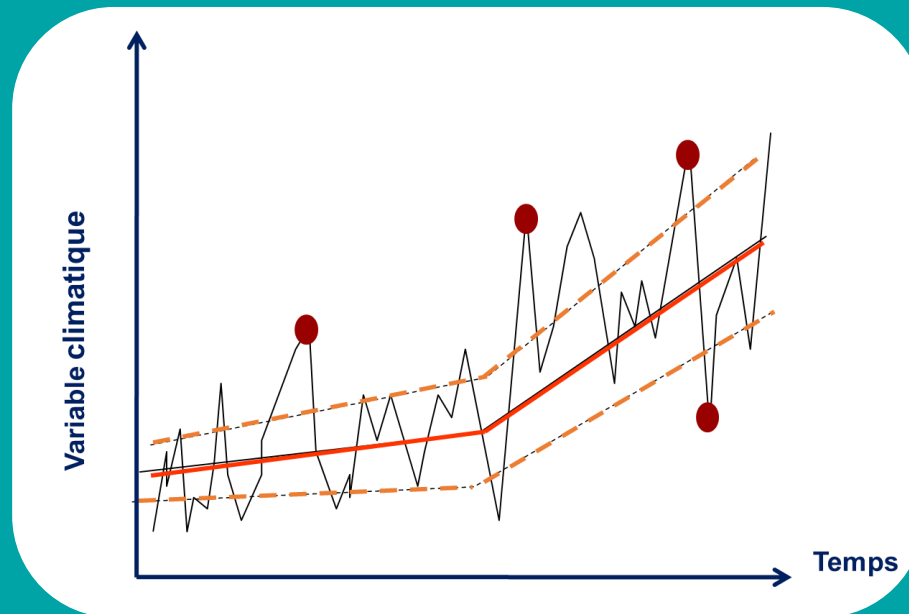


# Modéliser l'impact des événements climatiques extrêmes sur la production agricole

Ce que peuvent, et ne peuvent pas (encore) faire nos modèles



Romain Barillot, Sophie Brunel-Muguet, Eric Ceschia, Karine Chenu, Marc Corbeels, Jean-Louis Durand, Gatien Falconnier, Iñaki Garcia de Cortazar Aauri & Marie Launay

## ➤ Plan

1. Qu'est-ce qu'un événement extrême (EE) et comment le caractériser en entrée des modèles?
2. En quoi les EE sortent-ils nos modèles sol-plantes de leur domaine de validité
3. Mobiliser des données expérimentales pour améliorer la modélisation de l'impact des EE
4. Quels changements apporter à nos modèles pour mieux intégrer l'effets des EE
5. Perspectives d'utilisation de ces nouveaux modèles

- 1. Qu'est-ce qu'un événement extrême (EE) et comment le caractériser en entrée des modèles?

# ➤ Qu'est ce qu'un EE ?

## Définition du climatologue

### Vous avez dit extrêmes ?

Ces dernières années, les événements extrêmes sont devenus de plus en plus présents dans notre vie quotidienne du fait de leur fréquence ou leur intensité. Mozaïka se place en arbitre autour de ces phénomènes pour se saisir des questions qui animent les scientifiques, recenser les énigmes qu'il leur reste encore à résoudre et présenter les outils qu'ils utilisent pour en déchiffrer les subtilités.

Les événements extrêmes ont toujours existé sur notre planète...



Mais dernièrement, le climat est toujours plus chaotique...



...ce que l'on sait être une conséquence du changement climatique.



Les gaz à effet de serre liés aux activités humaines agissent comme des "stéroïdes" sur le climat.



Et augmentent la probabilité mais aussi l'intensité des événements extrêmes.



Cela peut sembler paradoxal, mais aussi les vagues de froid, les épisodes de neige et les gels tardifs.



Le rôle de l'IPSL est de comprendre les risques et les impacts pour aider à les maîtriser !



Cela englobe les phénomènes de pluies extrêmes, d'inondations, de crues...



...ou encore les canicules et les feux de forêts.



Pour observer ces phénomènes, l'IPSL utilise toute une panoplie d'instruments...



...collectant des données nécessaires à l'amélioration des modèles de climat.

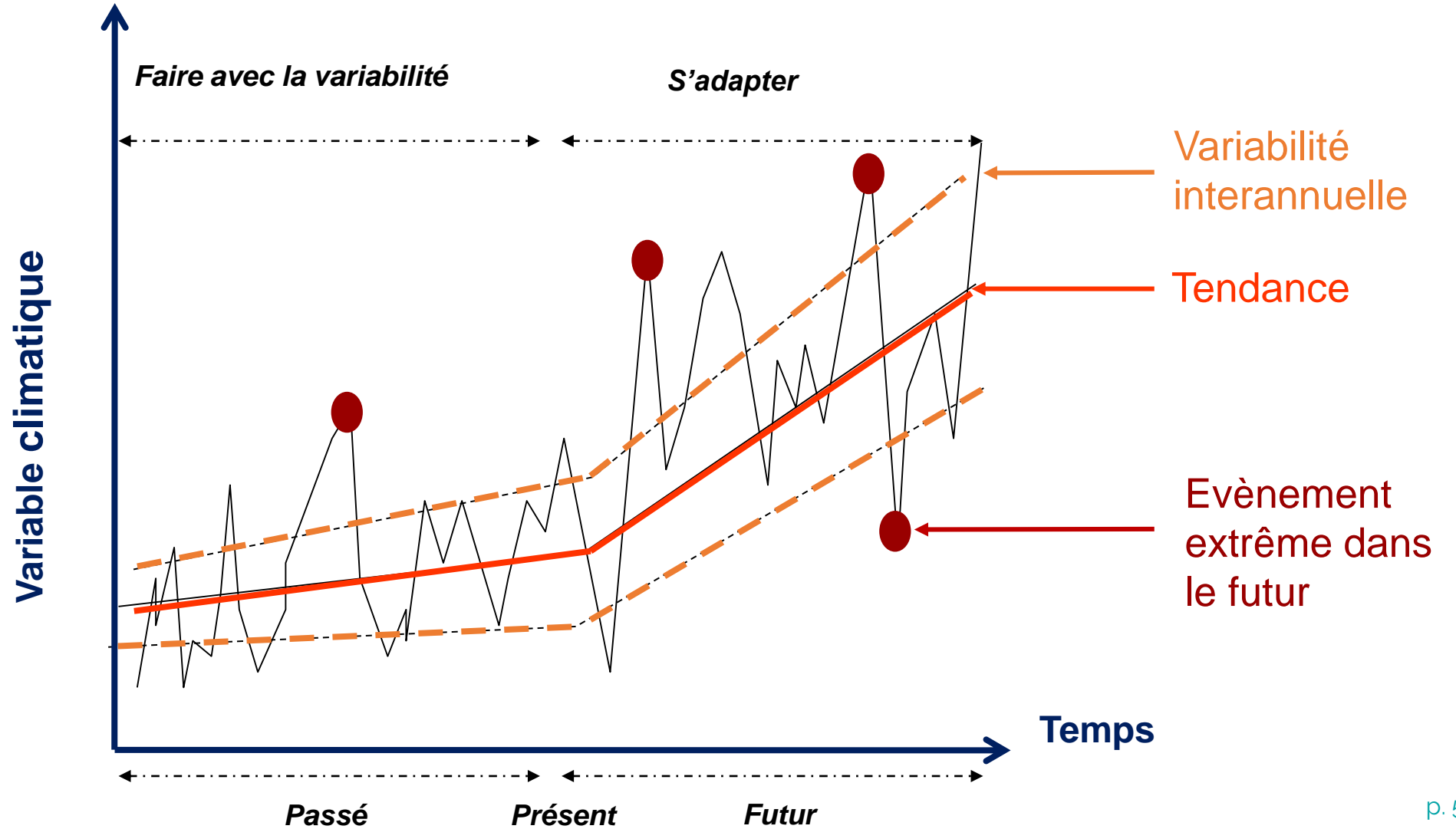
Ces connaissances sont précieuses pour aider les acteurs à s'adapter et pour construire des solutions ensemble.



- « La définition d'un événement extrême en statistique est très précise : un extrême, c'est un événement très rare »
- « Généralement, on considère qu'une valeur est extrême lorsqu'elle a moins d'1% de probabilité d'apparition, et encore, au-dessus d'un pour mille, ce n'est pas si rare que ça »
- « Peu importe la variable étudiée, l'échelle ou le modèle choisi, on voit que la probabilité de ces événements dans le monde actuel est plus importante que dans un monde sans impacts humains »

# ➤ Qu'est ce qu'un EE ?

Une notion relative à la période de référence & dynamique





# ➤ Quelle définition des EEs pour les modèles sol-plante?

➤ Définition statistique / stricte : est-ce pertinent pour les modèles sol-plantes?



➤ Définition sociétale de l'EE: notion d'impacts

« *Impact-oriented definition of the EE: high-impact on society and biophysical systems, hard-to-predict phenomenon that is far beyond normal expectations* » (Bellochi, 2015)

« *Il y a une façon plus sociétale de définir la notion d'extrême : c'est la question des impacts. Si vous demandez à un agriculteur ou à un chercheur dans un bureau, l'expérience de ce qu'est un extrême sera très différente.* »

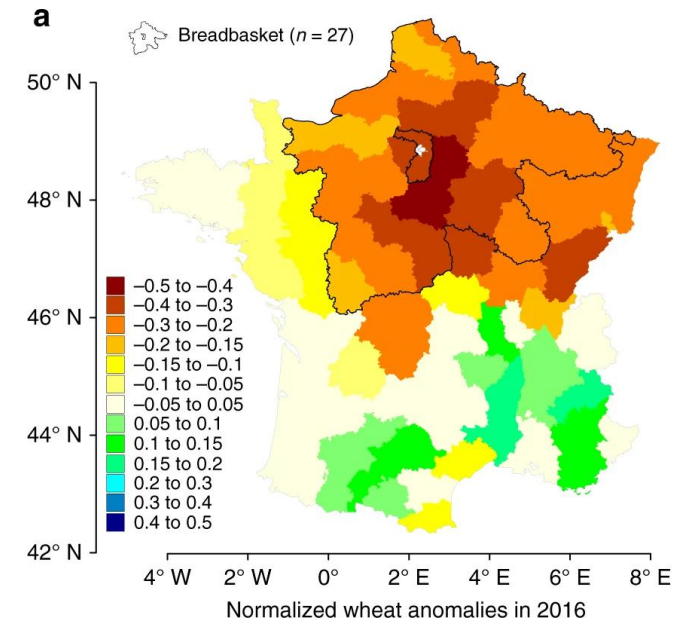
<https://www.ipsl.fr/article/les-extremes-du-statisticien/>

# ➤ EEs en Europe au cours depuis 2000

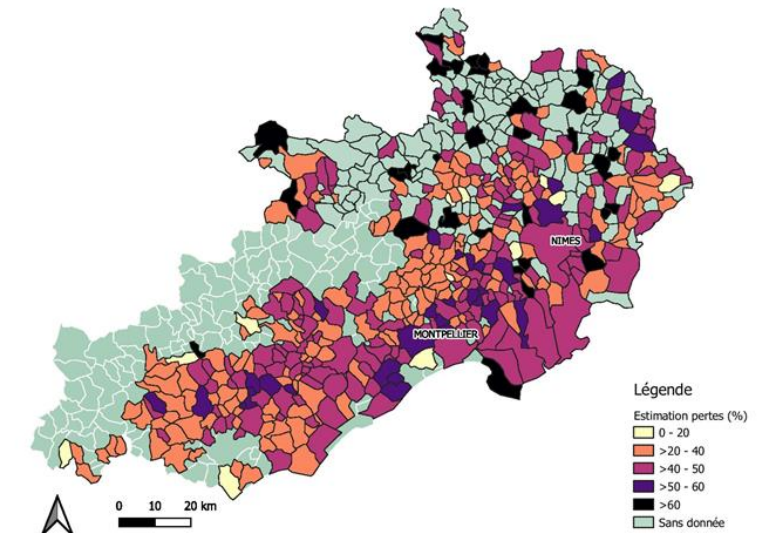
## Extreme weather events in Europe: impacts

Year	Region	Event	Impact
2003	Western and Central Europe	Hottest summer in at least 500 years (Luterbacher et al., 2004)	Crop harvest losses of 20-30% (Ciais et al., 2005); Mega-fires; Health damage
2004-2005	Iberian Peninsula	Hydrological drought	Grain harvest losses of 40% (EEA, 2010)
2007	Southern Europe	Hottest summer on record in Greece since 1891 (Founda and Giannakopoulos, 2009)	Mega-fires; roughly 575000 ha burnt area (JRC, 2008)
2007	England and Wales	May-July wettest since records began in 1766	78 farms flooded with about £50 million (Chatterton et al., 2010)
2010	Western Russia	Hottest summer since 1500 (Barriopedro et al., 2011)	Fire damage to forests (Shvidenko et al., 2011). Reduction in crop yields (Coumou and Rahmstorf, 2012); export ban; health damage
2011	France	Hottest and driest spring since 1880	8% decline in wheat yield (AGRESTE, 2011)

(Bellochi, 2015)



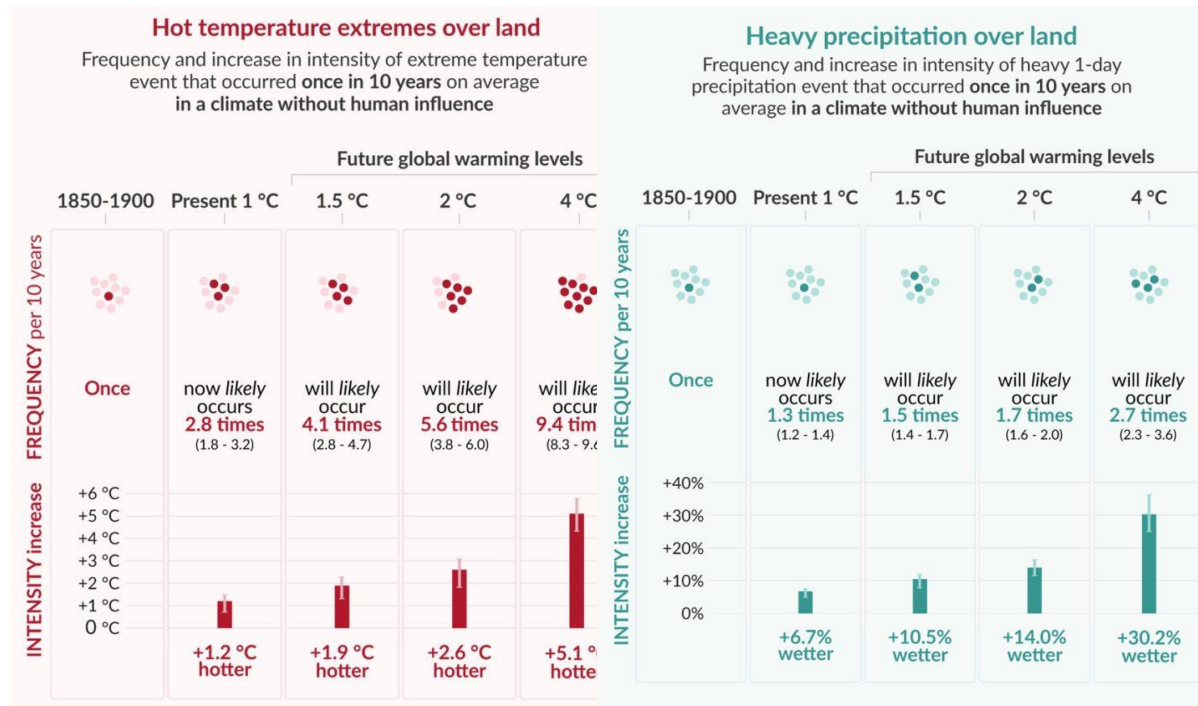
Rendement blé en France 2016 (Ben-Ari et al., 2018)



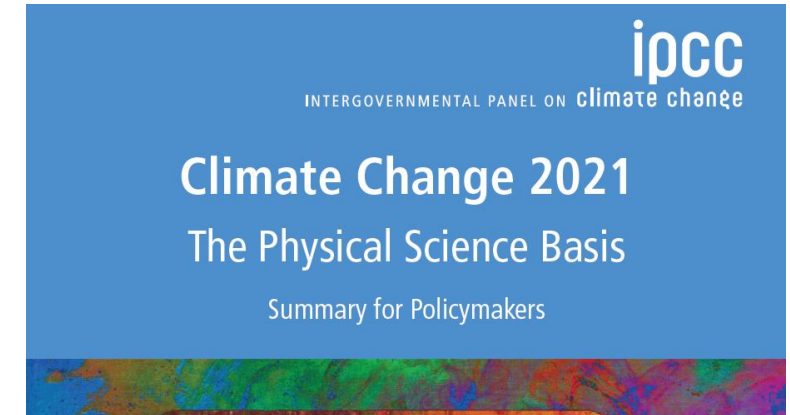
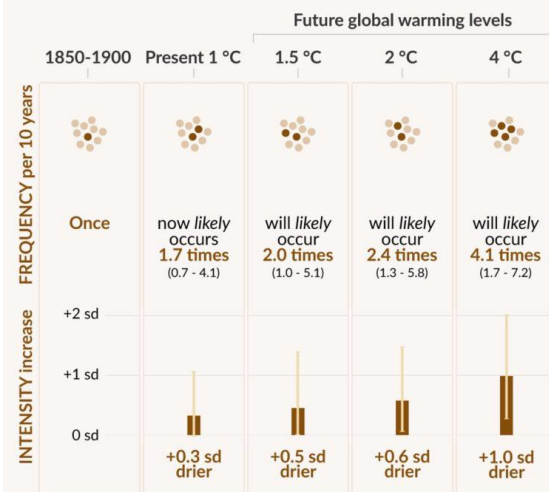
Production vignes Hérault et Gard 2019

(expertise collective SupAgro INRAE Univ. Montpellier pour le compte de la DDTM 34)

# ➤ Quelles projections des EEs dans le futur?



**Agricultural & ecological droughts in drying regions**  
Frequency and increase in intensity of an agricultural and ecological drought event that occurred once in 10 years on average across drying regions in a climate without human influence



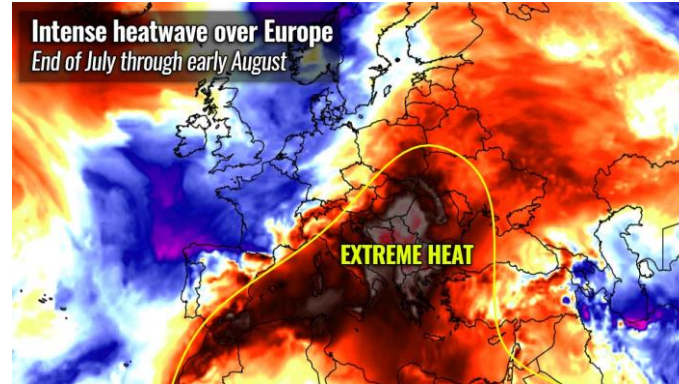
« Projected changes in extremes are larger in frequency and intensity with every additional increment of global warming »



# ➤ Caractérisation des EEs en entrées des modèles sol-plante

Des évènements à plusieurs dimensions

- Spatiale: échelle du continent à la parcelle (anticyclone ; canicule ; grêle). Extrêmes différents selon les contextes pédoclimatiques (Afrique vs Scandinavie)
- Temporelle: peut s'étaler sur plusieurs semaines/mois (vague chaleur) ou très ponctuel (pluie intense).
- Interactions entre variables climatiques : effet direct et/ou indirect d'un EE sur la culture



<https://www.severe-weather.eu/europe-weather/extreme-record-heatwave-greece-mk/>



Crédit Europe 1



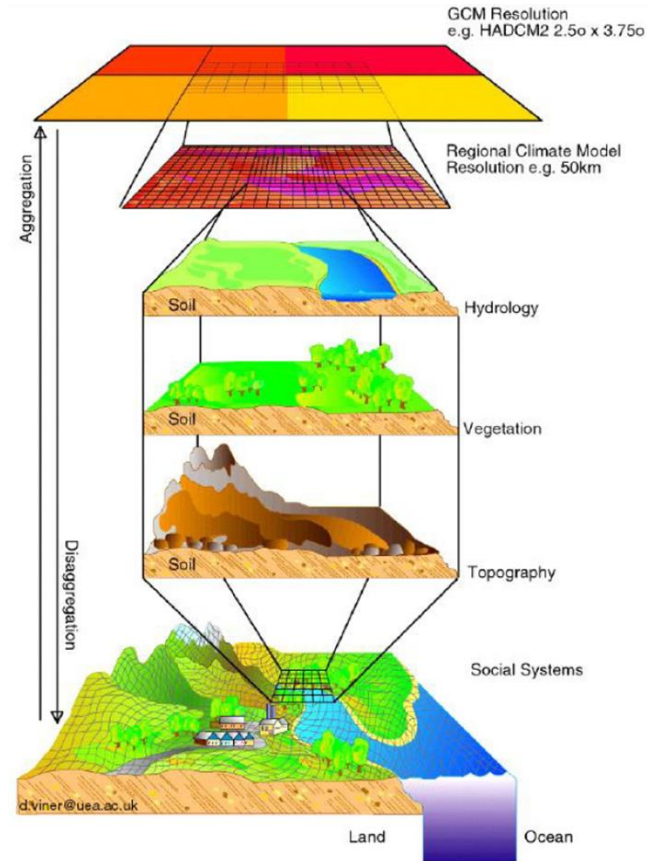
Crédit RTBF

# ➤ Caractérisation des EE en entrées des modèles sol-plante

Disponibilité des données climatiques et leur fiabilité

Besoin de données météo (passées et futures) fiables et adaptées à nos modèles:

- Fiabilité: Données disponibles (SAFRAN, EUROCORDEX,...) tendent à sous-estimer et sous représenter les EE (descente d'échelle tasse les extrêmes)
- Pas de temps: EE défini de manière infra-journalière (pluie intense ; grêle) peut passer sous les radars



Modèles climatiques globaux  
100 – 300 km

Modèles climatiques régionaux  
10 – 50 km

Modèles d'impacts  
(hydrologique, agronomique, ville...)  
m/km

Projet CICCLADE 2015

Dialogue accru avec climatologues pour mieux comprendre et utiliser les données climatiques.

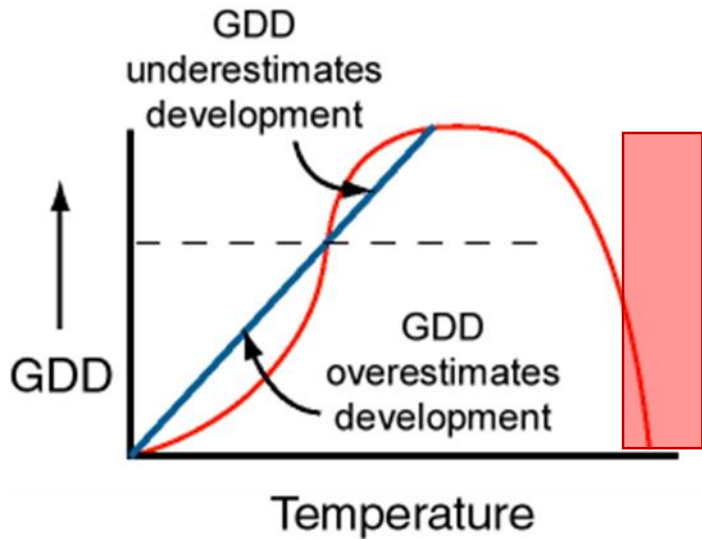


Construction de séries climatiques a priori en y injectant les EE afin d'entraîner nos modèles (?)

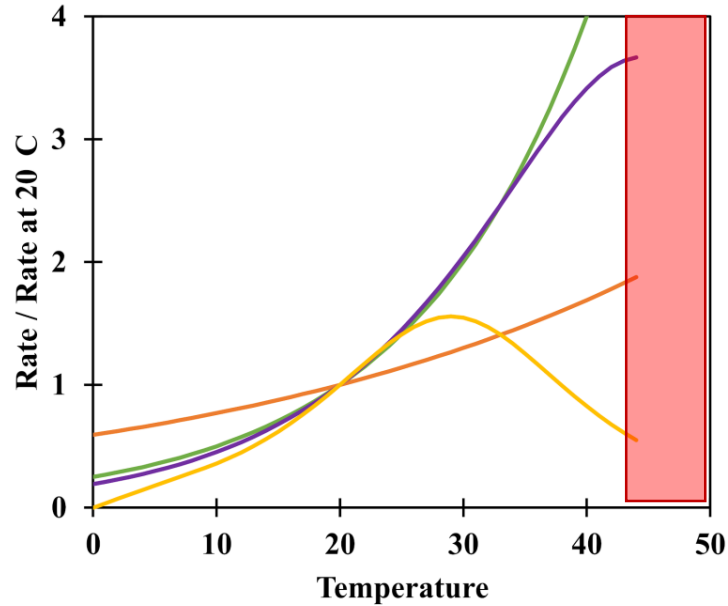
- 2. En quoi les EEs (et plus largement le CC) sortent-ils les modèles sol-plantes de leur domaine de validité ?

# ➤ EE situé hors des lois de réponses des modèles

Exemple de la température

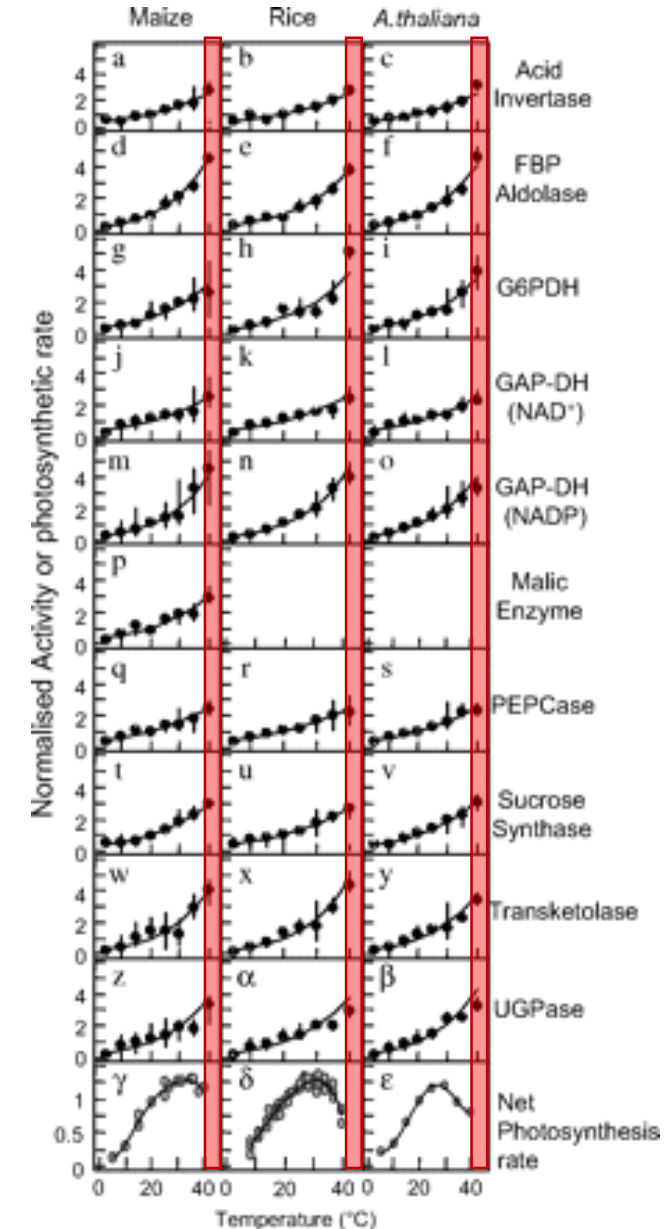


<http://agron-www.agron.iastate.edu>



Gauthier et al. (2010)

Quelles réponses hors gamme??



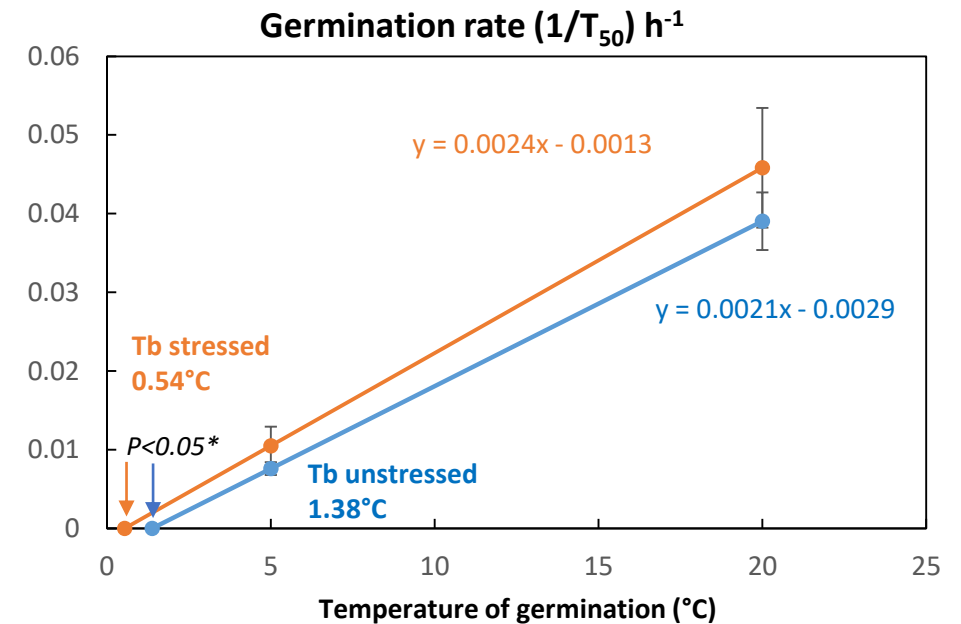
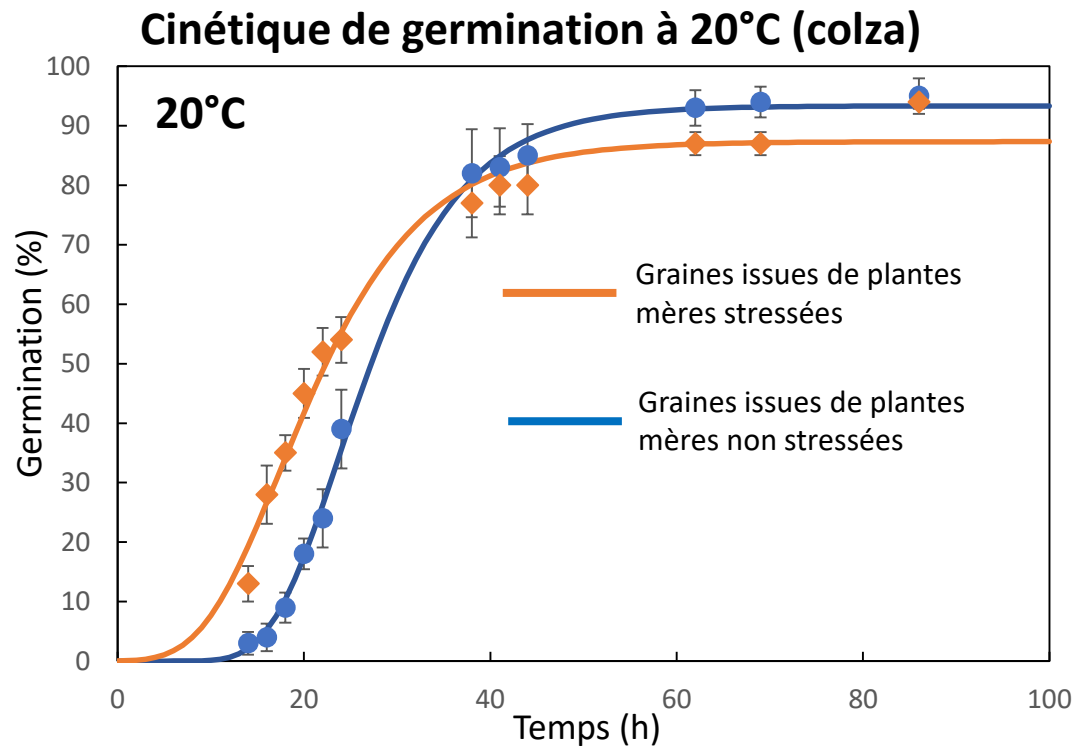
Parent et al. (2010)



# ➤ Modification des valeurs de paramètres sous l'effet de stress répétés

Recalibrer les paramètres dont les valeurs tendent à dériver

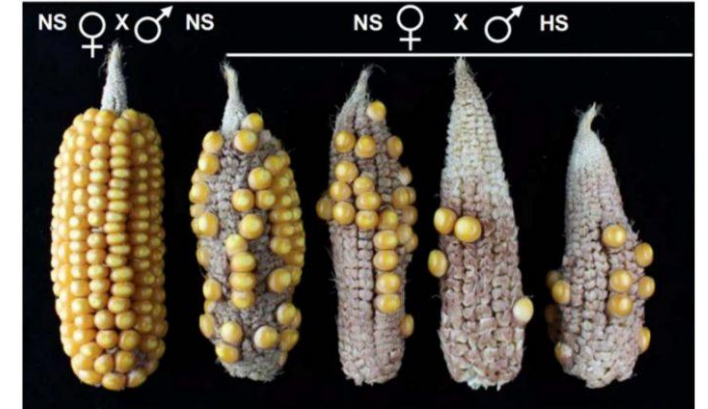
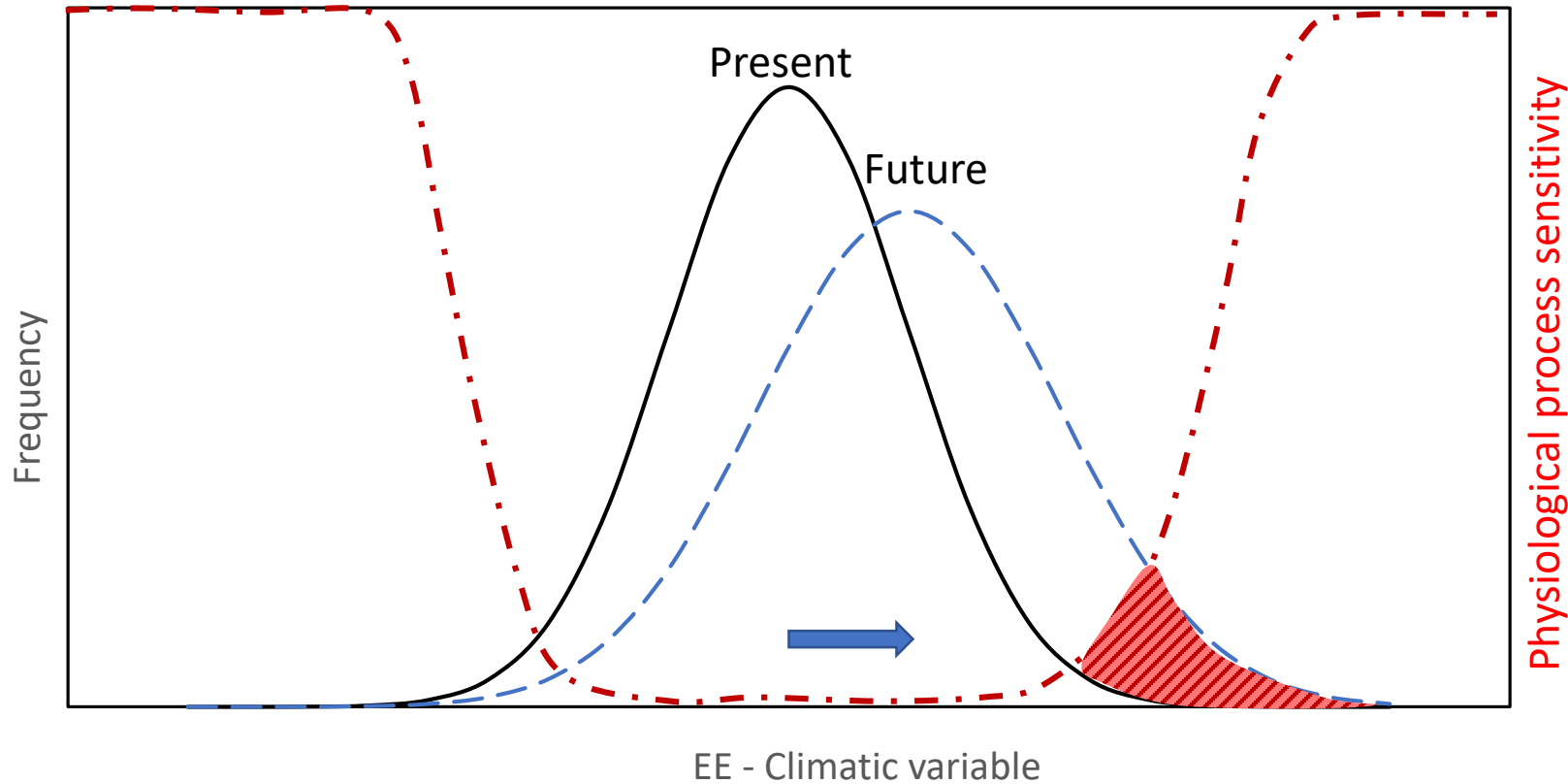
**Constat:** l'historique de la plante mère peut modifier des caractéristiques des graines e.g. cinétiques de germination à la température -> modification possible des valeurs de la température de base de germination.



Données issues Brunel-Muguet et al. 2015

# ➤ EE impacte un processus non pris en compte dans le modèle

Processus rarement impacté dans le passé mais bien plus fréquemment dans le futur (ex viabilité du pollen)



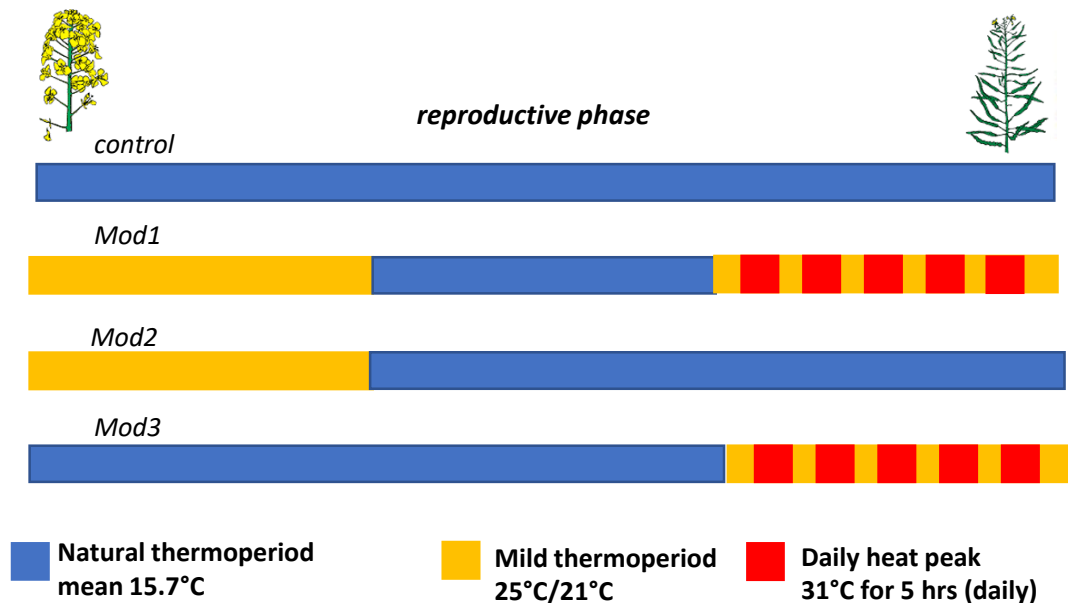
Begcy et al. (2019)

# ➤ Nécessité de prendre en compte l'effet de fréquence des stress et pas seulement de leur intensité.

**Postulat:** l'effet d'une séquence d'événements stressants n'est pas égal à la somme des effets individuels.

$$Effet1 + Effet2 + \dots + Effet k \neq \sum_{k=0}^n Effet k$$

**Exemple de l'effet mémoire : non additivité des effets de stress successifs.**



	Seed Yield (g)		%N		Total FAs	
T-modality	Value	Δ (%)	Value	Δ (%)	Value	Δ (%)
T-control	9.92	-	3.36	-	39.35	-
<b>Mod1</b>	7.52	<b>-24</b>	3.97	<b>+18</b>	30.10	<b>-23</b>
Mod2	8.82	-11	3.44	+2.4	36.43	-7
Mod3	9.61	-3	3.32	-1.2	31.16	-20
<b>Mod2+Mod3 effect</b>		<b>-14</b>		<b>+1</b>		<b>-26</b>

Magno et al., unpublished

**Processus dont les effets du stress thermique ne sont pas additifs sur**

- **Elaboration du rendement:** remplissage du grain (PMG), nombre de grains/siliques, nombre de siliques
- **Teneur en azote des grains**

# ➤ Impacts de l'EE à une échelle plus fine que celles des modèles

- Spatiale: hétérogénéité intra-parcellaire peut être très grande



*(expertise SupAgro INRAE Univ. Montpellier  
DDTM 34)*



*Diversité génétique. Lusignan.*

- Temporelle: EE peut être de courte durée: impact très différent selon la phénologie

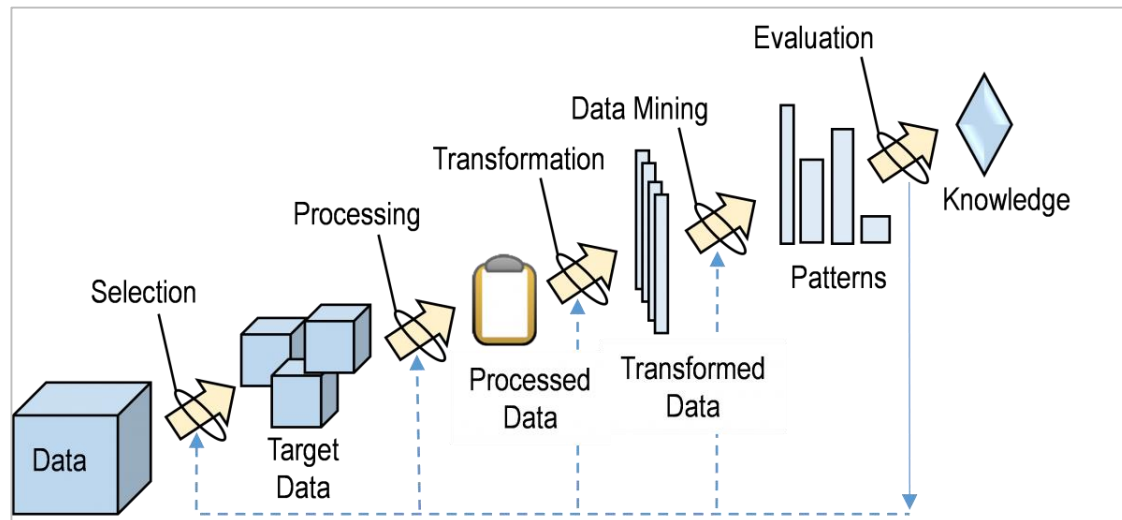




**➤ 3. Mobiliser des données expérimentales pour améliorer la modélisation des impacts des EE**

## ➤ Approche sans a priori fonctionnel : fouille de données

Extraction et représentation de connaissances par méthode de fouilles de données -> identification de motifs qui expliquent et /ou prédisent



### Limites à cette approche:

Peu d'événements extrêmes dans les jeux de données disponibles pour identifier des motifs pertinents

Les événements extrêmes sont souvent difficilement représentés dans les données météo

Approche peut être plus adaptée pour étudier les réponses tendanciennes.

Magno et al. 2020. Adapted from the Berkeley lab

➤ Nouveaux dispositifs expérimentaux pour comprendre et tester/recalibrer nos modèles



*Ecotron - Montpellier*



*SOERE ACBB (chauffage du sol) – Lusignan*



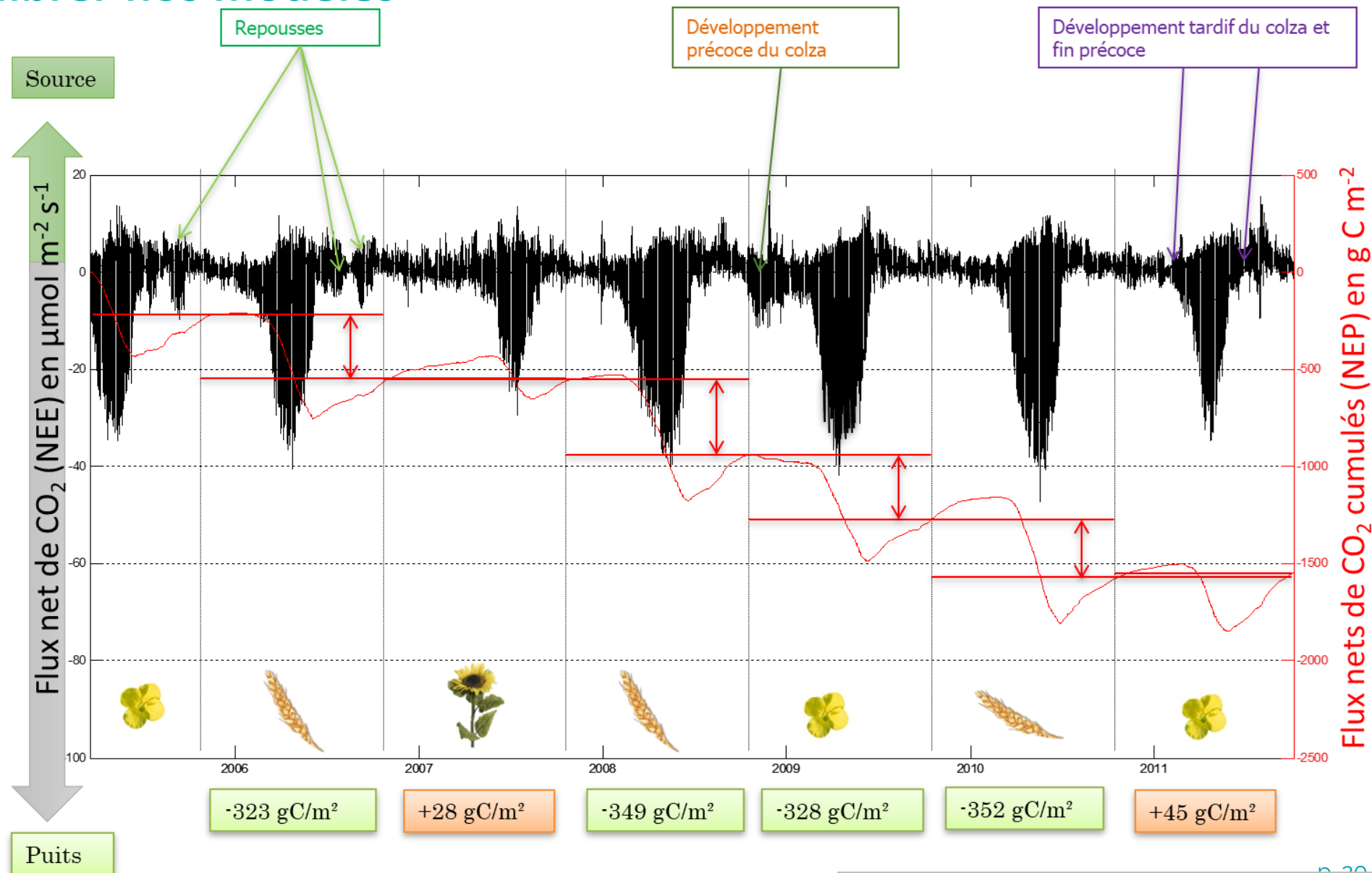
*Siclex - Lusignan*

# ➤ Nouveaux dispositifs expérimentaux pour comprendre et tester/recalibrer nos modèles



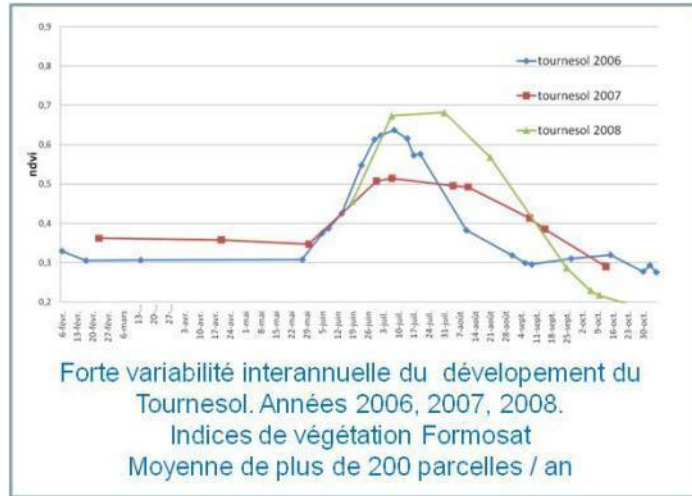
Station de flux

**ICOS** | INTEGRATED CARBON OBSERVATION SYSTEM

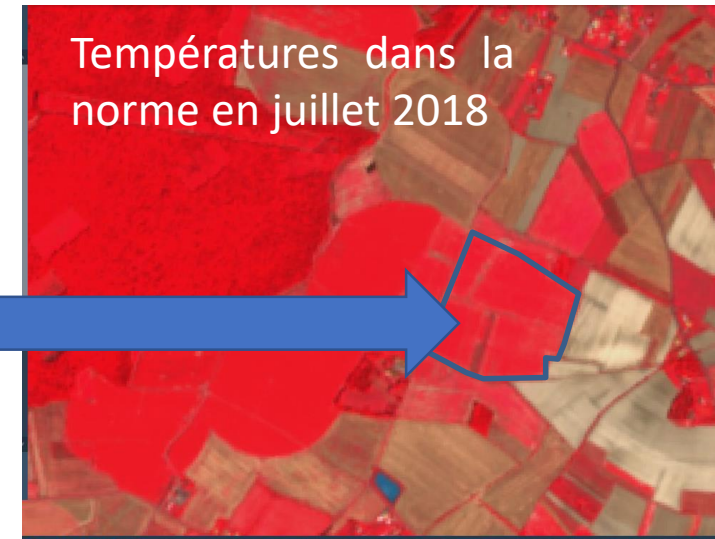




# ➤ Apport de la télédétection pour le suivi de l'impact des événements extrêmes sur les cultures



25/07/2018



25/07/2019



Météo-France @meteo france · 26 juil.  
#Canicule : de très nombreuses stations ont battu ces derniers jours leur record absolu de température maximale  
[meteo france.fr/actualites/745...](https://meteo france.fr/actualites/745...)

**RECORDS ABSOLUS DE TEMPÉRATURE MAXIMALE**  
Sur l'épisode du 23 au 25 juillet 2019

METEO FRANCE

7 89 108

Crédits : B. Gonella

Aucune production florale en 2019 ➔ pas de récolte

## ➤ Apport de la télédétection pour le suivi de l'impact des événements extrêmes sur les cultures

Conséquences des inondations sur la production



<https://www.lejournaltoulousain.fr/>  
**Tarn : des indemnisations possibles pour les agriculteurs suite aux inondations de février**



Autres applications possible :

- Mesure de la T°C de surface (ProbaV à 300m de résolution → 60 m bientôt avec Thrishna)
- Impact des tempêtes (ex. dégâts sur la végétation)
- Cartographie des surfaces brûlées



<https://www.ccacoalition.org/en/news/us-ing-satellites-monitor-open-burning>

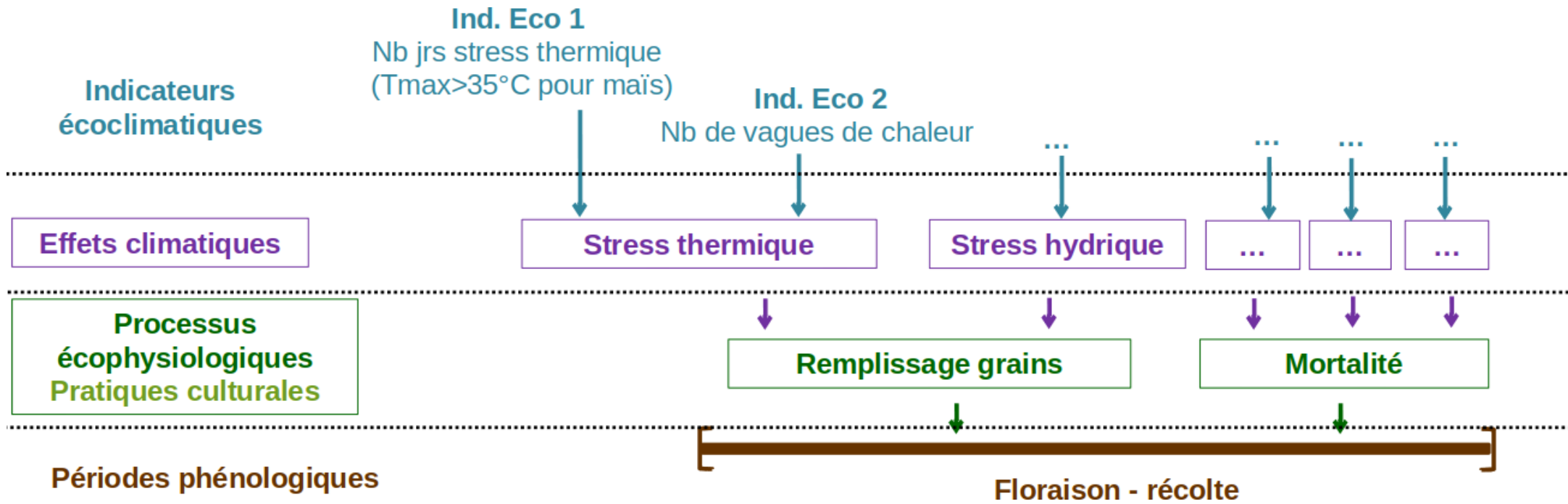


La télédétection peut permettre de cartographier les événements extrêmes, de constater leurs impacts sur la végétation mais pas toujours d'interpréter les causes

## ➤ Définir des indicateurs agro-climatiques

Définition d'indicateurs agro-climatiques prenant en compte le phénomène extrême en terme de :

- intensité,
- durée,
- fréquence
- et date d'apparition par rapport à la phénologie de la plante.

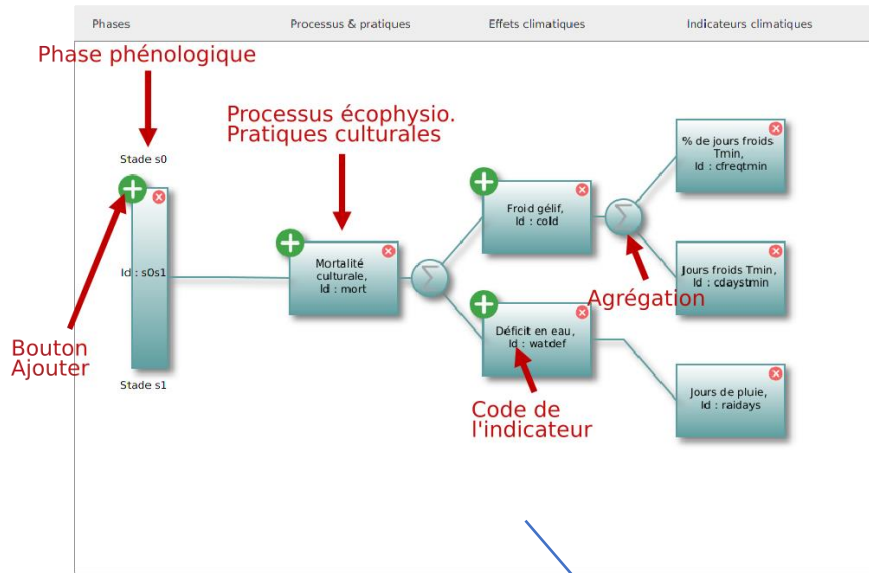


<https://w3.avignon.inrae.fr/getari/>



# ➤ Définir des indicateurs agro-climatiques

## GETARI



### Définition de la fonction de normalisation

Propriétés de l'évaluation | Propriétés de l'indicateur

Jours de stress thermique (hsdays)

Critère: TMAX > seuil

Seuil: 35

Normalisation: Sigmoïde

$$\frac{1}{1 + e^{\frac{a-x}{b}}}$$

Sigmoïde a: 20

Sigmoïde b: -4

Modifier les abscisses: min: 0, max: 50, pas: 1

Définition des valeurs de seuil (pour les indicateurs écoclimatiques ayant des seuils)

Sélection de la fonction de normalisation

Définition des valeurs de paramètres de la fonction de normalisation

### Définition de la fonction d'agrégation

Propriétés de l'évaluation | Propriétés de l'indicateur

Chaleur (heat)

Agrégation: Sélection de la fonction d'agrégation

Ajouter une fonction

Variables disponibles pour la fonction d'agrégation: hsdays, hsfreq

Supprimer

Définition de l'agrégation

GETARI Evaluation Résultats Exécution multiple Aide

évaluation-test Résultats pour évaluation-test X

Copier dans le presse-papier Copier vers LibreOffice ou Excel Enregistrer les données comme fichier .out ou .csv Enregistrer sous Fermer

Année	Phases		Processus & pratiques			Effets climatiques		Indicateurs climatiques			
	Phase s0s1	Mortalité culturale	Froid gélif	Déficit en eau	% de jours froids Tmin	Jours froids Tmin	Jours de pluie	Donnée normalisée	Donnée brute	Donnée normalisée	Donnée brute
2009	0.75	0.75									
2010	0.659	0.659									
1980	0.731	0.731	0.5	0.963	0	55	1	0	0.963	7	
1981	0.726	0.726	0.5	0.953	0	75	1	0	0.953	8	
1982	0.741	0.741	0.5	0.982	0	65	1	0	0.982	4	
1983	0.735	0.735	0.5	0.971	0	65	1	0	0.971	1	
1984	0.726	0.726	0.5	0.953	0	75	1	0	0.953	8	
1985	0.726	0.726	0.5	0.953	0	85	1	0	0.953	8	
1986	0.741	0.741	0.5	0.982	0	55	1	0	0.982	4	
1987	0.726	0.726	0.5	0.953	0	90	1	0	0.953	8	
1988	0.758	0.758	0.611	0.905	0.223	25	1	0	0.905	11	
1989	0.743	0.743	0.501	0.986	0.002	45	1	0	0.986	3	
1990	0.737	0.737	0.511	0.963	0.023	35	1	0	0.963	7	
1991	0.702	0.702	0.5	0.965	0	80	1	0	0.965	11	
1992	0.741	0.741	0.5	0.982	0	55	1	0	0.982	4	
1993	0.776	0.776	0.611	0.94	0.223	25	1	0	0.94	9	
1994	0.712	0.712	0.5	0.924	0	60	1	0	0.924	10	
1995	0.733	0.733	0.503	0.963	0.007	40	1	0	0.963	7	
1996	0.712	0.712	0.5	0.924	0.001	50	1	0	0.924	10	
1997	0.714	0.714	0.503	0.924	0.007	40	1	0	0.924	10	
1998	0.75	0.75	0.538	0.963	0.076	30	1	0	0.963	7	
1999	0.943	0.943	0.962	0.924	0.924	10	1	0	0.924	10	
2000	0.926	0.926	0.889	0.963	0.777	15	1	0	0.963	7	
2001	0.69	0.69	0.5	0.881	0	60	1	0	0.881	12	
2002	0.72	0.72	0.5	0.94	0	60	1	0	0.94	9	
2003	0.733	0.733	0.503	0.963	0.007	40	1	0	0.963	7	
2004	0.69	0.69	0.5	0.881	0	70	1	0	0.881	12	
2005	0.739	0.739	0.538	0.94	0.076	30	1	0	0.94	9	
2006	0.745	0.745	0.538	0.953	0.076	30	1	0	0.953	8	
2007	0.746	0.746	0.611	0.881	0.223	25	1	0	0.881	12	
2008	0.726	0.726	0.511	0.94	0.023	35	1	0	0.94	9	
2009	0.75	0.75	0.538	0.963	0.076	30	1	0	0.963	7	

Résultats





# ➤ Définir des indicateurs agro-climatiques



## webXTREME

**Start Date**  
April 01

**End Date**  
September 30

Please provide the desired period (starting and end dates) during which the criterion is evaluated

**Category**  
Heat

**Critical Value**  
34

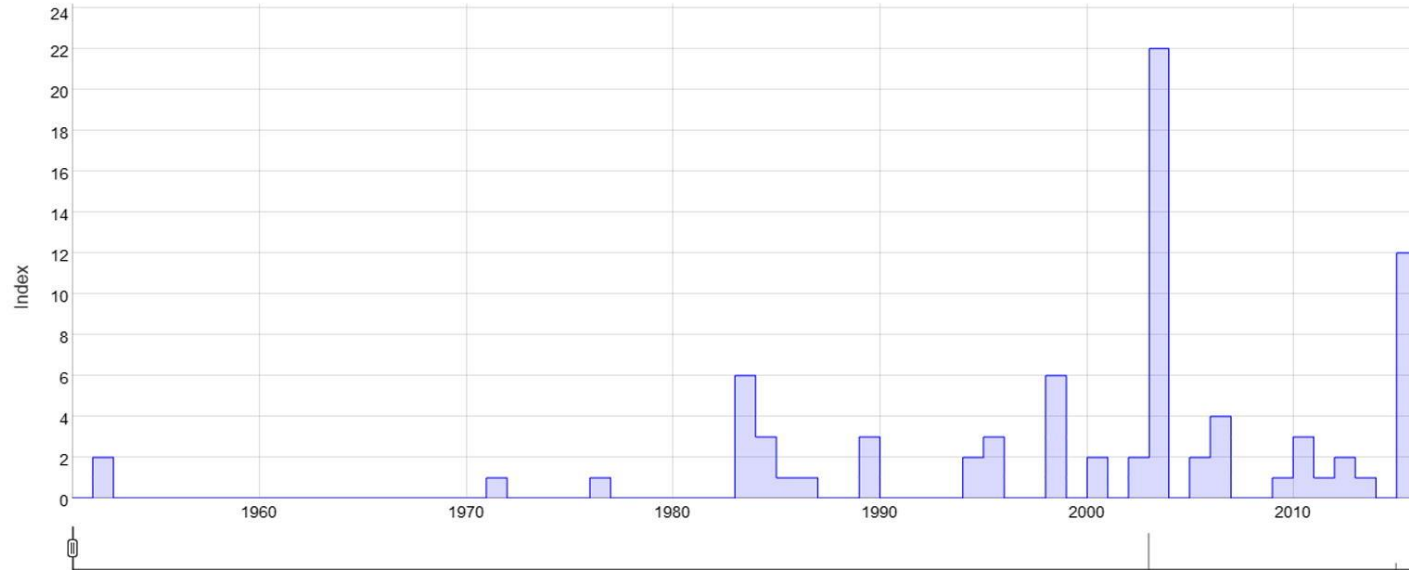
Units: °C / Range: [30.0, 50.0]  
Criterion: AIRTMAX > 34

**Compute Indicator**

About this App | Data Upload | Soil Moisture Budget Computation | Occurrence of Extreme Conditions

Number of days with AIRTMAX > 34 from April 01 to September 30 ( Geneve\_1951-2015\_DailyWeather )

Download Indicator



Use left/right bars to display a subset of index values for a specific period

Three agroclimatic indices for cold and heat shocks as well as extreme aridity are implemented in the current release. They are:

- cold shocks
- heat shocks
- extreme aridity



Contents lists available at ScienceDirect

Computers and Electronics in Agriculture

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



Application note

webXTREME: R-based web tool for calculating agroclimatic indices of extreme events

Tommy Klein<sup>a</sup>, Argyrios Samourkasidis<sup>b,c</sup>, Ioannis N. Athanasiadis<sup>b,c</sup>, Gianni Bellocchi<sup>d</sup>, Pierluigi Calanca<sup>a,\*</sup>



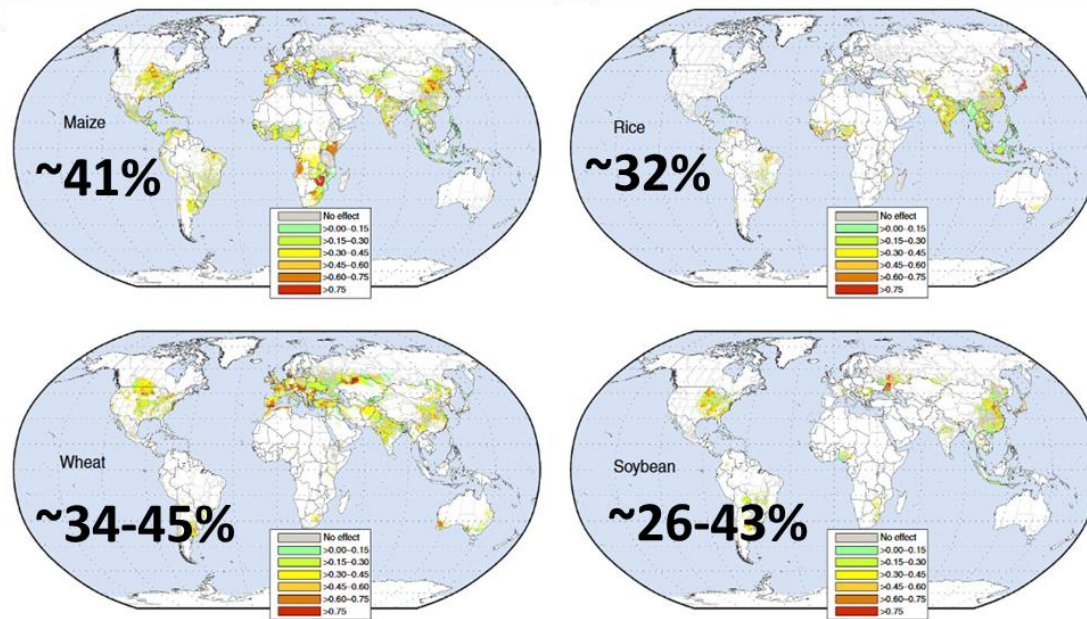
- 4. Quels changements apporter à nos modèles sol-plantes pour mieux intégrer l'effets des EE

## ➤ Focus sur eau et température

Concernant les EE, 2 variables climatiques majeures à bien intégrer dans nos modèles

- Température : gels (tardifs), vagues de chaleur
- Eau: pluies intenses, sécheresse

**Total crop yield variability explained due to climate variability over the last 3 decades.**



Ray et al. 2015

Simple measures of growing season temperatures and precipitation (spatial averages based on the locations of each crop) explain **~30% or more of year-to-year variations in global average yields**

**nature**  
COMMUNICATIONS

ARTICLE

Received 1 Sep 2014 | Accepted 28 Nov 2014 | Published 22 Jan 2015

DOI: [10.1038/ncomms6989](https://doi.org/10.1038/ncomms6989) OPEN

### Climate variation explains a third of global crop yield variability

Deepak K. Ray<sup>1</sup>, James S. Gerber<sup>1</sup>, Graham K. MacDonald<sup>1</sup> & Paul C. West<sup>1</sup>

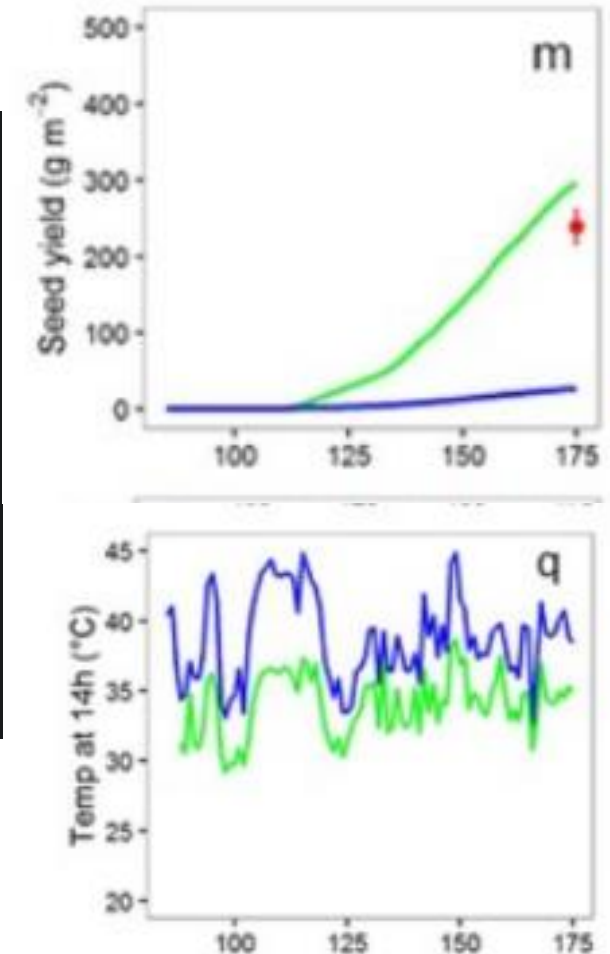
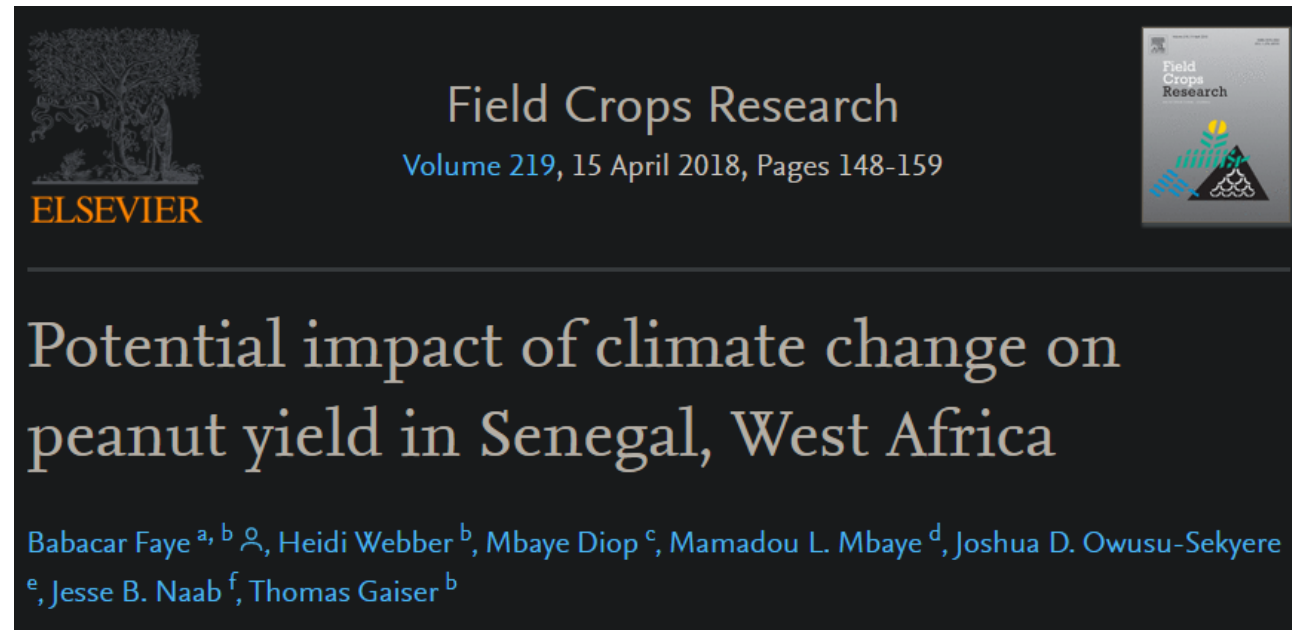
IOP PUBLISHING ENVIRONMENTAL RESEARCH LETTERS

Environ. Res. Lett. 2 (2007) 014002 (7pp) doi:10.1088/1748-9326/2/1/014002

### Global scale climate–crop yield relationships and the impacts of recent warming

David B Lobell<sup>1</sup> and Christopher B Field<sup>2</sup>

## ➤ Nécessiter de bien caractériser le bilan d'énergie

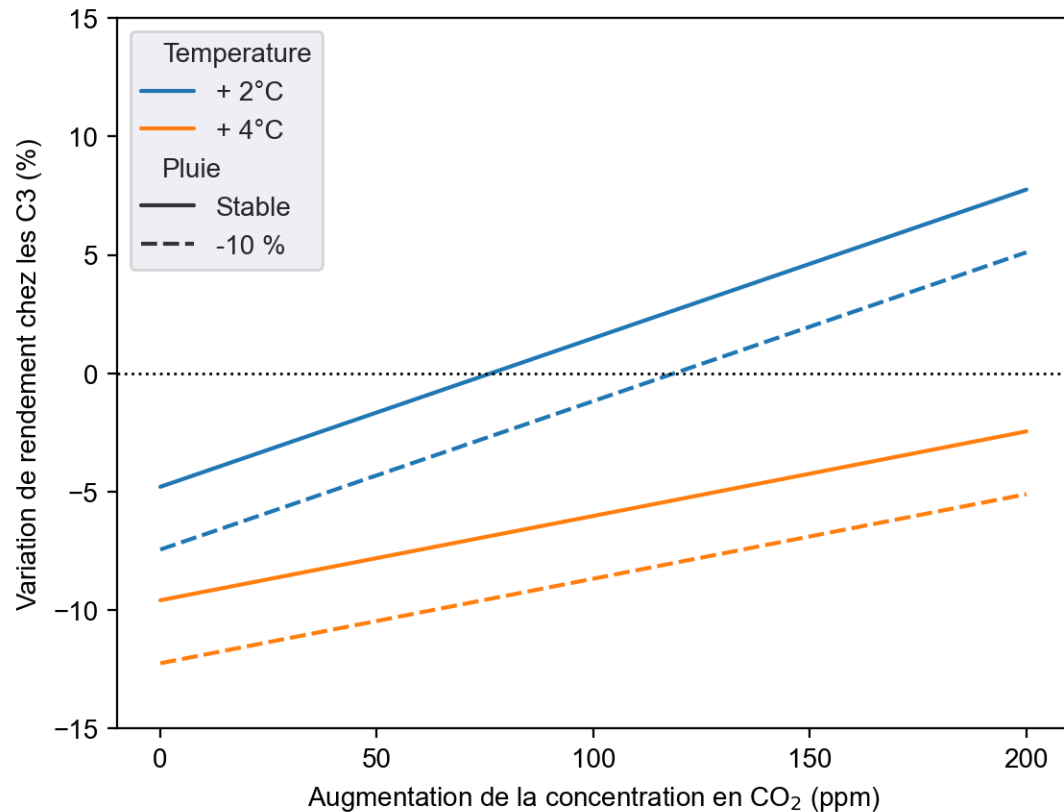


«  $T_c$  accounts for feedback between crop water status and crop temperature

Simulated  $T_c$  should be used instead of  $T_a$  to accurately account for heat stress impact on peanut especially during the dry season.”



## ➤ Intégrer les effets du CO<sub>2</sub>



Adapté de Makowski et al. (2020). Rapport INRAE: place des agricultures européennes dans le monde à l'horizon 2050. Rapport INRAE

nature  
food

REVIEW ARTICLE

<https://doi.org/10.1038/s43016-020-00195-4>

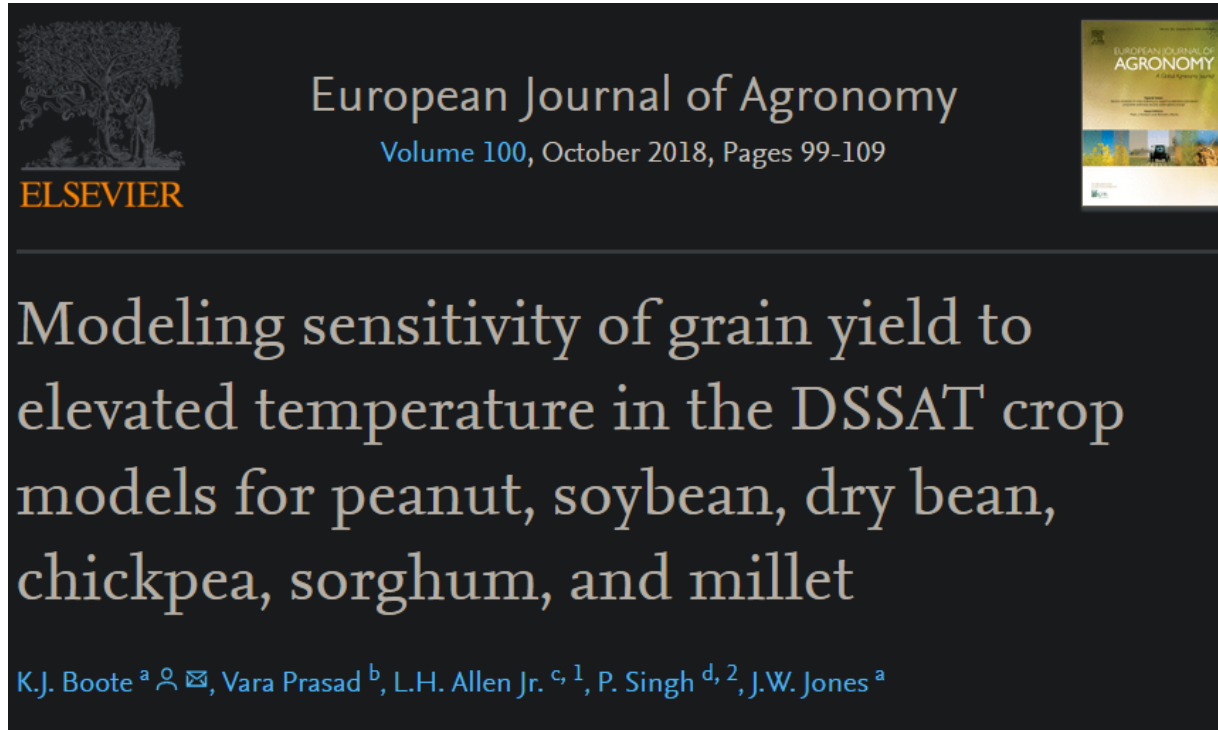
Check for updates

## Narrowing uncertainties in the effects of elevated CO<sub>2</sub> on crops

Andrea Toretì <sup>1,26</sup>, Delphine Deryng <sup>2,3,4,26</sup>, Francesco N. Tubiello <sup>5</sup>, Christoph Müller <sup>6</sup>, Bruce A. Kimball <sup>7</sup>, Gerald Moser <sup>8</sup>, Kenneth Boote <sup>9</sup>, Senthil Asseng <sup>9</sup>, Thomas A. M. Pugh <sup>10,11,12</sup>, Eline Vanuytrecht <sup>13,14</sup>, Håkan Pleijel <sup>15</sup>, Heidi Webber <sup>4</sup>, Jean-Louis Durand <sup>16</sup>, Frank Dentener <sup>1</sup>, Andrej Ceglar <sup>1</sup>, Xuhui Wang <sup>17,18</sup>, Franz Badeck <sup>19</sup>, Remi Leclerc <sup>1</sup>, Gerard W. Wall <sup>7</sup>, Maurits van den Berg <sup>1</sup>, Petra Hoegy <sup>20</sup>, Raul Lopez-Lozano <sup>21</sup>, Matteo Zampieri <sup>1</sup>, Stefano Galmarini <sup>1</sup>, Garry J. O'Leary <sup>22</sup>, Remy Manderscheid <sup>23</sup>, Erik Mencos Contreras <sup>24,25</sup> and Cynthia Rosenzweig <sup>24,25</sup>

## ➤ Augmenter domaine validité des lois de réponses

Cas des réponses non-linéaires

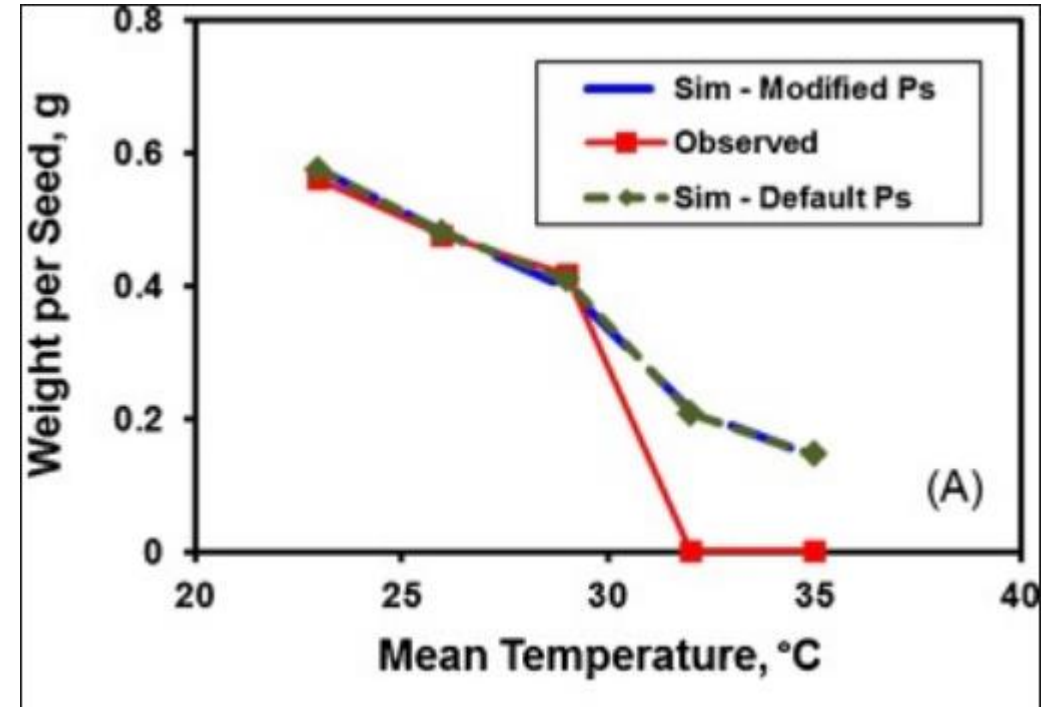


European Journal of Agronomy  
Volume 100, October 2018, Pages 99-109

ELSEVIER

Modeling sensitivity of grain yield to elevated temperature in the DSSAT crop models for peanut, soybean, dry bean, chickpea, sorghum, and millet

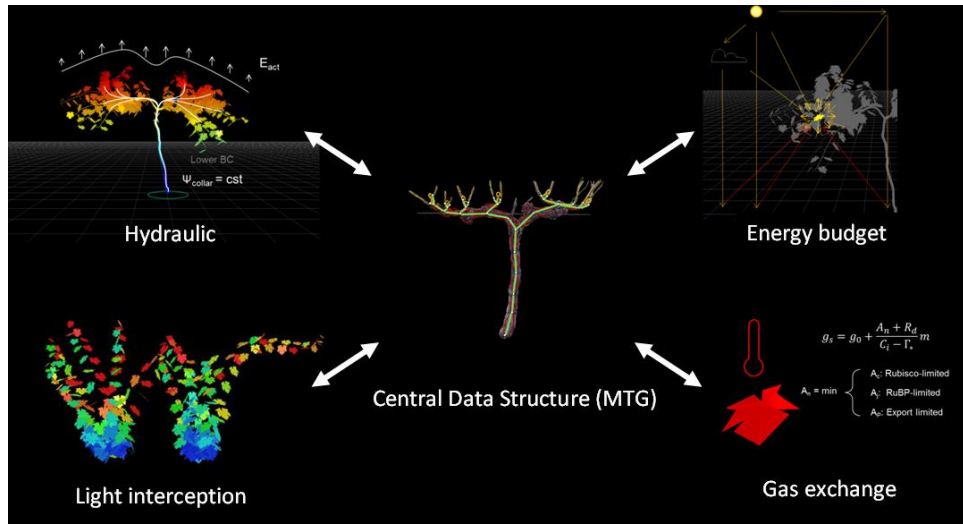
K.J. Boote<sup>a</sup>, Vara Prasad<sup>b</sup>, L.H. Allen Jr.<sup>c,1</sup>, P. Singh<sup>d,2</sup>, J.W. Jones<sup>a</sup>



“For reliable assessments of climate change impact, it is critically important to gather additional temperature response data and to update parameterization and code of all crop models including DSSAT.”

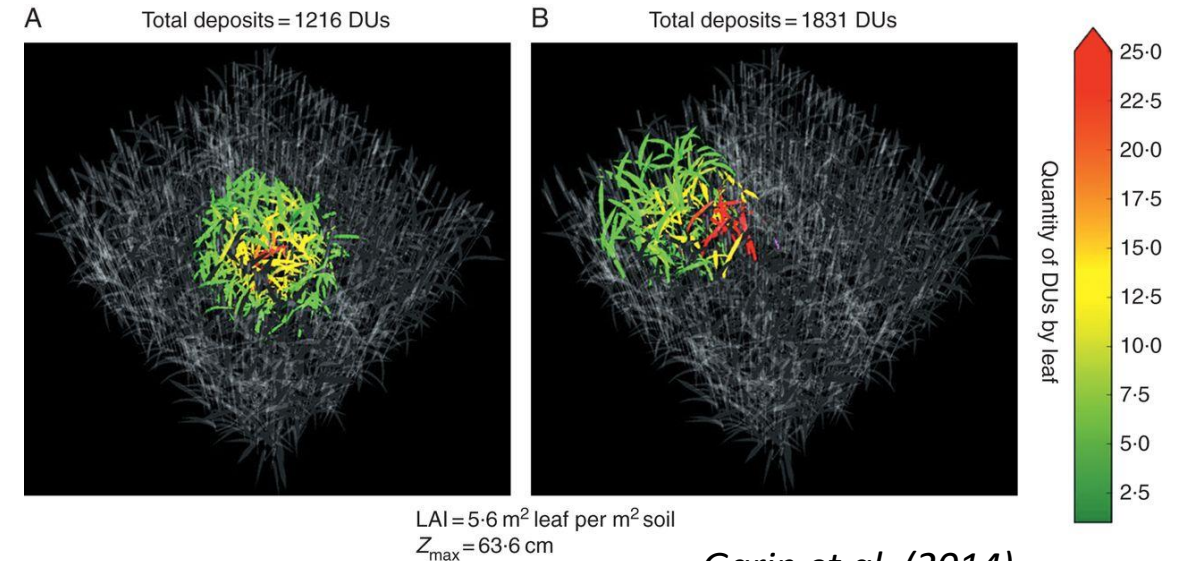
# ➤ Intégrer les interactions entre processus

## Trophique - hydrique



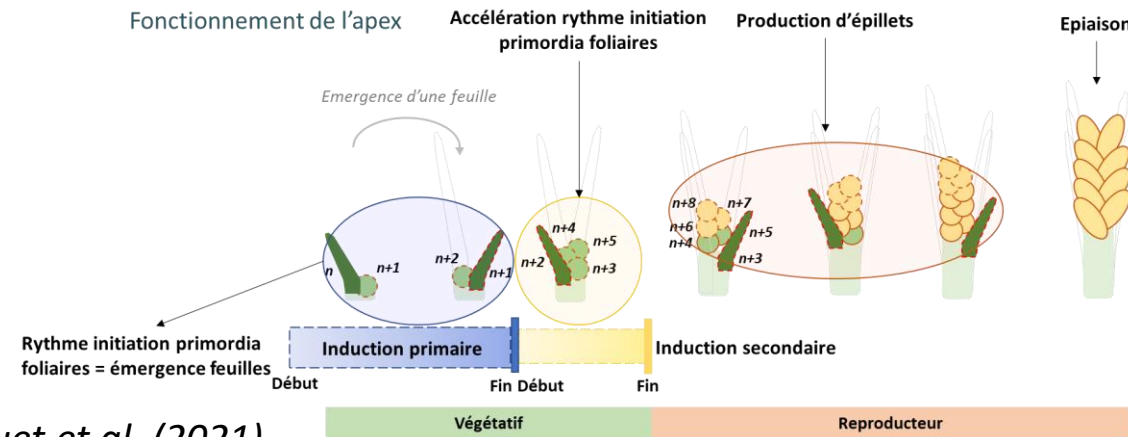
*Albasha et al. (2016)*

## Abiotique - biotique



*Garin et al. (2014)*

## Morphogénèse - phénologie



*Rouet et al. (2021)*

## ➤ Intégrer des nouveaux processus :

- e.g. impact des extrêmes de température et/ou pluie sur la décomposition des mulchs

Plant Soil (2015) 393:319–334  
DOI 10.1007/s11104-015-2501-x

---

REGULAR ARTICLE

### **Rain regime and soil type affect the C and N dynamics in soil columns that are covered with mixed-species mulches**

**Akhtar Iqbal · Sohaib Aslam · Gonzague Alavoine ·  
Pierre Benoit · Patricia Garnier · Sylvie Recous**

“Frequent/light rain pulses maintained the mulches wetter between pulses than infrequent/heavy rain pulses, and therefore these mulches decomposed faster.”

**-> current soil/crop models do not account for this effect**

- Mais aussi viabilité du pollen, acclimatation, mortalité...



## ➤ 5. Perspectives utilisation de ces nouveaux modèles

# > Perspectives

Identification idéotypes et adaptation des pratiques &  
Définir des zones de production



Contents lists available at [ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com)

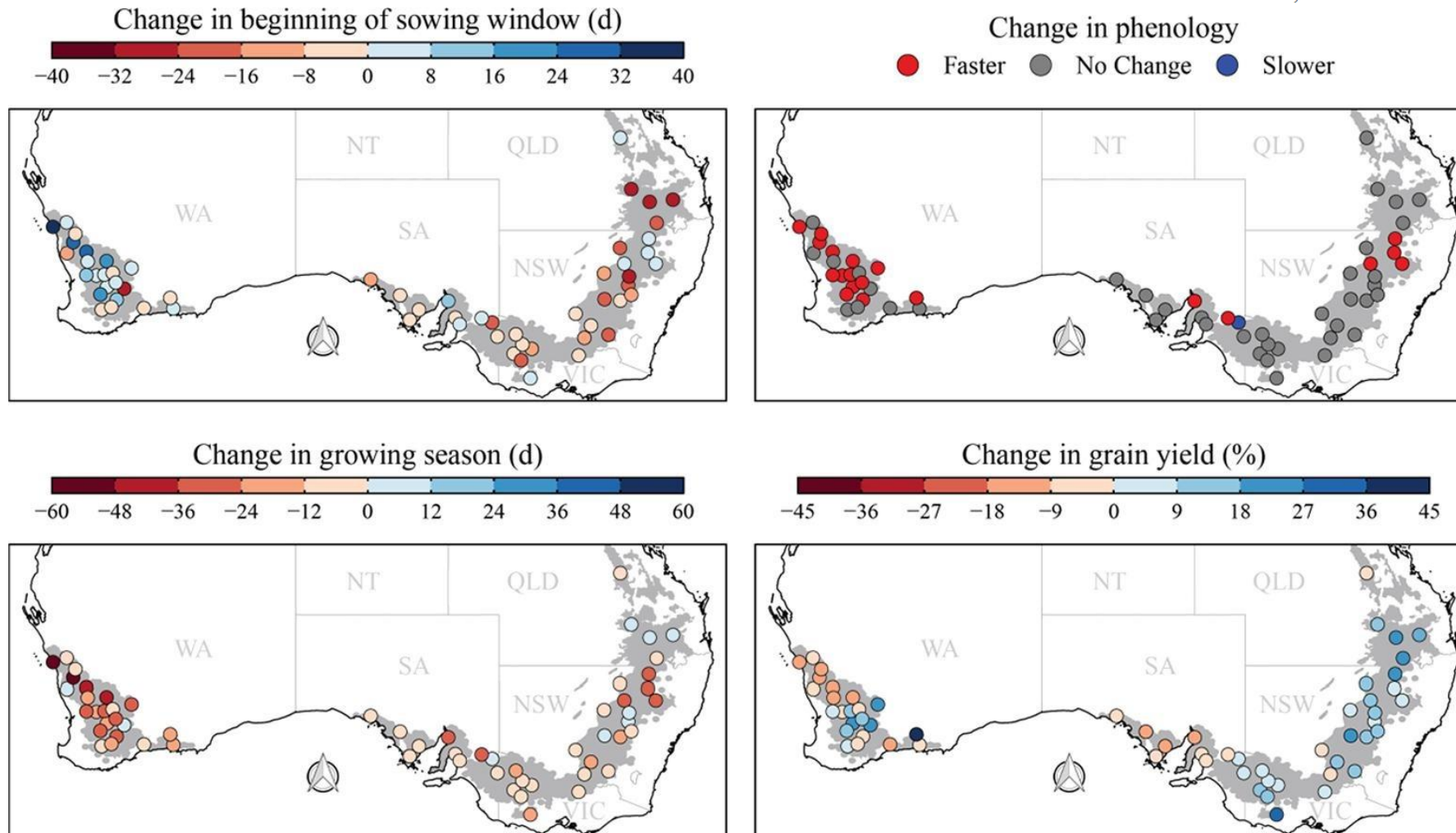
Climate Risk Management

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/crm](https://www.elsevier.com/locate/crm)



Improving productivity of Australian wheat by adapting sowing date and genotype phenology to future climate

Brian Collins, Karine Chenu\*



# ➤ Perspectives

Identification idéotypes et adaptation des pratiques &  
Définir des zones de production

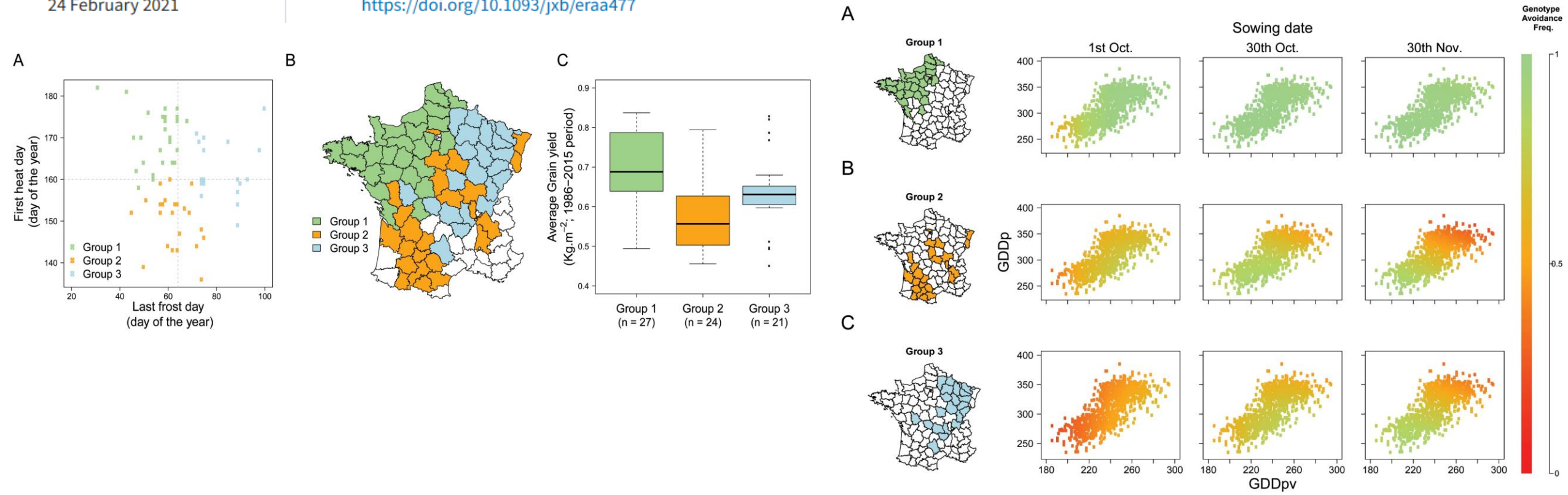


Volume 72, Issue 4  
24 February 2021

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

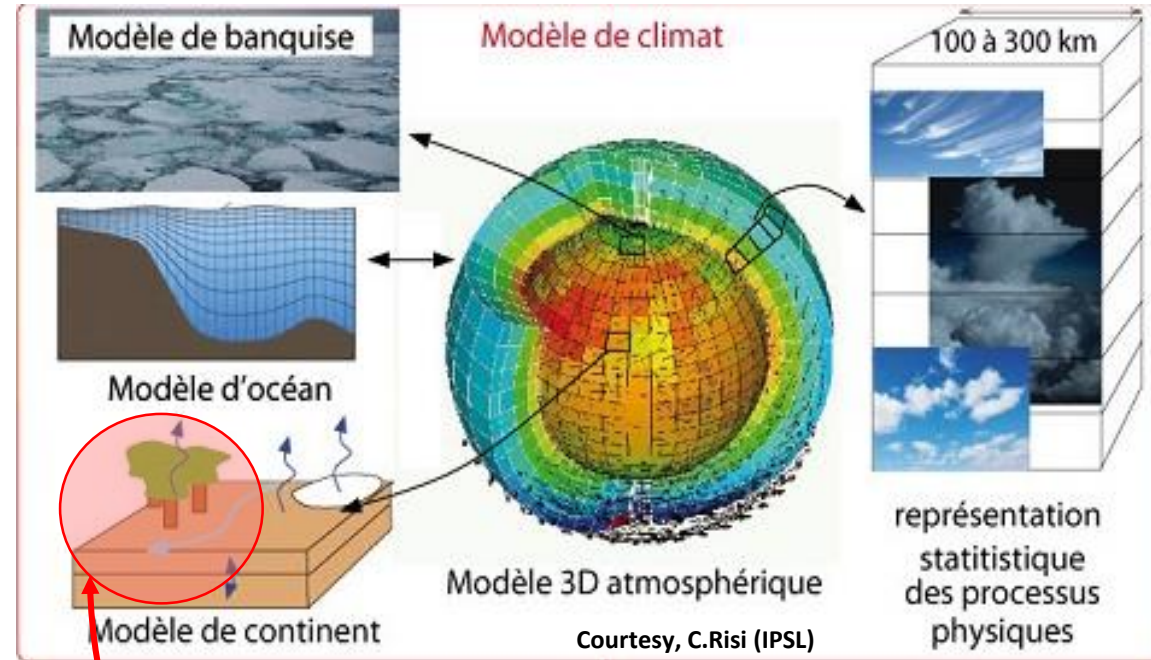
Matthieu Bogard ✉, Delphine Hourcade, Benoit Piquemal, David Gouache, Jean-Charles Deswartes, Mickael Throude, Jean-Pierre Cohan

*Journal of Experimental Botany*, Volume 72, Issue 4, 24 February 2021, Pages 1085–1103,  
<https://doi.org/10.1093/jxb/eraa477>

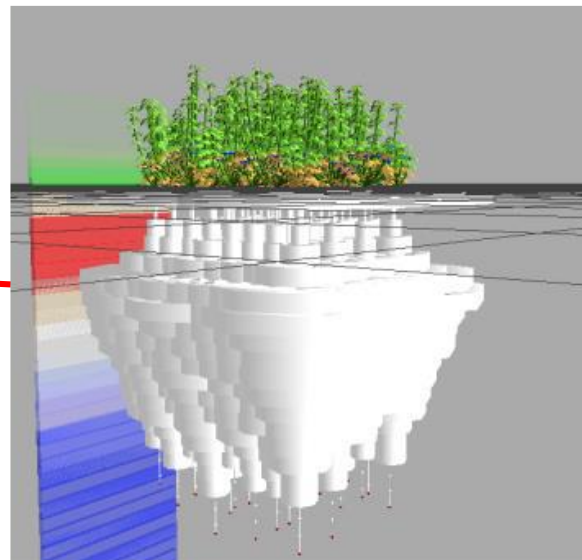


# > Perspectives

Améliorer les projections climatiques



- Flux d'eau
- Flux de carbone (atmosphère et sol)
- Température sol
- Albédo



Modèle plante - sol



➤ Merci de votre attention

## > Références

- Albasha R, Fournier C, Pradal C, Chelle M, Prieto JA, Louarn G, Simonneau T, Lebon E. 2019.** HydroShoot: a functional-structural plant model for simulating hydraulic structure, gas and energy exchange dynamics of complex plant canopies under water deficit—application to grapevine (*Vitis vinifera*). *in silico Plants* **1**.
- Begcy K, Nosenko T, Zhou L-Z, Fragner L, Weckwerth W, Dresselhaus T. 2019.** Male Sterility in Maize after Transient Heat Stress during the Tetrad Stage of Pollen Development1 [OPEN]. *Plant Physiology* **181**: 683–700.
- Bellocchi G. 2015.** Extreme events in agriculture: identification and impacts. : 53.
- Ben-Ari T, Boé J, Ciais P, Lecerf R, Van der Velde M, Makowski D. 2018.** Causes and implications of the unforeseen 2016 extreme yield loss in the breadbasket of France. *Nature Communications* **9**: 1627.
- Bogard M, Hourcade D, Piquemal B, Gouache D, Deswartes J-C, Throude M, Cohan J-P. 2021.** Marker-based crop model-assisted ideotype design to improve avoidance of abiotic stress in bread wheat. *Journal of Experimental Botany* **72**: 1085–1103.
- Boote KJ, Prasad V, Allen LH, Singh P, Jones JW. 2018.** Modeling sensitivity of grain yield to elevated temperature in the DSSAT crop models for peanut, soybean, dry bean, chickpea, sorghum, and millet. *European Journal of Agronomy* **100**: 99–109.
- Brunel-Muguet S, D’Hooghe P, Bataillé M-P, Larré C, Kim T-H, Trouverie J, Avice J-C, Etienne P, Dürr C. 2015.** Heat stress during seed filling interferes with sulfur restriction on grain composition and seed germination in oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Frontiers in Plant Science* **6**: 213.
- Collins B, Chenu K. 2021.** Improving productivity of Australian wheat by adapting sowing date and genotype phenology to future climate. *Climate Risk Management* **32**: 100300.
- Faye B, Webber H, Diop M, Mbaye ML, Owusu-Sekyere JD, Naab JB, Gaiser T. 2018.** Potential impact of climate change on peanut yield in Senegal, West Africa. *Field Crops Research* **219**: 148–159.
- Fischer A, Appenzeller C, Bey I, Bosshard T, Corti T, Croci-Maspoli M, Fischer EM, Fuhrer J, Knutti R, Kotlarski S. 2012.** Swiss Climate Change Scenarios: The CH2011 Initiative. In: EGU General Assembly Conference Abstracts. 7640.
- Garin G, Fournier C, Andrieu B, Houlès V, Robert C, Pradal C. 2014.** A modelling framework to simulate foliar fungal epidemics using functional–structural plant models. *Annals of Botany* **114**: 795–812.

- Gauthier M, Barillot R, Schneider A, Chambon C, Fournier C, Pradal C, Robert C, Andrieu B. 2020.** A functional structural model of grass development based on metabolic regulation and coordination rules. *Journal of Experimental Botany* **71**: 5454–5468.
- Hov Ø, Cubasch U, Fischer E, Höppe P, Iversen T, Gunnar Kvamstø N, Kundzewicz W. Z, Rezacova D, Rios D, Duarte Santos F, et al. 2013.** *Extreme Weather Events in Europe: preparing for climate change adaptation*. Oslo: Norwegian Meteorological Institute.
- IPCC, 2021:** Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
- Iqbal A, Aslam S, Alavoine G, Benoit P, Garnier P, Recous S. 2015.** Rain regime and soil type affect the C and N dynamics in soil columns that are covered with mixed-species mulches. *Plant and Soil* **393**: 319–334.
- Lobell DB, Field CB. 2007.** Global scale climate–crop yield relationships and the impacts of recent warming. *Environmental Research Letters* **2**: 014002.
- Magno L, Mollier A, Couceiro M, Avice JC, Brunel-Muguet S. 2020.** Modelling Memory: do crop models need to become nostalgic? iCROP 3-5 février 2020 (Montpellier, France).
- Pagani V, Guarneri T, Fumagalli D, Movedi E, Testi L, Klein T, Calanca P, Villalobos F, Lopez-Bernal A, Niemeyer S, et al. 2017.** Improving cereal yield forecasts in Europe – The impact of weather extremes. *European Journal of Agronomy* **89**: 97–106.
- Parent B, Turc O, Gibon Y, Stitt M, Tardieu F. 2010.** Modelling temperature-compensated physiological rates, based on the co-ordination of responses to temperature of developmental processes. *Journal of Experimental Botany* **61**: 2057–2069.
- Ray DK, Gerber JS, MacDonald GK, West PC. 2015.** Climate variation explains a third of global crop yield variability. *Nature Communications* **6**: 5989.
- Rouet S, Durand JL, Combes D, Escobar-Gutierrez A, Barillot R. 2020.** Modelling the genetic diversity of perennial grass phenology in contrasted temperate climates. In: 9th International Conference on Functional—Structural Plant Models. 43–44.
- Tibi A, Debaeke P, Ben-Ari T, Berard A, Biso A, Charcosset A, Durand J-L, Le Gouis J, Makowski D, Marrou H, et al. 2020.** *Place des agricultures européennes dans le monde à l’horizon 2050. Entre enjeux climatiques et défis de la sécurité alimentaire mondiale*. France: INRAE.
- Toreti A, Deryng D, Tubiello FN, Müller C, Kimball BA, Moser G, Boote K, Asseng S, Pugh TAM, Vanuytrecht E, et al. 2020.** Narrowing uncertainties in the effects of elevated CO<sub>2</sub> on crops. *Nature Food* **1**: 775–782.