Changement climatique et agriculture : des impacts aux solutions

dans le domaine des grandes cultures

Philippe Gate, Académie d'Agriculture, ex ARVALIS-Institut du Végétal

ACADÉMIE d'AGRICULTURE de FRANCE

AGRICULTURE ■ ALIMENTATION ■ ENVIRONNEMENT

Atténuation du dérèglement climatique

France : 18% des GES proviennent de l'agriculture

Elevage = 50%

- **95% éructation des ruminants**
- **5% flatulences**

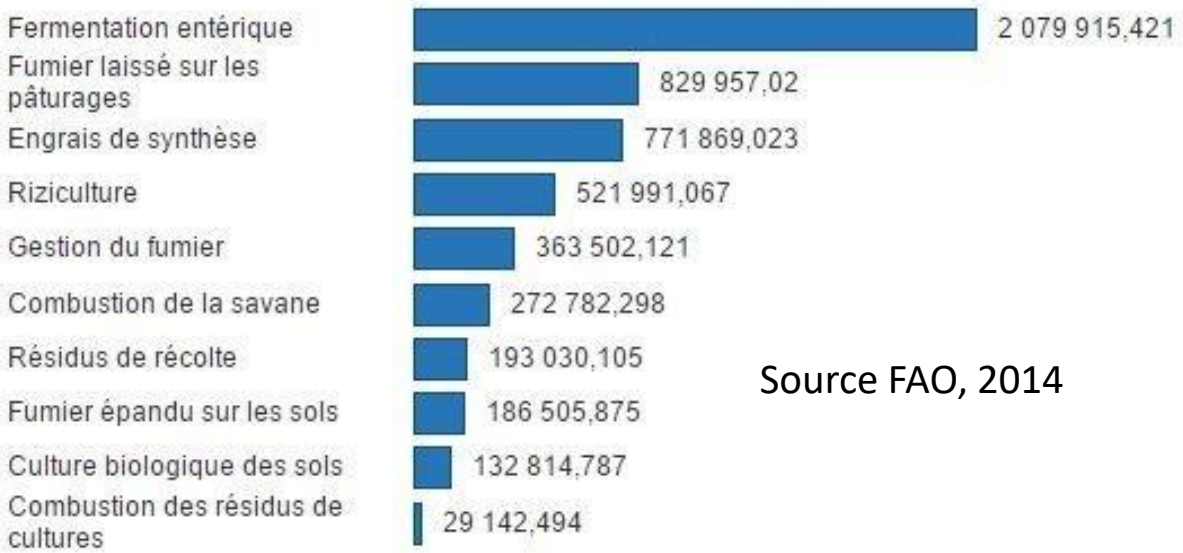
Agriculture = 50%

- **- 90% émissions de N20 par les engrais azotés** et les fumiers

Monde : 25% des GES proviennent de l'agriculture

Origines des émissions

Origines des émissions au niveau mondial, en 2012, en Gigagrammes équivalent CO2



Source FAO, 2014

- **39% éructation des ruminants**
- **26% gestion du fumier**
- **14% Engrais azotés**

France : 18% des GES proviennent de l'agriculture

Elevage = 50%

- **95% éructation des ruminants**
- **5% flatulences**

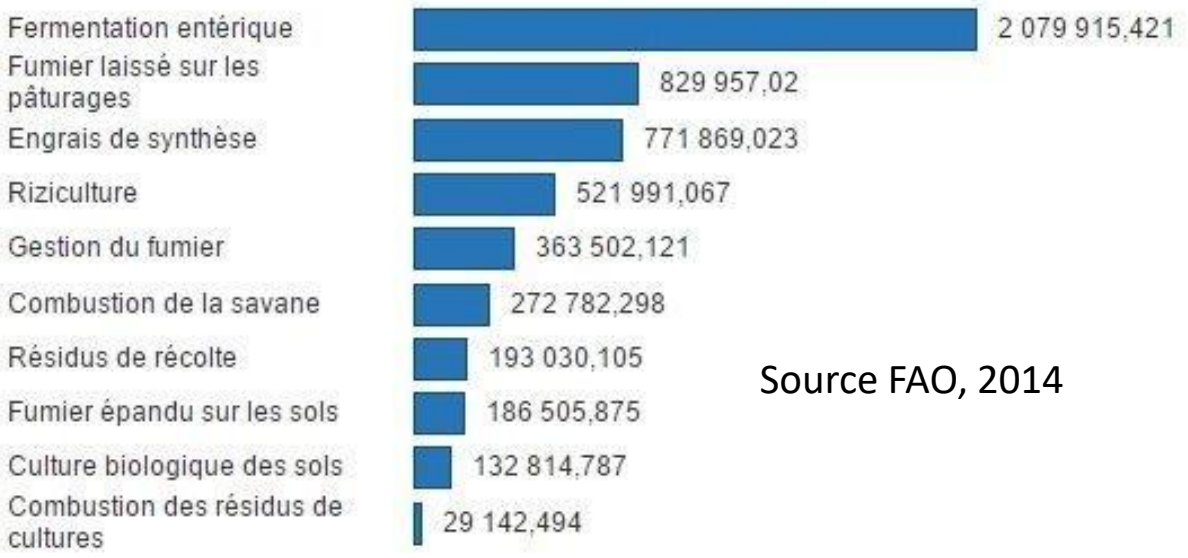
Agriculture = 50%

- **- 90% émissions de N20 par les engrais azotés** et les fumiers

Monde : 25% des GES proviennent de l'agriculture

Origines des émissions

Origines des émissions au niveau mondial, en 2012, en Gigagrammes équivalent CO2



Source FAO, 2014

- **39% éructation des ruminants**
- **26% gestion du fumier**
- **14% Engrais azotés**

Par ailleurs :

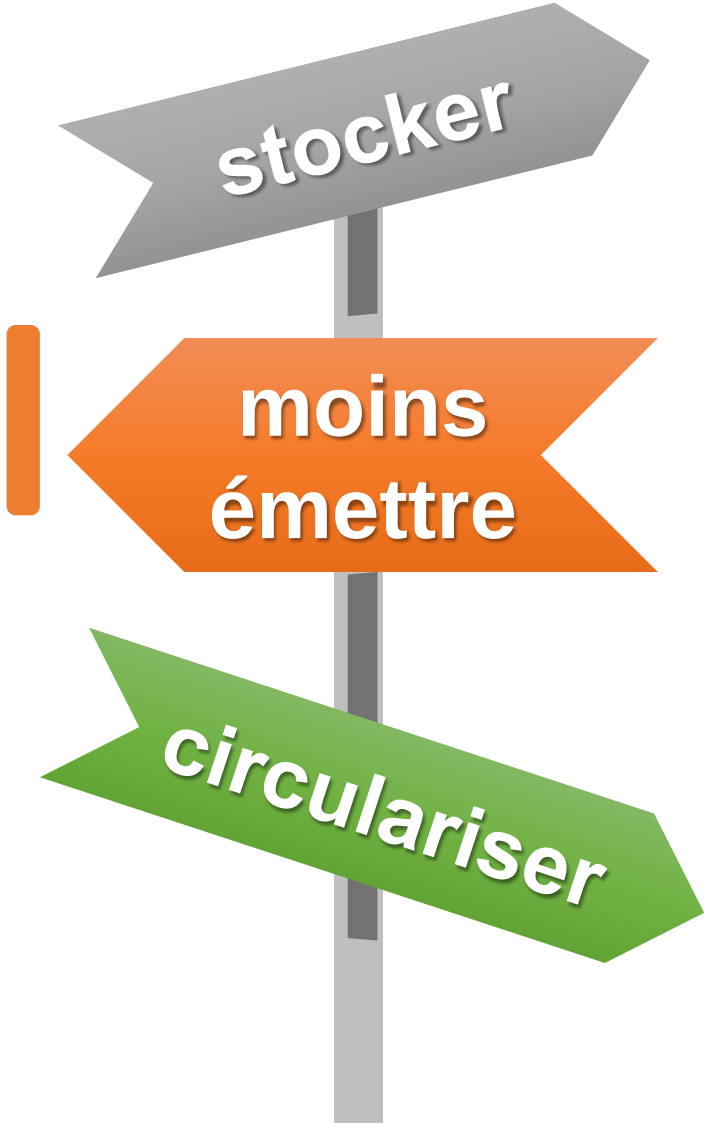
*La France c'est **1%** des émissions totales monde*

*Son agriculture représente **0.2%** des émissions totales*

L'urgente atténuation : les solutions en cours en production (+ actions filières amont aval)

RÉDUIRE LES ÉMISSIONS

- **N20** : réduction des engrais, efficience des apports, innovations engrais (jusqu'à -50%), tendre vers N2. *Rappel: un sol nu non drainé émet plus qu'un sol drainé fertilisé à l'optimum*
- **Energie consommée** : semis sous couverts..
- **CH4** : rations (ex : rôle du lin) → -14% ; mais phénomène surtout lié à l'espèce et au nombre d'animaux



STOCKAGE NATUREL DE CARBONE

- **Dans les sols**

émissions totales = 9 milliards et les sols du monde contiennent 2400 milliards de T de C (9 ≈ 4‰x 2400)

- **Les grandes cultures représentent 85% du stockage additionnel possible** (cf rapport INRAe juillet 2019)

→ 5.2 ‰ possible/an

- **Dans la biomasse (photosynthèse)**
  - Les grandes cultures : environ 20 Teq CO2 captées/ha/an pour 3 Tonnes émises)

VALORISATION DE LA BIOMASSE, DES MATIÈRES PREMIÈRES VÉGÉTALES

→ **Production d'énergie, Bio-économie au sens large**

Utilisation de l’azote des grandes cultures

Comparaison entre les espèces
les voies de progrès

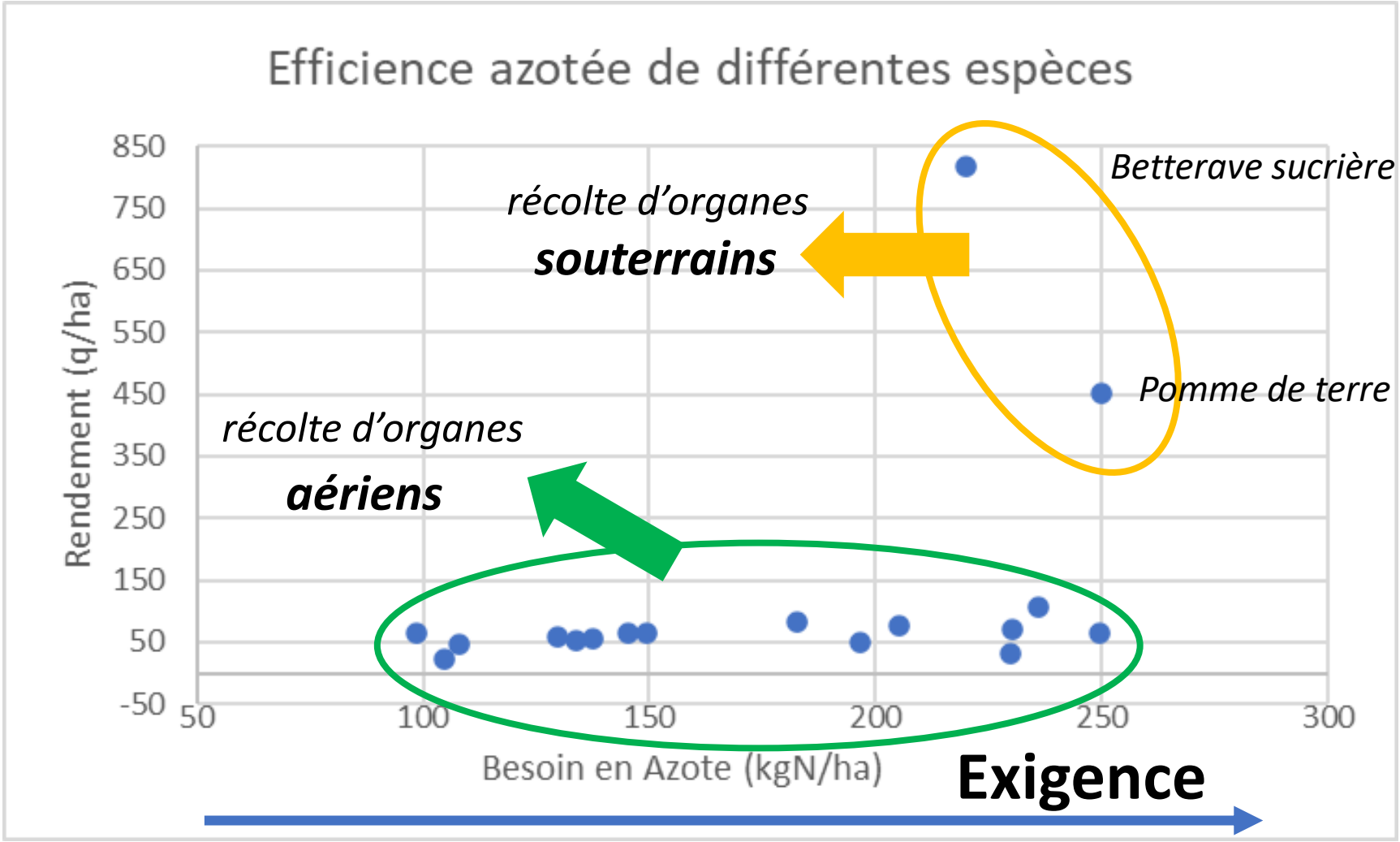
Efficience de l'utilisation de l'azote: comparaison inter-espèces grandes cultures

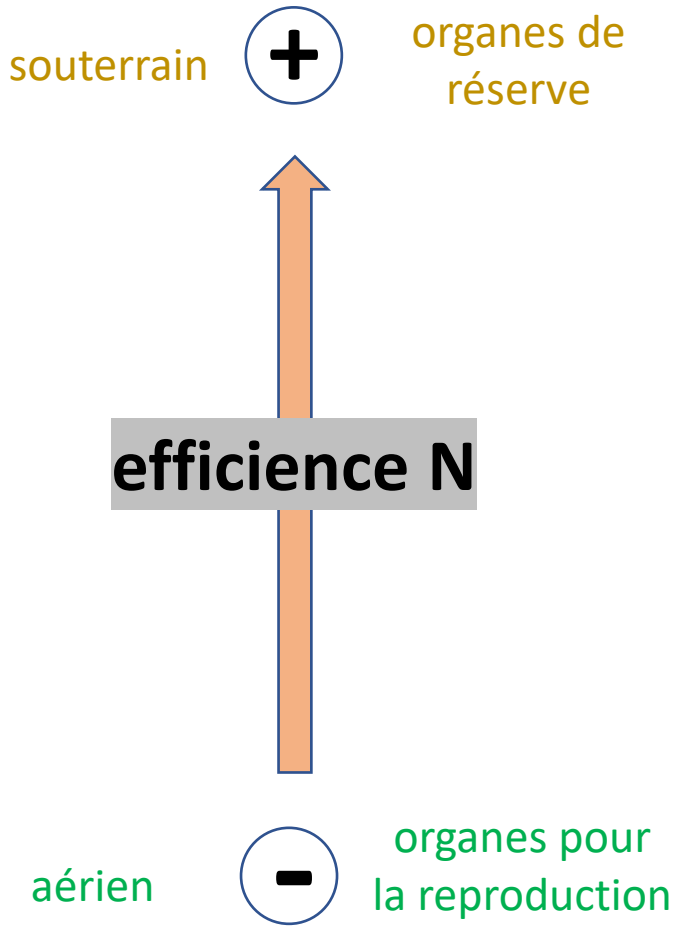
Besoin en azote *= quantité d'azote que la plante doit absorber pour assurer la production par hectare (besoin optimal).* ***La production*** *correspond au rendement moyen/ha sur 20 ans, sauf associations Céréales-Légumineuses (11 ans), données Agreste*

- **Toutes espèces (sauf légumineuses, p de terre, betterave)**
  - **b** = besoin N pour produire 1 q de grains (source = Instituts Techniques) ; R = rendement moyen sur 20 ans → Besoins de la culture **B** = **b x R**
- **Pomme de terre et betterave**
  - **B =** Quantités forfaitaires (source Comifer, ITB, Arvalis)
- **Légumineuses :** pas de besoins unitaires b et peu de données disponibles
  - Prise en compte de taux de fixation et d'assimilation en fonction des espèces
- **Mélanges Céréales-Légumineuses : hypothèse 50-50**
- **Blé bio :** très forte variabilité des quantités absorbées
  - Prise en compte de la variabilité de la quantité d'azote minérale du sol et du % d'absorption par les racines (Vallé M.,2006 et Billy L. 2008)

Limite de l'analyse : toutes les espèces n'occupent pas les mêmes territoires, certaines références sont à consolider

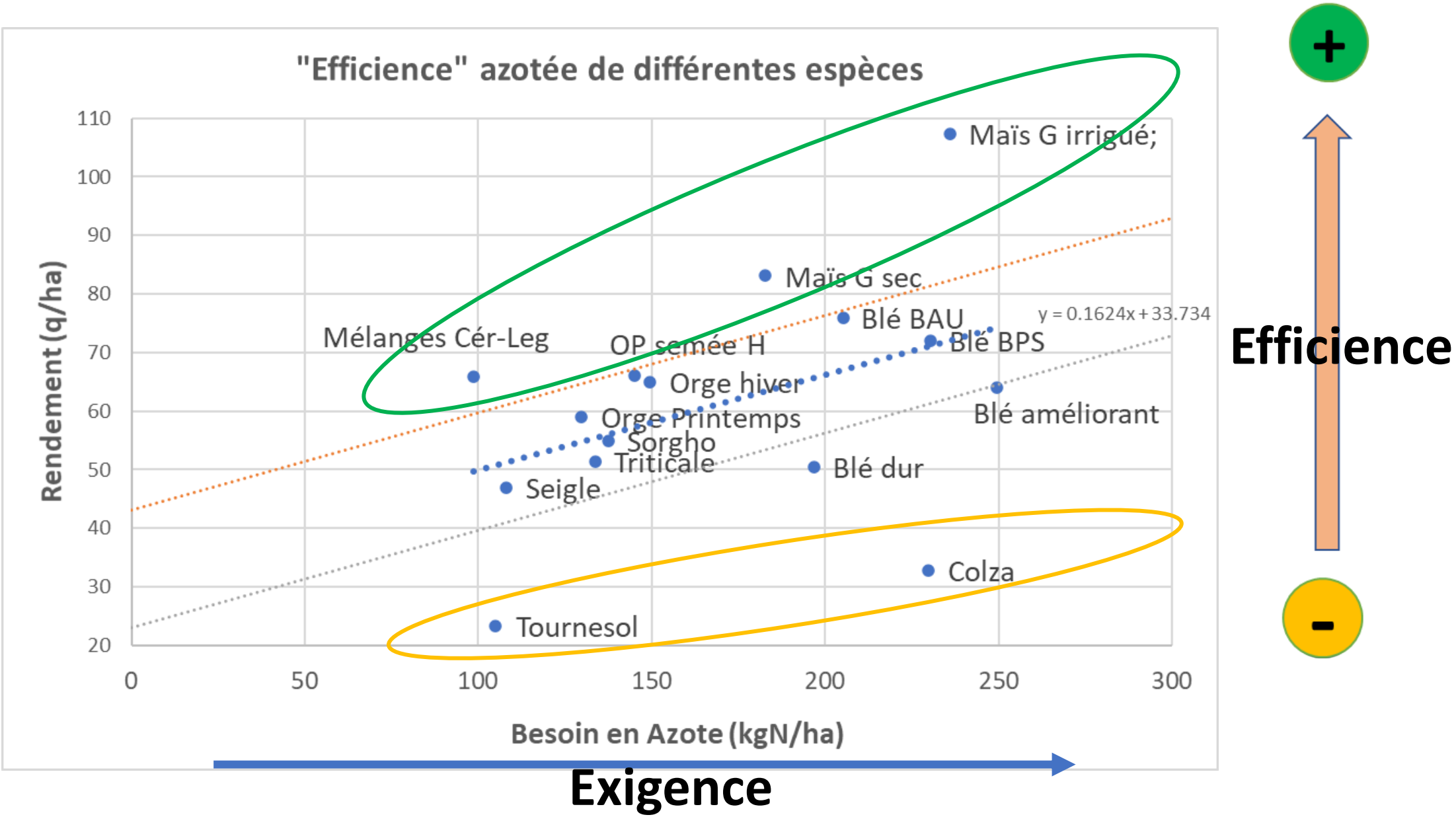
Azote : positionnement de différentes espèces



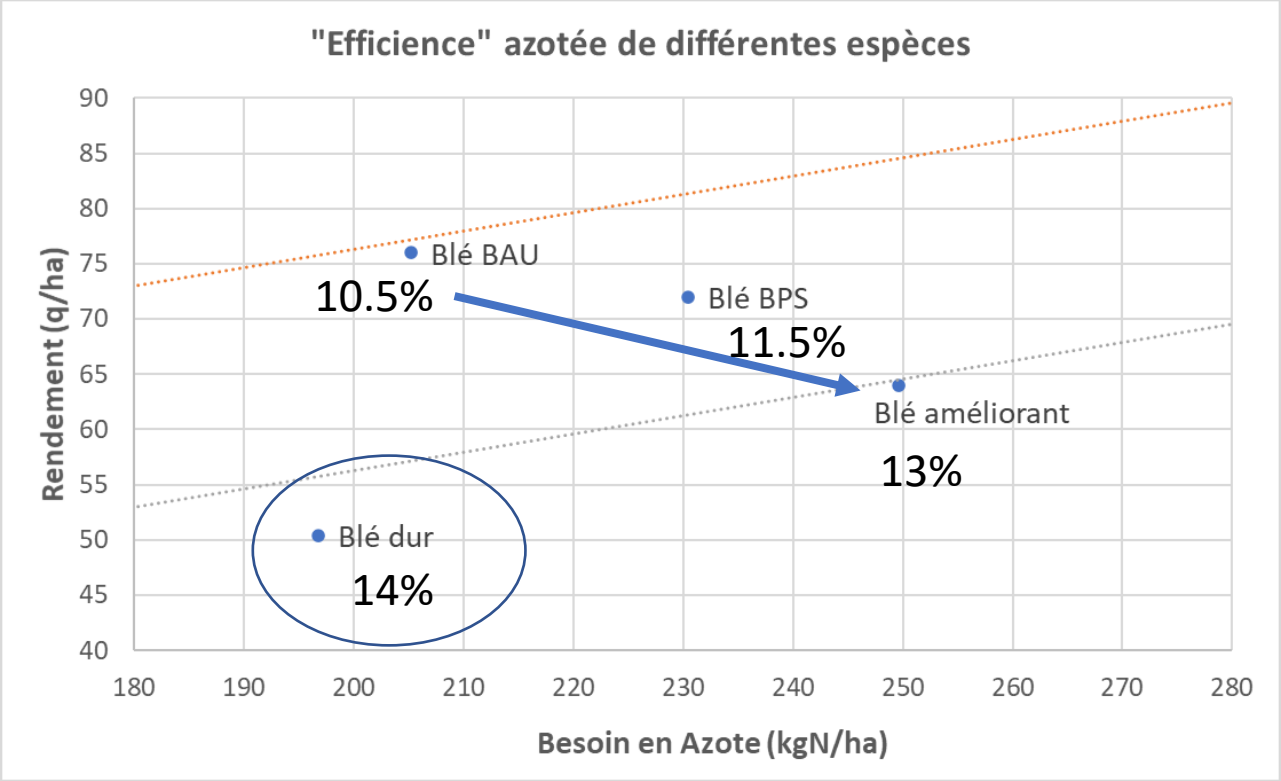


- *Réflexion prospective : cultiver, améliorer des espèces où il serait possible d'extraire de la farine à partir d'organes souterrains (manioc, ... ?)*

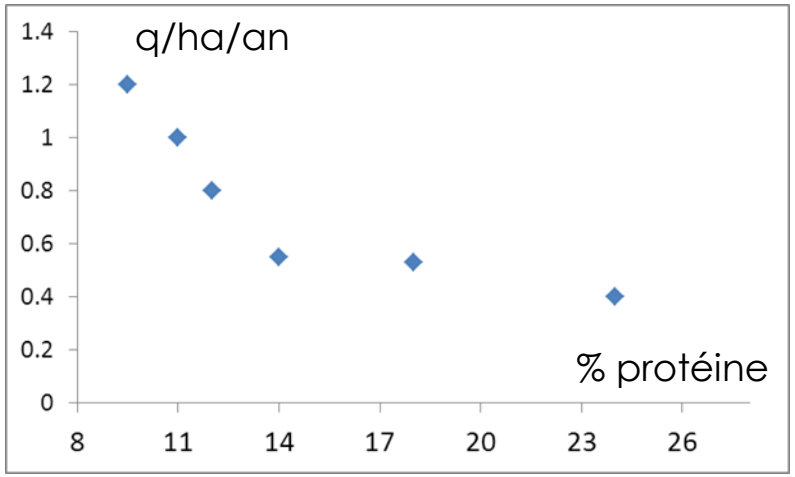
Azote : positionnement de différentes espèces



Blés : la teneur en protéine a un coût !



Progrès génétique et Teneur en Protéine



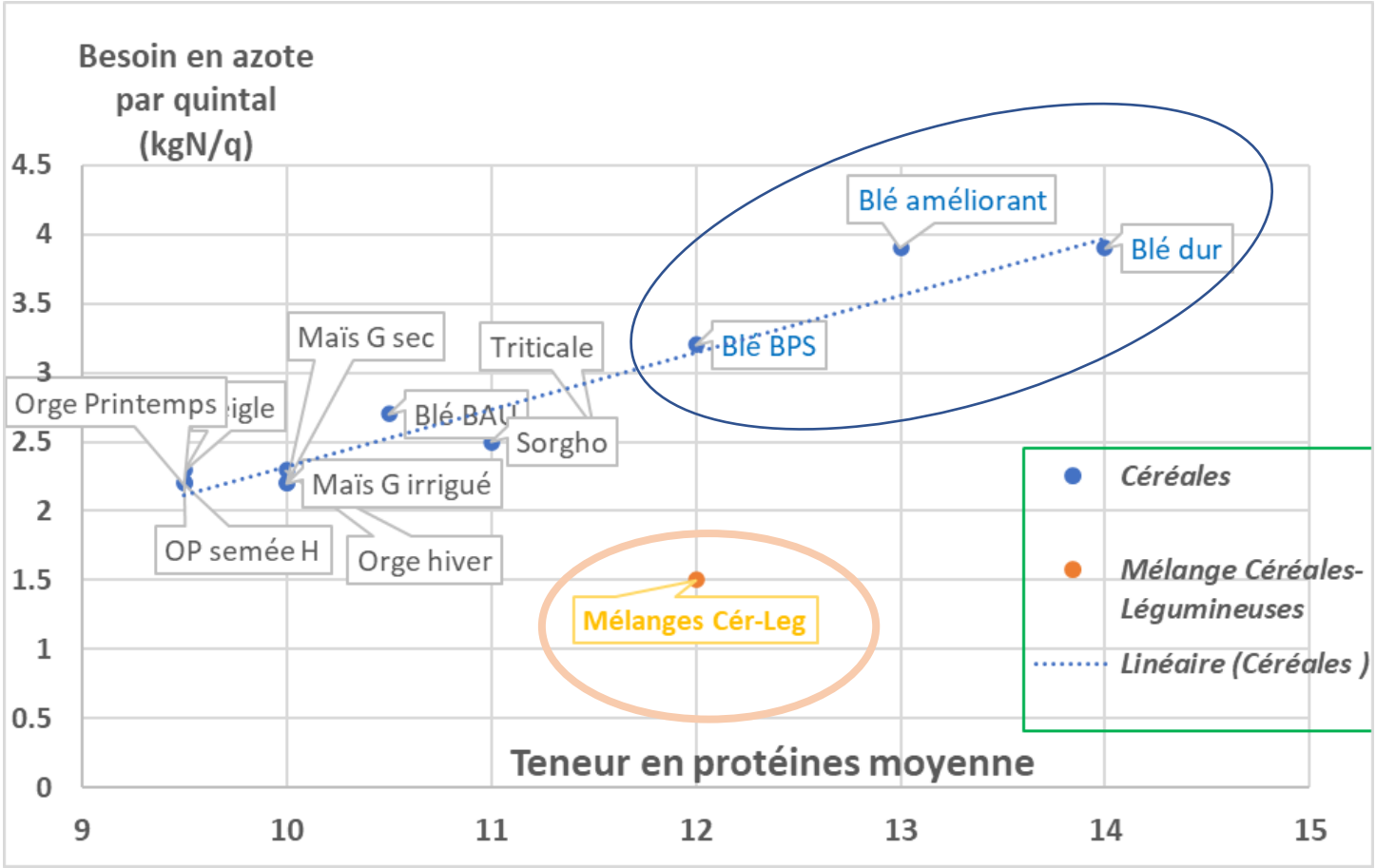
Séminaire ESPERA, 7 Oct 2013 Paris

Voies de progrès : réduire les trade off sur le progrès génétique, l'environnement (engrais)

- **98% de BPS** dans la sole de blé tendre en France : **peu cohérent avec la demande des marchés** (alimentation animale, biscuits, amidon etc...).
- Génétique : travailler sur la **qualité** des protéines et non seulement la **quantité** et le **transfert vers les grains**
- Modifier les **process de l'aval** (possible de faire des pâtes alimentaires à 12% et non à 14%)
- Association **avec des légumineuses**

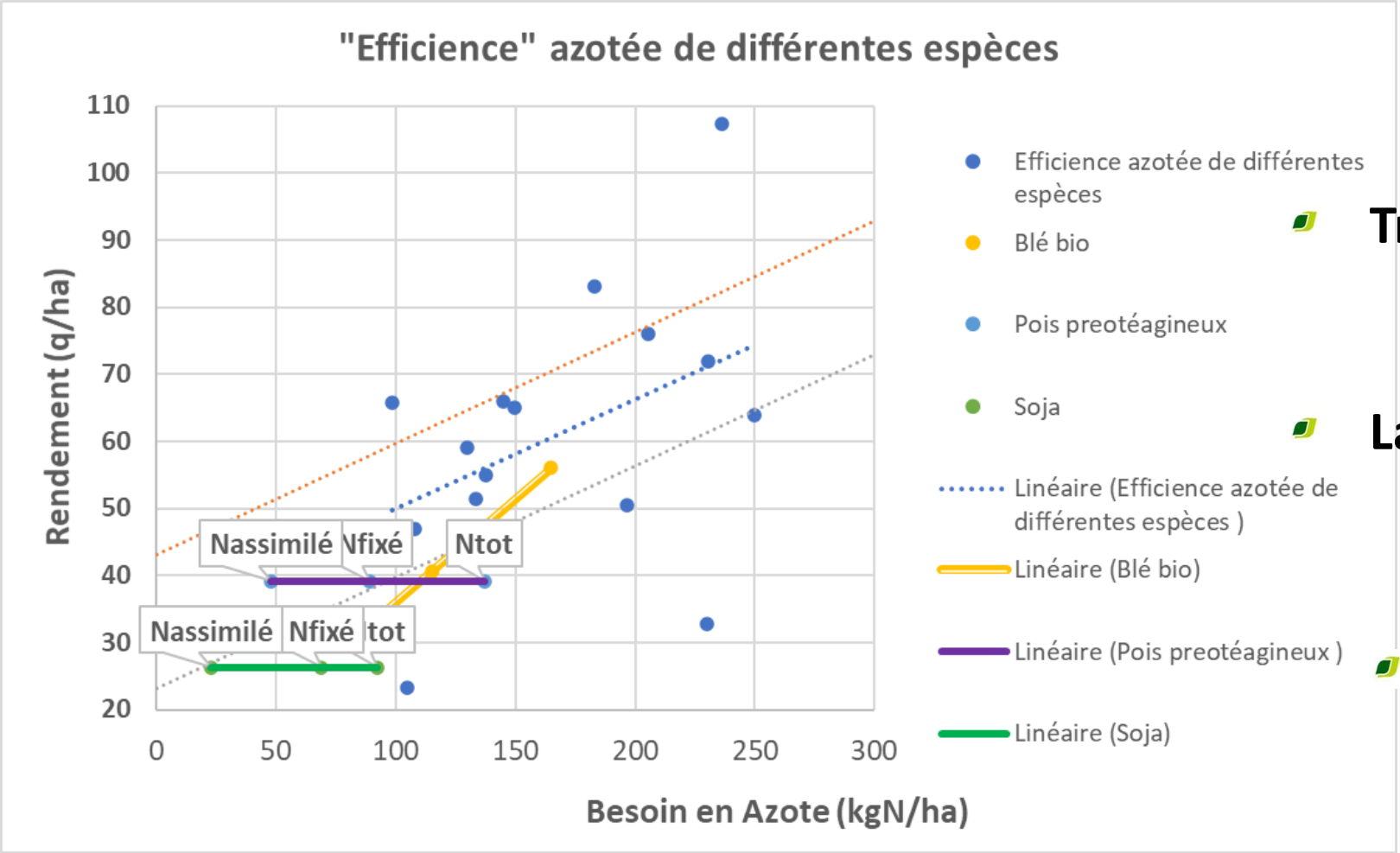
Céréales: une exigence en azote liée aux débouchés

une même relation linéaire pour toutes les céréales



- Des différences en termes de sobriété et d'efficience en lien avec les utilisations aval (de l'orge de brasserie à 9.5 au blé dur à 14%...)
- « Disruption » : Intérêt des mélanges avec les légumineuses

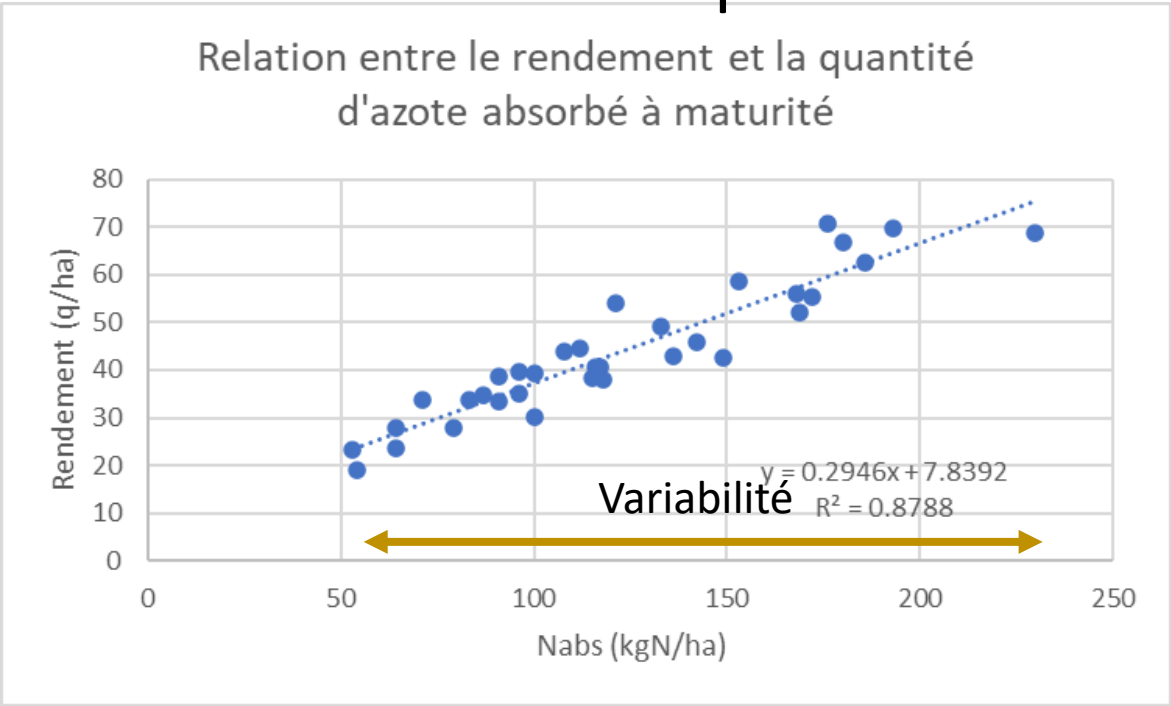
Estimation pour les légumineuses et le blé bio



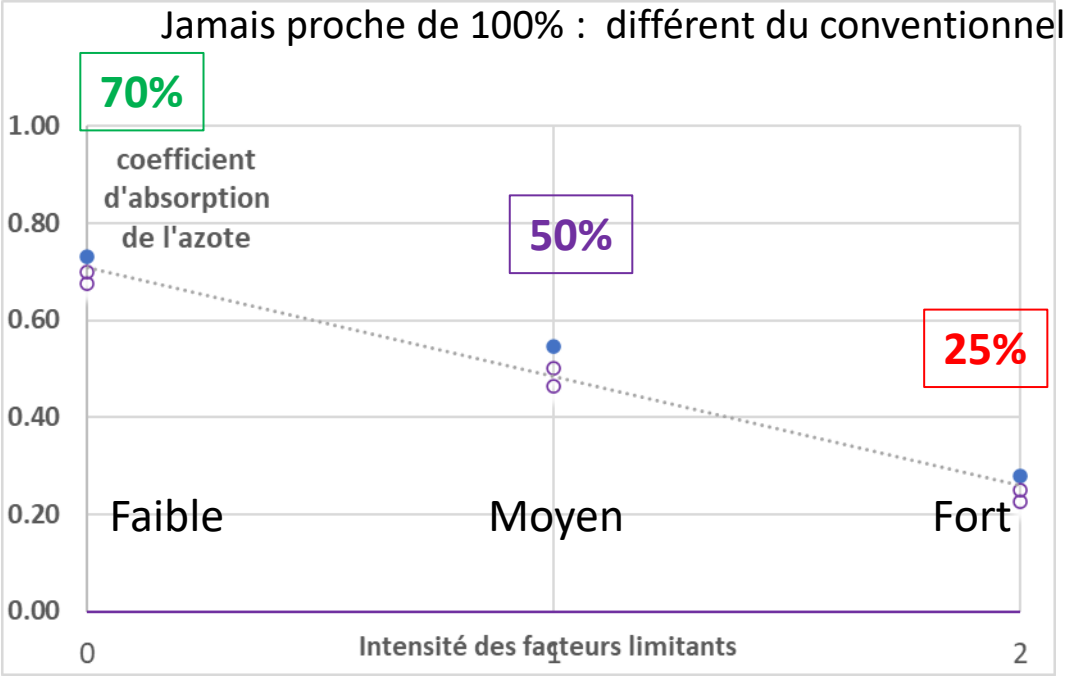
- **Très forte variabilité pour le blé bio**
- **La majeure partie des besoins des légumineuses est assurée par la fixation symbiotique**
  - Priorité = augmenter et stabiliser le rendement

D'après Terres Innovia : Pour le pois, priorité au pois d'hiver, optimiser le nombre d'étages en fonction des ressources et l'enracinement (stress hydrique), ainsi que la régulation entre la fixation et l'assimilation de l'azote pour une croissance maintenue dans de plus larges conditions environnementales

Blé bio: améliorer la disponibilité en azote dans le sol et la capacité de la plante à absorber



D'après les travaux de Lise Billy, 2008, région Centre



D'après Vallé M.,2006 et Billy L. 2008

La quantité absorbé dépend du **reliquat N sortie hiver** (niveau de croissance et du type de légumineuses) et du **coefficient d'absorption par les racines** (abondance des adventices, caractéristiques du sol, enracinement...)

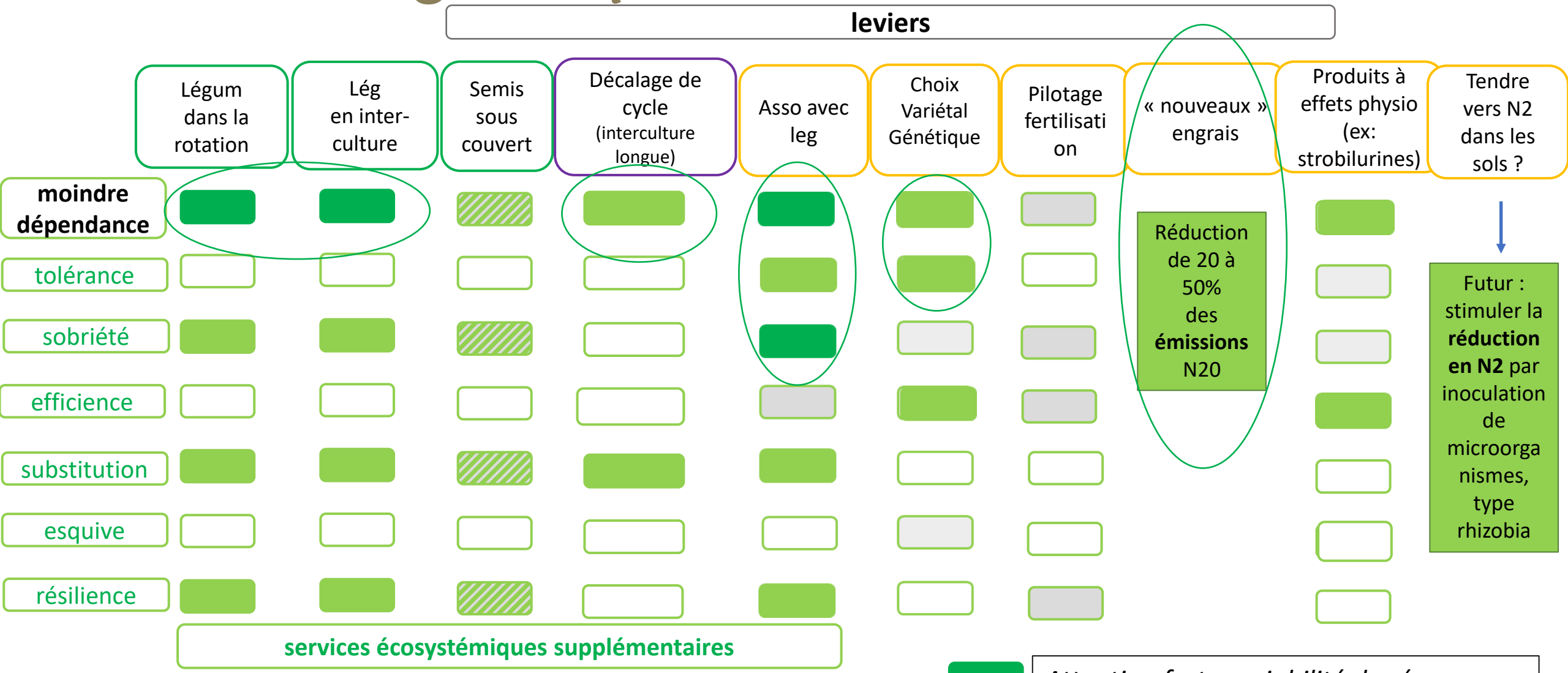
	Nabs	Rendement
médiane	115	40.6
décile 2	90	33
décile 8	165	56

Tentative de synthèse sur blé

Leviers activables et quantification de gains d’azote

D’après Michel Bonnefoy, Irène Félix ARVALIS et Philippe Gate

Azote : chiffrage des possibilités de réduction de doses



Jusqu'à 100 N	30 à 50 N	nul ou négligeable
10 à 20 N	moins de 10 N	négatif : 0 à – 20 N

Attention forte variabilité de réponse
Ex : Luzerne devant maïs, moyenne = 50 mais varie de 10 à 140 kgN/ha

D'après Michel Bonnefoy, Irène Félix ARVALIS et Philippe Gate

Blé: au moins 3leviers activables issus de la génétique

Choix Variétal Génétique

TRAITS	ENJEUX
• Le besoin par quintal (exigence) : de 2.7 à 3.5	40 kgN/ha (Arvalis)
• La capacité à enrichir le grains en protéines pour une même dose N	15 kgN/ha (J. Le Gouis)
• La tolérance : pertes de rendement faible, 40 kgN en dessous de l'optimum	20 kgN/ha (Arvalis)

→ ***Question : traits cumulables au moins partiellement ?***

Des pratiques nouvelles pour associer les couverts au sein d’une même parcelle

En plus des pratiques actuelles (couverts en tant que cultures précédentes, couverts permanents ou mélanges inter-espèces à l’échelle parcellaire),
pistes en cours de test qui nécessitent des innovations génétiques et en agroéquipements

Cultures intercalées pour une gestion sans herbicides des couverts (AB et Agriculture de Conservation des Sols)

Intérêt du guidage RTK pour un broyage de précision (2cm)

Semis de blé entre les rangs d'une luzerne (séparation des espèces dans l'espace)

Fauchage de la luzerne entre les rangs de blé au printemps

Blé à floraison qui domine la luzerne, le blé profite des restitutions d'azote de la luzerne

Couverture du sol et stockage d'azote par la luzerne durant l' interculture

Besoin de variétés adaptées à ces techniques

Dynamique de croissance Architecture

d'après Régis Hélias, ARVALIS

Cultures intercalées espacées pour accueillir une grande diversité de couverts et pour stimuler la photosynthèse

Des corridors solaires pour stimuler la photosynthèse du maïs et introduire un plus grand nombre d'espèces de couverts

écartements très larges (ex : 154 cm dans le cas du maïs)

→ stimulation de la photosynthèse du maïs, variabilité génétique (KREMER RJ. Et DEICHMAN CL., 2014).

→ possibilité de semer un grand nombre de couverts (plus de lumière)

→ pertes de rendement du maïs seulement les premières années (d'après les agriculteurs) ?

Des traits nouveaux : plasticité de la photosynthèse, nombre d'épis par tige…

Opaline Lysiak, http://agriculture-de-conservation.com/Du-mais-en-corridors-solaires.htm

Adaptation au dérèglement climatique

Evolution du climat en France :

avant et après le début du réchauffement (1995 environ)

Cas du blé (espèces d'automne)

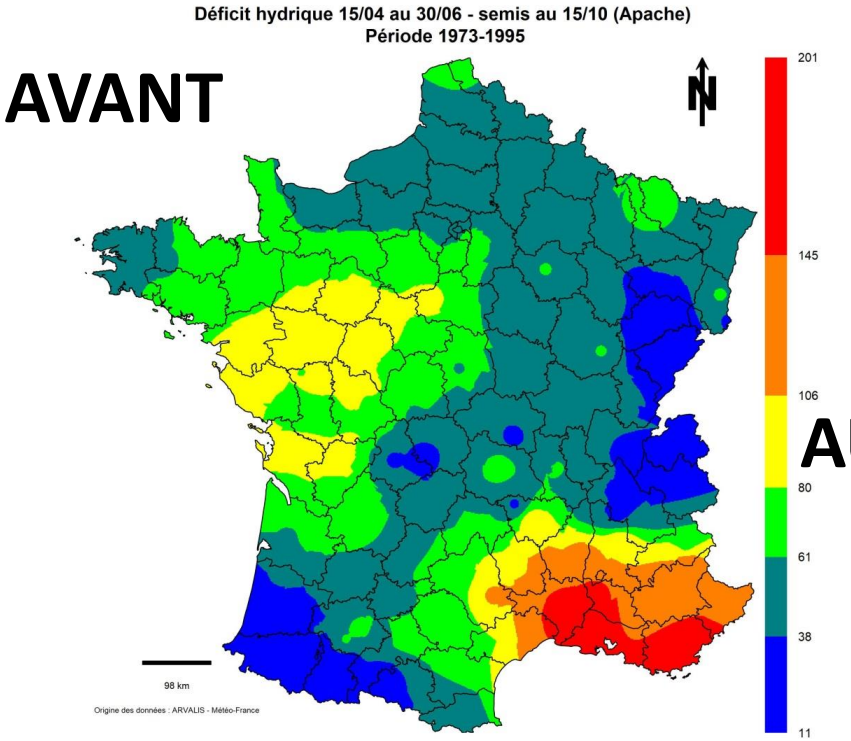
Sécheresse

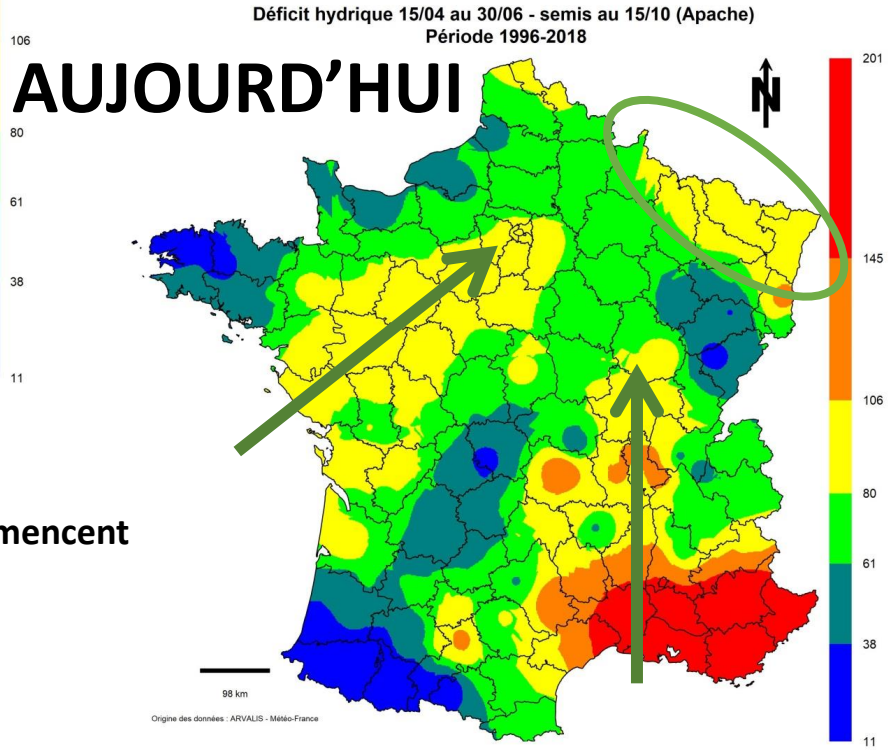
Déficit en eau pour les céréales d'automne (RU de 80 mm)

→ Extension des zones

→ Pays de Loire jusqu'au Bassin Parisien

→ Zone nouvelle (Alsace, Lorraine)





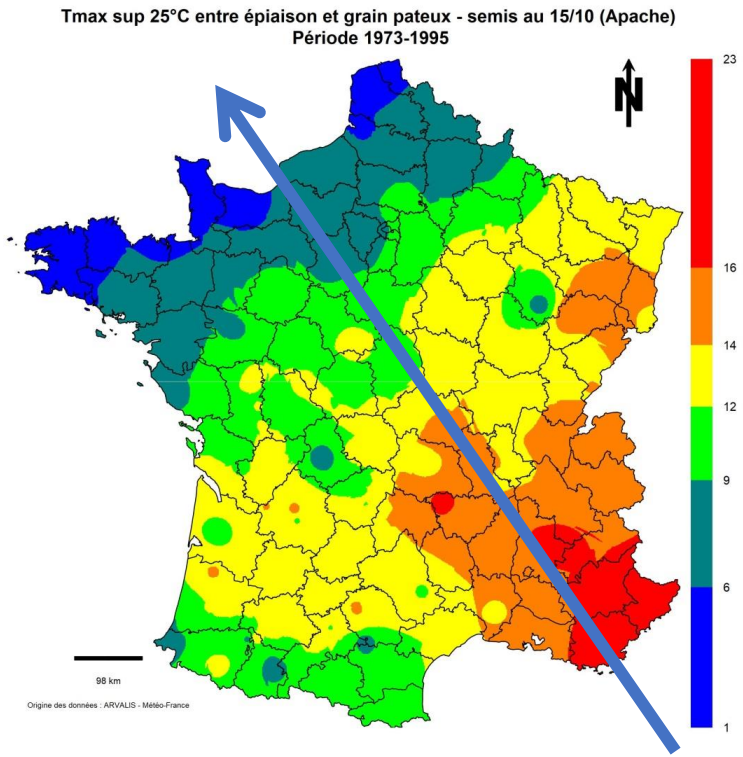
Quand la zone devient jaune : pénalités commencent à être significatives

D'après ARVALIS

Canicule

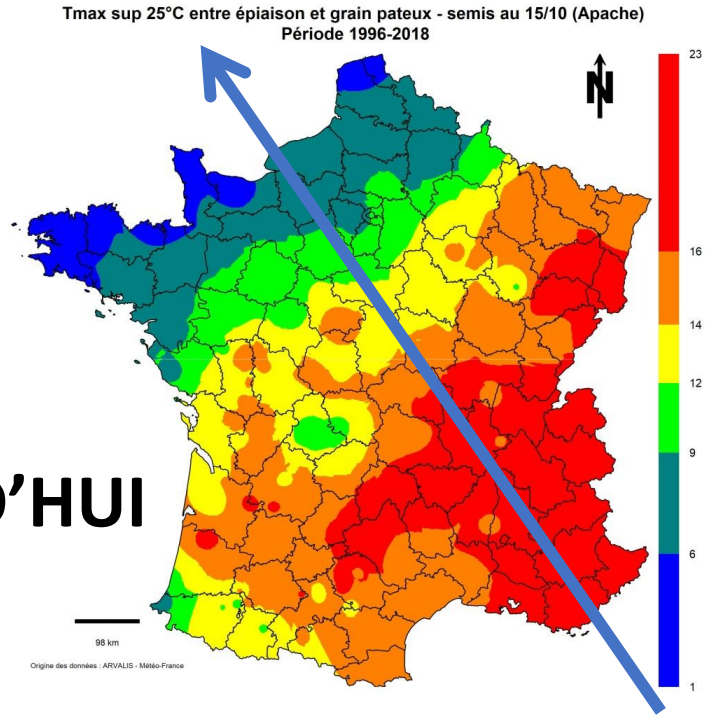
Echaudage des blés : T°max > 25°C entre épiaison et grains pâteux

→ Gradient Nord-Ouest / Sud-Est avec augmentation de la sévérité (sud-est et centre-est)



AVANT

AUJOURD'HUI



D'après ARVALIS

Selon les espèces, le rendement des cultures stagne, s'infléchit ou diminue…

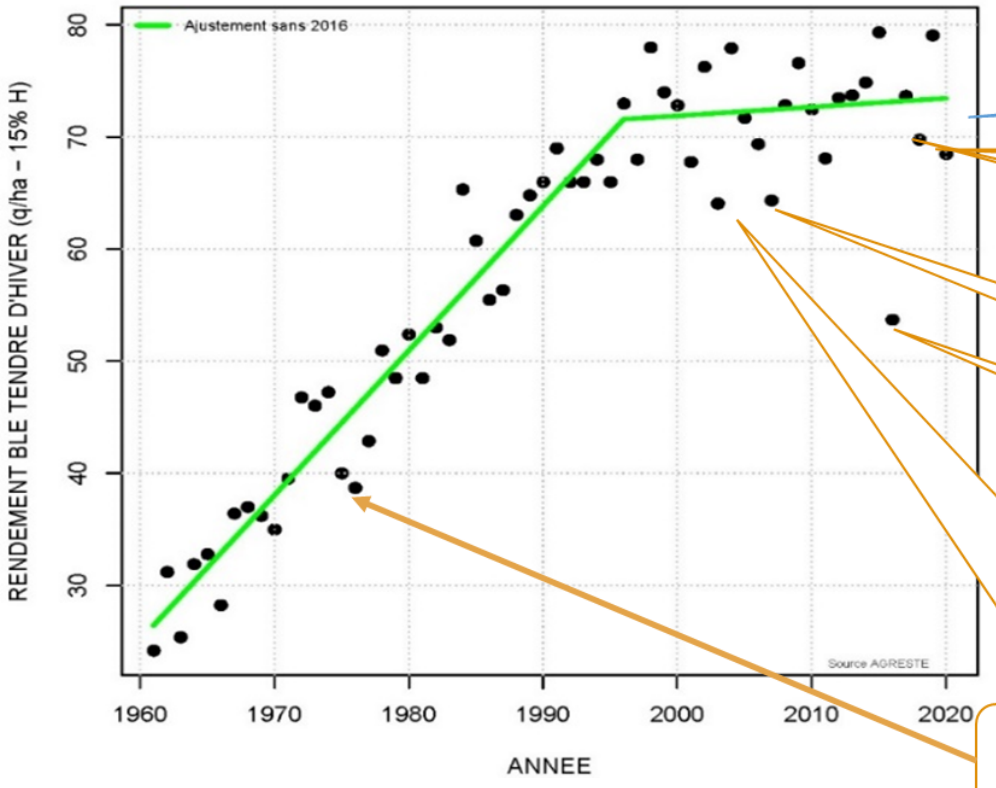
« Les origines supposées du plafonnement des rendements », dans Agriculture et Environnement, 26/07/2010 (séance Académie d'Agriculture du 5 mai 2010)

« À l'instar d'Agatha Christie, l'auteur du fameux roman policier Dix petits nègres, l'équipe Gallais-Gate a procédé à une élimination méthodique de toutes les causes possibles, ***pour au final en retenir une principale : le climat.*** *»*

Si on avait cultivé les mêmes variétés que celles présentes dans les années 1995, le rendement de toutes les espèces de Grandes Cultures diminuerait !
→ Importance du progrès génétique !

Stagnation des rendements : pas que la sécheresse et la canicule

exemple du blé tendre



2022 ? : sécheresse et canicule

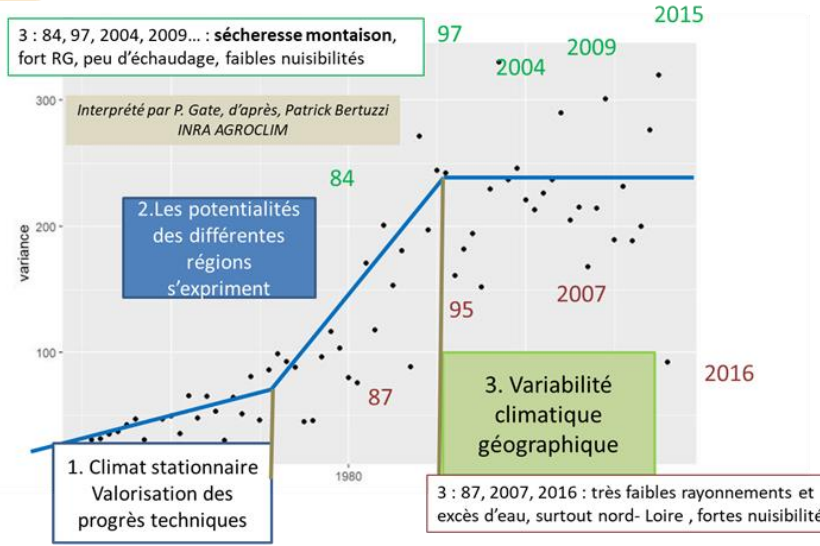
2020: inondations automne-hiver

2018: sécheresse d'automne

2007 : faible rayonnement méiose-fécondation

2016: « déluge » d'eau et très faible ensoleillement à floraison

1976 et 2003: sécheresse et canicule



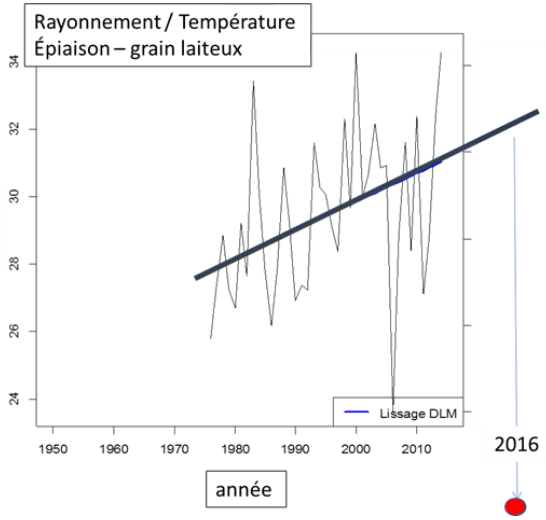
La stagnation (depuis 1995) se traduit par une plus forte variabilité **des rendements entre les départements**

→ En cause, **la sécheresse** car elle extériorise les différences de potentialités régionales (climat, profondeur des sols)

D'après ARVALIS

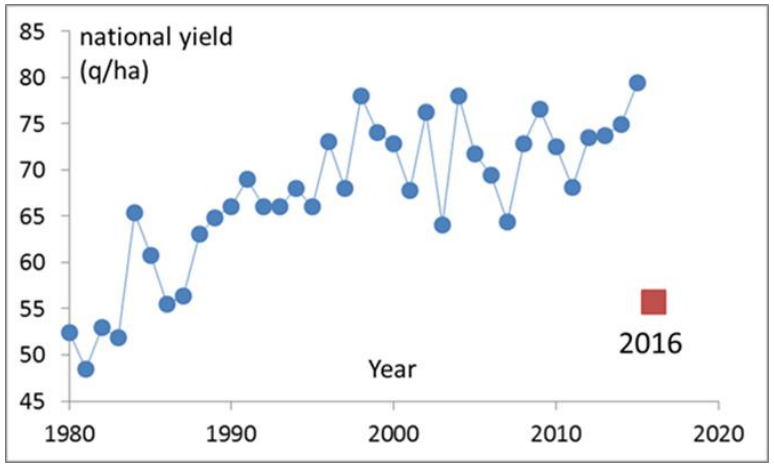
Voie de progrès: améliorer nos modèles de prévision

- Prévision des conditions extrêmes : retour aux événements de 2016

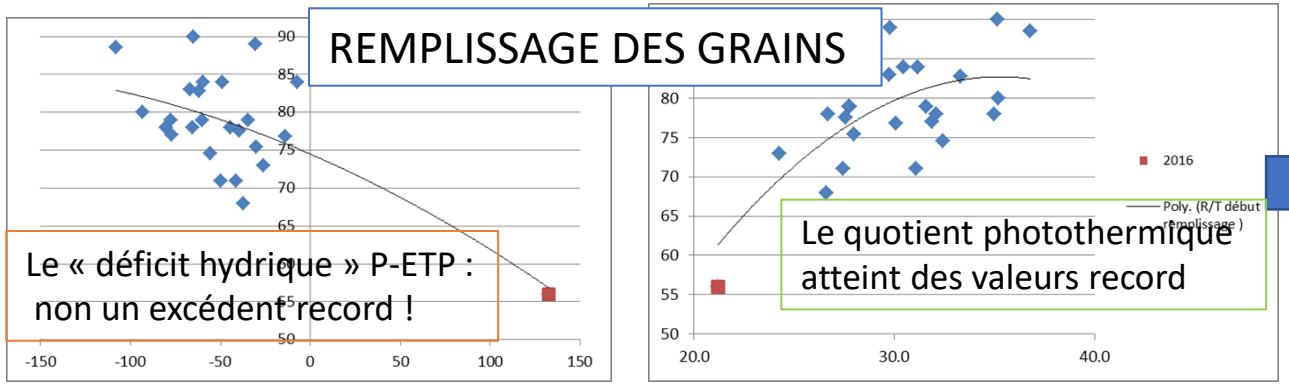


1. En tendance le risque diminue…
2. On a donc toutes chances qu'il disparaisse ?
3. Non car l'occurrence de valeurs extrêmes (dont basses) augmentent aussi ?

→ *Quelles fréquences de retour ?*



- Modèles écophysiologiques : prise en charge de conditions jamais rencontrées



- Impossibilité de prévoir le rendement en 2016
  - Quel facteur responsable ? Rayonnement et/ou excès d'eau ? Mécanismes physiologiques ?
  - Les modèles de 2022 ont-ils été améliorés ?

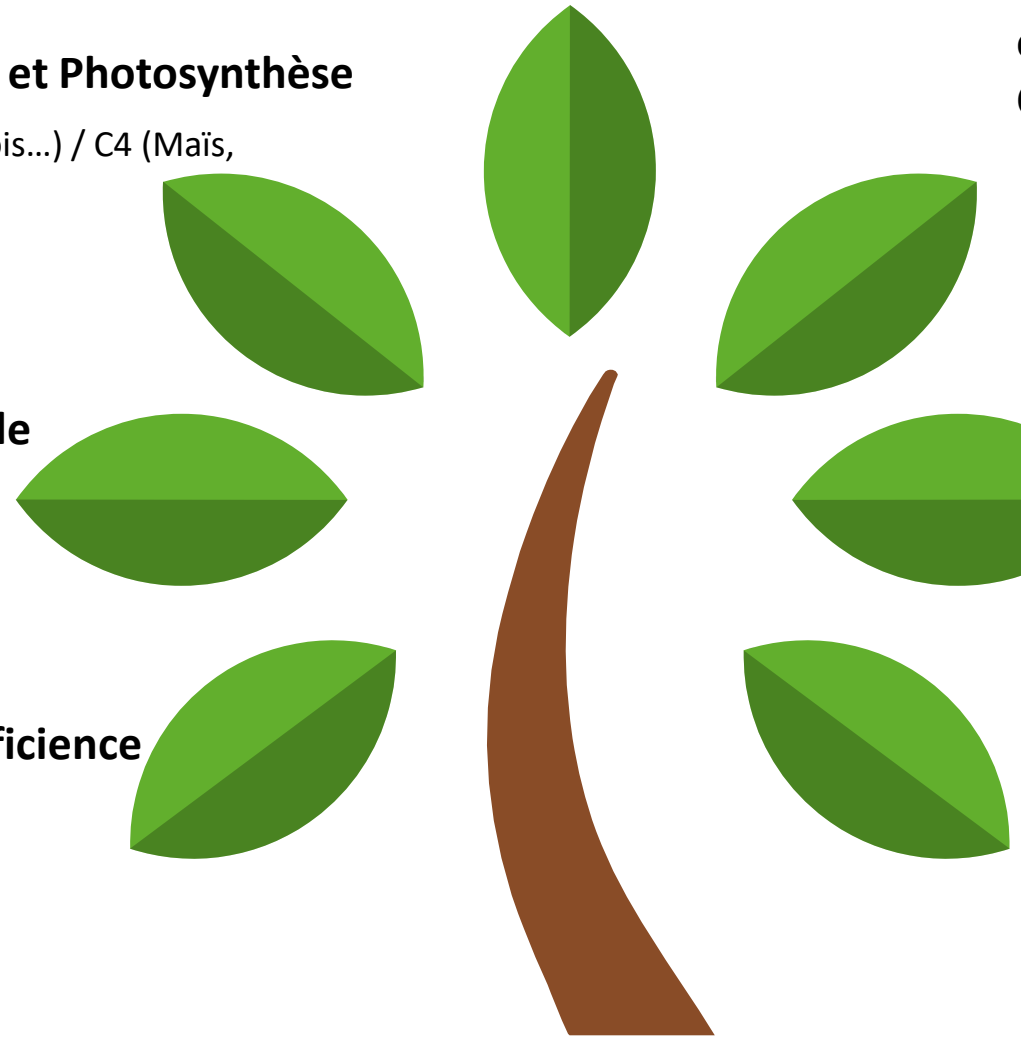
- sécheresse de 1976, 2003, et 2022 : impacts différents sur le rendement des C3 (blé, colza)

Parfois des rendements record en 2022 → CO_2 (de 313 à 419 ppm) ? Progrès génétique ?

D'après ARVALIS

Impacts du changement climatique

Fonctions de la physiologie des plantes



Température et Photosynthèse

C3 (Blé, Colza, Pois…) / C4 (Maïs, sorgho)

Espèces d'automne ou d'hiver / Efficience Climatique

Exposition sécheresse / esquive

Température et Durée du cycle

Blé / Maïs

Récolte des grains ou des parties végétatives

Céréales VS betterave …

Eau et Pertes de rendement / Efficience intrinsèque

10 mm : 2 q/ha blé ;
3.5 q/ha maïs

Localisation géographique des espèces

Ex : Lin fibre en bordures maritimes

Les évolutions et les perspectives

Continuer à saisir les opportunités de l'offre thermique

- Progression vers le nord des plantes en C4 et du tournesol (les températures deviennent optimales)
- Semis très précoces des espèces de printemps (esquive, maintien de la durée du cycle) → améliorer la tolérance au froid (notamment C4)
- Orges de printemps semées à l'automne, mais aussi pois, lin...
- Céréales d'hiver semées plus tard (réduction des risques de biogresseurs avec le même calendrier)
- Semer avant la récolte de la culture précédente : relay cropping, 2 cultures en 1 an
- Des céréales en zones de semi altitude

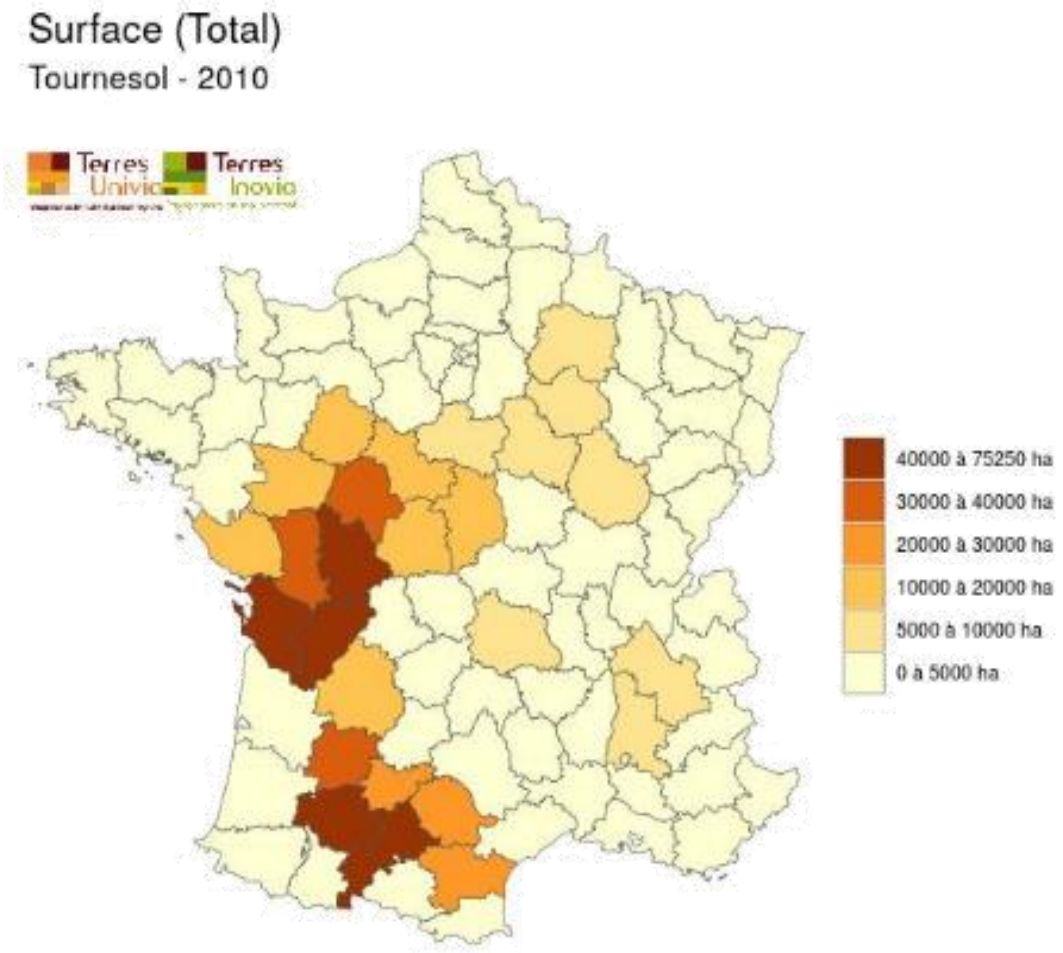
Perspectives

- Un panier d'espèces et de variétés adaptées à la diversité des débouchés, aux pédoclimats
- Diversification des couverts végétaux : des variétés adaptées aux différentes pratiques (sous couvert, intercalées, en mélange)

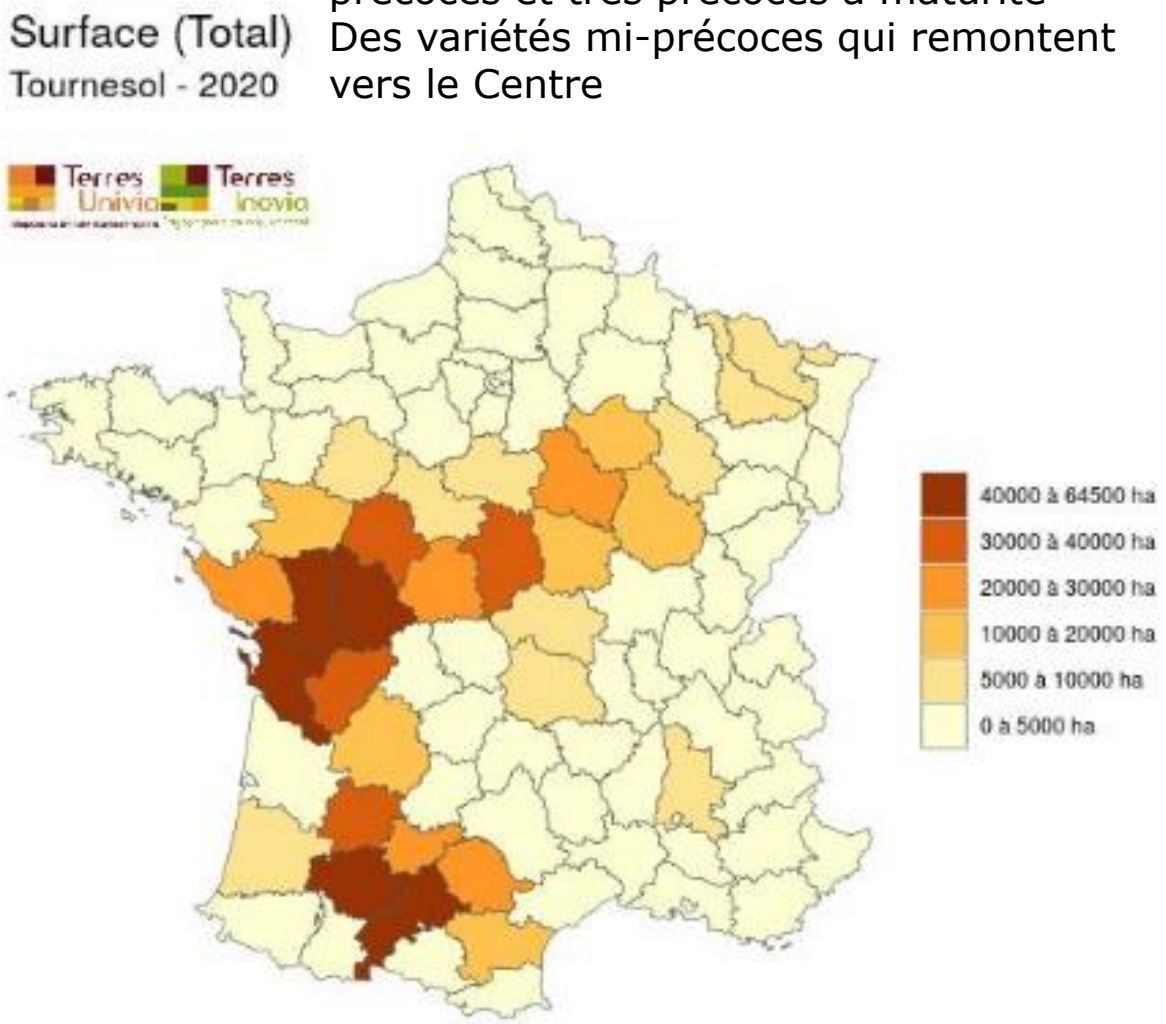
Améliorer l'accès à l'eau pour permettre la diversification

Evolution des surfaces de tournesol entre 2010 et 2020

Une offre variétale qui s'accroît dans les précoces et très précoces à maturité
Des variétés mi-précoces qui remontent vers le Centre



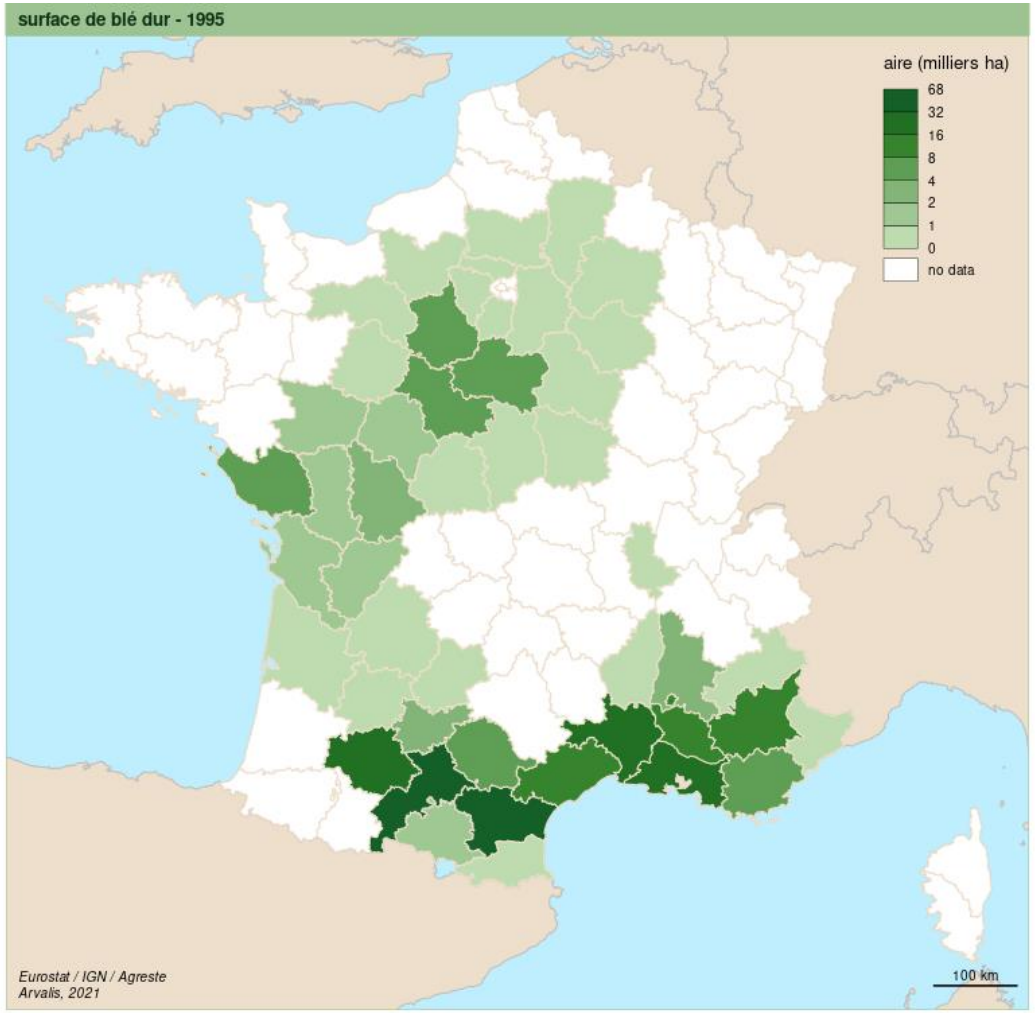
Terres Inovia et Terres Univia d'après les données d'Agreste (*Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation)*

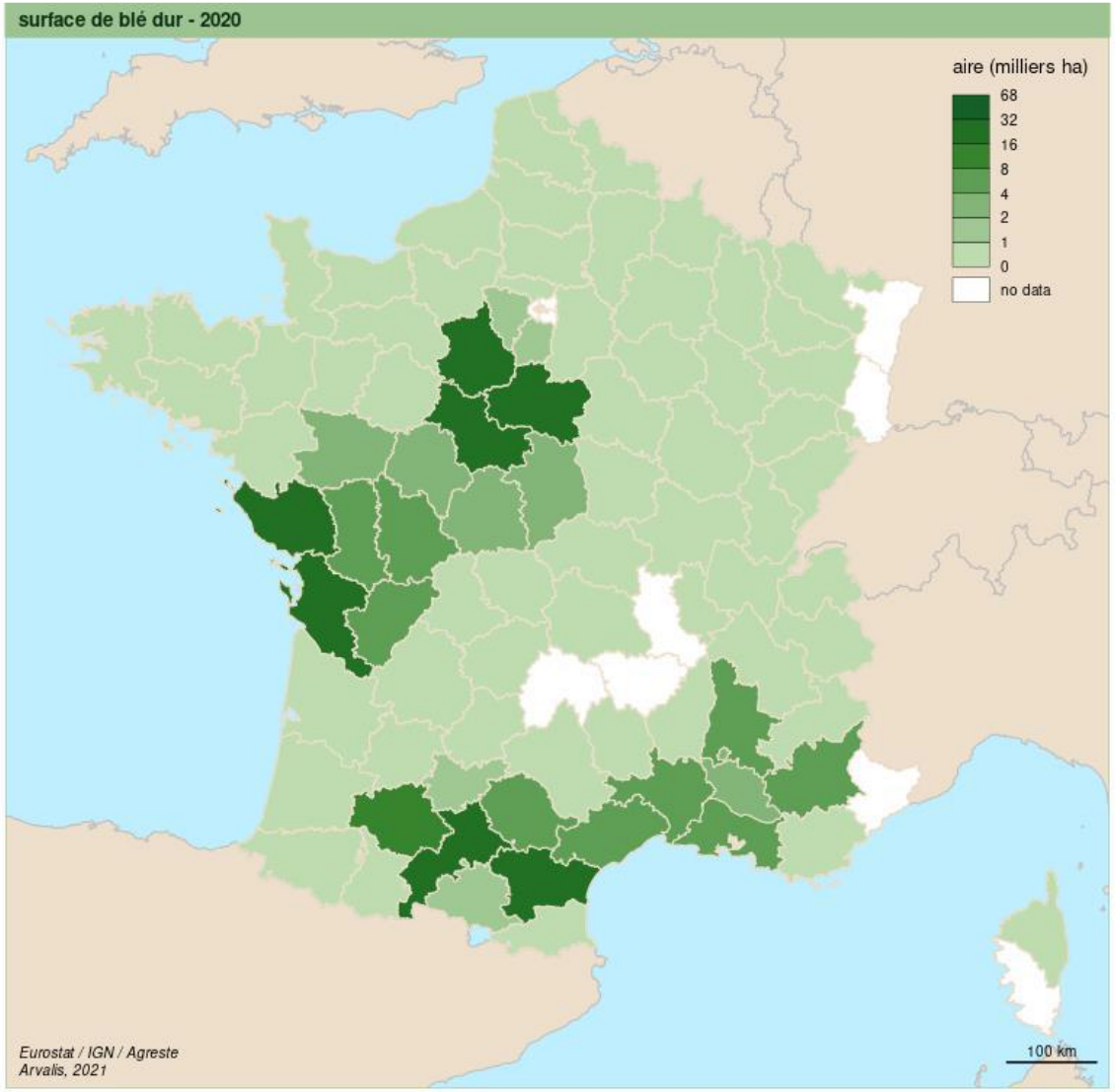


Terres Inovia et Terres Univia d'après les données d'Agreste (*Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation)*

Extension vers le centre et le nord-est qui suit le « croissant des petites terres à cailloux »

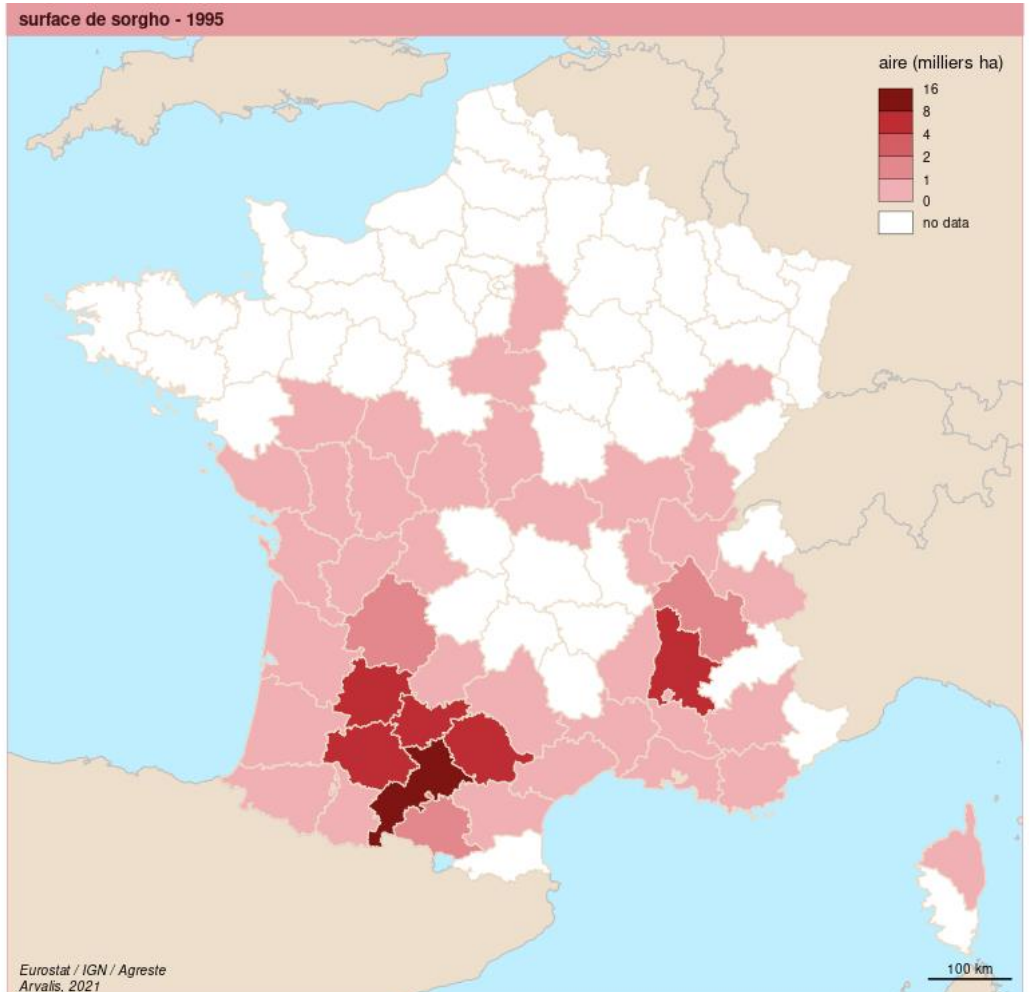
Evolution des surfaces en blé dur entre 1995 et 2020

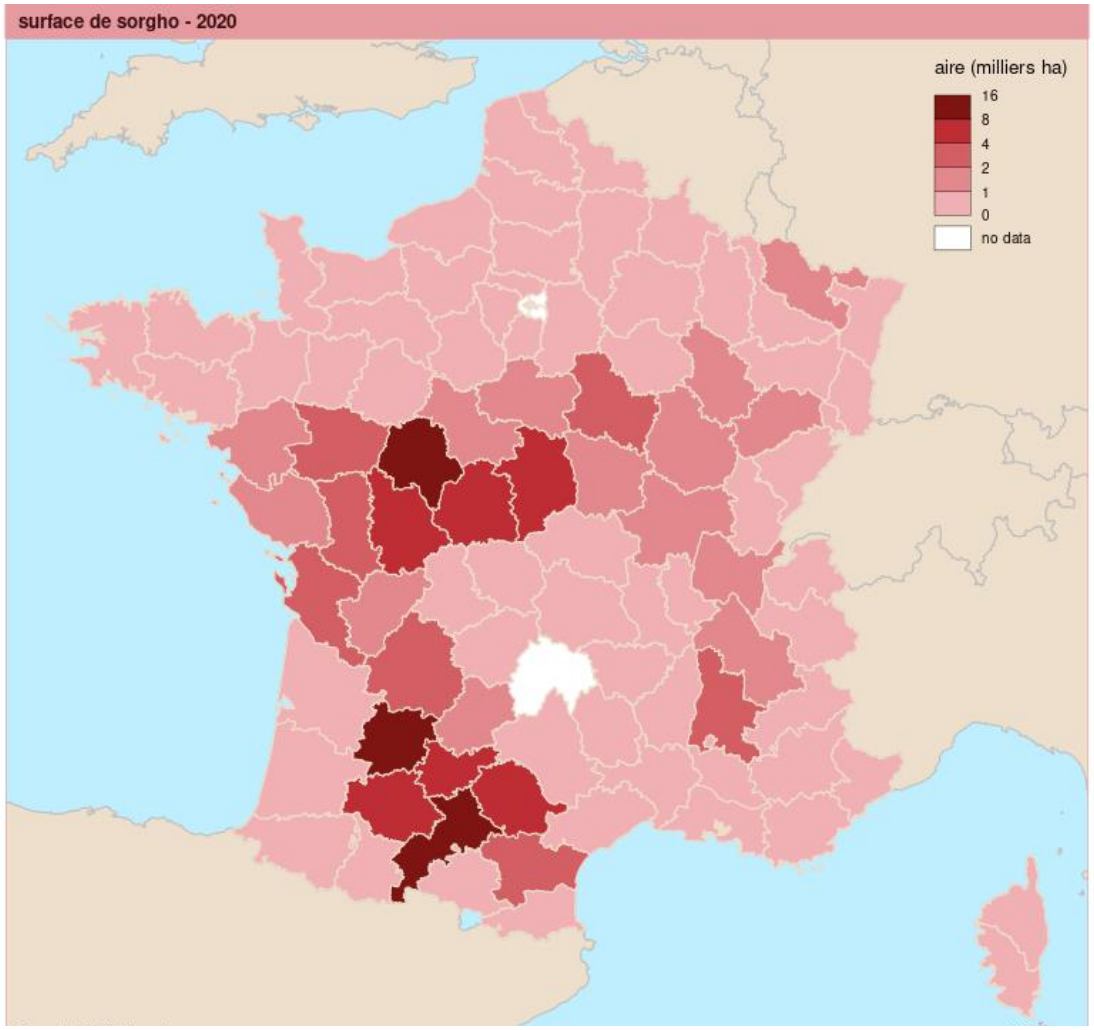




Surtout une densification dans les nouvelles zones au détriment des zones historiques

Evolution des surfaces en sorgho entre 1995 et 2020

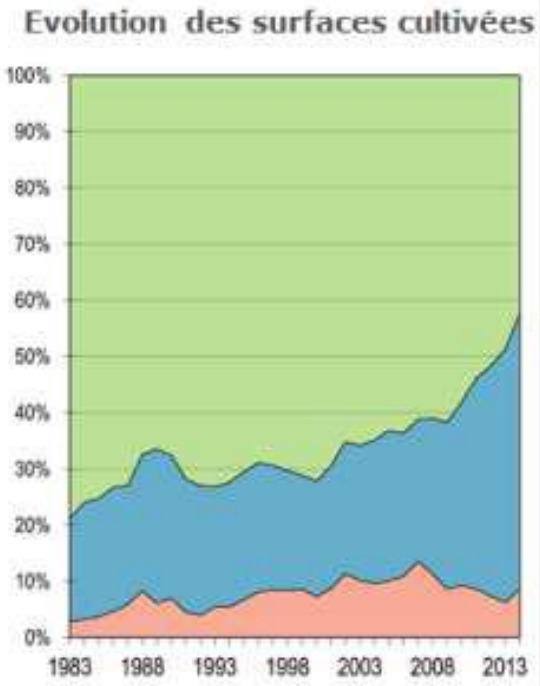


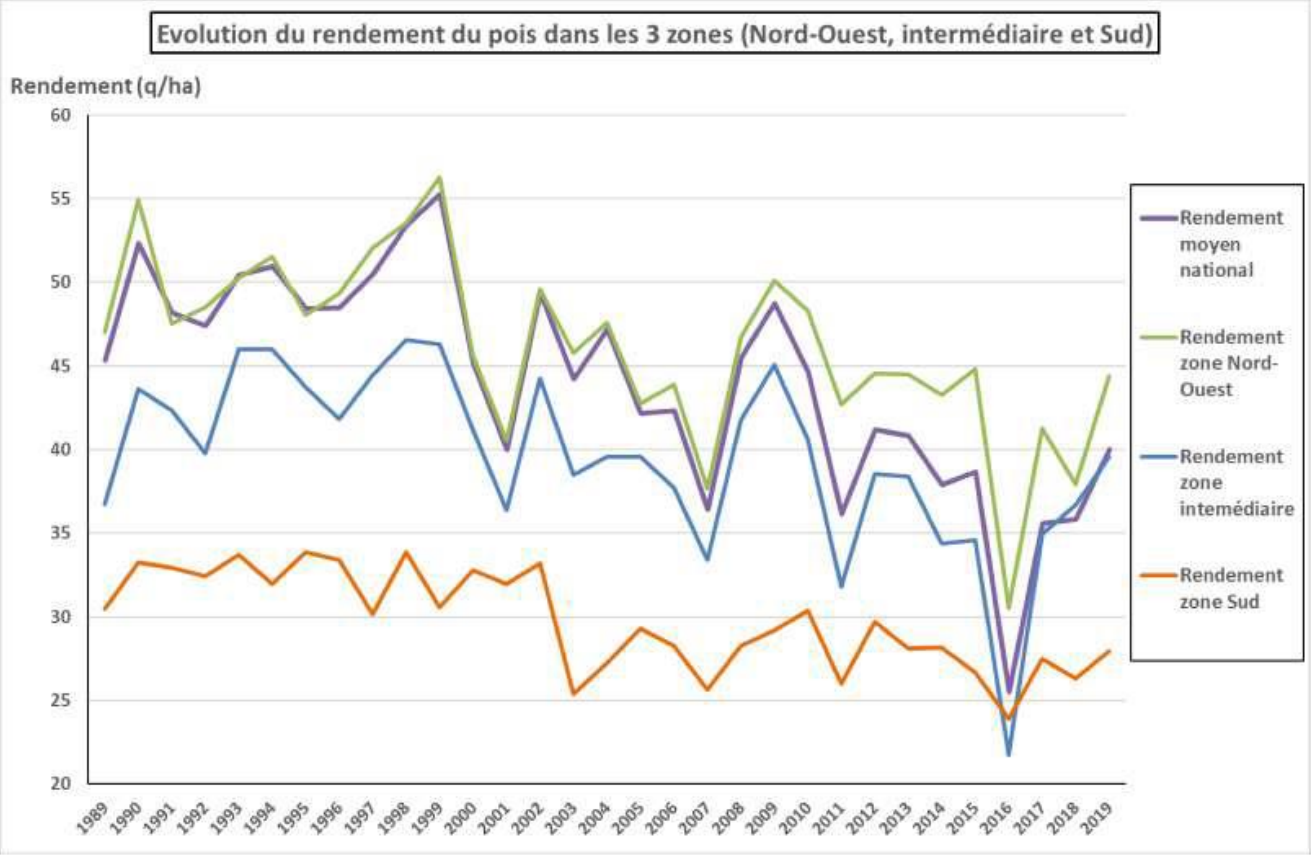


Développement spectaculaire en Poitou-Charentes, P de Loire, Centre et Centre-Est (zones vulnérables)

Déplacement de la zone de culture du pois

Légende :
- : Zone Nord-Ouest (2)
- : Zone intermédiaire (1)
- : Zone Sud-Est (3)





Abandon du pois dans zone Nord où RU élevée (Aphanomyces)
Développement du pois d'hiver dans la zone intermédiaire

=> Des stress hydriques renforcés : plus précoces et plus intenses

Déplacement vers la zone intermédiaire au détriment de la zone nord-ouest (perte d'attractivité)

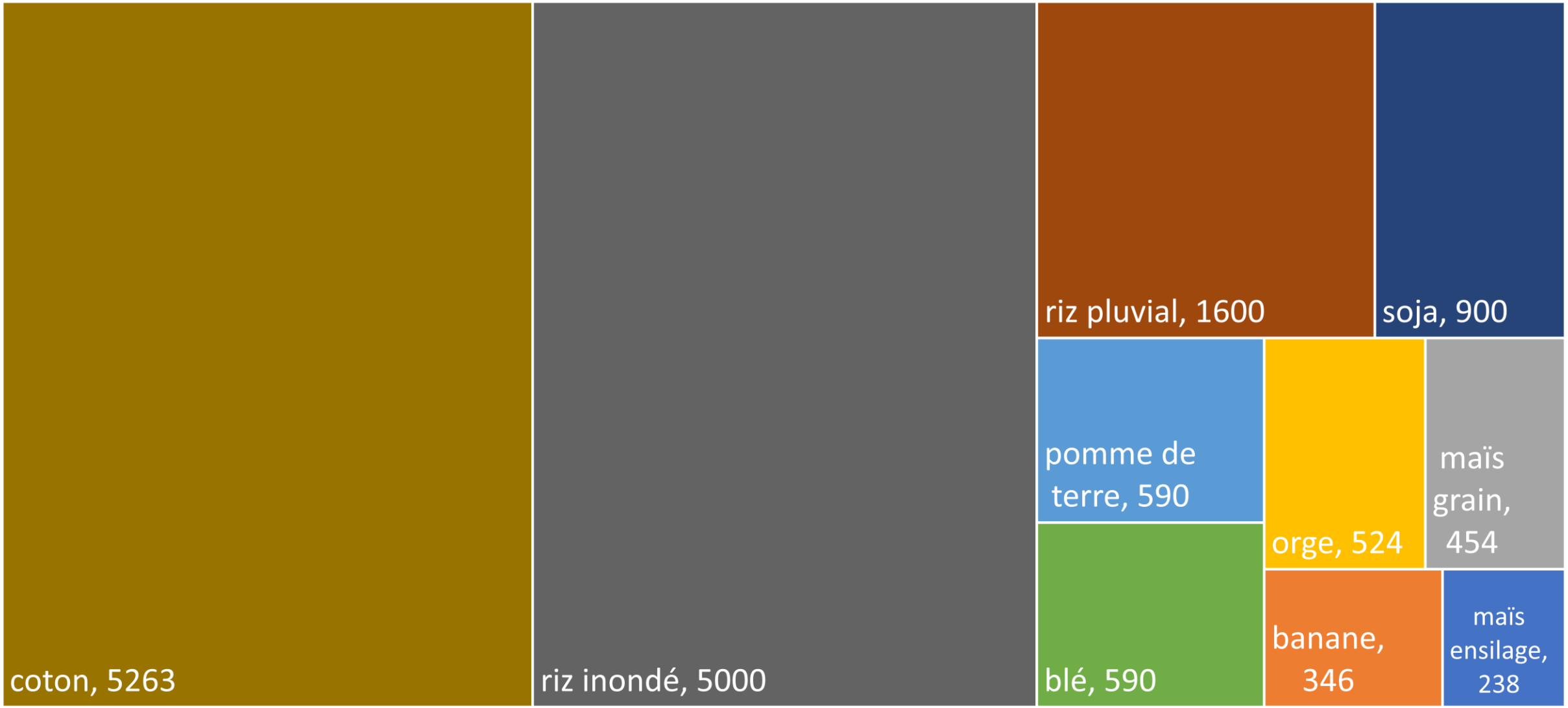
Terres Inovia
l'agronomie en mouvement

L’eau

Pour :

- Stabiliser la production (quantité et qualité)
- Permettre la diversification, pilier de l’agro-écologie
- Réduire les inégalités géographiques

Combien de litres d'eau pour produire 1 kg de…



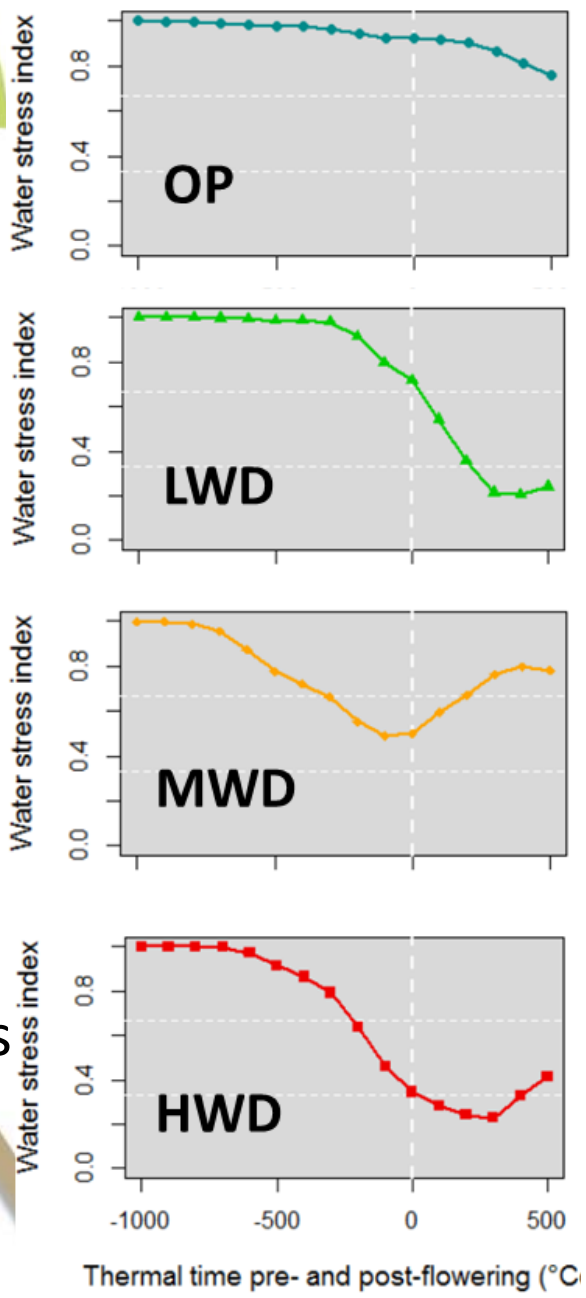
Source: https://www.cnrs.fr/cw/dossiers/doseau/decouv/usages/consoAgri.html

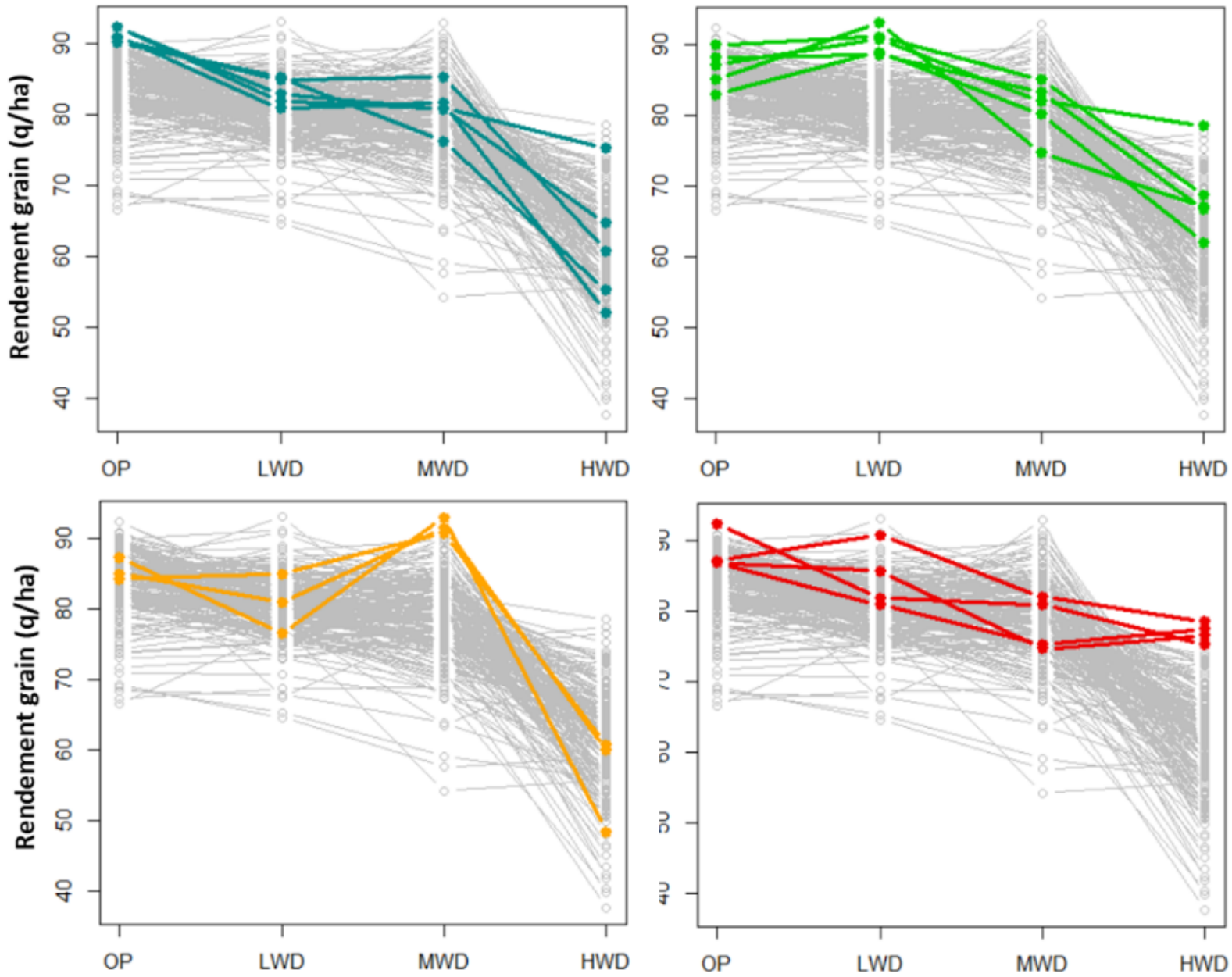
Vers des variétés plus stables pour des scenarios climatiques variés (blé)

(D'après ARVALIS, Breedwheat)

Peu de stress hydrique

fort stress hydrique

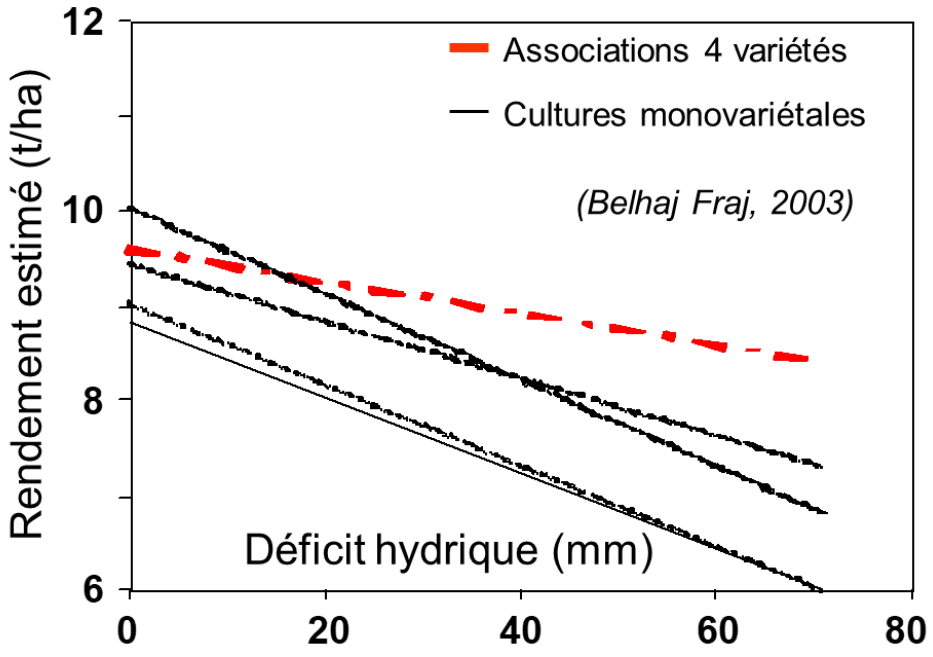




ARVALIS Institut du végétal

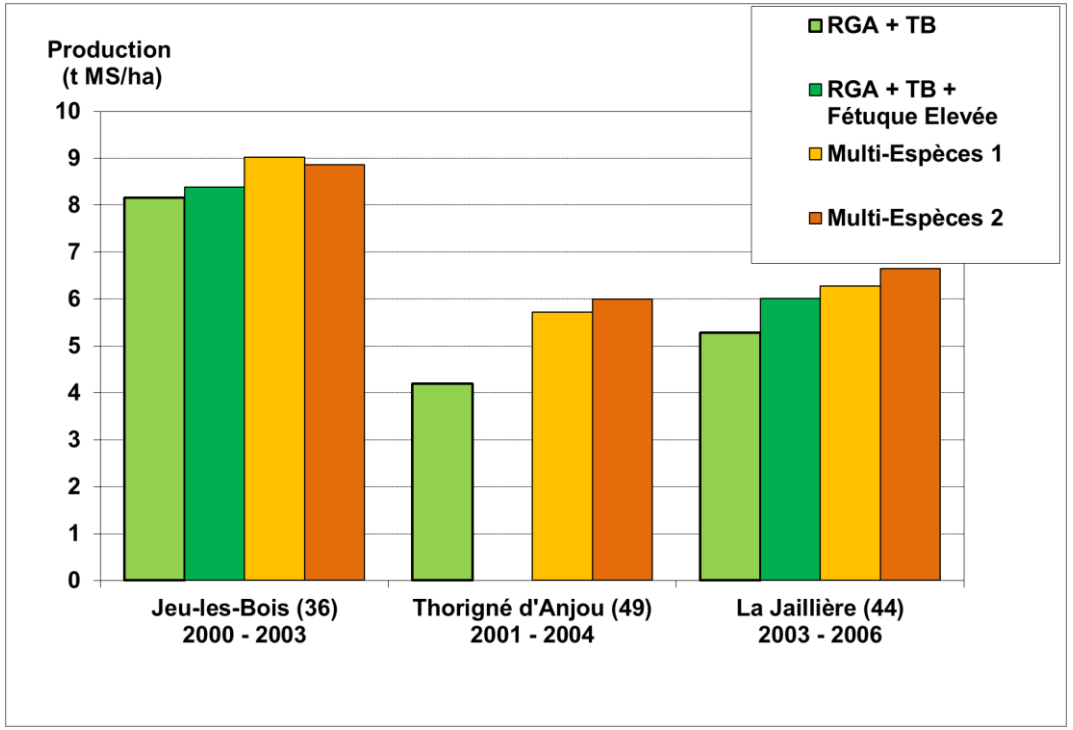
Intérêt des mélanges vis-à-vis de la sécheresse

Mélanges variétaux intra-parcellaire



les associations de variétés sont moins pénalisées en situations de déficit hydriques (Belhaj Fraj, 2003)

Mélanges prairiaux multispécifiques

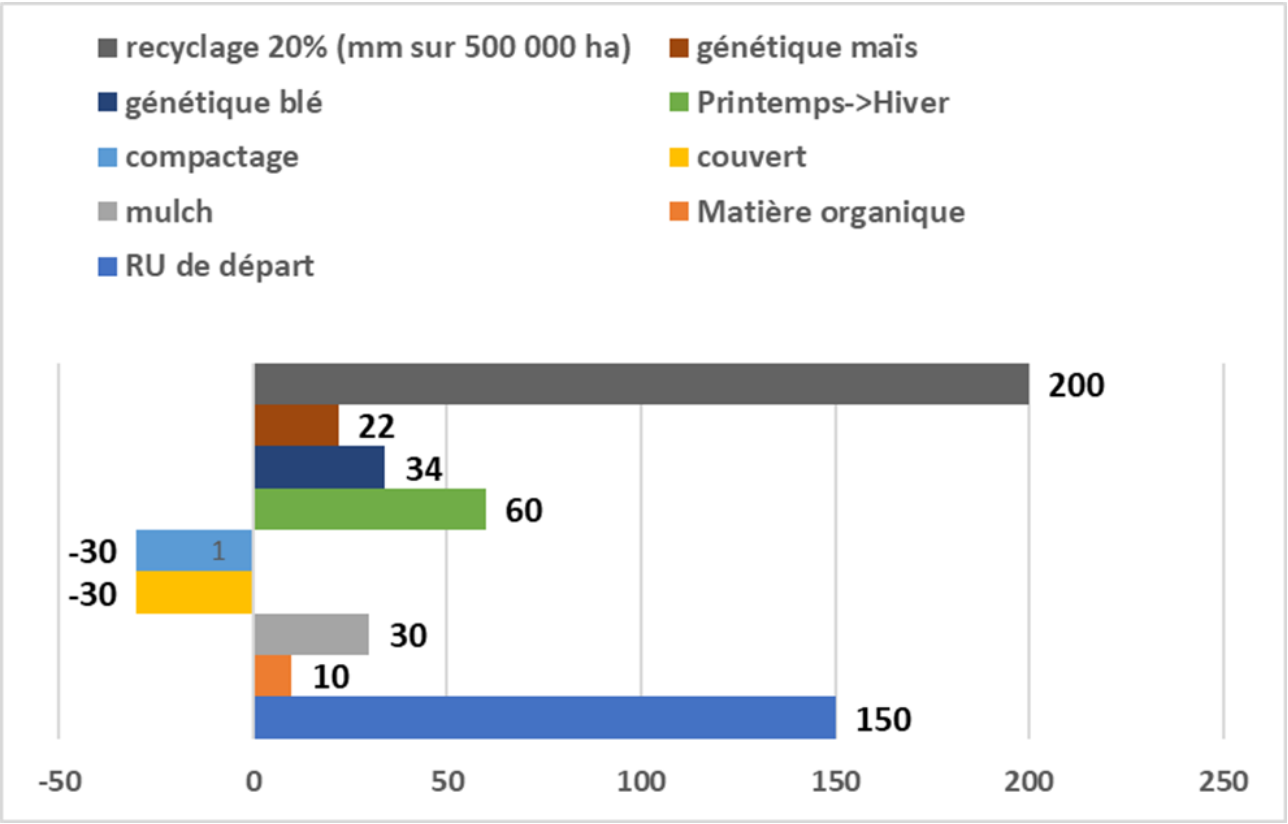


les assemblages multispécifiques sont plus productifs et plus stables (notamment sécheresse) (PROTIN P.V. et al., 2014)

Les leviers pour améliorer la gestion quantitative de l'eau

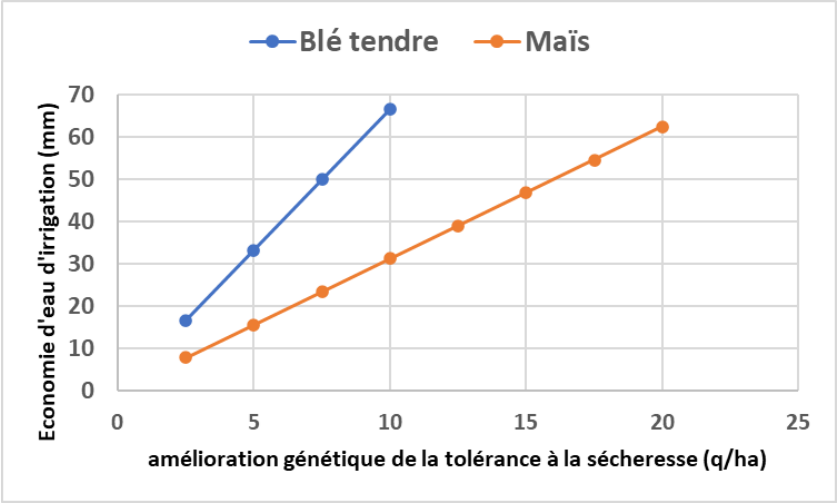
Réserve en eau du sol	Améliorer la réserve sol	Choix de l'espèce	Progrès génétique	Irrigation	Recyclage REUT	Stockage
Des pertes de rendement très différentes en fonction de la RU du sol Ex : -8q/ha en sols profonds contre -25 q/ha en sols superficiels en région centre. ↓ Quels enjeux sur la quantité d'eau ? *Quelle quantité supplémentaire en sol superficiel pour parvenir aux mêmes pertes de rendement ?*	- Fertilité biologique des sols - Mulch au semis - Couvert - Compactage ↓ Quels enjeux sur la quantité d'eau ? *Quels gains en mm?*	D'abord lié à l'exposition : remplacement d'une espèce de printemps (maïs) par un blé d'hiver ↓ Quels enjeux sur la quantité d'eau ?	Amélioration forte de la tolérance au stress hydrique - 5q/ha sur blé (Breedwheat) - 7 q/ha sur maïs (Amaizing) ↓ → Quels enjeux sur la quantité d'eau ? Espèce de printemps: semer plus tôt: mais C4 Enracinement : 80 cm sur pois, 200 sur Tournesol Valoriser de nouveaux mécanismes de tolérance (quinoa...) Intérêt des mélanges variétaux	20% de la SAU assure 40% de la production mondiale, des besoins qui augmentent avec le CC (+ 60mm, maïs) Des besoins fonction de l'exposition Lien avec l'azote : valorise la fertilisation, le développement des nodosités... Vers un pilotage sobre : parcours minimaliste de l'indice foliaire, stimulation des mécanismes physiologiques	France : 0.6% des surfaces... Craintes : risques sanitaires Les expériences (vignobles, grandes cultures, espaces verts avec stations d'épuration, eaux de laiterie, sucrerie...) sont des succès ↓ → Quels enjeux si la France recyclait 20% ?	Ressource en eau renouvelable = 211 Mrd m3/an (FAO, 2013) Projection P-ETP restera excédentaire dans le futur (MétéoFrance, Institut Pierre Simon) irrigation = 1.1% de la pluie ↓ Innover dans le stockage de l'eau pluviale en excès pour diversifier

Ordres de grandeur des leviers de la gestion quantitative de l'eau (en mm)



Méthodologie :

- **RU de départ** : calcul des écarts de déficits hydriques entre sols à faible réserve (80 mmm) et élevée (150 mm) en années sèches (décile 2)
- **génétique maïs et blé** : gain de rendement q/ha généré par l'amélioration actuelle (breedwheat, amaizing) et correspondance avec les mm d'eau gagnés base : blé = 1.5 q/ha/10mm et maïs = 3.5 q/ha/10mm



- **Hiver/Printemps** : différentiel de pertes de rendement à l'échelle nationale, les années sèches, entre le maïs et le blé d'hiver. Mm d'eau nécessaires sur le maïs pour obtenir les mêmes niveaux de pénalités que le blé.
- **Compactage, Couvert, Mulch** au semis**, Matière Organique** : Source Arvalis, les « vrais-faux de l'irrigation », pour une RU de 150 mm ; Couvert : aggravation de 30 mm si le couvert est détruit trop tard.
- **Recyclage** : 5.6 Mds de m3 d'eau usées en France, et irrigation de 2000 m3/ha → 200 mm d'eau utilisable sur 500 000 ha par an si le recyclage est de **20%**. (rappel : surface irriguée en France = 1.5 millions ha)

Des outils numériques pour aider les producteurs dans ce contexte changeant

→ Quels assolements ? → Quelles variétés ? → Quels mélanges de variétés ?

Wheatamix

→ Quels couverts ? → Gérer les aléas par le pilotage → Evaluation multicritère →

SYSTERRE

Système de production multiperformant

Marges
Coût de production
Charges de mécanisation
Efficience Economique des intrants
Consommation de carburant
Rendements
Emission de gaz à effet de serre
Temps d'intervention
bilan PK
nombre de passages
Balance globale azotée
IFT
Production et consommation d'énergie

Biodiversité, stock C
Risques transferts phyto azote
Performance alimentaire

A retenir en conclusion

Saisir les opportunités

- **concerne l'adaptation et l'atténuation**
- **quantifier et hiérarchiser les leviers activables**

Apprendre à produire avec un climat changeant

- **Caractériser les scénarios de stress, simuler les réponses, valoriser la variabilité**
- **Proposer une grande diversité d'espèces et de variétés pour une grande diversité de situations agronomiques**

Travailler aux interfaces car les solutions gagnantes seront des combinaisons de leviers

- **génétique-agronomie-aval-matériel-numérique**

Merci de votre attention