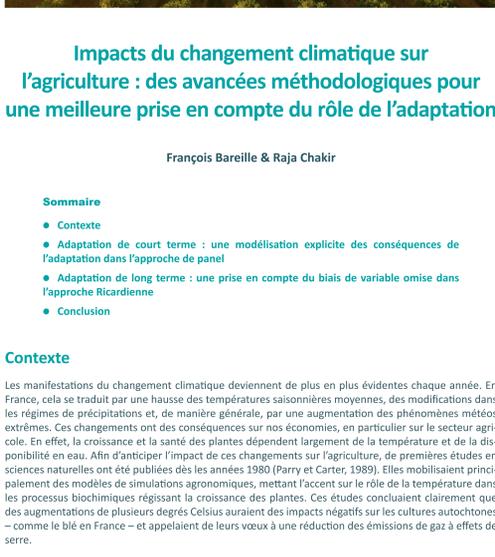


## » Edito

Le changement climatique a des répercussions de plus en plus évidentes sur nos économies, en particulier sur l'agriculture. Face à l'élévation continue des températures et à la modification de la fréquence des précipitations, l'adaptation de l'agriculture revêt une importance capitale. La littérature propose plusieurs approches pour évaluer les conséquences du changement climatique sur l'agriculture en tenant compte de l'adaptation. En particulier, la grande majorité des travaux repose sur deux types d'approches économétriques. D'une part, l'approche dite «Ricardienne» explique les variations transversales des prix des terres par des différences climatiques. D'autre part, l'approche «en panel» utilise des chocs météorologiques pour évaluer leurs effets sur les rendements/profits agricoles. Dans nos deux articles publiés en 2023, nous proposons des contributions méthodologiques à ces deux approches, fournissant de nouvelles perspectives quantitatives quant aux conséquences du changement climatique pour l'agriculture.



## Impacts du changement climatique sur l'agriculture : des avancées méthodologiques pour une meilleure prise en compte du rôle de l'adaptation

François Barelle & Raja Chakir

### Sommaire

- Contexte
- Adaptation de court terme : une modélisation explicite des conséquences de l'adaptation dans l'approche de panel
- Adaptation de long terme : une prise en compte du biais de variable omise dans l'approche Ricardienne
- Conclusion

### Contexte

Les manifestations du changement climatique deviennent de plus en plus évidentes chaque année. En France, cela se traduit par une hausse des températures saisonnières moyennes, des modifications dans les régimes de précipitations et, de manière générale, par une augmentation des phénomènes météos extrêmes. Ces changements ont des conséquences sur nos économies, en particulier sur le secteur agricole. En effet, la croissance et la santé des plantes dépendent largement de la température et de la disponibilité en eau. Afin d'anticiper l'impact de ces changements sur l'agriculture, de premières études en sciences naturelles ont été publiées dès les années 1980 (Parry et Carter, 1989). Elles mobilisaient principalement des modèles de simulations agronomiques, mettant l'accent sur le rôle de la température dans les processus biochimiques régissant la croissance des plantes. Ces études concluaient clairement que des augmentations de plusieurs degrés Celsius auraient des impacts négatifs sur les cultures autochtones – comme le blé en France – et appelaient de leurs vœux à une réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Sans remettre en cause la pertinence de la modélisation biologique de ces études, les économistes ont rapidement apporté des nuances à ces premiers résultats (Nordhaus, 1991). La critique principale des économistes réside dans le fait que, tout comme pour les autres secteurs, les agents sont rationnels et adaptent leur comportement face aux chocs exogènes. En d'autres termes, cela signifie que les agriculteurs ne laissent pas déprimer leurs cultures au fur et à mesure que les températures augmentent, mais plutôt qu'ils ajustent leurs pratiques afin de limiter les effets néfastes de ce réchauffement climatique, voire même d'en tirer profit (Mendelsohn et al., 1994). L'adaptation de l'agriculture englobe une diversité de stratégies qui peuvent être mises en œuvre avec plus ou moins de facilité. À court terme, les agriculteurs apportent des ajustements marginaux à leurs pratiques culturales, par exemple en changeant les dates de semis ou en adaptant l'utilisation des engrais et des pesticides (on parle d'adaptation «incrémentielle»). À plus long terme, ils peuvent aussi changer leur assolement, pour faire par exemple plus de place à des cultures bénéficiant de températures élevées ou en abandonnant des cultures gourmandes en eau (on parle alors d'adaptation «transformationnelle»). L'élément essentiel est que, puisque rationnels, les agriculteurs mettent en œuvre l'ensemble des stratégies d'adaptation qui leur sont bénéfiques. Par conséquent, les impacts du changement climatique sont nécessairement moins néfastes que ceux prédits par les premiers modèles de sciences naturelles, qui ne tenaient pas compte des comportements d'adaptation des agriculteurs.

Face à ce constat, les économistes ont proposé des méthodes alternatives pour estimer les impacts du changement climatique sur l'agriculture. Le point de départ de tous ces travaux économétriques repose sur l'idée que les résultats agricoles observés (e.g. les rendements, les profits, les prix des terres agricoles) sont la conséquence de l'effet cumulé des chocs exogènes – comme le climat ou la météo – et de la réponse des agriculteurs à ces chocs. En particulier, en régressant ces résultats agricoles observés sur les températures et précipitations correspondantes, les résultats obtenus sont supposés mesurer l'impact du climat pour les agriculteurs une fois qu'ils se sont adaptés, ou, en d'autres termes, la valeur du climat pour l'agriculture. En particulier, deux grandes approches coexistent parmi ces travaux.

La première, proposée par Mendelsohn et al. (1994), consiste à régresser le prix des terres agricoles sur le climat. En effet, puisque le prix des terres reflète le flux actualisé des profits futurs une fois toutes les potentielles stratégies d'adaptation mises en place, de telles régressions sont censées fournir la valeur à long terme du climat pour l'agriculture. Empiriquement, l'analyse dite «Ricardienne» est une régression de prix hédoniques conduite en coupe transversale exploitant les différences de prix des terres agricoles et de climats entre localisations. Toutefois, comme pour toutes les approches en coupe transversale, des potentielles variables omises sont susceptibles de biaiser les résultats obtenus<sup>1</sup>.

C'est pour limiter ce biais que Deschênes et Greenstone (2007) – respectivement Schlenker et Roberts (2009) – ont proposé le pendant court-termiste de l'approche Ricardienne. Celle-ci consiste à régresser les profits – resp. les rendements – sur la météo pendant la saison de croissance, conditionnellement à un effet fixe propre à la localisation. En d'autres termes, cette deuxième approche, dite «de panel», consiste à estimer les dividendes agricoles par rapport à son profit moyen sur les déviations météorologiques par rapport à la météo moyenne propre à sa localisation<sup>2</sup>. Si cette approche présente l'avantage de purger les coefficients estimés de l'influence des variables omises invariantes dans le temps, la littérature considère que l'approche de panel ne prend en compte que l'adaptation de court terme des agriculteurs, ignorant les stratégies d'adaptation de plus long terme (e.g., allocation des cultures considérée comme fixe). Par rapport à l'analyse Ricardienne, cette seconde approche est donc susceptible de surestimer les coûts du changement climatique.

Ces deux méthodes forment toutes les deux un corpus de plusieurs centaines de publications (Mendelsohn et Massetti, 2017). Nos récentes publications visent à réexaminer ces deux méthodes afin de mieux prendre en compte le rôle de l'adaptation et de ses conséquences et, in fine, mieux évaluer les impacts du changement climatique sur l'agriculture. Dans la suite de ce PSAE brief, nous présentons d'abord les avancées méthodologiques de Barelle et Chakir (2023a) pour l'approche de panel, avant de présenter les apports de Barelle et Chakir (2023b) pour l'approche Ricardienne.

### Adaptation de court terme : une modélisation explicite des conséquences de l'adaptation dans l'approche de panel

Notre objectif principal dans Barelle et Chakir (2023a) est de décomposer l'effet total de la météo sur les rendements pour évaluer de manière distincte les effets directs sur la croissance des plantes par le biais de processus biochimiques, de ceux indirects issus de l'adaptation des agriculteurs. En effet, la littérature spécialisée sur cette question suppose que les coefficients estimés abstraisément les effets météo-totaux, incluant ceux de l'adaptation. Cependant, seulement quelques études ont démontré que les agriculteurs adaptent leurs pratiques aux conditions météo, et aucune n'a vérifié si ces ajustements ont réellement une incidence sur les rendements des cultures.

Notre contribution à la littérature peut être illustrée dans la Figure 1. L'approche de panel consiste à régresser les rendements observés – représentés par la variable  $y$  – sur la météo observée (notée  $w$ ) ;  $w$  peut être un vecteur ou un scalaire – la température moyenne par exemple. Graphiquement, cela revient à identifier la différence entre les ordonnées des points A et C (Figure 1). Toutefois, les points A et C correspondent à deux optimums différents en termes de pratiques culturales (typiquement les applications d'engrais et de pesticides, représentés par  $x$ ). Spécifiquement, le point C représente un équilibre où les usages d'intrants sont plus élevés que pour le point A. Se dessine dans cet exemple graphique deux mécanismes concomitants expliquant les impacts météo-totaux suite à un choc météo. D'un côté, l'agriculteur subit d'abord pleinement le choc météo, conduisant ici à une perte de rendement correspondant à la différence d'ordonnées entre les points A et B (appelé « effet agronomique »<sup>3</sup>). De l'autre, l'agriculteur s'adapte à ce choc en ajustant ses applications d'intrants (différence entre les abscisses des points A et C, ce qui lui permet d'augmenter ses rendements (différence entre les ordonnées des points B et C, appelé « effet d'adaptation »). Ce faisant, il compense une partie du choc agronomique négatif sur les rendements. Dans l'exemple, l'effet d'adaptation lui permet de réduire de moitié ses pertes de rendements<sup>4</sup>.

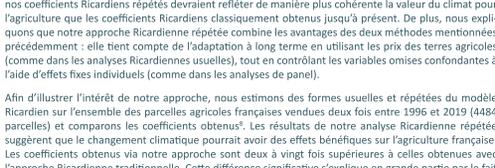


Figure 1 : Désagrégation des impacts météo-totaux suite à un choc météo.

Les courbes lient, via la fonction de production  $f(\cdot)$ , les applications d'intrants  $x$  (engrais et/ou pesticides) en abscisses, niveaux de rendements  $y$  correspondants en ordonnée, pour plusieurs conditions météo différentes. Plus spécifiquement, le point A correspond à l'optimum des applications d'intrants pour des conditions météo moyennes (e.g. température moyenne pendant la saison de croissance). Le point C correspond à l'optimum pour des conditions météo particulières (notées  $w_1$ ). Le point B correspond à l'équilibre sous  $w_1$  en l'absence d'adaptation. La différence entre les abscisses des points A et C représente ici l'adaptation optimale d'un agriculteur rationnel. Les dérivées aux points A et C sont égales et correspondent au rapport entre le prix des intrants et le prix prévu de la récolte. La différence d'ordonnées entre les points A et C correspond à l'effet météo total (négatif ici). La différence d'ordonnées entre les points A et B correspond à l'effet agronomique (négatif ici). La différence d'ordonnées entre les points B et C correspond à l'effet d'adaptation (positif ici).

Notre contribution dans Barelle et Chakir (2023a) est de proposer une approche qui permet de décomposer l'effet total comme la somme des effets agronomiques et d'adaptation. Concrètement, nous proposons un modèle microéconométrique de type structurel – dérivé d'un programme de maximisation du profit – nous permettant d'identifier conjointement les impacts de la météo sur (i) la croissance des plantes indépendamment des pratiques des agriculteurs, (ii) l'ajustement des applications d'engrais et de pesticides par les agriculteurs (via des impacts sur leur productivité) et (iii) les conséquences de ces ajustements sur les rendements. Ce faisant, nous pouvons mesurer les effets agronomiques, d'adaptation et totaux tels que définis sur la Figure 1<sup>5</sup>.

Nous estimons ce modèle sur un panel d'exploitations agricoles de la Meuse où les applications d'engrais et de pesticides sont détaillées par culture. Notre approche nous permet de décomposer les profits des agriculteurs en trois systèmes distincts : le blé, l'orge et le colza, qui représentent ensemble 80 % des surfaces de notre échantillon. Chacun de ces systèmes est composé d'une équation de rendement, d'une équation de demande d'engrais et d'une équation de demande de pesticides. Les différentes équations partagent les paramètres structurels de la fonction de production, lesquels sont estimés simultanément en utilisant à la fois les variations des ratios prix cultures/intrants et celles des températures et précipitations, en tenant compte des effets fixes individuels.

Nos résultats illustrent la capacité d'adaptation des agriculteurs face aux chocs météo. Plus spécifiquement, nous constatons une augmentation significative des applications d'engrais par les agriculteurs lorsque la température augmente pendant la saison de croissance. Nos résultats suggèrent que cette adaptation contribue considérablement à atténuer les effets néfastes du réchauffement climatique. Nous évaluons par exemple qu'un hypothétique +1°C par rapport aux moyennes de température de 2006-2012 entraînerait une réduction des rendements de blé d'environ 2%. Cette baisse serait d'environ 4% en l'absence d'adaptation. En d'autres termes, nous constatons que l'augmentation des applications d'engrais permettrait aux agriculteurs de réduire de moitié les pertes de rendement en blé. Nous observons des résultats similaires pour l'orge et le colza, avec des réductions d'environ un tiers des effets négatifs "agronomiques" liés à un hypothétique +1°C. Surtout, nous trouvons que les projections obtenues à partir de la méthode de panel classique indiquent statistiquement les mêmes pertes de rendement globales que celles obtenues avec notre modèle structurel. Cela démontre que les modèles de formes réduites couramment utilisés dans la littérature permettent bien de capturer les impacts de l'adaptation en plus de ceux directs sur la croissance des plantes.

### Adaptation de long terme : une prise en compte du biais de variable omise dans l'approche Ricardienne

Malgré les nombreuses critiques soulevées à son encontre (Cline, 1996 ; Schlenker et al., 2005 ; Deschênes et Greenstone, 2007), l'approche Ricardienne est sans doute la méthode la plus couramment employée pour estimer les coûts du changement climatique sur l'agriculture. Dans notre étude (Barelle et Chakir, 2023b), notre objectif est de proposer une solution méthodologique au principal problème empirique identifié dans la littérature Ricardienne : corriger le biais de variables omises confondantes (e.g. conditions pédologiques pouvant être corrélées au climat).

Pour ce faire, nous utilisons des données de ventes répétées de parcelles agricoles et expliquons les différences d'évolutions observées de prix des terres entre deux ventes par les différences correspondantes d'évolutions du climat<sup>6</sup>. Concrètement, notre analyse Ricardienne «répétée» implique d'introduire un effet fixe spécifique à chaque parcelle dans l'estimation Ricardienne traditionnelle. Cette approche diffère de la pratique courante dans la littérature Ricardienne, qui consiste à ajouter autant de variables de contrôle que possible. Toutefois, comme nous l'expliquons dans notre article, ces variables de contrôle sont souvent sujettes à des erreurs de mesure en raison de problèmes d'agrégation (par exemple, les conditions pédologiques mesurées à l'échelle de la commune). Étant donné que la plupart de ces variables sont constantes dans le temps, l'introduction d'effets fixes spécifiques à chaque parcelle permet d'éliminer l'effet des variables omises confondantes sur les coefficients Ricardiens estimés. Par conséquent, nos coefficients Ricardiens répétés devraient refléter de manière plus cohérente la valeur du climat pour l'agriculture que les coefficients Ricardiens classiquement obtenus jusqu'à présent. De plus, nous expliquons que notre approche Ricardienne répétée combine les avantages des deux méthodes mentionnées précédemment : elle tient compte de l'adaptation à long terme en utilisant les prix des terres agricoles (comme dans les analyses Ricardiennes usuelles), tout en contrôlant les variables omises confondantes à l'aide d'effets fixes individuels (comme dans les analyses de panel).

Afin d'illustrer l'intérêt de notre approche, nous estimons des formes usuelles et répétées du modèle Ricardien sur l'ensemble des parcelles agricoles françaises vendues deux fois entre 1996 et 2019 (4484 parcelles) et comparons les coefficients obtenus<sup>7</sup>. Les résultats de notre analyse Ricardienne répétée suggèrent que le changement climatique pourrait avoir des effets bénéfiques sur l'agriculture française. Les coefficients obtenus via notre approche sont deux à vingt fois supérieures à celles obtenues avec l'approche Ricardienne traditionnelle. Cette différence significative s'explique à un niveau plus élevé que nous ne le pensions : elle est due à une meilleure prise en compte de l'impact positif des températures estivales sur les prix des terres. À notre connaissance, c'est la première fois qu'une étude Ricardienne identifie un tel résultat. Les précédentes études Ricardiennes identifiaient plutôt un impact négatif des températures estivales sur le prix des terres. Les résultats des modèles Ricardiens classiques sur notre jeu de données indiquent également un effet négatif des températures en été. Par conséquent, la différence d'impact estimé des températures estivales entre l'approche Ricardienne traditionnelle et l'approche répétée n'est pas due à nos données, mais bien à une différence dans les stratégies d'identification. Ce constat est soutenu par plusieurs analyses de sensibilité. De plus, une analyse complémentaire suggère que cette différence est due à une meilleure prise en compte de l'impact positif des températures estivales sur la culture des vignes dans l'approche répétée, interprétation conceptuellement cohérente avec la meilleure prise en compte des effets hétérogènes de la qualité des sols sur le prix des terres dans cette dernière approche.

Enfin, les résultats de Barelle et Chakir (2023b) apportent un nouvel éclairage sur une incohérence entre les résultats théoriques et empiriques jusqu'alors obtenus dans la littérature sur l'adaptation de l'agriculture au changement climatique. Traditionnellement, la littérature considère que l'analyse Ricardienne, en raison de sa nature de long terme, devrait théoriquement aboutir à des estimations des coûts du changement climatique pour l'agriculture plus faibles que celles obtenues avec des approches de panel (de court terme). Cependant, les résultats empiriques de la littérature ont jusqu'à présent indiqué le contraire, créant ainsi une incohérence entre résultats théoriques et empiriques restée longtemps sans réponse. Pour la première fois, nous identifions ce que la théorie prédit. En adoptant une perspective à long terme, notre approche Ricardienne répétée fournit effectivement des estimations des coûts du changement climatique pour l'agriculture inférieures à celles obtenues avec des approches à court terme telles que celles de Deschênes et Greenstone (2007). Ce résultat marque un progrès significatif dans la compréhension des impacts du changement climatique sur l'agriculture et permet de mieux concilier les résultats théoriques et empiriques.

### Conclusion

L'estimation des impacts du changement climatique sur l'agriculture se fait l'objet de recherches abondantes depuis plus de 30 ans. Bien que la littérature économique se soit rapidement développée autour des approches Ricardienne et de panel, nos travaux récents (Barelle et Chakir, 2023a, 2023b) montrent que des améliorations conceptuelles pour ces deux approches sont encore possibles (et souhaitables). Nos deux articles contribuent à un agenda de recherche à court terme en matière de méthodes visant à prendre en compte de manière appropriée les effets de l'adaptation de l'agriculture (e.g. Burke et Emerick, 2016 ; Nérel et Garnier, 2021). Des efforts supplémentaires sont nécessaires dans cette direction, notamment pour mieux comprendre l'effet du changement climatique sur la sortie de l'agriculture (i.e. le plus haut niveau d'adaptation possible par définition).

### Pour en savoir plus :

Barelle, F., & Chakir, R. (2023a). Structural Identification of Weather Impacts on Crop Yields: Disentangling Agronomic from Adaptation Effects. *American Journal of Agricultural Economics*. Forthcoming.  
Barelle, F., & Chakir, R. (2023b). The impact of climate change on agriculture: a Ricardian analysis. *Journal of Environmental Economics and Management*, 119, 102822.  
Ces travaux ont été réalisés dans le cadre des projets ACCLIMATE (ANR-22-CE55-004), CLAND (ANR-16-COAV-0003) et FAST (ANR-20-PCPW-0005) financés par l'Agence Nationale de la Recherche.

**Références**  
Blanc, E., & Schlenker, W. (2017). The use of panel models in assessments of climate impacts on agriculture. *Review of Environmental Economics and Policy*, 11(2), 292-298.  
Burke, M., & Emerick, K. (2016). Adaptation to climate change: Evidence from US agriculture. *American Economic Journal: Economic Policy*, 8(3), 106-140.  
Cline, W. R. (1996). The impact of global warming of agriculture: comment. *American Economic Review*, 86(5), 1309-1311.  
Dell, M., Jones, B. F., & Olken, B. A. (2014). What do we learn from the weather? The new climate-economy literature. *Journal of Economic Literature*, 52(3), 740-780.  
Deschênes, O., & Greenstone, M. (2007). The economic impacts of climate change: evidence from agricultural output and random fluctuations in weather. *American Economic Review*, 97(1), 354-385.  
Mendelsohn, R., Nordhaus, W. D., & Shaw, D. (1994). The impact of global warming on agriculture: a Ricardian analysis. *American Economic Review*, 84(4), 753-771.  
Mendelsohn, R. O., & Massetti, E. (2017). The use of cross-sectional analysis to measure climate impacts on agriculture: Theory and evidence. *Review of Environmental Economics and Policy*, 11(2), 280-298.  
Merei, P., & Garmann, M. (2021). Climate Economics and Policy: Can the Panel Approach Account for Long-Run Adaptation? *American Journal of Agricultural Economics*, 103(4), 1207-1228.  
Nordhaus, W. D. (1991). To slow or not to slow: the economics of the greenhouse effect. *The Economic Journal*, 101(407), 920-937.  
Parry, M. L., & Carter, T. R. (1989). An assessment of the effects of climatic change on agriculture. *Climatic Change*, 15, 95-116.  
Schlenker, W., Hanemann, W. M., & Fisher, A. C. (2005). Will US agriculture really benefit from global warming? Accounting for irrigation in the hedonic approach. *American Economic Review*, 95(3), 393-406.  
Schlenker, W., & Roberts, M. J. (2009). Nonlinear temperature effects indicate severe damage to US crop yields under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(37), 15594-15598.

**Notes de fin**  
1 La qualité des sols mesurée de manière fine est un exemple de variable couramment omise dans les travaux Ricardiens. En effet, la pratique usuelle dans cette littérature est de prendre en compte la localisation (municipalité) des données agrégées cachant toutefois une grande hétérogénéité résiduelle au sein de l'unité d'agrégation, la qualité des sols restant très hétérogène dans l'espace même au sein d'une municipalité.  
2 Voir Barelle et Schlenker (2017) pour une revue de la littérature sur ces modèles de panel dans l'étude des impacts du changement climatique.  
3 La différence entre le climat et la météo tient en la distinction entre une distribution statistique et un tirage particulier de cette distribution : la météo est un tirage particulier de la distribution météorologique susceptible d'être trouvée dans la localisation en cette période de climat, ce le climat (Dell et al., 2014). En conséquence, le changement climatique correspond à un changement dans les moments de la distribution météorologique.  
4 Cette différence correspond typiquement à ce que mesureraient les premiers modèles de simulation de croissance des plantes mentionnés plus haut.  
5 Comme nous l'expliquons dans la publication associée, ces effets d'adaptation peuvent aussi conduire à réduire les applications d'intrants dans des cas où les chocs météo réduisent à la marge la productivité des intrants. Dans ce cas, la motivation sous-jacente d'intrants n'est pas l'augmentation des rendements, mais l'économie des achats d'intrants.  
6 Si nous appliquons ce modèle au cas des applications d'engrais et de pesticides, ce modèle peut être utilisé sur n'importe quel autre intrant variable.  
7 Alors que la stratégie d'identification repose sur l'exploitation de chocs météo dans Barelle et Chakir (2023a), la note de bas de page n°2 clarifie l'identification reposant sur l'exploitation de variations climatiques dans Barelle et Chakir (2023b). La note de bas de page n°2 clarifie la différence conceptuelle entre ces deux notions. Empiriquement, le climat est le plus souvent mesuré comme une moyenne sur longue période de la météo (typiquement 10 à 30 ans).  
8 Ces données ont été achetées auprès de la société ADNDV, propriétaires de la base de données PERVAL, qui recense l'ensemble des transactions notariales en France. Nous mentionnons dans Barelle et Chakir (2023b) que cet échantillon est statistiquement représentatif de l'ensemble des parcelles agricoles vendues sur la période.

Les PSAE BRIEF sont publiées par Paris Saclay Applied Economics.

Rédaction : Basak Bayraktaroglu, Christine Boissot-Santal, Claire Chamblot, Hervé Dakpo, Vincent Martinet, Gélly Meunier, Antoine Nebout

Realisation : David Delobel - Riggs Grateau - Florence Séverin