

Une méthode pour améliorer la connaissance des variétés

Intérêt des modèles, besoins de développements nouveaux

Christophe Lecomte (1), Lorène Prost (2), Arnaud Gauffreteau (3)

(1) INRA UMR LEG, 17 rue Sully – 21065 Dijon
christophe.lecomte@dijon.inra.fr

(2) INRA UMR SADAPT, BP 01 – 78850 Thiverval-Grignon
lorene.prost@grignon.inra.fr

(3) INRA UMR d'Agronomie, BP 01 – 78850 Thiverval-Grignon
arnaud.gauffreteau@grignon.inra.fr



Question posée

➤ A partir d'une connaissance a priori du milieu naturel

- Ex: Type de sol, profondeur et risques associés (stress hydrique, vitesse de réchauffement...)
- Risques climatiques (ex: gel hivernal, sécheresse au printemps, fortes températures et stress hydrique en fin de cycle...)

➤ Comment choisir la ou les variétés les mieux adaptées aux caractéristiques de ce milieu ?

On n'a pas l'information sur l'adaptation des variétés aux caractéristiques des milieux

Variétés de pois d'hiver commercialisées en France																				
Variétés (et année d'inscription)	Obtenteur ou représentant	Type de plante	Cou- leur du grain	Tolérance au froid	Résultats Arvalis															Sur- face en se- mences (2005) (ha)
					Hauteur à la récolte (cm)		Poids de 1 000 grains (grammes)		Teneur en pro- téines	Rendement (en % de Cheyenne)										
					2004	2005	2004	2005		Bourgogne Barrois Lorraine		Centre Ile-de- France		Nord Picardie		Craie et cranettes		Sud		
									2000 à 2004 (1)	2005	2000 à 2004 (1)	2005	2000 à 2004 (1)	2005	2004	2005	2000 à 2004 (1)	2005 (2)		
Apache (05)	GAE Semences	afla	jaune	bonne	43	36	180	180	23,0	-	113	-	109	-	108	-	105	-	-	-
Beckii (ce)	Sem Partners	feuilles	jaune	bonne	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11
Brévent (91)	Epis-Sem	feuilles	jaune	ass. faible	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	41
Cartouche (05)	Serasem	afla	jaune	bonne	41	36	170	170	22,0	-	113	-	112	-	112	-	103	-	-	116
Cherokee (05)	GAE Semences	afla	jaune	très bonne	37	30	190	190	22,5	-	119	-	113	-	117	-	101	-	111	78
Cheyenne (00)	GAE Semences	afla	jaune	bonne	37	27	200	200	22,5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	226
Dove (ce)	Agri-Obtentions	afla	vert	bonne	37	27	180	180	21,0	101	111	106	118	96	125	103	104	86	-	34
Iceberg (ce)	Lecureur	afla	jaune	bonne	43	-	170	-	22,5	-	-	98	-	96	-	-	-	99	-	6
Isard (05)	Agri-Obtentions	afla	jaune	très bonne	37	27	205	200	22,0	-	132	-	123	-	130	-	97	-	-	20
Lucy (ce)	GAE Semences	afla	vert	moyenne	44	36	175	180	23,5	95	-	105	111	87	110	-	94	106	100	73
Spirit (ce)	GAE Semences	afla	jaune	moyenne	37	-	210	-	23,0	-	-	101	-	97	-	-	-	100	-	46
Valeur du témoin Cherokee (ou Lucy, pour 2005 région Sud) (quintaux/ha)										44		49		54		45		45		
Nombre d'essais										5		9		2		6		6		

(1) Les résultats d'essais de rendement 2000-2004 sont des moyennes obtenues sur ces 5 années.

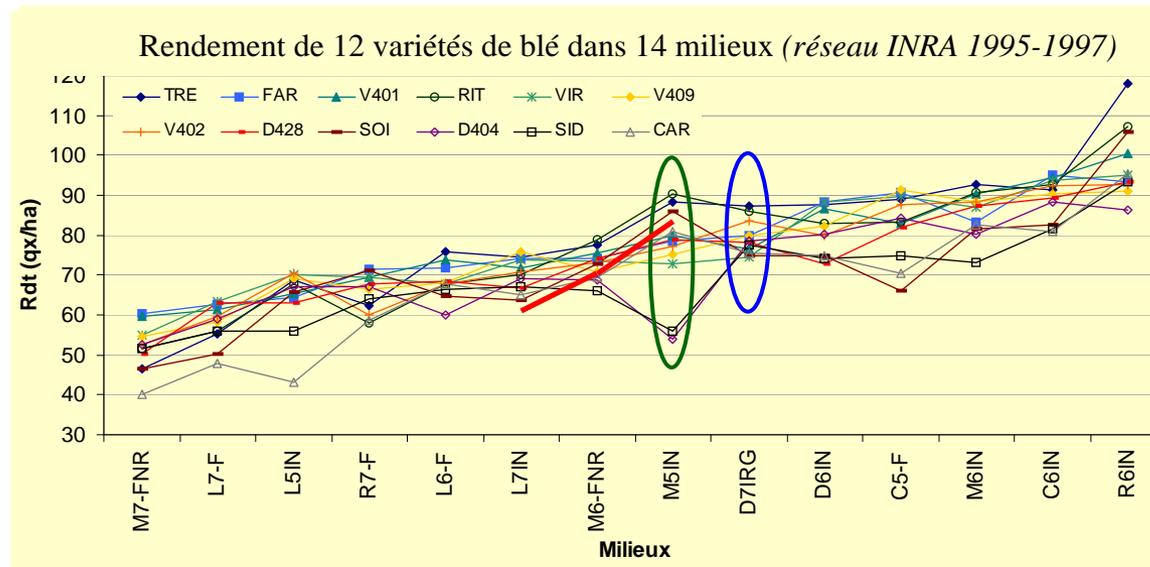
(2) Les résultats d'essais de rendements 2005 de la région Sud concernent, en fait, la région Pays de la Loire, et sont donnés en fonction de Lucy.

(Semences et Progrès n° 125, Septembre 2005)

Résistance aux maladies, aux fortes températures, à la sécheresse, ... ?

La principale source de connaissance des variétés est l'expérimentation variétale

- Les réseaux d'essais sont peu connectés entre eux
- Les performances variétales sont instables : interaction génotype x milieu



Le jugement des variétés ne peut reposer sur un seul milieu

→ Répéter les évaluations

L'interaction GxM révèle les différences de sensibilité des variétés aux contraintes apparues dans chaque milieu

→ Expliquer et valoriser l'interaction G x M

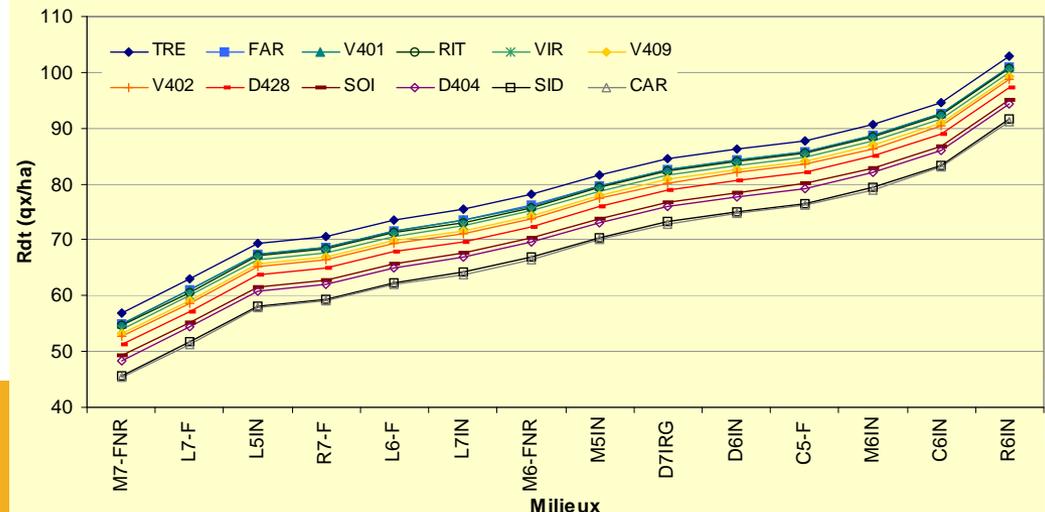
L'IGM n'est le plus souvent pas prise en compte dans l'analyse des résultats

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	Moy
		M7-FNR	L7-F	L5IN	R7-F	L6-F	L7IN	M6-FNR	M5IN	D7IRG	D6IN	C5-F	M6IN	C6IN	R6IN	
1	TRE	46.6	55.4	68.6	62.5	76.0	74.5	77.4	88.2	87.2	87.6	88.9	92.7	91.5	118.1	79.7
2	FAR	60.2	62.7	64.4	71.3	71.9	74.2	74.3	78.5	79.8	88.4	90.5	83.3	95.0	93.5	77.7
3	V401	59.8	61.2	65.4	69.3	73.8	71.7	75.5	79.8	76.5	86.8	82.8	90.4	94.3	100.5	77.7
4	RIT	51.6	55.9	67.7	58.1	67.9	70.1	78.9	90.2	85.8	83.0	83.4	90.7	92.6	107.4	77.4
5	VIR	55.1	63.3	70.0	69.5	67.8	73.7	73.4	72.8	74.4	88.5	89.8	87.1	93.8	95.1	76.7
6	V409	54.7	58.4	69.2	66.3	68.3	75.9	70.8	75.3	80.0	82.4	91.4	88.3	90.5	91.1	75.9
7	V402	52.7	59.5	70.4	60.1	67.7	70.6	73.0	77.1	83.5	79.9	87.5	88.3	92.5	92.7	75.4
8	D428	50.2	63.1	63.1	67.8	68.3	66.9	74.3	78.8	78.3	72.7	81.8	87.2	89.4	93.5	73.9
9	SOI	46.4	50.3	65.8	71.0	64.8	63.8	72.9	86.1	74.8	74.8	66.0	81.5	82.6	105.7	71.9
10	D404	52.5	59.0	67.0	67.1	59.9	69.2	68.8	53.9	78.7	80.4	84.2	80.2	88.3	86.2	71.1
11	SID	51.5	56.0	56.0	64.0	66.6	67.1	66.2	56.1	77.6	74.1	74.7	73.2	81.6	93.3	68.4
12	CAR	40.0	48.0	43.1	58.6	67.6	65.0	69.4	80.8	75.6	74.9	70.6	82.6	80.8	95.5	68.0
	Moy	51.8	57.8	64.2	65.5	68.4	70.2	72.9	76.5	79.3	81.1	82.6	85.5	89.4	97.7	74.5

Quand on juge les variétés sur leur moyenne, on fait comme si elles avaient une réponse parallèle dans les différents milieux

→ Perte d'information

Rendement de 12 variétés de blé dans 14 milieux (réseau INRA 1995-1997)

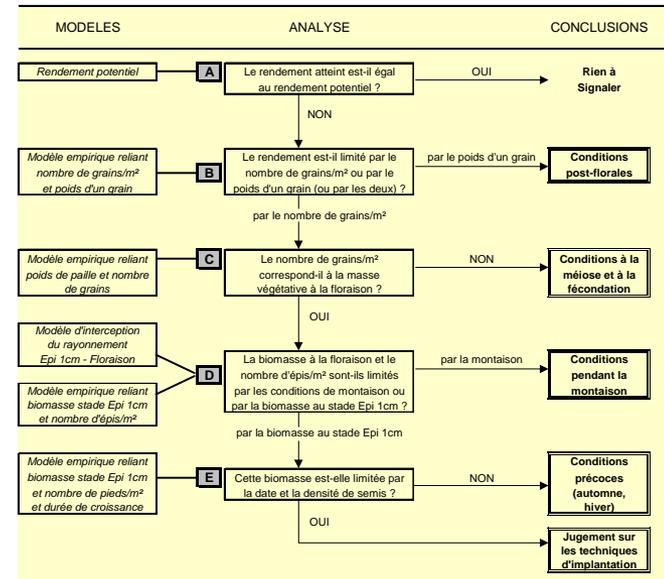


ENVIRONNEMENT

Il est nécessaire de développer de nouveaux outils pour analyser l'adaptation des variétés aux milieux

- Pour tirer pleinement et rapidement parti de la variabilité des résultats
- Dans ce sens, de nombreux travaux ont été réalisés depuis longtemps en agronomie et en statistiques (mais ils ne sont pas valorisés aujourd'hui)

- **Diagnostic agronomique** pour identifier les contraintes apparues dans les milieux (Sebillotte, 1980 ; Boiffin *et al*, 1981; Meynard et David, 1992; Leterme *et al*, 1994; Doré *et al*, 1997)
- **Méthodes statistiques** pour interpréter la réponse différentielle des variétés aux milieux, dès les années 1960 (Brancourt-Hulmel *et al*, 1997)



La régression factorielle (Denis 1980, 1988) permet de décomposer l'IGM avec des variables descriptives des facteurs limitants et d'estimer la tolérance des variétés à ces facteurs limitants (van Eeuwijk *et al.*, 2004).

Méthode d'analyse des résultats d'essais variétaux

1- Décrire les milieux
(Identifier et Quantifier
les facteurs limitants)



**Diagnostic agronomique
sur des témoins révélateurs**

Variables descriptives des
facteurs limitants



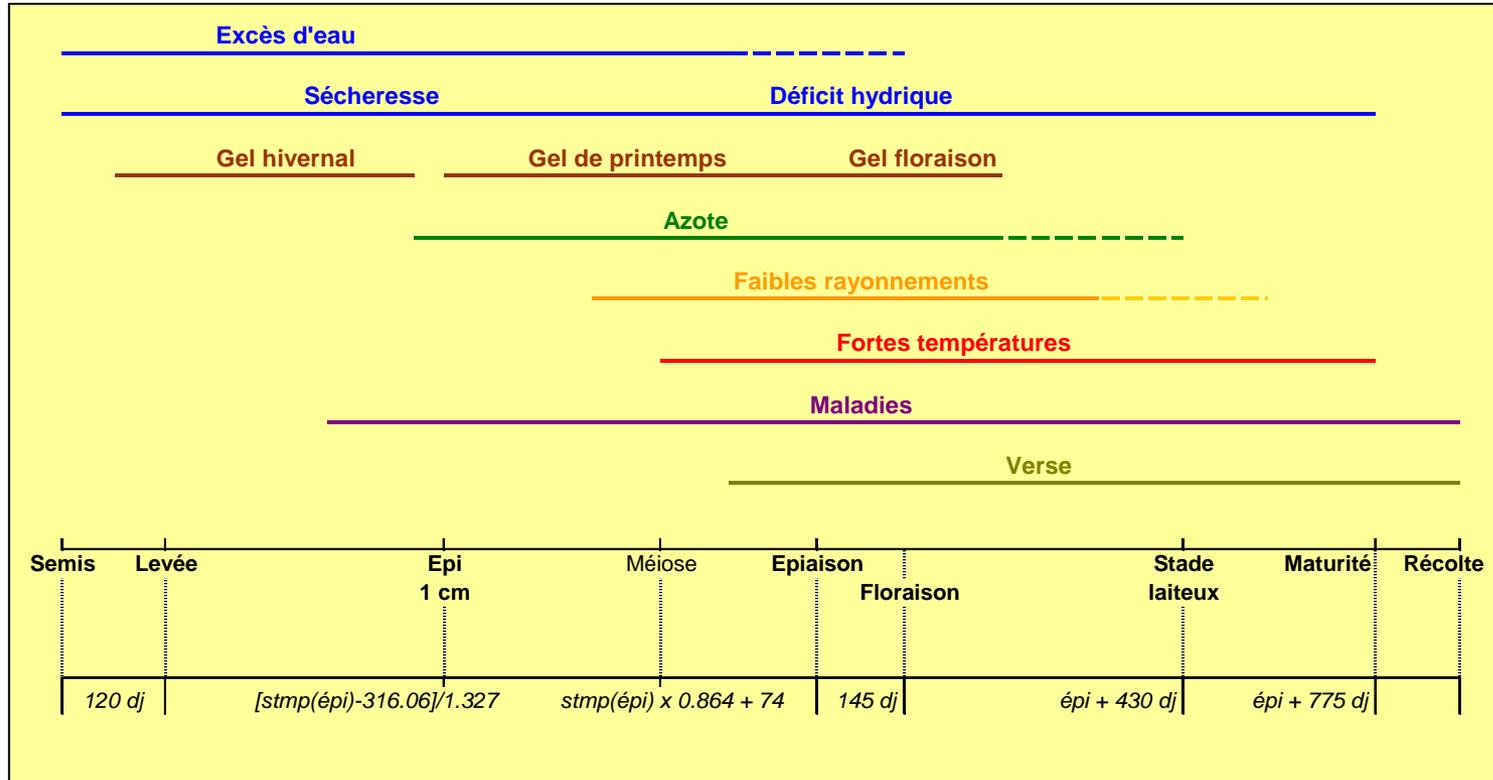
**2- Expliquer les variations de
comportement des variétés**



**Analyse de l'interaction
génotype x milieu sur
l'ensemble des variétés**

Estimation des tolérances
variétales aux facteurs limitants

Décrire tous les facteurs limitants possibles sur les génotypes témoins-révélateurs (GR)



Cumul des P-ETP >0

Cumul des P-ETP <0,
des ETR-ETM <0
Modèle (tmp min < seuils)
Observations
INN floraison, HN tester

Cumul Rgl, Rgl < seuil
(Nbj, cumul)
tmp max > 25° (Nbj,
cumul)
Observations, modèles

Observations verse et
accidents



-hv **-em** **-mf** **-fl** **-lm**

Stmp, Srgl, Rgst

**Echelle commune
(0 - 10), croissante
avec l'effet du f.l.**

ALIMENTATION
AGRICULTURE
ENVIRONNEMENT



Interpréter les pertes de rendement par GR

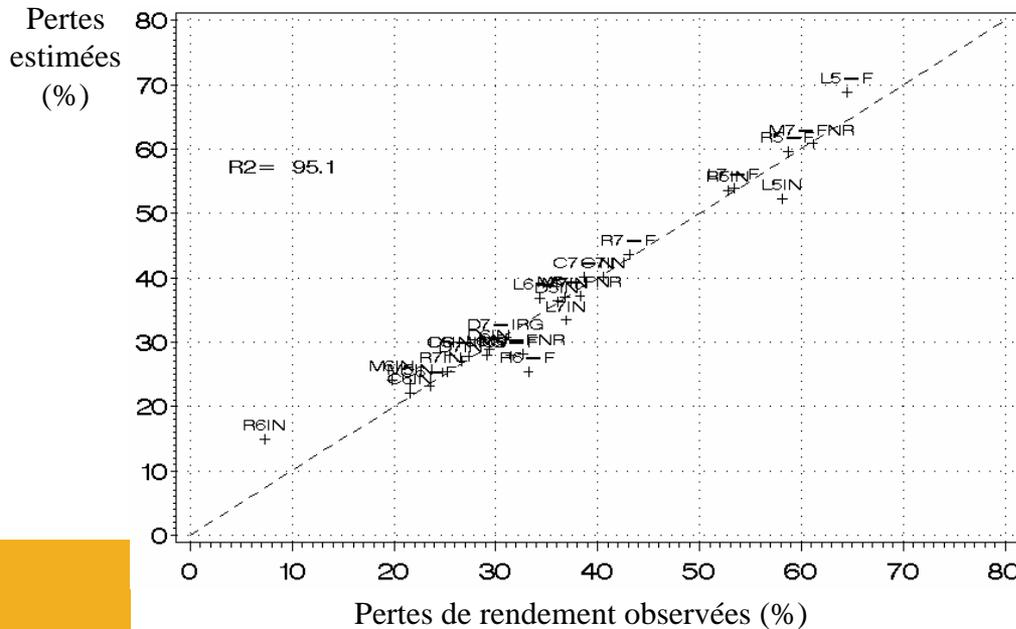
Régression linéaire multiple pas à pas avec les variables descriptives des facteurs limitants, avec contrainte sur le signe des variables:

$$dRdtr_j = \lambda_0 + \lambda_1 \cdot Ve_{1j} + \lambda_2 \cdot Ve_{2j} + \dots + \lambda_n \cdot Ve_{nj} + E_j$$

≈ 60 variables descriptives des facteurs limitants

6 à 12 variables explicatives selon le génotype révélateur

Réseau INRA 1995-1997, Variété Camp Rémy



Parts de variations du rendement expliquées:

- de 70 à 99 % selon le témoin révélateur, pour des réseaux de 10 à environ 35 milieux
- de 55 à 65 % pour des réseaux de 60 à 100 milieux

ALIMENTATION

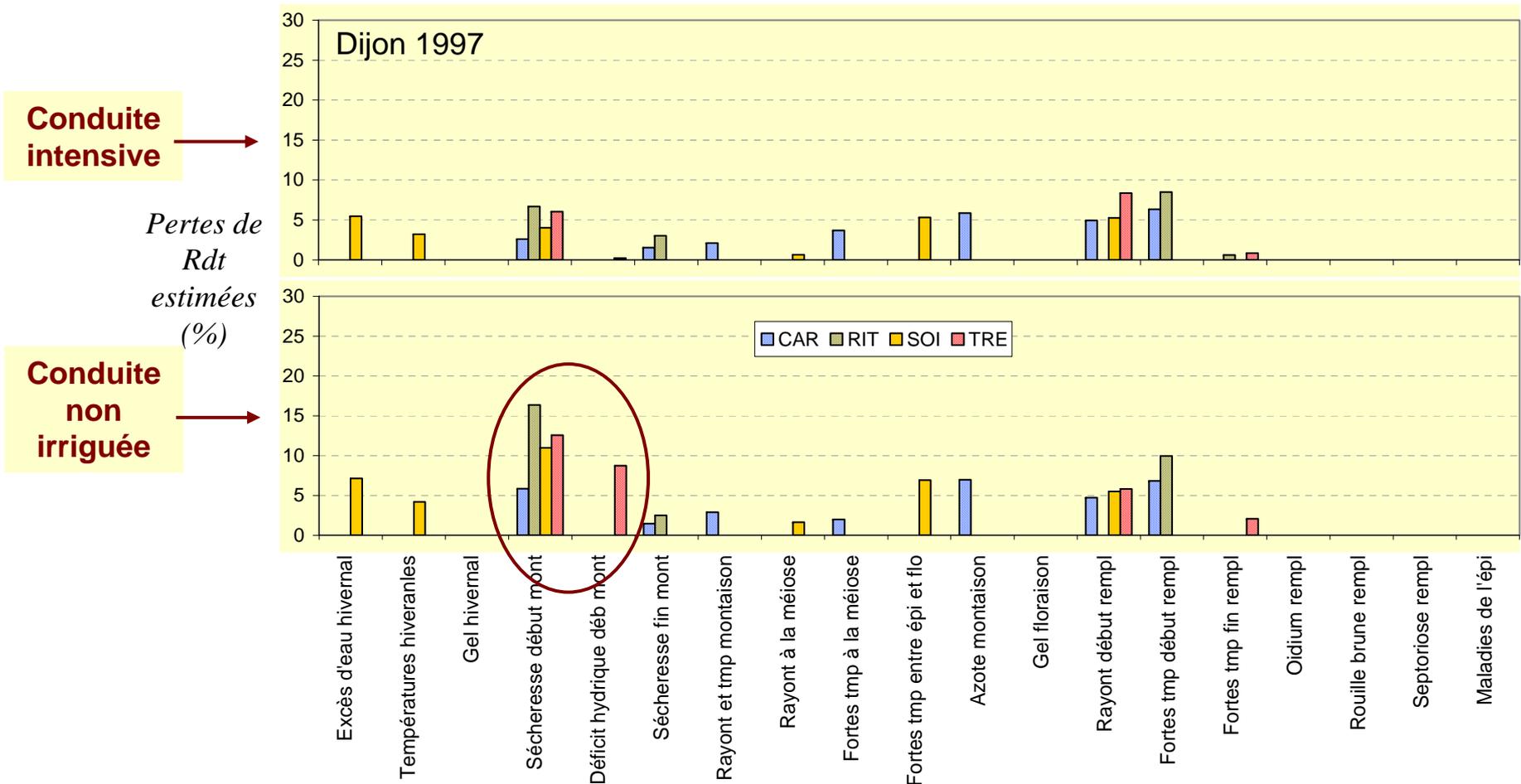
AGRICULTURE

ENVIRONNEMENT

INRA

Contribution des facteurs limitants aux pertes de rendement dans un essai

(réseau blé tendre de l'INRA de 1995 à 1997)



→ Caractérisation d'un essai par les pertes de rendement dues aux différents facteurs limitants

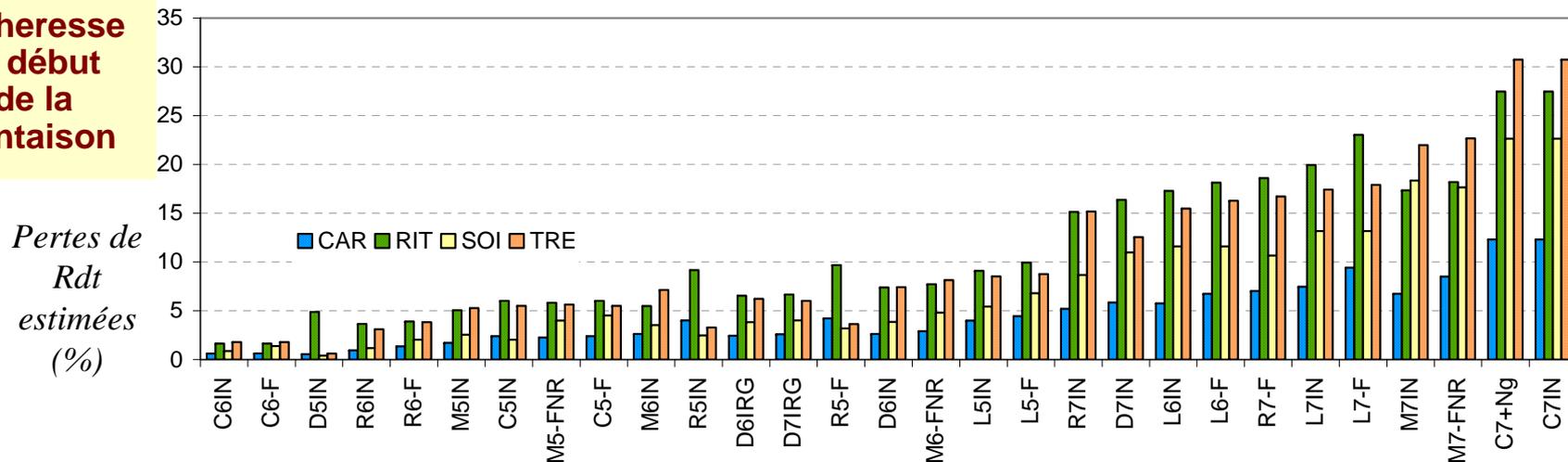
→ La comparaison de deux essais permet de valider la démarche



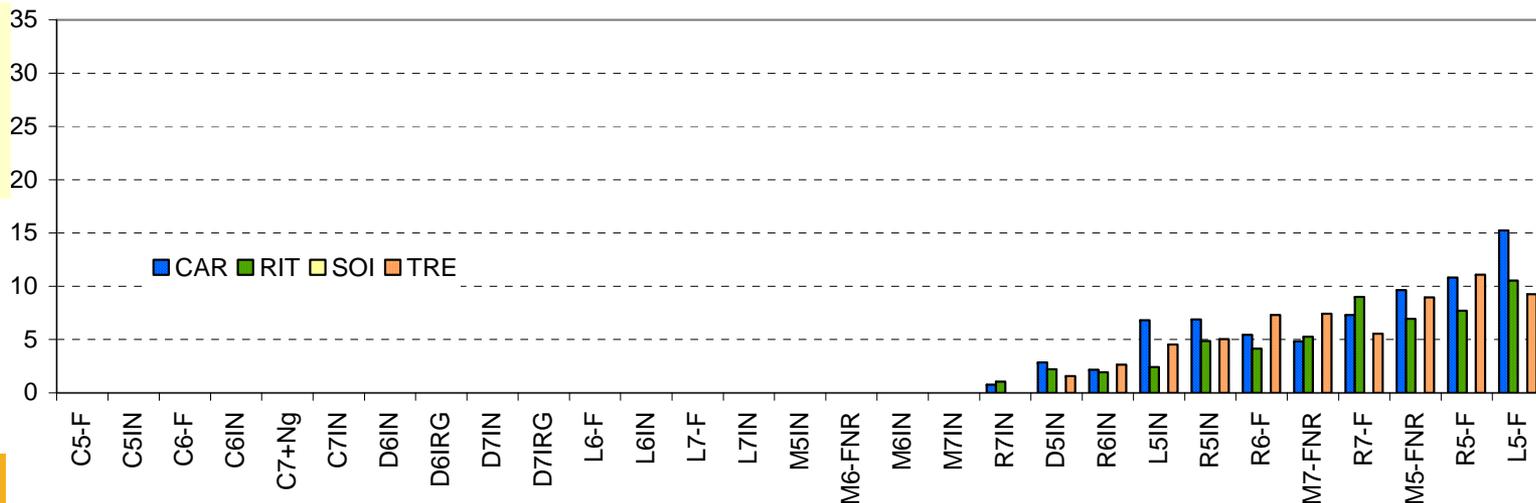
Classement des essais pour un facteur limitant

(réseau blé tendre de l'INRA de 1995 à 1997)

**Sécheresse
au début
de la
montaison**



**Septoriose
pendant le
remplissage
des grains**



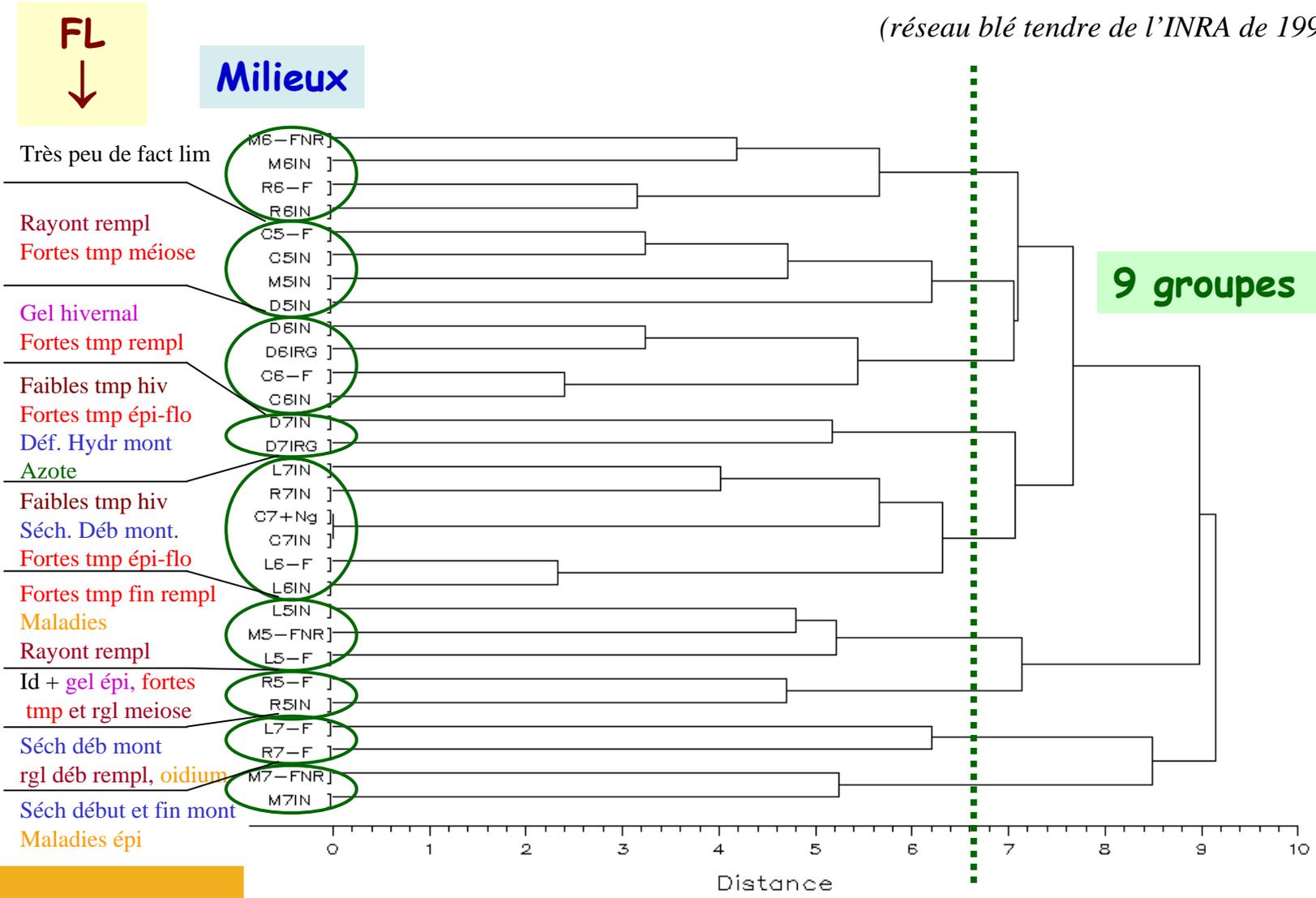
AGRICULTURE

ENVIRONNEMENT



Classification des milieux par la nature et le poids des facteurs limitants

(réseau blé tendre de l'INRA de 1995 à 1997)



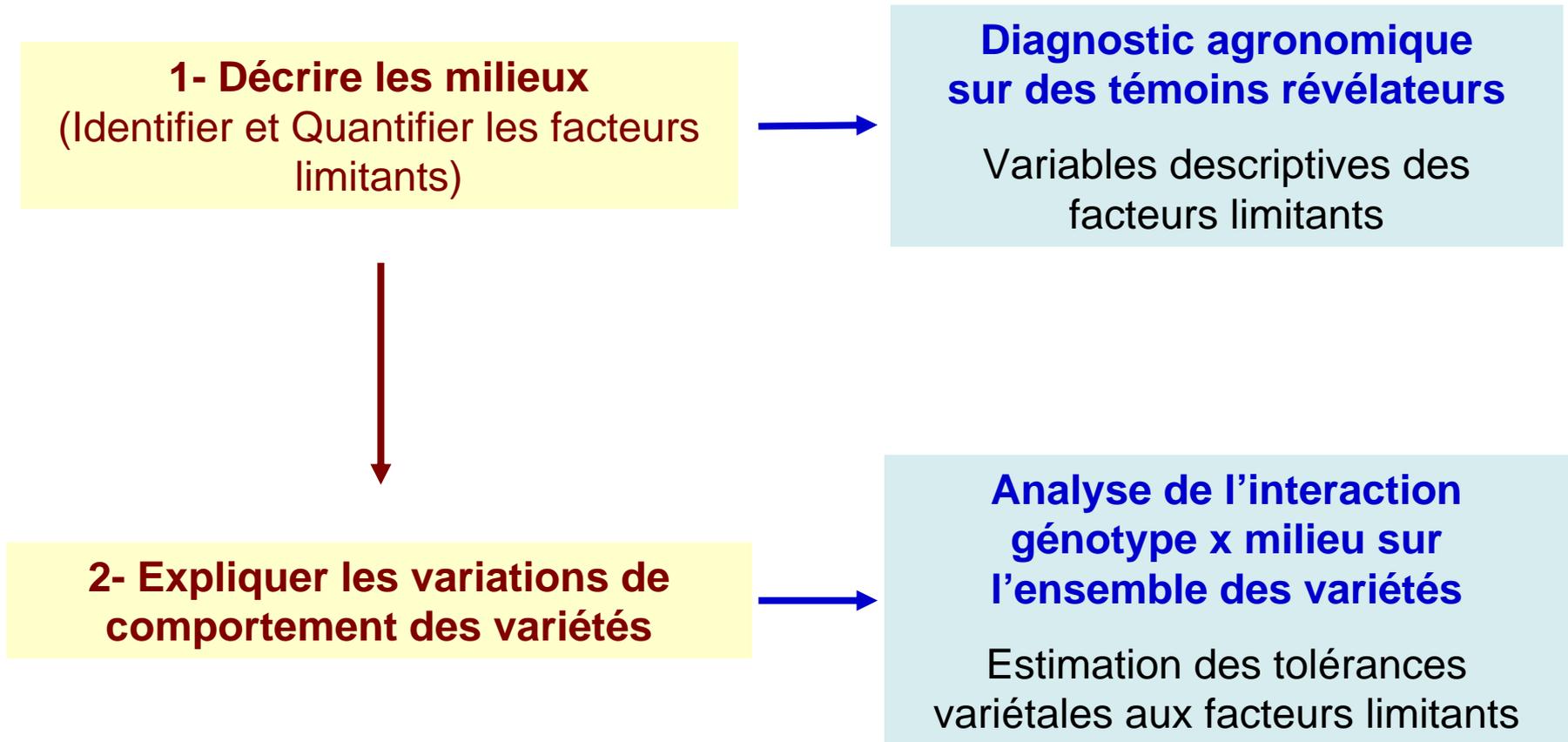
ALIMENTATION

AGRICULTURE

ENVIRONNEMENT



Méthode d'analyse des résultats d'essais variétaux



Analyser l'interaction génotype x milieu sur l'ensemble des variétés

Régression factorielle progressive avec les covariables environnementales, avec contrainte de signe sur l'effet principal:

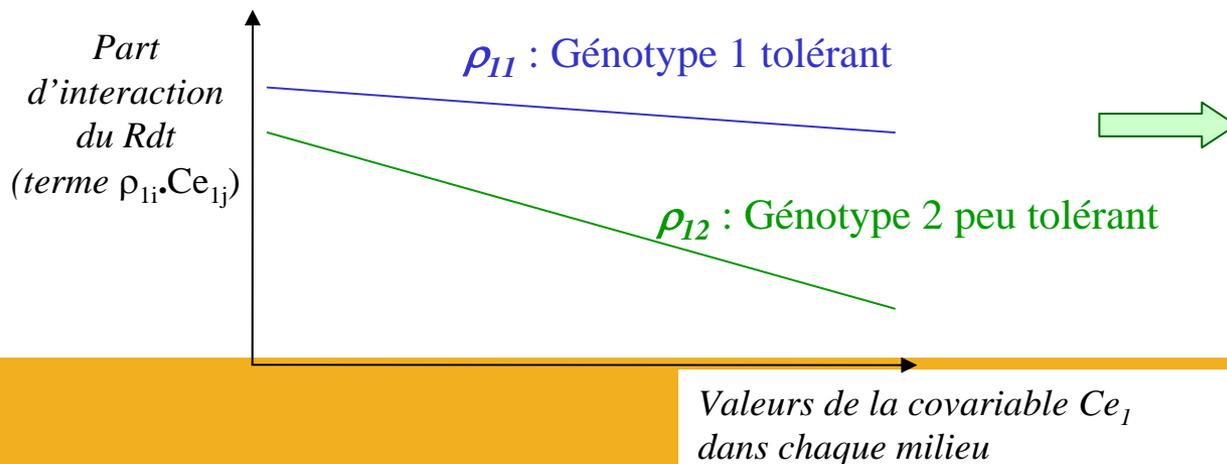
$$Rdt_{ij} = Rdt_m + G_i + M_j + G_i * M_j + E_{ij}$$

Moyenne générale
Effet du génotype
Effet milieu
Interaction
Erreur

$$\rho_{1i} \cdot Ce_{1j} + \dots + \rho_{ni} \cdot Ce_{nj} + G_i \cdot M'_j$$

Décomposition de l'interaction de l'ordre de 80%

Signification des paramètres génotypiques ρ_{ni}



Estimation de la tolérance des variétés au facteur limitant décrit par la covariable environnementale Ce_1

Estimation de la tolérance des variétés aux facteurs limitants

Notes de tolérance déduites des paramètres génotypiques ρ_{ni} (Réseau INRA 1995-1997)

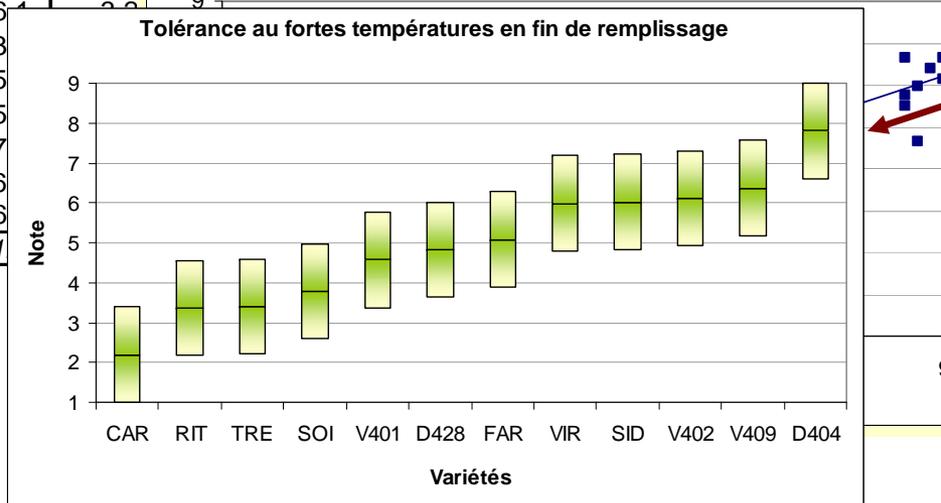
Facteurs limitants

Variétés

	Hiver		Montaison								Remplissage				
	temp hiver	gel hiver	séch déb m	séch fin m	rayn ^t -tmp montais	rayon ^t méiose	fortes tmp méiose	fortes tmp épi-flo	azote montais	rayon ^t d remp	fortes tmp déb remp	fortes tmp fin remp	septo	rouille brune	oidium
CAR	2.4	3.3	5.0	2.4	6.7	2.5	2.3	7.1	4.6	3.2	2.8	2.2	3.2	7.1	4.0
D404	7.6	5.6	3.0	7.6	2.9	7.1	6.8	3.4	4.6	6.9	7.2	7.8	7.1	5.9	5.4
D428	5.2	5.7	3.7	5.4	5.0	5.0	5.1	6.8	3.4	5.5	5.1	4.8	5.7	6.3	6.4
FAR	5.1	5.6	5.9	4.9	5.9							5.1	5.2	6.5	6.4
RIT	3.9	5.5	4.5	4.7	6.9							3.4	4.2	6.3	4.6
SID	6.7	4.1	3.5	6.1	6.9							6.0	7.3	5.1	4.1
SOI	2.8	2.6	3.9	3.3	6.9							3.8	5.0	2.5	7.0
TRE	3.5	2.5	4.0	5.0	6.9							3.4	2.7	7.5	3.0
V401	5.3	6.3	7.0	5.0	6.9							4.6	6.3	5.4	5.0
V402	6.7	7.5	5.0	7.0	6.9							6.1	5.5	6.1	5.5
V409	6.9	5.7	4.6	6.0	6.9							6.4	5.1	6.8	4.4
VIR	6.4	6.4	5.6	6.0	6.9							6.0	5.5	6.2	7.0
ET	1.4	1.5	2.0	1.0	6.9							1.2	1.7	1.5	2.0

Résistance à la rouille brune (8)

Tolérance au fortes températures en fin de remplissage



ALIMENTATION

AGRICULTURE

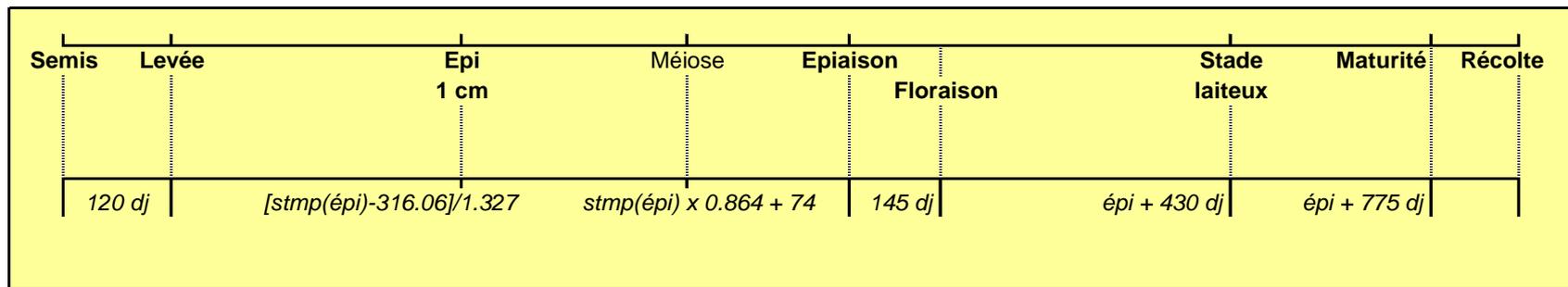
ENVIRONNEMENT



Données complémentaires à acquérir dans les essais variétaux

➤ Identifier les dates de plusieurs stades-clé

- Quelques modèles chez le blé



Il est nécessaire d'identifier la date d'épiaison, ou de l'estimer

- Initiation florale du pois

- **Pois de printemps:** Prédiction de la date d' IF à **20 d.j près** par un modèle unique (toutes variétés confondues) avec paramètres
- **Pois d'hiver:** somme de tmp IF-DF=**553.1 d.j** +/-71.2
- **Pois d'hiver "HR" (réactifs à la photopériode):** somme de tmp IF-DF=**526.3 d.j** +/-90

Données complémentaires à acquérir dans les essais variétaux

➤ 5 données météorologiques journalières

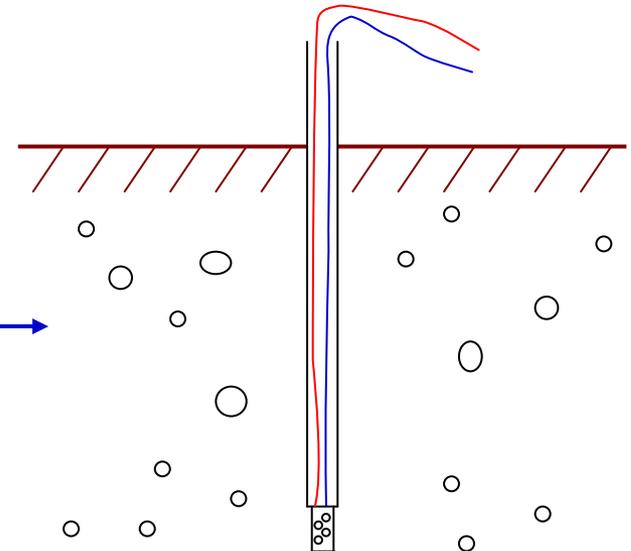
- Tmp mini et maxi
- Rayonnement global
- Evapo-Transpiration Potentielle Penman
- Pluviométrie

Interpolation possible à partir de sites renseignés

Remplacement éventuel par l'ETP Turc

Avoir une mesure aussi proche que possible du site expérimental

- L'interpolation est plus facile pour des critères élaborés.
Ex: risques de gel du pois en Bourgogne (Cuccia, 2008)
- Fiabiliser le bilan hydrique par des **mesures de tensiomètres**



Données complémentaires à acquérir dans les essais variétaux

➤ Il est nécessaire de noter les accidents et les maladies

- **Grille de notation commune** (échelle du Geves)

Mais une part de subjectivité subsiste

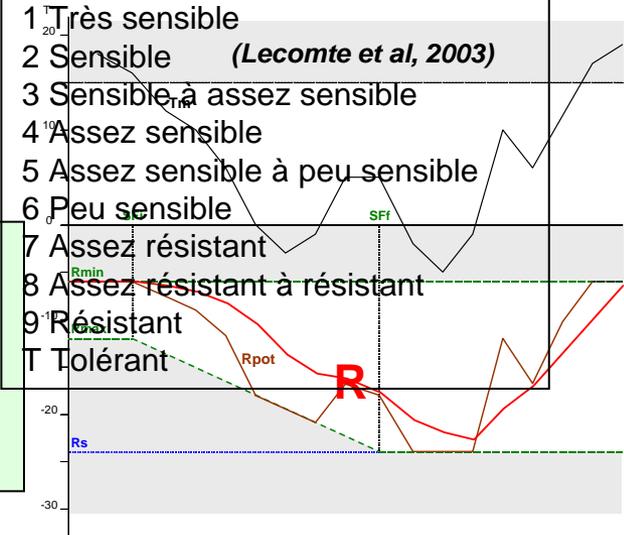
- **Dégâts non repérés ou notations difficiles**

Recours aux modèles: ex. du gel

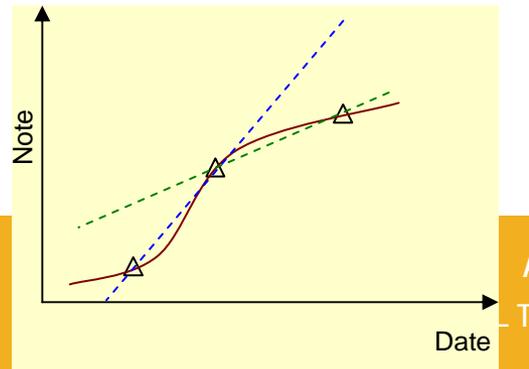
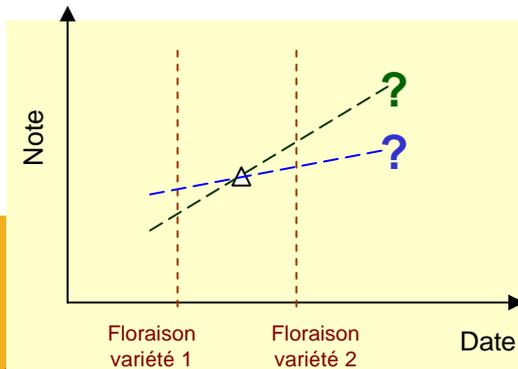
Le modèle intègre la **variété**, le **stade** et l'**endurcissement** des plantes. Il calcule la résistance de la plante et comptabilise les nbj et les stmp où $T_{min} < R$

- Sur le blé: prévoit l'apparition des dégâts à 1° C près
- En pois d'hiver: corrélation de 0.7 avec les dégâts observés
- En pois de printemps: corrélation de 0.9 (≈ prise en compte des T_{min})

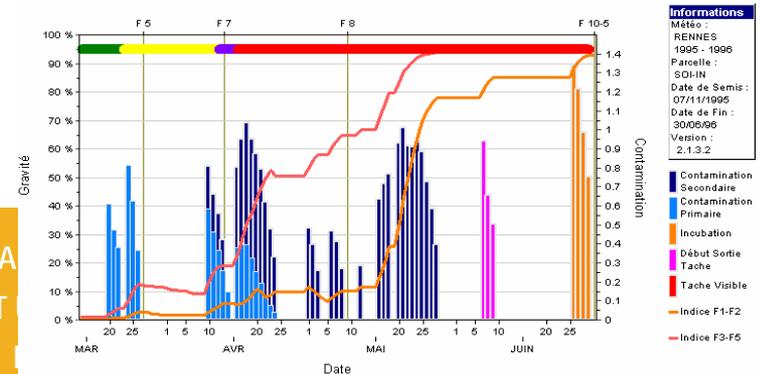
Maladies - Accidents climatiques



- **Notations maladies:** souvent une seule notation, à des stades différents entre variétés et entre essais



Simulation Présept Contaminations



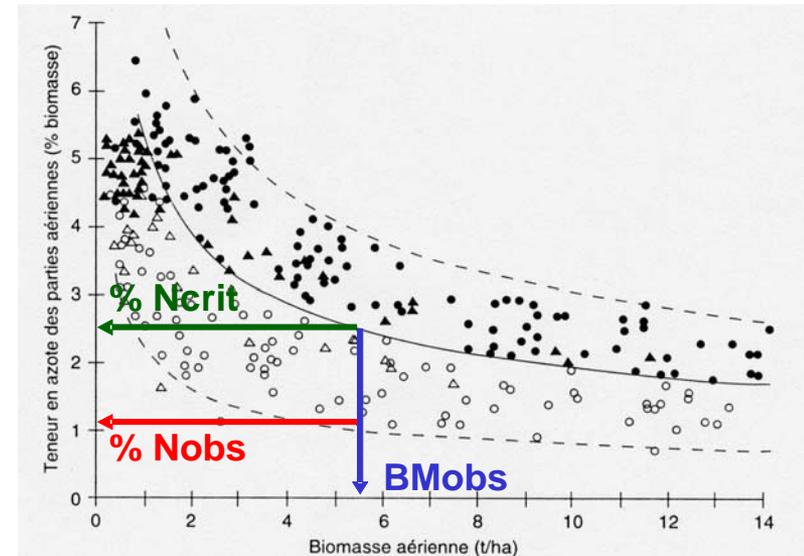
Données complémentaires à acquérir dans les essais variétaux

➤ Caractériser l'alimentation azotée

- **Indice de nutrition azotée**

$$\text{INN} = \% \text{Nobs} / \% \text{Ncrit} \text{ (Justes et al, 1997)}$$

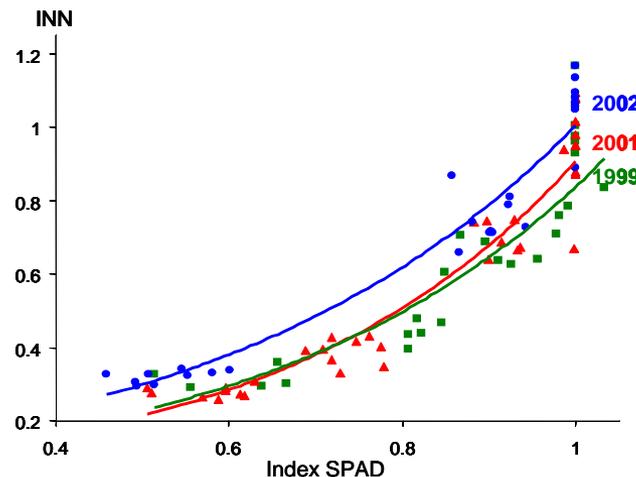
*Impose des prélèvements (destructifs)
et un passage à un stade précis*



- **Correspondance INN / Indice Spad** (Prost et Jeuffroy, 2007)



Mesures non destructives



Il y a un effet année, mais pas d'effet variété, et la qualité prédictive de la relation globale est satisfaisante :

RMSEP = 0.12
RMSEP/INNmoyen = 18%
pas de biais

ENT

ENVIRONNEMENT

INRA

Limites de la méthode, dépassements possibles

➤ Contraintes liées aux pratiques expérimentales

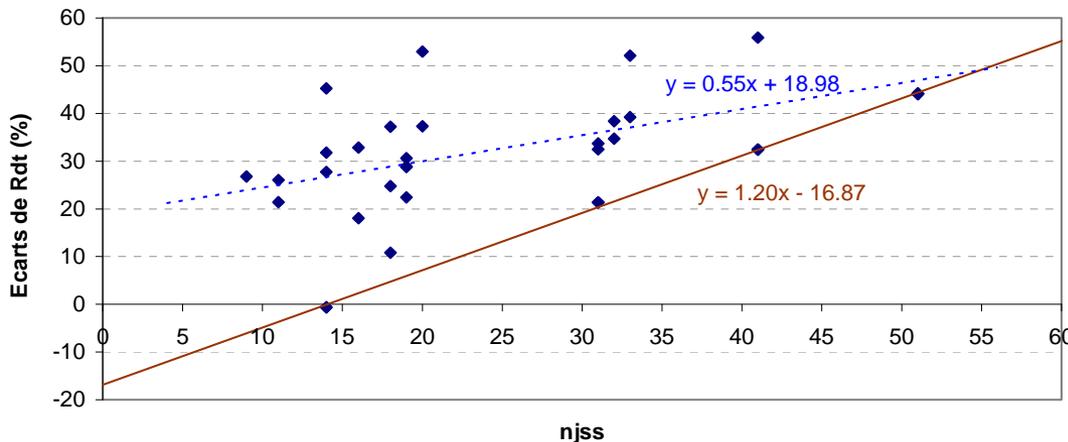
- Temps requis pour les observations
- Prélèvements supplémentaires dans des périodes déjà chargées
- Difficulté pour implanter des parcelles supplémentaires

- Observations supplémentaires sur des témoins seulement
- Vers l'utilisation accrue de modèles
- Gain d'information et allègements du réseau expérimental

➤ Choix des méthodes statistiques

- Modèles linéaires
- Effet simultané de plusieurs facteurs limitants
- Effet de seuil des F.L.

- Nouveaux outils statistiques: Régression quantile (Makowsky *et al*, 2007) (A Gauffreteau, C Robert, travaux en cours)
- Amélioration des variables descriptives des facteurs limitants, effet linéaire



Limites de la méthode, dépassements possibles

➤ Biais de la régression linéaire multiple quand les variables sont corrélées

- Risque de confusions d'effets
- Choix des variables très sensible à la base de données (Prost, 2008)

- Bien décrire tous les facteurs limitants
- Mélange de modèles pour améliorer l'estimation des paramètres liés à chaque F.L. (Prost *et al*, 2008; Gauffreteau, travaux en cours)

➤ S'affranchir des témoins révélateurs ?

- Caractériser les milieux à partir de toutes les variétés (moyenne, maxi...) ?
- Caractériser les milieux directement par les variables descriptives des facteurs limitants ?

- Témoins encore indispensables pour déterminer la date de certains stades, et pour décrire l'alimentation azotée
- Solution par le recours aux modèles
- La pondération des facteurs limitants par leur effet sur les témoins représente une sécurité

Conclusions

- Les réseaux d'évaluation variétale recèlent une très grande quantité d'informations
- On peut aller beaucoup plus loin dans la connaissance des variétés
 - Estimation des tolérances variétales, notamment pour des facteurs limitants dont les effets sont difficiles à observer
- Il est de plus en plus nécessaire de bien connaître les aptitudes variétales
- Optimisation des réseaux, meilleure structuration → Économies possibles
- Une meilleure articulation des réseaux expérimentaux entre eux permettrait d'amplifier ces bénéfices
- Méthode d'analyse DiagVar[®], en cours de développement sur maïs, tournesol, pois, pommes de terre, betteraves
- Des besoins importants d'amélioration subsistent
 - Variables descriptives des facteurs limitants → modèles agronomiques
 - Amélioration des méthodes statistiques pour limiter la part de hasard et aller vers une meilleure validation agronomique des explications
 - Poursuivre les interactions entre agronomes, statisticiens et évaluateurs