

FsoV

ARVALIS
Institut du végétal

ao agri Obtentions
Semencier de l'agriculture durable

BASF

FLORIMOND
DESPREZ

SECOBRA
Recherches

INRAE
la science pour la vie, l'humain, la terre

John Innes Centre

Limagrain
de la terre à la vie

NIAB

IRAGT

syngenta

UNISIGMA
RECHERCHE & CRÉATION VARIÉTALE

FSOV 2016 N GIEC

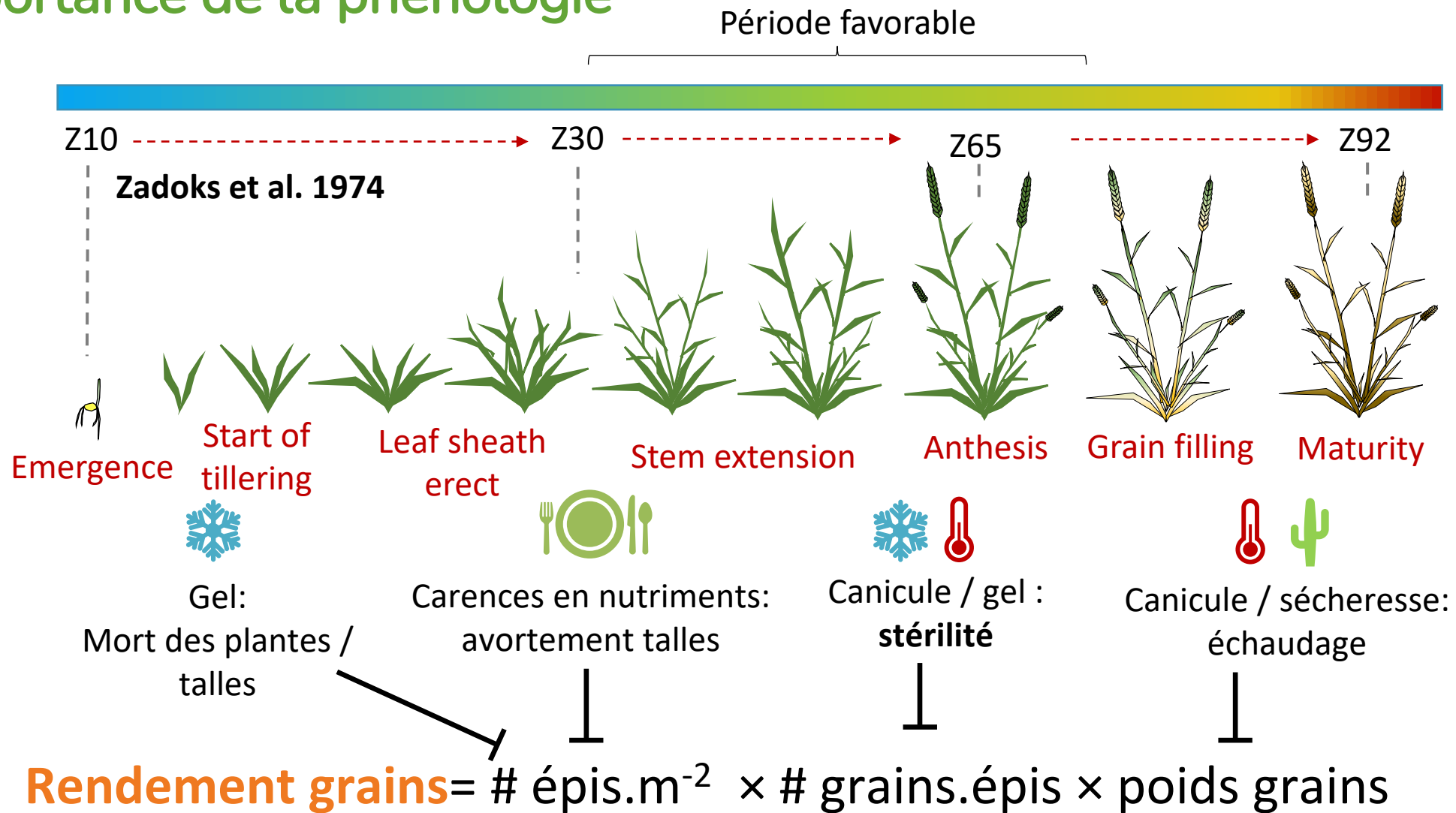
sélection assistée par marqueurs et modèles du stade épi à 1 cm pour des blés tendres adaptés au changement climatique

Matthieu BOGARD, Alison BENTLEY, Jacques LE GOUIS, Jérôme AUZANEAU, Simon GRIFFITHS, Jérôme ENJALBERT, Pascal GIRAUDEAU, Patrice SENELLART, Céline ZIMERLI, Céline DUQUE, Philippe LEREBOUR, Sébastien CAIVEAU, Ellen GOUEMAND



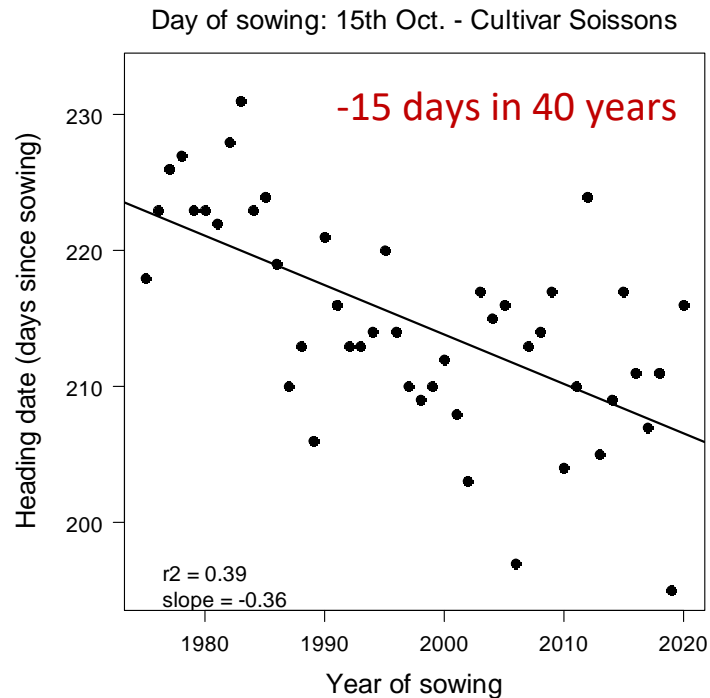
Introduction

Importance de la phénologie

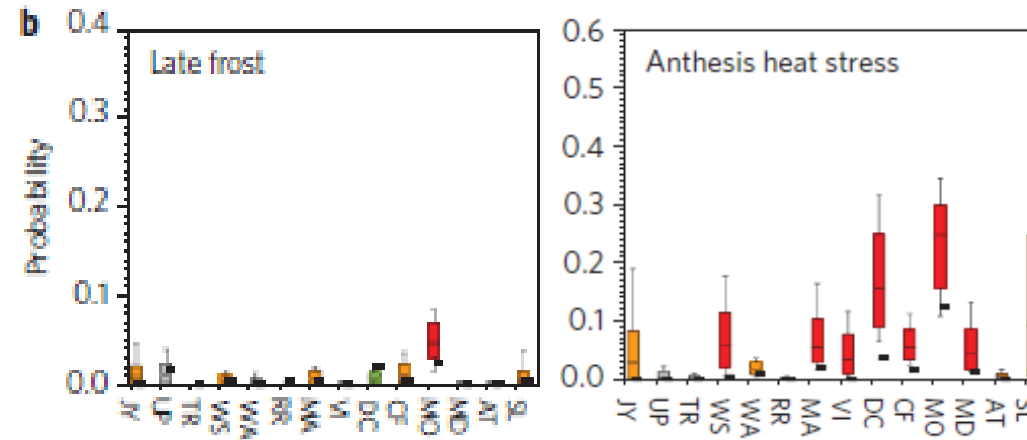


Introduction

Impacts des changements climatiques



Simulation of heading date for cultivar Soissons sown the 15th of Oct. From 1975 to 2020 at Boigneville, France.



Probability of frost and heat stress at anthesis (black rectangle 1981-2010; boxplots 2060 RCP8.5) for 14 locations in Europe (Trnka et al. 2014)

- Augmentation des **stress abiotiques** (gel d'épis, canicule, sécheresse) + **variabilité inter-annuelle** → positionnement période favorable?
- Accélération de la phénologie / diminution de la durée du cycle
→ **réduction de la durée d'interception de la lumière**



Introduction

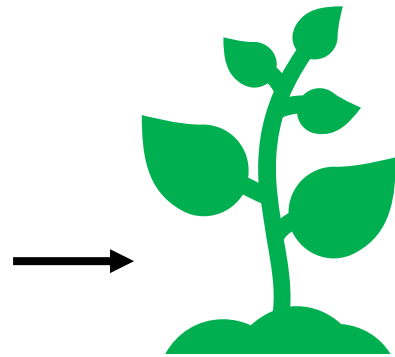
Le concept d'idéotype

Proposé par Donald (1968)

<https://csiropedia.csiro.au/Donald-Colin-Malcolm/>



Liste de caractères
morphophysiologiques
(dires d'experts)



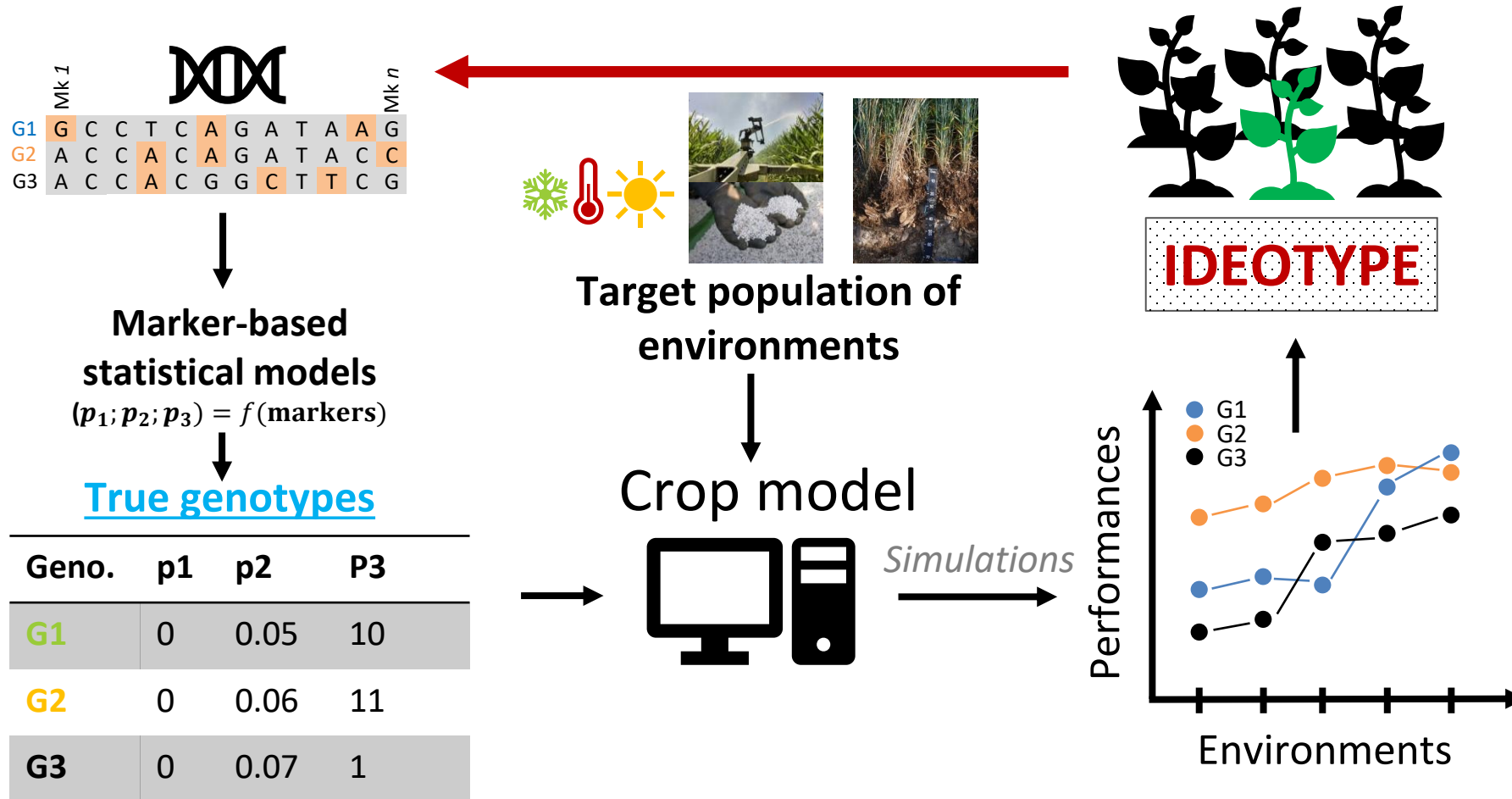
Ideotype

Création variétale



Introduction

Modèles écophysiologiques basés sur des marqueurs génétiques pour l'identification d'idéotypes



Introduction

Modèles écophysiologiques basés sur des marqueurs génétiques pour l'identification d'idéotypes

- **Avantages**

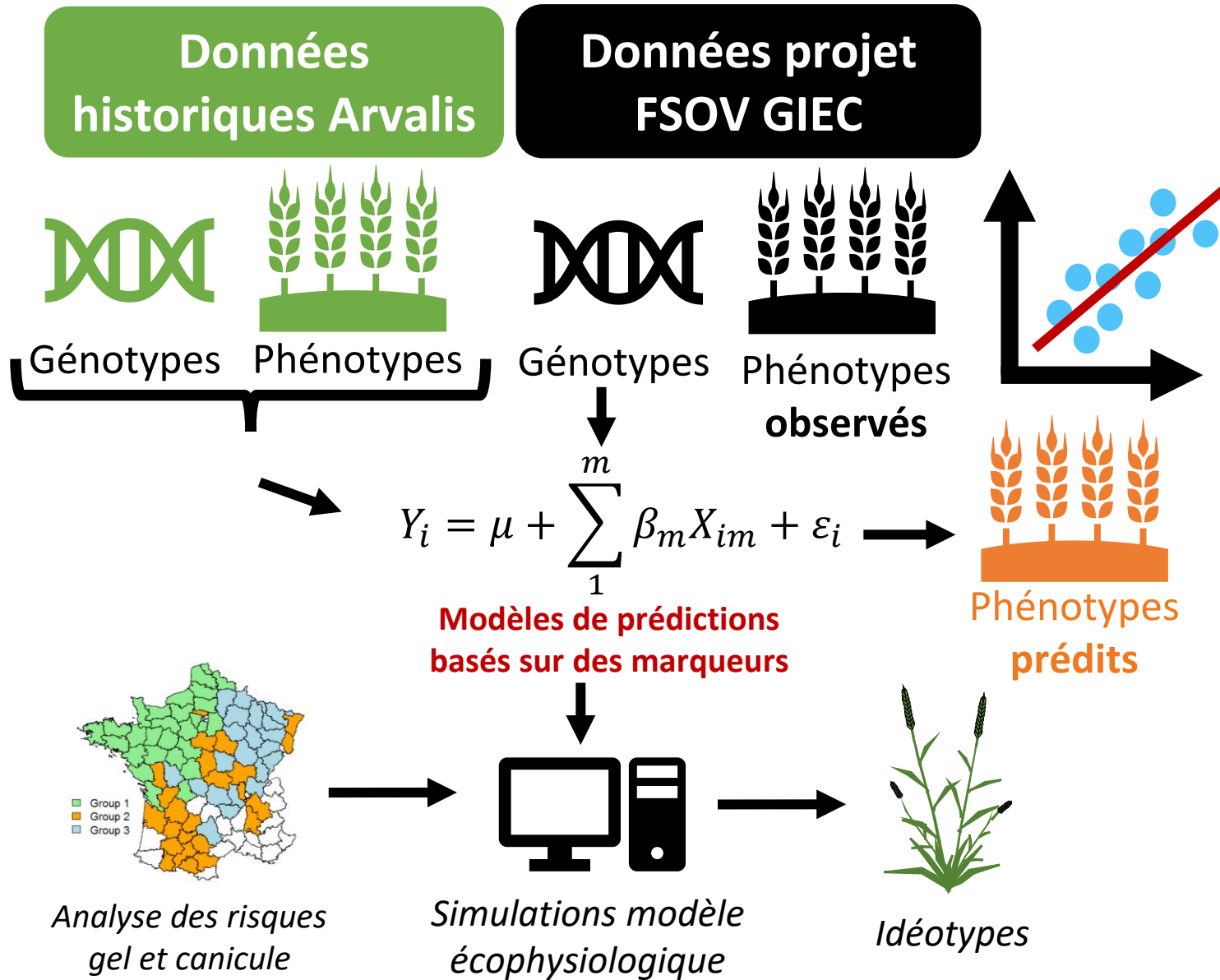
- Les génotypes peuvent être paramétrés à l'aide d'une analyse ADN
→ **Des simulations pour des génotypes réels ou virtuels peuvent être réalisés**
- Idéotype = combinaison d'allèles à différents marqueurs
→ **La sélection et le criblage du matériel végétal sont facilités**

- **Limites**

- Nécessite de paramétrer le modèle pour une population de calibration
- **Héritabilité** des paramètres génétiques?
- **Capacités prédictives** des modèles statistiques basés sur des marqueurs ?



Matériels et méthodes



Objectifs:

- Modèles de prédiction basés sur des marqueurs génétiques pour des caractères de précocité moyenne
- Modèle écophysologique basé sur des marqueurs génétiques pour la prédiction de la précocité
- Identification d'idéotypes de précocité pour maximiser l'échappement aux stress abiotiques



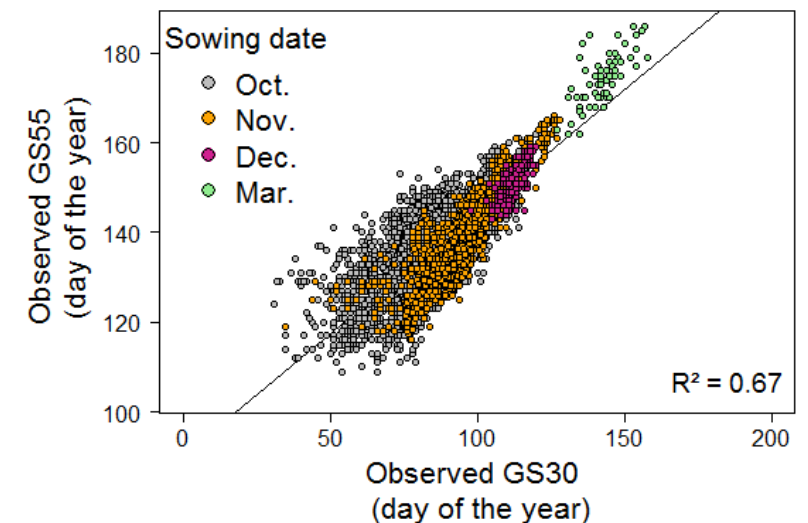
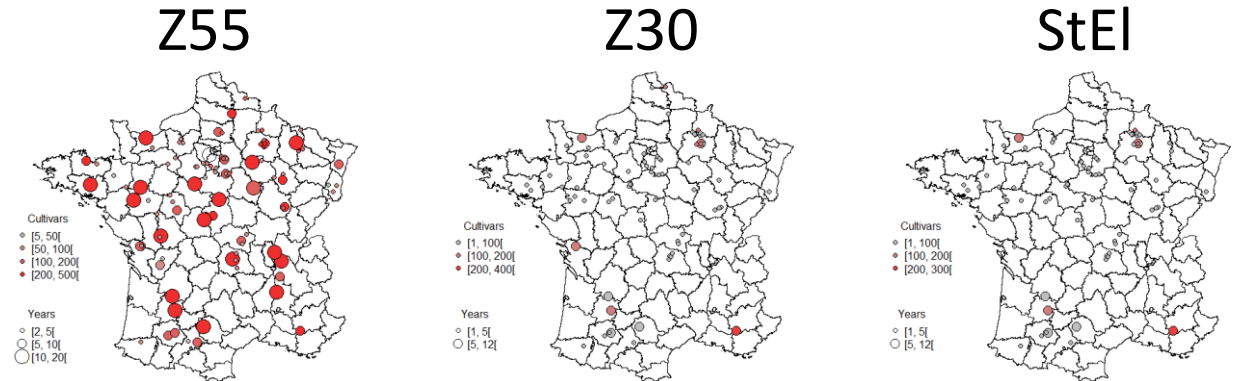
Matériels et méthodes

Données de calibration des modèles

Données générées dans le cadre des activités d'Arvalis Institut du Végétal (période 1997-2016)

Observations de la date d'apparition des stades:

- Épi à 1cm (GS30)
- Epiaison (GS55)



Données de validation des modèles

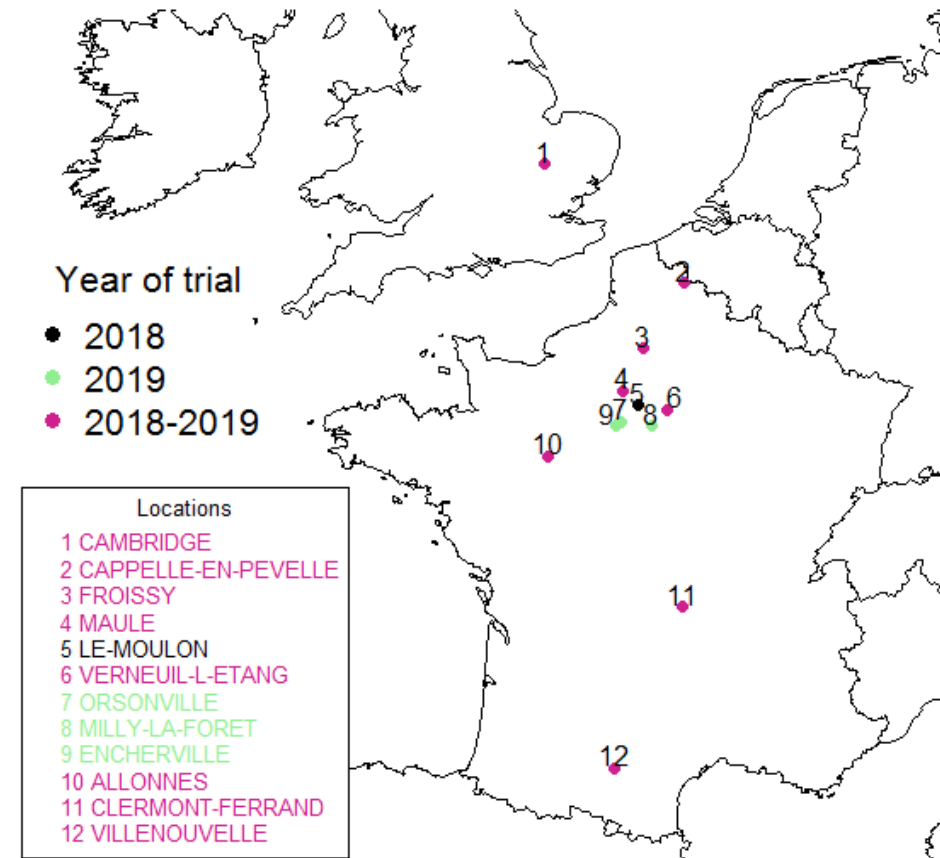
Panel de validation des modèles constitué et caractérisé dans le cadre du projet FSOV GIEC

Population	Partenaire	Type	Nombre de lignées
HEROS x BELEPI	Florimond	DH	18
STADIUM x SOLEHIO	KWS-Momont	DH	18
FALADO x SHERLOCK	Secobra	F3	14
AUCKLAND x DESCARTES	Limagrain	DH	17
ACCROC x GALIBIER	Agri-Obtentions	F3	13
UN7-3060 x RUBISKO	Unisigma	DH, F4/F5	17
BUENNO x TRIOMPH	syngenta	DH	17
MAGIC_inra	INRA GQE	SSD	17
MAGIC_niab	NIAB	SSD	18
TOTAL			149

Observations de la date d'apparition des stades:

- Épi à 1cm (GS30)
- Epiaison (GS55)

149 lignées issues de 9 populations testés dans 20 essais (2 années, 12 lieux FR / UK)



Variables phénotypiques étudiées

- Calcul de **moyennes génotypiques** pour la durée des phases:
 - Semis – épi à 1cm (Z30)
 - Semis – épiaison (Z55)
 - épi à 1cm – épiaison (StEl)

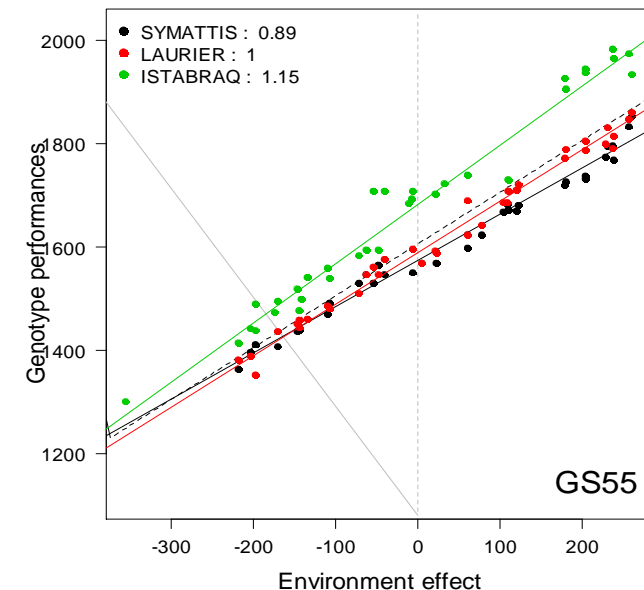
Caractère	# variétés	# essais (min – max)
Z30	438	5-186
Z55	718	5-825
StEl	404	5-164
b.Z30	144	6-9
b.Z55	212	30-50
b.StEl	143	6-9

- Calcul des **coefficients de plasticité** correspondants (Finlay and Wilkinson 1963)

$$Y_{ij} = \mu + g_i + e_j + b_i e_j + \varepsilon_{ij}$$

- Où $1+b_i$ représente la plasticité génotypique

- $1+b_i = 1$: la variété se comporte comme la moyenne
- $1+b_i \gg 1$: la variété est + tardive / précoce que la moyenne dans les environnements tardifs / précoces
- $1+b_i$ proche de zéro: la variété est stable



Matériels et méthodes

Génotypage

- Puce SNPs haute densité

Panel de validation



Panel de calibration



- Copy Number Variation pour Ppd-B1, Vrn-A1, Vrn-A3 (TaqMan assay)
Diaz et al. 2012



Génétique d'association

- Modèle Q+K (prise en compte de la structure et l'apparentement)

$$Y_i = \mu + \sum_1^p \alpha_p + \beta_m X_{im} + G_i + \varepsilon_i$$

- Ajustement avec MM4LMM (Laporte and Mary-Huard, 2018)
- Marqueurs positionnés sur RefSeqv1 (IWGSC et al., 2018)
- Seuil de significativité: $-\log_{10}(p) \geq 4$



Modèles de prédiction basés sur des marqueurs génétiques

- **GWAS**: régression linéaire multiple avec pour variables explicatives des marqueurs identifiés par génétique d'association

$$Y_i = \mu + \sum_1^m \beta_m X_{im} + \varepsilon_i$$

- **GBLUP**: modèle linéaire mixte avec un effet génotypique aléatoire

$$Y_i = \mu + G_i + \varepsilon_i$$

- **GSGWAS**: modèle linéaire mixte avec pour variables explicatives des marqueurs identifiés par génétique d'association et un effet génotypique aléatoire

$$Y_i = \mu + \sum_1^m \beta_m X_{im} + G_i + \varepsilon_i$$

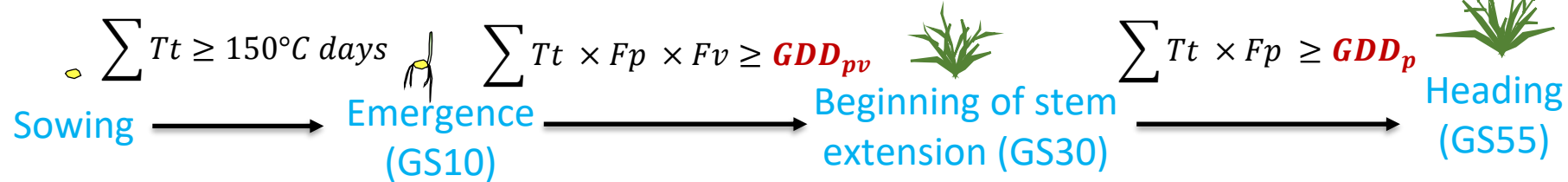


Matériels et méthodes

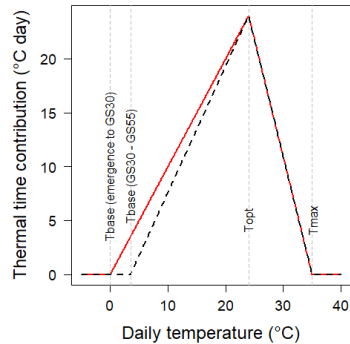
Modèle écophysiological

Weir et al. (1984)

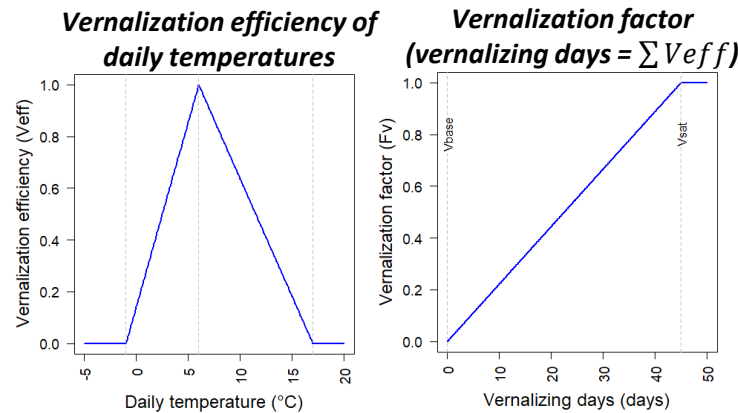
Simulation des phases de manière séquentielle, pas de temps journalier



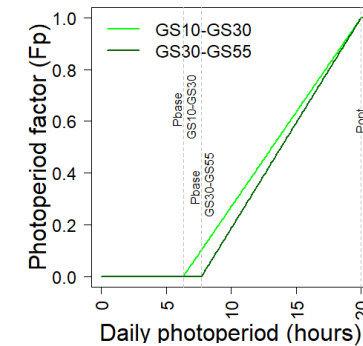
Temperature response



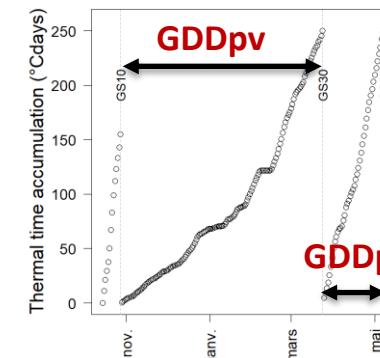
Vernalization response



Photoperiod response



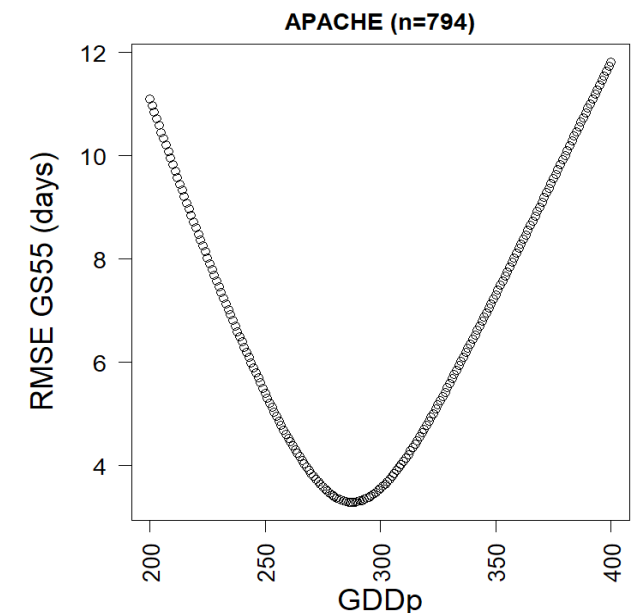
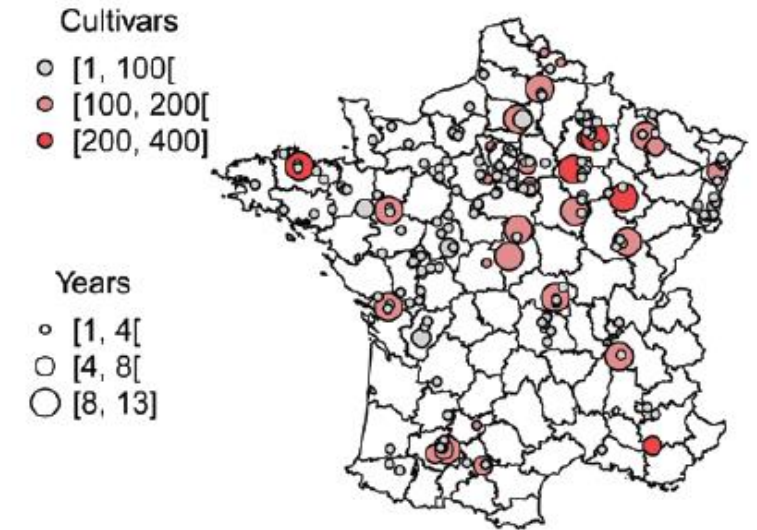
- Tt : Thermal time contribution of daily temperatures (°C days)
- Fp : Daily photoperiod factor [0;1]
- Fv : Daily vernalization factor [0;1]
- **GDD_{pv}** : duration of the GS10-GS30 phase (modified °C days)
- **GDD_p** : duration of the GS30-GS55 phase (modified °C days)



Matériels et méthodes

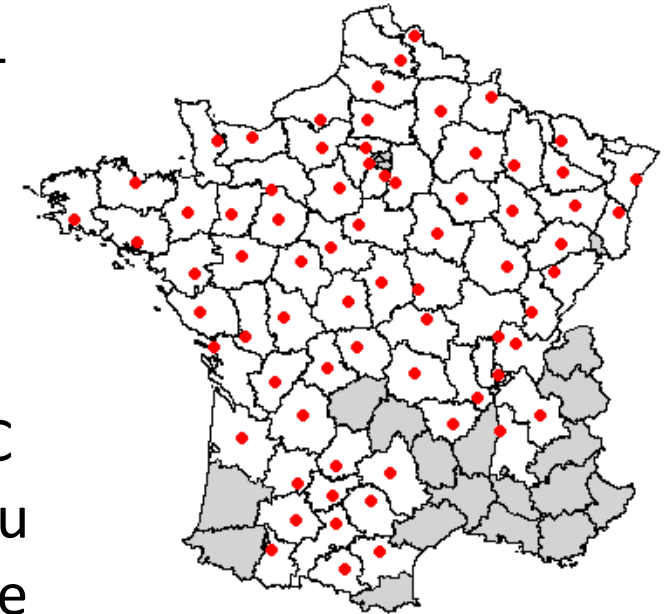
Optimisation des paramètres génétiques

- **Données phénotypiques:** GS30 et GS55 pour **408 variétés** inscrites en France entre 1969 et 2019 (min. 5 essais)
- **Domaines de variation:**
 - **GDDpv** [100; 350] pas = 1
 - **GDDp** [200; 400] pas = 1
→ 50 451 combinaisons de paramètres
- **Pour chaque variété:**
 1. $\text{GDDpv} = \text{argmin}(\text{RMSE GS30})$
 2. $\text{GDDp} = \text{argmin}(\text{RMSE GS55} \mid \text{GDDpv})$



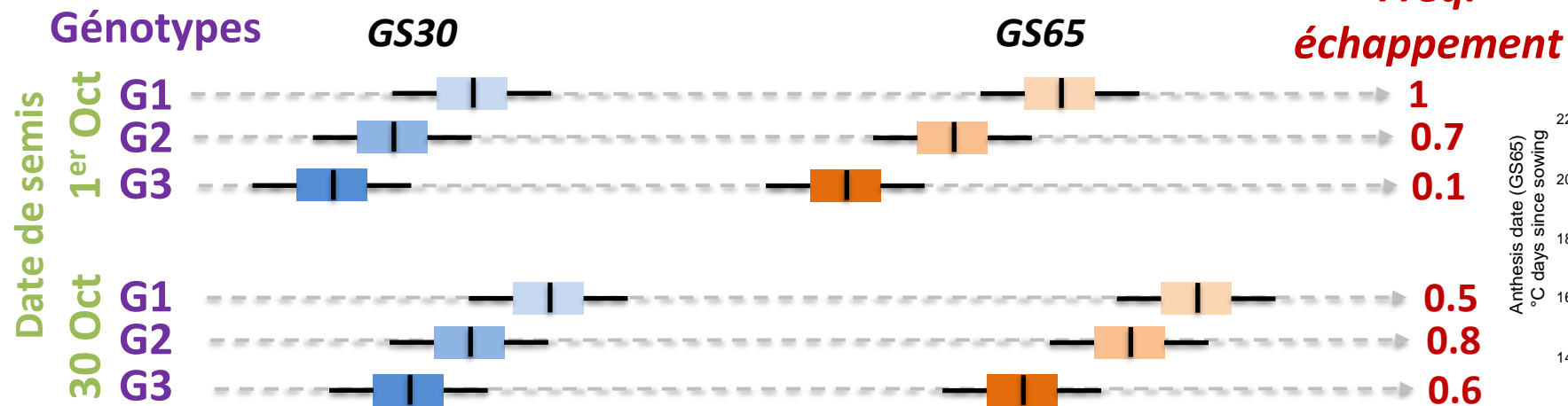
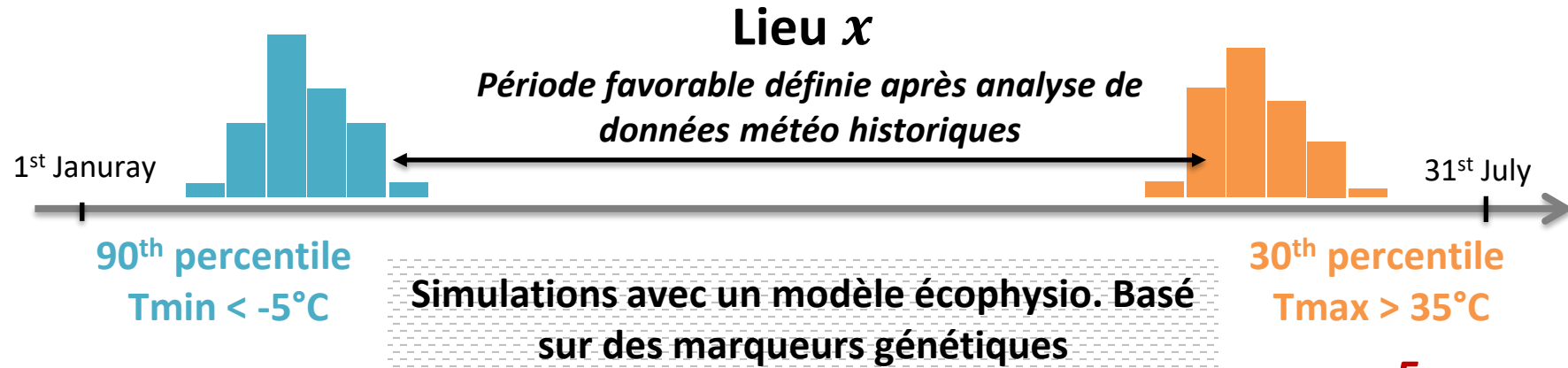
Analyse des risques de gel et de canicule en France

- **72 lieux de référence** en France (>95% production blé)
- **Donnes météo pour 30 années historiques** (période 1986-2015)
- Pour chaque lieu × année, calcul du:
 - **Dernier jour de gel:** dernier jour avec $T_{\min} < -5^{\circ}\text{C}$
 - **Premier jour de canicule:** premier jour avec $T_{\max} > 30^{\circ}\text{C}$
 - **Définition d'une période favorable** [90^{ème} percentile du dernier jour de gel ; 30^{ème} percentile du premier jour de canicule]

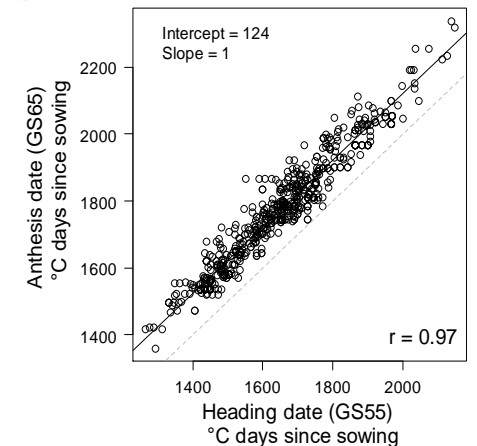


Matériels et méthodes

Identification d'idéotypes par simulations



Fréquence d'échappement: probabilité que GS30 et GS65 apparaissent durant la période favorable

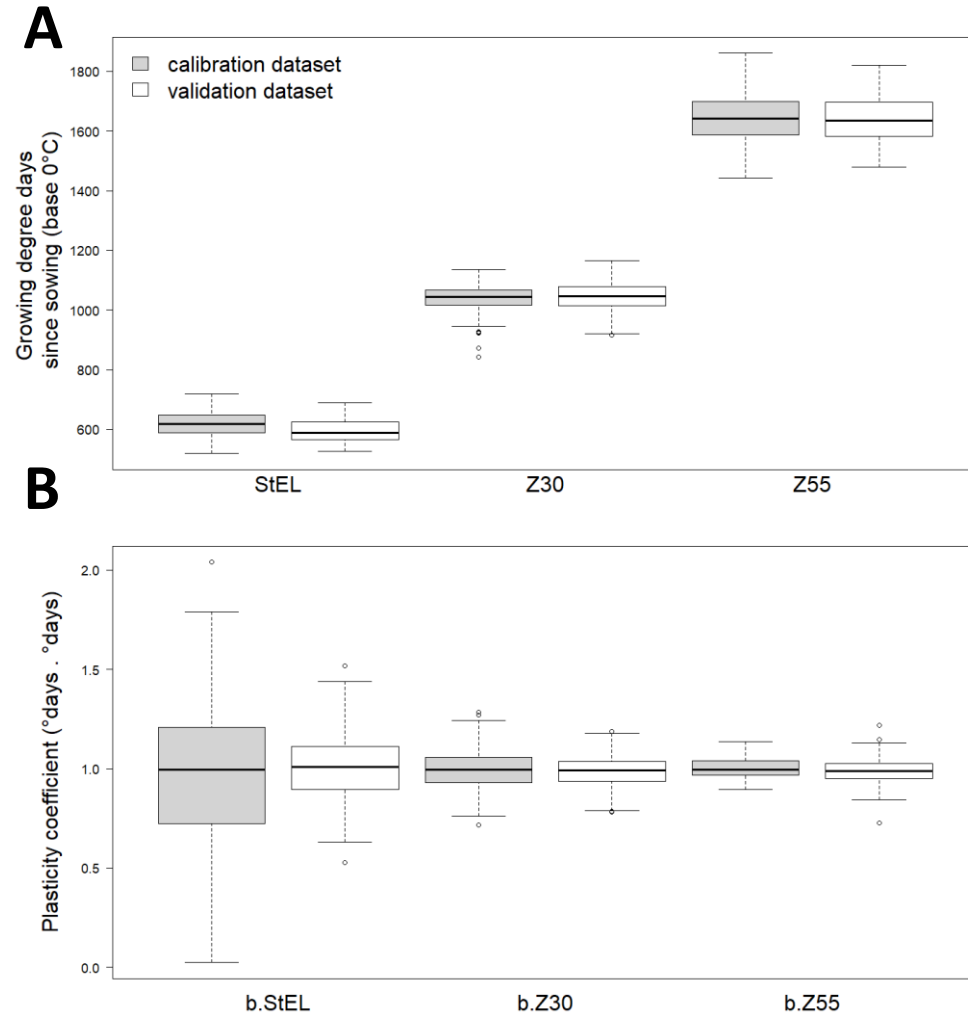


$$GS65 = GS55 + 124^{\circ}Cdays$$



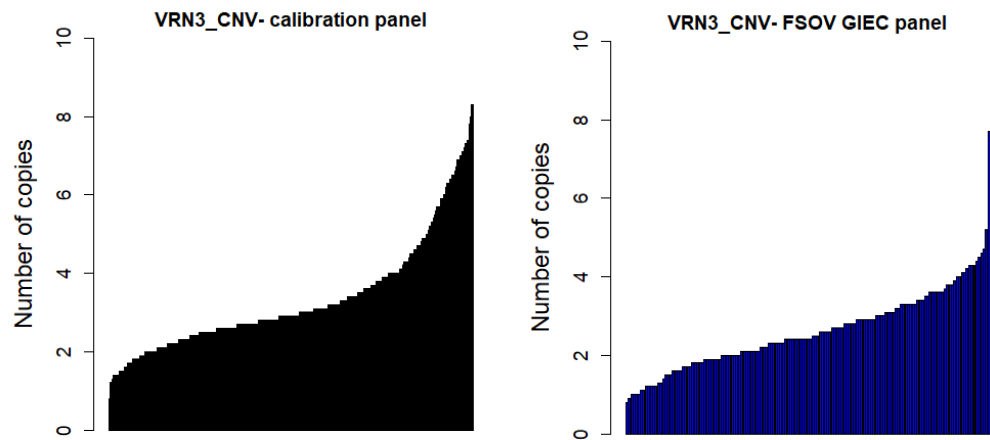
Distributions des caractères étudiés

- Données de calibration:
 - Z30: 843 à 1136°C jours
 - Z55: 1443 à 1861°C jours
 - StEl: 520 à 720°C jours
- Données de validation:
 - Z30: 916 à 1166°C
 - Z55: 1478 à 1819°C jours
 - StEl: 528 à 688°C jours
- **Variations comparables dans les panels de calibration et validation**



Impact du nombre de copies de gènes de précocité

Nombres de copies de Vrn-A3 dans les panels de calibration et de validation



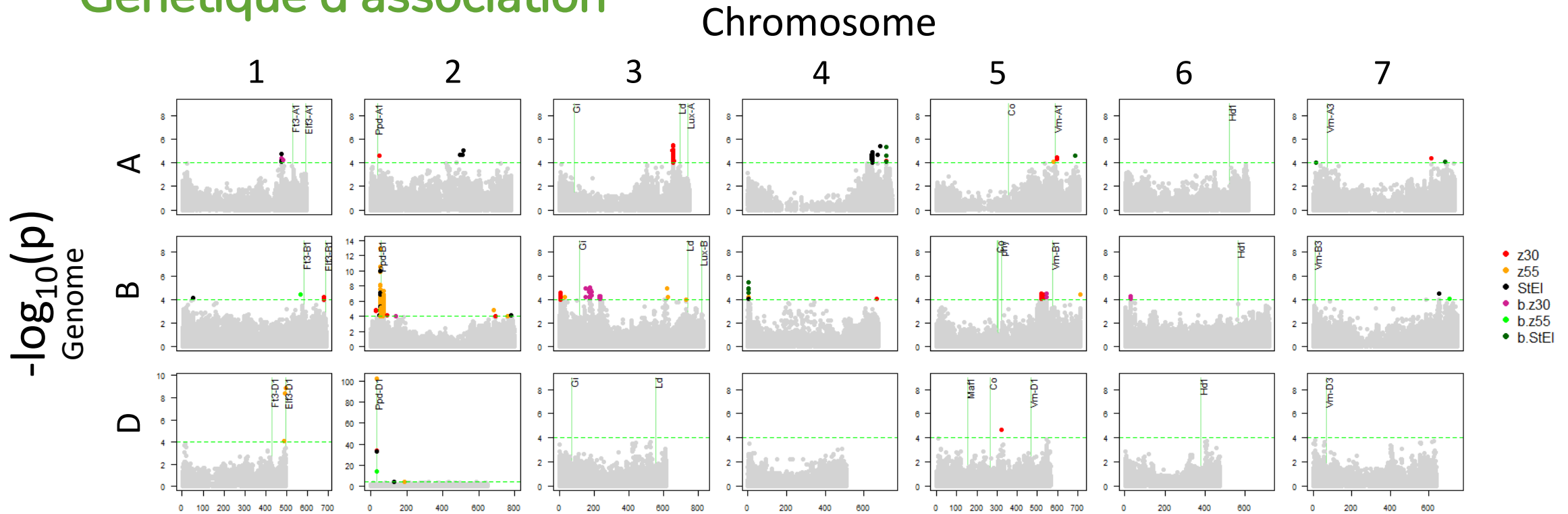
Corrélations entre nombres de copies de gènes de précocité et caractères étudiés

<i>Caractère</i>	<i>Ppd-B1</i>	<i>Vrn-A1</i>	<i>Vrn-A3</i>
<i>Z30</i>	-0.01	-0.09	0.03
<i>Z55</i>	-0.14	0.11	-0.01
<i>StEl</i>	-0.20	0.19	0.13
<i>b.Z30</i>	0.04	0.00	0.07
<i>b.Z55</i>	-0.11	0.08	0.12
<i>b.StEl</i>	-0.08	0.10	0.02

- Impact significatif de Ppd-B1, Vrn-A1 et VrnA3 sur Z55 / StEl et b.Z55



Génétique d'association



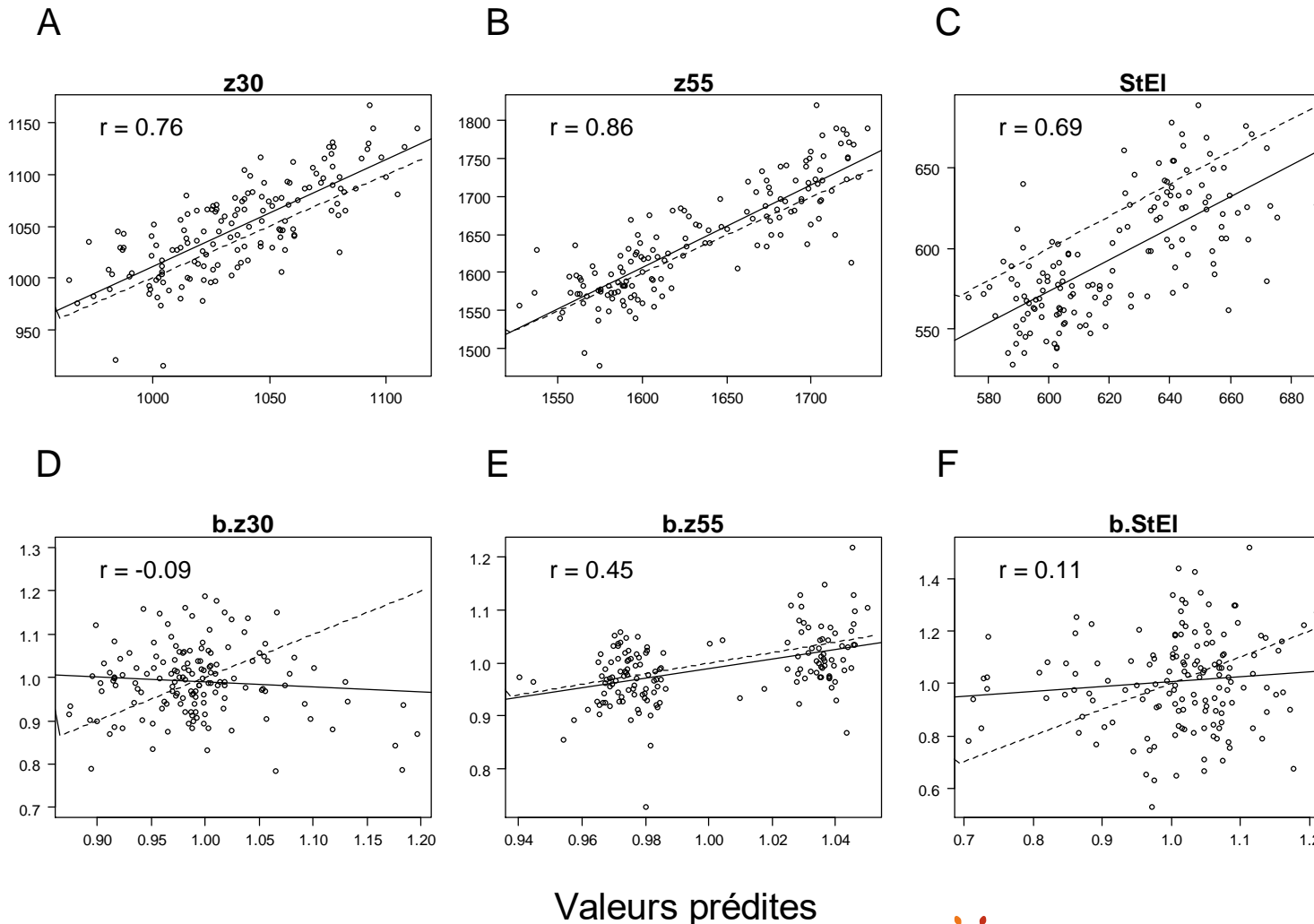
- Forte de association de Ppd-D1, associations significative de Ppd-B1 et d'autres gènes de précocité connus (Ft3-B1, Elf3-B1, Elf3-D1, Ppd-A1, LD, Vrn-A1, Vrn-B1)



Validation des modèles de prédiction sur les données du FSOV GIEC

Durées des phases
Coefficients de plasticité

Valeurs observées

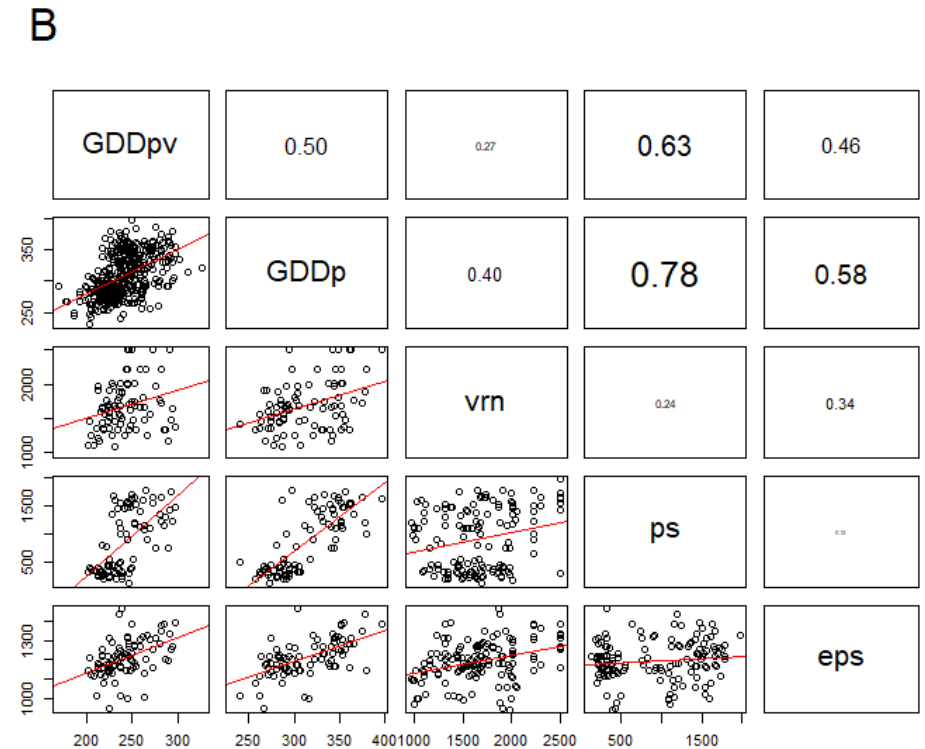
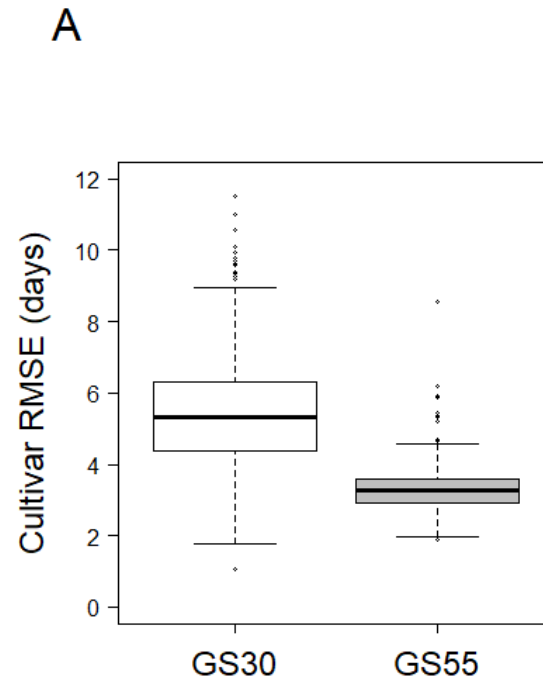


- Bonnes capacités prédictives pour les durée de phases
- Capacités prédictives modérées pour b.z55
- Capacités prédictives nulles pour b.z30 et b.StEI

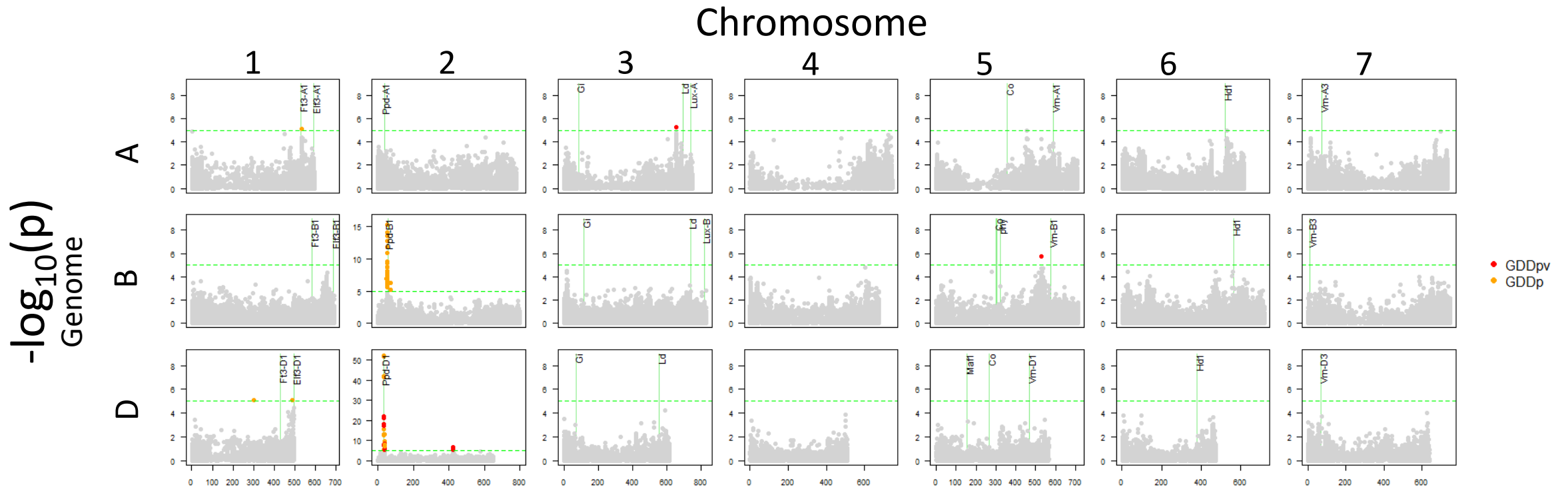


Optimisation des paramètres génétiques du modèle écophysiolgique

- GS30: RMSE 5.3 jours
- GS55: RMSE 3.2 jours
- Paramètres corrélés à la sensibilité à la photopériode et la précocité intrinsèque



Génétique d'association pour les paramètres du modèle écophysio

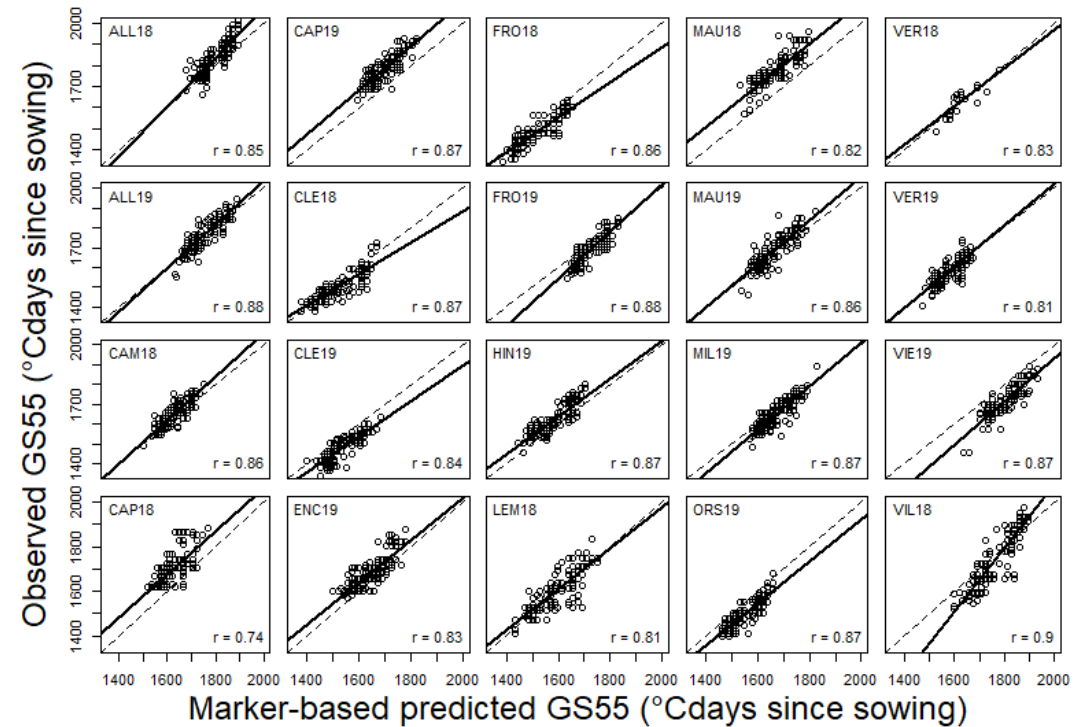
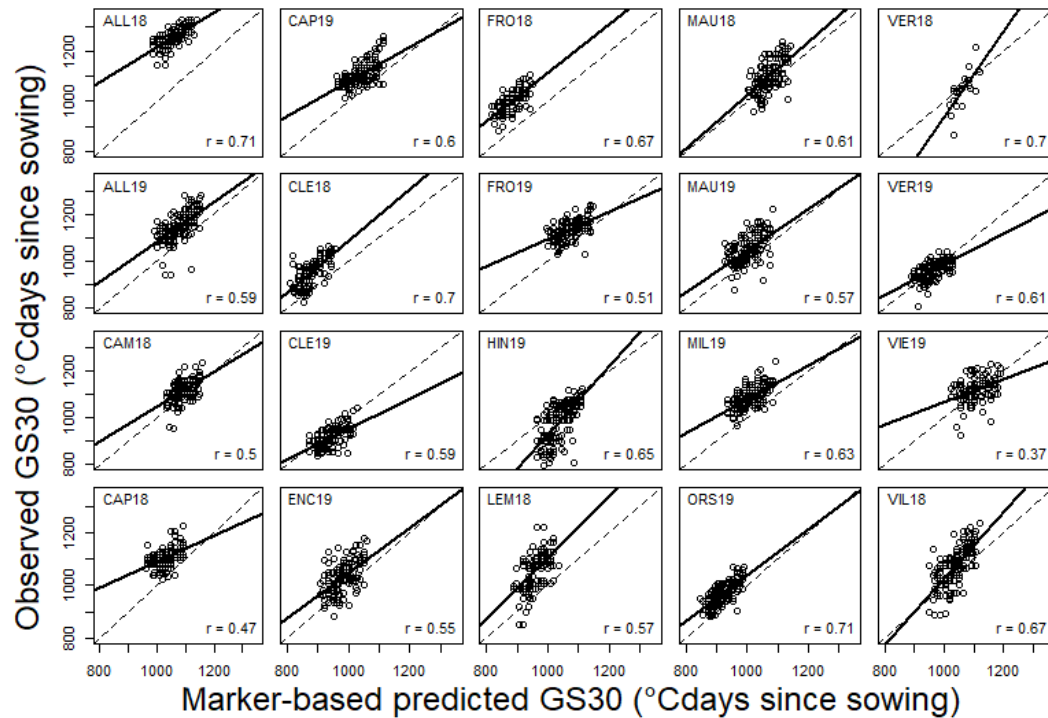


- Forte de association de Ppd-D1 pour les deux paramètres
- GDDpv: trois autres QTLs dont LD et Vrn-B1
- GDDp, 4 autres QTLs dont Ft3-A1, Eif3-D1, Ppd-B1



Prédictions basées sur des marqueurs des stades GS30 et GS55 pour le jeu de données de validation

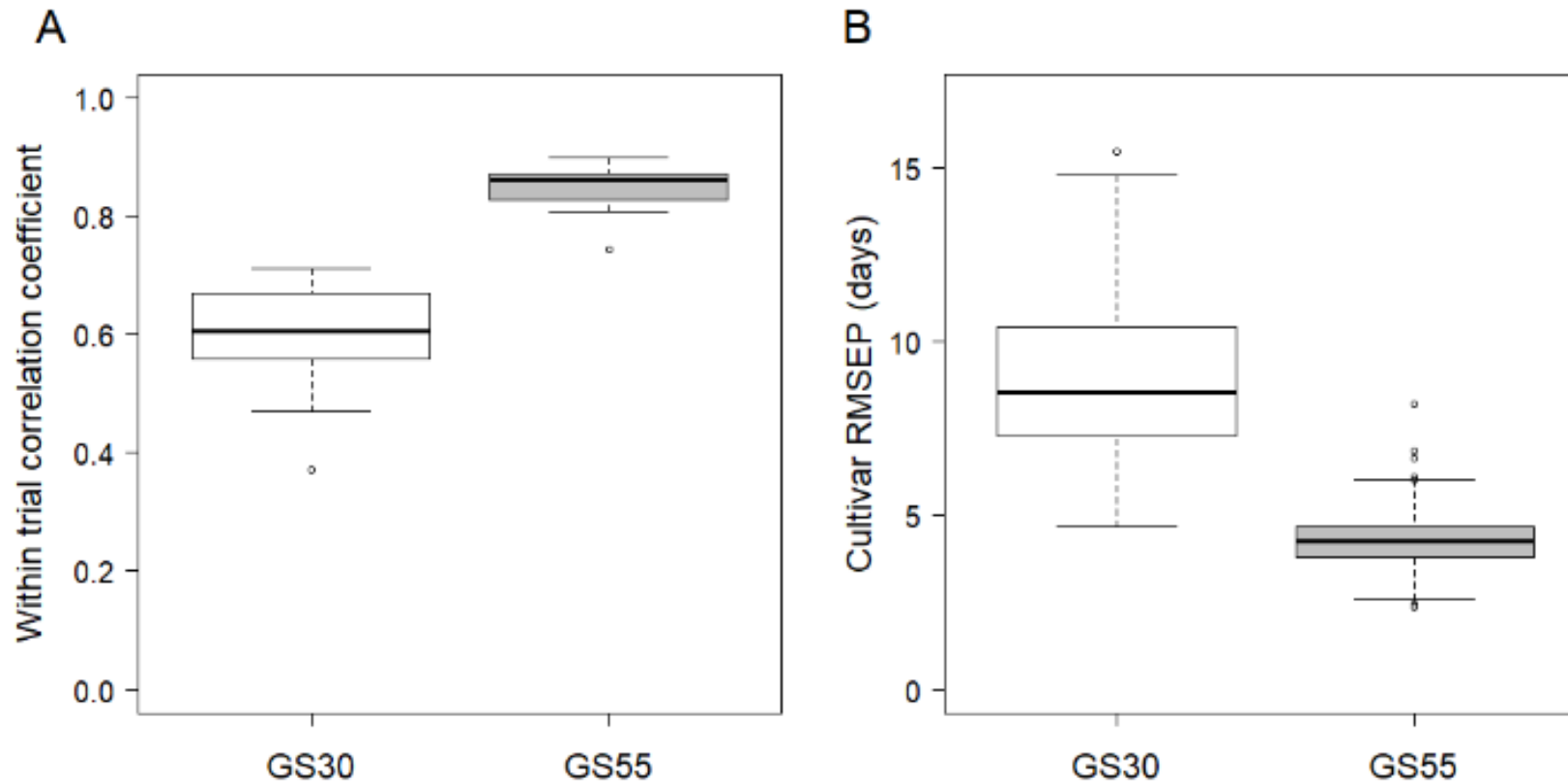
Comparaison prédit / observé dans les différents essais



Résultats

Prédictions basées sur des marqueurs des stades GS30 et GS55 pour le jeu de données de validation

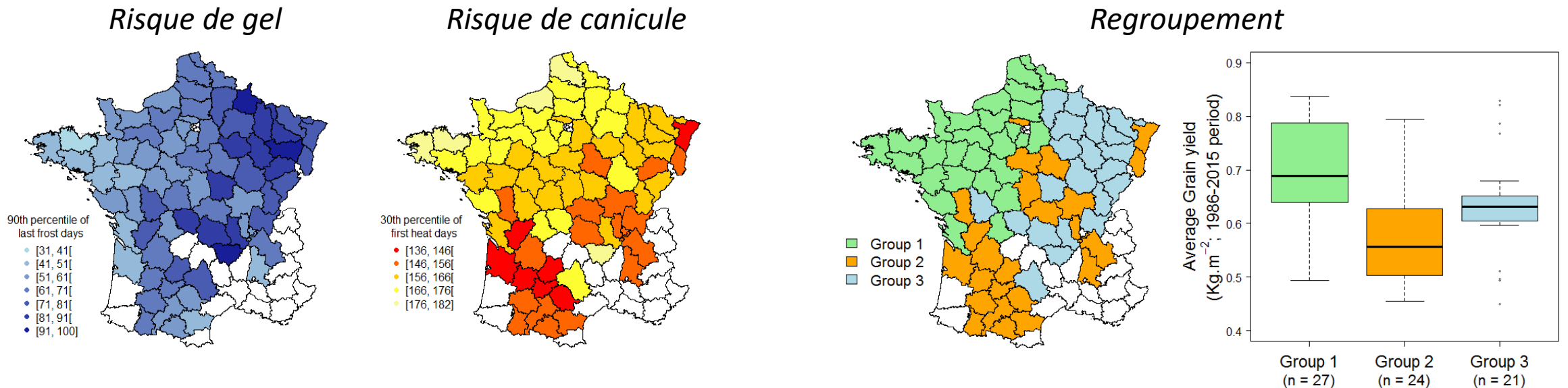
Prédit vs. observé dans les différents essais → corrélations, RMSEP par variété



Résultats

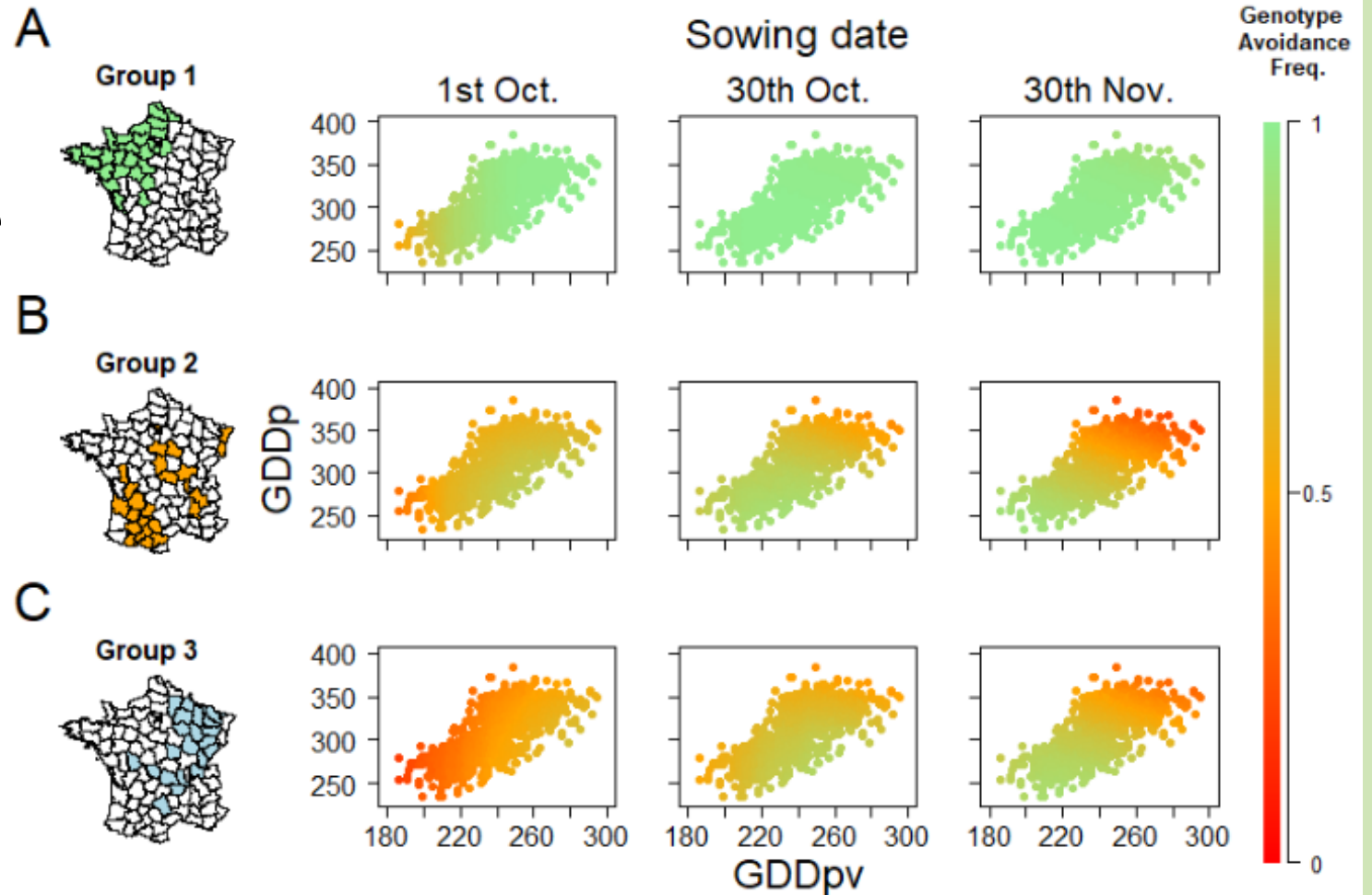
Analyse des risques gel et canicule en France et définition d'environnements cibles

- Trois groupes d'environnements contrastés:
 - Groupe 1: faible risque gel/canicule
 - Groupe 2: risque de gel modéré et un risque de canicule élevé
 - Groupe 3: risque de gel élevé et un risque de canicule modéré



Identification d'idéotypes de précocité

- Groupe 1: enjeu faible, large gamme variétale, éviter les variétés précoces en semis précoce
- Groupe 2 / 3, nécessité d'optimiser le couple variété × date de semis pour maximiser l'échappement
- Groupe 2 / 3, recul de la date de semis pour augmenter le choix variétal



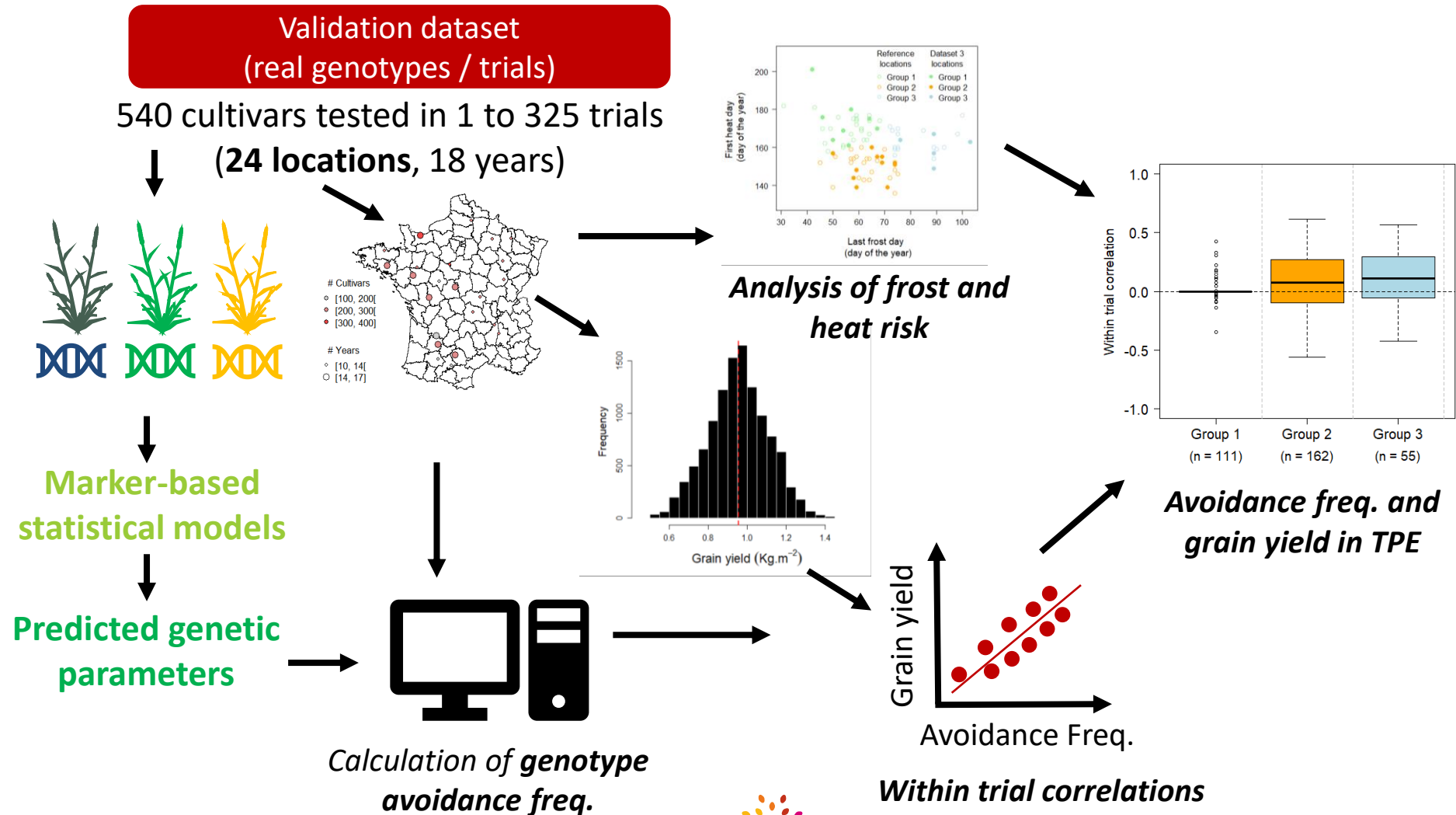
Composition génotypique des idéotypes de précocité

Group of locations	sowing day	GDDpv × GDDp	Cultivar	Multi-locus genotype		Avoidance Freq.
				GDDpv *	GDDp **	
Group 2	01-oct	262 × 285	SOKAL	AA;AA;AA;AA	AA;AA;TT;AG;CC;CG;GG;GG	0.82
Group 2	30-oct	225 × 244	ANAPURNA	AA;AA;AG;AA	AA;GG;CC;GG;GG;GG;GG;GG	0.91
Group 2	30-nov	199 × 235	FADELA	AA;AA;GG;CC	AA;AA;CC;AA;GG;CC;AA;GG	0.94
Group 3	01-oct	279 × 298	KARILLON	TT;GG;AA;AA	TT;GG;CC;GG;CC;GG;GG;GG	0.69
Group 3	30-oct	248 × 264	CROISADE	AA;AA;GG;AA	AA;AA;TT;AG;CC;GG;GG;GG	0.84
Group 3	30-nov	218 × 238	ICARDA6	AA;AA;AA;AA	AA;AA;TT;AA;GG;GG;AA;GG	0.90
* BGABW004965;CFN1774440;BS0007766751;CFN0660461						
** BGABW004965;BWS2249;CFN1709196;RAC875C17720570;CFN0635329;BW28416;CFN0561987;CFN0024182						

- Les idéotypes peuvent être reliés à des combinaisons alléliques à différents loci
- Facilite l'identification et la sélection des idéotypes recherchés pour un type d'environnement donné



Validation empirique



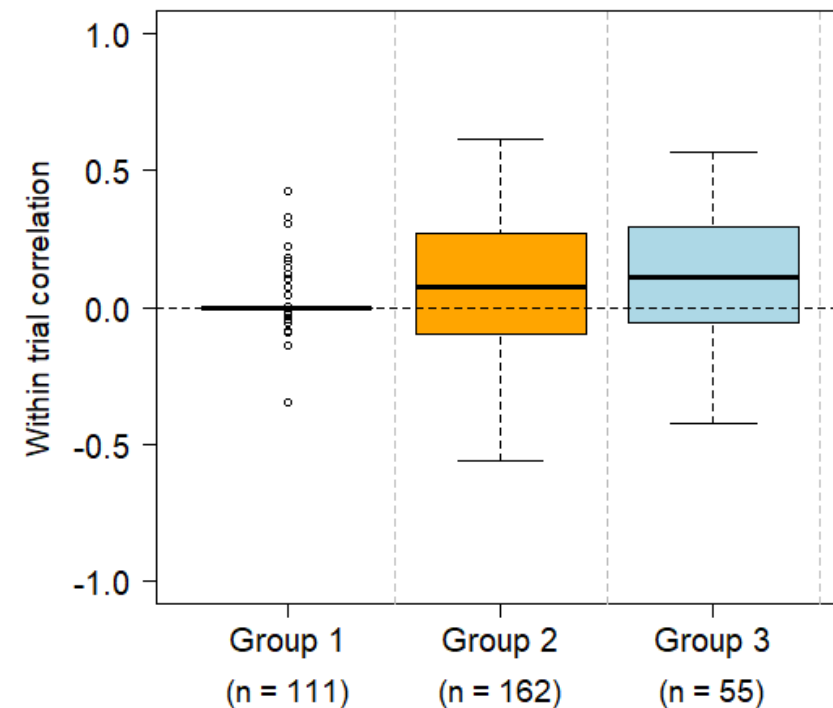
Validation empirique

- **Simulations des stades GS30 et GS65 pour 540 variétés dans 24 nouveaux lieux sur données météo historiques (1986-2015)**

→ Calcul des fréquences d'échappement génotypiques

- **Corrélations intra-essais** entre rendement en grains et fréquence d'échappement génotypique?

→ **En moyenne, corrélations positives dans les environnements des groupes 2 et 3**



Conclusions et perspectives

Livrables:

- Des modèles de prédiction pour les durées de phases, les coefficients de plasticité
- Un modèle écophysiologique paramétré avec des marqueurs génétiques pour prédire épi à 1cm et épiaison/floraison
- Une méthode d'identification d'idéotypes pour maximiser l'échappement aux stress abiotiques

Perspectives:

- Retravailler les coefficients de plasticité avec un jeu de données plus conséquent
- Idéotypes pour l'échappement au gel sur épis
- Simulations pour des séries climatiques futures

RESEARCH PAPER

Marker-based crop model-assisted ideotype design to improve avoidance of abiotic stress in bread wheat

Matthieu Bogard^{1,*}, Delphine Hourcade¹, Benoit Piquemal², David Gouache³, Jean-Charles Deswartes⁴, Mickael Throude⁵ and Jean-Pierre Cohan⁶

Résultats publiés dans Bogard et al. 2020



ARVALIS
Institut du végétal


FLORIMOND
DESPREZ

INRAE
la science pour la vie, l'humain, la terre


John Innes Centre



FsoV




SECOBRA
Recherches

NIAB



merci

 **BASF**

ao  agri Obtentions
Semencier de l'agriculture durable

Limagrain 
de la terre à la vie

 IRAGT

syngenta

 **UNISIGMA**
RECHERCHE & CRÉATION VARIÉTALE