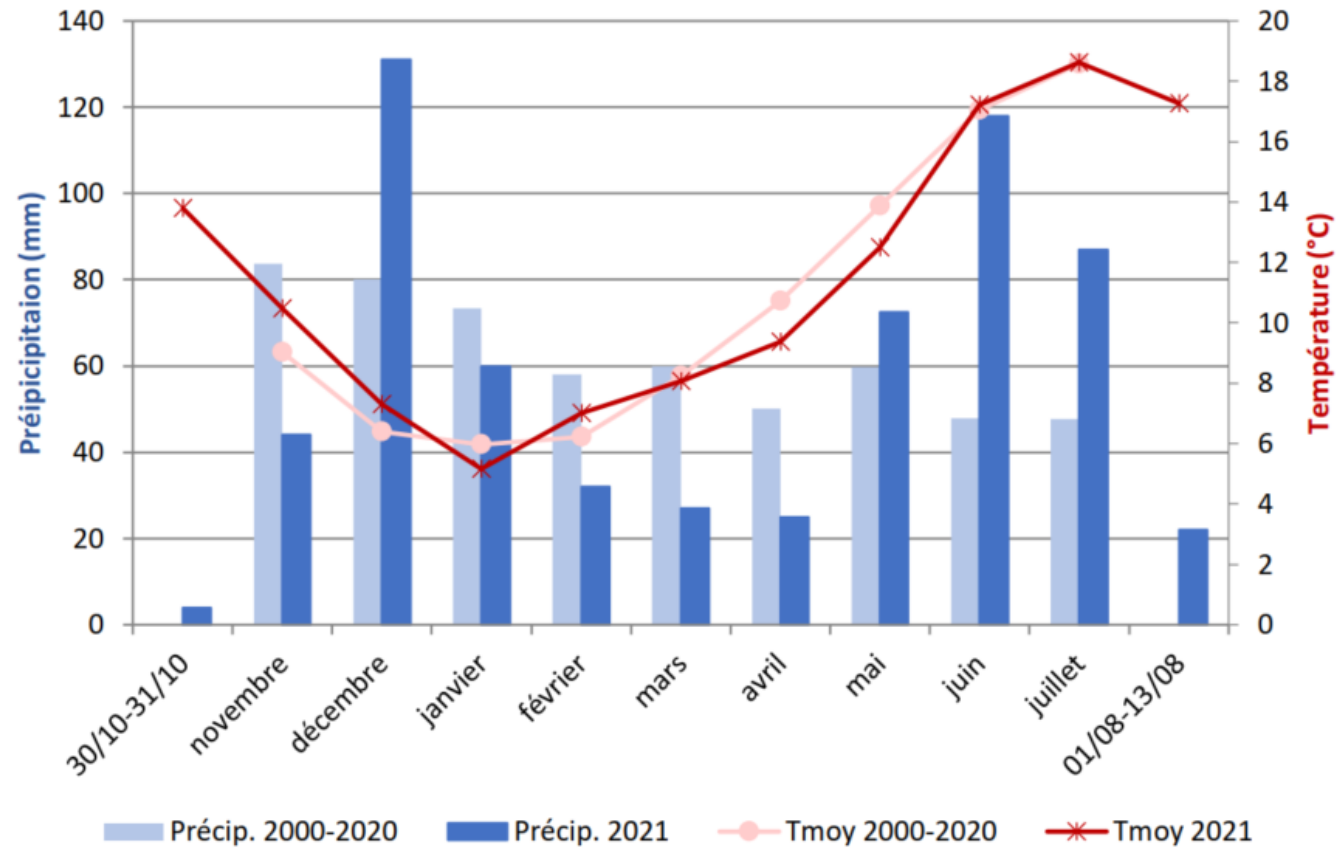


Figure 21. Données météorologiques de la campagne BTH 2020-2021 (30/10/2020-13/08/2021) au Rheu et données historiques.

Annexes

Annexe 7 – Historique des rendements des essais portants sur les génotypes avancés au Rheu

	Conduite	Rendement moyen (qt/ha)	Ecart T-FI (qt/ha)
2017	T	100	35
	FI	65	
2018	T	115	29
	FI	92	
2019	T	101	28
	FI	74	
2020	T	71	12
	FI	59	

Rendement — T, NT et FI — 2021

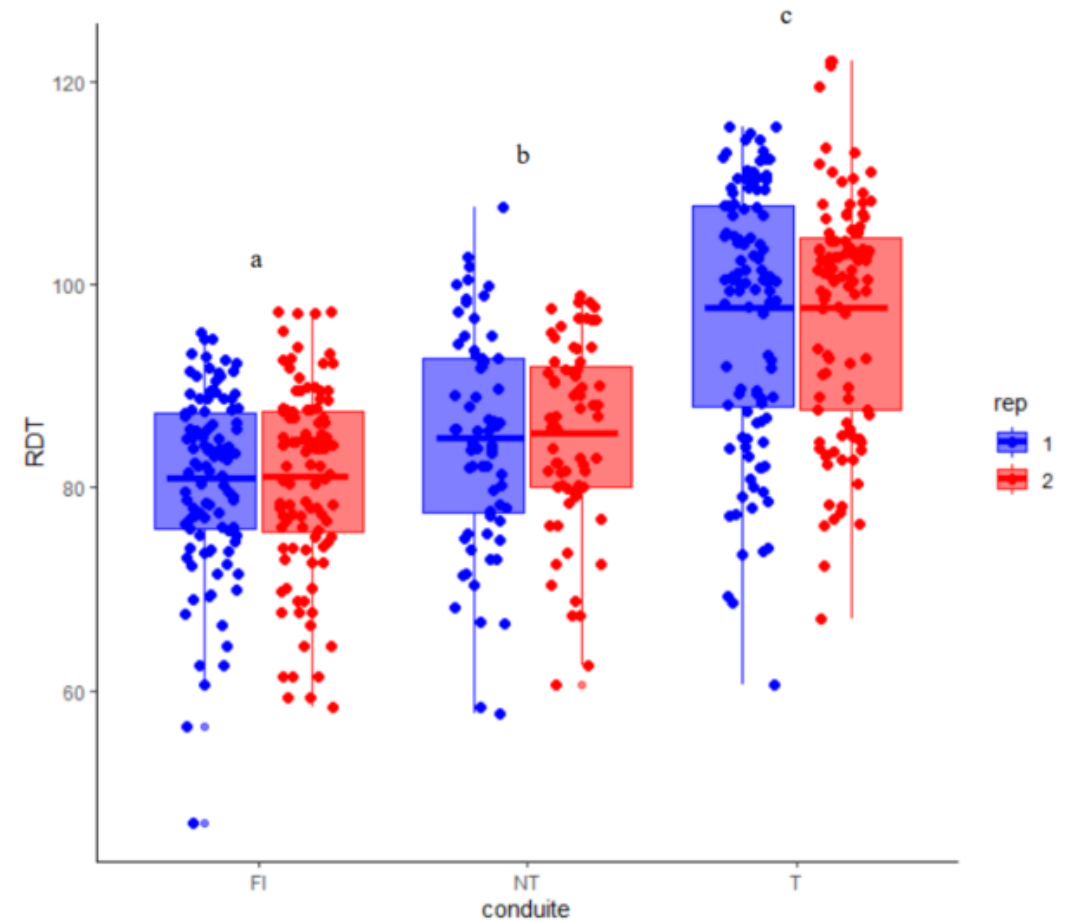
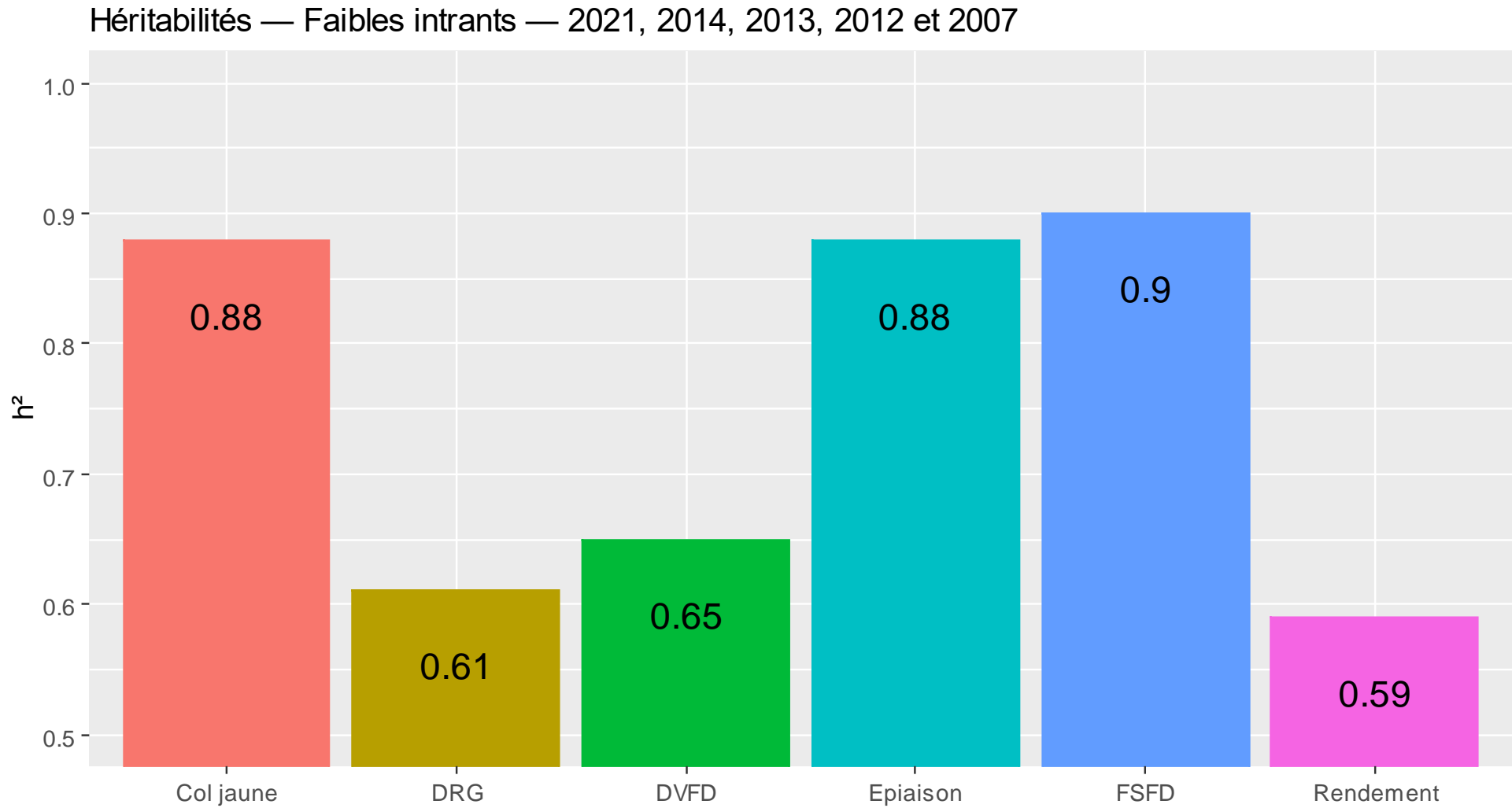


Figure 24. Distribution des rendements (RDT ; qt/ha) selon la conduite et la répétition (rep). (FI : faibles intrants ; NT : non traité ; T : traité). Les lettres minuscules représentent les groupes homogènes selon le test de Newman-Keuls ($\alpha=5\%$).

Annexes



Annexes

Héritabilités — T, NT et FI — 2021, 2014, 2013, 2012 et 2007

