

---

## Étude de cas économétrique : Productivité agricole et changement climatique.

*Comment le climat influence la productivité agricole? Comment les pratiques  
d'adaptation permettent-elles d'en atténuer les effets?*

---

**Auteurs :**

AYEREBI Kattié  
BELARIBI Saïd  
BIGARD Noa  
LEBEUF Emmanuelle

**Superviseur :**

JOUF Chouaib Ahmed

**Année académique :**

2025 – 2026

**Université :**

Marie & Louis Pasteur

**Abstract :**

*Cette étude analyse l'impact du changement climatique sur les rendements céréaliers en Europe du Sud et le rôle des stratégies d'adaptation agricole. À partir de données de panel couvrant la période 2003–2022 pour six pays et trois céréales (maïs, blé et orge), nous estimons des modèles à effets fixes afin d'identifier les effets des variables climatiques et techniques. Une première estimation par culture met en évidence des résultats similaires entre céréales, reflétant la forte agrégation des données disponibles. Un second modèle intégrant des variables d'interaction entre les cultures et les variables explicatives permet de révéler des résultats différenciés, notamment en matière d'irrigation et d'usage des fertilisants. Les résultats suggèrent que la résilience agricole dépend moins de l'intensité climatique moyenne que de la mobilisation différenciée des leviers d'adaptation. Cette analyse souligne enfin la nécessité de données plus fines pour mieux appréhender les mécanismes d'adaptation au changement climatique.*



# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Méthodologie</b>	<b>3</b>
2.1	Sources et structure des données . . . . .	3
2.2	Définition des variables . . . . .	3
2.3	Spécification économétrique et justification . . . . .	4
2.4	Limites méthodologiques . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Résultats</b>	<b>8</b>
3.1	Analyse descriptive et dynamiques régionales . . . . .	8
3.2	Analyse économétrique des déterminants du rendement . . . . .	11
3.2.1	Analyse des rendements céréaliers et limites de la spécification par culture	11
3.2.2	Interprétation des résultats . . . . .	12
<b>4</b>	<b>Discussion et limites</b>	<b>13</b>
4.1	Contributions principales . . . . .	13
4.2	Limites méthodologiques . . . . .	14
<b>5</b>	<b>Recommandations pour la résilience agronomique</b>	<b>16</b>
<b>6</b>	<b>Orientations pour les politiques publiques</b>	<b>17</b>
<b>7</b>	<b>Conclusion</b>	<b>17</b>
	<b>Références</b>	<b>19</b>
	<b>Annexes</b>	<b>19</b>

# 1 Introduction

Au cours des deux dernières décennies, les systèmes de production céréalière européens ont été confrontés à une intensification des aléas climatiques, marquée par l'augmentation de la fréquence et de la sévérité des vagues de chaleur, des sécheresses prolongées et plus généralement, des événements extrêmes. Ces anomalies climatiques, particulièrement prononcées dans les pays du Sud de l'Union européenne, affectent directement les rendements des principales céréales à savoir le blé, l'orge et maïs (Schmidt et Flesche, 2023) en réduisant la disponibilité en eau, en perturbant les stades phénologiques clés ou en accentuant les risques d'incendies et de stress thermique (Gulino et Lopes, 2024).

Il est par ailleurs crucial de renforcer la sécurité alimentaire mondiale : en 2024, 2.3 milliards de personnes dans le monde demeuraient en situation d'insécurité alimentaire modéré ou grave (FAO, 2025), un phénomène étroitement lié à l'émergence de conflits et de tensions sociales et géopolitiques avec en filigrane l'urgence climatique. Dans un contexte où la productivité agricole constitue un enjeu stratégique pour la sécurité alimentaire et la stabilité socio-économique, comprendre la vulnérabilité des systèmes céréaliers face à ces pressions climatiques devient indispensable.

Cependant, la vulnérabilité agricole n'est ni homogène ni déterminée par le seul climat (IPCC, 2022). Elle dépend fortement des capacités d'adaptation des systèmes de culture, qu'il s'agisse d'ajustements techniques, structurels ou organisationnels. Parmi ces leviers, les dispositifs d'adaptation reposant sur un fort niveau d'investissement — en particulier l'irrigation — jouent un rôle central dans l'atténuation des effets négatifs des stress hydriques et thermiques. Une méta-analyse sur le maïs montre que chaque augmentation de 100 mm d'irrigation diminue la sensibilité au stress thermique d'environ 7.6% (Zhang et al. 2025).

Entre 2004 et 2024, l'évolution des rendements céréaliers en France méridionale, Grèce, Italie, Espagne, Roumanie et Portugal révèle des dynamiques contrastées, reflétant des sensibilités et des niveaux d'exposition hétérogènes. Alors que certaines régions ont pu stabiliser leur productivité grâce à des infrastructures hydrauliques robustes ou à des investissements techniques importants, d'autres demeurent particulièrement vulnérables face à l'intensification du changement climatique.

Les anomalies de rendements de céréales (blé, orge, maïs) en Europe sont corrélés aux changements climatiques, mais cette corrélation varie en amplitude et en signe selon les régions

et les périodes considérées. Par exemple, En France, l'orge verrait sa production augmentée suite à une hausse des températures durant le mois d'octobre. A contrario, une hausse des températures en Allemagne serait responsable d'une diminution de la production de blé (Schmidt et Flesche, 2023). Ce constat alarme sur la portée discordante du changement climatique, et par extension, sur la nécessité d'adopter des politiques climatiques communes mais différenciées à l'échelle européenne.

Selon le Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire (AGRESTE, 2025), l'Union européenne représente environ 11% de la production mondiale de céréales (hors riz, en Mt). De plus, comme le soulignent Olesen et al. (2011), « *la productivité de l'agriculture européenne est généralement élevée - en particulier en Europe occidentale - et les rendements moyens en céréales dans les pays de l'UE dépassent de plus de 60% la moyenne mondiale* ». Malgré cette contribution importante, de fortes disparités persistent au sein du continent.

Les systèmes agricoles intensifs situés dans des climats plus frais peuvent même bénéficier, à court terme, d'un réchauffement modéré (Olesen & Bindi, 2002). À l'inverse, les systèmes déjà situés dans des régions chaudes et sèches devraient être les plus sévèrement affectés par le changement climatique (Darwin & Kennedy, 2000). Cette vulnérabilité différenciée s'explique par la forte hétérogénéité du continent en termes de climat, de types de sols, d'usages des terres, de disponibilité en infrastructures, ainsi que de conditions politiques et économiques, autant de facteurs qui influencent la capacité d'adaptation des systèmes agricoles européens face au changement climatique (Olesen & Bindi, 2002).

Dans ce contexte, ce travail propose une analyse économétrique des déterminants climatiques et des mécanismes d'adaptation de la productivité céréalière en Europe du Sud. À partir de données de panel couvrant plusieurs pays et cultures, l'étude vise à quantifier les effets non linéaires du climat tout en évaluant le rôle des investissements et des pratiques d'adaptation, notamment l'irrigation. La section suivante présente la méthodologie retenue, avant d'exposer les résultats empiriques, d'en discuter les implications et de formuler des recommandations à destination des décideurs publics.

## 2 Méthodologie

### 2.1 Sources et structure des données

Variable	Unité	Source	Période
Production céréalière	indice base 100	FAOSTAT	2003-2022
Température moyenne	°C	Berkeley Earth	1990-2022
Précipitations annuelles	m/an	GlobalDataLab	1990-2022
Irrigation proxy	USD\$/m <sup>3</sup>	FAOSTAT	1986-2022
Taux d'irrigation	%	Eurostat	2005-2022
Usage d'engrais	Kg/ha de terres arables	WDI (Banque mondiale)	1990-2022

TABLE 1 – Sources, unités, et périodes de données mobilisées

Le panel est non équilibré en raison de la structuration de la variable *Taux d'irrigation* dont les observations sont à intervalles irréguliers<sup>1</sup>. Nous avons donc pris la liberté d'interpoler les valeurs manquantes afin que notre échantillon soit exploitable quoique nous biaisons à la marge cette variable. Notre jeu de donnée couvre 6 pays européens à savoir la France, la Grèce, l'Italie, la Roumanie, l'Espagne et le Portugal ainsi 3 cultures céréalières (blé, maïs, orge) sur la période 2003-2022. De ce fait, notre nombre d'observation est égale à 342 ( $N = 342$ ) soit  $6 \text{ pays} \times 19 \text{ ans} \times 3 \text{ cultures}$ .

Notre modélisation vise à expliquer la production céréalière (variable dépendante) exprimée en base 100 (2014-2016) via différentes variables (que nous détaillerons dans la sous-section suivante) sélectionnées selon les disponibilités des données et pour leur potentiel pouvoir explicatif sur cette production céréalière. Précisons que l'ensemble des valeurs de la production céréalière est étiqueté « estimated value », à savoir qu'elles sont toute estimé.

### 2.2 Définition des variables

Comme susmentionné, la production céréalière couvre trois types de céréales à savoir le blé, le maïs et l'orge. Selon la Commission Européenne, le blé représente plus de la moitié des céréales produits en Europe alors que le maïs et l'orge combiné couvrent un tiers de la production totale. Ils sont ainsi comptés parmi les céréales les plus produits en Europe justifiant le choix de ces derniers. Les variables climatiques à savoir *Température moyenne* et *Précipitations annuelles* permettent de capturer l'exposition des systèmes agricoles aux conditions climatiques

1. Nous avons des observations pour 2005, 2007, 2010, 2013, 2016, 2020, 2023

changeantes, difficilement dissociable de la production céréalière. Les variables *Irrigation proxy* et *Taux d'irrigation* sont catégorisées comme des variables d'adaptation. Elles nous permettent de mesurer les mécanismes d'adaptation susceptible d'atténuer l'impact négatif du changement climatique afin pouvoir faire des recommandations avisées. Le reste des variables est utilisé à des fins de contrôle dans le cadre de nos modèles.

## 2.3 Spécification économétrique et justification

Nous estimons un modèle à effets fixes (within) qui élimine l'hétérogénéité inobservable fixe entre pays où  $c \in [\text{blé, maïs, orge}]$  et  $k \in [\text{T,P,I,F}]$  avec T = Température, P = Précipitation, I = Taux d'irrigation et F = Fertilisant :

$$\log(Y_{i,c,t}) = \beta_0 + \beta_1 Temp_{i,t}^2 + \beta_2 Precip_{i,t} + \beta_3 Irrig\_Rate_{i,t} + \beta_4 Irrig\_Proxy_{i,t} + \beta_5 Fertilizer_{i,t} + \tau_i + \rho_c + \zeta_t + \varepsilon_{i,c,t} \quad (1)$$

$$\ln(Y_{i,c,t}) = \beta_0 + \beta_1 Temp_{i,t}^2 + \beta_2 Precip_{i,t} + \beta_3 Irrig\_Rate_{i,t} + \beta_4 Fertilizer_{i,t} + \beta_5 Irrig\_Proxy_{i,t} + \sum_{c \neq orge} (\delta_c^T Temp_{i,t}^2 + \delta_c^P Precip_{i,t} + \delta_c^I Irrig\_Rate_{i,t} + \delta_c^F Fertilizer_{i,t}) \mathbb{I}\{c\} + \tau_i + \rho_c + \zeta_t + \varepsilon_{i,c,t} \quad (2)$$

où :

- $Y_{i,c,t}$  : Le volume de production dans le pays  $i$  du céréale  $c$  à l'année  $t$
- $\beta_0$  : L'ordonnée à l'origine (l'intercept)
- $Temp_{i,t}^2$  : La température moyenne au carré pour le pays  $i$  à l'année  $t$
- $Precip_{i,t}$  : Les précipitations annuelles pour le pays  $i$  à l'année  $t$
- $Irrig\_Rate_{i,t}$  : Le taux d'irrigation pour le pays  $i$  à l'année  $t$
- $Irrig\_Proxy_{i,t}$  : L'efficacité d'utilisation de l'eau pour le pays  $i$  à l'année  $t$
- $Fertilizer_{i,t}$  : Volume d'engrais utilisé
- $\delta_c^k \forall k \in [\text{T,P,I,F}]$
- $\mathbb{I}\{c\} = \begin{cases} 1 & \text{si l'observation appartient à la catégorie } c \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$
- $\tau_i$  : Effet fixe par pays

- $\rho_c$  : Effet fixe par céréale
- $\zeta_t$  : Effet fixe dans temps
- $\varepsilon_{i,c,t}$  : Terme d'erreur idiosyncratique

La variable dépendante est introduite sous forme logarithmique afin de réduire l'hétéroscédasticité, fréquemment observée dans les données de production agricole, où la variance des erreurs croît avec le niveau de la production. La transformation logarithmique permet donc de stabiliser la variance en convertissant les variations absolues en variations relatives. Par exemple, une sécheresse réduit la production de 15%, et non pas de 2 tonnes exactement pour tout le monde. La température est ici sous forme quadratique afin de capturer une relation non linéaire entre cette variable et la production agricole. La littérature explique à ce sujet qu'une augmentation modérée de la température peut accroître la production, mais au-delà d'un certain seuil, les effets deviennent fortement négatifs<sup>2</sup>.

Le taux d'irrigation mesure l'intensité de l'irrigation par hectare et constitue un mécanisme direct d'adaptation au stress hydrique et thermique. Nous faisons aussi appel à un proxy de l'irrigation, à savoir l'efficacité d'utilisation de l'eau permettant de capturer la qualité et la performance des systèmes d'irrigation et ainsi pouvoir distinguer une irrigation d'envergure peu efficace d'une irrigation techniquement optimisée. De plus, nous avons décidé d'ajouter à cela l'usage d'engrais (en Kg/ha de terres arables) comme variable d'intensification de la production agricole permettant d'accroître le rendement et de compenser partiellement les pertes liées aux conditions climatiques défavorables.

Les modèles incluent des effets fixes pays ( $\tau_i$ ), culture ( $\rho_c$ ) et temporels ( $\zeta_t$ ) afin de contrôler l'hétérogénéité inobservable et constante dans le temps. Les effets fixes pays capturent les caractéristiques structurelles propres à chaque pays, tandis que les effets fixes culture tiennent compte des différences technologiques et biologiques entre céréales. Les effets fixes temporels absorbent les chocs communs et les tendances globales pouvant affecter simultanément les pays, ainsi que les cultures.

Cette spécification permet de capturer les effets non linéaires du climat sur la production agricole tout en intégrant explicitement les mécanismes d'adaptation via l'irrigation, l'efficacité

---

2. Schlenker, W. & Roberts, M. J. (2009), Nonlinear Temperature Effects Indicate Severe Damages to U.S. Crop Yields, PNAS.



de l'eau, l'usage d'intrants, tout en contrôlant l'hétérogénéité inobservable propre aux cultures choisies.

Nous avons délibérément opté pour un modèle à effet fixe au détriment d'un modèle pooled (OLS) ou à effet aléatoire sans passer le test statistique d'Hausman en raison des différences structurelles des pays. De raison, les conditions climatiques, le progrès technique, le niveau de formation et autres de chaque pays ne sont pas comparables. Précisons aussi que le modèle à effets aléatoire ne pouvait être applicable à notre modèle (1) compte tenu du degré de liberté trop faible de ce dernier. Le modèle pooled suppose implicitement que toutes les unités agricoles sont homogènes, c'est-à-dire qu'il n'existe aucune caractéristique spécifique inobservable affectant durablement la production agricole. Nonobstant, dans un contexte agricole, cette hypothèse est économiquement chimérique. Le test de Fisher pour données de panel fut effectué et rejette l'hypothèse nulle d'absence d'effets individuels ( $p = 3.5e-05$ ), indiquant que le modèle pooled est inadapté. Le recours à un modèle à effets fixes est ainsi empiriquement et économiquement justifié. Le modèle à effets aléatoires quant à lui repose sur une hypothèse économiquement forte :

$$Cov(\rho_c, X_{it}) = 0 \quad \forall i, t \text{ avec } \rho_c \text{ un effet fixe par céréale}$$

Entendez par là que les caractéristiques inobservables spécifique aux unités agricole sont non corrélées avec les variables explicatives. Dans le cas de la production agricole, cette hypothèse est difficilement défendable économiquement car les régions disposent de sols peu ou prou fertiles, investissent davantage ou non, le choix et l'influence des infrastructures etc. Ainsi l'hypothèse clé du modèle à effets aléatoires est violée rendant les estimateurs inconsistants et corroborant notre appétence pour un modèle à effets fixes.

Afin de permettre aux effets du climat de varier selon la céréale, nous introduisons des termes d'interaction entre le type de culture  $c \in \{\text{orge, maïs, blé}\}$  et les principaux déterminants climatiques et d'intensification ( $Temp^2$ ,  $Precip$ ,  $Irrig\_Rate$ ,  $Fertilizer$ ). L'orge est prise comme la variable de référence et les indicatrices  $\mathbb{I}\{c\}$  (pour  $c \in \{\text{orge, maïs, blé}\}$ ) multiplient chaque variable  $k \in \{T, P, I, F\}$ , ce qui permet d'estimer un effet spécifique par culture. Les coefficients  $\beta_j$  mesurent l'effet marginal de la variable  $j$  (avec  $j \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$ ) sur  $\ln(Y_{i,c,t})$  pour la culture de référence (orge), tandis que les coefficients  $\delta_c^k$  capturent l'écart d'effet pour la culture  $c$  relativement à l'orge. Ainsi, pour une variable  $k$ , l'effet marginal total pour le maïs (respectivement le blé) est  $\beta_j + \delta_{\text{maïs}}^k$  (resp.  $\beta_j + \delta_{\text{blé}}^k$ ), ce qui permet de tester directement si le climat (ou les autres

variables) affecte différemment les rendements selon la céréale. Ainsi pour une variable  $j$  et une culture  $c$ , l'effet marginal de  $X_{i,t}$  sur  $\ln(Y_{i,c,t})$  est égal à  $\beta_j + \delta_c^k$ . Cette spécification permet de tester directement si l'impact des variables climatiques et d'intensification diffère significativement selon la céréale considérée.

Le recours à un modèle à effets fixes reste donc pleinement justifié dans cette nouvelle spécification. Les pays de l'échantillon présentent en effet une hétérogénéité marquée en termes de caractéristiques agro-écologiques, institutionnelles et productives, telles que la qualité et la composition des sols, les conditions climatiques de long terme, le niveau et l'organisation des infrastructures d'irrigation ou encore les politiques agricoles. Ces facteurs, largement inobservables, sont structurels, persistants dans le temps et susceptibles d'être corrélés avec les variables explicatives du modèle.

Enfin, le rejet de l'hypothèse d'absence d'effets individuels par le test de Fisher confirme l'inadéquation d'un modèle *pooled*. De même, l'hypothèse clé du modèle à effets aléatoires, supposant l'absence de corrélation entre les effets inobservables et les régresseurs, apparaît économiquement difficilement défendable dans un contexte agricole fortement hétérogène entre pays. Le modèle à effets fixes s'impose donc comme la spécification économétrique la plus appropriée pour analyser la productivité céréalière dans ce cadre enrichi par des effets différenciés selon les cultures.

## 2.4 Limites méthodologiques

Premièrement, bien que le modèle à effets fixes permette de contrôler l'hétérogénéité inobservable constante, il ne corrige pas les biais liés aux variables omises variant dans le temps. Des facteurs tels que l'évolution des pratiques culturelles, les politiques agricoles ou l'adoption de nouvelles technologies peuvent influencer simultanément la productivité agricole et certaines variables explicatives, sans être explicitement observés dans le modèle.

Deuxièmement, certaines variables d'adaptation, notamment le proxy d'irrigation fondé sur l'efficacité de l'utilisation de l'eau, peuvent être sujettes à des erreurs de mesure. Ces erreurs peuvent atténuer les coefficients estimés et conduire à une sous-estimation des effets réels des pratiques d'adaptation.

Par ailleurs, l'analyse repose sur l'hypothèse d'exogénéité stricte des variables explicatives conditionnellement aux effets fixes. Or, certaines décisions agricoles, telles que l'irrigation

ou l'investissement, peuvent être prises en anticipation de conditions climatiques futures, introduisant un risque d'endogénéité résiduelle.

L'introduction de termes d'interaction entre les variables climatiques et le type de céréale, bien que permettant de capturer des réponses différenciées selon les cultures, s'accompagne également de limites spécifiques. En particulier, l'estimation d'effets différenciés accroît le nombre de paramètres à estimer, ce qui peut réduire la précision statistique de certains coefficients, notamment dans un échantillon de taille modérée. Certains effets spécifiques par culture doivent ainsi être interprétés avec prudence, en particulier lorsqu'ils sont faiblement significatifs.

De plus, le modèle suppose que les différences de sensibilité climatique entre céréales sont homogènes à l'intérieur de chaque pays, ce qui peut constituer une approximation. En réalité, les réponses au climat peuvent varier selon les régions, les systèmes de production ou les variétés cultivées, une hétérogénéité qui ne sont pas observables à l'échelle agrégée retenue dans l'analyse.

Enfin, les résultats doivent être interprétés comme des effets moyens intra-pays et intra-cultures, ce qui limite leur généralisation à d'autres contextes géographiques ou institutionnels. Les conclusions tirées de ce cadre empirique doivent donc être comprises comme valables pour les pays et les cultures considérés, et non comme des relations universelles.

### 3 Résultats

Cette section présente d'abord la dynamique observée des variables climatiques et agricoles à travers une analyse descriptive, avant de détailler les résultats économétriques estimant l'impact du climat et des stratégies d'adaptation sur la productivité céréalière.

#### 3.1 Analyse descriptive et dynamiques régionales

L'analyse de notre panel sur la période 2003-2022 met en lumière une forte hétérogénéité structurelle entre les six pays étudiés.

**1. Exposition climatique différenciée :** Comme l'illustre la figure 1, il existe un gradient thermique marqué au sein de l'échantillon. La Grèce et le Portugal enregistrent les températures moyennes les plus élevées (médiane  $> 16^{\circ}\text{C}$ ), tandis que la Roumanie se distingue par un climat nettement plus continental (médiane  $\approx 10,6^{\circ}\text{C}$ ). Cette disparité justifie la nécessité de contrôler

l'hétérogénéité inobservable via des effets fixes pays dans notre modélisation.

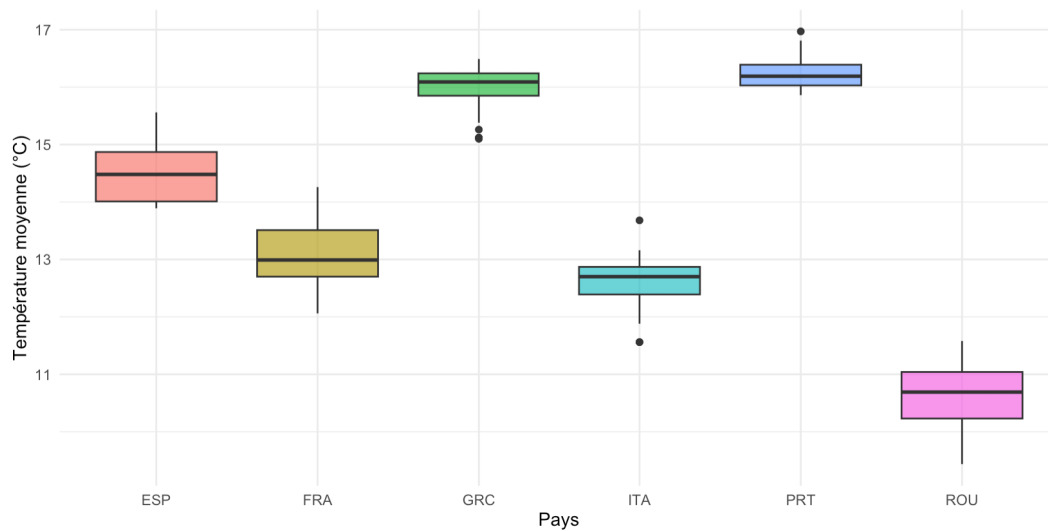


FIGURE 1 – Distribution des températures moyennes par pays (2003-2022)

**2. Trajectoires d'adaptation divergentes :** Le taux d'irrigation, levier central d'adaptation, suit des dynamiques nationales contrastées (Figure 2). La Grèce, bien qu'affichant le taux moyen le plus élevé (31,6%), connaît un déclin structurel de ses surfaces irriguées. À l'inverse, l'Espagne et l'Italie maintiennent des taux stables et élevés (respectivement 14,3% et 26,7%), témoignant d'une infrastructure hydraulique consolidée. La France et la Roumanie restent caractérisées par une agriculture majoritairement pluviale, avec des taux d'irrigation inférieurs à 10%.

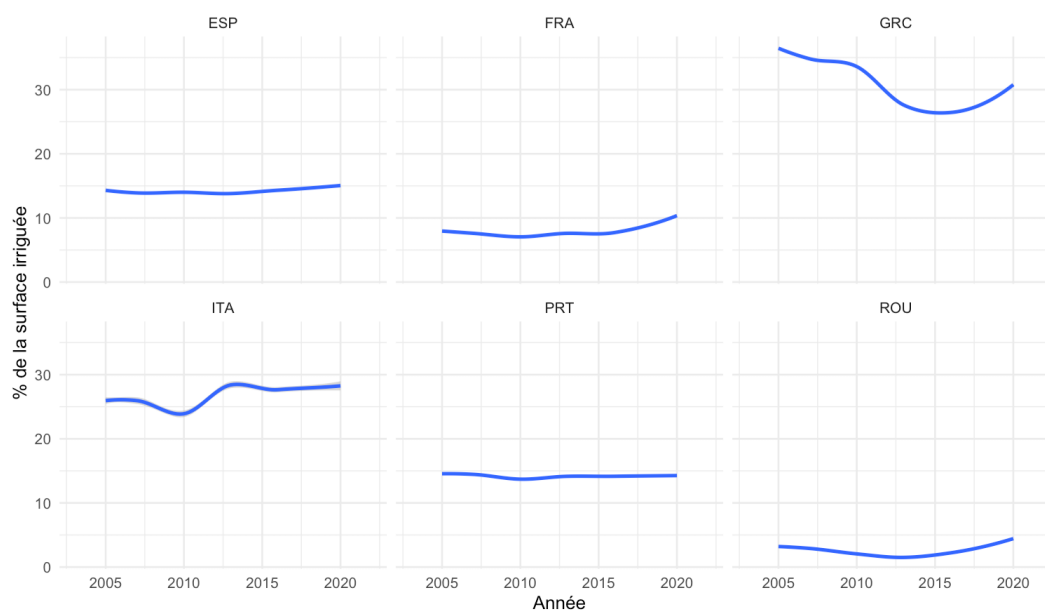


FIGURE 2 – Évolution au cours du temps du taux d'irrigation

**3. Volatilité de la production :** La figure 3 révèle la forte sensibilité des rendements aux chocs exogènes. On observe des décrochages de production synchronisés lors des années de crises climatiques majeures, notamment en 2003 (canicule européenne) et 2012. Le maïs apparaît visuellement comme la culture la plus volatile, particulièrement en Roumanie où les rendements subissent des variations extrêmes, suggérant une faible résilience technique face aux aléas.

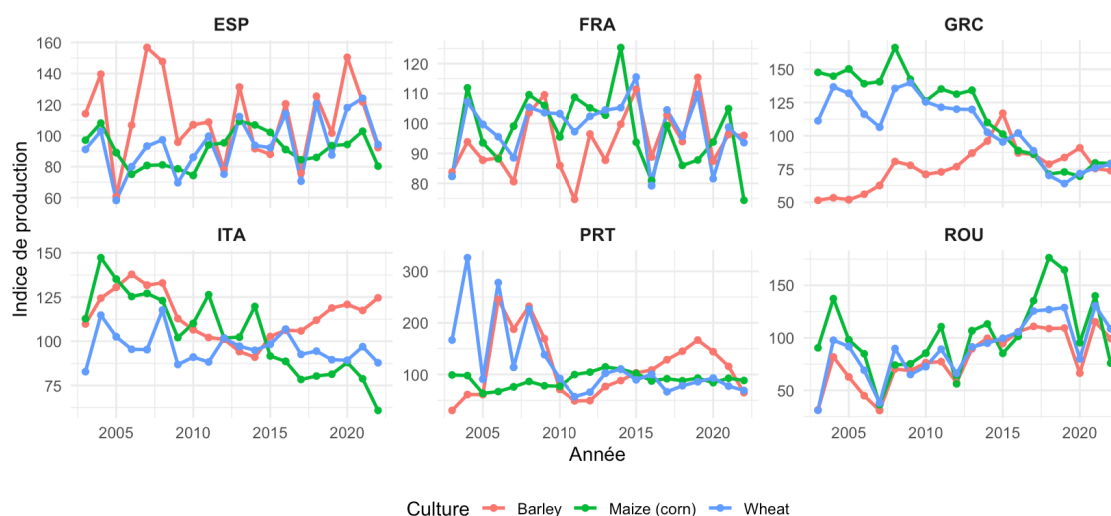


FIGURE 3 – Évolution des indices de production céréalière par culture et pays (Base 100 2014-2016)

## 3.2 Analyse économétrique des déterminants du rendement

Afin de quantifier ces relations, nous avons estimé trois modèles à effets fixes (Table 2). Les tests de spécification (Fisher, Breusch-Pagan) ont validé le choix des effets fixes et la nécessité de corriger l'hétéroscédasticité et l'autocorrélation via des erreurs-types robustes.

### 3.2.1 Analyse des rendements céréaliers et limites de la spécification par culture

Les estimations réalisées séparément pour le maïs, le blé et l'orge conduisent à des résultats strictement identiques en termes de coefficients estimés, de significativité statistique et de qualité d'ajustement pour le modèle (1). Ce constat ne traduit pas une absence de différences agronomiques ou physiologiques entre céréales, mais découle directement de la structure de la base de données mobilisée.

Comme le montre la table 2 de l'annexe, si la variable dépendante, le rendement agricole, est bien spécifique à chaque céréale, l'ensemble des variables explicatives retenues dans le modèle est observé à un niveau agrégé pays-année et ne varie pas selon le type de culture. Ainsi, pour une année et un pays donnés, ces variables prennent exactement la même valeur pour le maïs, le blé et l'orge. Dans un cadre à effets fixes estimé séparément par culture, cette absence de variation intra-pays et intra-année des régresseurs conduit mécaniquement à des estimations identiques, indépendamment du céréale considéré.

La figure 4 suggère néanmoins une relation non linéaire entre la température et le rendement agricole, compatible avec l'existence d'un seuil thermique au-delà duquel les rendements sont pénalisés. De même, les mécanismes d'adaptation liés à l'irrigation apparaissent davantage dépendants de la qualité et de l'efficacité des systèmes hydriques que de la seule intensité de l'irrigation, tandis que l'usage d'engrais joue un rôle positif dans l'intensification de la production.

L'absence de différenciation empirique entre céréales dans cette première spécification reflète donc une limite informationnelle de la base de données plutôt qu'un résultat économique structurel. Les différences biologiques, technologiques et calendaires propres aux cultures d'été (maïs) et aux céréales d'hiver (blé, orge) ne peuvent s'exprimer pleinement tant que les variables explicatives restent communes à l'ensemble des cultures.

Cette limite motive le recours à une seconde spécification économétrique intégrant explicitement des termes d'interaction entre le type de céréale et les principaux déterminants climatiques

et d'intensification, afin de permettre aux effets marginaux de varier selon la culture et de restituer une hétérogénéité des réponses climatiques plus conforme aux réalités agronomiques.

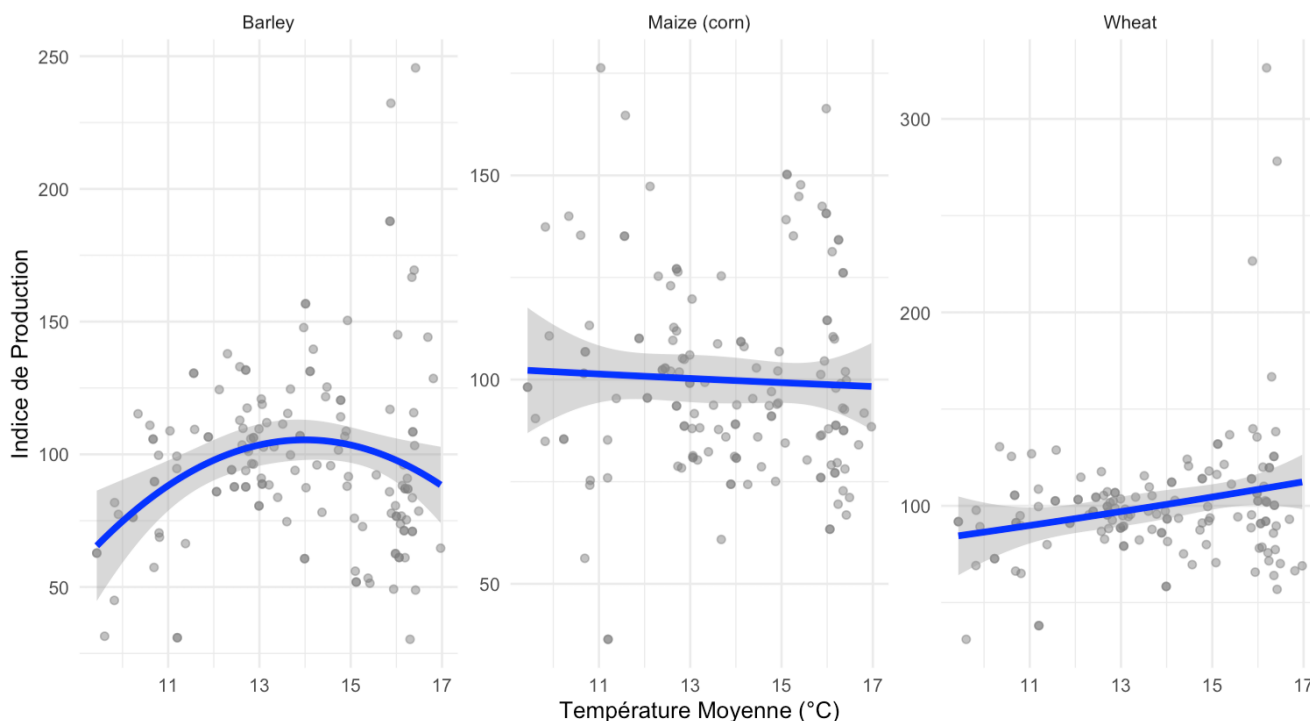


FIGURE 4 – Impact de la température sur le rendement

### 3.2.2 Interprétation des résultats

Nous estimons un modèle à effets fixe via comme pays de référence l'Espagne, l'année de référence 2003 et la culture de référence l'orge. Les résultats sont précisés dans la Table 3 en annexe.

La variable *FE année : 2004* significatif à hauteur de 5% nous indique que le rendement moyen est supérieur d'environ 32.2% à celui observé en 2003. De même pour le niveau de significativité pour les années 2009, 2013, 2014, 2015, 2016, 2018, 2019 sauf 2008 étant significatif à hauteur de 1%. Ces effets reflètent des chocs temporels communs et ne doivent pas être interprétés causalement, c'est-à-dire variables par variables.

Concernant les variables d'interactions, *Irrigation × Maïs* égale à 0.011 est significatif au seuil de 5% et nous indique que l'irrigation est significativement plus productive pour le maïs que pour l'orge, toutes choses égales par ailleurs. Il en va de même pour l'interaction *Engrais × Maïs* valant -0.003 et significatif à 5% affirmant que le rendement marginal des engrais est significativement plus fiable pour le maïs que pour l'orge *ceteris paribus*. C'est interprétation est

symétrique pour la variable *Engrais* × *Blé* significatif à 1% disant que le rendement marginal des engrais est significativement plus fiable pour le blé que pour l'orge *ceteris paribus*

En définitive, l'introduction des interactions par culture permet de dépasser les limites du premier modèle, dont les résultats strictement identiques par céréale reflétaient davantage une contrainte de spécification qu'une réalité agronomique. Là où la première approche suggérait à tort une homogénéité des réponses, le modèle enrichi met en évidence une hétérogénéité ciblée des mécanismes d'adaptation, en particulier au profit du maïs via l'irrigation, ainsi qu'une simulation plus nuancée de l'efficacité marginale des intrants selon les cultures. Ce contraste illustre que l'absence de différenciation observée initialement ne provenait pas d'une insensibilité réelle des rendements aux facteurs climatiques et techniques, mais bien d'une incapacité du premier modèle à identifier des effets spécifiques en raison de l'agrégation des données. La seconde spécification apparaît ainsi comme une amélioration nécessaire pour restituer des dynamiques économiquement cohérentes et conformes aux enseignements de la littérature.

## 4 Discussion et limites

Cette étude contribue à la littérature existante en quantifiant l'hétérogénéité des réponses céréalières face au changement climatique en Europe du Sud, mais ses résultats doivent être interprétés à la lumière de plusieurs contraintes méthodologiques.

### 4.1 Contributions principales

Notre analyse apporte un éclairage empirique sur les déterminants climatiques et techniques de la productivité céréalière en Europe du Sud, tout en mettant en évidence les contraintes informationnelles dû aux bases de données disponibles.

Premièrement, les estimations issues des modèles à effets fixes par culture révèlent que, compte tenu de la structure des données, les coefficients associés aux variables explicatives sont strictement identiques quel que soit le type de céréale considéré. Ce résultat ne traduit pas une homogénéité agronomique réelle entre le maïs, le blé et l'orge, mais découle du fait que les variables climatiques et techniques sont observées à un niveau agrégé pays–année et ne varient pas selon la culture. Cette limite informationnelle empêche toute différenciation empirique dans une spécification estimée séparément par céréale.



Deuxièmement, afin de dépasser cette contrainte, nous proposons une seconde spécification intégrant explicitement des termes d'interaction entre les variables explicatives et le type de céréale. Cette approche permet de relâcher l'hypothèse d'effets homogènes et de tester directement la présence d'effets hétérogènes des facteurs climatiques et d'intensification selon le type de culture. Les résultats du modèle global mettent en évidence une hétérogénéité partielle des mécanismes d'adaptation : le maïs se distingue notamment par une sensibilité accrue au taux d'irrigation, tandis que l'efficacité marginale des intrants diffère selon les cultures.

Troisièmement, cette recherche souligne l'importance de distinguer les leviers quantitatifs et qualitatifs de l'adaptation. Si l'irrigation constitue un facteur clé de résilience, son effet apparaît hétérogène selon les cultures et n'est significativement identifié que pour le maïs. De même, bien que l'usage d'engrais soit globalement associé à une hausse de la productivité pour la culture de référence, son efficacité marginale estimée est significativement plus faible pour le maïs et le blé, suggérant une réponse différenciée des rendements aux intrants selon la céréale considérée.

Enfin, notre contribution est également méthodologique : elle met en évidence les conséquences économétriques d'une forte agrégation des données et montre que l'introduction d'interactions constitue une réponse pragmatique pour restituer une hétérogénéité des effets lorsque l'information par culture fait défaut. Ce résultat plaide pour le développement futur de bases de données plus fines, condition nécessaire à une identification plus précise des mécanismes agronomiques structurels.

## 4.2 Limites méthodologiques

Bien que robustes, nos estimations sont sujettes à plusieurs limites inhérentes à la disponibilité des données, à leur niveau d'agrégation et aux choix méthodologiques retenus :

- **Interpolation des données d'irrigation :** Une limite majeure de notre étude réside dans la structure des données Eurostat relatives au taux d'irrigation, disponibles uniquement à intervalles irréguliers (tous les 3 à 4 ans). Afin de conserver une structure de panel équilibrée, nous avons procédé à une interpolation linéaire des valeurs manquantes. Cette méthode, bien que standard, lisse artificiellement la dynamique d'investissement et ne permet pas de capturer les ajustements rapides que les agriculteurs peuvent opérer en réponse à des chocs climatiques soudains, introduisant ainsi un biais de mesure potentiel.
- **Taille restreinte de l'échantillon :** Le panel se limite à six pays sur une période de vingt ans,

ce qui réduit les degrés de liberté disponibles pour l'estimation. Bien que l'estimateur *within* permette de contrôler l'hétérogénéité inobservable invariante, la dimension temporelle relativement courte limite la puissance statistique pour identifier des effets non linéaires complexes ou des seuils climatiques rares.

- **Agrégation temporelle des variables climatiques :** L'utilisation de moyennes annuelles pour la température et les précipitations constitue une approximation forte. En agronomie, l'impact d'un stress climatique dépend fortement du stade phénologique de la culture (floraison, remplissage du grain, etc.). Cette agrégation tend à lisser les chocs extrêmes et peut conduire à une sous-estimation des effets réels du climat sur les rendements.
- **Qualité hétérogène et manque de granularité des bases de données :** Une contrainte structurelle de cette étude tient à la forte hétérogénéité et au manque de précision des sources statistiques mobilisées. Les variables explicatives (climat, irrigation, intrants) sont disponibles au niveau national et sont identiques pour toutes les céréales au sein d'un pays et d'une année donnée. Cette absence de désagrégation par culture empêche de capter les pratiques agricoles spécifiques à chaque céréale et limite l'identification de mécanismes différenciés à partir du premier jeu de modèles estimés.
- **Conséquences sur la comparaison inter-céréales :** Cette contrainte informationnelle se traduit empiriquement par des coefficients quasi identiques entre les modèles estimés séparément pour le maïs, le blé et l'orge, les seules différences provenant de la variable dépendante (le rendement propre à chaque céréale). Cette homogénéité des résultats reflète davantage la structure des données que l'absence réelle de différences agronomiques entre cultures.
- **Justification du recours à un second modèle avec interactions :** Afin de contourner cette limite, nous avons estimé un second modèle intégrant explicitement des termes d'interaction entre les variables explicatives et le type de céréale. Cette spécification permet de relâcher l'hypothèse d'effets homogènes et d'identifier des réponses différenciées malgré l'absence de données climatiques et techniques spécifiques par culture. Ce choix méthodologique constitue une adaptation nécessaire aux contraintes des bases de données disponibles.
- **Endogénéité potentielle de l'irrigation :** Le taux d'irrigation est traité comme exogène dans notre modèle, alors même que les décisions d'investissement peuvent être prises en

anticipation de conditions climatiques futures ou en réaction à des chocs passés. Cette endogénéité inverse potentielle peut biaiser les estimations, bien que l'utilisation d'effets fixes et d'erreurs-types robustes en atténue partiellement les conséquences.

- **Absence de contrôle variétal :** Enfin, faute de données harmonisées, nous ne contrôlons pas explicitement le progrès génétique ou l'évolution variétale des cultures. Il est donc difficile de distinguer les gains de rendement imputables aux conditions climatiques de ceux résultant de l'amélioration technologique et génétique des semences.

## 5 Recommandations pour la résilience agronomique

L'analyse des dynamiques de rendement souligne que la sécurité céréalière en Europe méridionale repose désormais sur une gestion proactive des équilibres climatiques et techniques. À la lumière des tendances observées lors de notre étude, plusieurs leviers d'adaptation peuvent être activés :

- **Transition vers une irrigation de haute précision :** nos observations confirment que l'accès à l'eau est un facteur déterminant des rendements, en particulier pour les cultures estivales fortement exposées au stress hydrique, comme le maïs. Cependant, l'enjeu n'est plus seulement la quantité d'eau apportée, mais l'efficacité de son utilisation. Le passage de méthodes traditionnelles à des systèmes de précision (goutte-à-goutte, pilotage par sondes) est impératif pour maintenir la productivité tout en préservant une ressource hydrique de plus en plus rare.
- **Gestion des sols comme levier complémentaire de résilience hydrique :** au-delà des infrastructures d'irrigation, la capacité des sols à stocker et restituer l'eau constitue un déterminant essentiel de la résilience des systèmes céréaliers. Des pratiques favorisant l'amélioration de la structure des sols, telles que la couverture végétale ou la réduction du travail du sol, permettent d'accroître la rétention hydrique et de limiter les pertes par évaporation.
- **Pilotage raisonné des intrants :** si la fertilisation demeure un levier potentiel de rendement, nos résultats suggèrent que son efficacité est hétérogène selon les cultures et fortement conditionnée par les conditions climatiques. Une approche de « nutrition de précision », ajustée aux besoins réels de la plante et aux prévisions météorologiques, permet

de soutenir la vigueur des cultures sans engendrer de surcoûts inutiles ou de pressions environnementales excessives.

- **Adaptation des variétés :** le réchauffement observé impose une révision des pratiques culturales et des choix variétaux. Pour les céréales les plus sensibles aux températures élevées, telles que le maïs, l'adoption de variétés à cycle court ou à floraison précoce permettrait de réduire l'exposition aux pics de chaleur les plus dommageables. En somme, le recours à des pratiques agroécologiques favorisant une meilleure gestion des sols et des cultures pourrait renforcer la capacité d'adaptation des systèmes de production face aux contraintes climatiques croissantes.

## 6 Orientations pour les politiques publiques

- **Soutien massif à la modernisation des infrastructures :** il existe un lien étroit entre le niveau d'équipement des territoires et la stabilité des rendements agricoles. Les politiques publiques, notamment dans le cadre de la Politique Agricole Commune (PAC), gagneraient à accentuer leur soutien à la modernisation des infrastructures hydrauliques collectives, incluant la rénovation des réseaux de distribution, la réduction des pertes en ligne et le développement de solutions de stockage adaptées aux territoires les plus vulnérables.
- **Renforcement du conseil agronomique et climatique :** la complexité croissante des aléas climatiques rend nécessaire un accompagnement renforcé des exploitants agricoles. Le développement de services de conseil intégrant des données météorologiques locales, des outils d'aide à la décision en temps réel et des technologies de télédétection (imagerie satellitaire, indicateurs de stress hydrique) permettrait de mieux anticiper les périodes critiques pour les cultures. Ces dispositifs offriraient aux producteurs la possibilité d'ajuster plus finement leurs interventions en fonction de l'état réel des cultures.

## 7 Conclusion

Ce travail met en évidence la vulnérabilité croissante des systèmes céréaliers d'Europe du Sud face à l'intensification des pressions climatiques, tout en soulignant le rôle central, mais non uniforme, des mécanismes d'adaptation technique. À partir de données de panel couvrant

six pays et trois céréales sur la période 2003–2022, l’analyse économétrique confirme que le changement climatique constitue une contrainte réelle sur la productivité agricole, sans pour autant en déterminer mécaniquement l’évolution. Dans un premier temps, l’estimation de modèles à effets fixes séparés par culture a conduit à des résultats strictement identiques pour le maïs, le blé et l’orge. Cette homogénéité apparente ne reflète pas une absence de différences agronomiques entre céréales, mais résulte directement de la structure des données mobilisées : les variables climatiques et techniques sont observées à un niveau agrégé pays–année et ne varient pas selon la culture. Cette contrainte informationnelle limite toute identification empirique de réponses différenciées dans une spécification estimée séparément par céréale.

Afin de dépasser cette limite, un second modèle intégrant explicitement des termes d’interaction entre les variables explicatives et le type de céréale a été proposé. Cette spécification permet de relâcher l’hypothèse d’effets homogènes et de tester directement l’existence de réponses différenciées aux facteurs climatiques et d’intensification. Les résultats mettent en évidence une hétérogénéité partielle des mécanismes d’adaptation : le maïs se distingue notamment par une sensibilité accrue à l’irrigation, tandis que l’efficacité marginale des intrants apparaît plus faible pour le maïs et le blé relativement à la culture de référence. En revanche, les différences de réponse aux variables climatiques moyennes demeurent limitées sur la période étudiée.

Ces résultats suggèrent que, si le climat impose une contrainte croissante sur les rendements, la capacité d’adaptation repose avant tout sur des leviers techniques dont l’efficacité dépend du type de culture. L’irrigation apparaît ainsi comme un facteur clé de résilience, non pas tant par son extension quantitative que par sa mobilisation différenciée selon les besoins agronomiques. Cette lecture nuance les approches uniformes de l’adaptation et plaide pour des stratégies ciblées, adaptées aux spécificités des systèmes de culture.

Enfin, cette étude souligne les implications méthodologiques majeures liées à l’usage de données fortement agrégées. Elle montre que l’introduction de termes d’interaction constitue une réponse pragmatique pour restituer une hétérogénéité des effets lorsque l’information spécifique par culture fait défaut, tout en restant une solution imparfaite. L’avenir de la recherche sur la résilience agricole en Europe méridionale dépendra donc de la disponibilité de bases de données plus fines, à l’échelle régionale, intra-annuelle et spécifiques aux cultures, condition nécessaire pour identifier avec précision les mécanismes agronomiques et orienter efficacement les politiques d’adaptation.

## Références

- [1] Commission européenne. *Cereals, oilseeds, protein crops and rice*. Direction générale de l'agriculture et du développement rural,
- [2] Darwin, R. et Kennedy, D., (2000). *Economic effects of CO<sub>2</sub> fertilization of crops : transforming changes in yield into changes in supply*.
- [3] Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire (AGRESTE) (2025). *Note de conjoncture : Campagne 2024–2025 : un léger recul de la récolte mondiale de céréales et une production d'oléagineux toujours en hausse*. Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture.
- [4] FAO, (2025). *L'état de la sécurité alimentaire et de la nutrition dans le monde*. Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture.
- [5] Gulino, D. et Lopes, M. S, (2024). *Phenological Adaptation of Wheat Varieties to Rising Temperatures : Implications for Yield Components and Grain Quality*.
- [6] IPCC, (2022). *AR6 Working Group II, Chapter 13 : Climate change impacts and risks for agriculture*.
- [7] Olesen, J. E, (2011). *Impacts and adaptation of European crop production systems to climate change*.
- [8] Olesen, J. E, (2002). *Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy*.
- [9] Schlenker, W. et Roberts, M. J, (2009). *Nonlinear temperature effects indicate severe damages to U.S. crop yields under climate change*.
- [10] Schmidt, M. et Felsche, E (2023). *The effect of climate change on crop yield anomaly in Europe*.
- [11] Zhang, L, (2025). *Increased irrigation could mitigate future warming-induced maize yield losses in the Ogallala Aquifer*.

## Annexes

<b>Variable dépendante : log(Rendement)</b>	<b>Maïs</b>	<b>Blé</b>	<b>Orge</b>
Température moyenne au carré	−0.003*** (0.002)	<b>0.003***</b> (0.002)	<b>0.003***</b> (0.002)
Précipitations annuelles	−3.586 (5.169)	−3.586 (5.169)	−3.586 (5.169)
Irrig_Rate	<b>0.042**</b> (0.018)	<b>0.042**</b> (0.018)	<b>0.042**</b> (0.018)
Irrig_Proxy	<b>0.095*</b> (0.050)	<b>0.095*</b> (0.050)	<b>0.095*</b> (0.050)
Usage d’engrais	<b>0.123**</b> (0.048)	<b>0.123**</b> (0.048)	<b>0.123**</b> (0.048)
Observations	120	120	120
R <sup>2</sup> (within)	0.234	0.234	0.234
R <sup>2</sup> Ajusté	−0.013	−0.013	−0.013
F Statistic (df = 6 ; 89)	<b>5.496***</b>	<b>5.496***</b>	<b>5.496***</b>

Note : Les symboles \*, \*\* et \*\*\* renvoient à des seuils de significativité de 10%, 5% et 1% respectivement.

Les erreurs-types robustes sont précisées entre parenthèses.

TABLE 2 – Résultats des estimations (Effets Fixes avec erreurs-types robustes)

<i>Variable dépendante : log(Rendement)</i>					
Temp_Mean_Sq	−0.002 (0.002)	FE culture : Maïs	0.647** (0.318)	FE culture : Blé	−0.008 (0.357)
Precip_Annual	3.588 (8.585)	Irrig_Rate	0.010 (0.011)	Fertilizer	0.005*** (0.001)
Irrig_Proxy	−0.019 (0.054)	FE pays : France	−0.057 (0.133)	FE pays : Grèce	−0.174 (0.181)
FE pays : Italie	−0.221 (0.174)	FE pays : Portugal	0.073 (0.117)	FE pays : Roumanie	0.068 (0.255)
FE année : 2004	0.322** (0.138)	FE année : 2005	0.081 (0.129)	FE année : 2006	0.231 (0.143)
FE année : 2007	0.062 (0.136)	FE année : 2008	0.420*** (0.139)	FE année : 2009	0.323** (0.146)
FE année : 2010	0.174 (0.130)	FE année : 2011	0.248* (0.140)	FE année : 2012	0.148 (0.136)
FE année : 2013	0.294** (0.121)	FE année : 2014	0.305** (0.119)	FE année : 2015	0.279** (0.112)
FE année : 2016	0.254** (0.114)	FE année : 2017	0.221* (0.119)	FE année : 2018	0.241** (0.123)
FE année : 2019	0.256** (0.120)	FE année : 2020	0.155 (0.110)	FE année : 2021	0.206* (0.113)
FE année : 2022	0.168 (0.133)	Température <sup>2</sup> × Maïs	−0.001 (0.001)	Température <sup>2</sup> × Blé	0.002 (0.001)
Précipitations × Maïs	−8.217 (7.460)	Précipitations × Blé	3.919 (8.273)	Irrigation × Maïs	0.011** (0.005)
Irrigation × Blé	0.003 (0.005)	Engrais × Maïs	−0.003** (0.001)	Engrais × Blé	−0.003*** (0.001)
Constante	3.902*** (0.655)				
Observations	360	R <sup>2</sup>	0.226	R <sup>2</sup> ajusté	0.131

Note : Les symboles \*, \*\* et \*\*\* renvoient à des seuils de significativité de 10%, 5% et 1% respectivement. Les erreurs-types robustes sont précisées entre parenthèses. FE = Effet fixe

TABLE 3 – Modèle global : effets fixes pays et temps + interactions par culture