

STABILITÉ DE LA RÉSISTANCE À LA ROUILLE JAUNE : COMPLÉMENTARITÉ ENTRE RECHERCHE, SÉLECTION ET DÉVELOPPEMENT



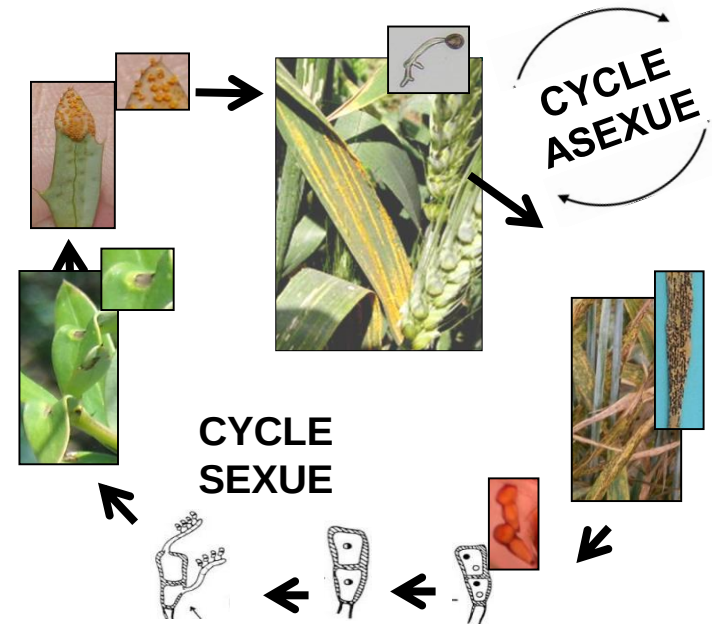
Claude Pope
INRA Bioger

Coordinateur : Simon Lefèvre, Agrosolutions

PARTENAIRES : **AgroSolutions** : A. OLIVIER, **GIE Recherche Génétiques Céréales** : P. RIGOLLE ; **INRA BIOGER** : M. LECONTE ; **INRA APBV** : B. ROLLAND, J.P. LeMONNIER ; **NIAB** : S. HOLGATE, A. HUBBARD, E. COVENTRY, I. MIDGLEY ; **Hutchinson** : D. ELLERTON, C. BUTTON, B. BULMER ; **Unisigma** : P. LEREBOUR, C. DEBITON ; **Limagrain** : J. STRAGLIATI, F. OUDIN, B. DUPERRIER, J. B. BEAUFUMÉ ; **Maison Florimond Desprez** : D. BÉGHIN, P. LONNET ; **R2N** : L. DUCHALAIS ; **Syngenta Seed SAS** : P. SENELLART, S. CAIVEAU, P. BANSEPT, D. GUIARD ; **Agri-obtentions** : J. AUZANNEAU

OBJECTIFS DU PROJET

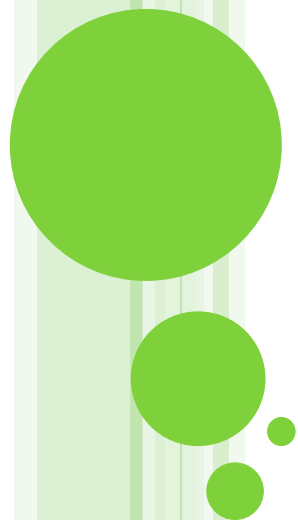
- Comprendre les pressions rouille jaune en lien avec le climat et les races de l'année
- Déployer un réseau d'évaluation :
 - Le comportement des variétés vis-à-vis de la rouille jaune varie-t-il dans l'espace et dans le temps ?
 - Intérêt de génotypes révélateurs pour détecter les virulences ?
- Valider la méthodologie d'évaluation au champ
 - Une notation de l'intensité sur chaque étage foliaire est-elle nécessaire pour appréhender le comportement au stade adulte ?
 - Quel comportement des variétés des essais inoculés ?
 - L'analyse du comportement des nouvelles variétés peut-elle substituer l'intérêt des génotypes révélateurs ?
 - Le comportement des variétés en Angleterre est-il un bon prédicteur du comportement des variétés en France et des races présentes ?



Ali et al., 2014

Reproduction asexuée
Spores dicaryotiques
Croissance systémique
Dispersion à longue distance
Relation gène pour gène
Nombreuses sources de résistance, 71 Yr

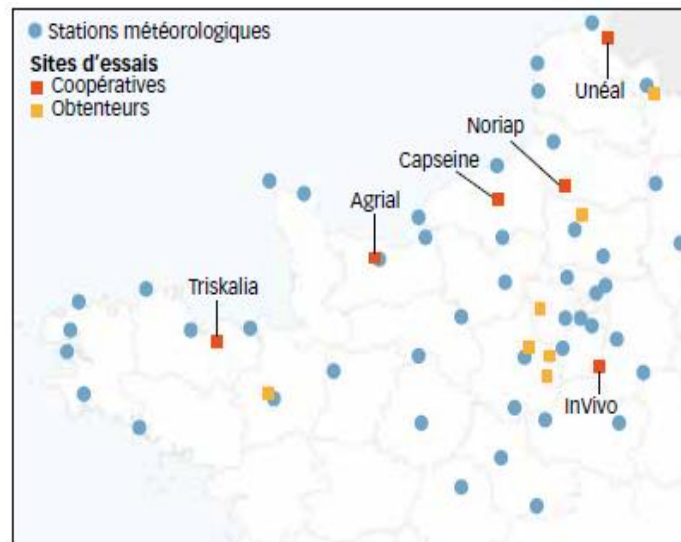
Comprendre les pressions de rouille jaune en lien avec le climat de l'année



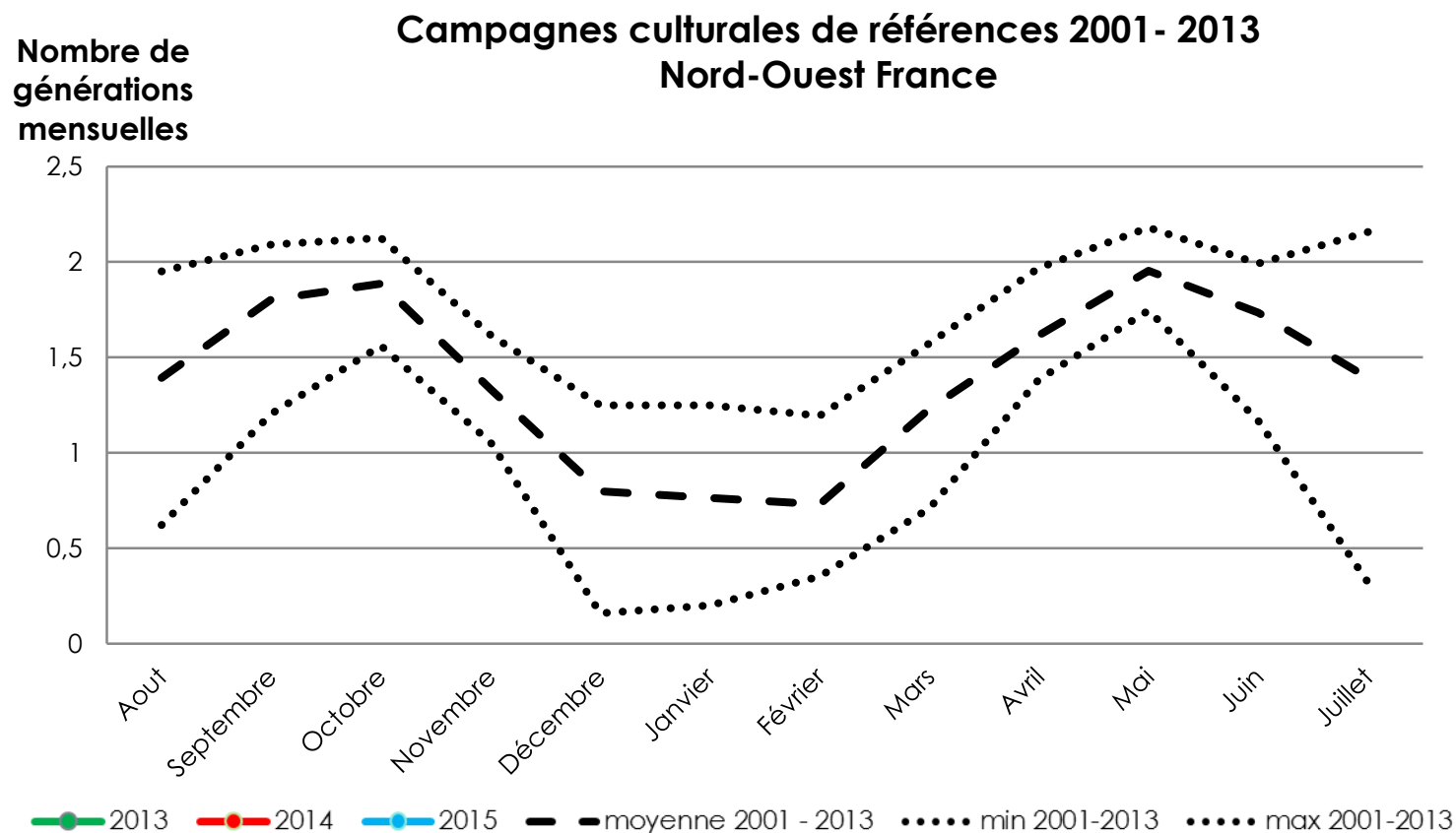
LE CLIMAT : FACTEUR EXPLICATIF DE LA PRESSION ROUILLE JAUNE

- Nombre de générations mensuelles de *Pst* calculé à partir de la durée période de latence en fonction de de T_{moy} , T_{min} journalières (Zadoks (1961), Rapilly (1976))

48 stations météorologiques (source : MétéoFrance)

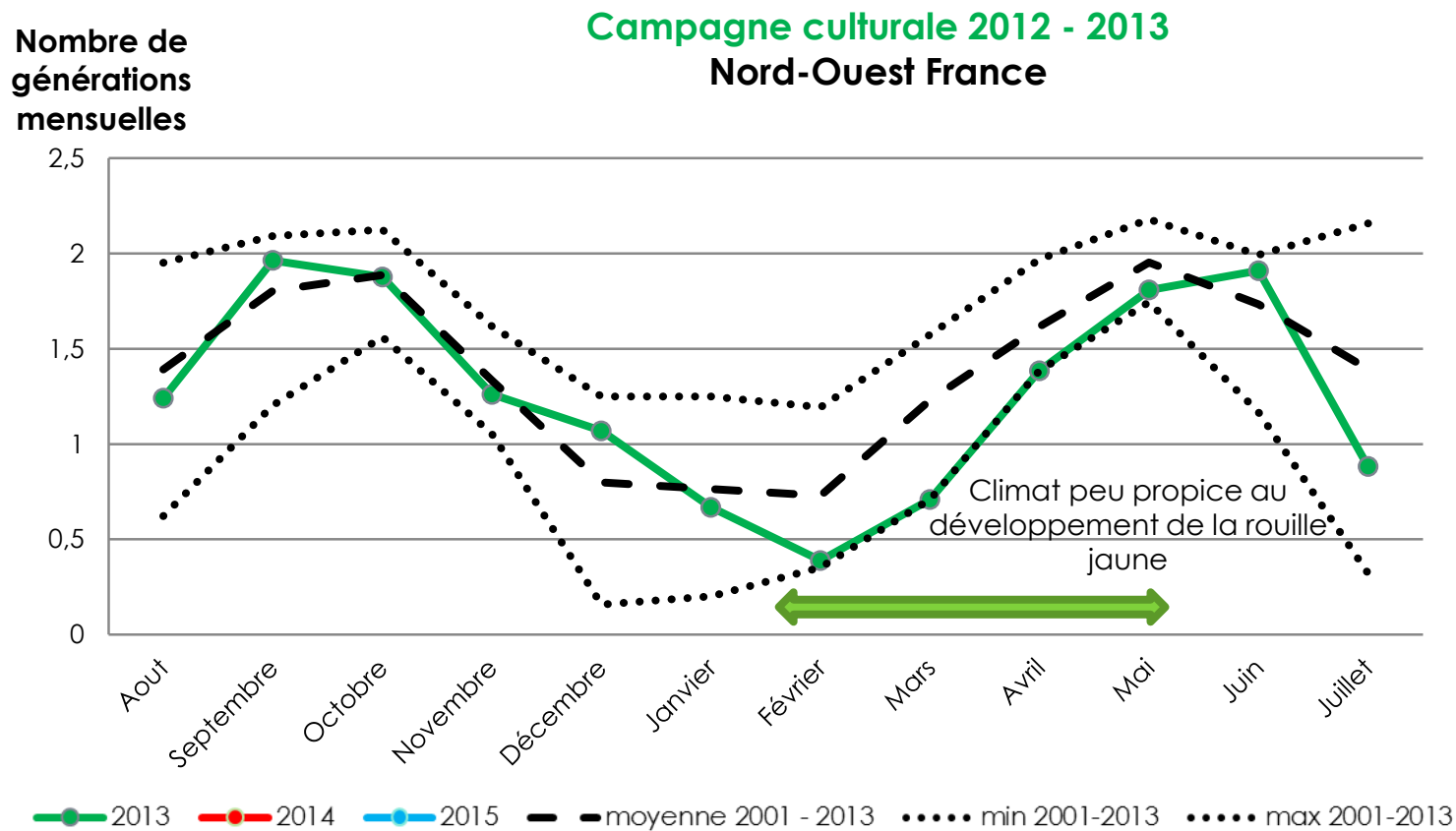


LE CLIMAT : FACTEUR EXPLICATIF DE LA PRESSION ROUILLE JAUNE



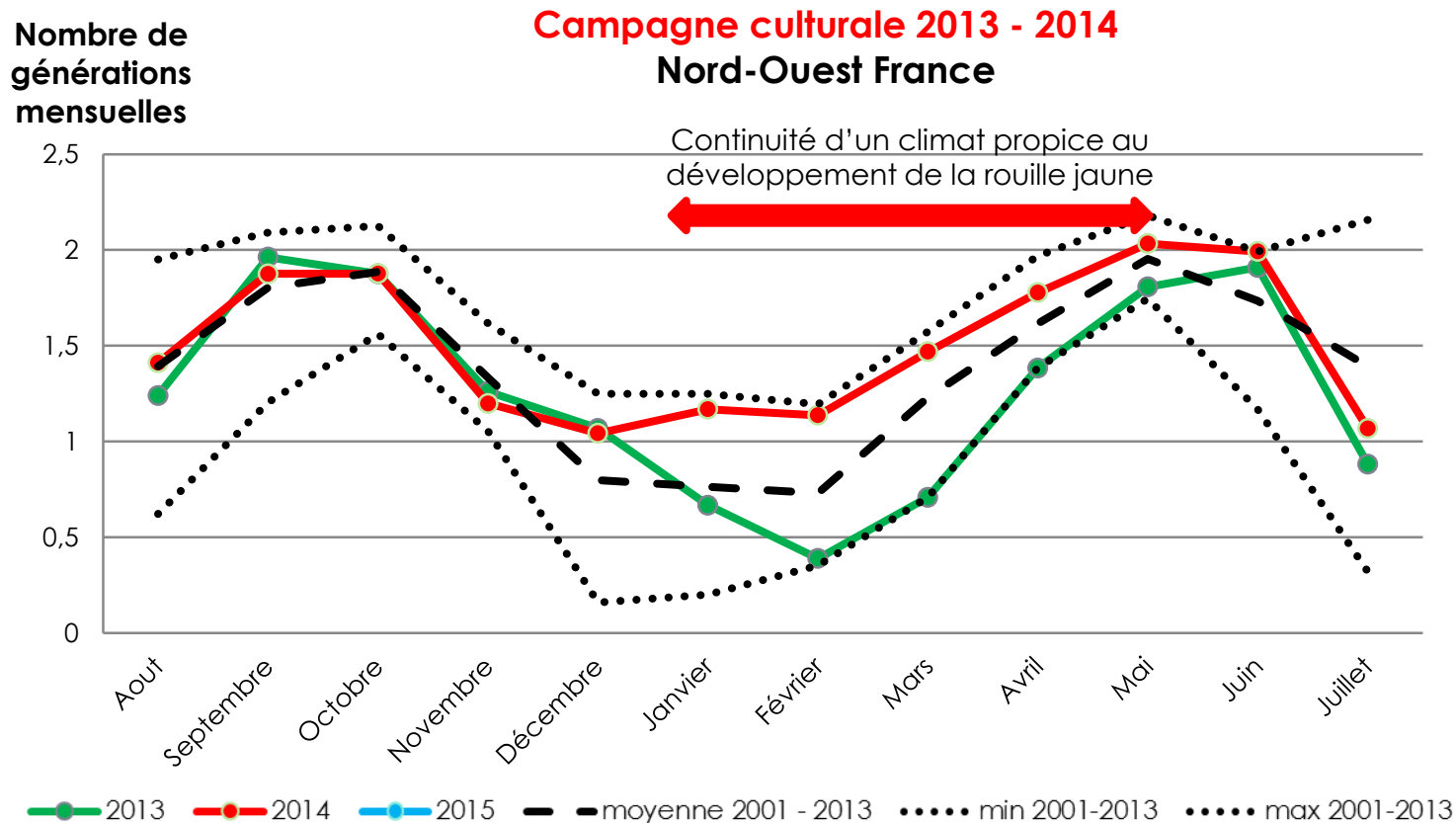
LE CLIMAT : FACTEUR EXPLICATIF DE LA PRESSION ROUILLE JAUNE

○ 2013 : pression faible



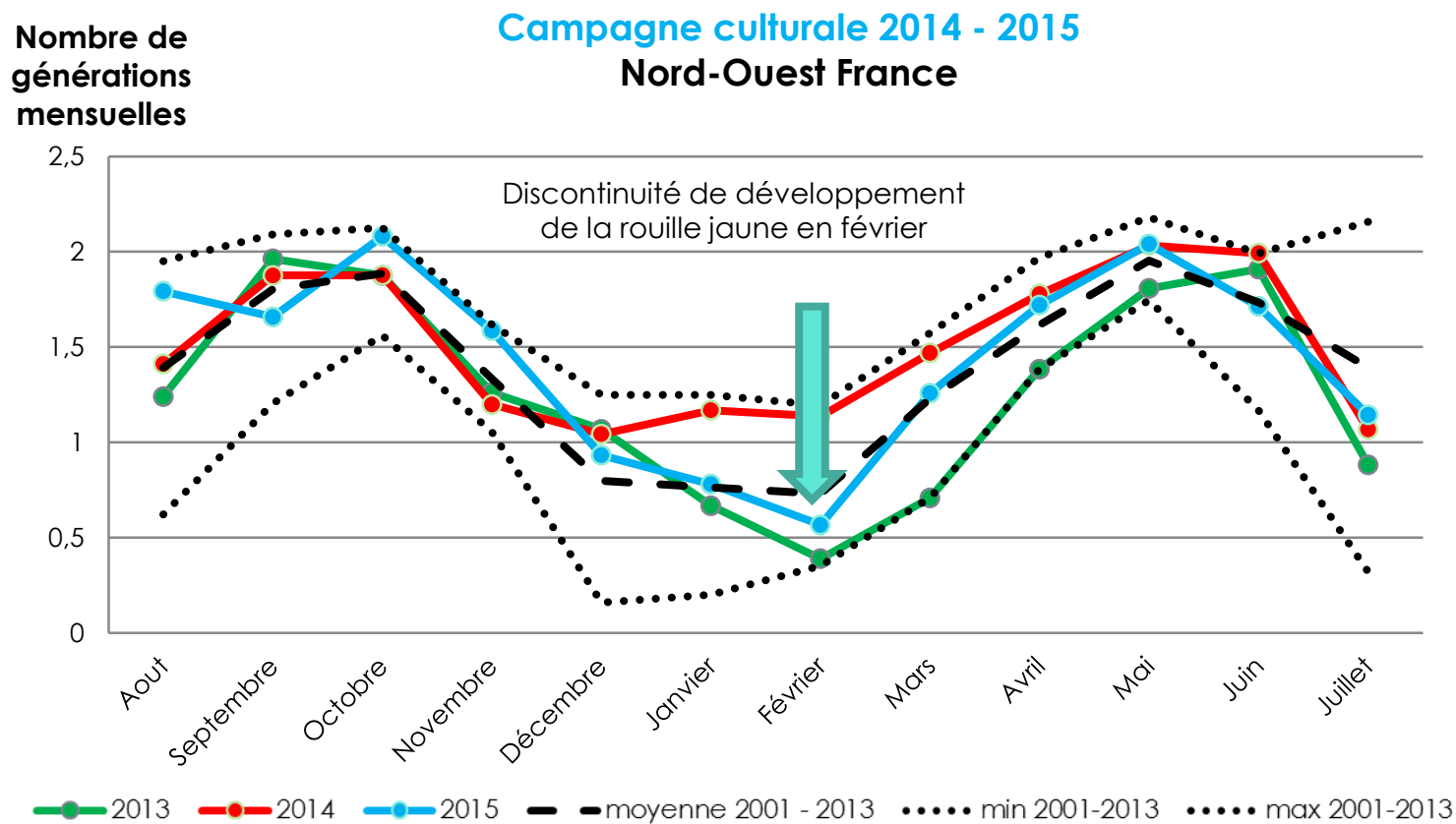
LE CLIMAT : FACTEUR EXPLICATIF DE LA PRESSION ROUILLE JAUNE

- 2013 : pression faible
- 2014 : pression exceptionnellement élevée



LE CLIMAT : FACTEUR EXPLICATIF DE LA PRESSION ROUILLE JAUNE

- 2013 : pression faible
- 2014 : pression exceptionnellement élevée
- 2015 : pression intermédiaire



LE CLIMAT : FACTEUR EXPLICATIF DE LA PRESSION ROUILLE JAUNE

- L'estimation de la période de latence s'avère en première approche, rendre compte des observations de terrain
- Malgré certains mois favorables, c'est la continuité d'un climat favorable à la rouille jaune qui paraît être déterminante pour la pression
- L'étude des conditions optimales de développement adaptée aux nouvelles races de rouille jaune pourrait améliorer la qualité du modèle.
- D'autres facteurs (hygrométrie, vent séchant, etc.) pourront être ajoutés au modèle.

Caractérisation des épidémies

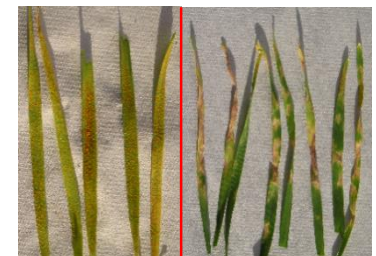
Les races de *Pst*

PATHOTYPAGE (32 LIGNÉES DIFFÉRENTIELLES, 17 YR)

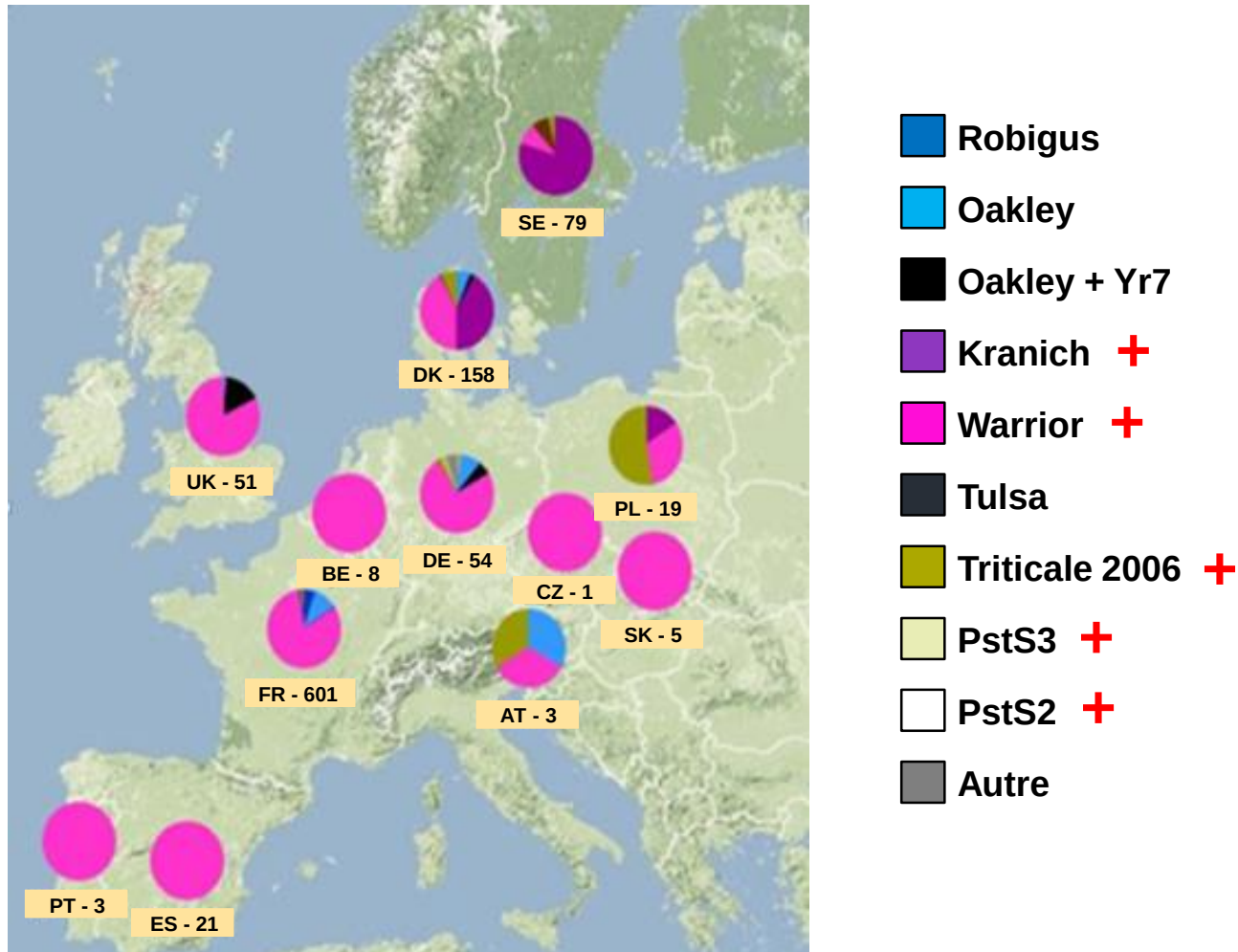
de Vallavieille – Pope et al., *Plant Disease* 2012

GÉNOTYPAGE (19 SSR)

Ali et al., *BMC research Notes* 2011



DISTRIBUTION DES RACES DE Pst ENTRE 2009 ET 2013



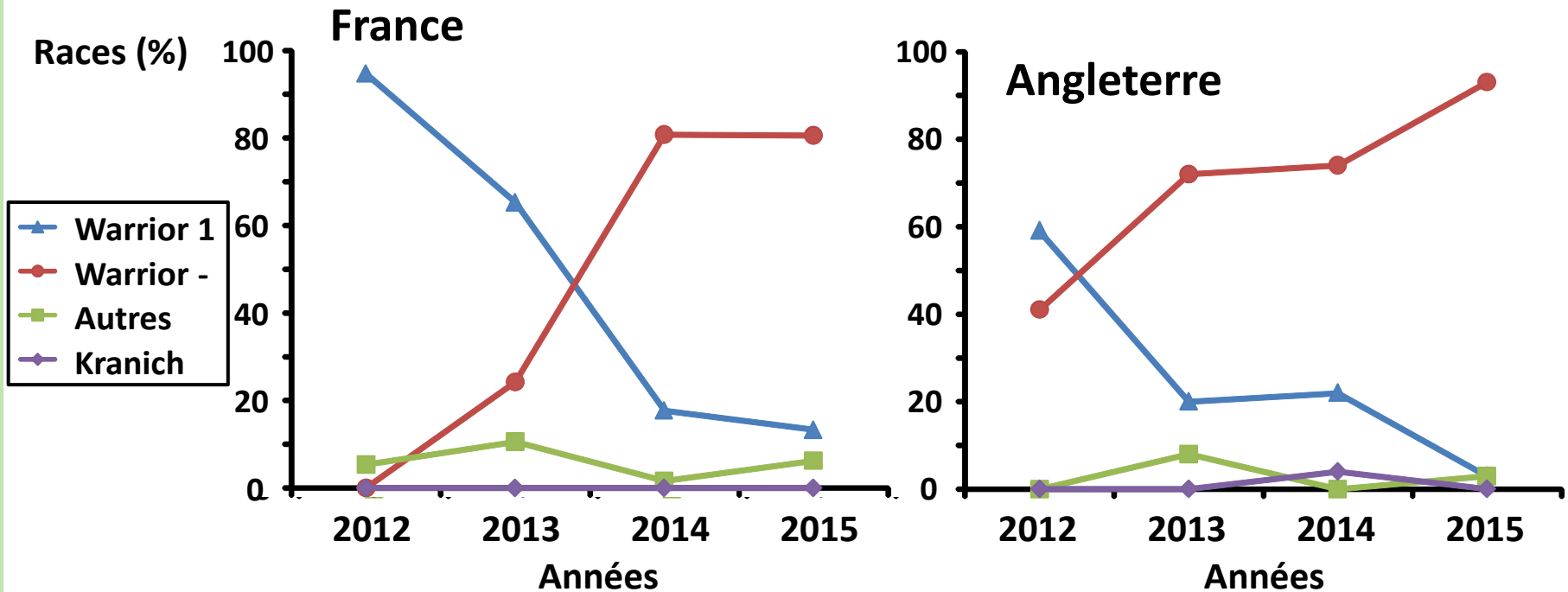
- Au début du projet, la race Warrior domine en Europe.

RACES DÉTECTÉES EN FRANCE ET ANGLETERRE 2013 - 2015

Races		Fr	UK	Virulences														
Variants	Triticale	+	-	-	2	-	-	6	7	8	-	10	-	-	-	-	-	-
	Triticale aggressive	+	-	-	2	-	-	6	7	8	9	10	-	-	-	-	-	-
	Kranich	-	+	1	2	3	-	6	7	8	9	-	17	25	32	-	Amb	
	Warrior 1	+	+	1	2	3	4	6	7	-	9	-	17	25	32	Sp	Amb	
	Warrior -	+	+	1	2	3	4	6	7	-	9	-	17	25	32	Sp	-	
	Warrior Av17	+	-	1	2	3	4	6	7	-	9	-	-	25	32	Sp	-	
	Warrior AvSp	-	+	1	2	3	4	6	7	-	9	-	17	25	32	-	-	
	Warrior Av4	-	+	1	2	3	-	6	7	-	9	-	17	25	32	Sp	-	
	Warrior Av4,Sp	-	+	1	2	3	-	(6)	7	-	9	-	17	25	32	-	-	
	Warrior Av4,7	-	+	1	2	3	-	(6)	-	-	9	-	17	25	32	Sp	-	
	Warrior Av1,9,17	-	+	-	2	3	4	6	7	-	-	-	-	25	32	Sp	-	
Oakley/Soltice		+	+	1	2	3	4	6	-	-	9	-	17	25	32	-	-	
Sterling		+	+	1	2	3	4	6	7	-	9	-	17	25	32	-	-	

- Sous le nom de Warrior, différents variants sont identifiés.

EVOLUTION DES RACES DE PST, 2012-2015



- En Angleterre et en France, nous observons entre 2012 et 2015, une inversion de la race dominante de Warrior 1 vers Warrior -.

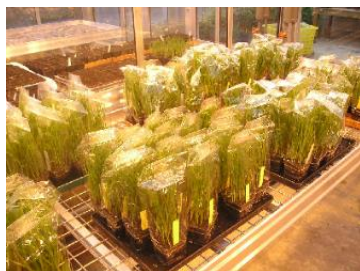
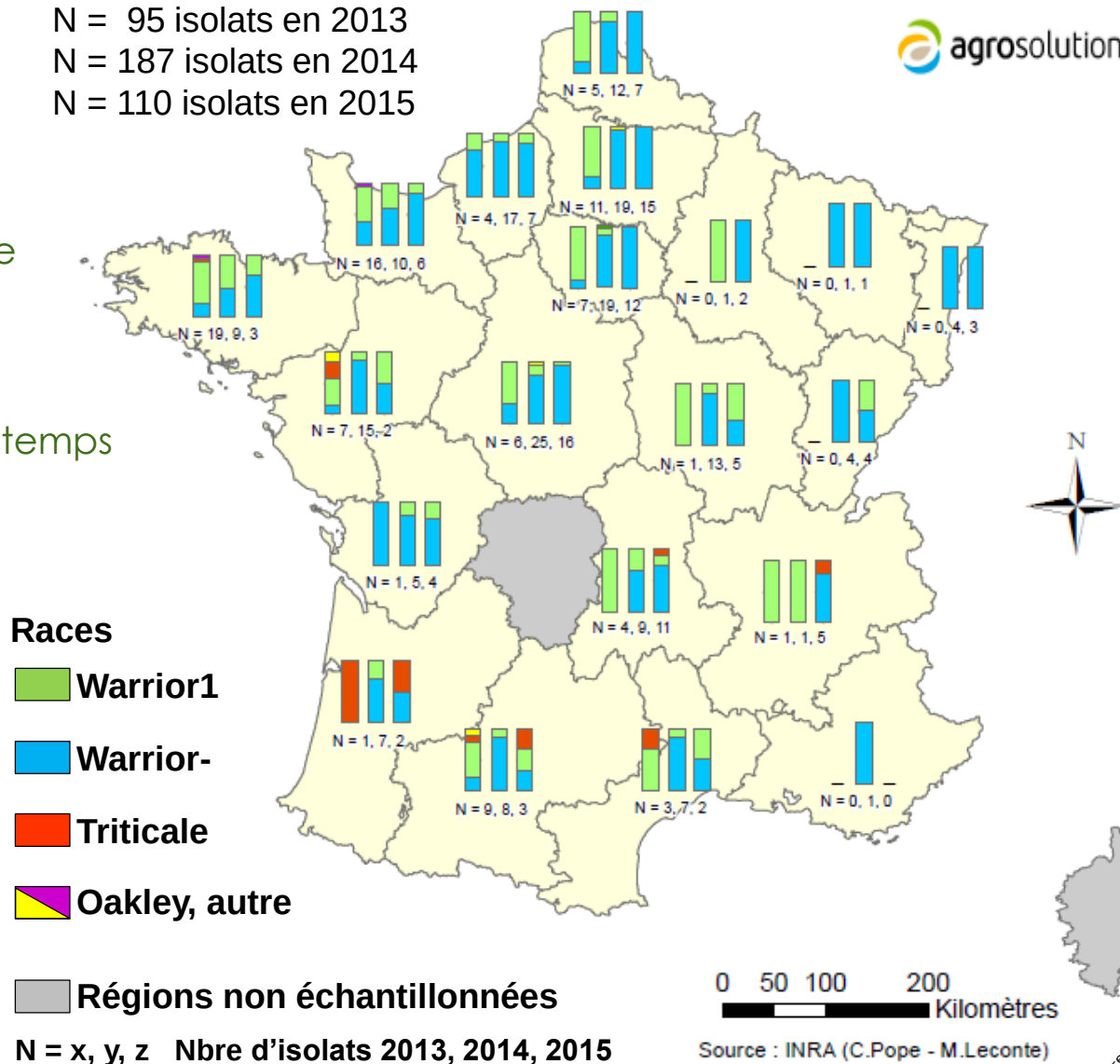
FRÉQUENCE DES RACES PAR RÉGION

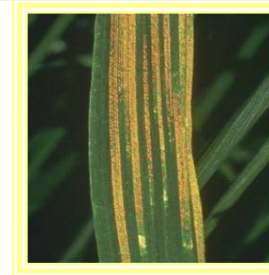
N = 95 isolats en 2013
N = 187 isolats en 2014
N = 110 isolats en 2015



○ Pas de régionalisation nette

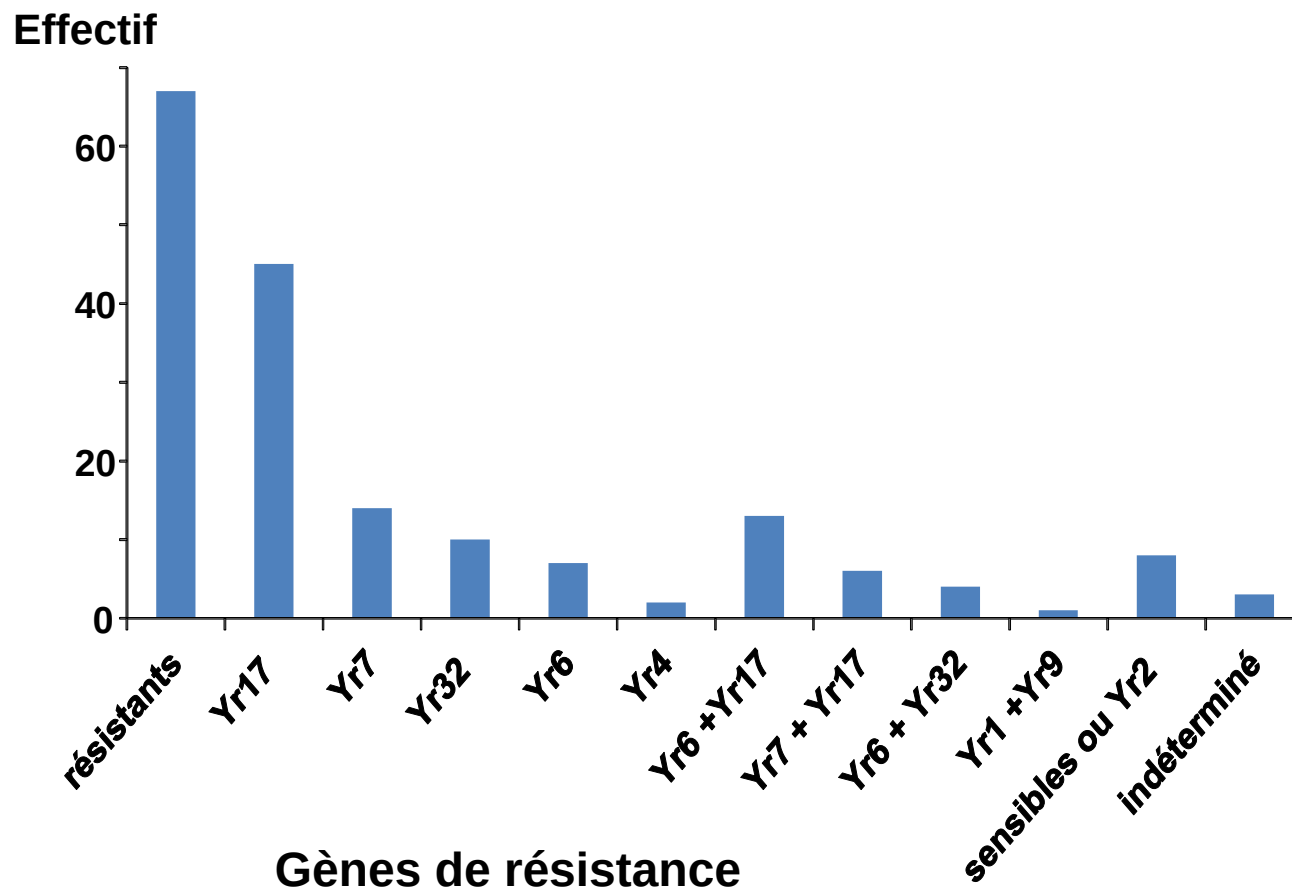
○ Les races évoluent dans le temps et dans l'espace.





**Evaluation des résistances de
variétés en pré-inscription
(CTPS1/2) et de variétés récentes
2012-2015**

POSTULATION DES GÈNES DE RÉSISTANCE MAJEURS DE VARIÉTÉS PRÉ/POST INSCRIPTION 2012 – 2015



Les tests réalisés au stade plantule, sur 180 variétés inoculées par 12 races de *Pst* montrent une majorité de résistantes.



Expérimentations au champ

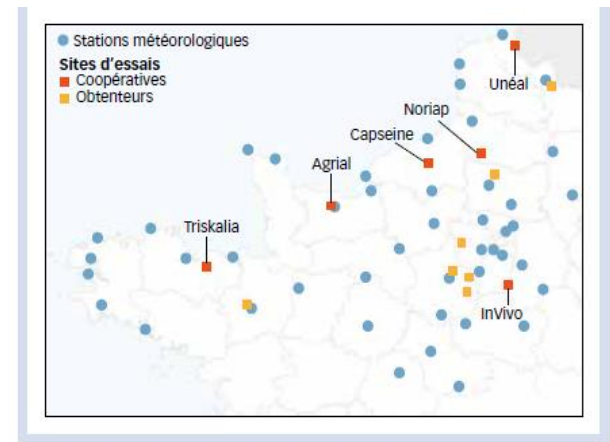
- Notations (contamination artificielle / naturelle)
- Notations des épis
- Hétérogénéité spatiale (régionale, UK),
temporelle (entre les années du projet)
importance du suivi



Capseine, 2015

ESSAIS MIS EN PLACE

- Environ 60 essais réalisés sur 3 ans



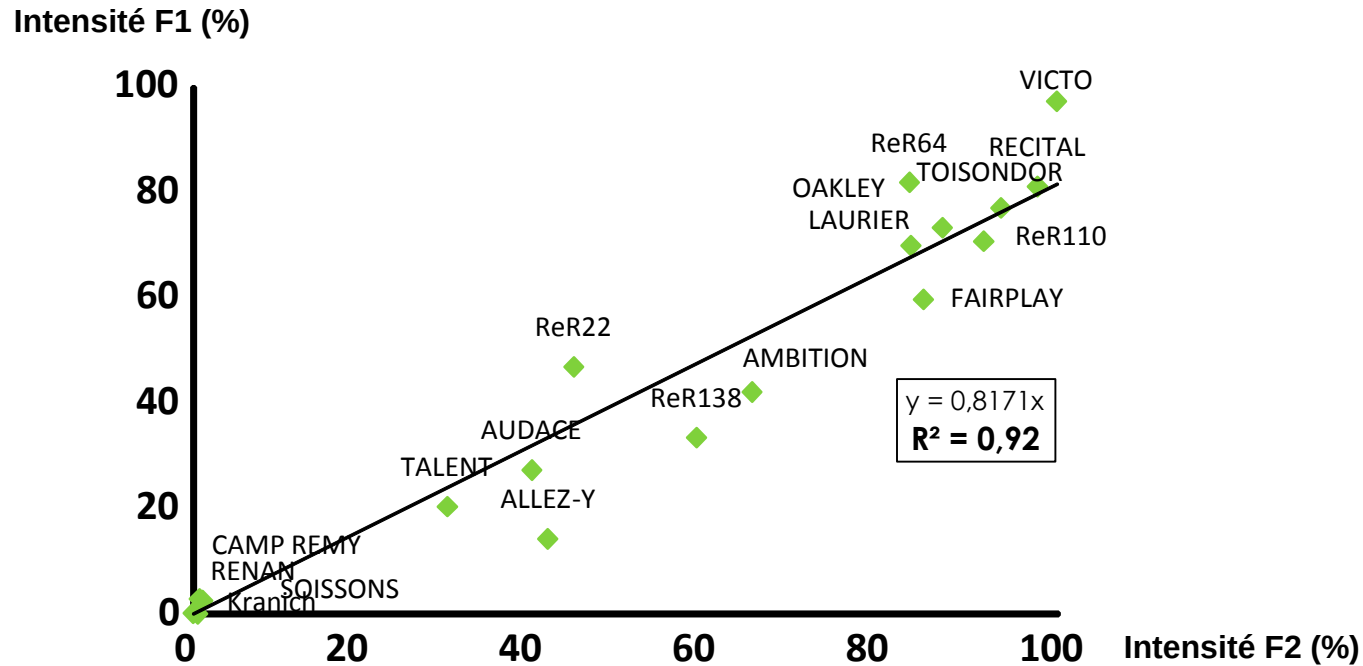
	Contamination naturelle		Contamination artificielle	
	France	Angleterre	France	Angleterre
Nombre de sites	6 (dpts 14, 22, 59, 76, 82 et 91)	4	7 (dpts 28 (x2), 35, 59, 60 et 78 (x2))	4

Contamination par la race Warrior, dominante en France depuis 2011 + race Solstice/Oakley

○ Classification

- **Résistante totale**, tous les sites, intensité $< 3\%$
- **Moyennement résistante**, intensité $< 15\%$; au moins un site, $\geq 3\%$
- **Moyennement sensible**, intensité $< 40\%$; au moins un site, $\geq 15\%$
- **Sensible**, au moins un site, intensité $\geq 40\%$

UNE NOTATION DE L'INTENSITÉ DE MALADIE SUR CHAQUE ÉTAGE FOLIAIRE EST-ELLE NÉCESSAIRE POUR APPRÉHENDER LE COMPORTEMENT AU STADE ADULTE ?



Site d'InVivo (91) en contamination naturelle, juin 2014

- Les notations d'intensité sur les feuilles F1 et F2 sont fortement corrélées.
- Ces corrélations sont moins importantes avec les étages inférieurs.

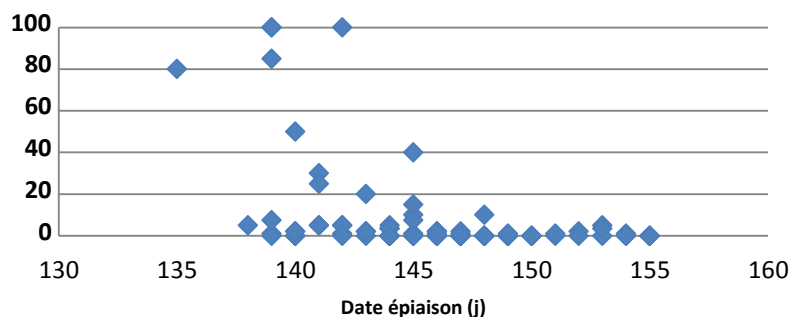


NOTATIONS ÉPIS

- Cas particulier de sporulation sur glumes alors que les feuilles sont résistantes
- Les mécanismes de résistance sur épi ne sont pas maîtrisés. Date d'épiaison en lien avec la pression du pathogène ?

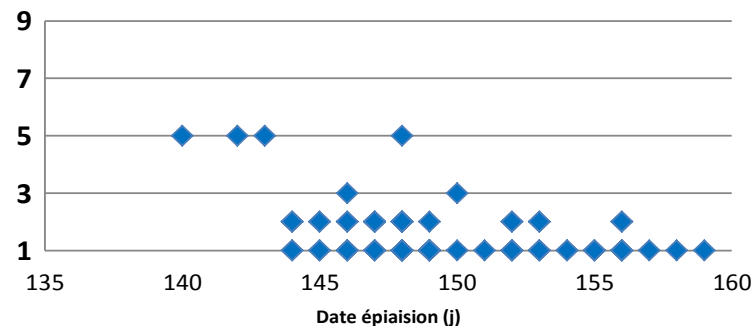
Epi malades (%)

Site d'Unisigma



Notation épis
(1=absence de
symptômes ; 9)

Site Florimond Desprez



- Date épiaison (j) = nombre de jours entre le 1^{er} janvier et la date où 50 % des épis sont au stade épiaison.

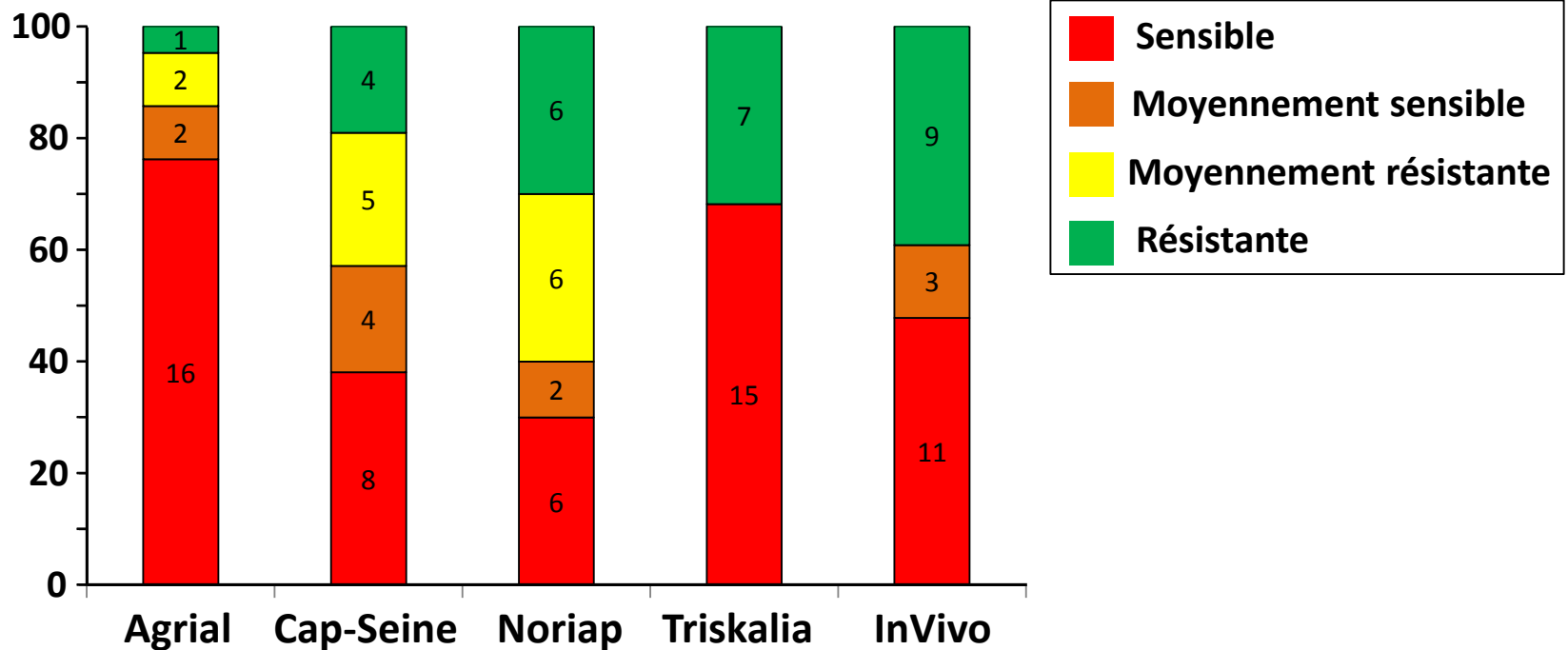
Sites obtenteurs, 2015

- Hypothèses : ouverture des glumes, gènes de résistance, etc.

LE COMPORTEMENT DES VARIÉTÉS VARIE-T-IL DANS L'ESPACE ET DANS LE TEMPS ?

IMPORTANCE DE L'EFFET SITE EN CONTAMINATION NATURELLE EN FRANCE

Génotypes (%)

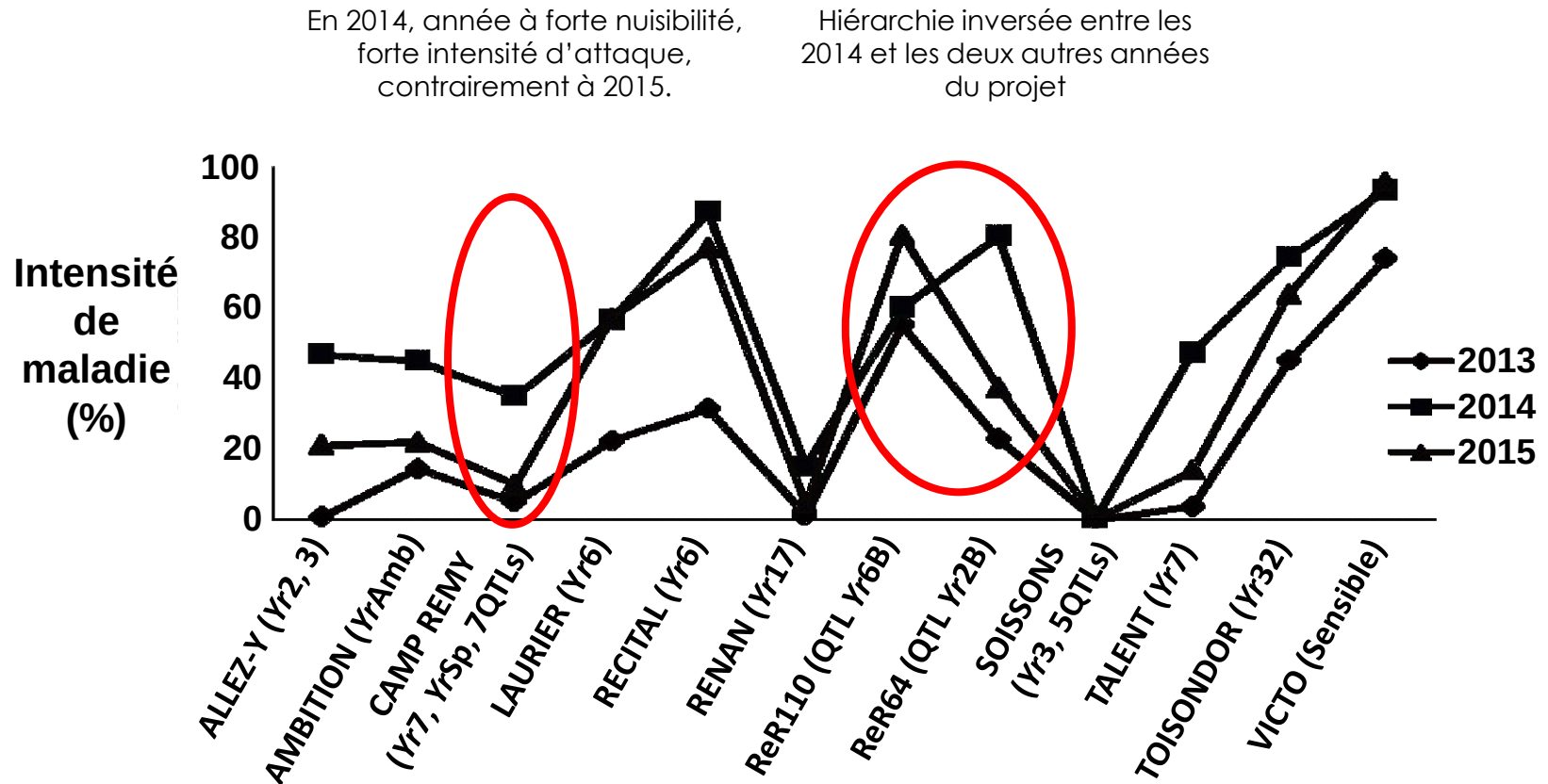


Importante interaction génotype x site pour les génotypes révélateurs (sites de coopératives françaises) en 2014.

- Le niveau de symptômes de certains génotypes révélateurs diffère selon les sites.

LE COMPORTEMENT DES VARIÉTÉS VARIE-T-IL DANS L'ESPACE ET DANS LE TEMPS ?

IMPORTANCE DE L'EFFET ANNÉE EN CONTAMINATION NATURELLE EN FRANCE



- Classement d'intensité de maladie entre les génotypes révélateurs selon les années : évolution des virulences

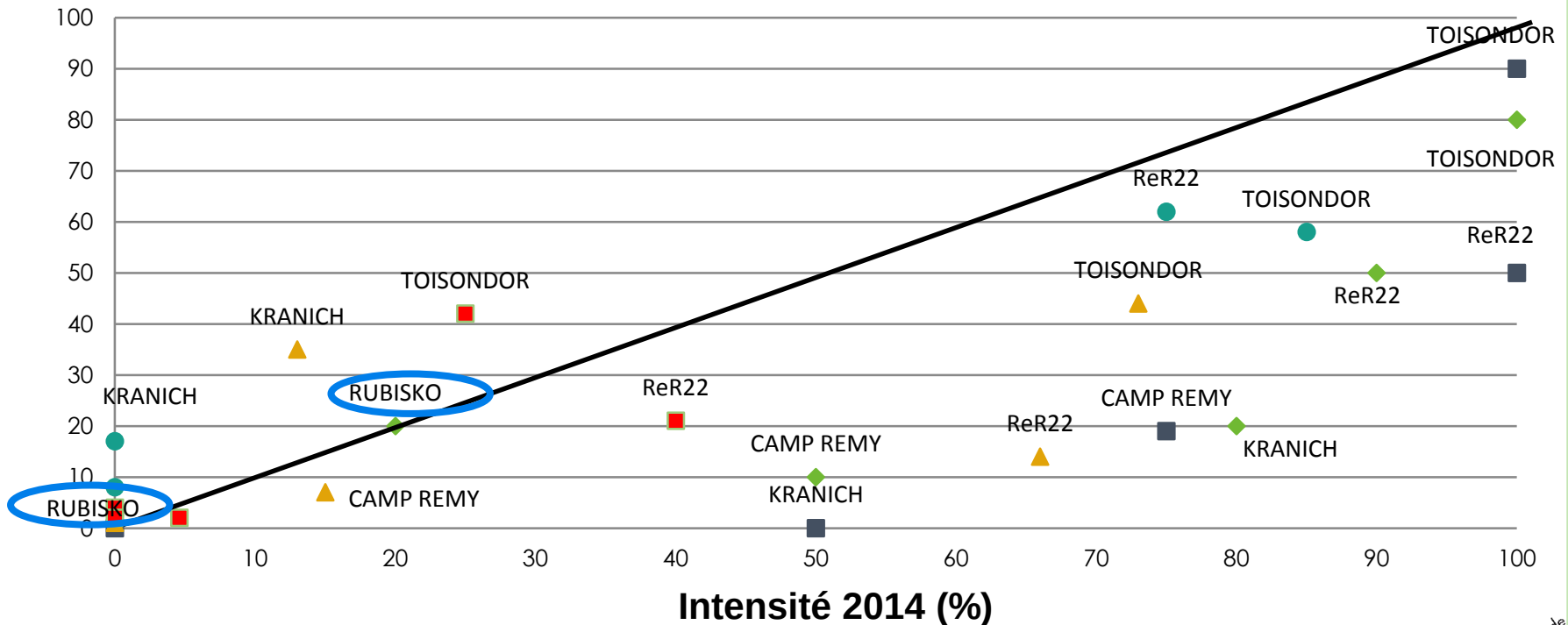
IMPORTANCE DE L'EFFET ANNÉE*EFFET SITE

- Pour Rubisko, seul l'effet site est présent entre les 2 années du projet

Relation entre les intensités observées en 2014 et 2015.

Intensité 2015 (%) 5 géotypes révélateurs - 5 lieux - Contamination naturelle

● InVivo ◆ Agrial ■ Triskalia ▲ CapSeine ■ Noriap



IMPORTANCE DE L'EFFET ANNÉE*EFFET SITE

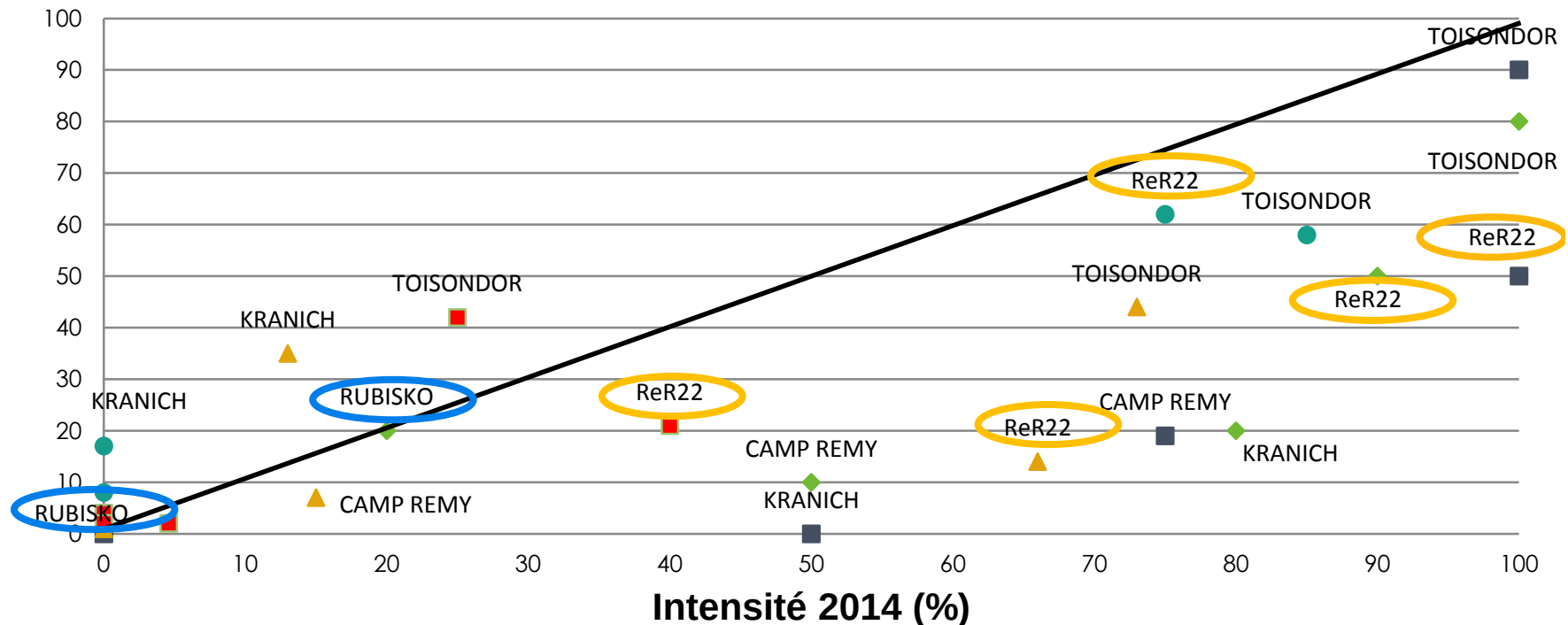
- Pour Rubisko, seul l'effet site est présent entre les deux années du projet
- Pour ReR22, la pression plus forte en 2014 a engendré des symptômes plus importants en 2014 qu'en 2015.

Relation entre les intensités observées en 2014 et 2015.

5 géotypes révélateurs - 5 lieux - Contamination naturelle

**Intensité
2015 (%)**

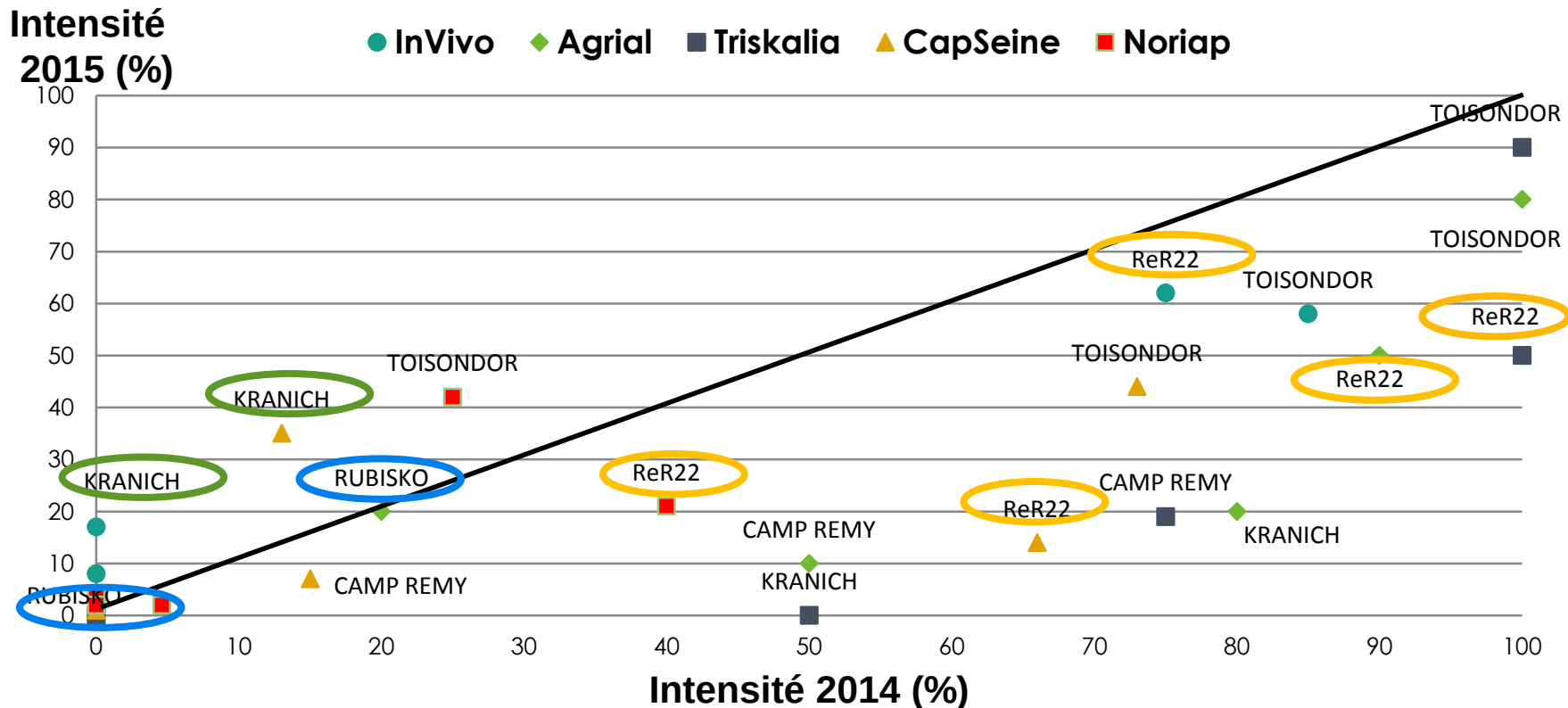
● InVivo ◆ Agrial ■ Triskalia ▲ CapSeine ■ Noriap



IMPORTANCE DE L'EFFET ANNÉE*EFFET SITE

- Pour Kranich, les réponses sont différenciées selon les sites :
 - Sur le site de Capseine (76) et InVivo (91), intensité plus forte en 2015, alors que la pression maladie était moins importante.

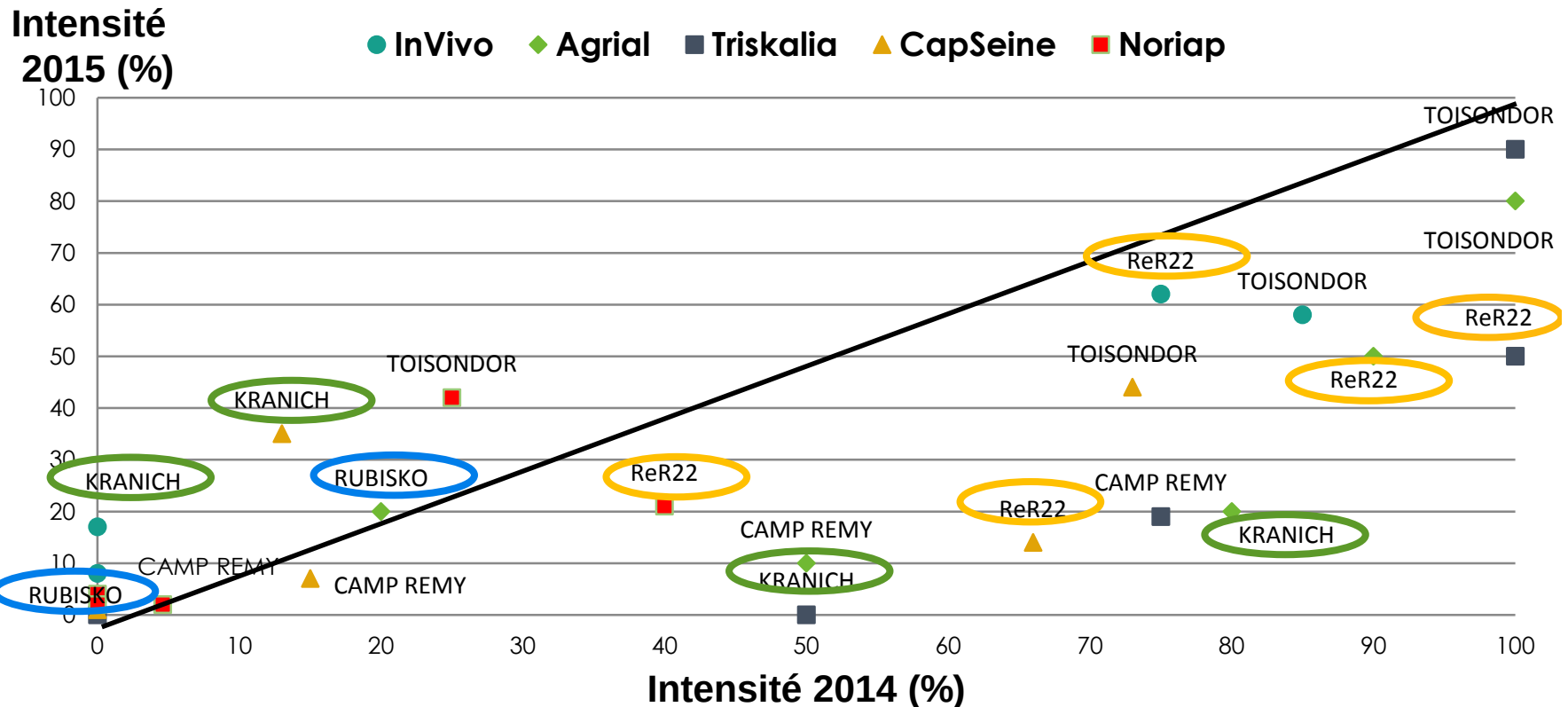
Relation entre les intensités observées en 2014 et 2015. 5 géotypes révélateurs - 5 lieux - Contamination naturelle



IMPORTANCE DE L'EFFET ANNÉE*EFFET SITE

- Pour Kranich, les réponses sont différenciées selon les sites :
 - Sur le site d'Agrial (14) et de Triskalia (29), les infestations ont été plus importantes en 2014, en lien avec la pression maladie.

**Relation entre les intensités observées en 2014 et 2015.
5 génotypes révélateurs - 5 lieux - Contamination naturelle**



IMPORTANCE DE L'EFFET ANNÉE*EFFET SITE

LIEN AVEC LES RACES PRÉSENTES SUR LE SITE

- En 2014, sur les sites où Kranich ou Camp Rémy (dans une moindre mesure) étaient les plus fortement touchées, Warrior 1 était présente (Triskalia). A l'inverse, elle était absente sur le site InVivo.

Coopératives	2013		2014		2015	
	Warrior1	Warrior-	Warrior1	Warrior-	Warrior1	Warrior-
Agrial	6	3	2	8	-	-
Cap-Seine	-	3	1	13	1	1
InVivo	1	-	-	10	-	3
Triskalia	3	4	5	4	-	-
Noriap	-	-	-	1	-	-

Races de *Pst* isolées à partir d'échantillons de coopératives françaises en 2013, 2014, 2015, déterminées par pathotypage et génotypage

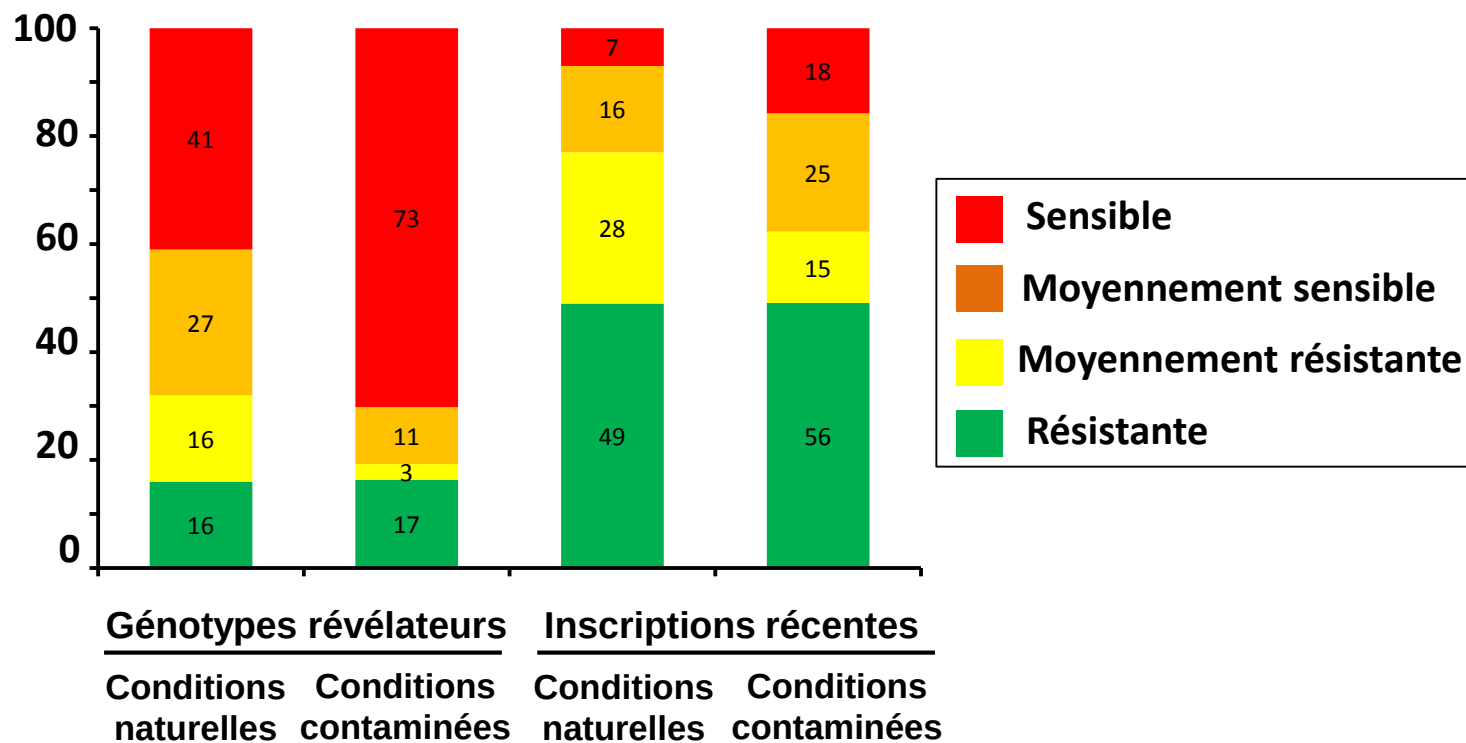
- D'autres races non identifiées ?



EN CONTAMINATION ARTIFICIELLE

- 7 essais obtenteurs en conditions contaminées
- Les réponses variétales en conditions contaminées et naturelles sont dans l'ensemble similaire malgré une intensité de maladie plus forte sur les sites contaminés.

Génotypes (%)



(dispositifs 2015)



EN CONTAMINATION ARTIFICIELLE

- Les mêmes souches inoculées
- Des coefficients de corrélation entre sites globalement élevés

Spearman Correlation Coefficients, N = 20						
	Limagrain	RAGT	NRA Rennes	Florimond D	Unisigma	AgriObtentio
Limagrain						
RAGT	0,88963					
	0,0000					
INRA Rennes	0,93195	0,84614				
	0,0000	0,0000				
Florimond Desprez	0,85610	0,93865	0,80898			
	0,0000	0,0000	0,0000			
Unisigma	0,91134	0,86642	0,84548	0,88116		
	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000		
AgriObtentions	0,66314	0,70801	0,65703	0,59111	0,62989	
	0,0014	0,0005	0,0016	0,0061	0,0029	
Syngenta	0,95052	0,86934	0,93175	0,87562	0,95618	0,70765
	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0005

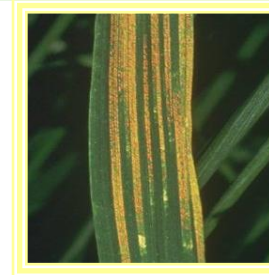
Coefficient de corrélation de Spearman et p-value associées pour l'intensité de maladie pour les génotypes révélateurs (N=20) sur les sites des obtenteurs.

	INRA RENNES	FLORIMOND DESPREZ
LAURIER	80	75
KRANICH	55	0,1
FRUCTIDOR	25	0
MUSIK	55	75

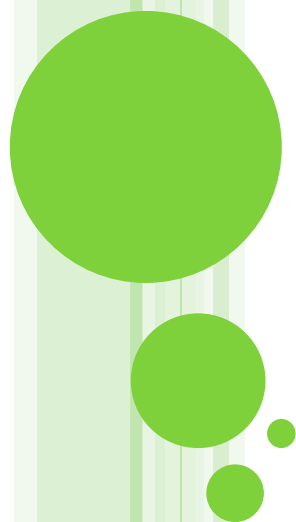
- Mais des différences de réponse entre génotypes révélateurs...
- ... ce qui suggère des contaminations naturelles

Intensité de rouille jaune (%) sur 2 sites en contamination artificielle en 2014 pour 4 variétés.





Evaluation des résistances de variétés en Angleterre

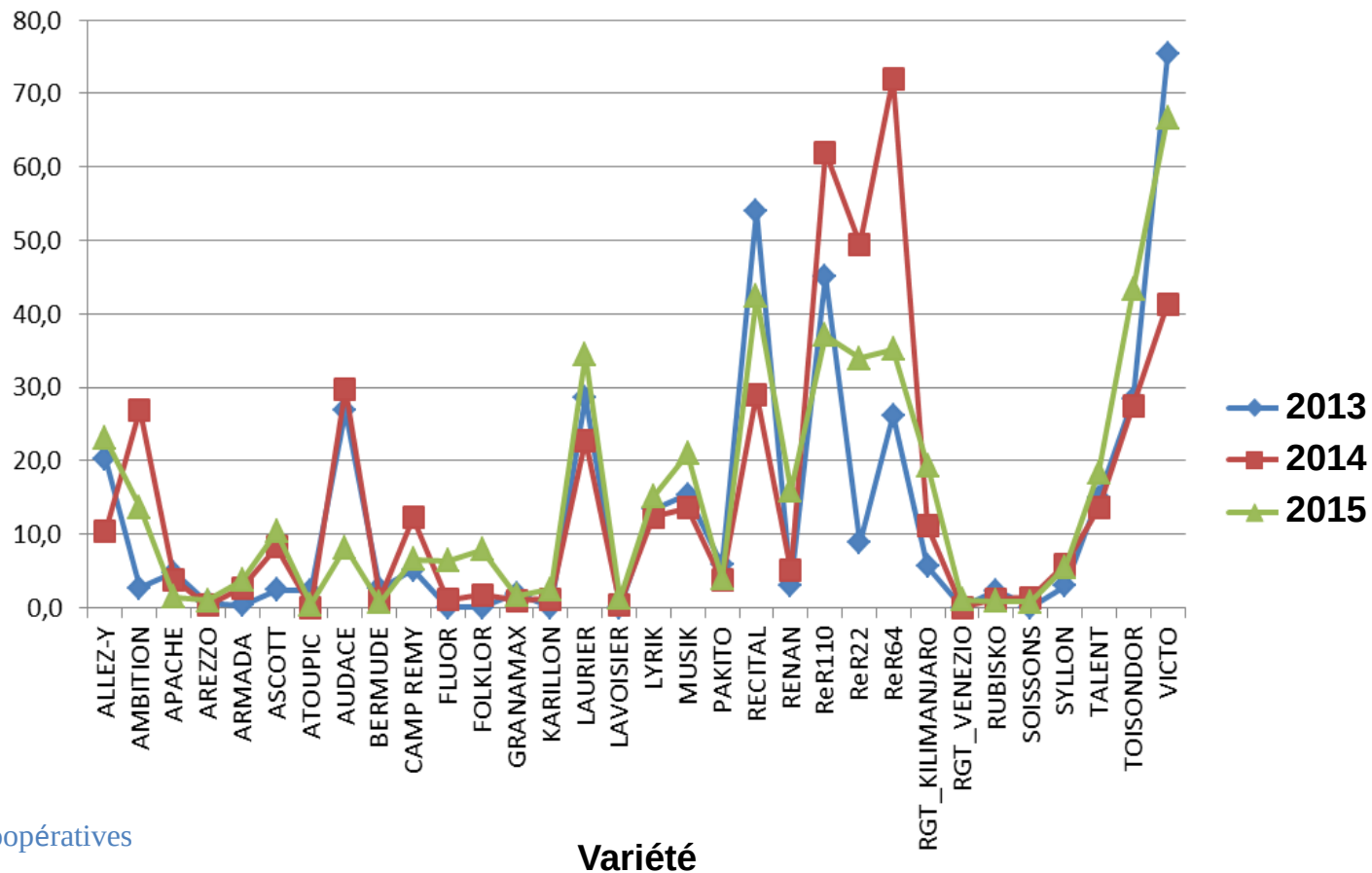


IMPORTANCE DE L'EFFET ANNÉE

EN ANGLETERRE EN CONDITION NATURELLE

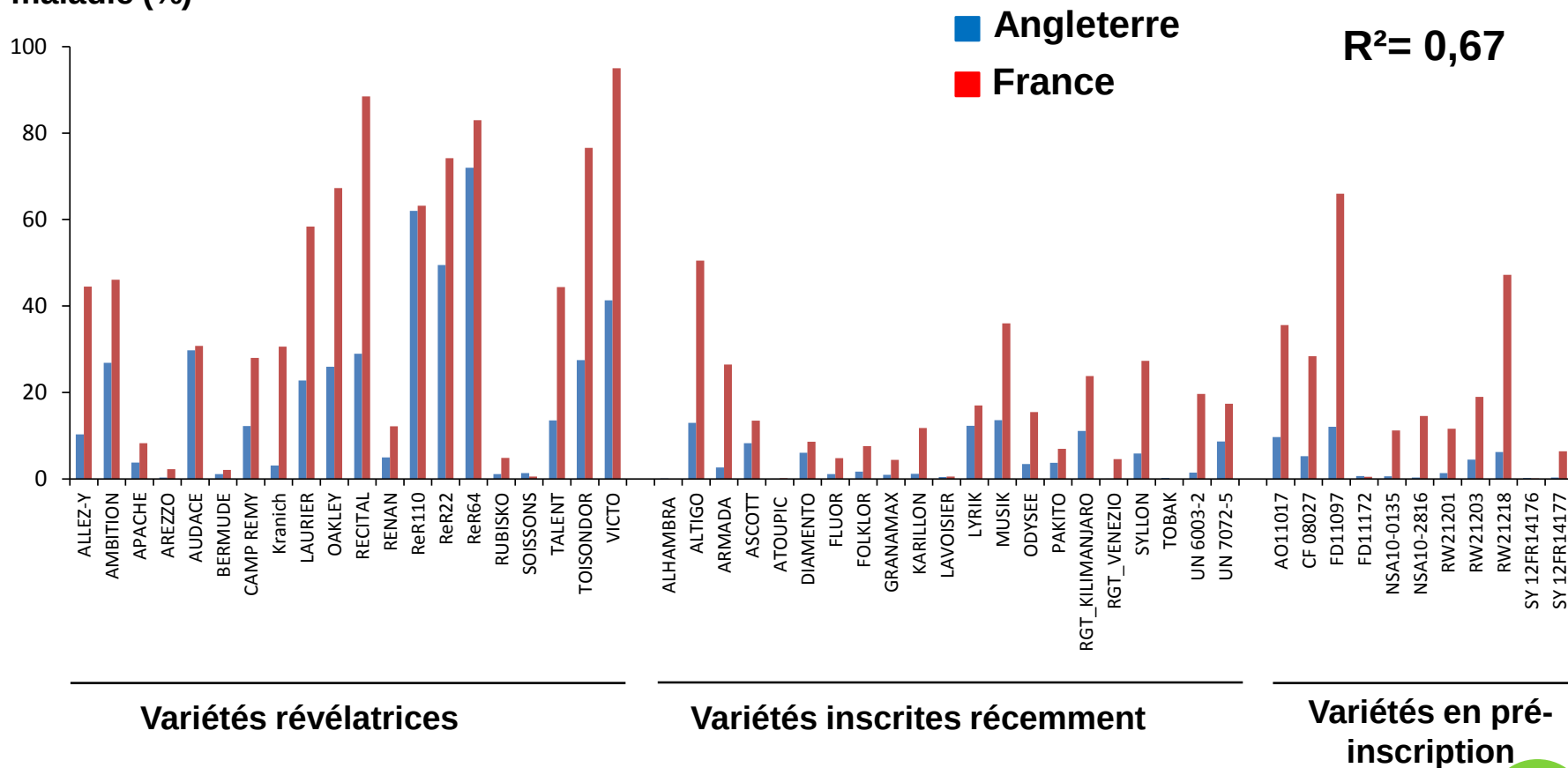
- La hiérarchie des intensités de maladie entre années est également différente selon les variétés (ex : Audace, Récital).

Intensité moyenne
de maladie
(%)



COMPARAISON DES NOTATIONS EN ANGLETERRE ET EN FRANCE EN 2014 EN CONDITIONS NATURELLES

Intensité de
maladie (%)



- Une tendance générale similaire mais une hiérarchie des symptômes qui peut varier pour certains génotypes (ex : FD11097)

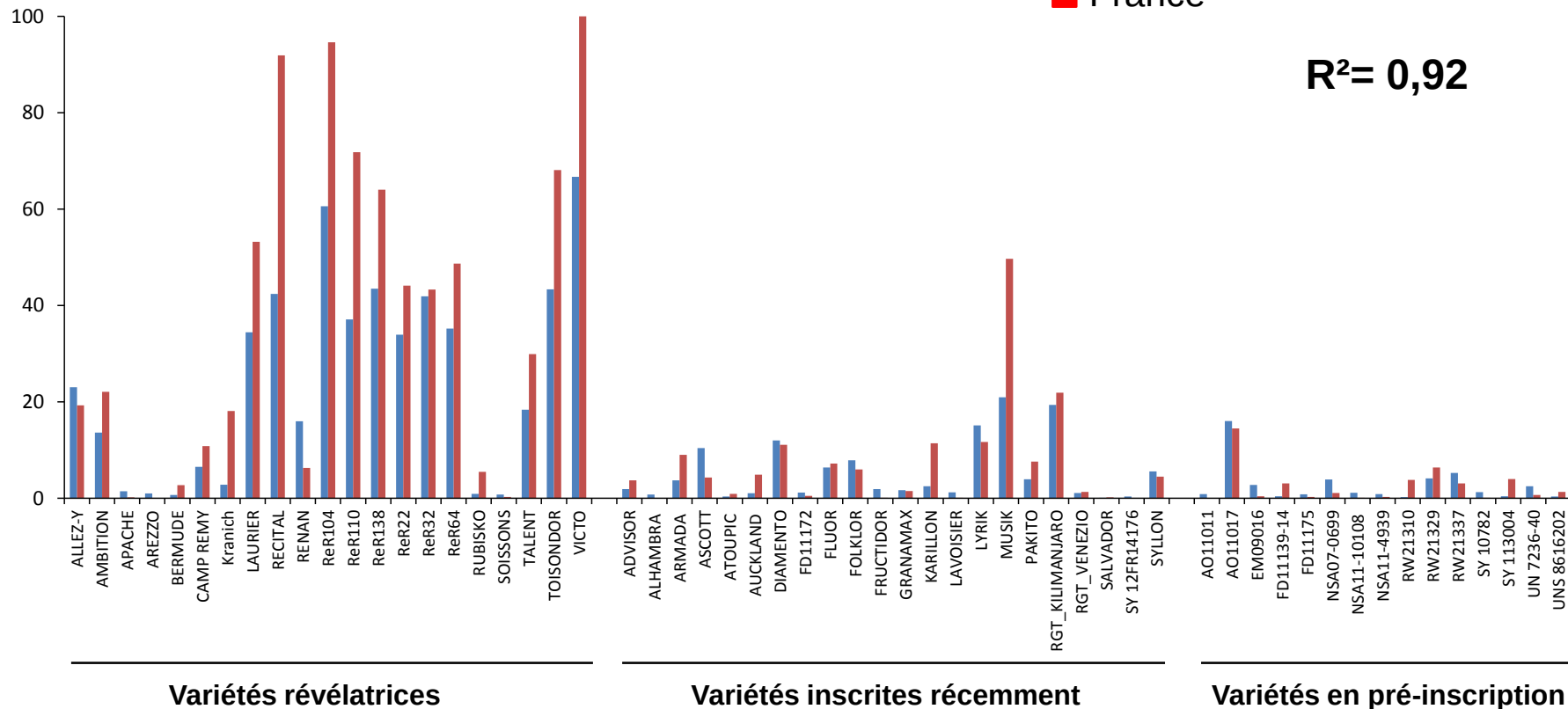
COMPARAISON DES NOTATIONS EN ANGLETERRE ET EN FRANCE EN 2015 EN CONDITIONS NATURELLES

Intensité
de maladie
(%)

■ Angleterre

■ France

$R^2 = 0,92$



- En 2015, année à pression plus faible en France, le comportement des variétés en France et en Angleterre est proche.

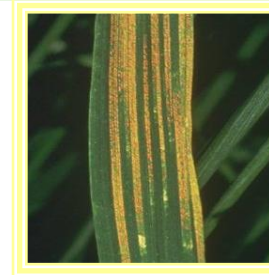


RACES PRÉSENTES EN ANGLETERRE EN CONDITION NATURELLE

- Plusieurs races en Angleterre, dont certaines présentes en France

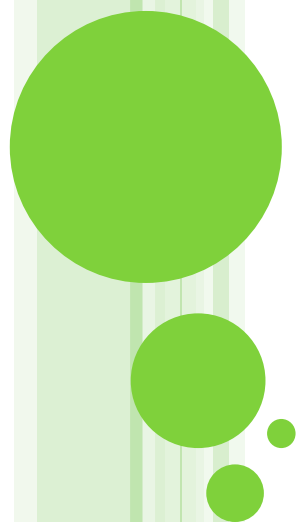
Races		Fr	UK	Virulences															
Variants	Triticale	+	-	-	2	-	-	6	7	8	-	10	-	-	-	-	-	-	-
	Triticale aggressive	+	-	-	2	-	-	6	7	8	9	10	-	-	-	-	-	-	-
	Kranich	-	+	1	2	3	-	6	7	8	9	-	17	25	32	-	Amb	-	-
	Warrior 1	+	+	1	2	3	4	6	7	-	9	-	17	25	32	Sp	Amb	-	-
	Warrior -	+	+	1	2	3	4	6	7	-	9	-	17	25	32	Sp	-	-	-
	Warrior Av17	+	-	1	2	3	4	6	7	-	9	-	-	25	32	Sp	-	-	-
	Warrior AvSp	-	+	1	2	3	4	6	7	-	9	-	17	25	32	-	-	-	-
	Warrior Av4	-	+	1	2	3	-	6	7	-	9	-	17	25	32	Sp	-	-	-
	Warrior Av4,Sp	-	+	1	2	3	-	(6)	7	-	9	-	17	25	32	-	-	-	-
	Warrior Av4,7	-	+	1	2	3	-	(6)	-	-	9	-	17	25	32	Sp	-	-	-
	Warrior Av1,9,17	-	+	-	2	3	4	6	7	-	-	-	-	25	32	Sp	-	-	-
Oakley/Soltice		+	+	1	2	3	4	6	-	-	9	-	17	25	32	-	-	-	-
Sterling		+	+	1	2	3	4	6	7	-	9	-	17	25	32	-	-	-	-

- Corrélation entre les observations dans les 2 pays, l'intérêt serait d'inoculer en UK une race non détectée en F.



Recherche de résistance durable

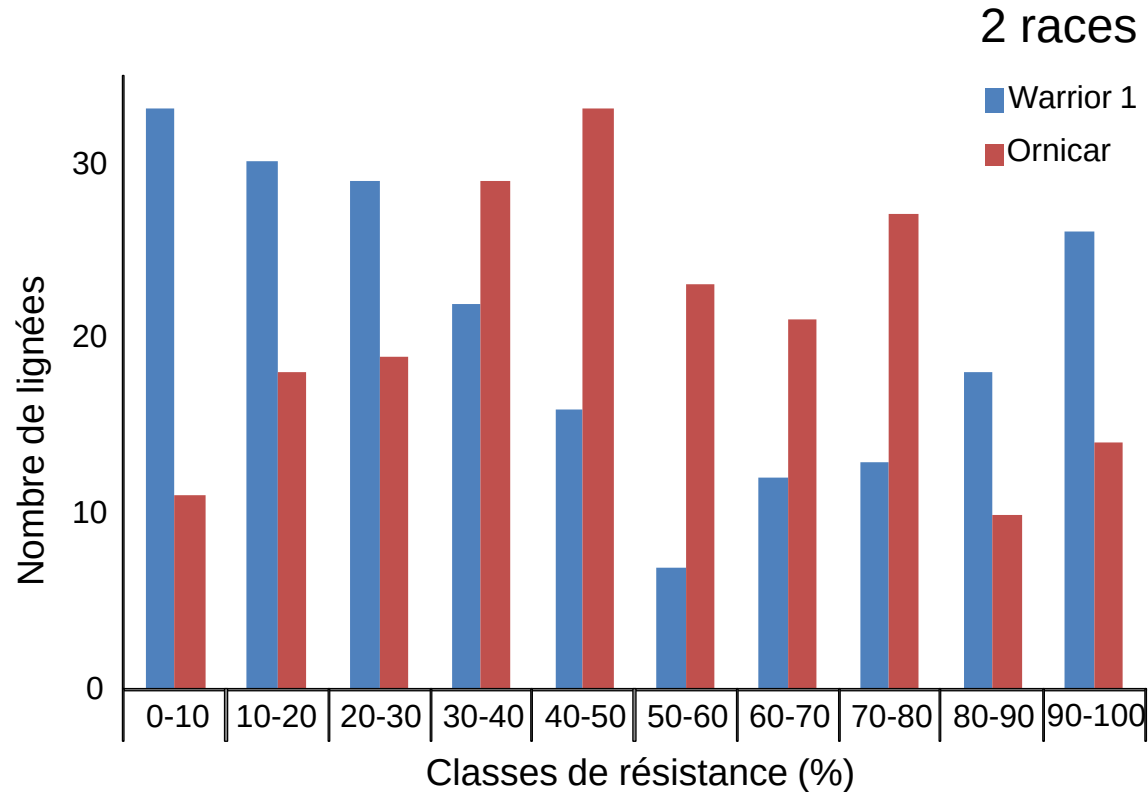
Population Nogent x Soissons



POPULATION SOISSONS X NOGENT

DISTRIBUTION DES CLASSES DE RÉSISTANCE (% SURFACE SPORULANTE)

FIN ÉPIAISON, INRA DE VERSAILLES, 2013



QTLs DE RÉSISTANCE ADULTE CHEZ SOISSONS

PHÉNOTYPAGE, GÉNOTYPAGE DE LA POPULATION NOGENT X SOISSONS

206 lignées SSD
960 SNP



Yr3

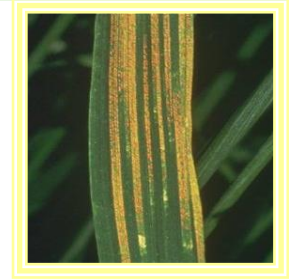
5 QTLs

5QTL identifiés :

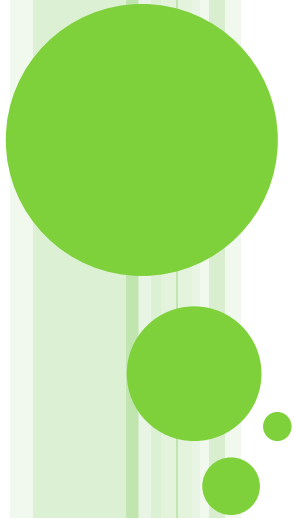
- QTL 2Aa, **2Ab**, 2B, 6D efficaces pour les 2 souches (Ornicar, Warrior1)
- QTL 7B spécifique de la souche Warrior1

L. Duchalais



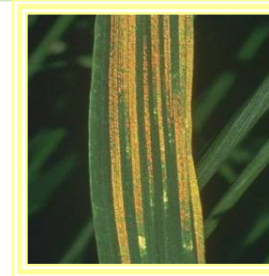


Conclusions

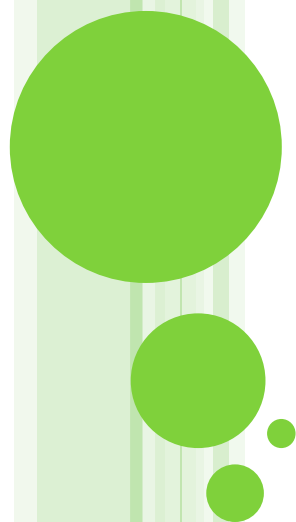


CONCLUSIONS

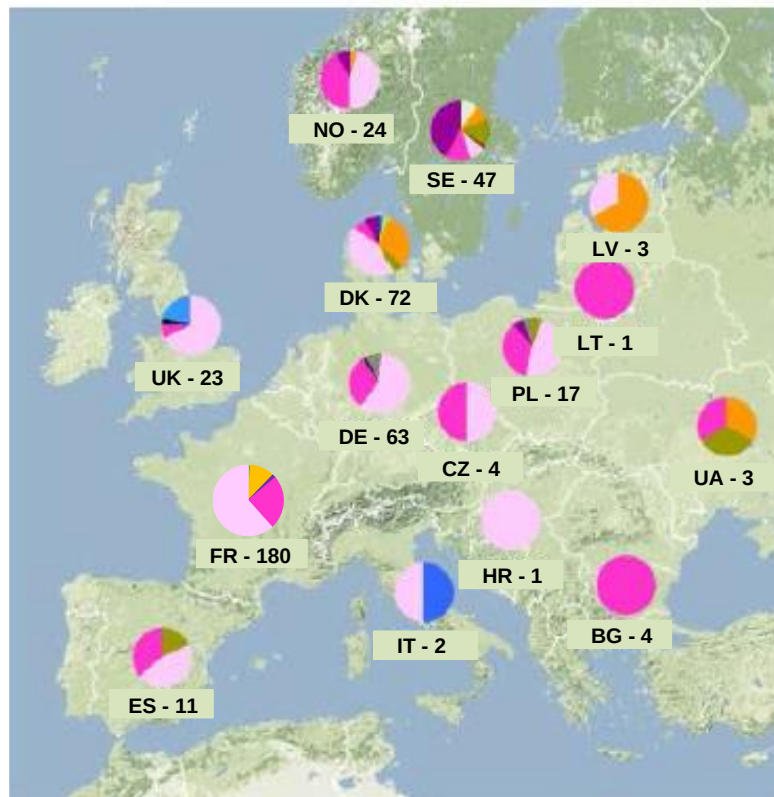
- La rouille jaune évolue de manière rapide et son suivi est complexe. Des réponses variétales en certains sites ne sont pas comprises.
- Pour appréhender au mieux l'évolution de *Pst* et les relations pathogène – plante hôte, il est nécessaire de maintenir
 - Une interaction forte entre recherche, sélection et développement
 - Un travail en réseau à l'échelle nationale et internationale
- Des gènes de résistance durable ont été identifiés vis-à-vis de la race Warrior et constitue des leviers de lutte



Rouille jaune Et en 2017 ?



DISTRIBUTION DES RACES DE PST EN 2016

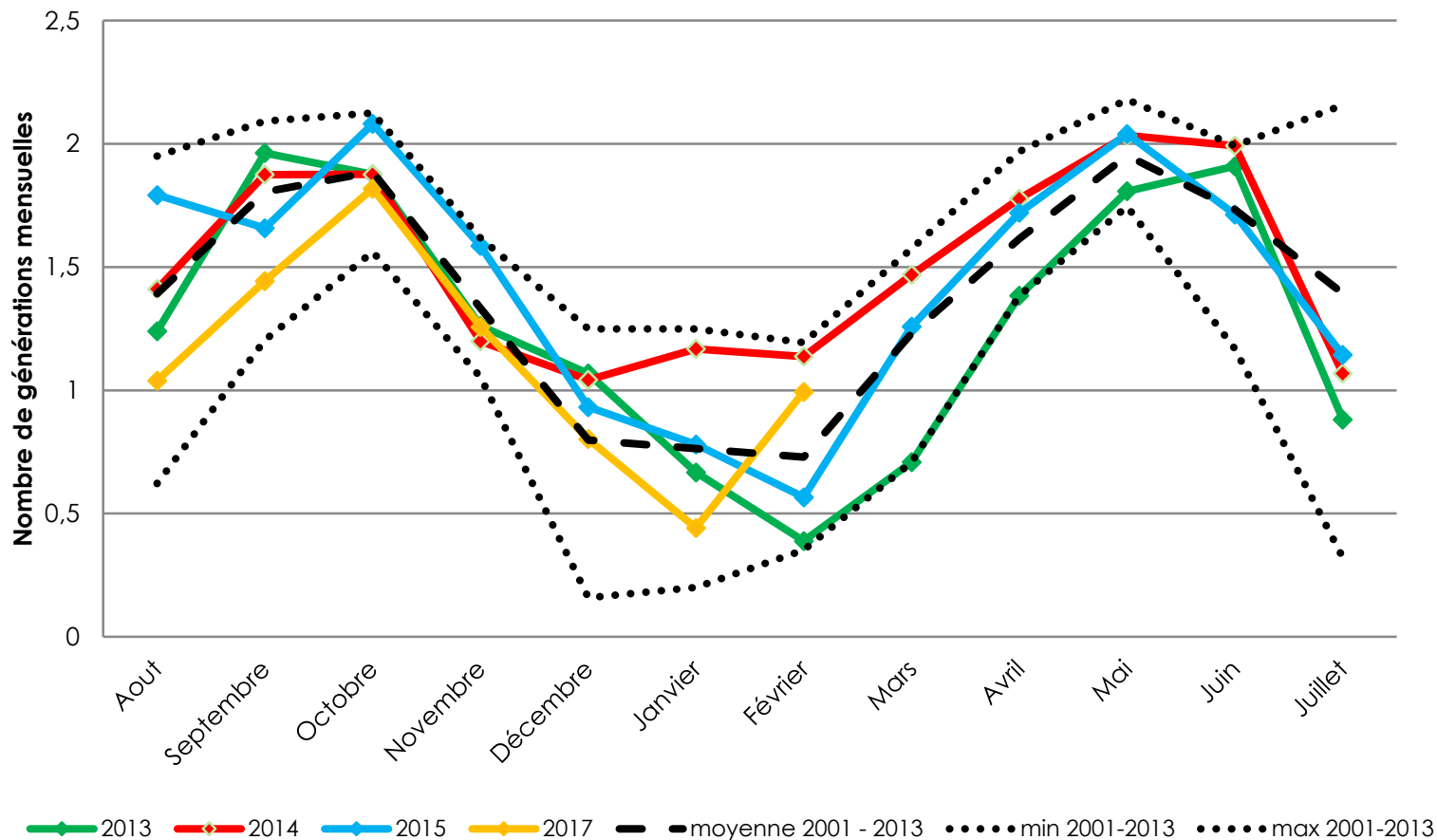


Spectre de virulences

	New-2016	-	2	-	-	6	7	8	9	-	-	25	32	Sp	-
	PstS3+V2 V25	-	2	-	-	6	7	8	-	-	-	25	-	-	-
	Hereford	-	2	3	-	6	7	8	-	-	-	25	32	-	-
	Triticale 2006	-	2	-	-	6	7	8	-	10	-	-	-	-	-
	Triticale 2015	-	2	-	-	6	7	8	9	-	-	-	-	-	-
	Triticale 2016	-	-	-	-	6	-	8	-	-	-	-	-	-	-
	Tulsa	-	-	3	4	6	-	-	-	-	-	25	32	-	-
	Kranich	1	2	3	-	6	7	8	9	-	17	25	32	-	Amb
	Warrior 1	1	2	3	4	6	7	-	9	-	17	25	32	Sp	Amb
	Warrior -	1	2	3	4	6	7	-	9	-	17	25	32	Sp	-
	Oakley/Soltice	1	2	3	4	6	-	-	9	-	17	25	32	-	-
	Oakley + V7	1	2	3	4	6	7	-	9	-	17	25	32	-	-
	autre														

UN HIVER 2017 SUFFISAMMENT RIGOUREUX POUR LIMITER LE DÉVELOPPEMENT DE LA ROUILLE JAUNE ?

**Nombre de générations mensuelles théoriques pour les
campagnes culturales 2013, 2014, 2015 et 2017
Région Nord Ouest**



Merci !

