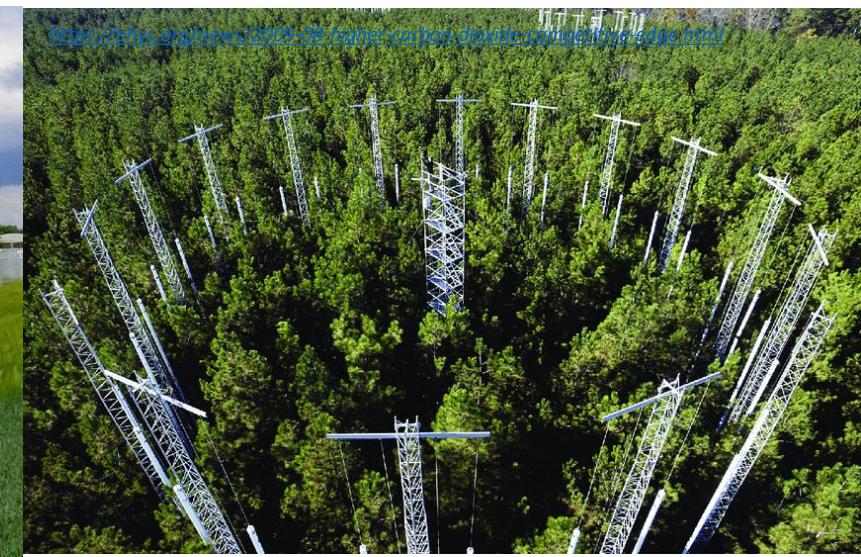


Impacts du changement climatique sur le fonctionnement et la productivité des agroécosystèmes

Focus sur l'impact des interactions entre CO₂, température et déficit hydrique

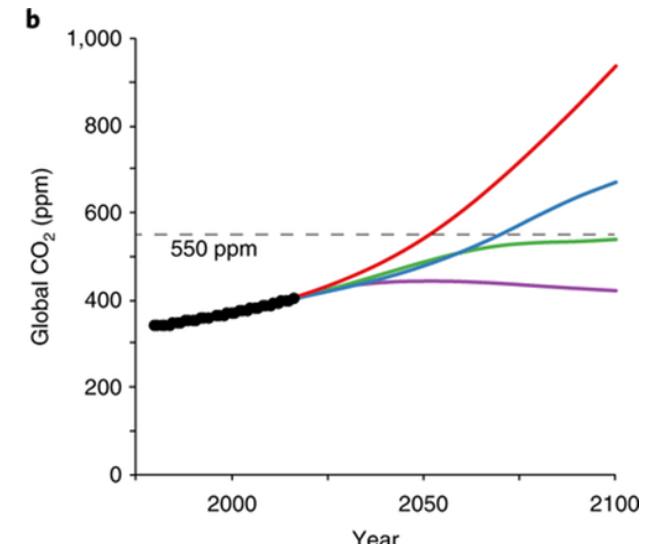


Marie-Odile Bancal, Meije Gawinowski, Karine Chenu, Marie Launay

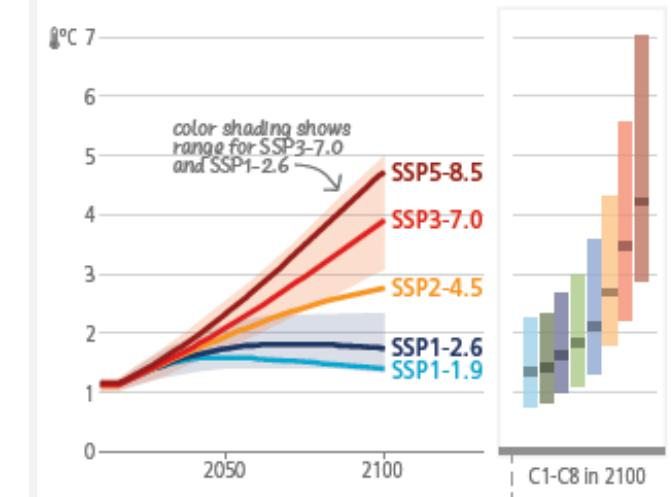


Changement climatique : les attendus pour le futur

- **CO₂ élevé (eCO₂) :**
 - 280-340 ppm entre 1750 et 1980
 - 415 ppm en 2020
 - Prédictions 550-1000 ppm en 2100
- **Températures élevées (eT) et stress thermiques**
 - +1.5°C à +4°C
- **Déficit hydrique/sécheresse, excès d'eau**
 - gammes historiques et futures ?



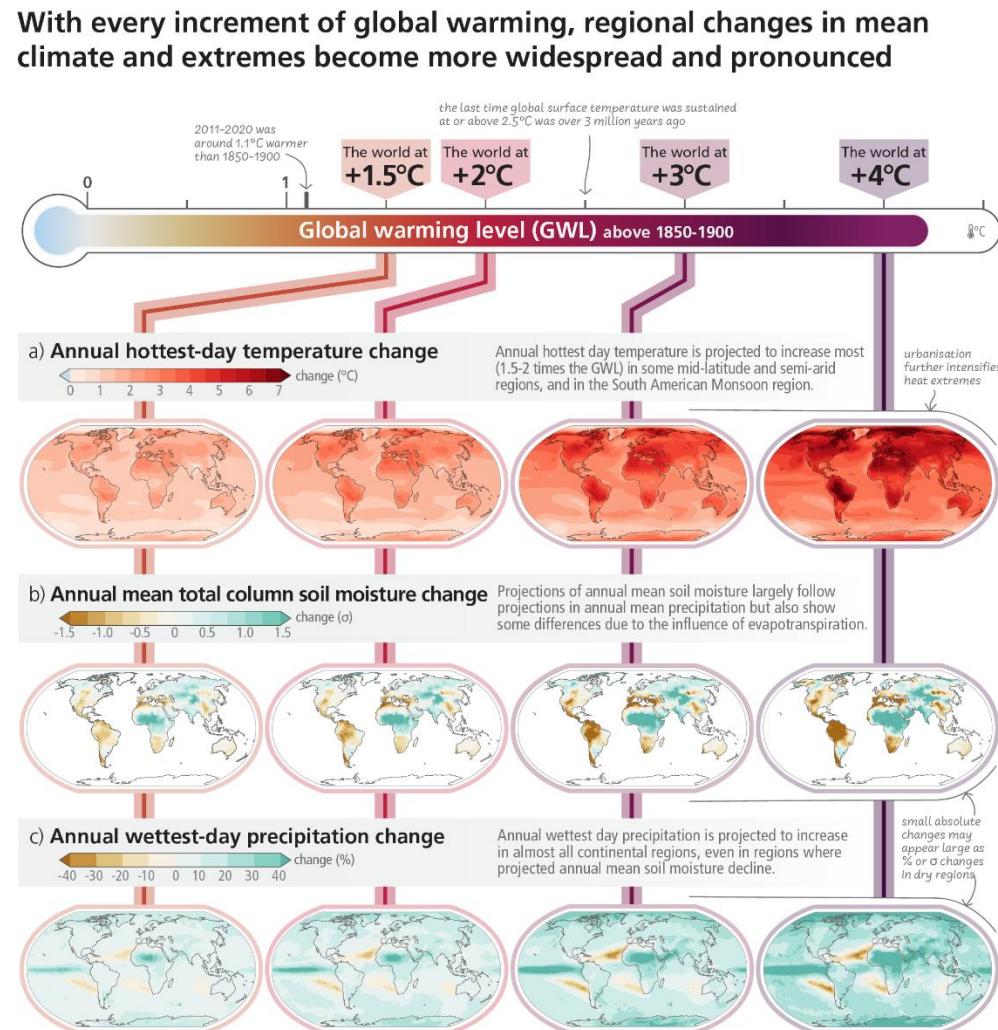
Temperature for SSP-based scenarios over the 21st century and C1-C8 at 2100



In *IPCC, Synthesis report 2023*

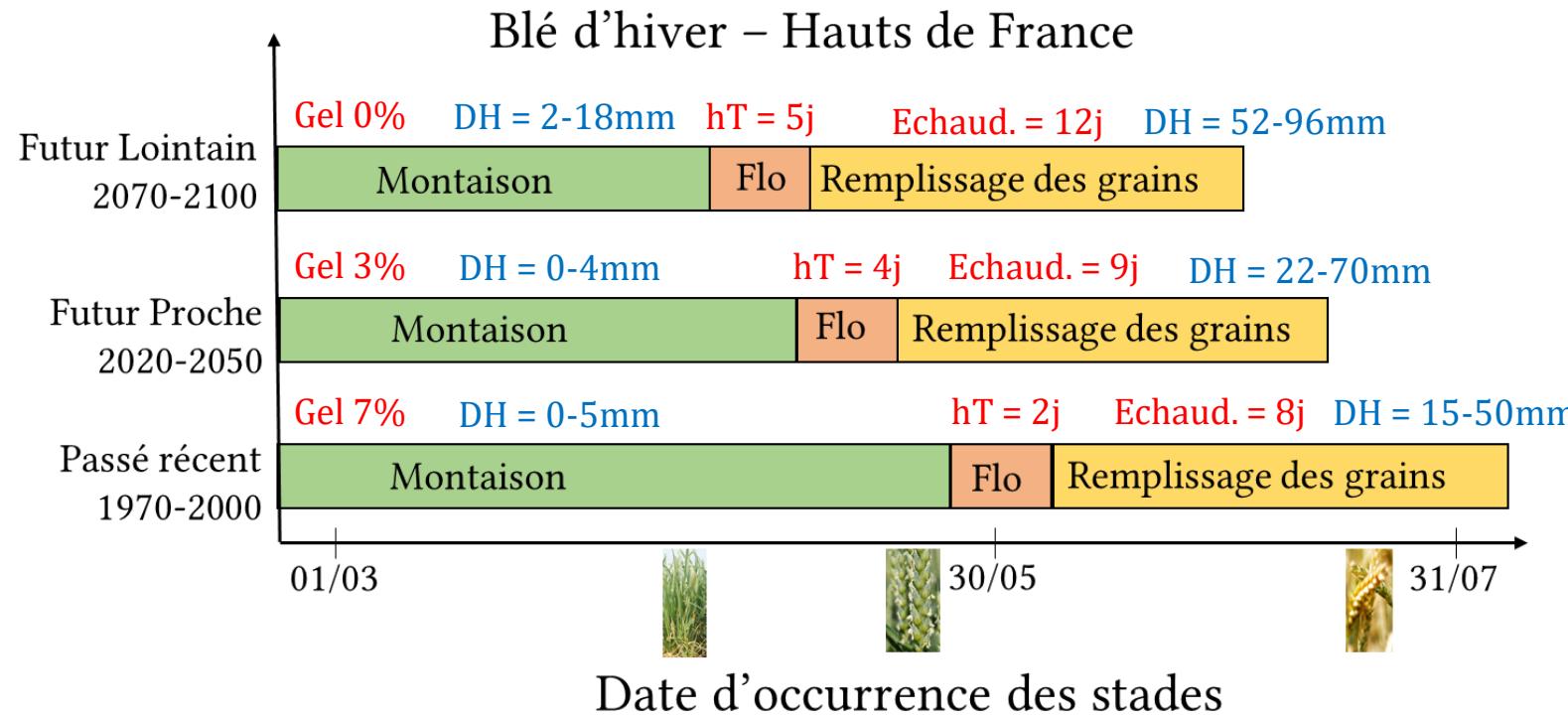
Changement climatique : les attendus pour le futur

- **CO₂ élevé (eCO₂) :**
 - 280-340 ppm entre 1750 et 1980
 - 415 ppm en 2020
 - Prédictions 550-1000 ppm en 2100
- **Températures élevées (eT) et stress thermiques**
 - +1.5°C à +4°C
- **Déficit hydrique/sécheresse, excès d'eau**
 - gammes historiques et futures ?



Les enjeux pour le futur

D'après Livre Vert Climat, 2010 



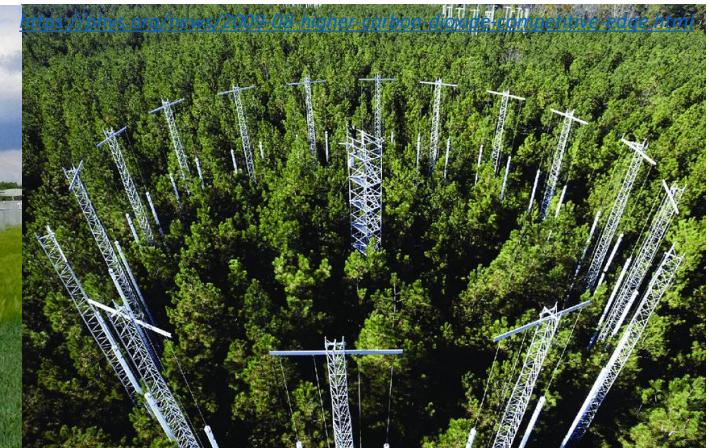
Des interactions fluctuantes entre facteurs climatiques pouvant aboutir à des stress multiples
→ besoin de décrire et comprendre

- Une augmentation de ressources en CO₂
- Un raccourcissement du cycle
- Une anticipation des stades
- Une diminution du risque de gel
- Une augmentation des déficits hydriques précoces et tardifs
- Une augmentation des épisodes de stress thermiques tardifs

Problématique

- 1) Effet fertilisant du CO₂ :** L'élévation du CO₂, en tant que ressource de carbone, compense-t-elle l'élévation de T° et des contraintes hydriques liées au changement climatique sur les couverts cultivés ?
- 2) Comment évalue-t-on **expérimentalement ces tendances** pour aboutir à une prédition robuste des impacts futurs ?

Quels moyens pour répondre à ces questions?



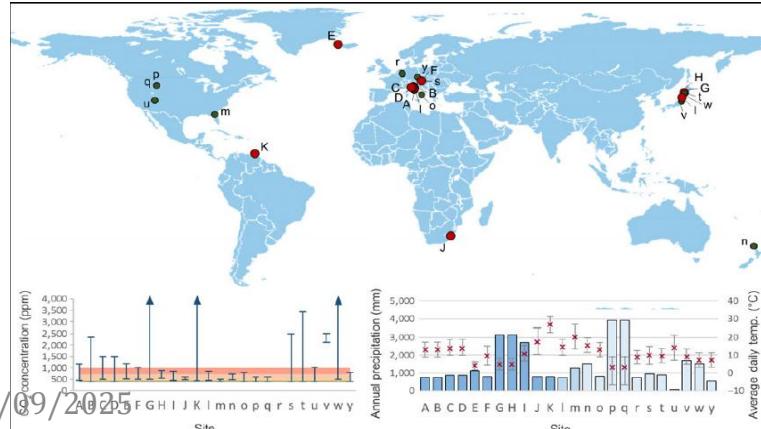
Différents moyens pour y répondre

Une grande gamme de dispositifs à l'échelle peuplement

Herbarium ou données



Sources naturelles de CO₂



Conditions semi- à contrôlées



Open-Top-Chambers



Les plantes dans un environnement à fort CO₂

Free-Air-CO₂ Enrichement (FACE)



Différents moyens pour y répondre

Une grande gamme de dispositifs à l'échelle peuplement

Herbarium ou données

Des suivis simplifiés à long terme Multi sites en conditions naturelles

Des gammes passées
Des interactions multiples
Co-facteurs

270 à 415 ppm

INRAE

Sources naturelles de CO₂

Impacts à long terme sur des populations naturelles : acclimatation Multi sites et témoins proches

Des gammes très larges fluctuantes
Des interactions multiples

Conditions semi- à contrôlées

Effets factoriels contrôlés Des gammes futures possibles

Peu de combinaisons de facteurs
Conditions très artificielles

Jusqu'à 1000 ppm

Open-Top-Chambers

Effets factoriels semi contrôlés / naturels

Des gammes futures possibles

Peu de combinaisons de facteurs Effets de bord

Jusqu'à 1000 ppm

Free-Air-CO₂ Enrichement (FACE)



Effets factoriels contrôlés
En conditions naturelles multisites
Des gammes futures possibles
Sur une large gamme d'espèces
En conditions naturelles multisites

Peu de combinaisons de facteurs
Gammes eCO₂ restreintes
Coût élevé
Fluctuations de eCO₂ importantes

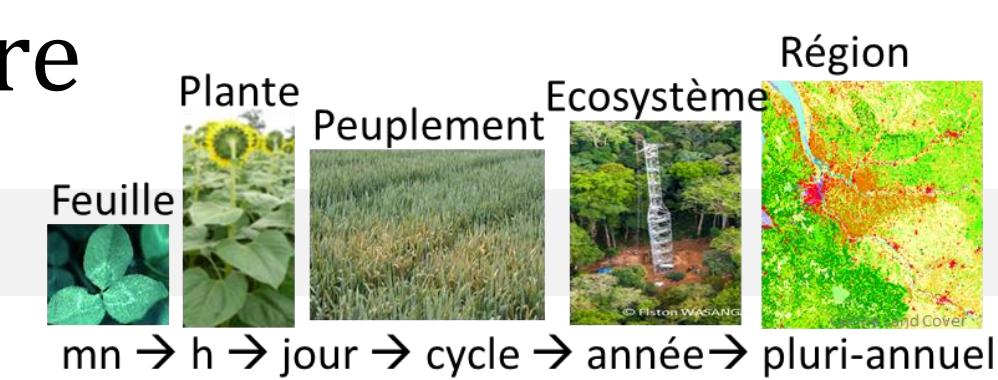
Ambiant +100 à +250 ppm



<https://phys.org/news/2009-08-higher-carbon-dioxide-competitive-edge.htm>

Différents moyens pour y répondre

Des mesures très variables



Directes : Flux (CO_2 et eau), Surface foliaire, Productivité brute/nette, Biomasse, Rendement

Indirectes: Traits (conductance gs ; surface spécifique; azote spécifique), croissance 2^{ère}, marqueurs génétiques ou isotopiques, GLAI (NDVI)

Des traitements de données très variables également

Valeurs absolues

Valeurs relatives

Avec une référence variable

Valeurs normalisées

Avec une interpolation linéaire

Valeurs simulées

Modèles de cultures – Modèles statistiques

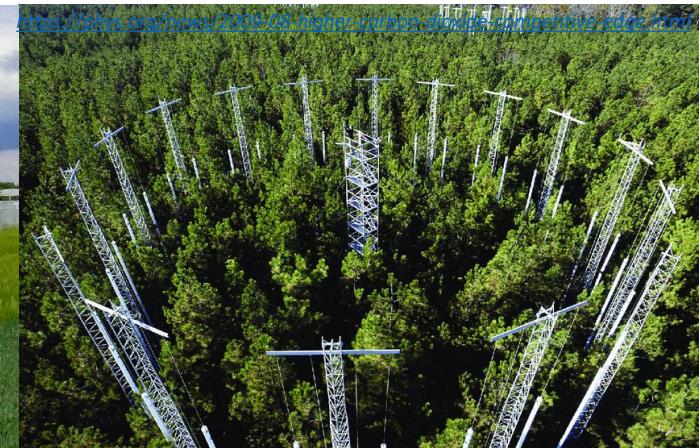
Synthèse biblio

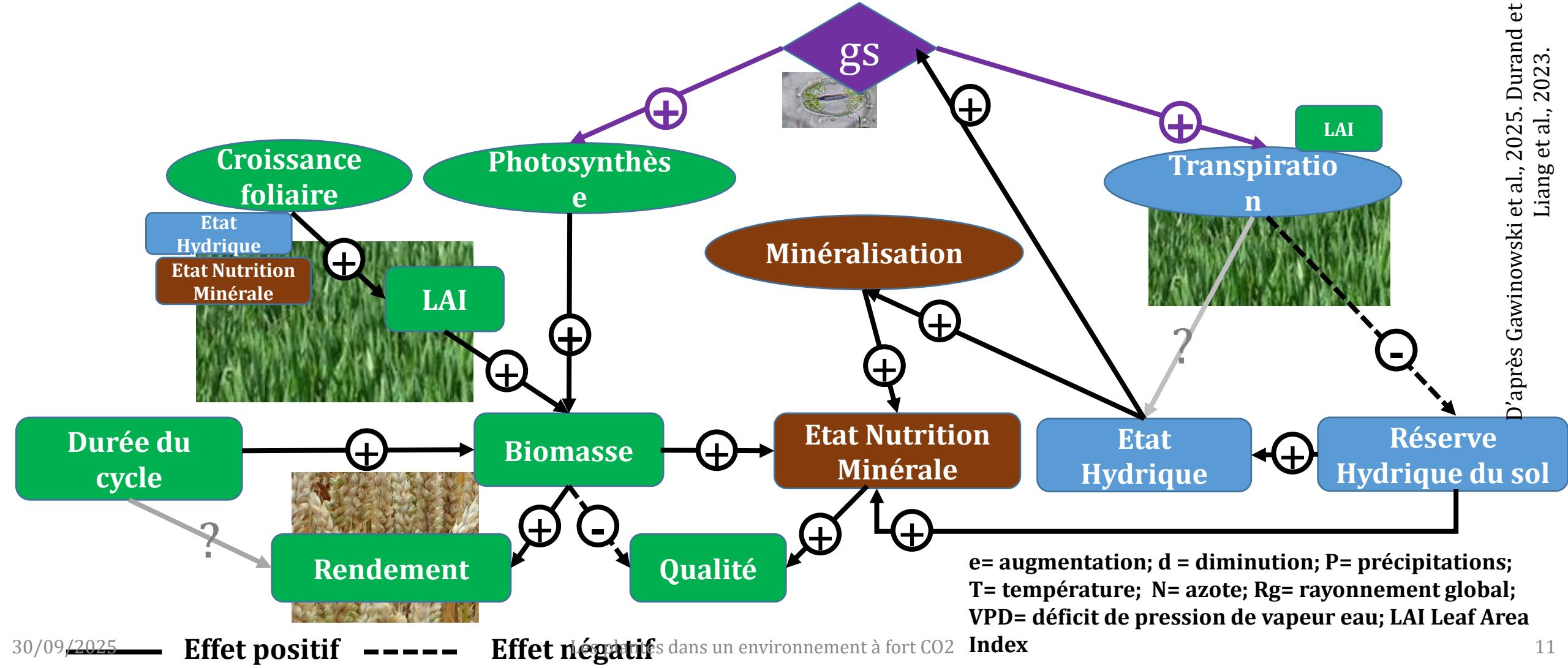
Méta-Analyses

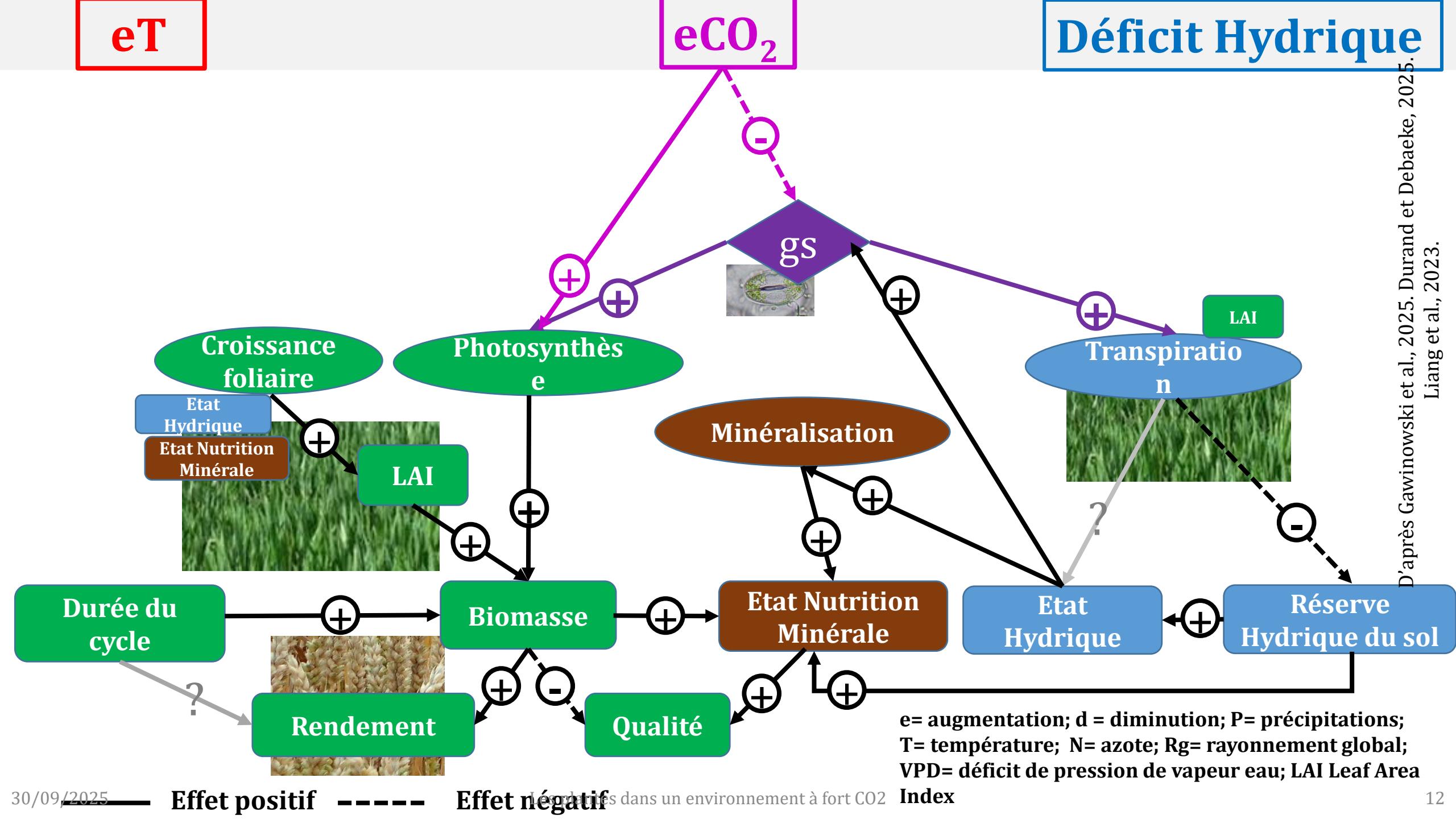
Expérimentations factorielles

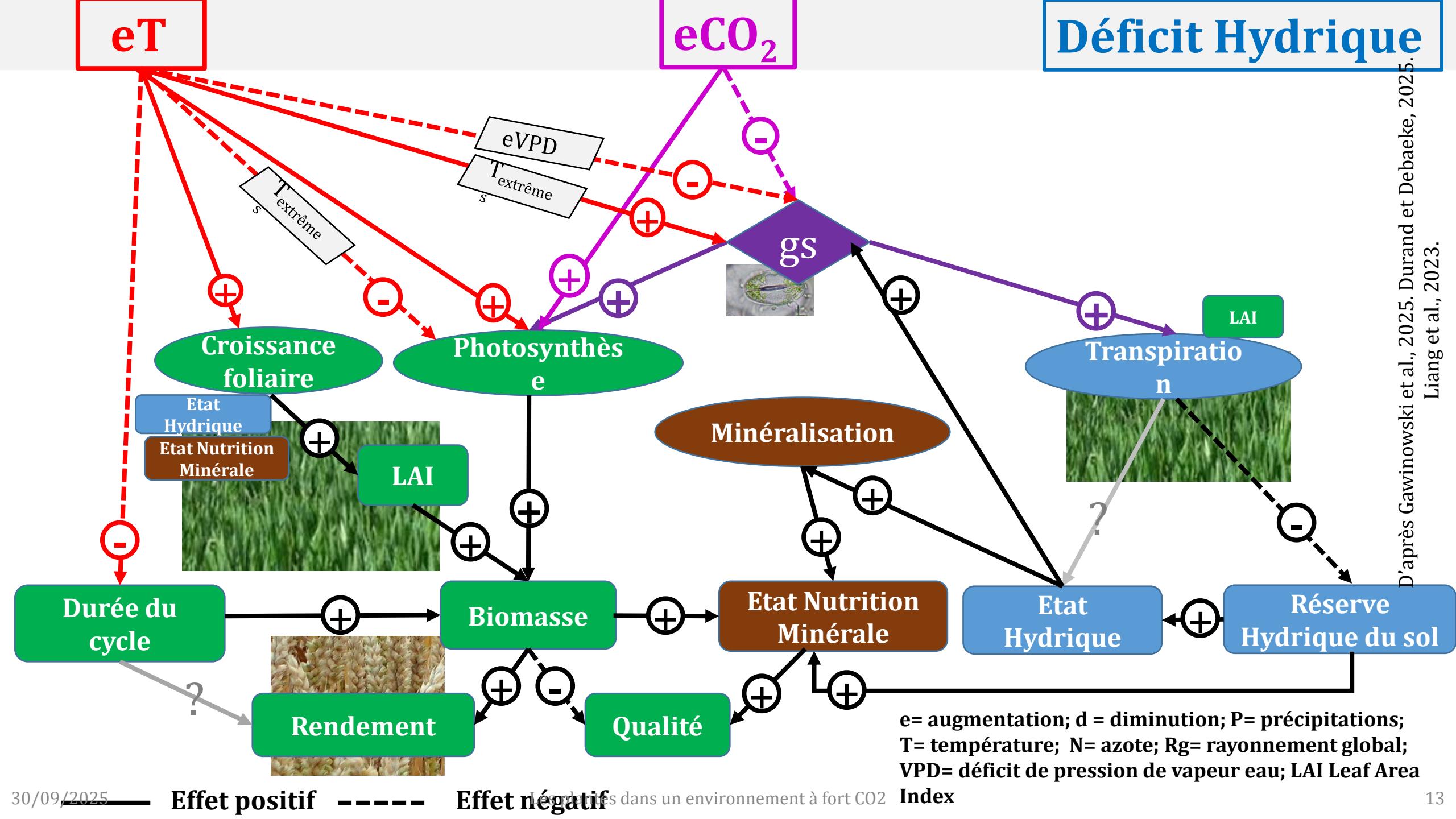
Calibration de modèles

Fonctionnement des agroécosystèmes sous changement climatique





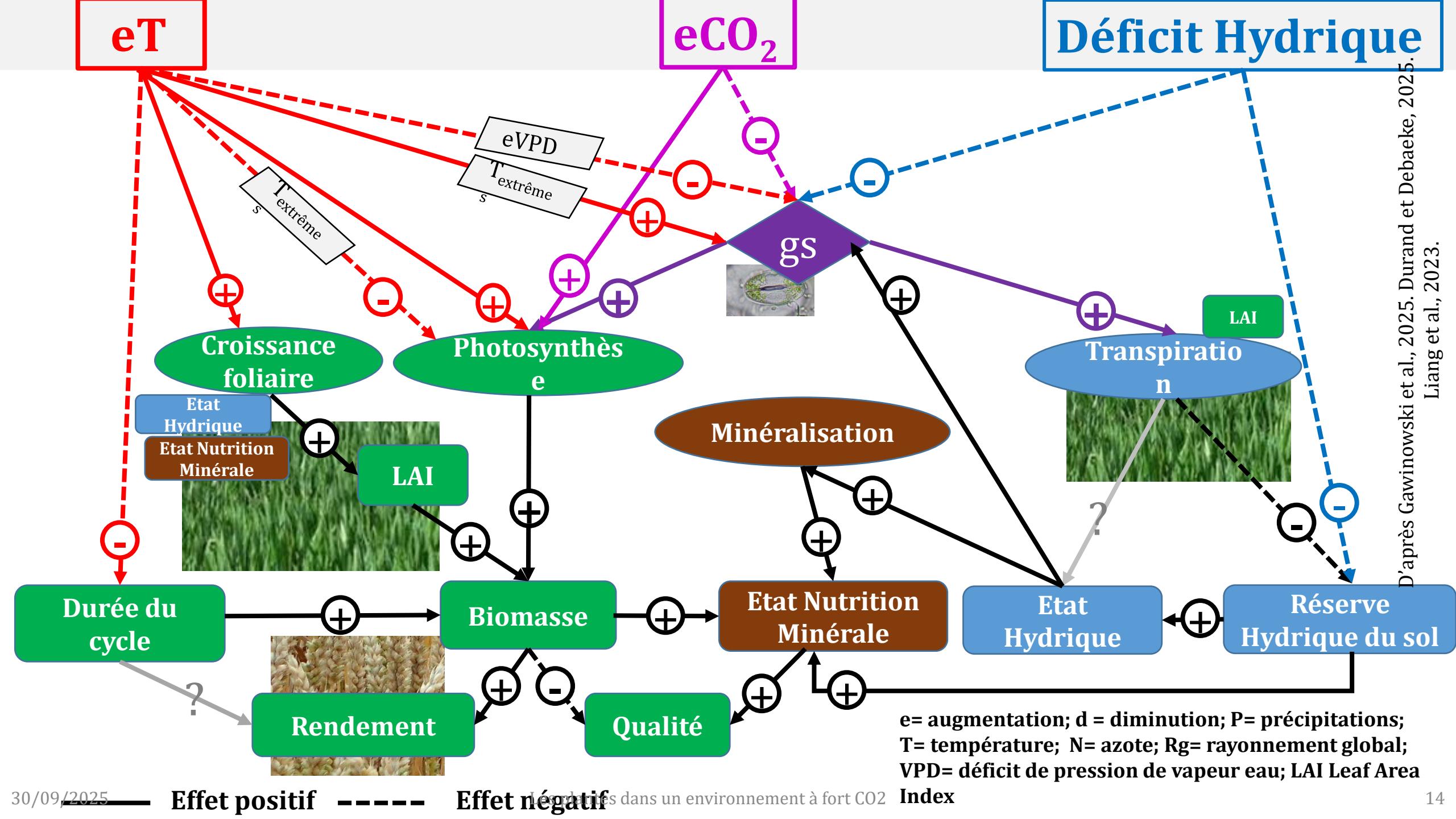




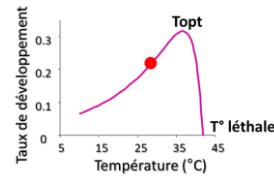
Déficit Hydrique

D'après Gawinowski et al., 2025. Durand et Debaeke, 2025.

Liang et al., 2023.

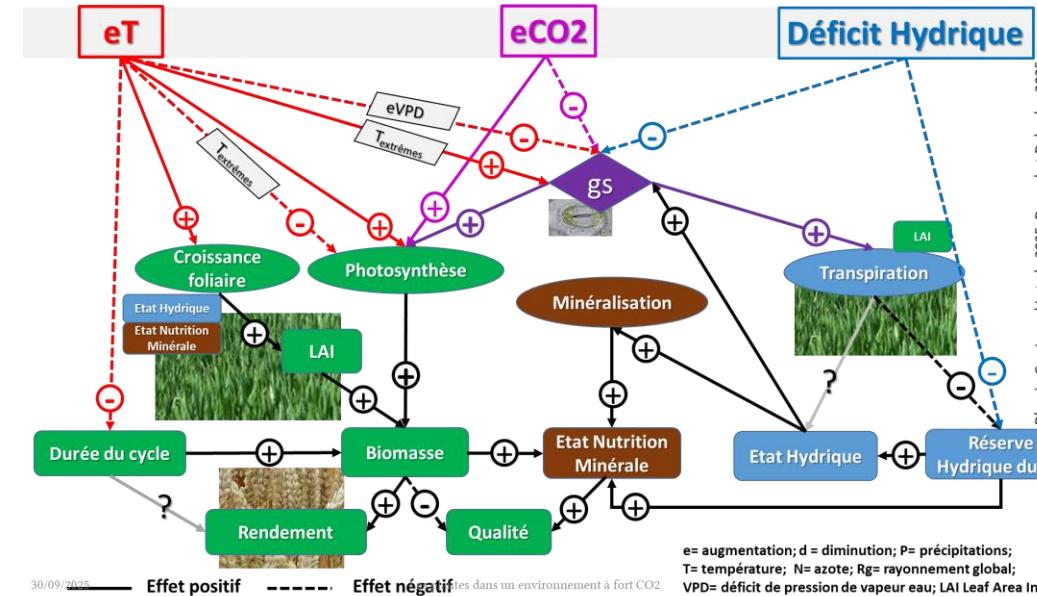


Fonctionnement des agroécosystèmes sous changement climatique



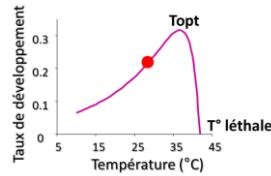
Sensibilité au eCO₂, eT° et Déficit hydrique

Par °C (T° < T°_{opt}) Par 100ppm CO₂ Avec déficit hydrique



*En italique ligneux
pérennes, hors conifères*

Fonctionnement des agroécosystèmes sous changement climatique



Sensibilité au eCO₂, eT° et Déficit hydrique

Par °C (T° < T°_{opt}) Par 100ppm CO₂ Avec déficit hydrique

gs: -8.3 %

Asat: + 8-12%
+ 20-30%

LAI: +13%

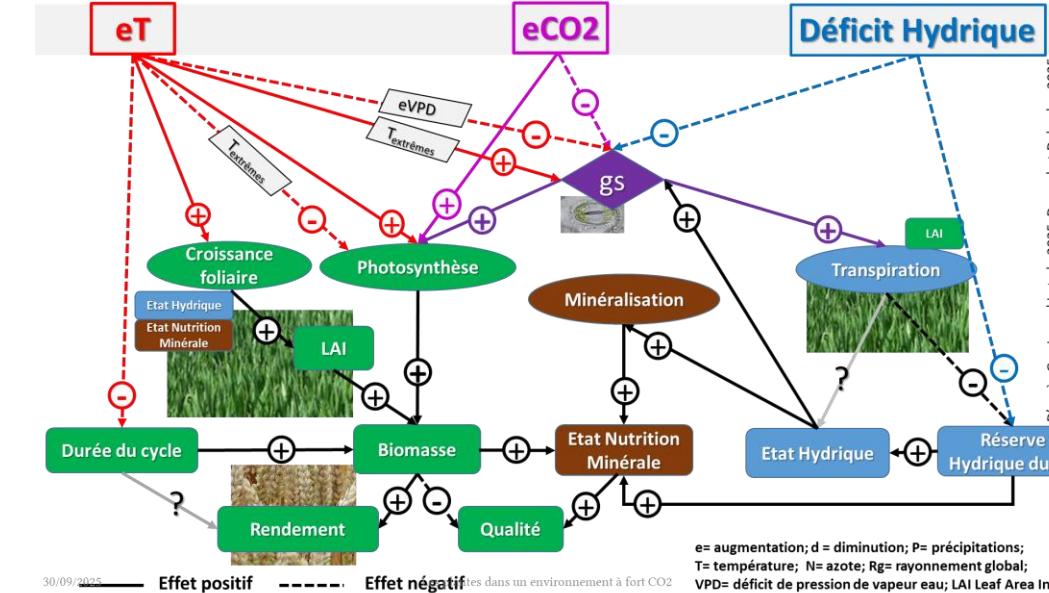
SLA: -3.5 à -5%

BM: + 8-10%
+ 26%

Rdt: + 9 %

+15%

*En italique ligneux
pérennes, hors conifères*



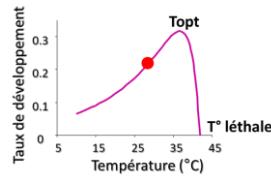
ET: -3 à -5%

Efficience de l'eau:
+28%

Nupt: +4-12 %

GPC: -3 à -8%

Fonctionnement des agroécosystèmes sous changement climatique



Sensibilité au eCO₂, eT° et Déficit hydrique

Par °C (T° < T°_{opt}) Par 100ppm CO₂ Avec déficit hydrique

gs: -8.3 % -1.5%

Asat: + 8-12% +4.8%
+ 20-30%

LAI: +13% Augmente

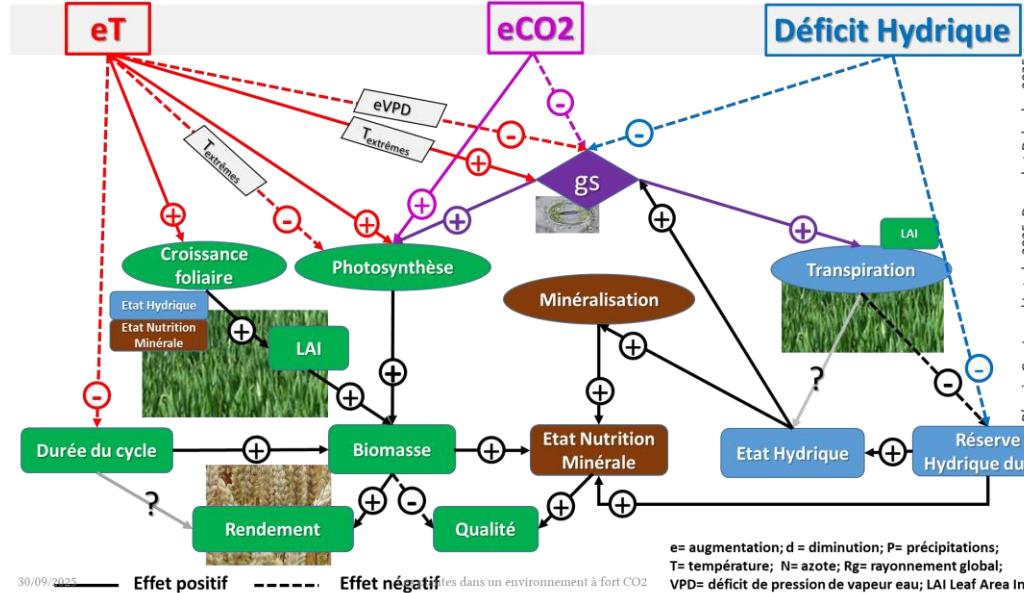
SLA: -3.5 à -5%

BM: + 8-10% +~5
+ 26% %

Rdt: + 9 % +5 %

+15%

*En italique ligneux
pérennes, hors conifères*



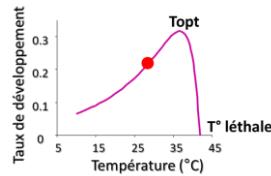
ET: -3 à -5%

Efficience de l'eau:
+28%

Nupt: +4-12 %

GPC: -3 à -8%

Fonctionnement des agroécosystèmes sous changement climatique



Sensibilité au eCO₂, eT° et Déficit hydrique

Par °C (T° < T°_{opt}) Par 100ppm CO₂ Avec déficit hydrique

gs: -8.3 % -1.5%

-3.5% pour -10% P

Asat: + 8-12% +4.8%

+ 20-30%

LAI: +13% Augmente

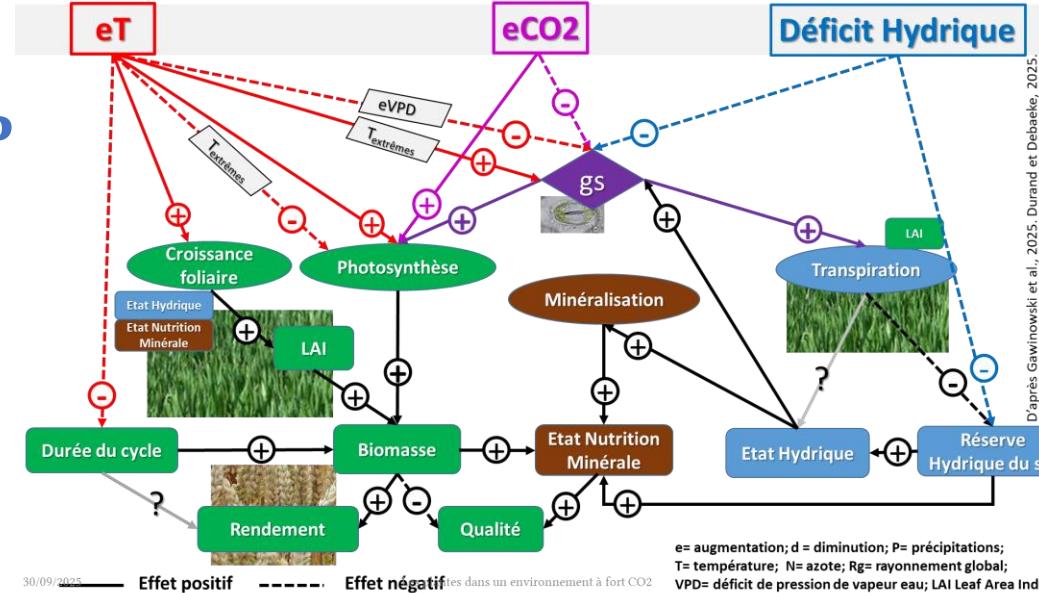
Diminue

SLA: -3.5 à -5%

BM: + 8-10% +~5

+ 26% Diminue %

*En italique ligneux
pérennes, hors conifères*



Rdt: + 9 % +5 %
+15% Diminue

GPC: -3 à -8%
Augmente

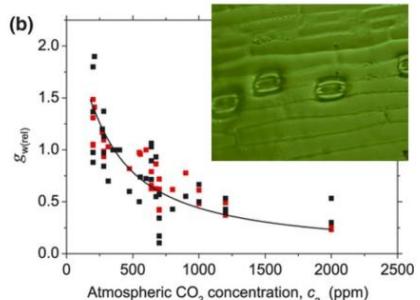
Nupt: +4-12 %

Diminue

ET: -3 à -5%
Diminue

Efficience de l'eau:
+28%

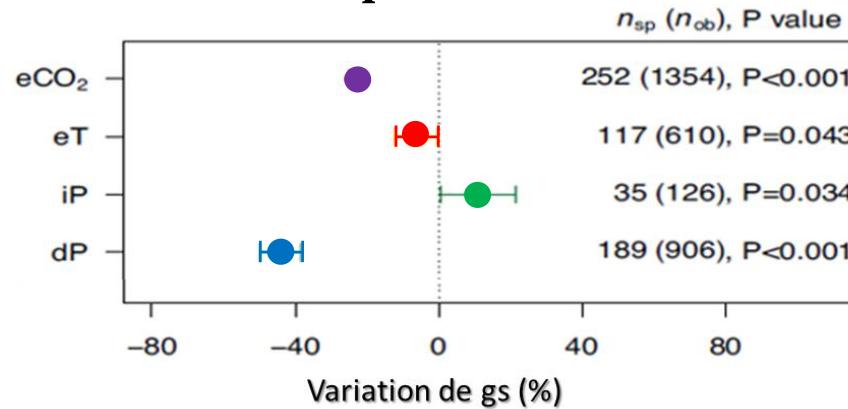
Fonctionnement des agroécosystèmes sous changement climatique



Avec des interactions entre facteurs parfois quantifiées



Effet simple relatif

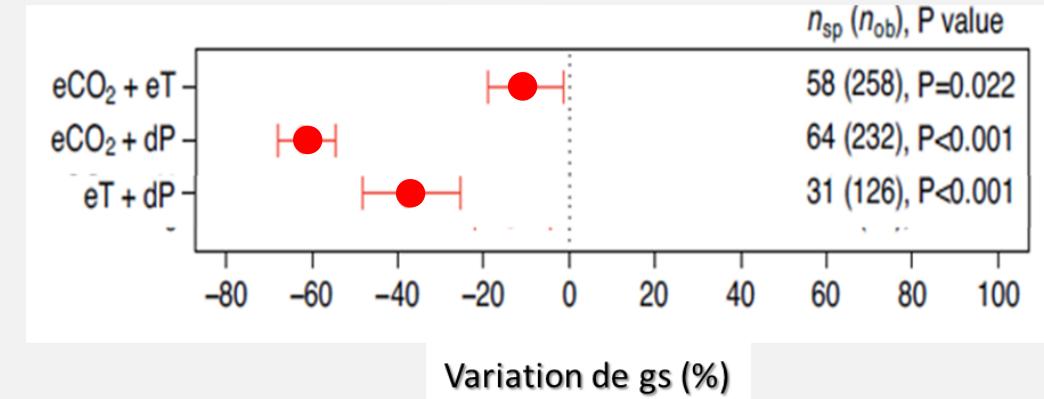


Baisse de conductance attendue
Sensibilités relatives

- 8,3% par 100 ppm eCO₂
- 1,5% par °C eT
- 3,5% par -10% dP

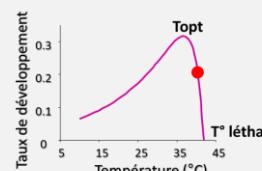
616 études 5500 paires
sur 444 espèces

Interactions



Effets globalement additifs

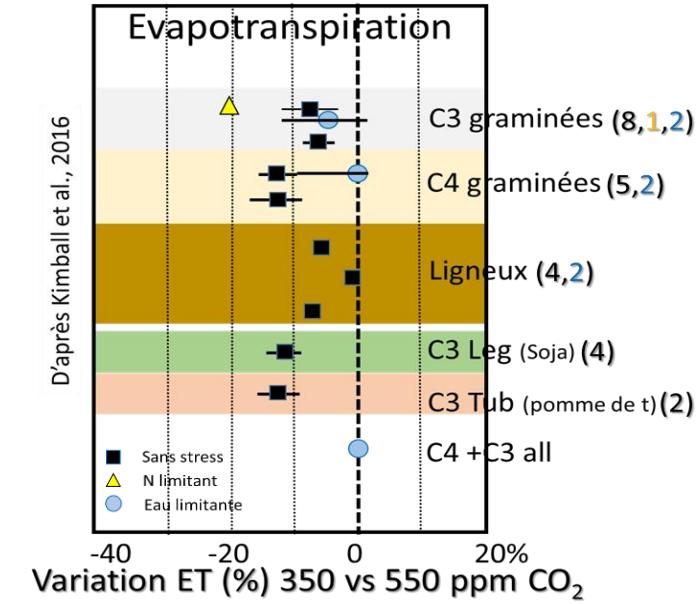
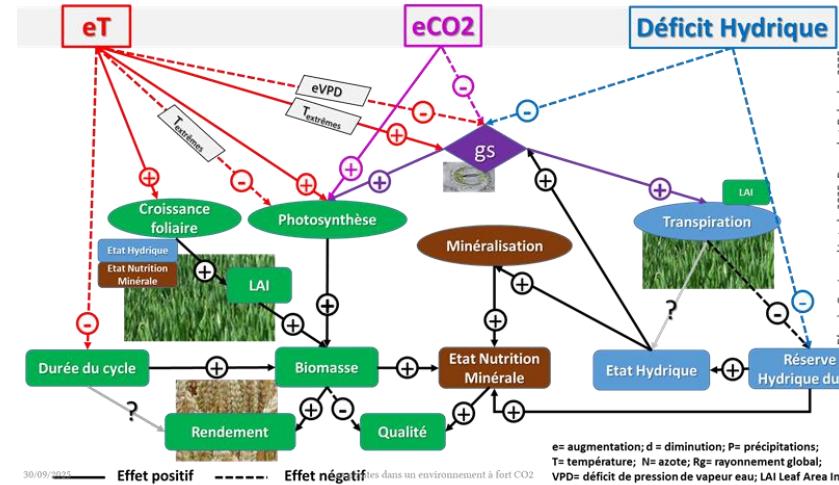
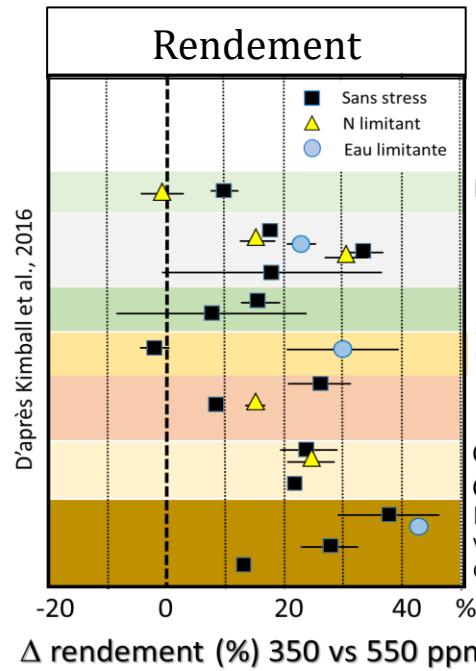
Mais ni les évènements extrêmes (T°) ni les sources de variabilités ne sont pris en compte



Source Liang et al., 2023
Méta-analyse, tous biomes

Fonctionnement des agroécosystèmes sous changement climatique

Et une variabilité de réponse selon types fonctionnels et stress environnementaux



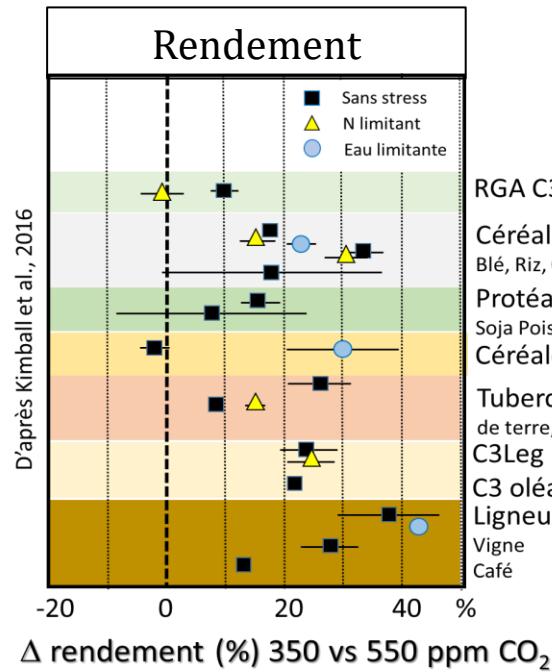
Qui permettent de classer la sensibilité des espèces cultivées

$\text{C3 tub} > \text{C3Leg} > \text{C3} > \text{C4}$

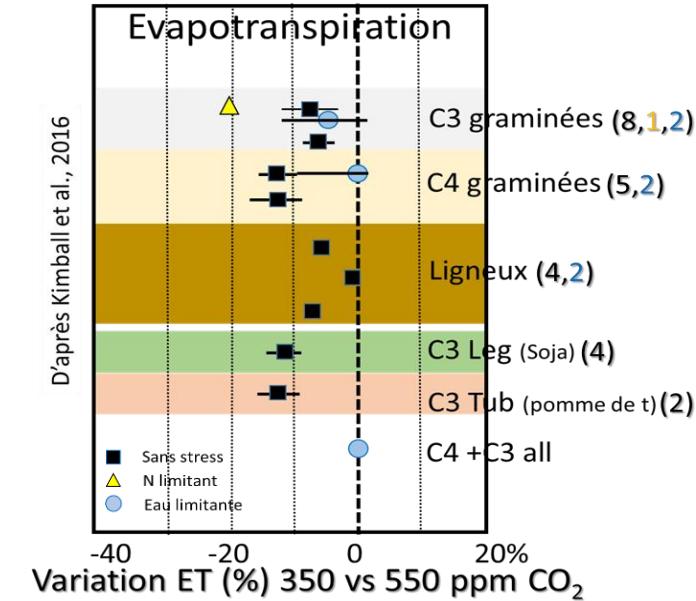
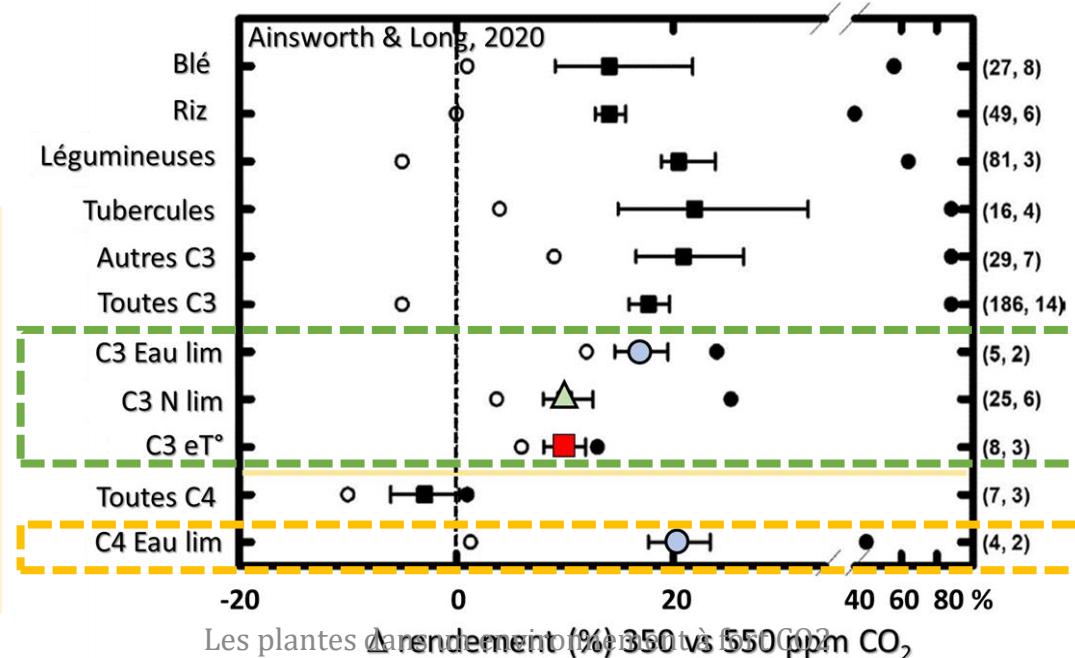
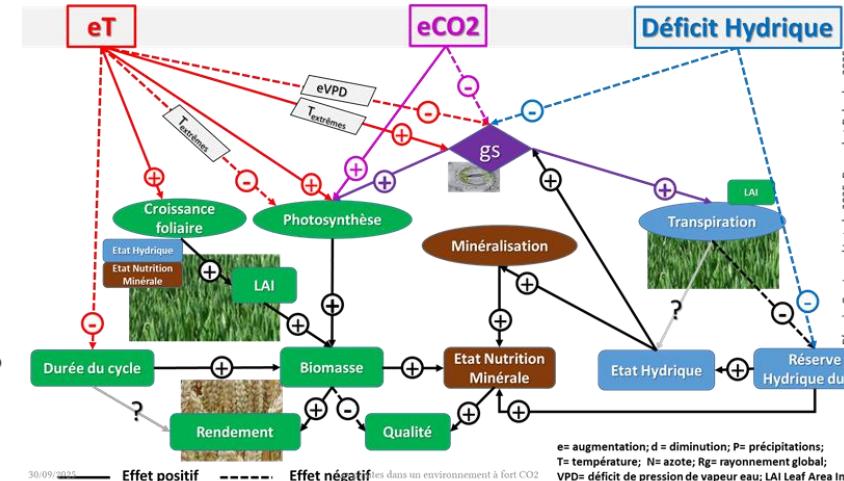
Pérennes>annuelles

Fonctionnement des agroécosystèmes sous changement climatique

Et une variabilité de réponse selon types fonctionnels et stress environnementaux



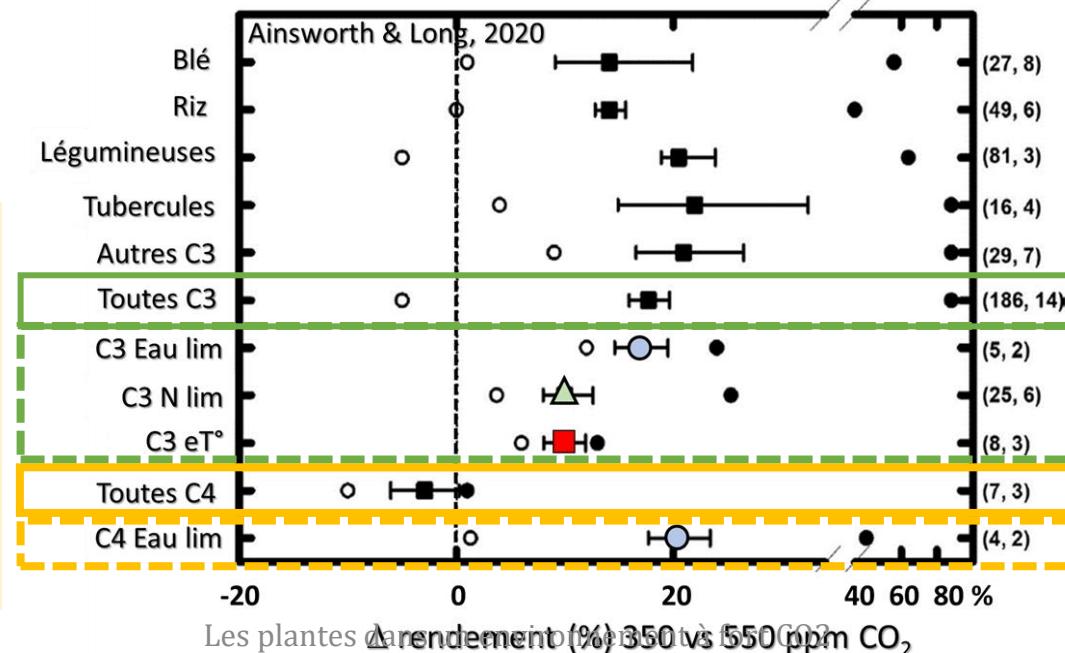
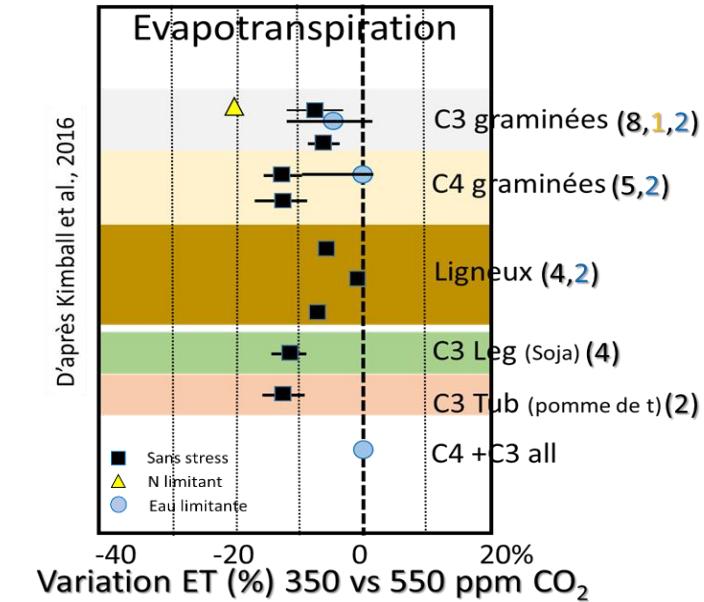
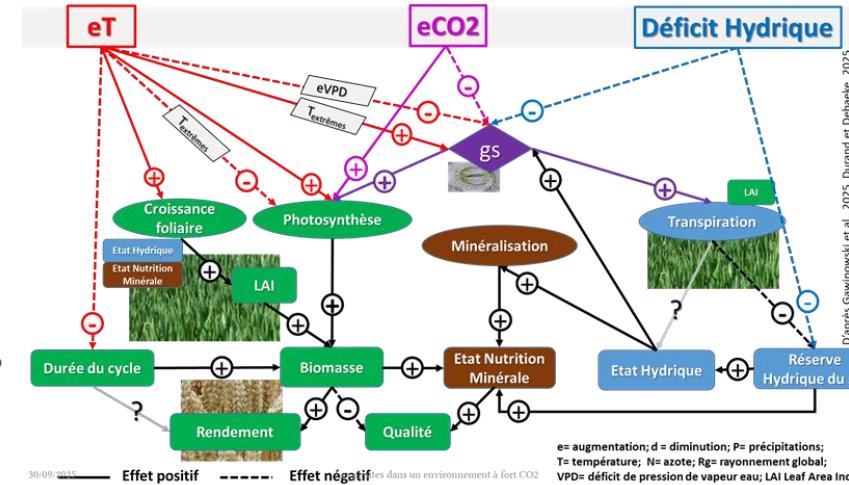
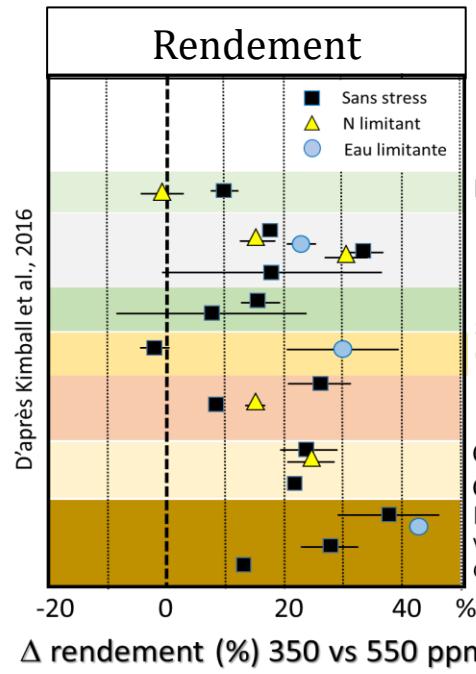
Qui permettent de classer la sensibilité des espèces cultivées
C3 tub > C3Leg > C3 > C4
Pérennes>annuelles



Et de mettre en évidence les interactions entre CO₂, T°, et stress hydrique ou azoté

Fonctionnement des agroécosystèmes sous changement climatique

Et une variabilité de réponse selon types fonctionnels et stress environnementaux



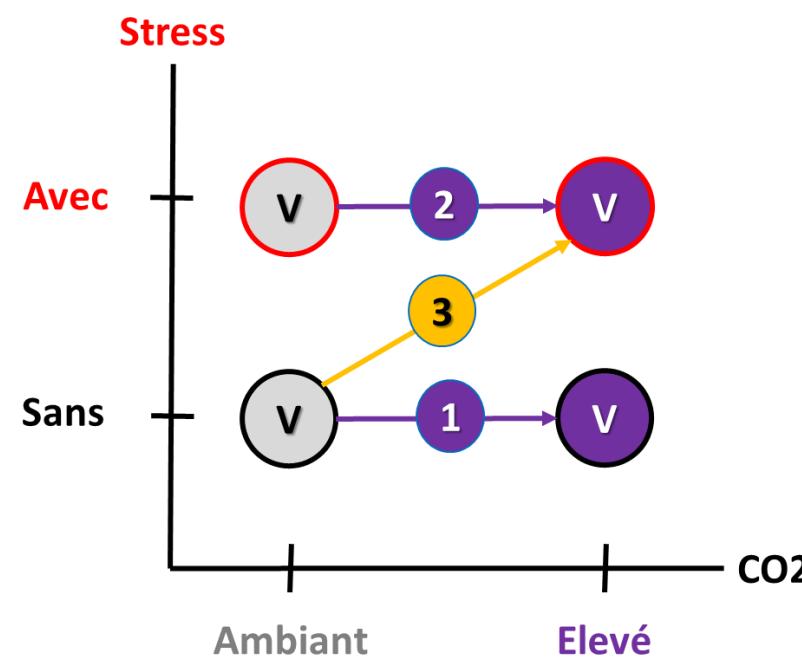
Qui permettent de classer la sensibilité des espèces cultivées
 C3 tub > C3Leg > C3 > C4
 Pérennes>annuelles

Et de mettre en évidence les interactions entre CO₂, T°, et stress hydrique ou azoté

Fonctionnement des agroécosystèmes sous changement climatique

Focus sur les céréales C3 (blé, riz) pour aller plus loin sur les interactions

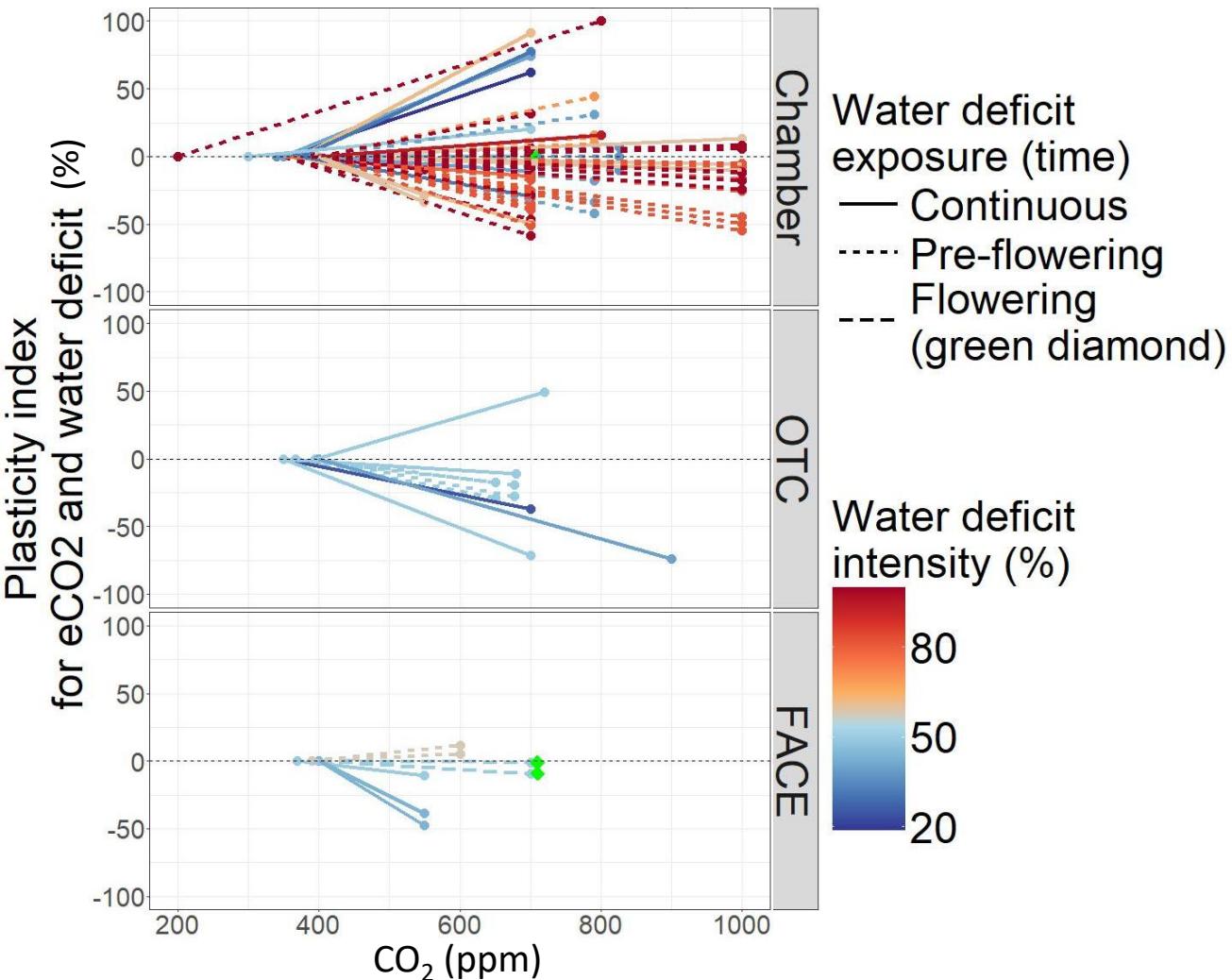
- Synthèse littérature scientifique des expérimentations combinant CO_2 , températures (hautes températures et vagues de chaleurs) et/ou déficit hydrique pour le **blé** (Gawinowski et al. (2025); projet FSOV REGARD, porteur Arvalis)
- Indicateurs relatifs pour évaluer interaction vs compensation entre CO_2 et facteurs climatiques adverses
- Deux types de variables d'intérêt : productivité (rendement, biomasse, assimilation) et consommation en eau (transpiration, conductance, efficience)



- **Interactions (2 vs 1) : Est-ce que l'effet du CO_2 est le même en conditions ambiantes vs stressantes ?**
- **Compensation (3) : Quel est l'effet du CO_2 combiné au réchauffement et/ou au déficit hydrique ?**

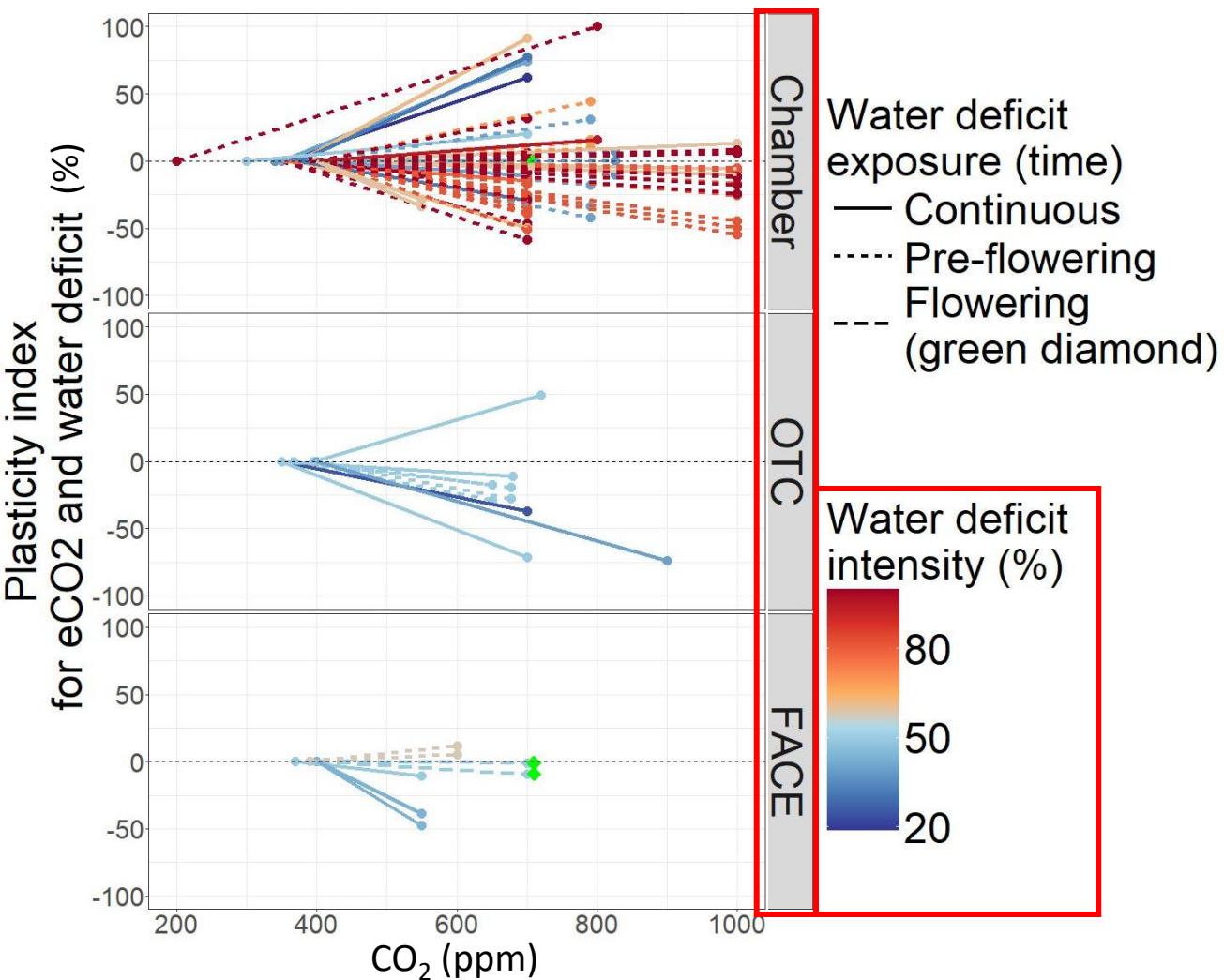
Compensation CO_2 x déficit hydrique sur la productivité du blé

Représentation des indices relatifs sous forme de normes de réaction pour la compensation sur la productivité



Compensation CO_2 x déficit hydrique sur la productivité du blé

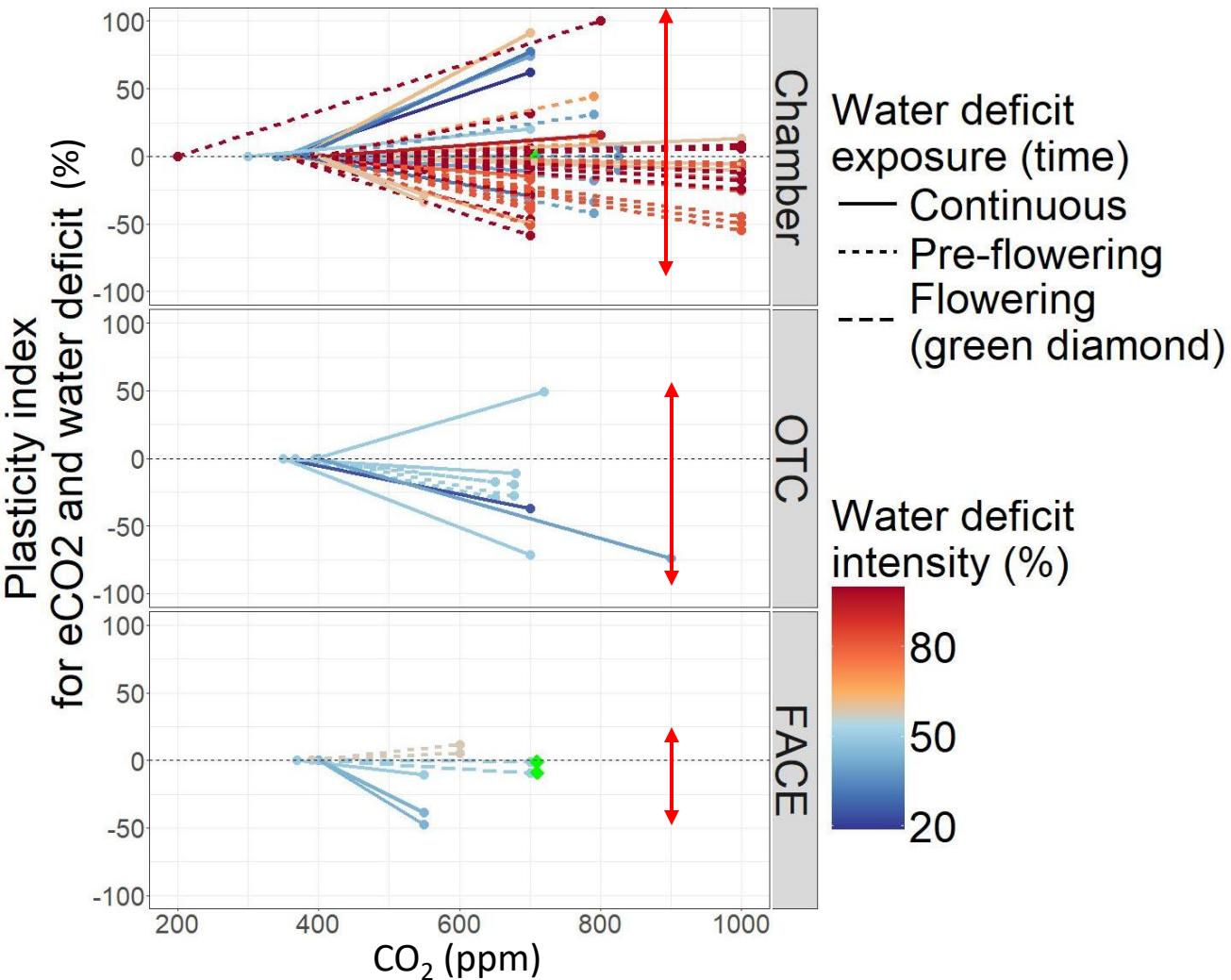
Représentation des indices relatifs sous forme de normes de réaction pour la compensation sur la productivité



- Des expérimentations déséquilibrées en nombre et en intensité entre les dispositifs

Compensation $\text{CO}_2 \times$ déficit hydrique sur la productivité du blé

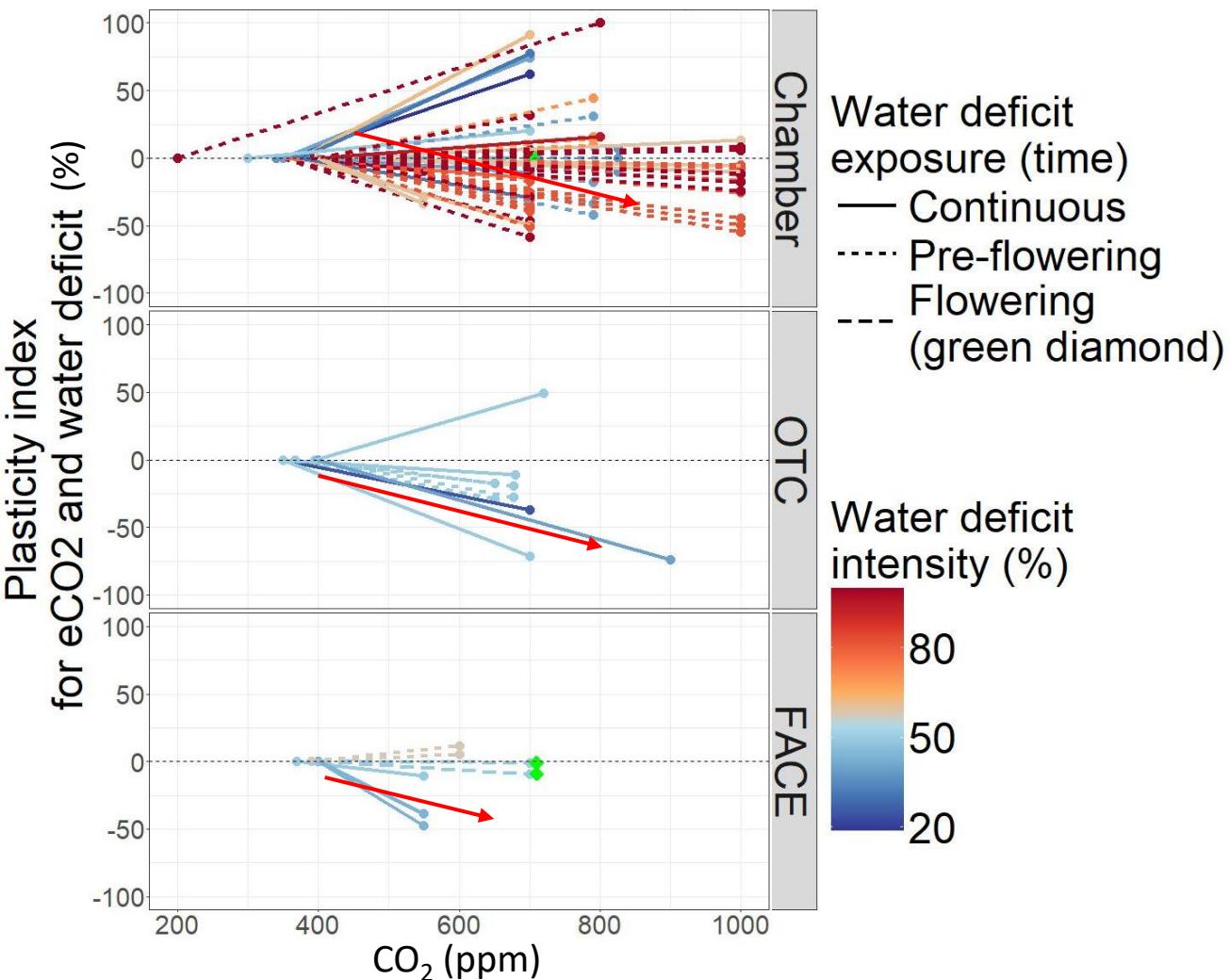
Représentation des indices relatifs sous forme de normes de réaction pour la compensation sur la productivité



- Des expérimentations déséquilibrées en nombre et en intensité entre les dispositifs
- Les réponses relatives en conditions $\text{CO}_2 \times$ déficit hydrique sont très variables

Compensation $\text{CO}_2 \times$ déficit hydrique sur la productivité du blé

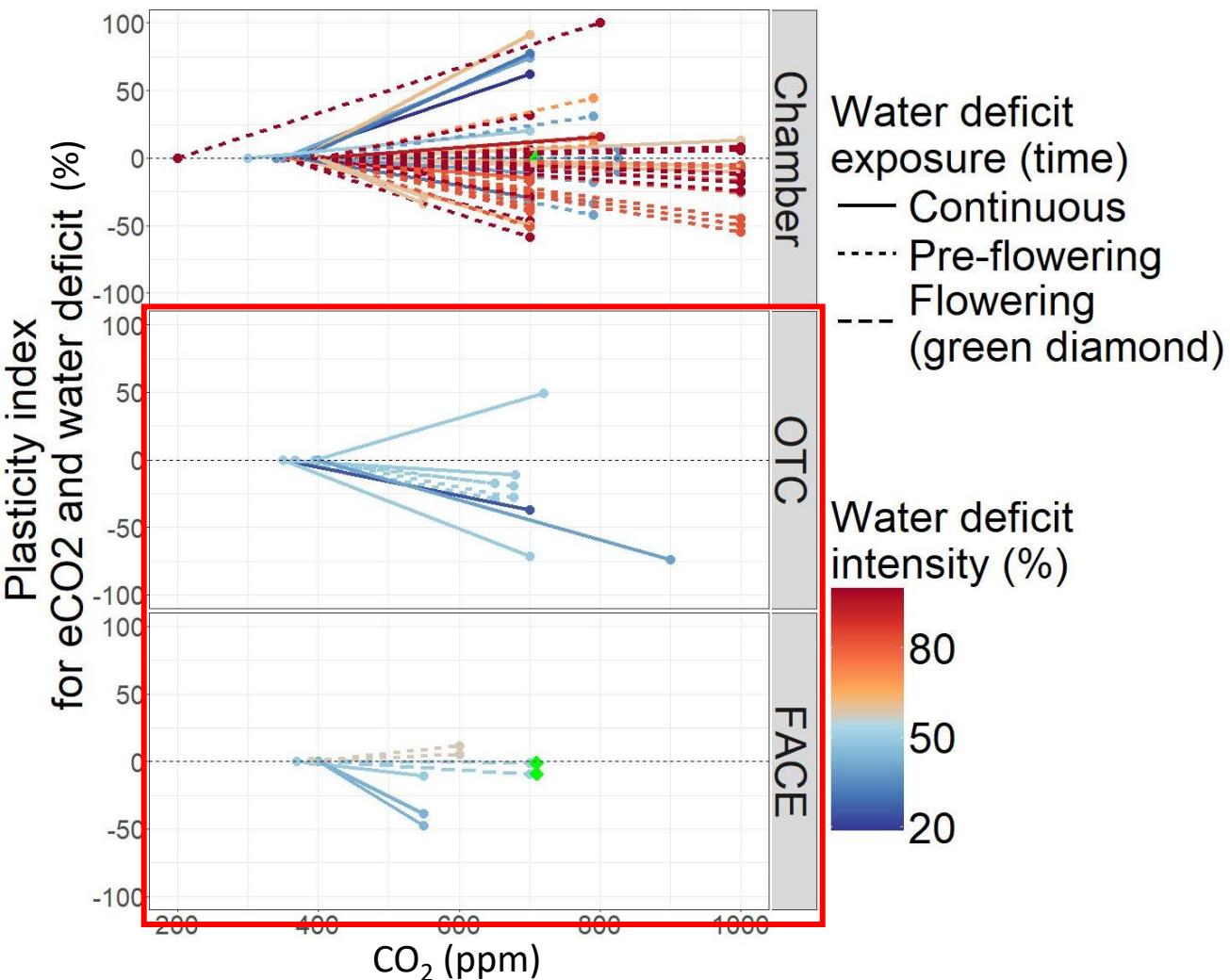
Représentation des indices relatifs sous forme de normes de réaction pour la compensation sur la productivité



- Des expérimentations déséquilibrées en nombre et en intensité entre les dispositifs
- Les réponses relatives en conditions $\text{CO}_2 \times$ déficit hydrique sont très variables
- Diminution moyenne de la productivité (-9%, 55/79 des cas) → l'augmentation de CO_2 ne compense pas les effets adverses du déficit hydrique sur la productivité

Compensation $\text{CO}_2 \times$ déficit hydrique sur la productivité du blé

Représentation des indices relatifs sous forme de normes de réaction pour la compensation sur la productivité



- Des expérimentations déséquilibrées en nombre et en intensité entre les dispositifs
- Les réponses relatives en conditions $\text{CO}_2 \times$ déficit hydrique sont très variables
- Diminution moyenne de la productivité (-9%, 55/79 des cas) → l'augmentation de CO_2 ne compense pas les effets adverses du déficit hydrique sur la productivité
- Malgré des intensités faibles de déficit hydrique, les réponses sont à la diminution en OTC et en FACE

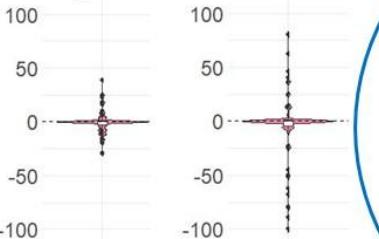
Compensation sur la productivité du blé

Réchauffement

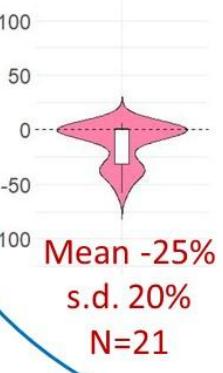
- Hautes températures (HT)
- Vagues de chaleur (HW)

Déficit hydrique (WD)

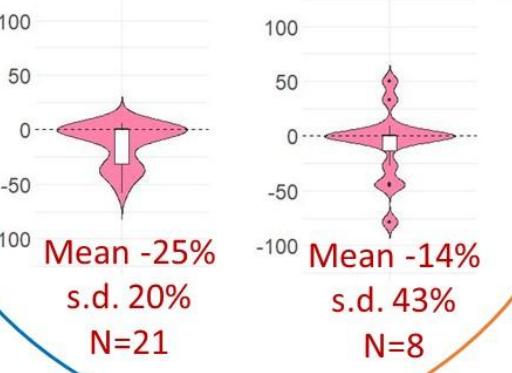
$eCO_2 \times HT$



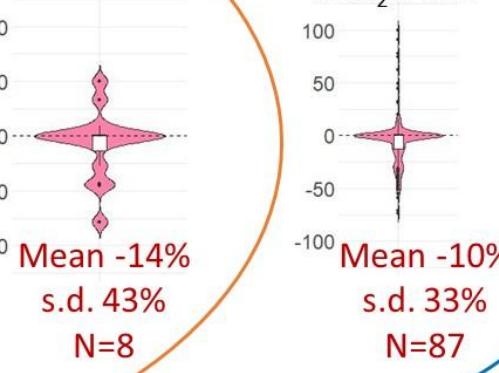
$eCO_2 \times HW$



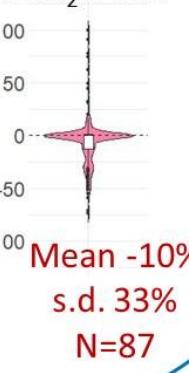
$eCO_2 \times WD \times HT$



$eCO_2 \times WD \times HW$



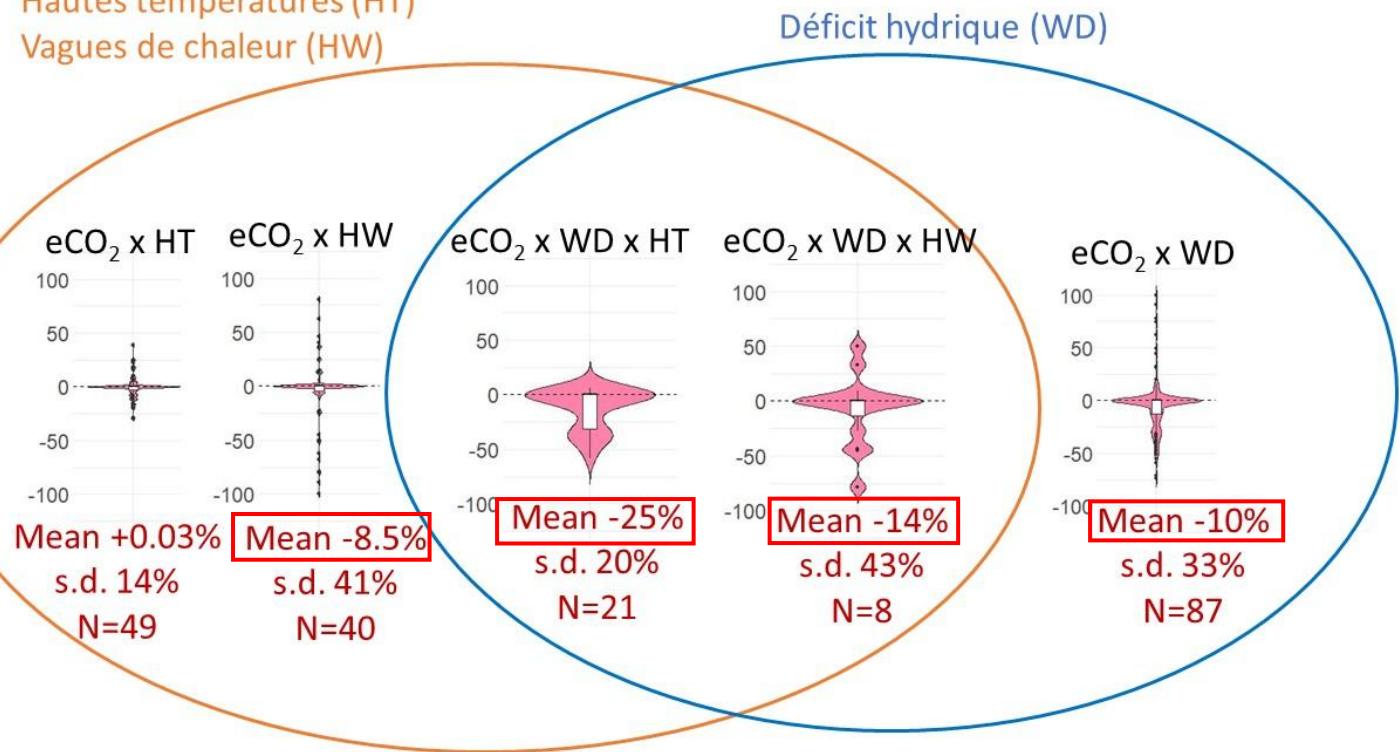
$eCO_2 \times WD$



Compensation sur la productivité du blé

Réchauffement

- Hautes températures (HT)
- Vagues de chaleur (HW)

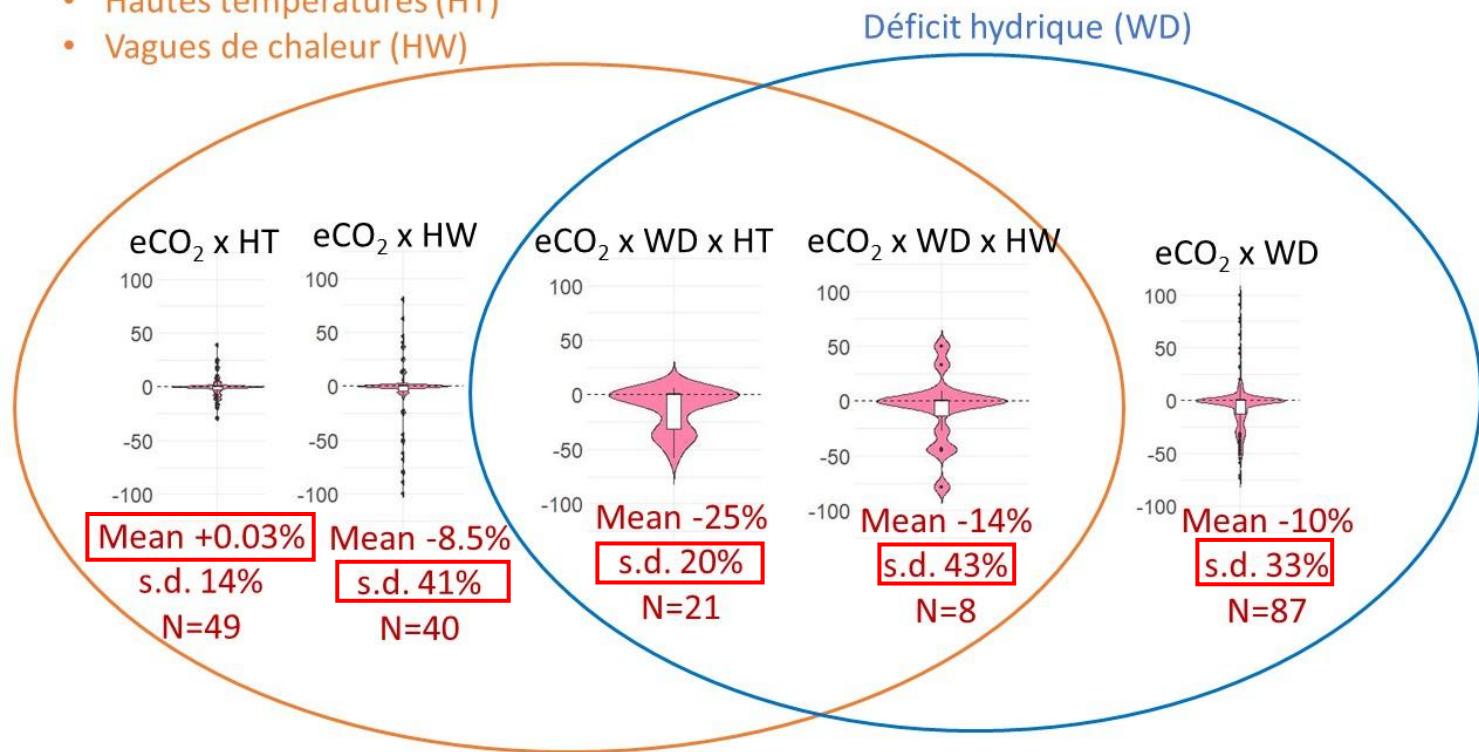


- Tendance générale de diminution de la productivité dans les conditions pseudo-futures expérimentées.

Compensation sur la productivité du blé

Réchauffement

- Hautes températures (HT)
- Vagues de chaleur (HW)

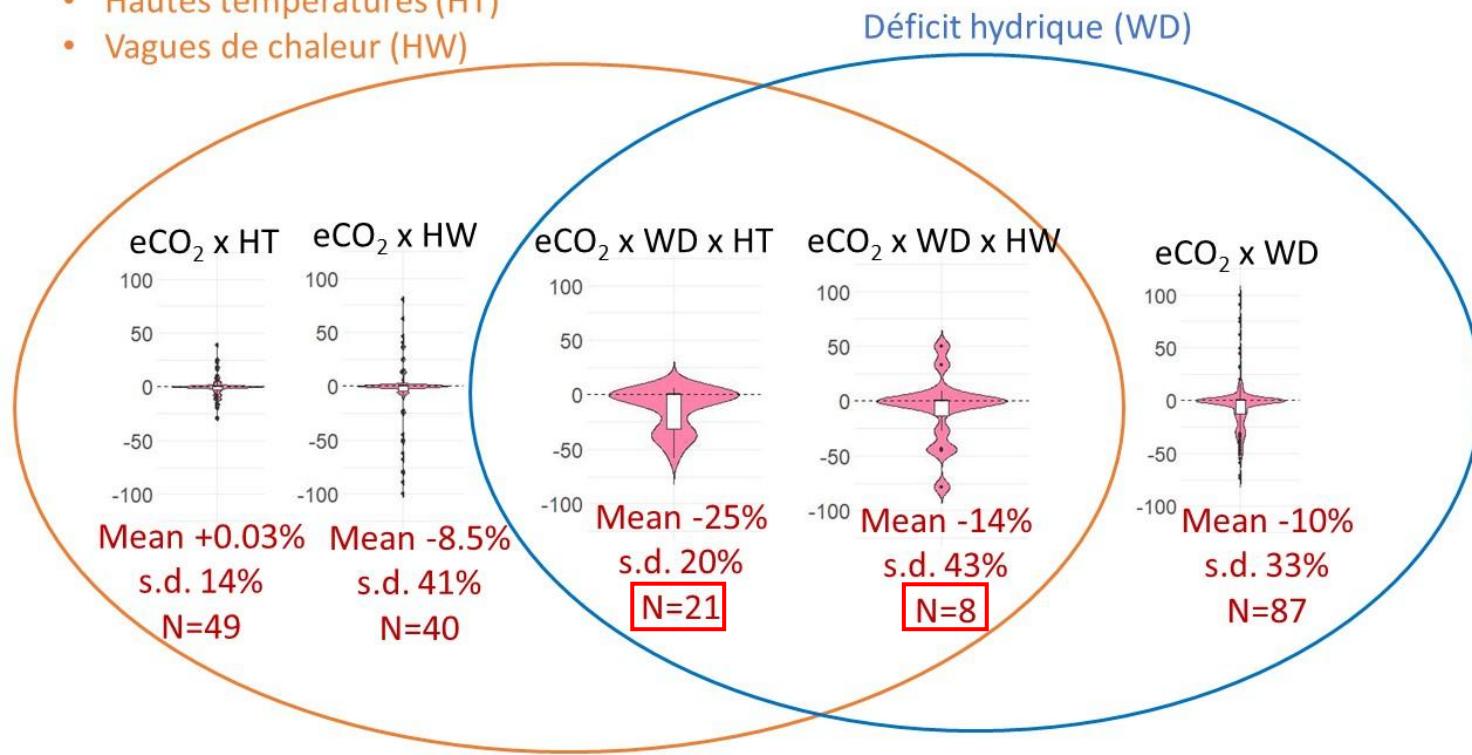


- Tendance générale de diminution de la productivité dans les conditions pseudo-futures expérimentées.
- Variabilité importante

Compensation sur la productivité du blé

Réchauffement

- Hautes températures (HT)
- Vagues de chaleur (HW)

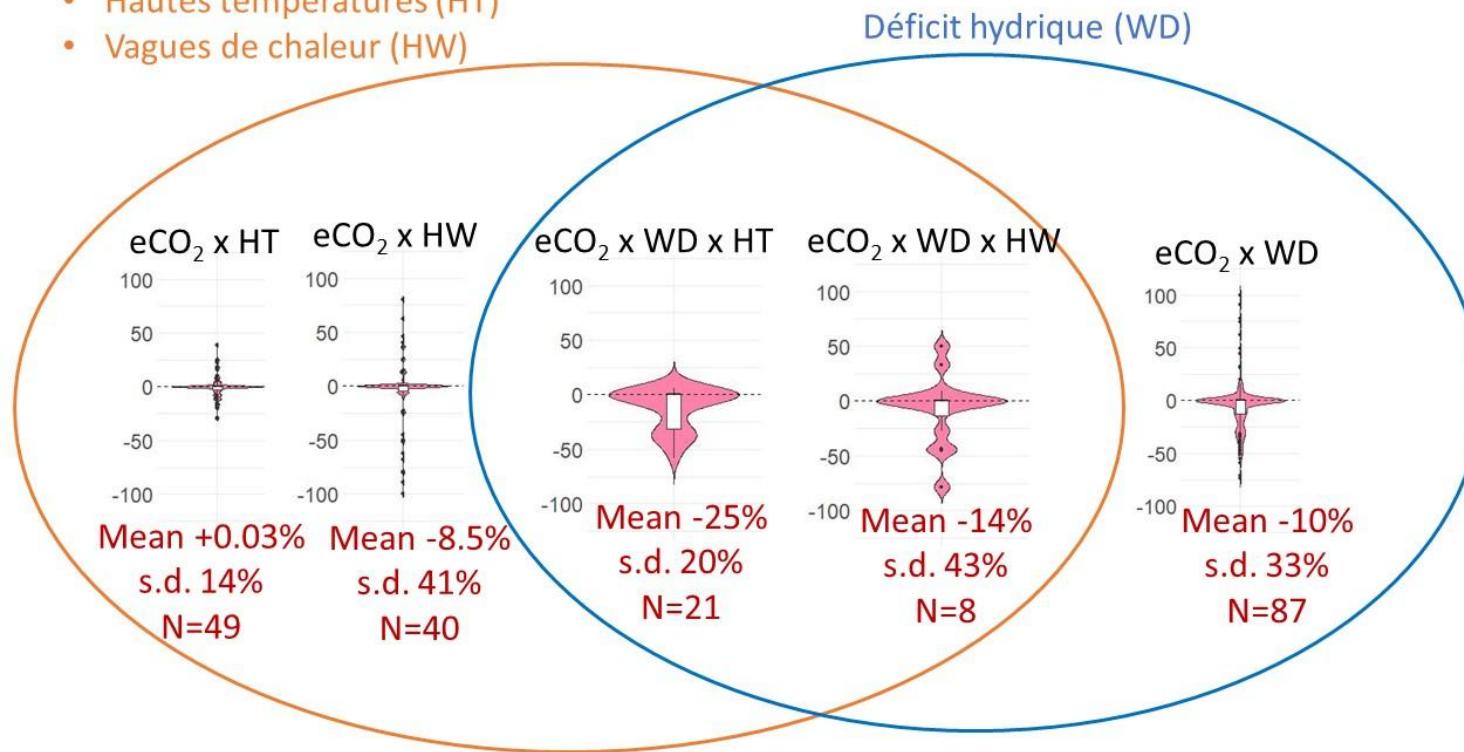


- **Tendance générale de diminution de la productivité dans les conditions pseudo-futures expérimentées.**
- Variabilité importante
- Très peu de données pour certaines combinaisons

Compensation sur la productivité du blé

Réchauffement

- Hautes températures (HT)
- Vagues de chaleur (HW)

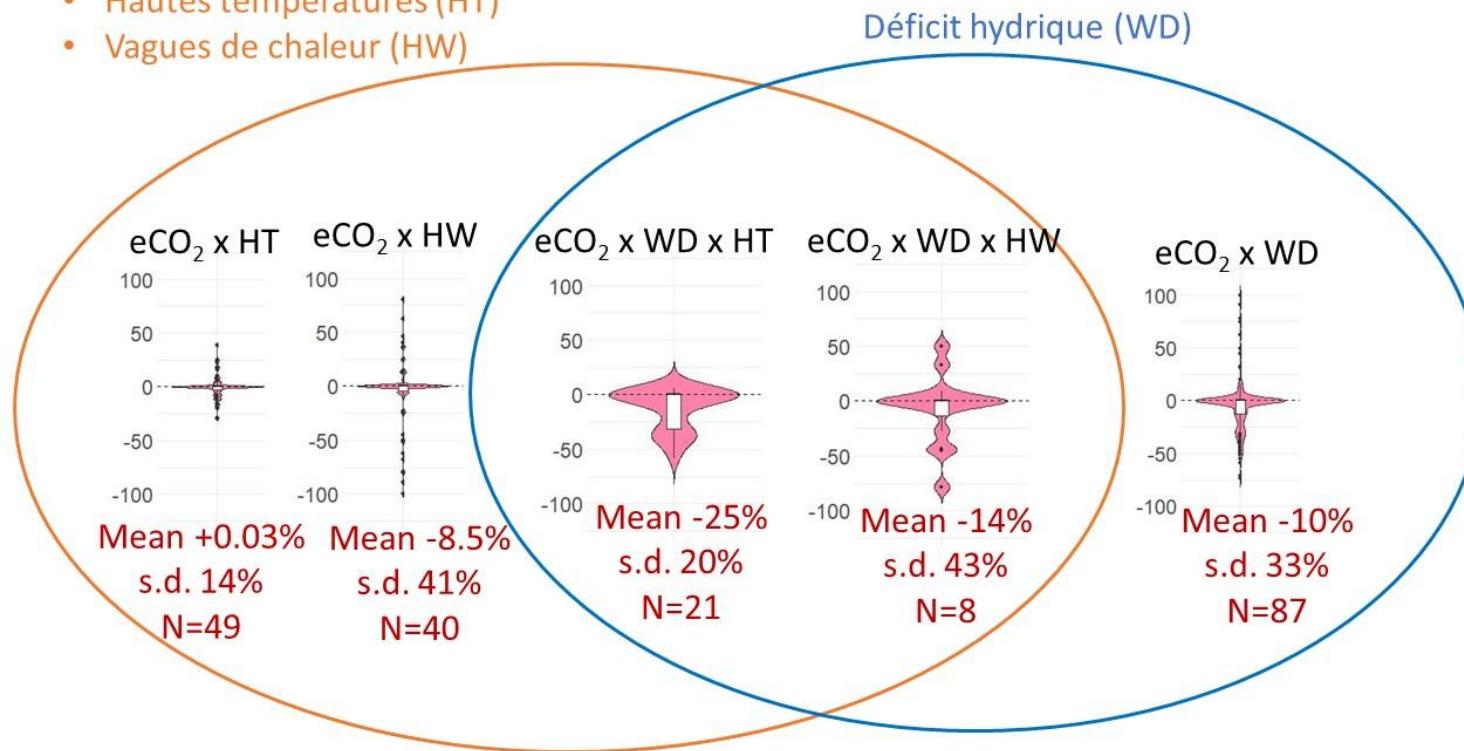


- **Tendance générale de diminution de la productivité dans les conditions pseudo-futures expérimentées.**
- Variabilité importante
- Très peu de données pour certaines combinaisons
- CO₂ x températures
 - Le timing des vagues de chaleur est plus impactant que la température ou la durée
 - Stress pré-floraison plus délétère
 - Mais possible effet confondant avec la tolérance des variétés

Compensation sur la productivité du blé

Réchauffement

- Hautes températures (HT)
- Vagues de chaleur (HW)

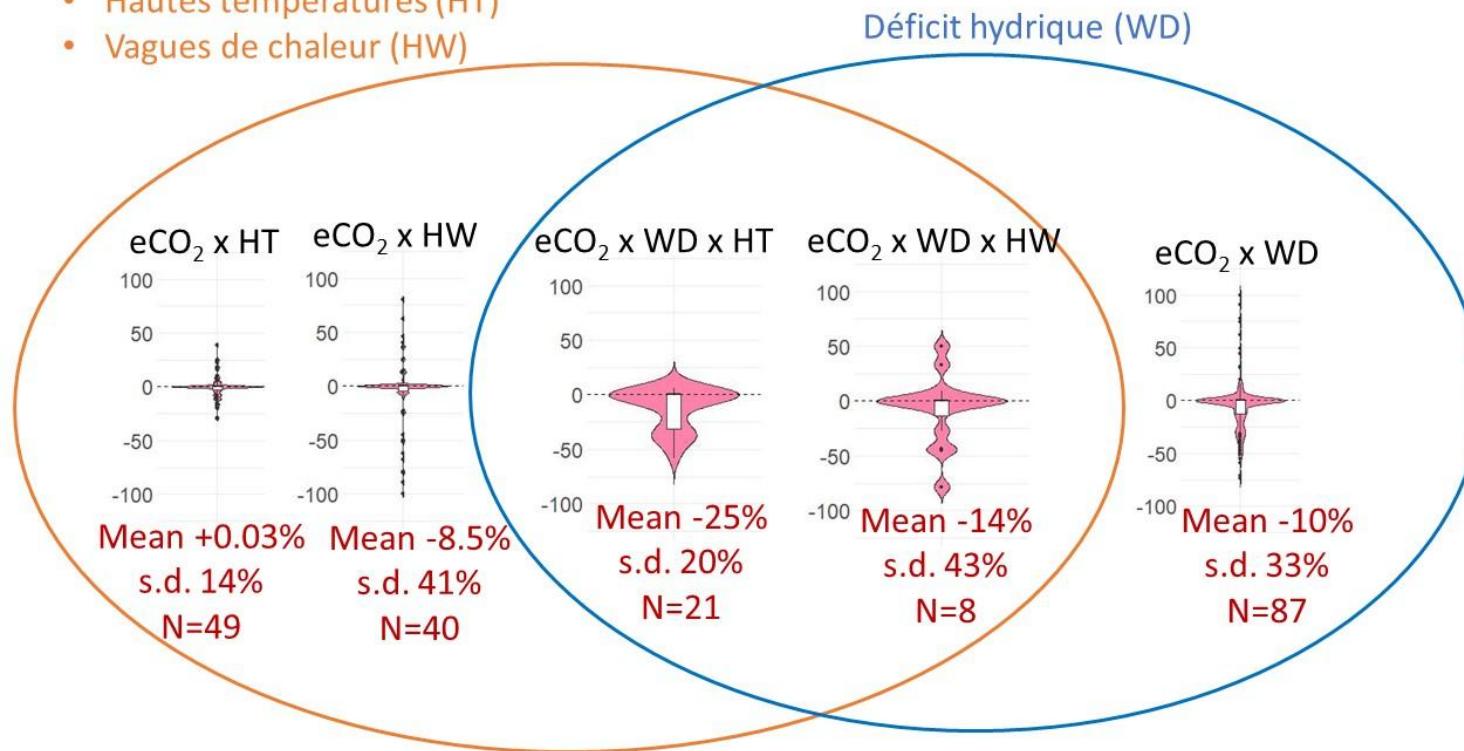


- **Tendance générale de diminution de la productivité dans les conditions pseudo-futures expérimentées.**
- Variabilité importante
- Très peu de données pour certaines combinaisons
- $CO_2 \times$ températures
 - Le timing des vagues de chaleur est plus impactant que la température ou la durée
 - Stress pré-floraison plus délétère
 - Mais possible effet confondant avec la tolérance des variétés
- $CO_2 \times$ températures \times déficit hydrique
 - La tolérance à la sécheresse semble plus bénéfique que la tolérance à la température

Compensation sur la productivité du blé

Réchauffement

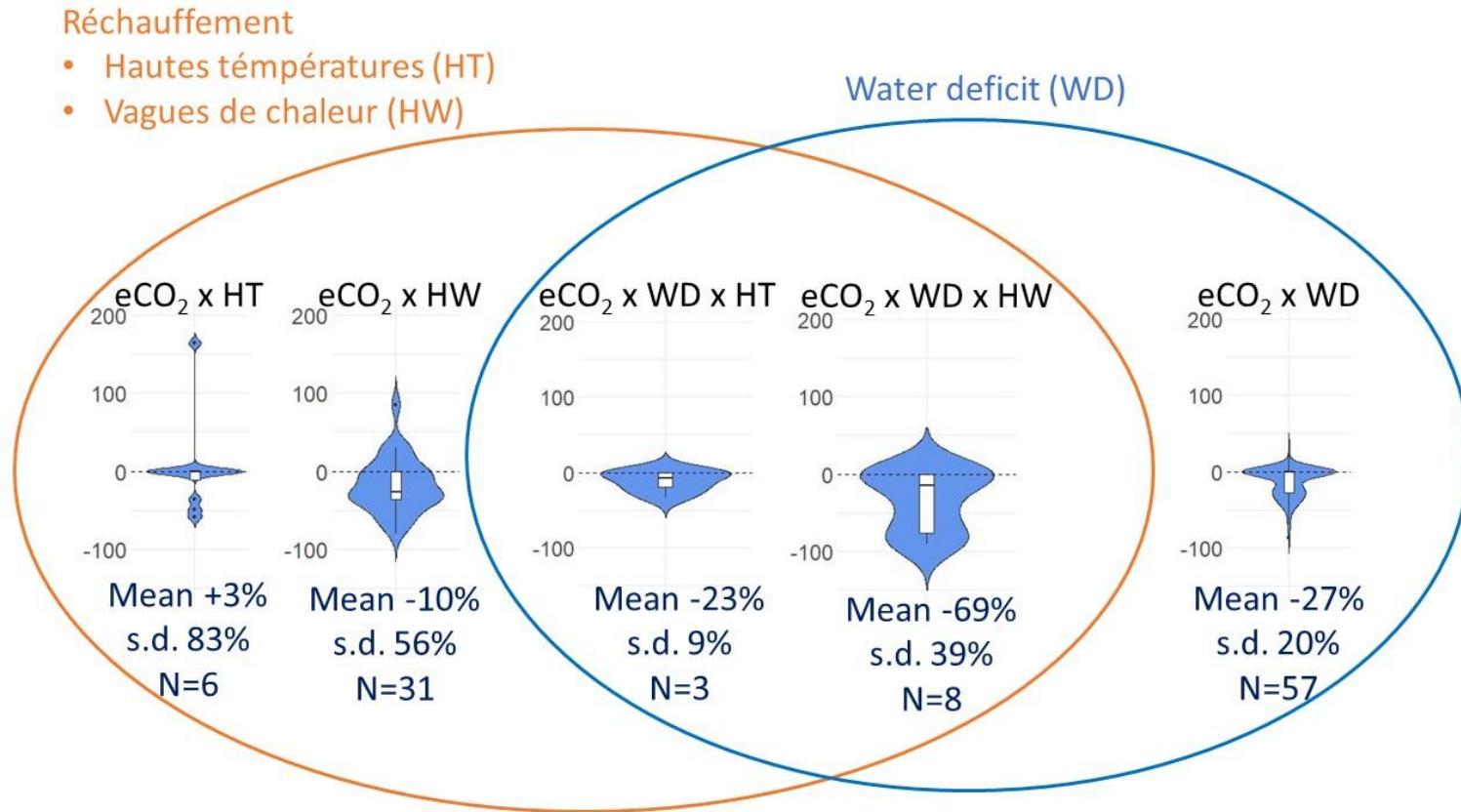
- Hautes températures (HT)
- Vagues de chaleur (HW)



Interaction CO₂ avec température et déficit hydrique très variable (positive ou négative)

- **Tendance générale de diminution de la productivité dans les conditions pseudo-futures expérimentées.**
- Variabilité importante
- Très peu de données pour certaines combinaisons
- CO₂ x températures
 - Le timing des vagues de chaleur est plus impactant que la température ou la durée
 - Stress pré-floraison plus délétère
 - Mais possible effet confondant avec la tolérance des variétés
- CO₂ x températures x déficit hydrique
 - La tolérance à la sécheresse semble plus bénéfique que la tolérance à la température

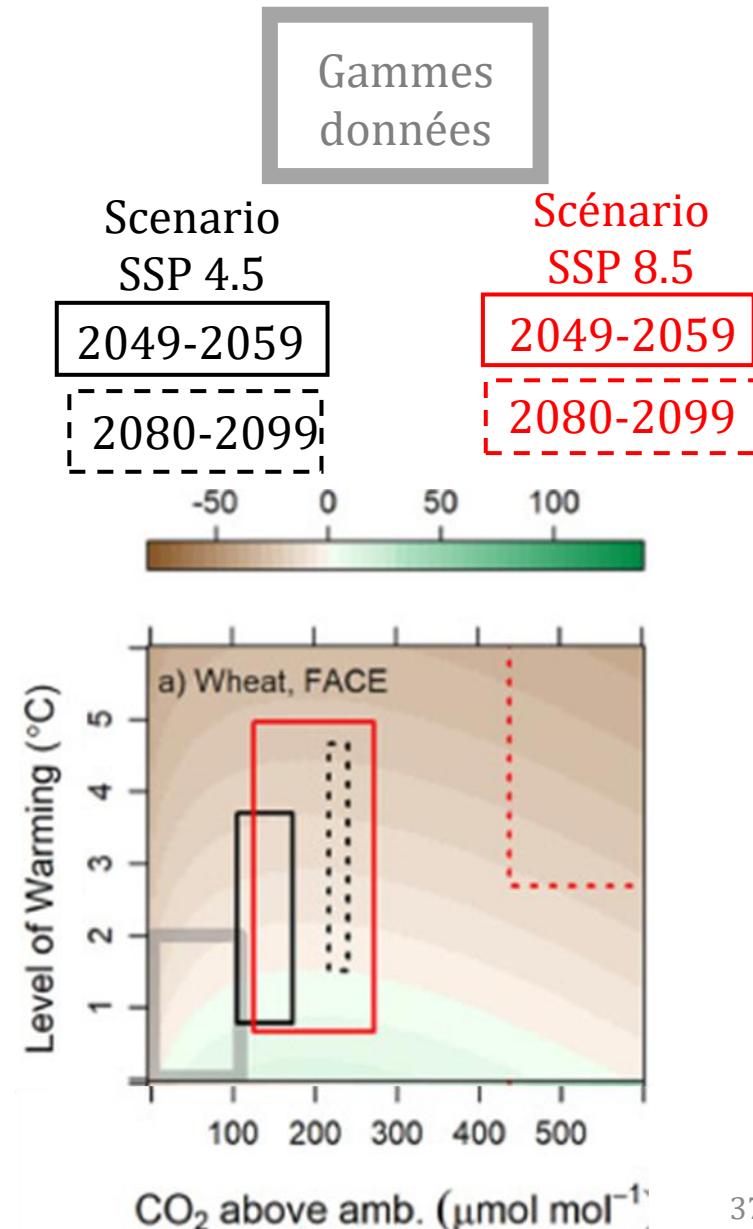
Compensation sur la consommation en eau du blé



- **Tendance générale de diminution de la consommation en eau**
- Peu de données
- Variabilité importante
- $CO_2 \times$ déficit hydrique
 - Diminution quasi-systématique
- $CO_2 \times$ températures
 - Trop peu d'observations et variabilité importante pour les hautes température
 - Diminution pour les vagues de chaleur
- $CO_2 \times$ températures x déficit hydrique
 - Diminution plus importante pour les vagues de chaleur

Conclusions de la synthèse expérimentale

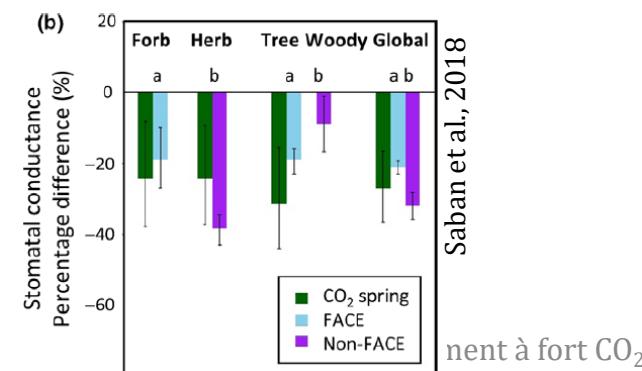
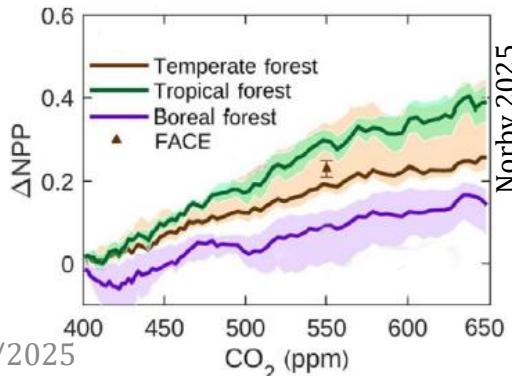
- Cette synthèse a permis de dégager des tendances générales de **diminution de productivité et de consommation en eau du blé** dans les expérimentations combinant CO₂, déficit hydrique et températures
- Toutefois les réponses extraites sont très variables
 - Diversité de dispositifs, conditions expérimentales, types de mesures et variétés
 - Faible nombre d'expérimentations et accès limité aux données pertinentes
 - Caractérisation non standardisée des expérimentations avec des indicateurs éco-climatiques
- Gammes limitées de facteurs climatiques peu compatibles avec les prédictions climatiques futures → (Zhu et al., 2023) CO₂ x températures



Fonctionnement des agroécosystèmes sous changement climatique

Conclusion partielle

- Effets propres de eCO₂- eT- déficit hydrique assez convergents avec
 - des interactions mises en évidence entre facteurs du changement climatique
 - pas de compensation systématique par l'effet fertilisation du CO₂
- Une réponse néanmoins très variable selon le type fonctionnel mais également inter et intra spécifiques très importantes et la localisation géographique
- Une vigilance à porter aux réponses quantitatives avec
 - Les dispositifs et les gammes appliquées: C. Contrôlées > OTC > Source Naturelles > FACE
 - La durée des expérimentations
 - Une potentielle acclimatation : assez faible au eCO₂ mais plus importante au eT°
 - Mais une validation globale des dispositifs (OTC vs Face) vs Naturel



nant à fort CO₂

Trait	A_{sat}	V_{cmax}	J_{max}	g_s	Leaf starch	Leaf sugar	Leaf nitrogen	SLA
Spring	+45.8% [19.7, 77.1]	-17.2% [-23.4, -10.6]	-9.4% [-18.6, -3.3]	-27.2% [-19.3, -23.0]	+58.6% [12.5, 123.6]	+17.9% [-6.8, 49.1]	-6.3% [-13.3, 1.2]	-9.7% [-24.3, 7.7]
FACE	+32.1% [29.0, 35.2]	-10.1% [-13.0, -7.1]	-3.5% [-5.6, -1.5]	-21.2% [-19.3, -23.0]	+84.3% [61.3, 107.3]	+31.9% [0.2, 47.9]	-13.3% [-16.8, -9.8]	-6.0% [-8.2, -3.6]

Sabán et al., 2018

Effect size

-100% 0% +100%

Fonctionnement des agroécosystèmes sous changement climatique

Le changement climatique modifie aussi les autres interactions biotiques

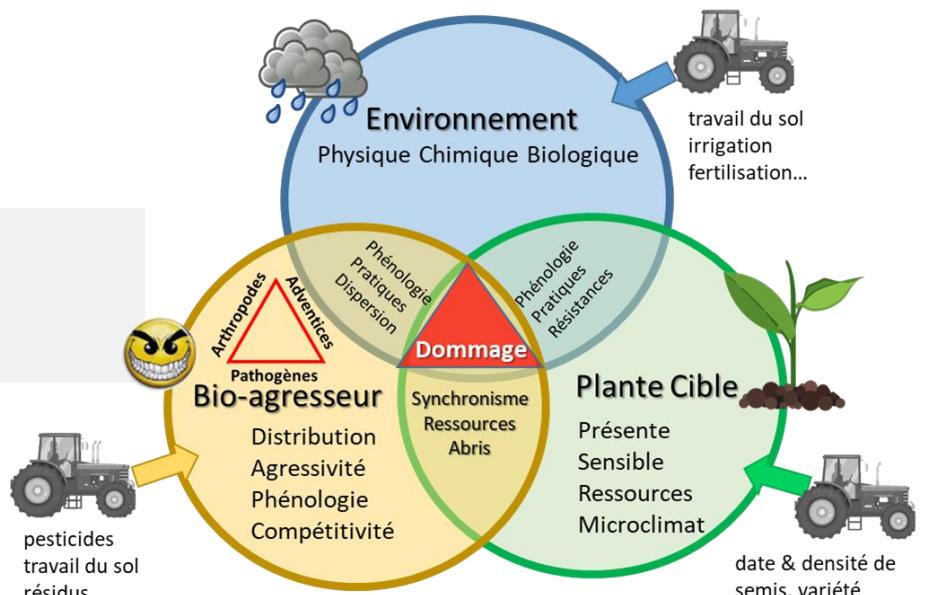


Fonctionnement des agroécosystèmes sous changement climatique

- 1- D'une part, le climat joue directement sur le cycle de vie d'un bioagresseur
- 2- D'autre part, le climat joue indirectement en créant un habitat ± favorable

Un milieu physique, chimique et biologique favorable

Une population virulente de bioagresseurs



Des plantes ou des populations sensibles

Fonctionnement des agroécosystèmes sous changement climatique

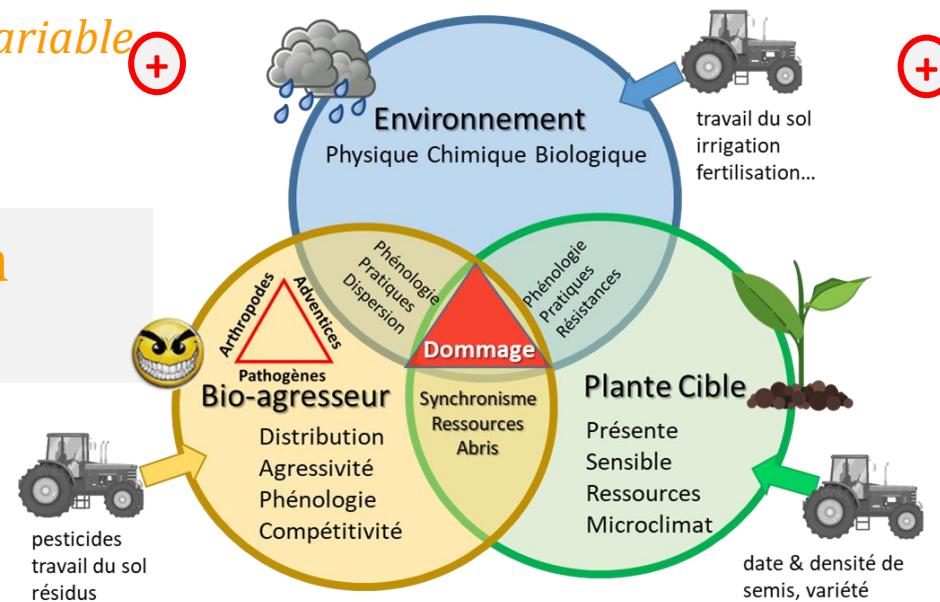
- 1- D'une part, le climat joue directement sur le cycle de vie d'un bioagresseur
- 2- D'autre part, le climat joue indirectement en créant un habitat ± favorable

Un milieu physique, chimique et biologique favorable

Extension géographique variable selon les bioagresseurs

Une population virulente de bioagresseurs

Systèmes de cultures et eT° favorables à la survie de l'inoculum (humidité, gs) d'infection défavorables



En interaction avec les pratiques

+ Synchronisme perturbé entre hôtes et bioagresseurs

Les plantes dans un environnement à fort CO₂

Faisabilité des cultures accrues selon les besoins thermiques

Des plantes ou des populations sensibles

+ Sensibilité variable avec la T° et défenses accrues avec le CO₂

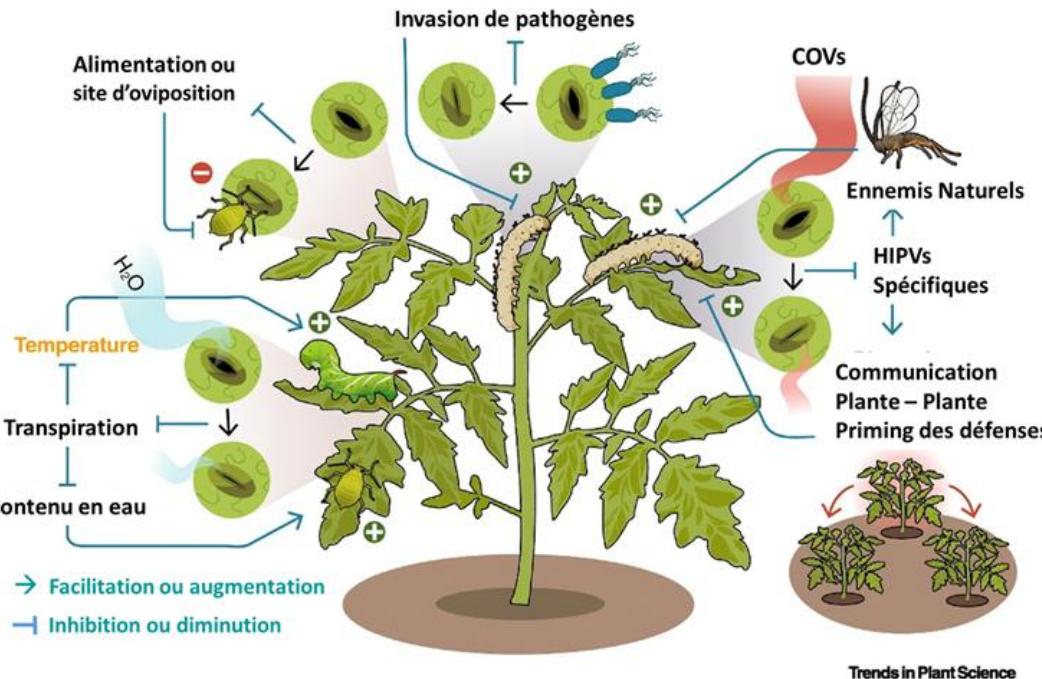
D'après Launay et al., 2025.

in « Agriculture et changement climatique ». Eds. Quae

Fonctionnement des agroécosystèmes sous changement climatique

3- Aboutissant à des interactions multiples en cascade assez incertaines

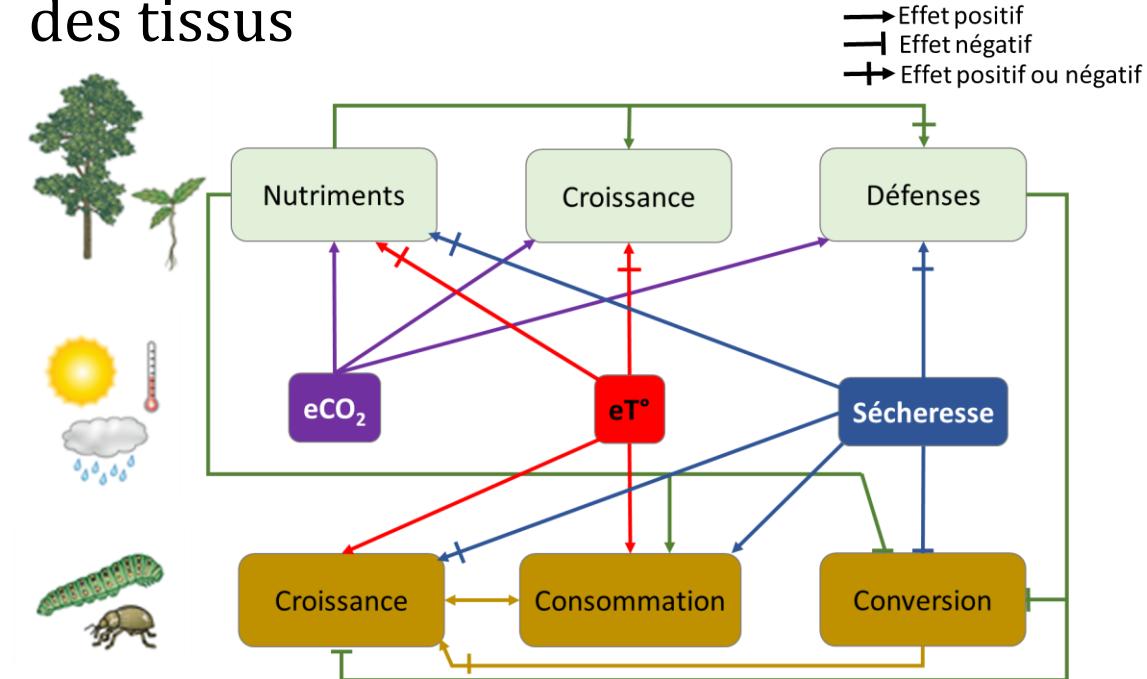
Des interactions via les stomates....



selon Lin et al., 2022. doi: 10.1016/j.tplants.2021.08.017

Une fermeture stomatique *défavorable* à l'entrée/attaque des bioagresseurs et à l'immunité collective, mais une température accélérant leur développement

Et par la quantité et qualité nutritionnelle des tissus



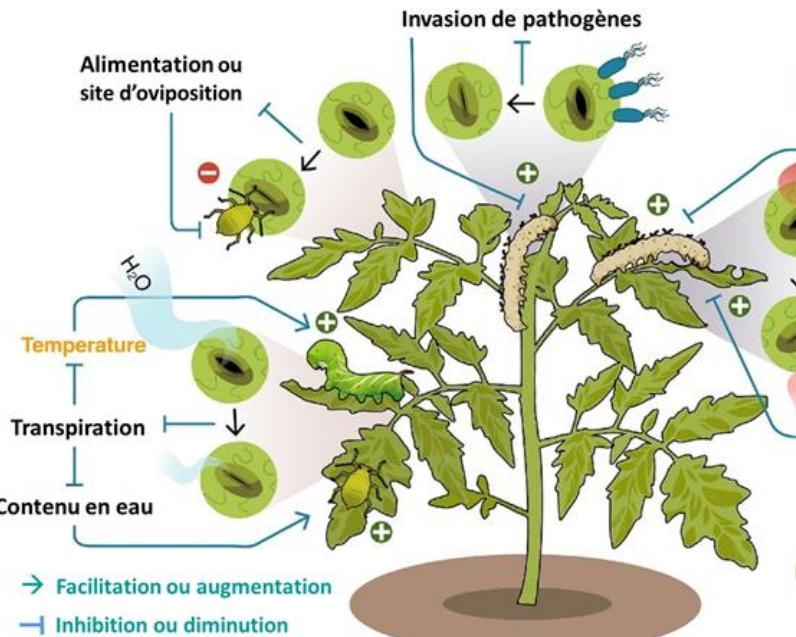
selon Hamann et al., 2020. doi: 10.1111/nph.17036

La baisse de qualité nutritionnelle accroît la consommation par les herbivores mais peut limiter leur fécondité et abondance à terme

Fonctionnement des agroécosystèmes sous changement climatique

3- Aboutissant à des interactions multiples en cascade assez incertaines

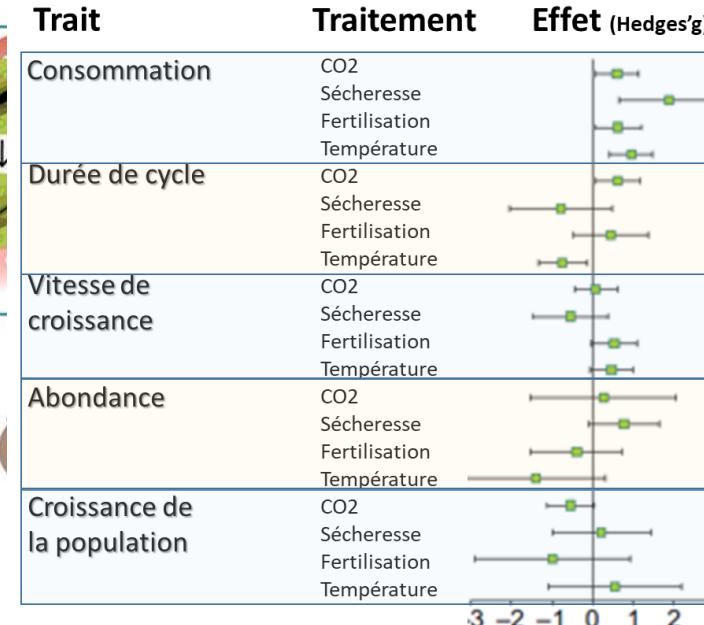
Des interactions via les stomates....



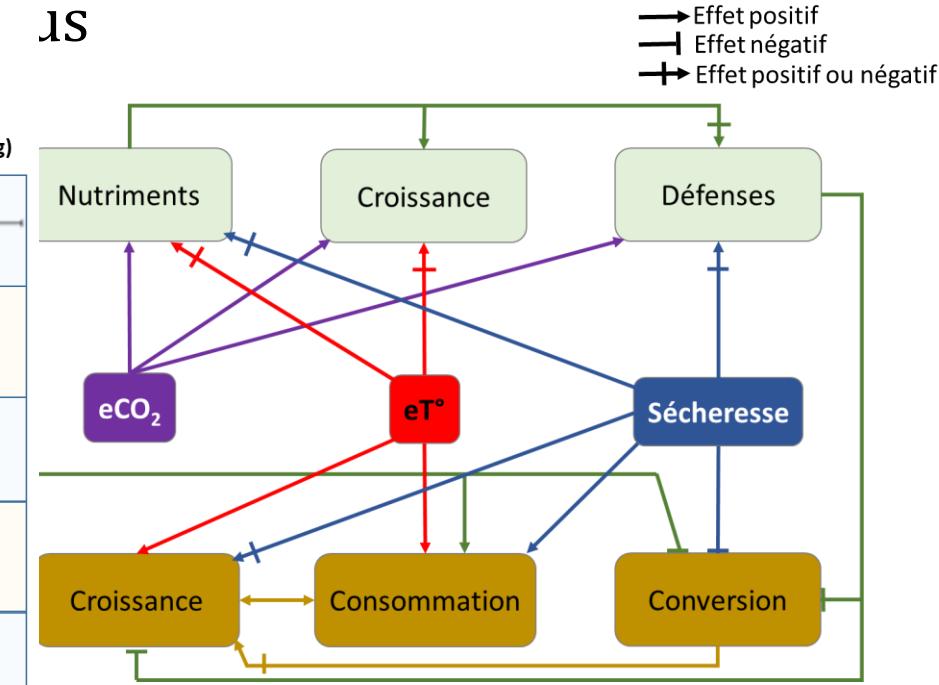
selon Lin et al., 2022. doi: 10.1016/j.tplants.2021.08.017

Une fermeture stomatique défavorable à l'entrée/attaque des bioagresseurs et à l'immunité collective, mais une température accélérant leur développement

Effets directs et indirects du changement climatique sur les herbivores (62 études)



JS



selon Hamann et al., 2020. doi: 10.1111/nph.17036

La baisse de qualité nutritionnelle accroît la consommation par les herbivores mais peut limiter leur fécondité et abondance à terme

Fonctionnement des agroécosystèmes sous changement climatique

Le changement climatique modifie les autres interactions biotiques

En tendance pour les bioagresseurs :

- Des dégâts – dommages qui peuvent augmenter et/ou diminuer (Fitzgerald et al., 2021)
- Mais avec une acclimatation/adaptation très rapide en raison du nombre de cycles (T°)
- Variabilité de réponse accrue dans la cascade des réseaux trophiques

En tendance pour le microbiote du sol : des effets plutôt négatifs sur les communautés microbiennes du sol (Yang et al., 2021).

- Abondance
- Diversité



Santé des plantes et des sols modulant fortement la productivité et la résilience des AES dans le futur

Synthèse

Le eCO₂ a un effet **fertilisation en carbone**, mais avec des **interactions avec eT et/ou déficit hydrique** : il ne **compense que** partiellement et pas toujours les autres stress, en particulier extrêmes.

- Des approches expérimentales primordiales pour comprendre mais des combinaisons souvent trop limitées pour extrapoler
- Intérêt des références multiples pour dé corréler les effets des facteurs simples ou combinés
- Mieux caractériser de manière standardisée le milieu et les peuplements par des indicateurs pertinents
- D'autres facteurs du CC sont peu intégrés: O3, eN, etc

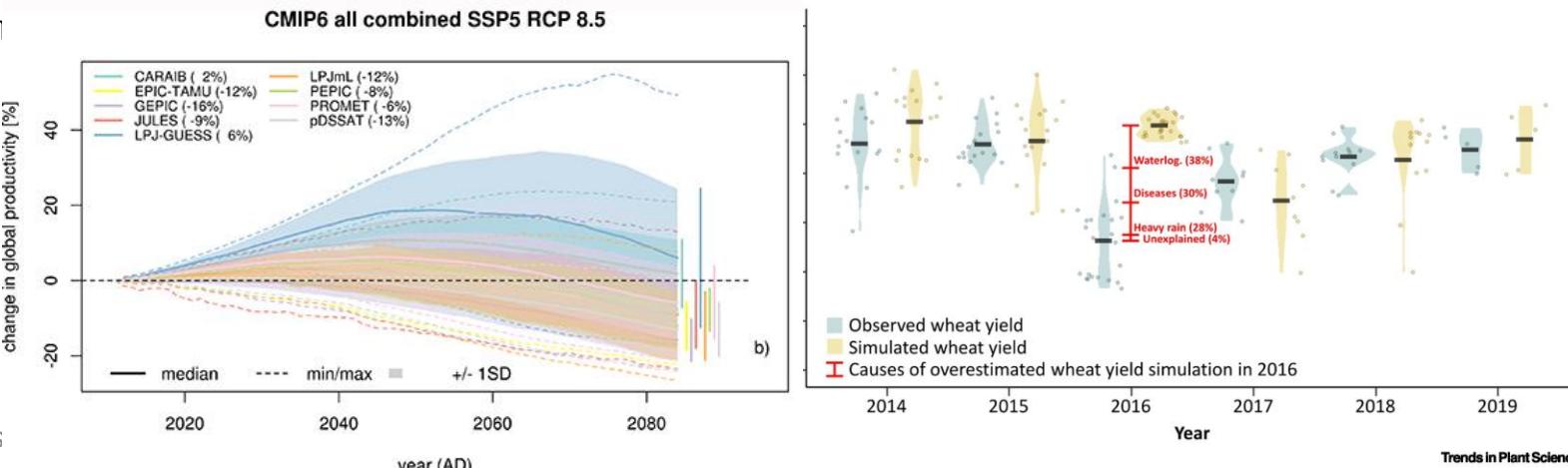
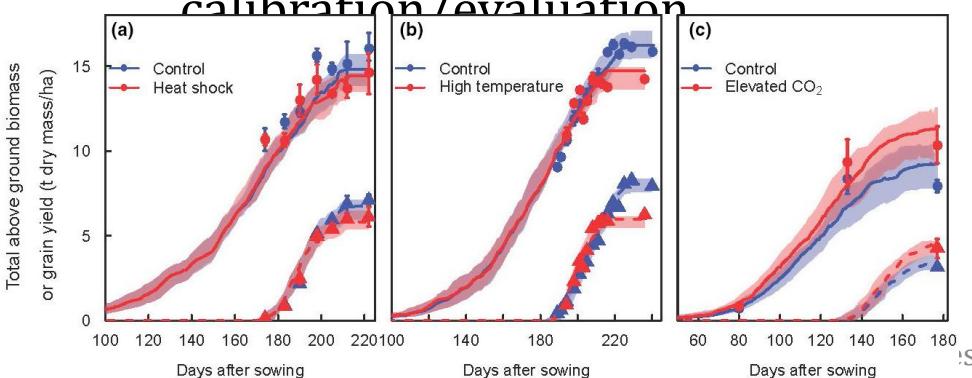
Si la variabilité génétique interspécifique permet de différencier **les réponses par types fonctionnels**, la variabilité intra-spécifique est trop peu explorée

Les **autres composantes biologiques** des l'agroécosystèmes sont trop peu regardés parallèlement à ceux sur la productivité, ce qui biaise les résultats

Le couplage à des approches de modélisation des impacts est nécessaire pour hiérarchiser les origines des impacts

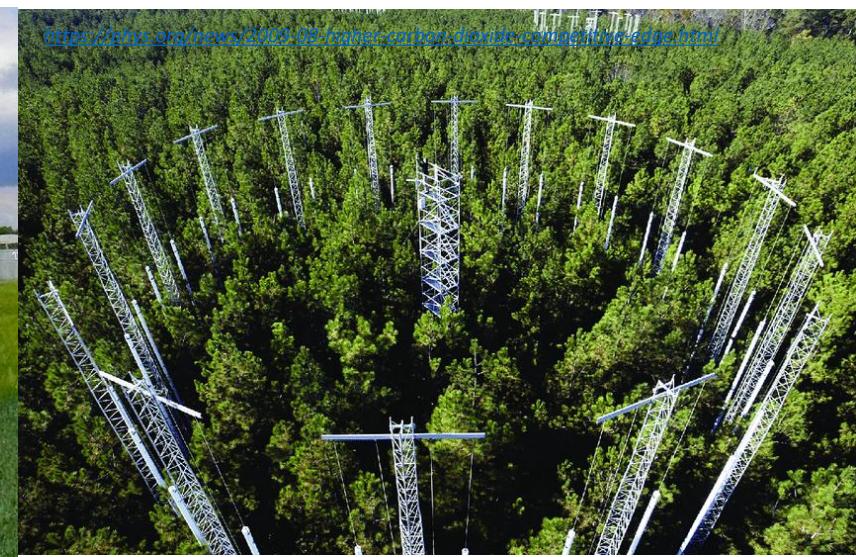
Perspectives pour la modélisation des impacts

- Utiliser des modèles de culture pour évaluer et prédire les effets du changement climatique
- Mobiliser des ensembles de modèles (Initiative internationale AgMIP; Asseng et al., 2019)
 - La médiane simulée est un bon prédicteur mais cache la variabilité très importante entre modèles
- Mieux rendre compte des événements extrêmes et interactions.
 - Les modèles de culture ont tendance à sous-estimer les effets négatifs du changement climatique sur les rendements.
- Consolider la validité des modèles de culture dans ce contexte de changement climatique
 - enjeu majeur d'acquisition/accès à la calibration /évaluation



Impacts du changement climatique sur le fonctionnement et la productivité des agroécosystèmes

Focus sur l'impact des interactions entre CO₂, température et déficit hydrique



Merci pour votre attention !

Marie-Odile Bancal, Meije Gawinowski, Karine Chenu, Marie Launay



Références bibliographiques

1. Ainsworth et Long, 2020. doi: 10.1111/gcb.15375
2. Allen et al., 2020. [doi: 10.1016/j.agrformet.2020.107899](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.107899)
3. Brisson et Levraud, 2010. Changement climatique, agriculture et forêt en France: simulations d'impacts sur les principales espèces. Le Livre Vert du projet Climator (2007-2010). ADEME 336p.
4. Debaeke et Durand, 2025. Chap 6 pp123-152. in « Agriculture et Changement Climatique. Impacts, adaptation et atténuation». Eds Debaeke et al., QUAE. doi: 10.35690/978-2-7592-4012-8
5. Fitzgerald et al., 2021. [doi: 10.1016/bs.agron.2021.08.001](https://doi.org/10.1016/bs.agron.2021.08.001)
6. Gawinowski et al., 2025. [doi: 10.1016/j.envexpbot.2025.106113](https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2025.106113)
7. Hamman et al., 2020. doi: 10.1111/nph.17036
8. Kimball B.A., 2016. doi: 10.1016/j.pbi.2016.03.006
9. Launay et al., 2025. Chap 8 pp187-237. in « Agriculture et Changement Climatique. Impacts, adaptation et atténuation». Eds Debaeke et al., QUAE. doi: 10.35690/978-2-7592-4012-8
10. Leisner et al., 2022. doi: 10.1111/pce.14532
11. Liang et al., 2023. [doi: 10.1038/s41467-023-37934-7](https://doi.org/10.1038/s41467-023-37934-7)
12. Lin et al., 2022. [doi: 10.1016/j.tplants.2021.08.017](https://doi.org/10.1016/j.tplants.2021.08.017)
13. Norby RJ., 2025. doi: 10.1111/nph.70162
14. Rezaie et al., 2023. [doi: 10.1038/s43017-023-00491-0](https://doi.org/10.1038/s43017-023-00491-0)
15. Saban et al., 2018. doi: 10.1111/gcb.14437
16. Yang et al., 2021. doi: 10.1016/j.soilbio.2021.108229
17. Zhu et al., 2023. doi: [10.1016/j.agrformet.2023.109737](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109737)