

# Impact du changement climatique sur les rendements des cultures : *méthodes et sources d'incertitudes ; quelles adaptations ?*



**Philippe Debaeke – UMR AGIR (Toulouse)**



avec les contributions de J-L Durand et M. Launay

Ecole d'été « Autour du 2°C », Autrans, Juin 2019



# 1. L'INRA et le changement climatique



# Métaprogramme ACCAF sur l'Adaptation de l'Agriculture et de la Forêt au Changement Climatique lancé en 2011 ([www.accaf.inra.fr](http://www.accaf.inra.fr))

à partir de 2 dynamiques :

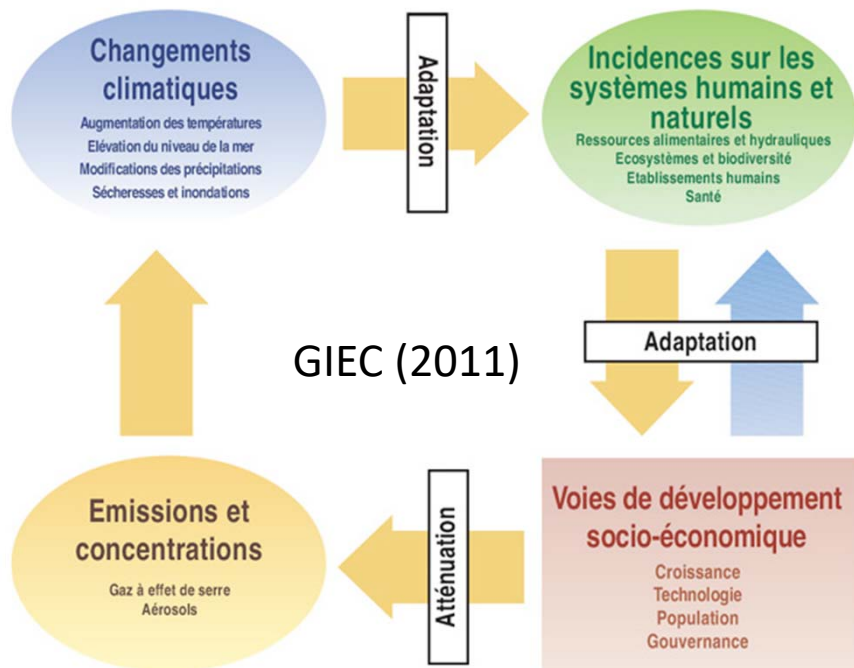
- **ADAGE** (2009-2010) : Atelier de réflexion prospective Adaptation de l'agriculture et des écosystèmes anthropisés au changement climatique (coord JF Soussana)
- **CLIMATOR** (ANR VMC 2007-2010) : Changement climatique, agriculture et forêt en France – Simulations d'impacts sur les principales espèces (coord N.Brisson)



# Les objectifs du MP ACCAF (INRA)

Projeter et scénariser les impacts régionaux du CC

Comprendre et maîtriser les effets du CC sur la biodiversité et la santé des (agro)-écosystèmes et des animaux d'élevage



Evaluer/gérer les **risques** et les **opportunités** à moyen terme et définir des stratégies visant à anticiper et pallier les crises climatiques

Améliorer génétiquement les espèces cultivées/domestiquées et **renforcer la capacité d'adaptation** des systèmes de culture, des systèmes de production et des filières

Définir des **modes d'organisation collective** susceptibles de renforcer la capacité d'adaptation au CC

Développer des **technologies innovantes** de l'adaptation **compatibles** avec les stratégies **d'atténuation**

Identifier les **coûts** et les **bénéfices** de mesures d'adaptation au regard de différents enjeux

## 2 études pilotées par l'INRA sur l'atténuation des émissions de GES par l'agriculture

- ❑ ETUDE « Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ? » (2013)



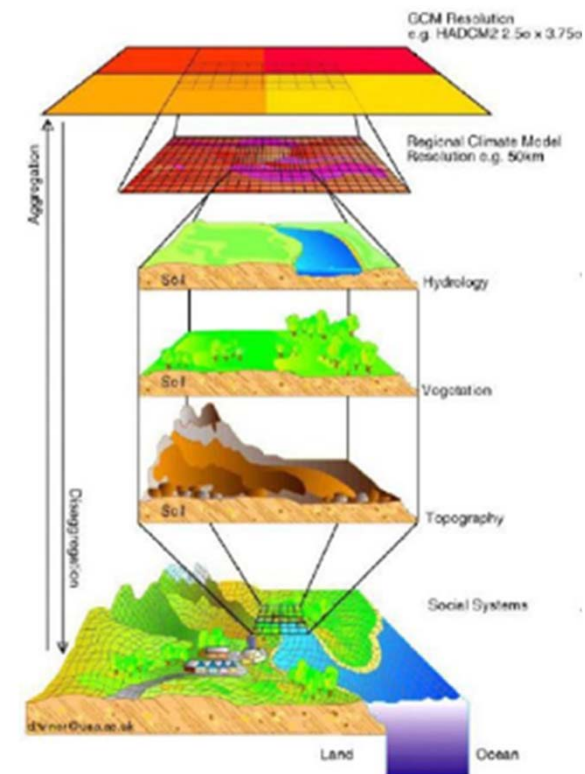
- ❑ ETUDE « Potentiel de l'agriculture et de la forêt française en vue de l'objectif d'un stockage de carbone dans les sols à hauteur de 4 pour mille » - Restitution publique le 13 Juin 2019 (Paris, CIC Sorbonne Université)

## 2. Prendre en compte le changement climatique

**Scénarios climatiques globaux**  
100 – 300 km

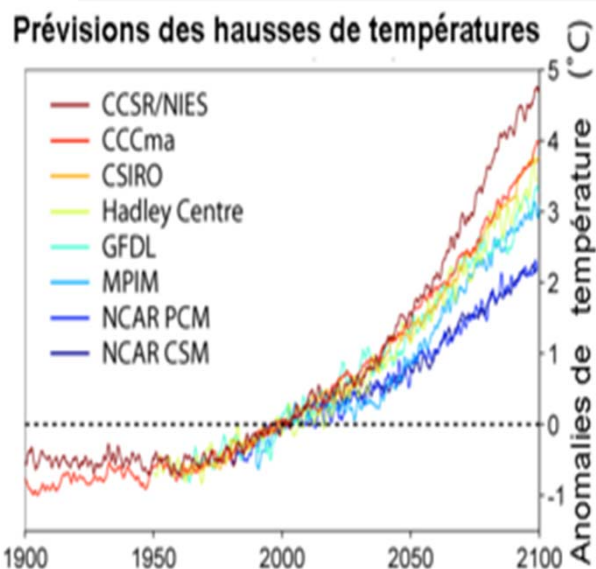
**Scénarios climatiques régionaux**  
10 – 50 km

**Modèles d'impacts**  
quelques km à quelques mètres

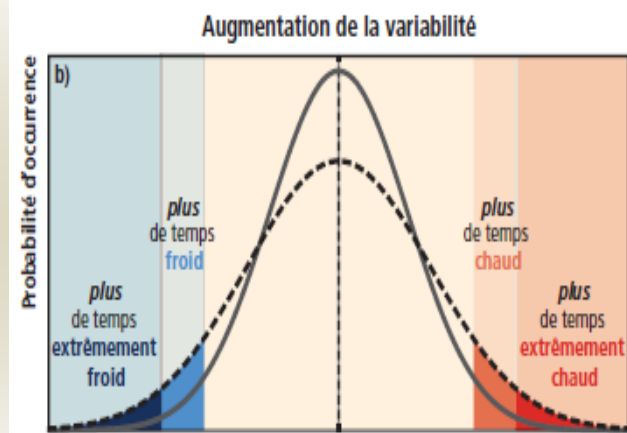


# A quels changements faut-il s'attendre ?

## 1 Changements tendanciels

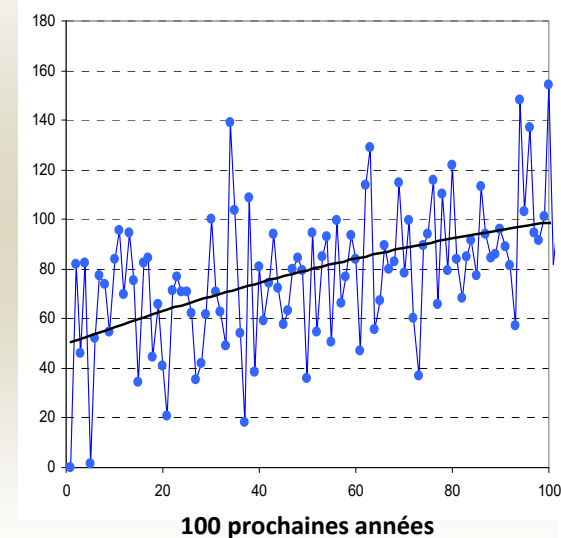


## 2 Evènements climatiques extrêmes

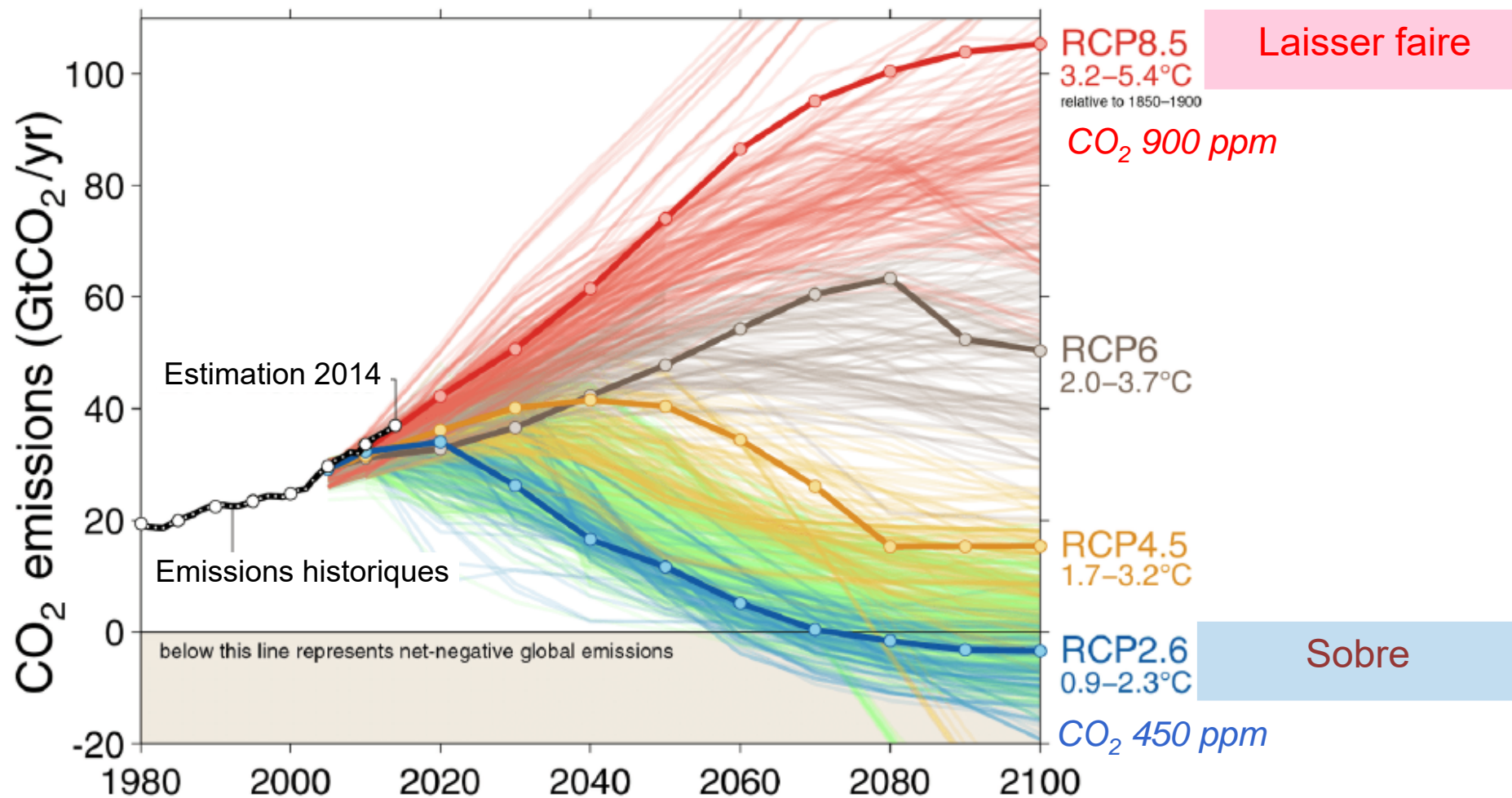


## 3 Variabilité saisonnière et interannuelle

### Déficit hydrique

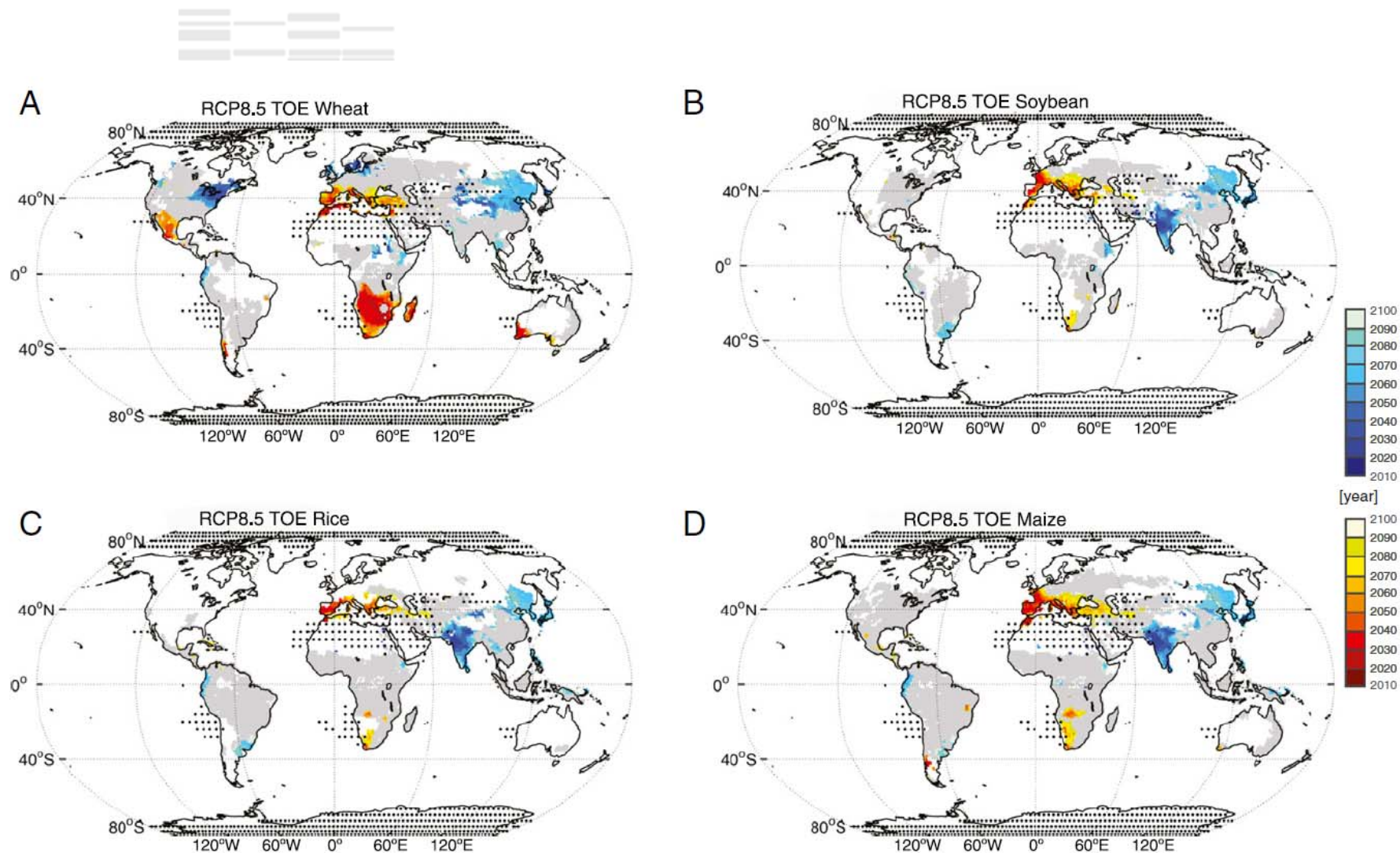


# Scénarios d'évolution des émissions de GES



Fuss et al., 2014



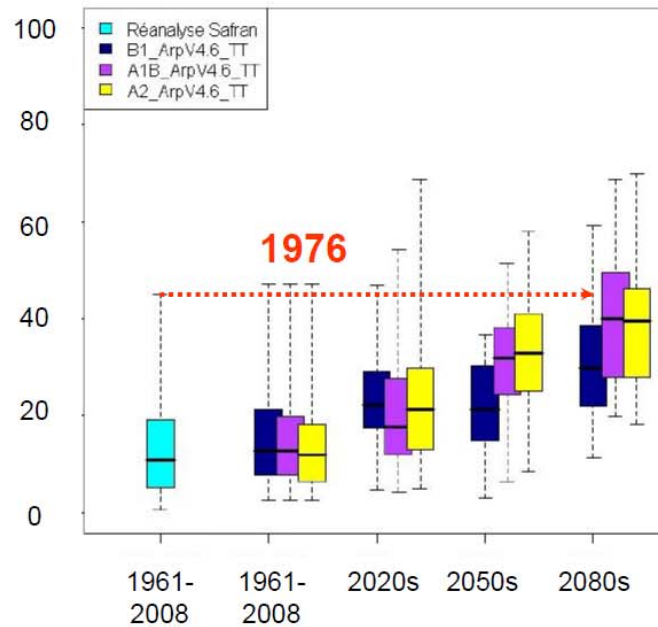


**Fig. 2.** TOE (year) of precipitation changes for RCP8.5 by growing season of wheat (A), soybean (B), rice (C), and maize (D). The red color scale is used for regions with a decrease in precipitation. The blue color scale is used for regions with an increase in precipitation. Gray indicates regions where a crop is grown, and all grid cells with harvested area by crop are shown. Stippling indicates climatological dry areas (below 50 mm·y<sup>-1</sup>).

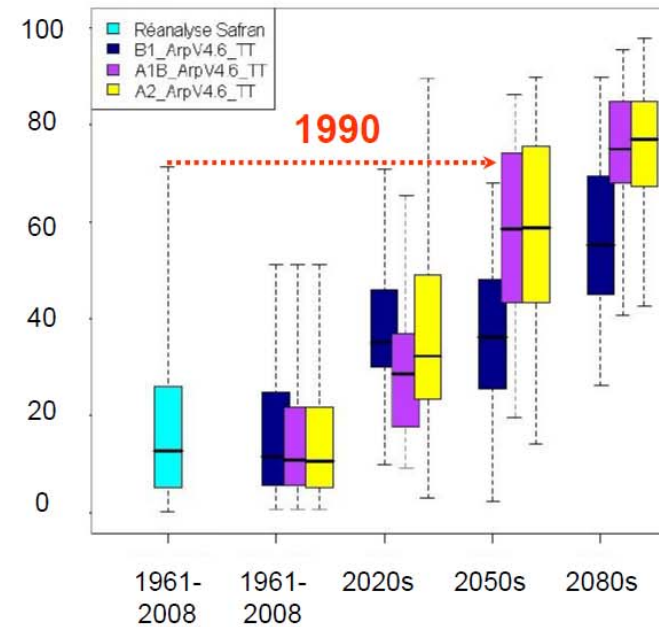
Rojas et al. (2019), *PNAS*

# Evolution de la surface exposée à la sécheresse en France

Sécheresse Météorologique  
(% de la superficie)



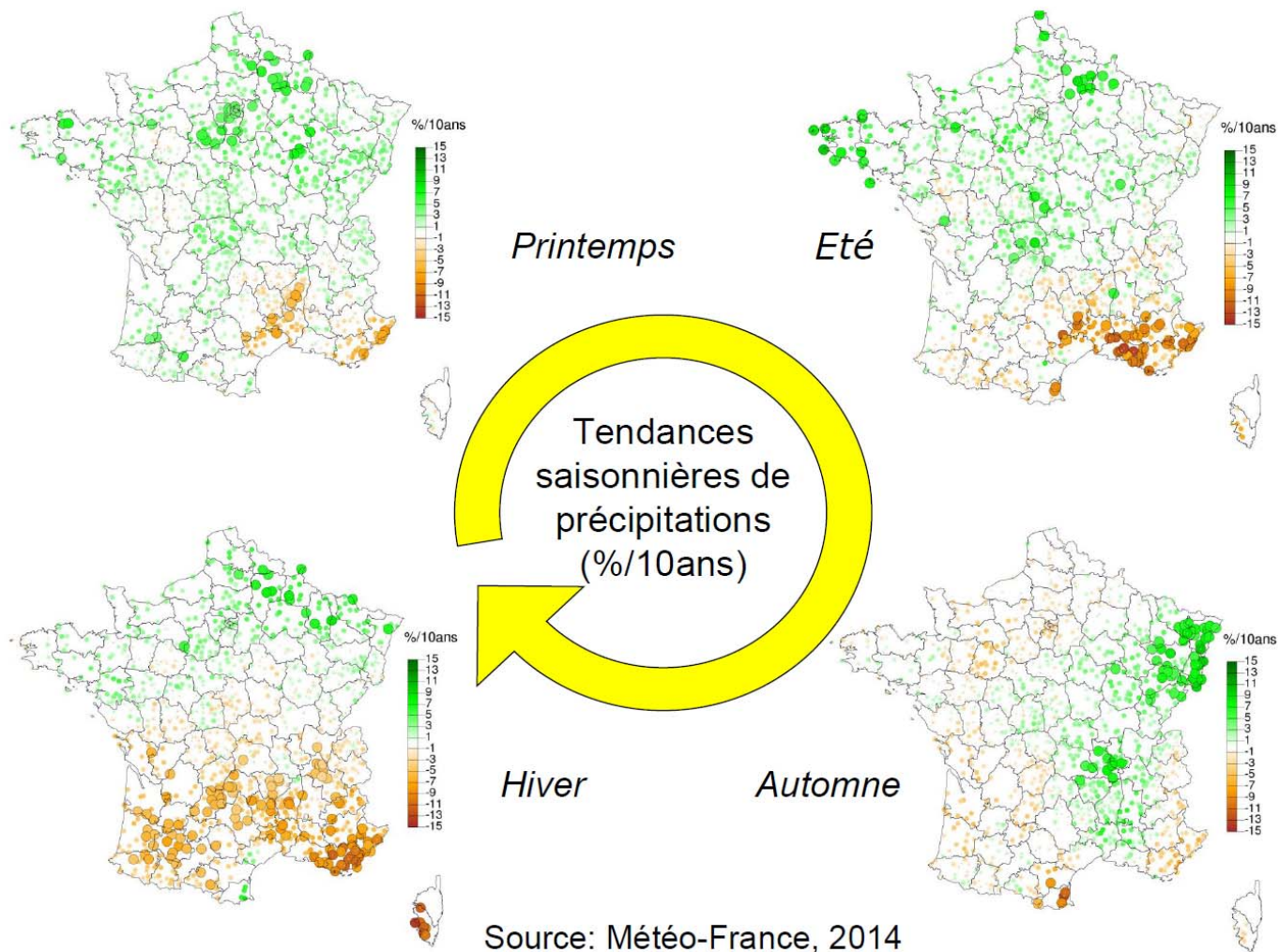
Sécheresse Agricole  
(% de la superficie)



SYMPOSIUM

Source: CLIMSEC, 2011

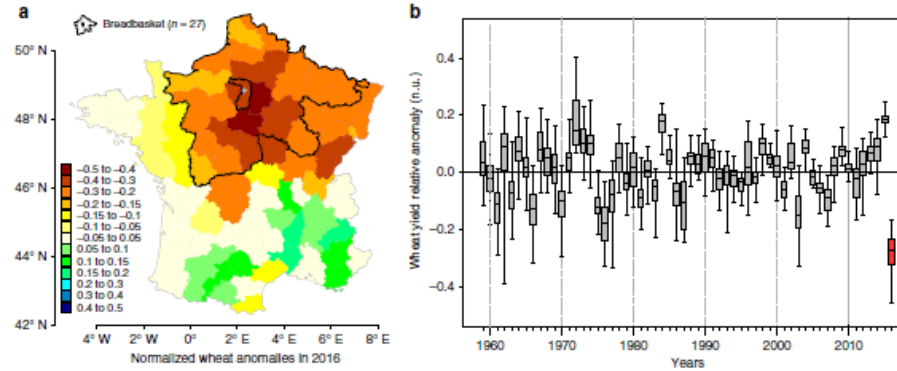
# Un changement déjà à l'œuvre : ex. précipitations saisonnières



# Des séquences climatiques récentes inédites

**2016**

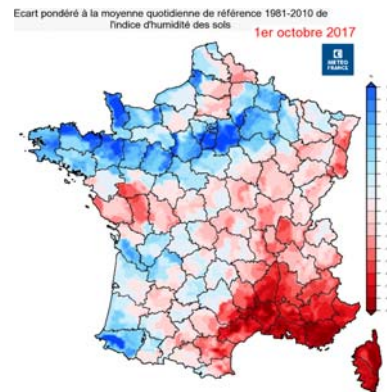
Hiver chaud +  
printemps  
excessivement pluvieux  
Une perte record  
pour le blé



Ben Ari et al. (2018), NC

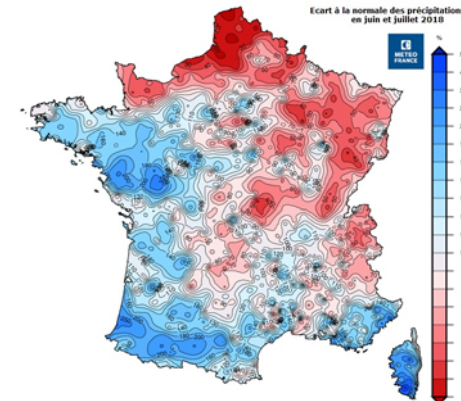
**2017**

Très forte  
sécheresse dans  
le Sud-Est



**2018**

Forte  
sécheresse  
dans le Nord  
et l'Est de la  
France



# GETARI - Generic Evaluation Tool of AgRoclimatic Indicators

TEMPERATURE	T_MIN T_MAX T_MEAN T_AMP COLDTMIN_DAYS COLDTMIN_FREQUENCY FROST_SPELL COLDTMEAN_DAYS COLDTMEAN_FREQUENCY HEAT_DAYS HEAT_FREQUENCY HEAT_SPELL	Average minimal temperature per phase Average maximal temperature per phase Average mean temperature per phase Average daily range temperature per phase Number of days when the minimal temperature < threshold per phase Frequency of days when the minimal temperature < threshold per phase Number of cold waves per phase (minimal temperature < threshold during x consecutive days) Number of days when the mean temperature < threshold per phase Frequency of days when the mean temperature < threshold per phase Number of days when the maximal temperature > threshold per phase Frequency of days when the maximal temperature > threshold per phase Number of heat waves per phase (maximal temperature > threshold during x consecutive days)
RADIATION	RADIATION_AVERAGE RADIATION_SUM	Average daily radiation per phase Sum of daily radiation per phase
WIND	HIGHWIND_DAYS HIGHWIND_FREQUENCY	Number of days with wind speed > threshold per phase Frequency of days with wind speed > threshold per phase
RAIN	RAIN_SUM RAINY_DAYS RAINY_FREQUENCY HEAVYRAIN_FREQUENCY HEAVYRAIN_DAYS WATER_DEFICIT DROUGHT_SPELL	Sum of rain per phase Number of rainy days per phase Frequency of days with rain per phase Frequency of days with heavy rain (rain > threshold) Number of days with heavy rain (rain > threshold) Sum of daily rain – daily reference evapotranspiration per phase Number of drought spell per phase (rain = 0 during x consecutive days)
SOIL WATER	WATERSTRESS_FREQUENCY WATERSTRESS_DAYS WETSOIL_FREQUENCY WETSOIL_DAYS	Frequency of days with soil water content < threshold per phase Number of days with soil water content < threshold per phase Frequency of days with soil water content > SWCfc (soil water content at field capacity) per phase Number of days with soil water content > SWCfc (soil water content at field capacity) per phase
COMPOSITE INDICATOR	DECISIONSOW_FREQUENCY	Frequency of days for which conditions on minimal temperature, mean temperature, soil water content and rain after sowing are respected during the sowing period

<https://w3.avignon.inra.fr/getari>



### 3. Impacts sur les cultures

*T°C, CO<sub>2</sub>, eau*



## 4 variables climatiques clés en écophysologie : température, rayonnement solaire, eau et CO<sub>2</sub>

- La température détermine la vitesse de développement et de croissance des feuilles et des racines + l'apparition des stades phénologiques (ex floraison, maturité)
- Le rayonnement solaire détermine la production de biomasse et l'évapo-transpiration
- Le CO<sub>2</sub> modifie l'efficacité de conversion du rayonnement en biomasse (pour les C3) et la fermeture des stomates (de toutes les plantes)
- L'eau contrôle :
  - L'évapotranspiration
  - la température des feuilles
  - La croissance des feuilles
  - L'ouverture des stomates

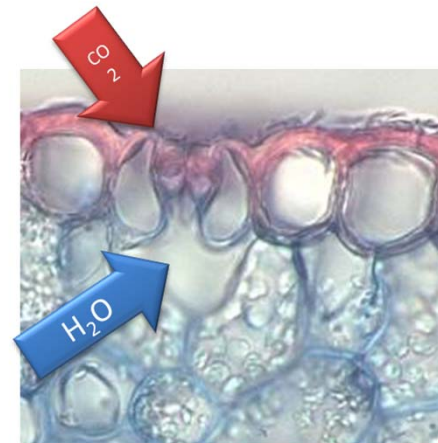
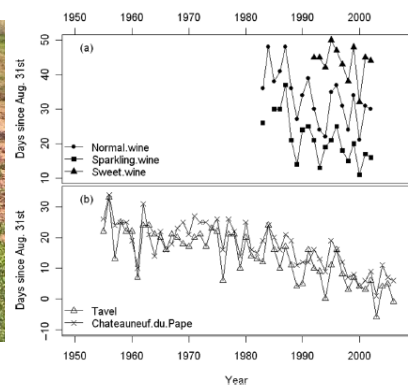


Photo S. Carré (INRA)

# Méthodes d'étude des impacts du CC en agriculture

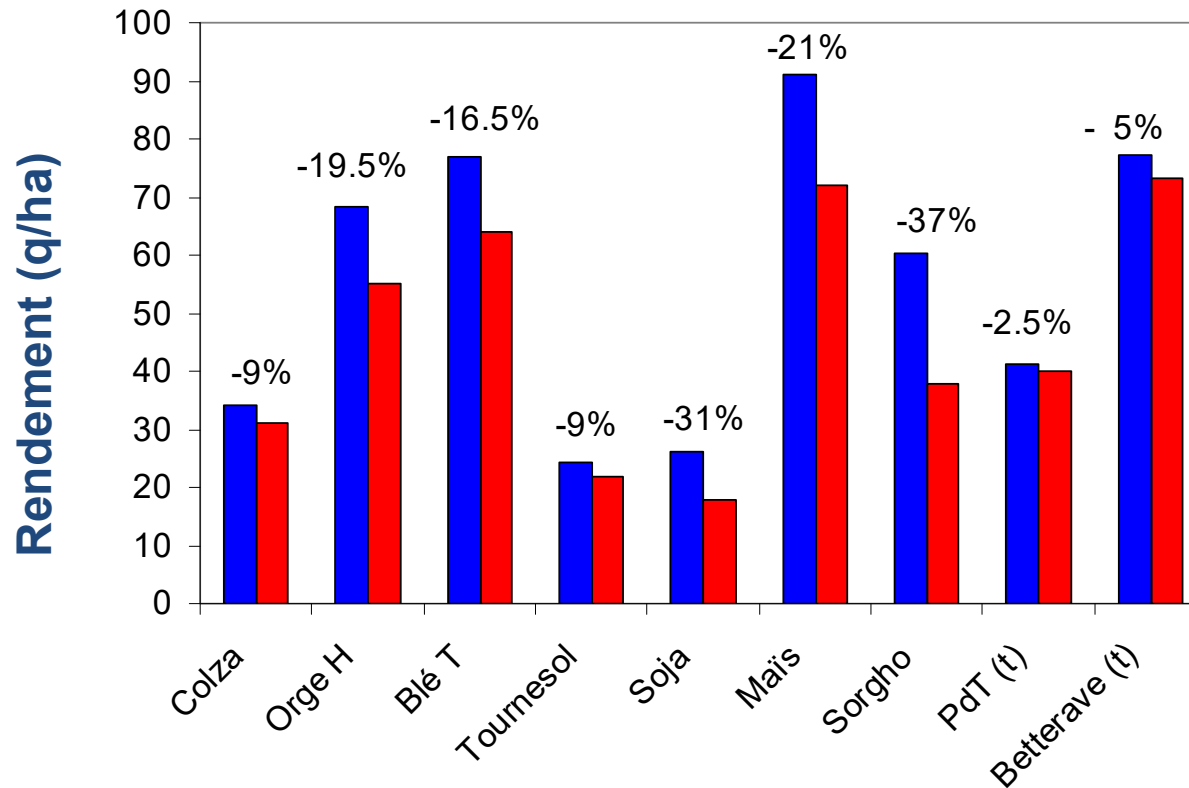
- Observation de séries chronologiques + analyse d'évènements exceptionnels (rendements, pratiques : dates de semis & récolte, relevés météo)
- Expérimentations en conditions contrôlées (CO<sub>2</sub> x T°C x Eau x N)
- Modélisation écophysiological ou statistique avec données de climats futurs





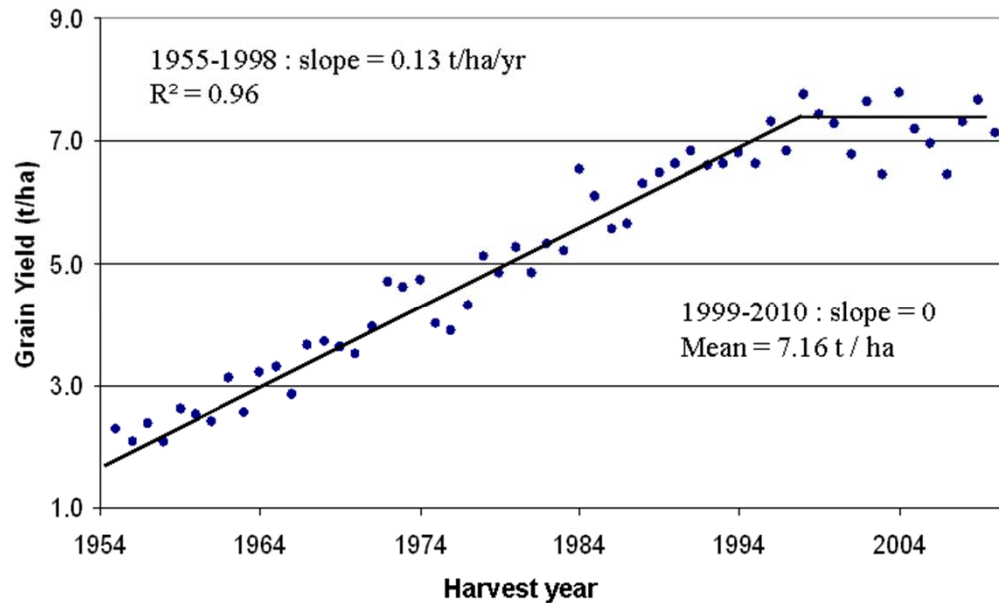
# Effet de la sécheresse 2003 sur le rendement des cultures

■ Rendement attendu      ■ Rendement réalisé

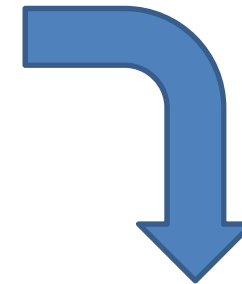


Debaeke et al. (2008)

# Le changement climatique, responsable de la stagnation des rendements du blé en Europe ?



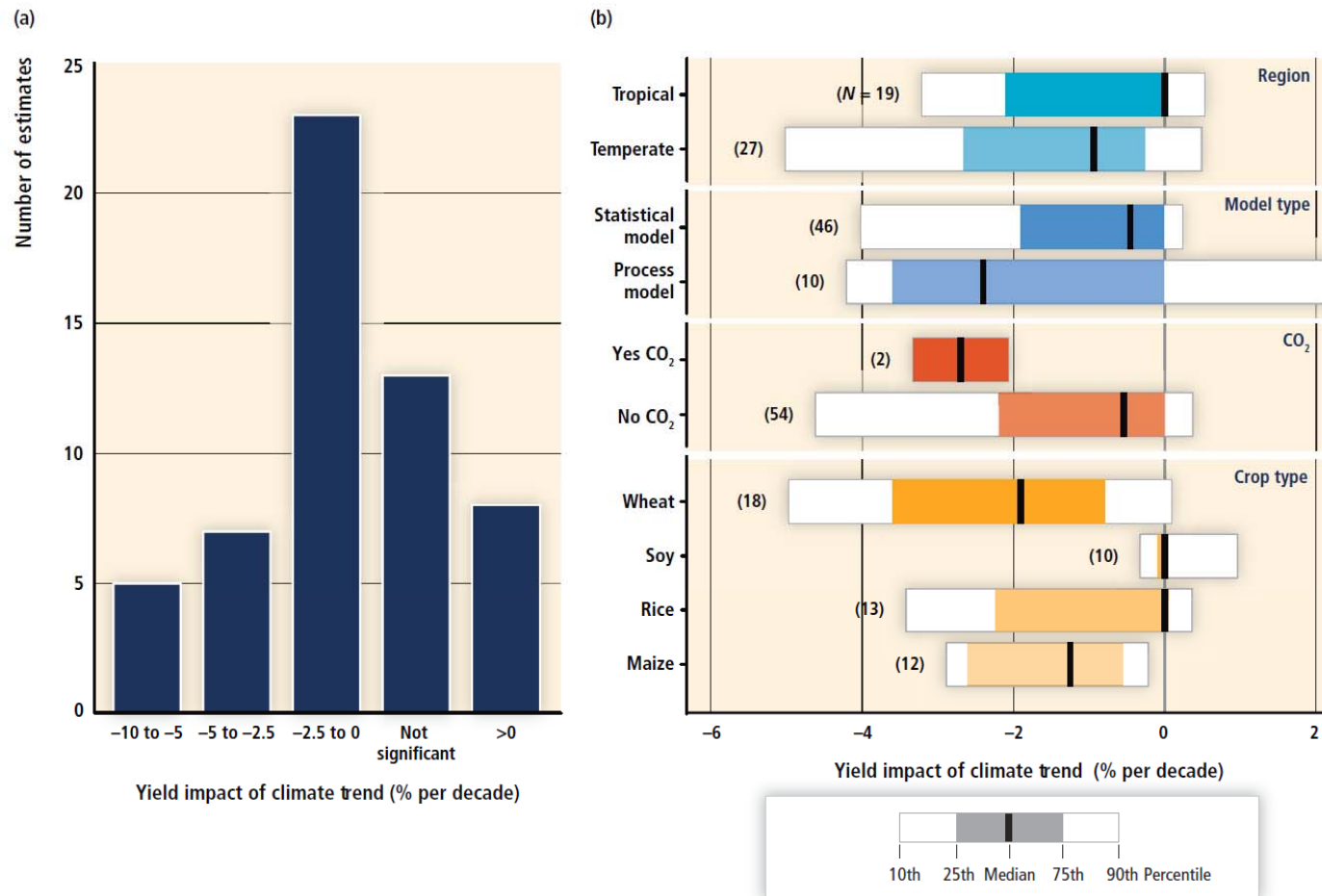
(Brisson et al 2010)



## Causes agronomiques et climatiques

- diminution des précédents favorables
- diminution des intrants (N)
- *accélération de la phénologie*
- *sécheresses printanières*
- *fortes températures estivales*

## Impacts observés sur les rendements (% par décennie) : revue de la littérature - Porter et al. (2014) – 5<sup>th</sup> IPCC



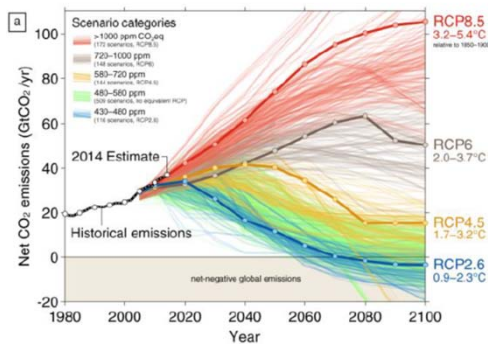
**Figure 7-2** | Summary of estimates of the impact of recent climate trends on yields for four major crops. Studies were taken from the peer-reviewed literature and used different methods (i.e., physiological process-based crop models or statistical models), spatial scales (stations, provinces, countries, or global), and time periods (median length of 29 years). Some included effects of positive carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) trends (Section 7.3.2.1.2) but most did not. (a) Number of estimates with different level of impact (% yield per decade). (b) Boxplot of estimates separated by temperate vs. tropical regions, modeling approach (process-based vs. statistical), whether CO<sub>2</sub> effects were included, and crop. Boxplots indicate the median (vertical line), 25th to 75th percentiles (colored box), and 10th to 90th percentiles (white box) for estimated impacts in each category, and numbers in parentheses indicate the number of estimates. Studies were for China (Tao et al., 2006, 2008a, 2012; Wang et al., 2008; You et al., 2009; Chen et al., 2010), India (Pathak et al., 2003; Auffhammer et al., 2012), USA (Kucharik and Serbin, 2008), Mexico (Lobell et al., 2005), France (Brisson et al., 2010; Licker et al., 2013), Scotland (Gregory and Marshall, 2012), Australia (Ludwig et al., 2009), Russia (Licker et al., 2013), and some studies for multiple countries or global aggregates (Lobell and Field, 2007; Welch et al., 2010; Lobell et al., 2011a). Values from all studies were converted to percentage yield change per decade. Each study received equal weighting as insufficient information was available to judge the uncertainties of each estimate.

# le climat change

[CO<sub>2</sub>]<sub>atm</sub> ↑

Température ↑

Pluies ↓



# quels impacts ?

Photosynthèse (potentiel de production) ↑

Stress thermique ↑

Durée du cycle ↓

Confort hydrique ↓

Besoin irrigation ↑

Interactions biotiques

- Maladies
- Ravageurs
- Pollinisateurs
- Microbiote du sol

# Effets du CC sur la croissance des prairies

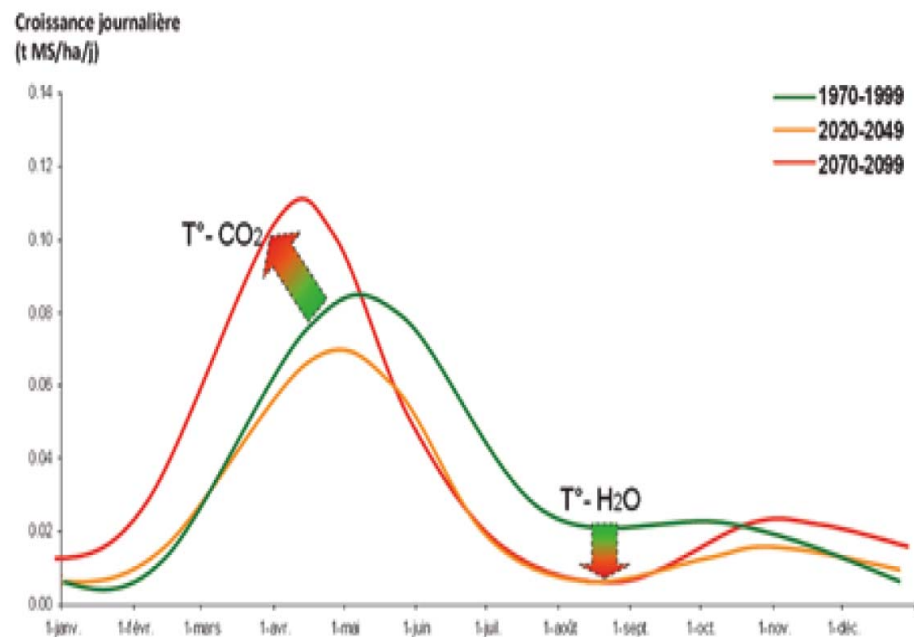
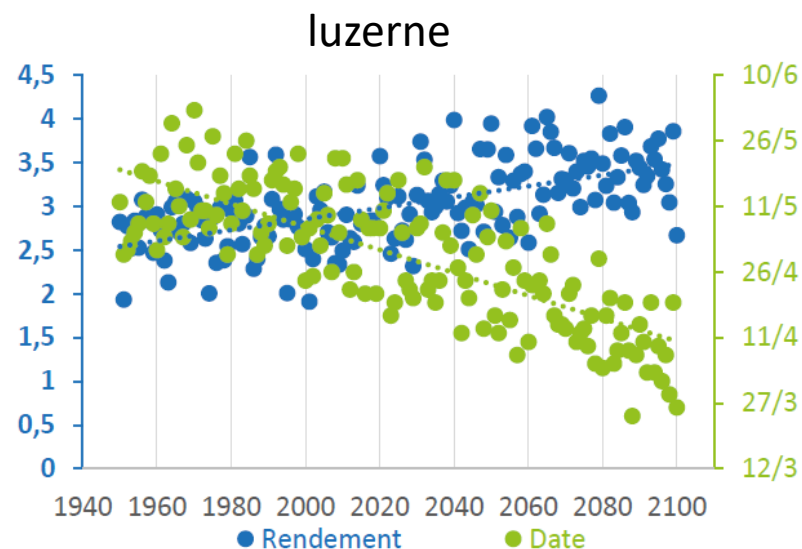


Figure 3 : évolution annuelle de la production journalière au cours de l'année – Exemple de la fétuque cultivée à Rennes sur sol superficiel, scénario A1B simulé avec STICS avec la méthode de régionalisation\* climatique QQ.

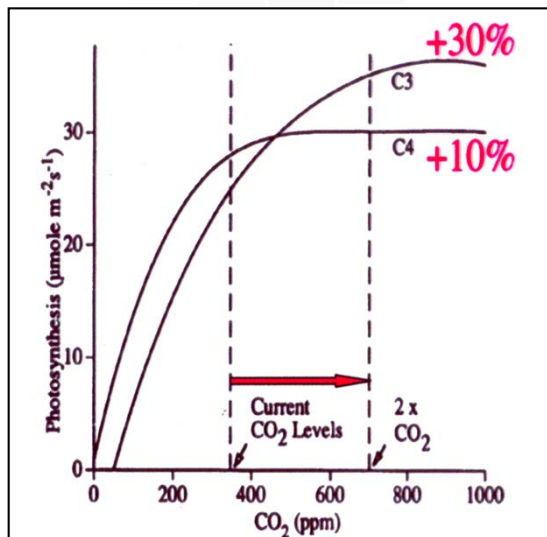
## Dates et rendements de la 1<sup>re</sup> coupe Moyenne sur boubène et terrefort



Durand et al. (2010), **Livre Vert Climator**

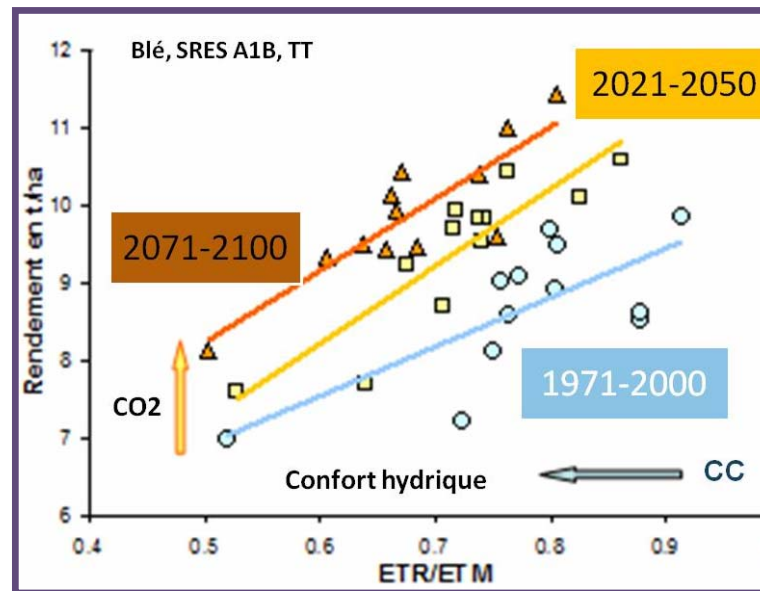
**Projet Climalait**  
(JC Moreau et al., Idele)

## Augmentation du potentiel de production primaire variable selon les espèces



## Réduction de la durée du cycle cultural

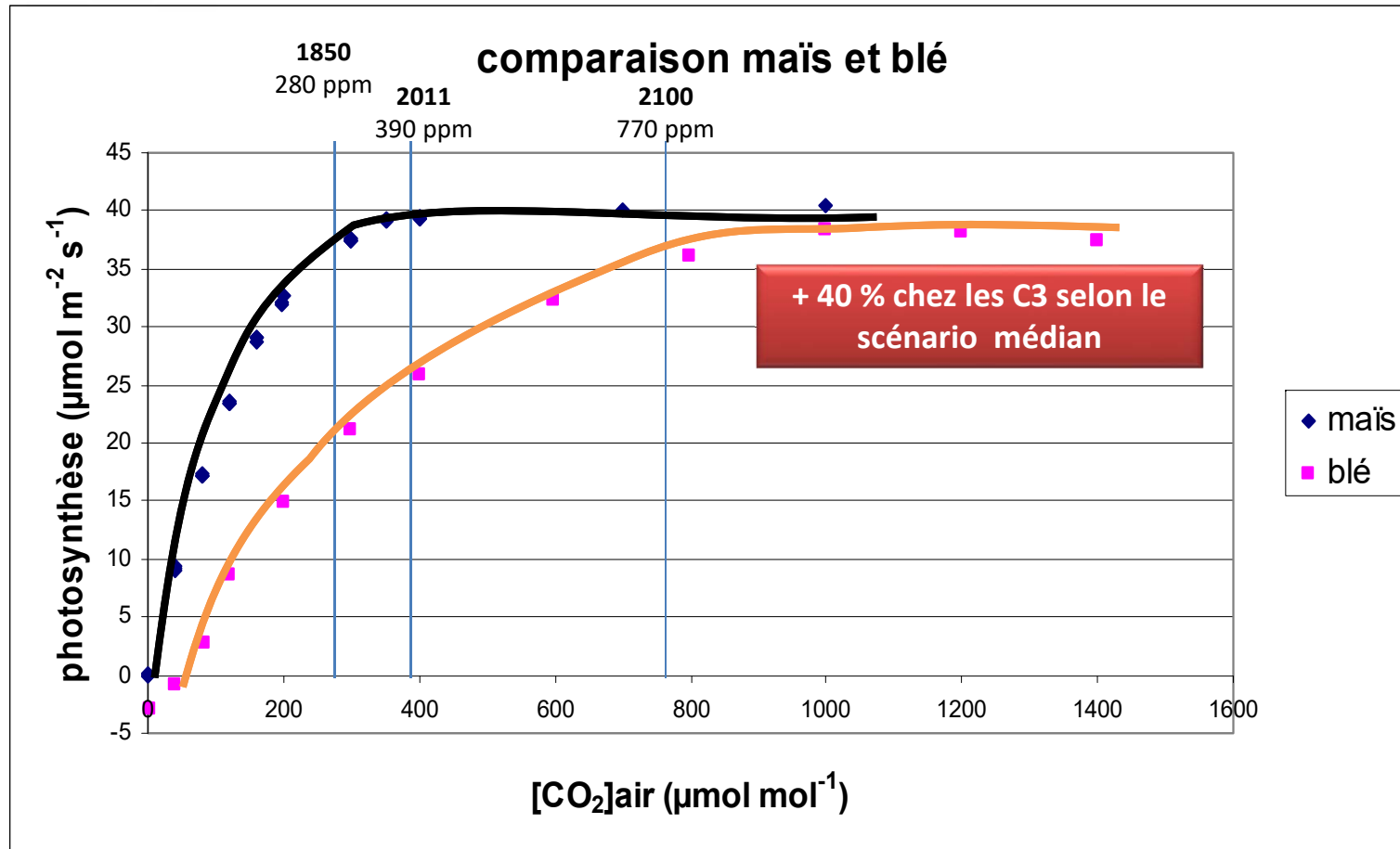
## Diminution du confort hydrique des cultures



Culture	Avancement Floraison en Jour/°C	Avancement Récolte en Jour/°C
Blé	5	6
Maïs	5	15
Tournesol	4	9
Vigne	8	10

CLIMAT OR

# Effet de la concentration en CO<sub>2</sub> sur la photosynthèse du blé (C3) et du maïs (C4)





Contents lists available at SciVerse ScienceDirect

# European Journal of Agronomy

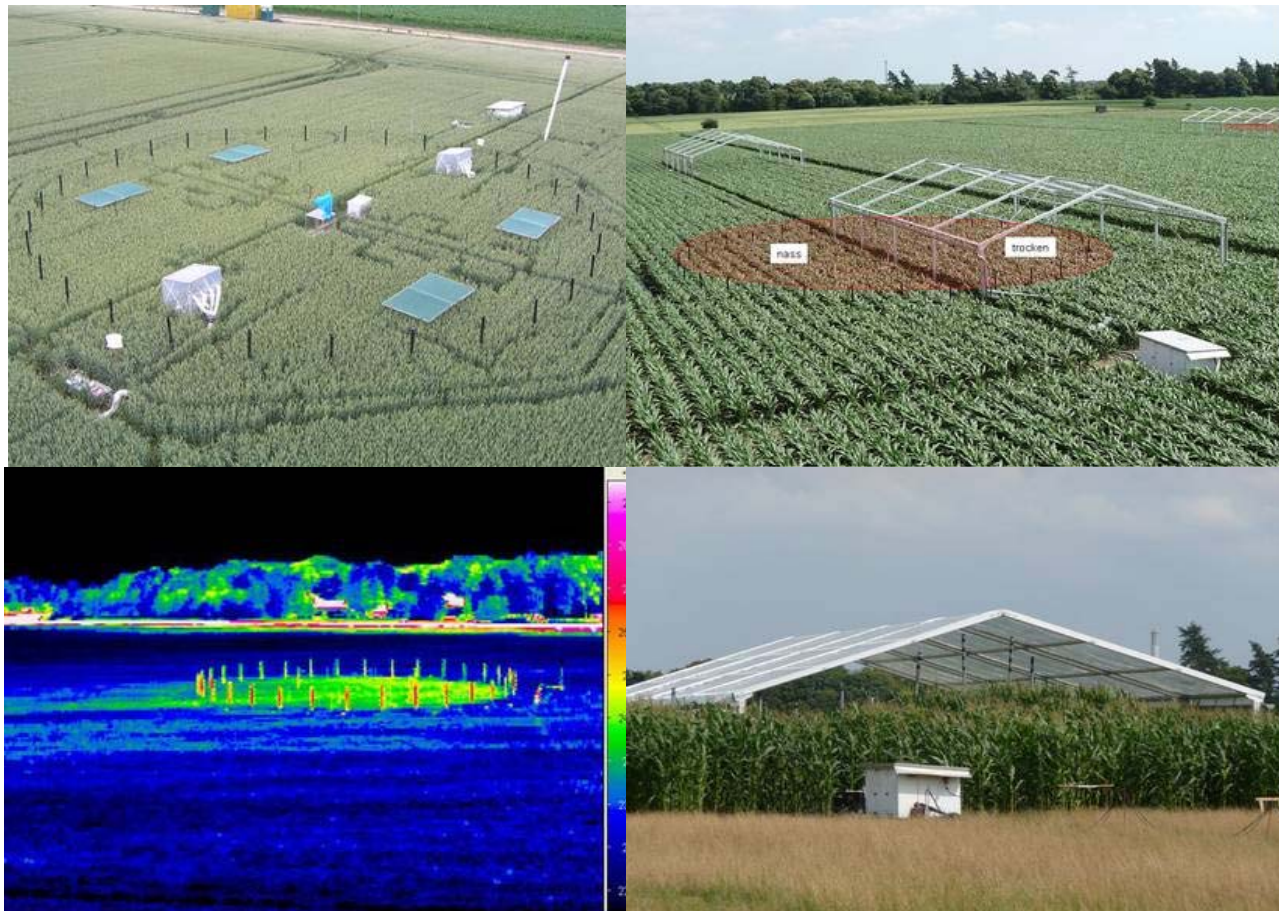
journal homepage: [www.elsevier.com/locate/eja](http://www.elsevier.com/locate/eja)



## Interactive effects of free-air CO<sub>2</sub> enrichment and drought stress on maize growth

Remy Manderscheid\*, Martin Erbs, Hans-Joachim Weigel

*Institute of Biodiversity, Johann Heinrich von Thunen-Institute, Federal Research Institute for Rural Areas, Forestry and Fisheries, Bundesallee 50, D-38116 Braunschweig, Germany*





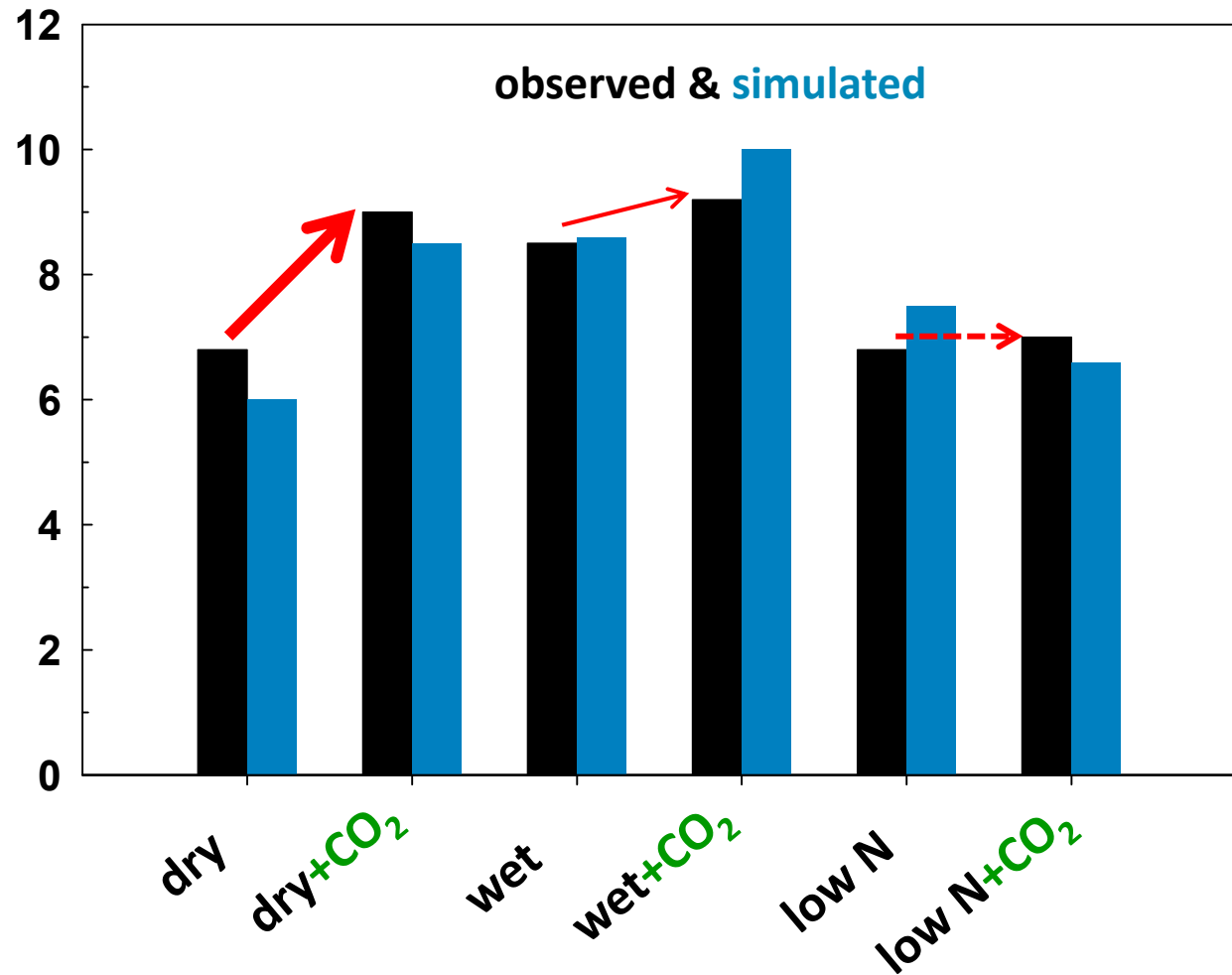
# Observed & simulated wheat grain yield – CO<sub>2</sub> effect

*Asseng et al. 2004, FCR*

*Observed data after  
Kimball et al. 1995, GCB*



Grain Yield (t/ha)



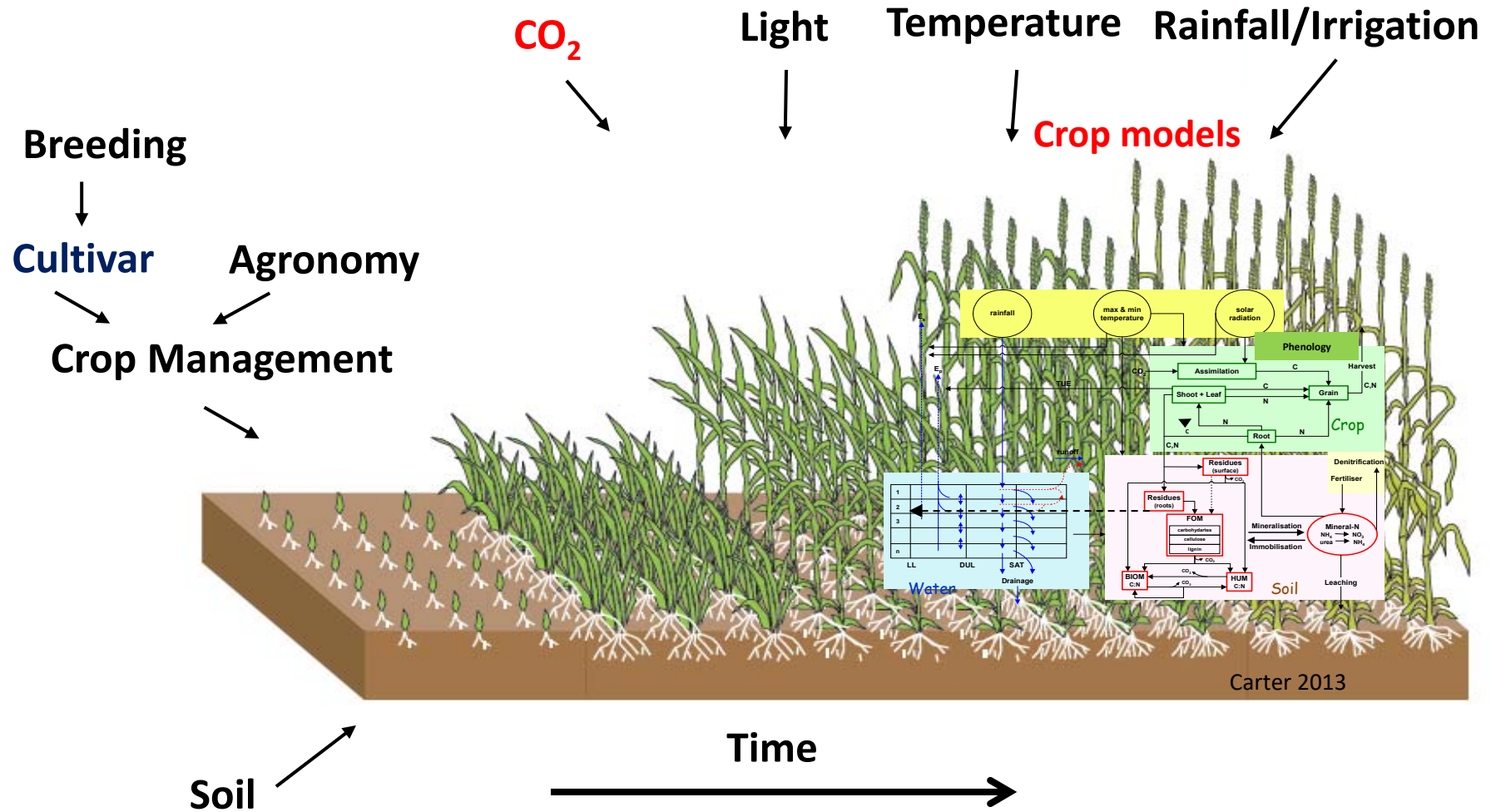
## Ce que l'on sait de l'effet du CO<sub>2</sub> sur les cultures

- Réduction de **10 %** en moyenne de l'évapotranspiration des plantes en C<sub>3</sub> et C<sub>4</sub> (FACE)
- Augmentation en moyenne de 0.7°C de la température de surface des cultures
- Le rendement et la biomasse des cultures en C<sub>3</sub> est augmenté : **+18 %** (FACE)
- Ce n'est pas le cas pour les C<sub>4</sub> sauf en condition de contrainte hydrique
- Une faible disponibilité en azote diminue la réponse au CO<sub>2</sub>



Arizona FACE Project  
Free Air CO<sub>2</sub> Enrichment

# Modeling (Crop) Cropping Systems



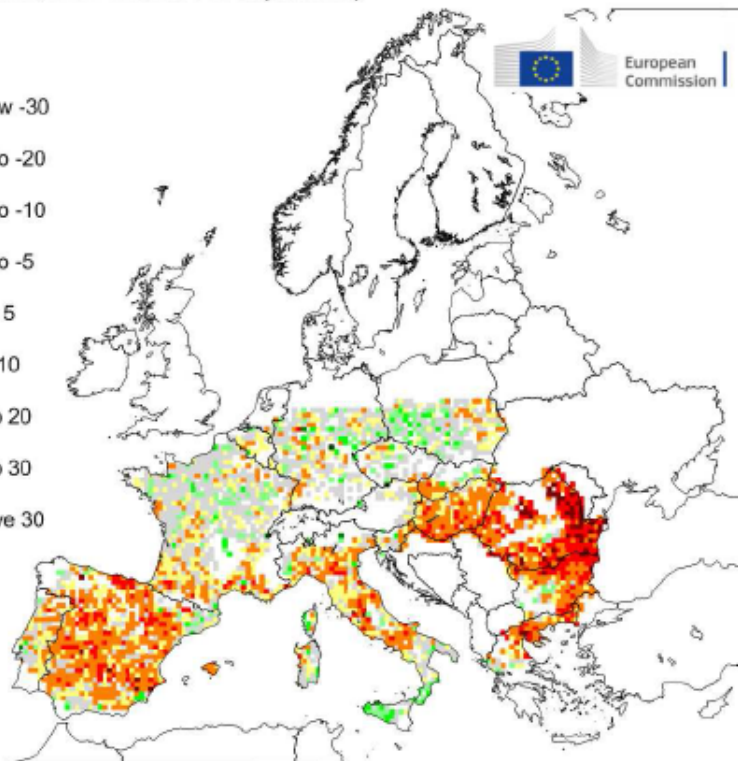
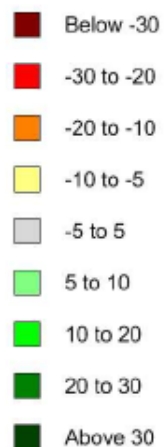
# Impacts sur le rendement du tournesol (2030) selon le scénario climatique

« COLD A1B »

« WARM A1B »

Percent difference of water-limited yield for sunflower  
A1B scenario, ECHAM5, 2030-2000 (baseline)

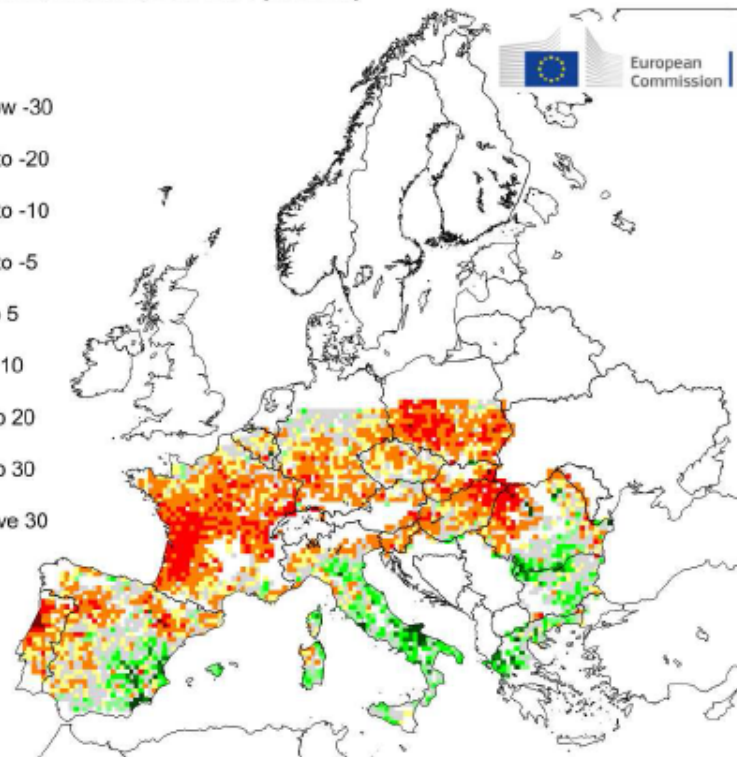
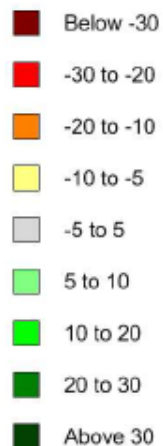
Units: %



© European Union, 2012. Source: Joint Research Centre

Percent difference of water-limited yield for sunflower  
A1B scenario, HadCM3, 2030-2000 (baseline)

Units: %

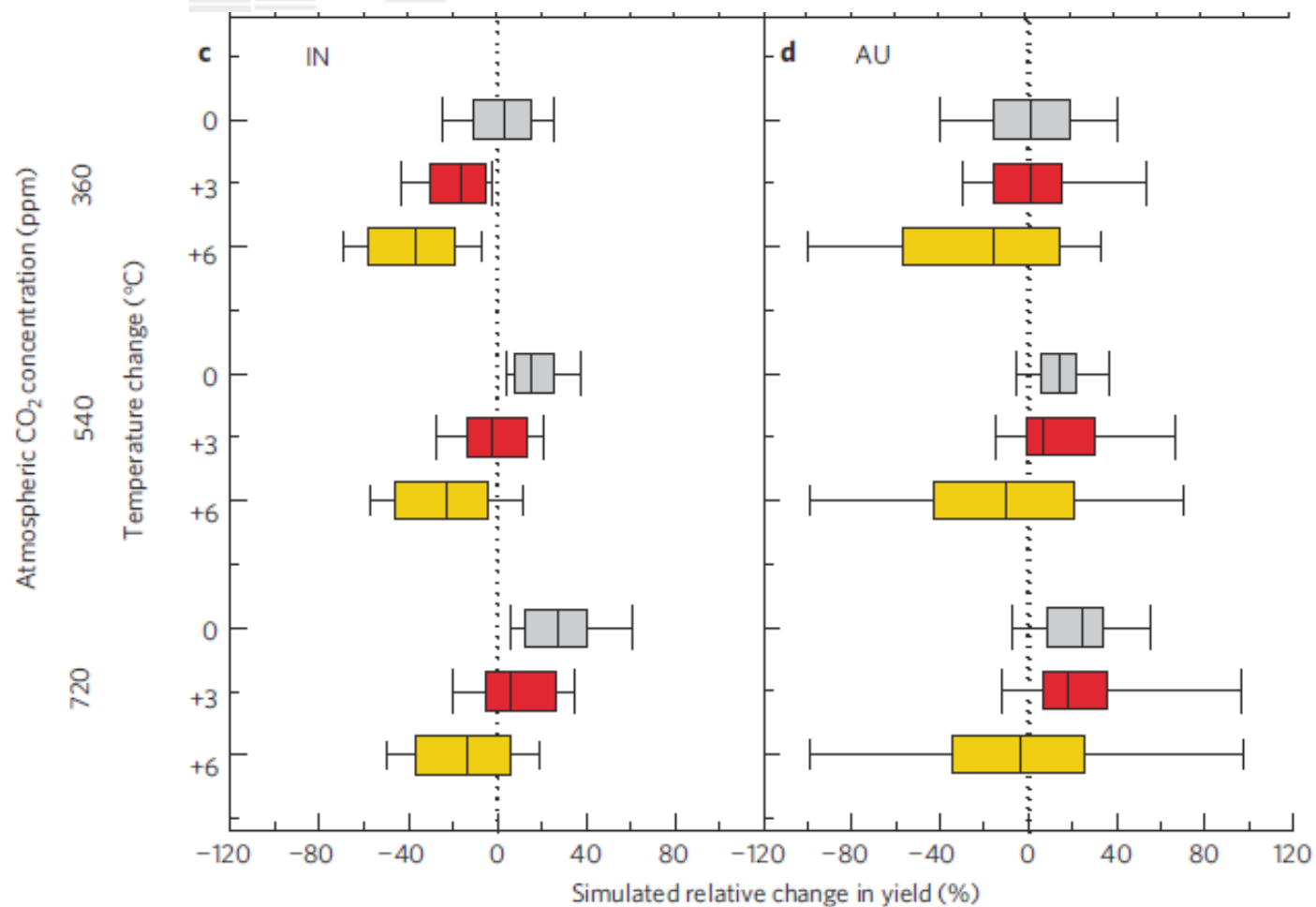


© European Union, 2012. Source: Joint Research Centre

Donatelli et al., 2012

Pays-Bas

Australie



## 27 modèles de blé

Asseng et al. (2013) *Nature Climate Change*

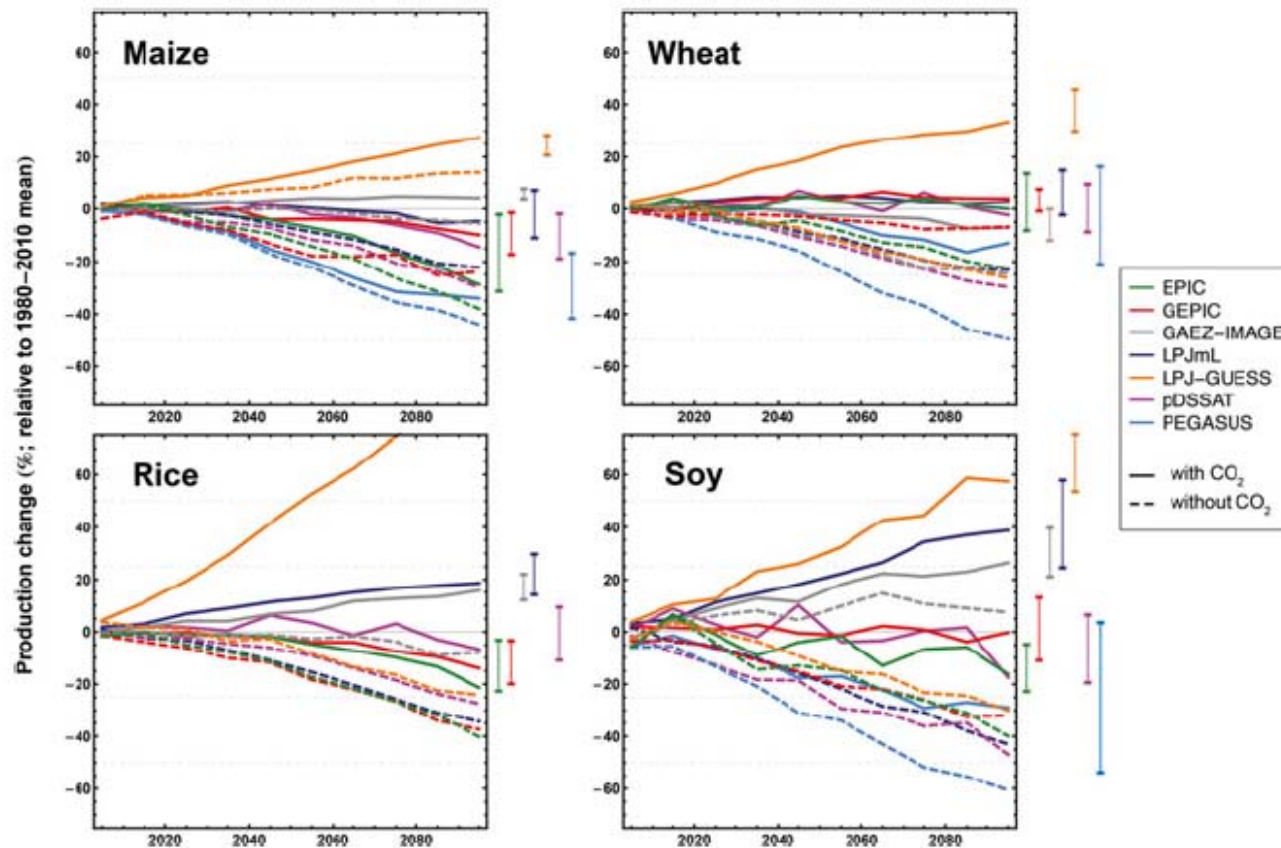


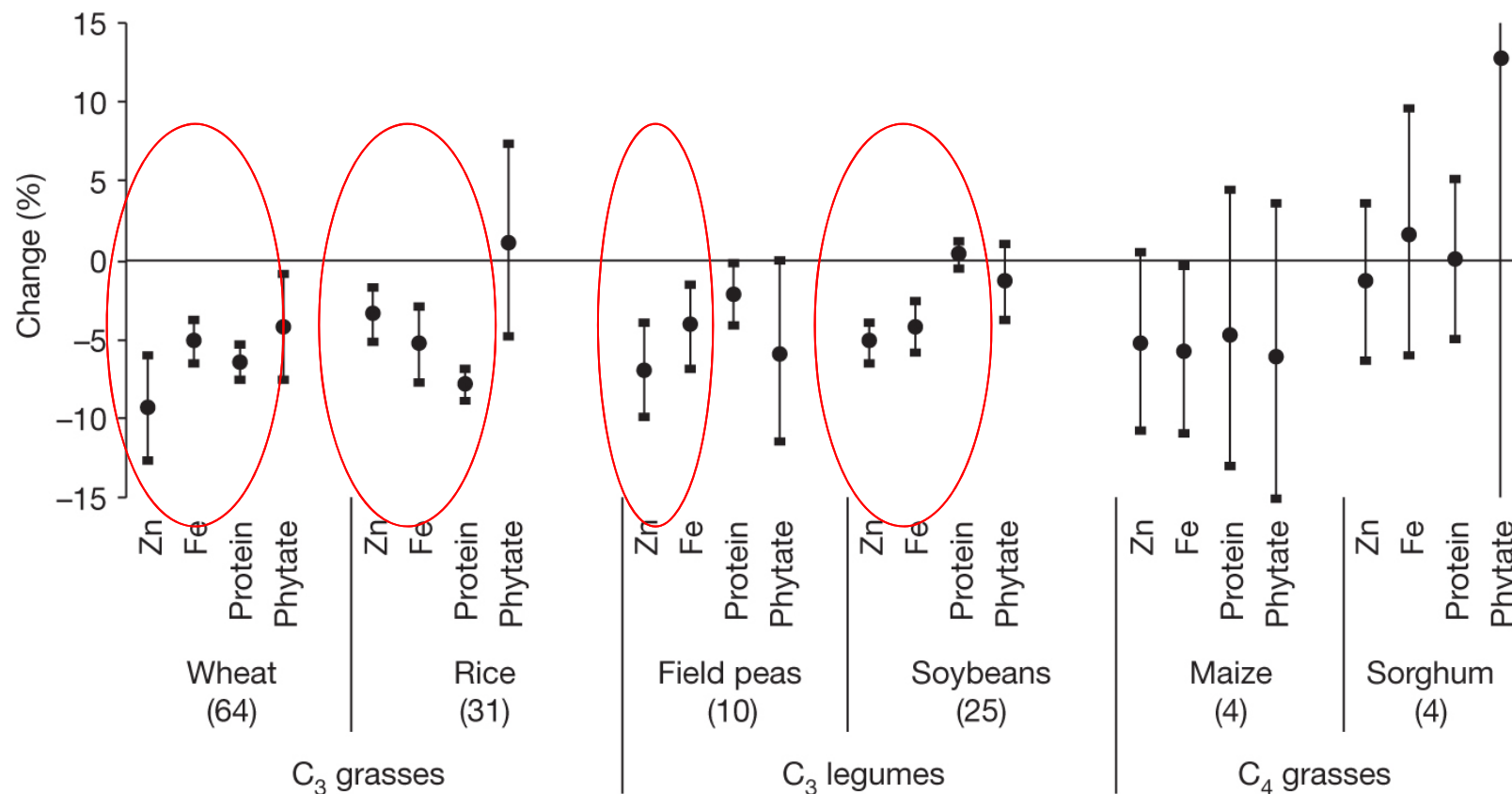
Fig. 4. Relative change (%) in RCP8.5 decadal mean production for each GCM (based on current agricultural lands and irrigation distribution) from ensemble median for all GCM combinations with (solid) and without (dashed) CO<sub>2</sub> effects for maize, wheat, rice, and soy; bars show range of all GCM combinations with CO<sub>2</sub> effects. GEPIC, GAEZ-IMAGE, and LPJ-GUESS only contributed one GCM without CO<sub>2</sub> effects.

Comparaison des réponses (production) de 7 modèles de culture spatialisés avec ou sans prise en compte du CO<sub>2</sub>atm

Rosenzweig et al (2014), *PNAS*

# Au delà des rendements: les effets sur la qualité

Méta-analyse sur les effets d'une augmentation de la concentration en CO<sub>2</sub> atmosphérique sur les teneurs en micronutriments + protéines



Myers *et al.* Nature, 2014

## De nombreuses INCERTITUDES qui expliquent les effets contrastés sur la croissance et le rendement des cultures

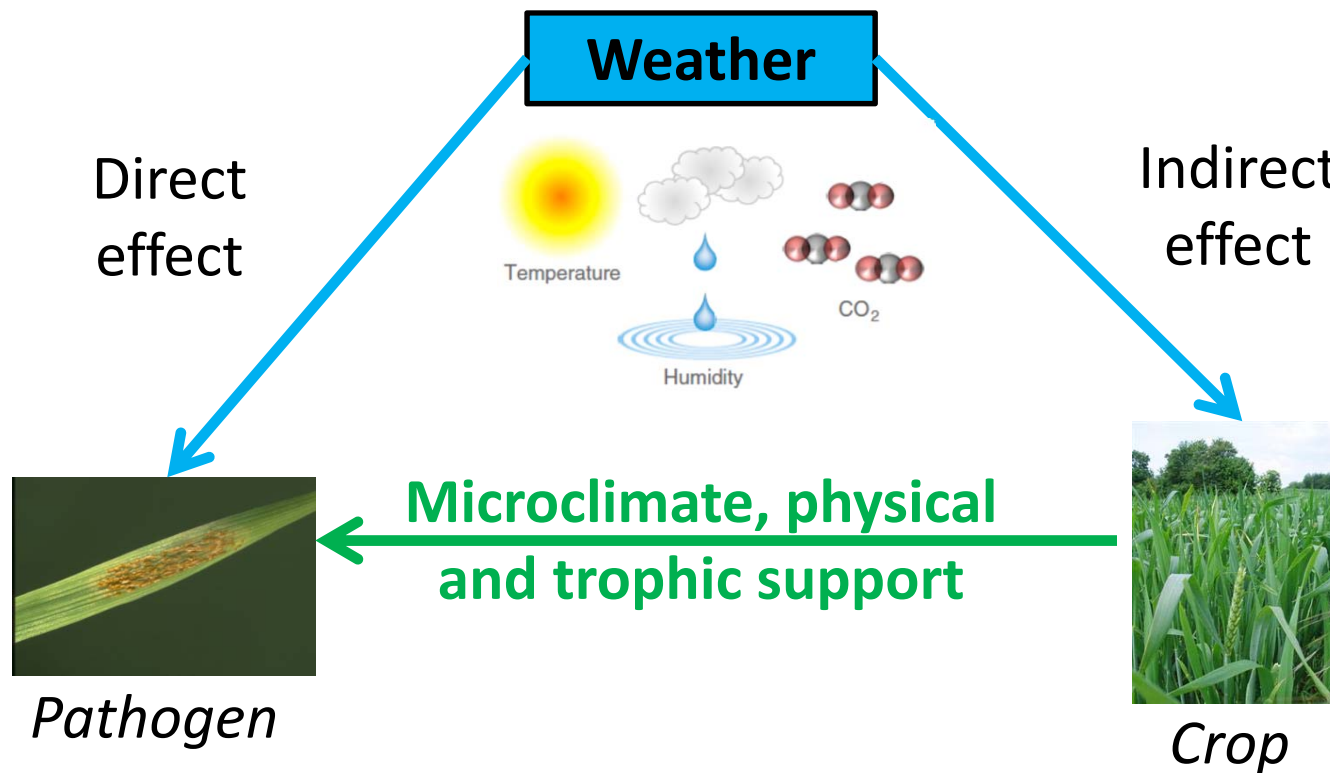
- 1) *Scénarios de forçage climatique (émissions de GES en fonction des politiques d'atténuation mises en œuvre) - RCPs*
- 2) *Modèles climatiques globaux (GCM)*
- 3) *Méthodes de régionalisation (descente d'échelles) – RCM*
- 4) Résultats variables selon l'horizon temporel considéré et les zones géographiques (pas toujours bien précisés)
- 5) Modèles de prévision des impacts (statistiques ou mécanistes ; incertitudes sur le paramétrage des modèles ; erreurs liées à la structure/complétude des modèles ; prise en compte ou non du CO2)
- 6) Non prise en compte des risques liés aux bioagresseurs émergents
- 7) Prise en compte ou non, plus ou moins explicite, d'adaptations incrémentales (variété, date de semis, irrigation...)



# What impacts on crop pests and diseases?

Will climate change make a difference?

Disentangling the processes... Direct and indirect effects on fungi

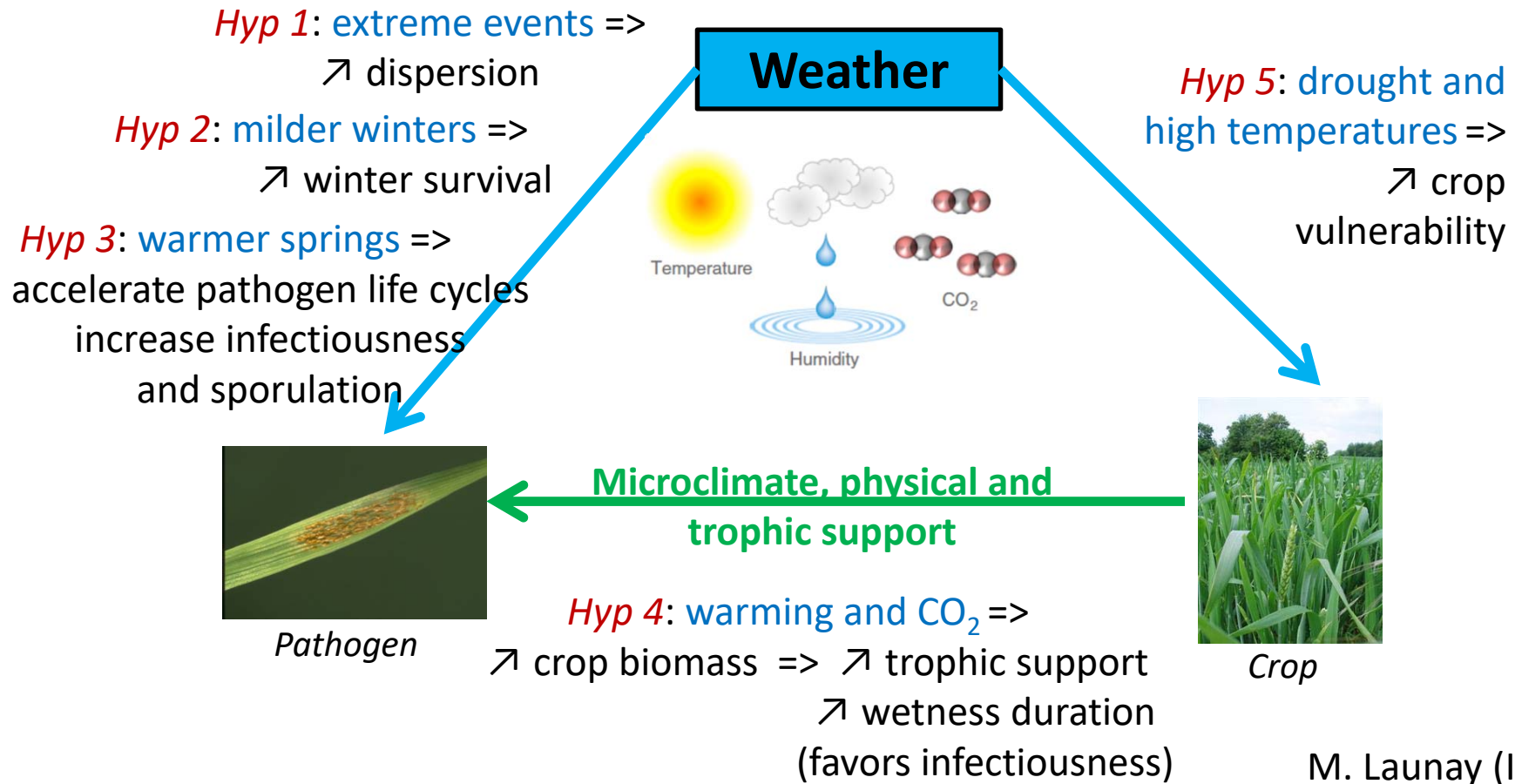


M. Launay (INRA)

# What impacts on crop pests and diseases?

## Will climate change make a difference?

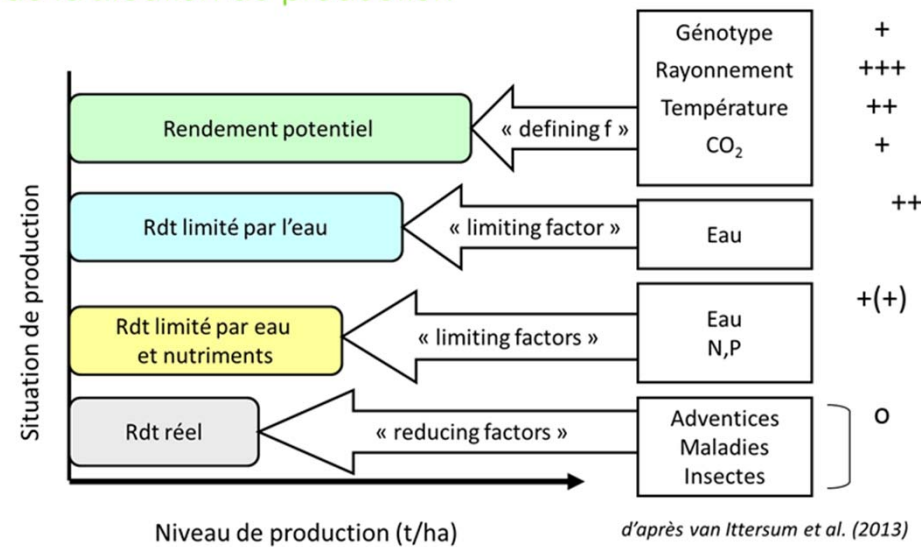
Disentangling the processes... Assumptions about climate change effects.



# Pourquoi il est si difficile de prévoir les effets du CC sur les bioagresseurs ?

- ❑ Effets directs et indirects
- ❑ Possibilité d'invasions biologiques non prévues
- ❑ Grande diversité de bioagresseurs en jeu
- ❑ Evolution de la structure génétique des populations (adaptation...)

Capacité des modèles à prévoir le rendement en fonction de la situation de production

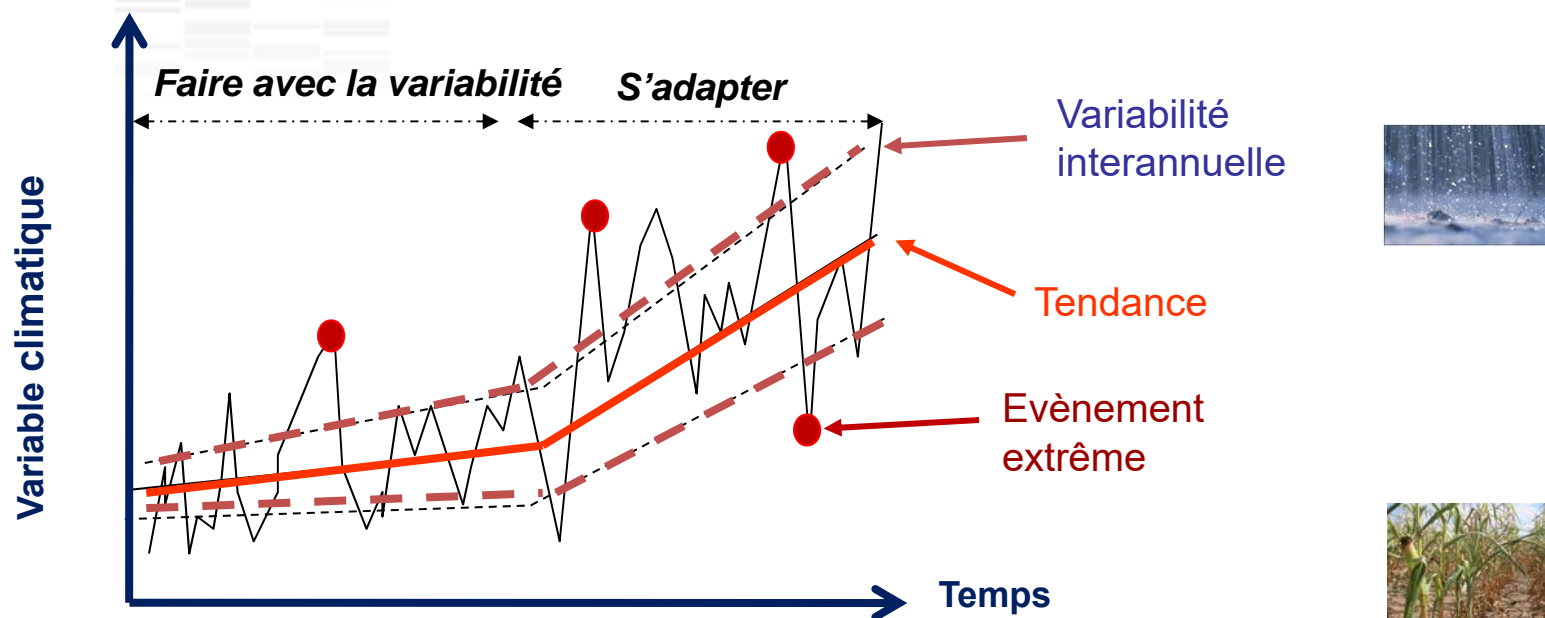




## 4. Adaptation au changement climatique

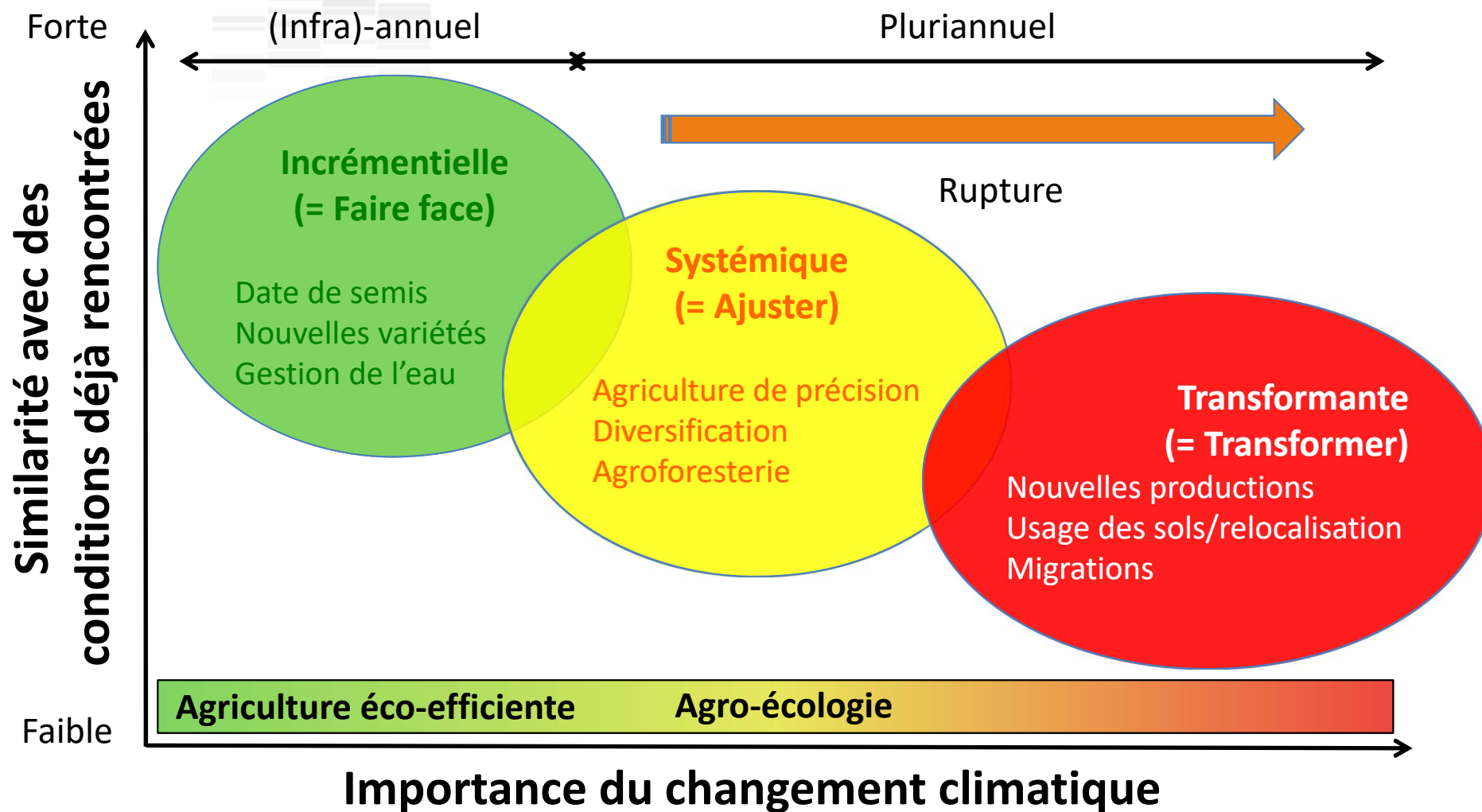


## Adapter l'agriculture au CC → 3 contraintes



- ✓ *S'adapter à une tendance de fond*
- ✓ *Réduire la vulnérabilité à la variabilité interannuelle probablement croissante*
- ✓ *Résister à des événements extrêmes croissants (stress hydrique, stress thermique, fortes pluies, etc.)*

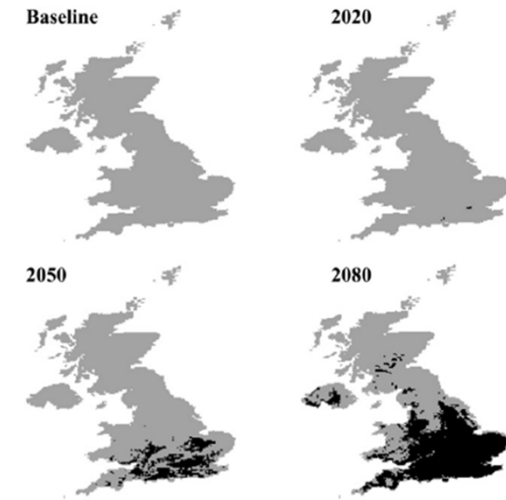
# Nature et formes de l'adaptation en agriculture



(d'après Thornton, 2014)

# Valoriser les opportunités

- Effet fertilisant de l'augmentation du CO<sub>2</sub>
- Modification des aires de culture
- Réduction de l'impact de certaines maladies
- Augmentation du nombre de jours disponibles
- Fenêtres pour les doubles cultures

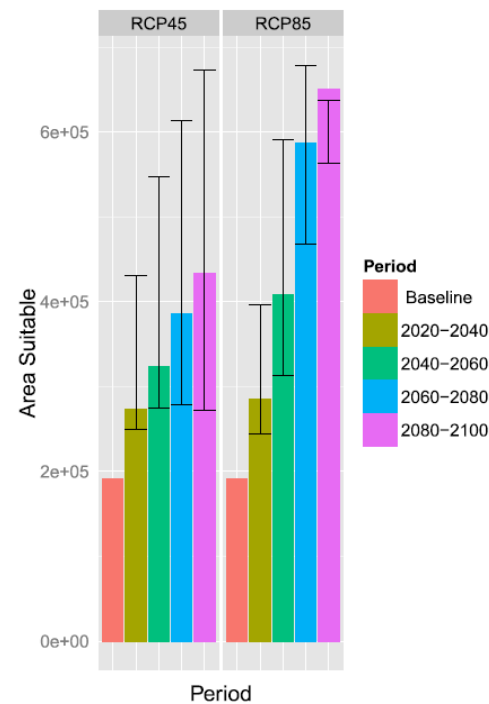


Bellarby *et al.* (2010), B&B



[CO<sub>2</sub>] actuel

[CO<sub>2</sub>] x 2



**Blé-soja (culture  
dérobée) aux USA**  
Seifert *et al* (2015)

# Les options d'adaptation

## ❖ Nouvelles cibles pour la sélection variétale



### Résistance à la sécheresse

#### Evitement

- Profondeur d'enracinement
- Rapport tige/racines
- Mycorhizes

**Optimisation de l'acquisition de l'eau** compatible avec des rendements élevés quelles que soient les conditions hydrologiques

- Fermeture des stomates
- Enroulement des feuilles
- Structure épiderme foliaire

**Efficacité d'utilisation de l'eau élevée** car usage conservatif de l'eau. Rendement limité dans certaines conditions hydrologiques

#### Esquive

- Précocité
- Plasticité du développement
- Remobilisation des assimilats

**Raccourcissement de la saison de croissance**  
Croissances potentiellement limitée en absence de stress

#### Tolérance

- Ajustement osmotique
- Solutés protecteurs
- Enzymes tolérantes à la dessiccation

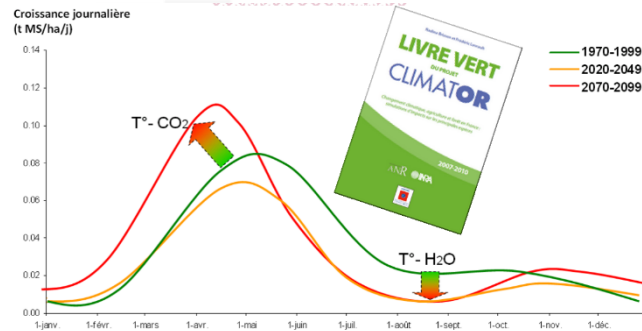
**Mécanismes de survie** des espèces xérophylls. Intérêt limité pour les plantes cultivées



(d'après Bodner *et al.*, 2015)

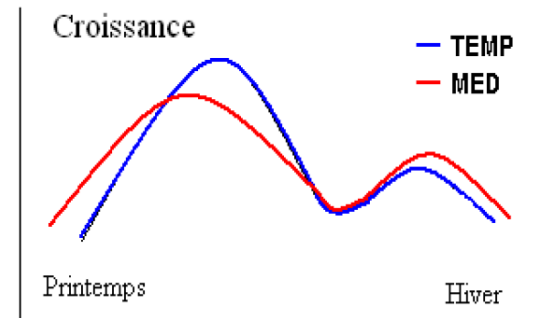


# CLIMAGIE Adapter les prairies semées au changement climatique par l'amélioration génétique et l'intensification écologique

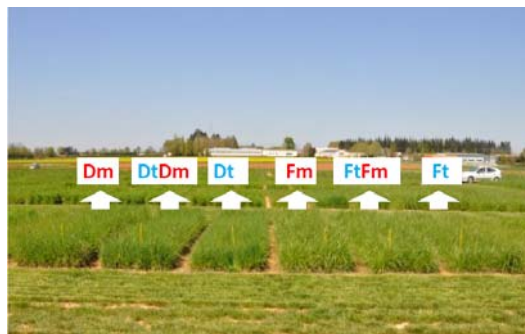


Production quotidienne de fourrage d'une prairie de fétuque en Bretagne, aujourd'hui, vers 2050 et 2100 simulée avec le modèle STICS prairie (Durand et al 2010, in Brisson et Levrault)

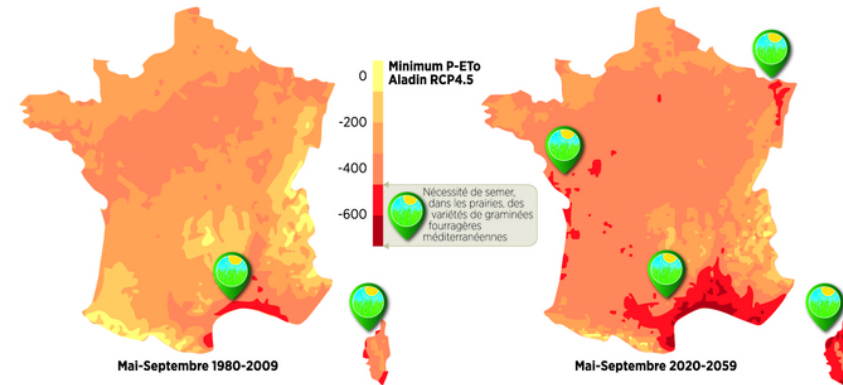
Répartition saisonnière du potentiel de croissance des types tempérés et méditerranéens



Les mélanges de variétés méditerranéennes/tempérées: plus de régularité ?



Les variétés semées devraient évoluer avec le changement climatique

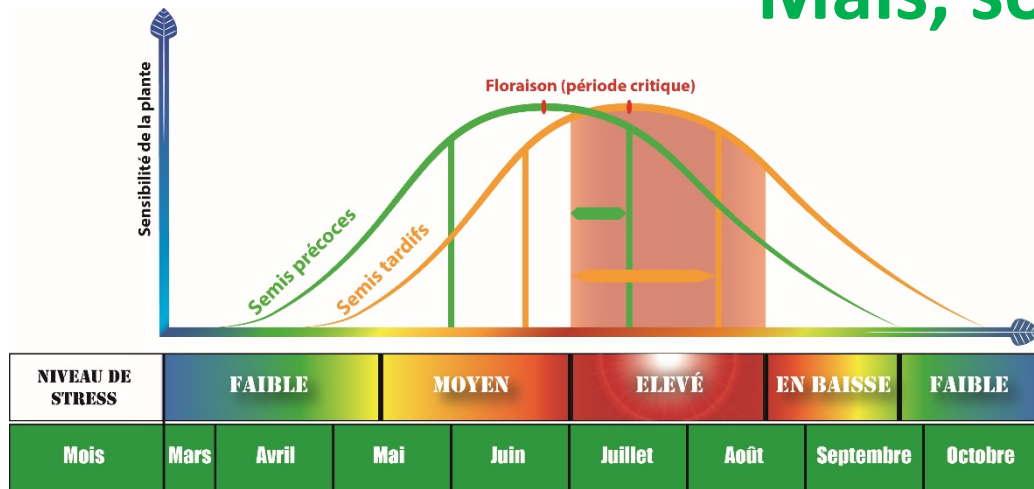


Sélection de dactyle à dormance estivale pour les zones Méditerranéennes

# Les options d'adaptation

- ❖ Adaptation des itinéraires techniques
  - Esquive : Décalage du semis (esquive stress thermique, économie d'eau, ...)

## Maïs, soja



(<http://www.semencesdefrance.com/dossier/mais-methode-desquive/>)



- Atténuation : Irrigation (supplémentaire ou déficitaire)
- Conservation : Travail du sol simplifié (avec mulch)

# Besoins en irrigation simulés avec ou sans prise en compte du rôle du CO2 dans la transpiration

4038 G. ZHAO *et al.*

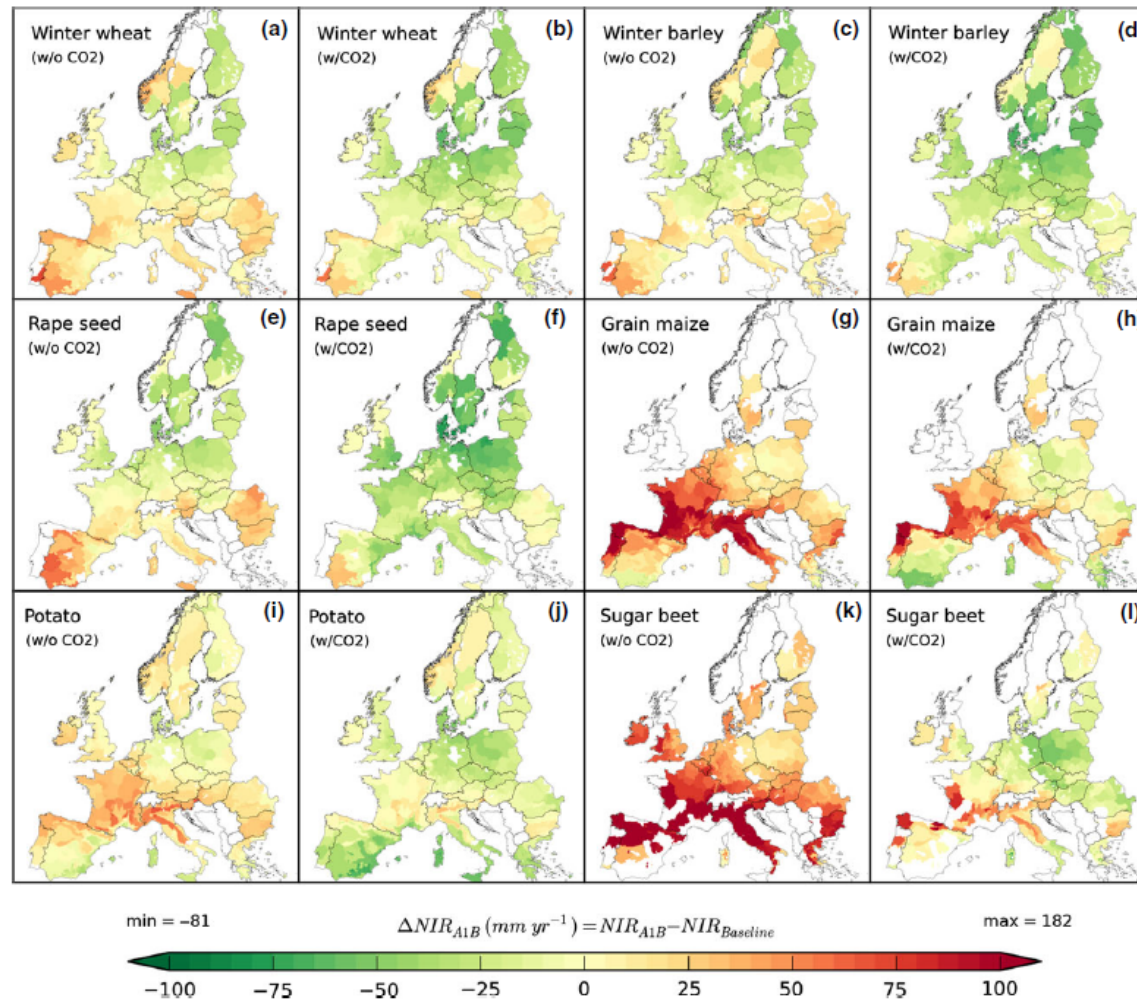


Fig. 6 Simulated impacts of climate change on the net irrigation requirement ( $\Delta\text{NIR}$ ) of six crops in the SRES A1B scenario across simulation units in EU25. The six crops are winter wheat (a and b), winter barley (c and d), rapeseed (e and f), grain maize (g and h), potato (i and j), and sugar beet (k and l). Simulations are performed without considering CO2 effects on crop growth and transpiration considering (a, c, e, g, i, and k) and with CO2 effects considered (b, d, f, h, j, and l).

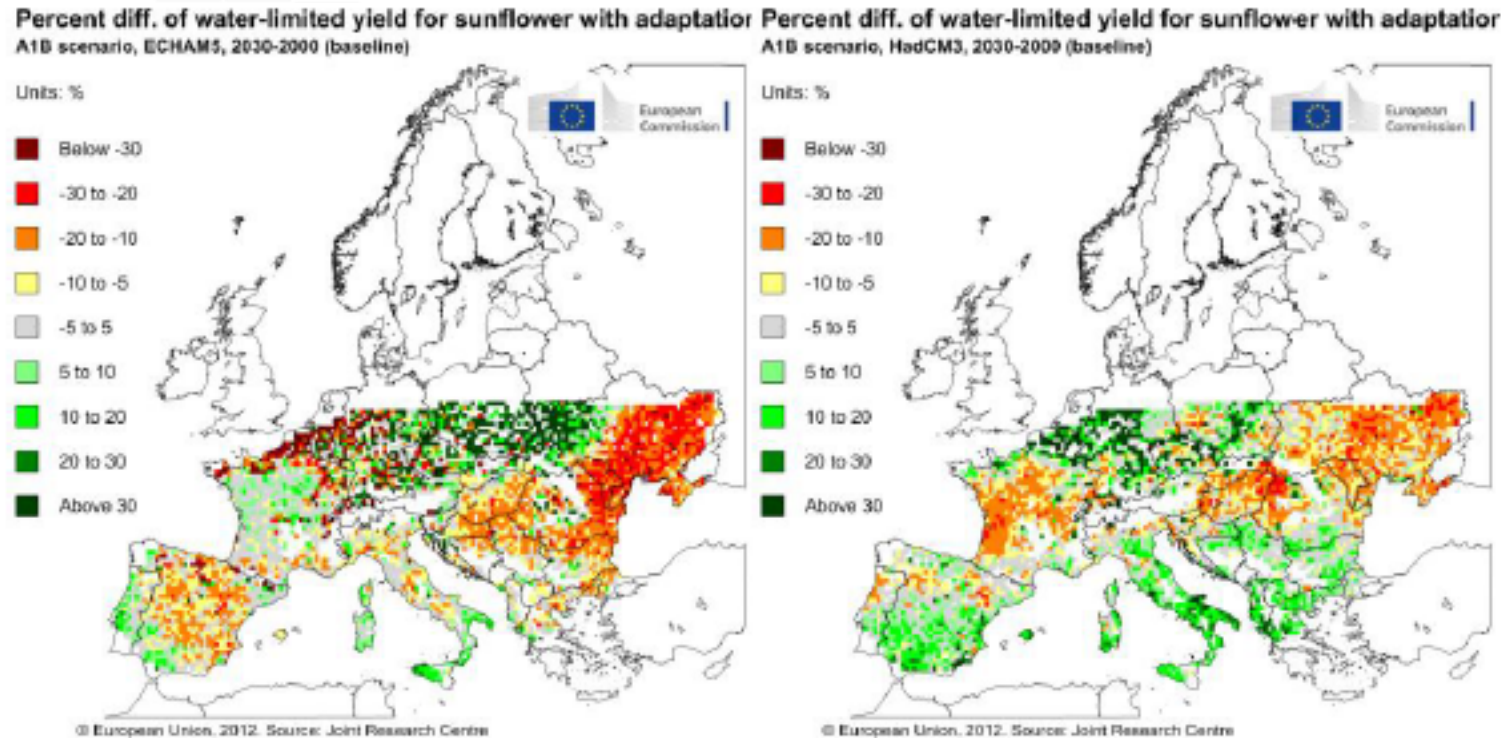
Zhao et al.  
(2015), GCB

# Les options d'adaptation

- ❖ Reconception/diversification des systèmes de culture
  - Décalage des aires de culture
  - Remplacement d'espèces (ex. maïs -> sorgho)
  - Diversification poussée pour augmenter la résilience face aux aléas → **AgroEcologie**
    - \*intra-parcelle (associations, successions de cultures, ...)
    - \*intra-exploitation (« panier » de cultures + variétés)
    - \*intra-territoire (gestion de l'eau)
  - Nouvelles domestications



## Evaluation de stratégies d'adaptation (date de semis, précocité variétale) sur tournesol à l'horizon 2030

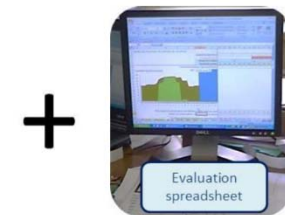
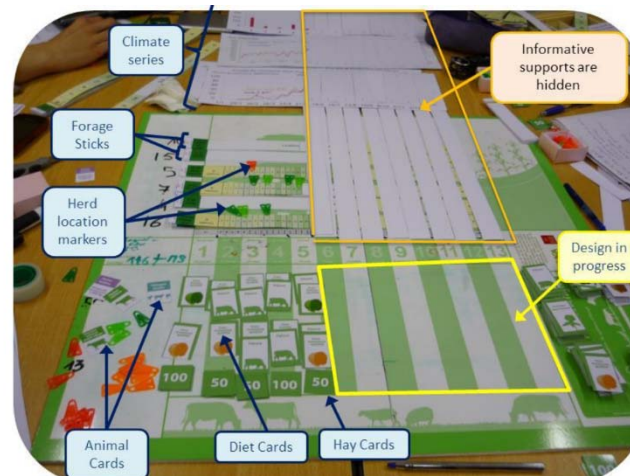


**Figure 4.** Percentage change in simulated water-limited yield for rain-fed sunflower in 2030 with respect to the 2000 baseline under the A1B scenario as modelled using ECHAM5 (left column) and HadCM3 (right). Maps show the result for the best adaptation strategy for cell.

Donatelli et al., 2012

# FARMATCH Adaptation des systèmes agricoles au CC

- analyser les adaptations réalisées dans le passé et développer une méthode d'analyse - à base de modèles – de l'exposition au changement et à la variabilité climatique
- développer avec des agriculteurs et/ou conseillers puis diffuser **une méthode participative de conception de systèmes d'élevage** adaptés à de nouveaux contextes climatiques, économiques, techniques, environnementaux et sociaux.



M.Sautier et al. (INRA)

# L'étude INRA « Agriculture Européenne 2050 »

## 2 variantes de régimes alimentaires

Régimes "tendanciels"  
= régimes majoritaires actuels



ou

Régimes "sains"  
= régimes du scénario « Healthy » d'Ag-T



X

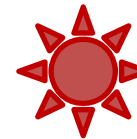
## 2 variantes de CC

CC "tendanciel"  
= trajectoire RCP6.0

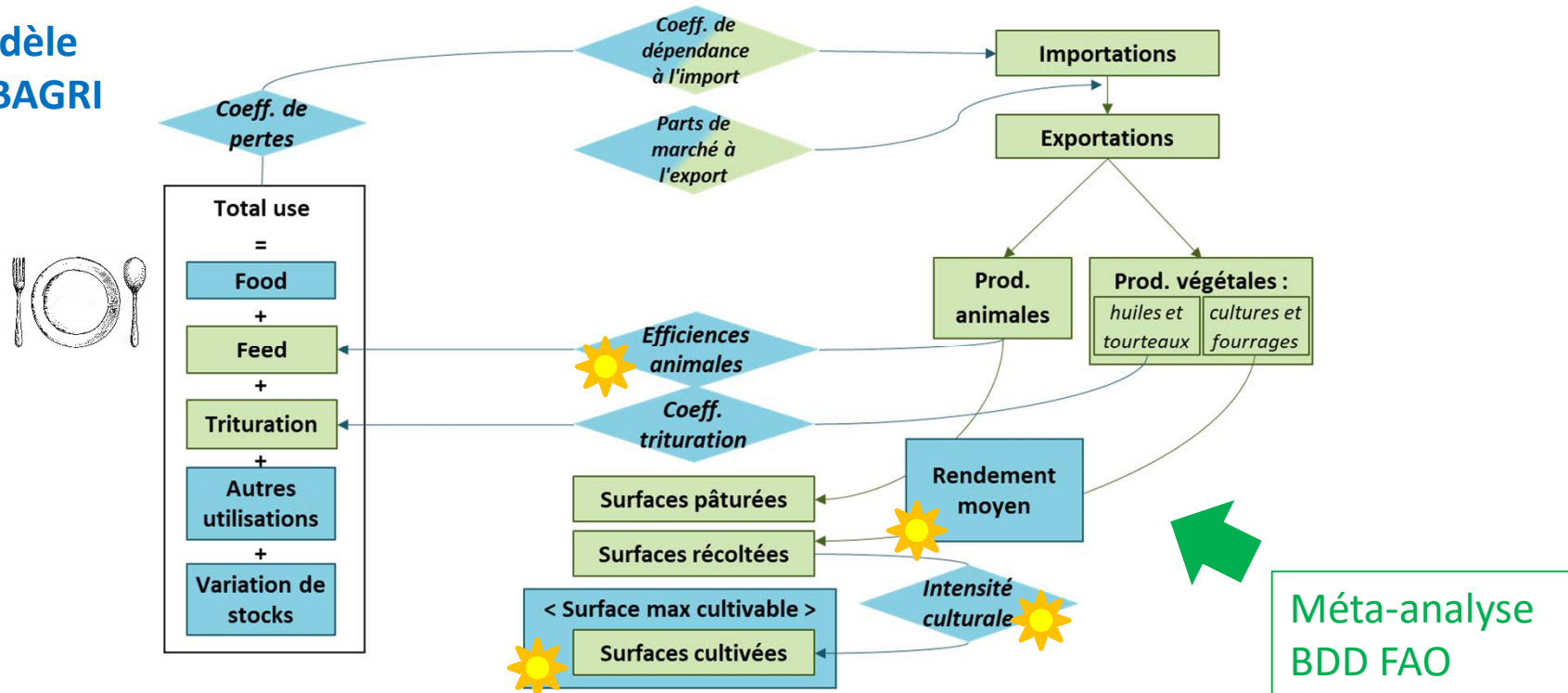


ou

CC "aggravé"  
= trajectoire RCP8.5



## Modèle GLOBAGRI



Merci de votre attention

