

# COMMENT ÉCONOMISER LA RESSOURCE EAU EN AGRICULTURE ?

## How to save water in agriculture ?

**CATHERINE BENJAMIN<sup>1</sup>**

Univ Rennes, CNRS, CREM – UMR6211, F-35000 Rennes, France  
catherine.benjamin@univ-rennes1.fr  
ORCID : 0000-0002-2054-7746

**ALEJANDRA GIRALDO HURTADO**

Univ Rennes, CNRS, CREM – UMR6211, F-35000 Rennes, France  
ORCID : 0000-0003-4338-2822

**Abstract :** Agricultural use of water, accounting for 70% of water use worldwide, both contributes and is confronted to water scarcity. This problem becomes more urgent as world's population continues to grow and climate change is accelerating. Improving the efficiency of water use is usually presented as an opportunity for large water savings in the agricultural sector. However, recent literature has pointed out that the introduction of more efficiency irrigation systems may actually increase water catchment depletion. This is explained by the so-called rebound effect or Jevons paradox, a phenomenon widely study in the energy sector. The price reduction following the efficiency improvement leads to an increase in water use which ends up eroding, completely or partially, the savings expected from the new technology. In this paper, we present a theoretical framework to analyze farmers' incentives to save water after an improvement of the irrigation efficiency. Moreover, we study the variability of irrigation demand following an energy price shock. Our findings suggest that incentive to water saving are determine by the underlying energy context.

**Keywords :** rebound effect, irrigation, water management.

**Résumé :** L'irrigation représente plus de 70% de l'utilisation d'eau au niveau mondial et cette activité peut non seulement subir la rareté croissante de l'eau mais aussi contribuer à sa raréfaction. Aussi, ce problème devient plus pressant avec l'augmentation de la population et l'exacerbation du changement climatique. L'amélioration de l'efficacité de l'utilisation de l'eau est généralement présentée comme une opportunité pour réaliser

---

<sup>1</sup> Université de Rennes, 7 place Hoche, 35065 Rennes.

des économies d'eau dans le secteur agricole. Toutefois, l'amélioration de l'efficacité peut avoir un effet non attendu. En raison de modification des comportements individuels des exploitants agricoles, la demande en eau peut augmenter. Cette adaptation de comportement est connue dans la littérature économique sous le nom d'effet rebond ou paradoxe de Jevons. L'amélioration de l'efficacité d'une technologie d'usage d'une ressource peut conduire à l'augmentation de la consommation de cette ressource, en réduisant les économies attendues. Dans ce papier, nous présentons un cadre théorique pour analyser les incitations des agriculteurs à économiser de l'eau suite à une amélioration de l'efficacité du système d'irrigation. De plus, nous étudions les variations de la demande d'irrigation sous différents contextes économiques, notamment, suite à un choc dans le prix de l'énergie. Nos résultats suggèrent que les incitations à faire des économies d'eau sont fortement liées au contexte énergétique.

**Mots-clés :** effet rebond, irrigation, gestion des ressources en eau.

**JEL Classification :** Q15, Q25, Q55.

## Introduction

Au niveau mondial, de nombreux rapports montrent que la demande en eau augmente fortement, notamment, en raison de la croissance de la population mondiale et de l'augmentation des superficies de terres agricoles irriguées. L'eau est, non seulement, indispensable pour la vie humaine mais elle est aussi un facteur de production essentiel pour la création de ressources alimentaires. La raréfaction des ressources en eau observée dans de nombreux pays pourraient, ainsi, conduire certaines régions à perdre jusqu'à 6% de leur PIB d'ici 2050 (World Bank, 2016).

Le changement climatique devrait aggraver l'ampleur des pénuries d'eau, surtout dans les régions qui sont déjà en déficit hydrique. A l'échelle mondiale, il est ainsi prévu que les températures dans le monde pourraient augmenter (de 1,6 degrés Celsius à 6 degrés Celsius d'ici 2050). Si les sécheresses sont plus fréquentes et plus graves, elles vont avoir des répercussions négatives sur la production agricole, tandis que la hausse des températures pourra se traduire par une augmentation de la demande en eau des cultures (World Bank, 2016). Pour chaque degré de réchauffement supplémentaire, 7% de la population mondiale pourrait connaître une diminution d'au moins 20% des ressources en eau renouvelables (GIEC, 2018).

L'agriculture peut non seulement subir la rareté croissante de l'eau mais aussi contribuer à l'exacerbation de la raréfaction de cette ressource. La consommation mondiale d'eau utilisée pour l'agriculture a ainsi été multipliée par six entre 1900 et 2014<sup>2</sup>. L'irrigation représente plus de 70% de l'utilisation d'eau au niveau mondial,

---

<sup>2</sup> Source des données *Global International Geosphere-Biosphere Programme* (IGB), publié dans le site <https://ourworldindata.org/water-use-stress>

plus de 44% en moyenne pour les pays de l'OCDE et plus de 80% pour certains pays (OCDE, 2014).

Des incitations économiques peuvent être mis en place pour tenter de résoudre ces conflits d'usage sur la ressource en eau. Classiquement, les politiques publiques visant à atténuer le problème de raréfaction de cette ressource naturelle étaient principalement orientées vers des investissements en infrastructures pour accroître l'offre d'eau (construction de barrages, de canaux, de systèmes de purification, d'usines de désalinisation et d'autres infrastructures hydrauliques). Mais ces infrastructures ont un coût financier très important. D'autres instruments incitatifs de marché peuvent être mis en place en jouant par exemple sur le niveau du prix de l'eau. Un usage excessif en eau pouvant être encouragé par le fait que, dans la plupart des pays, les agriculteurs ne paient pas l'intégralité du coût de l'eau qu'ils utilisent. Dans le domaine de l'irrigation, de nombreux travaux ont ainsi porté sur l'estimation de la demande d'eau en agriculture pour mesurer la disposition à payer des agriculteurs pour cette ressource (Pfeiffer & Lin, 2014b).

En Union Européenne, un document de référence sur la politique d'utilisation rationnelle des ressources intitulé « The Roadmap to a Resource Efficient Europe » de la Commission Européenne (CE) identifie des mesures potentielles afin de faire face à la pression actuelle sur l'utilisation de l'eau. Un levier d'action est la mise en place de subventions pour inciter les producteurs à investir dans des technologies plus économes en eau (European Commission, 2011).

L'amélioration de l'efficacité des technologies dans l'utilisation de l'eau est, généralement, présentée comme une solution pour réaliser des économies d'eau dans le secteur agricole (European Commission, 2011). Théoriquement, l'investissement dans une technologie d'irrigation économe en eau devrait permettre d'obtenir des rendements similaires à ceux obtenus avec du matériel ancien pour un volume d'eau moins important. La quantité d'eau appliquée aux cultures avec du matériel ancien est souvent perdue par évaporation sans avoir été utilisée (Pfeiffer & Lin, 2014b).

Aussi, des techniques d'irrigation plus efficaces peuvent être développées pour permettre de diminuer la quantité d'eau utilisée. Toutefois, l'amélioration de l'efficacité peut avoir un effet non attendu. En raison de modification des comportements individuels des exploitants agricoles, la demande en eau peut augmenter. En effet, les producteurs agricoles utilisant des techniques plus productives peuvent avoir une incitation à utiliser plus d'eau soit, par exemple, en irriguant de nouvelles surfaces agricoles ou en cultivant d'autres cultures nécessitant plus d'eau (Li & Zhao, 2018).

Cette adaptation de comportement est connue dans la littérature économique sous le nom d'effet rebond ou paradoxe de Jevons. L'amélioration de l'efficacité d'une technologie d'usage d'une ressource peut conduire à l'augmentation de la consommation de cette ressource. Ce paradoxe a fait l'objet de l'attention de

nombreux travaux empiriques dans le domaine de l'énergie et des transports (Sorrell, Dimitropoulos, & Sommerville, 2008).

Par rapport à la gestion de l'eau, les travaux appliqués sont très récents, la majeure partie des travaux sont des évaluations *ex-post* évaluant l'impact de programmes de subventions à l'investissement dans du matériel économe en eau. Les résultats empiriques montrent que ces programmes ont des effets contrastés sur l'usage de l'eau et ne permettent pas systématiquement une diminution de la demande en eau. Dans certains cas, ces programmes publics ont même conduit à une augmentation de l'usage en eau (Song, Guo, Wu, & Sun, 2018).

Il n'y a que très peu de travaux théoriques permettant de rechercher les conditions dans lesquelles une amélioration de l'efficacité pourrait conduire à une augmentation de la ressource en eau. Ces travaux montrent que l'augmentation de l'usage en eau peut être observée non seulement suite à une amélioration de la technologie d'irrigation, mais aussi suite à une modification du coût de l'eau (Song et al., 2018).

Un élément clé dans l'ajustement du comportement des agriculteurs est lié au prix de l'énergie qui est une composante importante du coût d'irrigation. Un système d'irrigation plus efficace est directement associé avec une demande d'énergie plus élevée, aussi, toute variation du niveau d'efficacité de l'irrigation aura un effet à la fois sur la demande d'eau et la demande d'énergie. Par conséquent, une hausse du prix de l'énergie augmente les prix des facteurs de production intensifs en énergie et notamment la demande d'eau (Pfeiffer & Lin, 2014a).

L'objet de cet article est d'identifier les facteurs garantissant l'efficacité de « l'irrigation verte », expression que nous utilisons pour dénommer l'usage de technologie d'irrigation plus économe en eau. Nous proposons un modèle de demande d'eau d'irrigation qui permettra d'analyser la variation de la demande d'eau en irrigation suite à une augmentation de l'efficacité du système d'irrigation. Notre contribution est d'endogénéiser le coût de l'eau. Nous montrons que l'effet rebond dépend du prix de l'énergie et du prix des denrées alimentaires. Cette modélisation permet de montrer que qu'une politique de subventions à l'investissement ne peut pas conduire à une diminution de la consommation en eau dans le cas de fluctuations importantes du prix de l'énergie et du prix des denrées alimentaires. Ce résultat a des implications importantes en matière de politiques publiques. D'autres mesures doivent dans ce cas être mises place. En effet, dans certains cas les subventions à l'investissement ne pourront pas permettre une économie dans l'usage de l'eau.

L'article est organisé de la façon suivante. La section 2 présente comment l'effet rebond est analysé dans la littérature et les principaux résultats. La troisième partie propose un modèle micro-économique permettant d'analyser comment la demande d'irrigation réagit à l'amélioration de l'efficacité. La dernière section discute les résultats et conclut.

## 1. L'amélioration de l'efficacité en irrigation : une revue de la littérature

La conversion vers l'utilisation de technologies d'irrigation plus efficace a souvent été encouragée par différentes politiques dans de nombreux pays. Toutefois, ces technologies n'ont pas toujours conduit à des économies d'eau.

Après avoir défini la notion d'efficacité de l'irrigation, nous proposons une synthèse de la littérature existante mesurant l'effets de programmes de subventions à l'investissement sur la consommation d'eau.

### 1.1. Qu'est-ce qu'une irrigation plus efficace ?

L'efficacité d'une technologie d'irrigation, notée par la variable  $\varepsilon$ , est définie par le rapport entre les besoins en eau des plantes et la quantité d'eau utilisée (FAO, 2004) :

$$\text{Efficacité de l'irrigation } (\varepsilon) = \frac{(\text{Quantité d'eau nécessaire pour la culture})}{(\text{Quantité d'eau fournie à la culture})} \quad (1)$$

Les besoins en eau des plantes dépendent de plusieurs facteurs, intrinsèques ou extrinsèques à la culture : nature des plantes cultivées (espèce, variété), stade de végétation, nature et état d'humidité du sol, données climatiques (précipitations, insolation, vent...). La quantité d'eau nécessaire pour la culture, est nommée besoin d'évapotranspiration (ET).

Imaginons le cas extrême d'une technologie parfaitement efficace, le volume d'eau fourni à la plante est exactement la quantité dont elle a besoin, dans ce cas  $\varepsilon = 1$ . En pratique, il n'y a aucune technologie d'irrigation qui atteigne un niveau parfait d'efficacité, en d'autres termes, la variable  $\varepsilon$  est inférieure à 1 (Huffaker & Whittlesey, 2003 ; Sears et al., 2018).

Chaque technologie se caractérise par un niveau d'efficacité spécifique. Par exemple, l'irrigation par arrosage à la raie<sup>3</sup> a une efficacité moyenne de 65%. Un système d'irrigation goutte à goutte enterré<sup>4</sup> a une efficacité moyenne de 90%. Cette dernière technique est plus efficace du fait que l'infiltration de l'eau en profondeur et le ruissellement sont moins forts que dans l'irrigation à la raie (Barta, Broner, Schneekloth, & Waskom, 2004).

La nécessité de préserver les ressources en eau amène à la mise en place de réglementations. La conversion vers des technologies d'irrigation plus efficaces a souvent

<sup>3</sup> Méthode d'irrigation de surface caractérisée par l'écoulement libre de l'eau via un réseau de canaux pouvant couvrir jusqu'à la moitié de la surface (Barta et al., 2004).

<sup>4</sup> Méthode de micro-irrigation permettant d'apporter l'eau directement sur ou dans le sol (Barta et al., 2004).

été encouragée par de nombreux gouvernements et organisations internationales via notamment des subventions à l'investissement (Menet, Leplay, Deniel, & Nauges, 2018, Sears et al., 2018).

## 1.2. Evidence de l'effet de rebond dans la littérature

Certaines contributions théoriques (Gómez & Pérez-Blanco, 2015 ; Huffaker & Whittlesey, 2003 ; Wang, Park, & Jin, 2015) suggèrent l'existence d'un effet non attendu suivant une amélioration de l'efficacité du système d'irrigation. En effet, le comportement des producteurs agricoles s'ajuste suite à l'adoption de nouvelles technologies (Gómez & Pérez-Blanco, 2015 ; Song et al., 2018).

Ainsi, Gómez et Pérez-Blanco (2015) montrent que l'effet total d'une amélioration de l'efficacité du système d'irrigation dépend de trois effets qui s'opposent entre eux : l'effet technique, l'effet coût et l'effet productivité. L'impact réel des politiques sur la conservation de la ressource en eau peut être surestimé lorsque l'interaction de ces trois effets n'est pas analysée.

Le premier effet, l'effet technique, suggère que, toutes choses égales par ailleurs, la quantité d'eau utilisée en irrigation diminue du même pourcentage que celui qui affecte l'efficacité. Supposons un agriculteur qui adopte une nouvelle technologie qui induit une amélioration de l'efficacité de 25%, les économies d'eau attendues sont alors également de 25% (toutes choses égales par ailleurs)<sup>5</sup>.

Ce raisonnement est au cœur d'un nombre important de politiques de gestion d'eau d'irrigation. Toutefois, cet impact attendu néglige le fait que les agriculteurs peuvent adapter leur comportement suite à un changement d'incitations initiales, ce qui peut créer d'autres effets.

Le second effet correspond à l'effet coût. Les principaux coûts liés à l'irrigation sont le coût lié à l'investissement dans le capital, correspondant au matériel d'irrigation; le coût associé à la consommation d'eau et le coût lié à la consommation d'énergie nécessaire au fonctionnement du matériel d'irrigation (généralement l'électricité). L'ensemble de ces coûts est dénommé le coût d'irrigation. L'utilisation d'un système d'irrigation plus efficace conduit à une utilisation plus intensive d'énergie. Aussi, le coût total d'extraction de l'eau sera plus important du fait des coûts d'énergie plus importants. En conséquence, l'effet coût conduit à une diminution de la quantité d'eau utilisée dû à l'augmentation du coût d'irrigation à la suite d'une amélioration de l'efficacité.

Enfin, le troisième effet, l'effet productivité, relève du fait que la productivité de l'eau est accrue grâce à une irrigation plus efficace. Pour une même quantité d'eau

---

<sup>5</sup> A titre d'exemple, le passage d'une irrigation à la raie, ayant un niveau d'efficacité moyen de 65%, à une irrigation goutte à goutte enterré, avec un niveau d'efficacité moyen de 90%.

appliquée de manière plus efficace, le rendement de la culture sera plus élevé, ce qui constitue une incitation à utiliser davantage la ressource en eau. Cet effet peut donc conduire à une demande d'eau plus importante.

Les deux premiers effets conduisent à une diminution de la quantité d'eau utilisée et le troisième effet, à une augmentation. Le troisième effet pourrait réduire les économies d'eau attendues de la politique. Dans ce cas, on observe ce que l'on appelle l'effet rebond ou le paradoxe de Jevons (Gómez & Pérez-Blanco, 2015). A titre d'exemple, en Chine, l'efficacité des systèmes d'irrigation a augmenté de manière continue les deux dernières décennies. Cependant, le volume d'eau prélevé n'a pas décliné comme prévu (Song et al., 2018).

L'effet rebond est donc une fonction du coût et de la productivité de l'irrigation (Berbel, Gutiérrez-Martín, Rodríguez-Díaz, Camacho, & Montesinos, 2015). Si l'effet productivité est suffisamment élevé, l'accès à une technologie d'irrigation plus efficace inciterait les agriculteurs à ajuster le type de culture, privilégiant des cultures avec des besoins d'eau plus élevés, ainsi qu'à augmenter la surface irriguée (Li & Zhao, 2018 ; Pfeiffer & Lin, 2014b). De plus, si la demande d'eau est élastique et si la nouvelle technologie augmente le rendement agricole, le volume d'eau utilisé augmentera (Huffaker & Whittlesey, 2003 ; Pfeiffer & Lin, 2014b ; Ward & Pulido-Velazquez, 2008).

Les institutions peuvent tenir un rôle clé dans les politiques de conservation de l'eau. Plusieurs études montrent que l'effet rebond est faible, voire inexistant, quand l'utilisation de l'eau et de la terre sont restreintes jusqu'à un certain seuil (e.g. Berbel & Mateos, 2014 ; Li & Zhao, 2018 ; Ward & Pulido-Velazquez, 2008). C'est pourquoi, des régulations concernant les droits sur l'extraction de l'eau peuvent limiter l'effet rebond sans pour autant réduire les incitations à améliorer la technologie d'irrigation (Berbel et al., 2015 ; Li & Zhao, 2018).

### **1.3. Rôle du prix de l'énergie sur l'investissement**

Un autre élément clé dans l'ajustement du comportement des agriculteurs est lié au prix de l'énergie, qui est une composante importante du coût d'irrigation (Pfeiffer & Lin, 2014a ; Zilberman, Sproul, Rajagopal, Sexton, & Hellegers, 2008). Une hausse du prix de l'énergie augmente les prix des facteurs de production intensifs en énergie et notamment la demande d'eau. Cette hausse va aussi avoir un impact sur le prix des denrées alimentaires (Zilberman et al., 2008).

Un système d'irrigation efficace est un facteur de production intensif en énergie. En conséquence, l'impact d'une variation du coût des facteurs de production suite à un choc sur le prix de l'énergie a un impact négatif sur les décisions d'investissement dans un système d'irrigation plus efficace. L'impact du prix de l'énergie sur les décisions d'investissement en efficacité a été peu abordé dans la littérature

(Wang, Zhou, & Zhou, 2012). L'effet d'un changement des prix de l'énergie sur l'effet rebond et les incitations à investir dans une nouvelle technologie d'irrigation n'a pas été analysé jusqu'à présent.

Nous proposons un modèle de demande d'eau d'irrigation qui nous permettra d'examiner les potentiels effet rebond et les incitations à investir en dans un système d'irrigation plus efficace sous différentes conjonctures économiques. En particulier, nous cherchons à analyser l'effet d'une même politique publique (notamment une subvention à l'investissement) dans le cas d'une hausse du prix de l'énergie.

## 2. Modélisation de la demande d'eau d'irrigation

Cette section présente la base théorique pour un modèle de demande d'eau d'irrigation en s'appuyant sur le modèle d'Huffaker (2008). Ce cadre nous permettra d'analyser dans quel contexte l'agriculteur aura intérêt à investir dans une technologie d'irrigation plus efficace et quel sera l'effet d'une amélioration de l'efficacité en irrigation sur la demande en eau.

### 2.1. La demande en eau et les composantes du prix d'irrigation

La demande en eau de l'agriculteur dépend des prix des facteurs de production utilisés : le prix de l'eau, le prix lié à l'investissement dans un système d'irrigation plus ou moins performant, et le prix de l'énergie utilisé pour mettre en place la technique d'irrigation (électricité par exemple). Cette demande en eau dépend par ailleurs aussi de l'efficacité technique des équipements utilisés.

Le coût d'irrigation pour l'agriculteur est noté  $C_w$ , il inclut le coût du carburant et de main d'œuvre nécessaires à l'irrigation de l'eau. Le prix lié à l'investissement dans le système d'irrigation est une fonction linéaire et croissante du niveau d'efficacité  $I$ , ( $\epsilon$ ).

Suivant la démarche présentée par Wang et alii (2015), nous modélisons le programme de l'agriculteur, dans son choix de demande d'eau, comme une décision en deux étapes. Dans la première étape, le producteur choisit la technologie d'irrigation et dans l'étape suivante le producteur choisit le niveau d'eau d'irrigation, sous condition de la technologie choisie dans l'étape précédente, de façon à maximiser son profit de court terme. Le programme est résolu par rétro-induction.

Dans un premier temps nous allons présenter un modèle simplifié décrivant le programme de maximisation de l'agriculteur, dans le cas où le  $C_w$  est constant. Par la suite, ce coût sera défini comme fonction du prix de l'énergie, ce qui permettra d'étudier l'investissement en efficacité ainsi que la variation de la demande en eau avec les prix de l'énergie.

## 2.2. Coût d'irrigation constant

Chaque unité d'eau appliquée à la culture sert à satisfaire ses besoins en eau ou sa demande d'évapotranspiration ( $ET$ ). L'efficacité du système d'irrigation est le pourcentage de la quantité totale d'eau d'irrigation fournie qui satisfait la demande d' $ET$  de la culture, dénotée par la variable d'efficacité  $\varepsilon \in (0,1]$ . Reprenant l'équation (1), nous avons la relation  $ET = \varepsilon W$ : les besoins en eau des plantes correspondent à une fraction  $\varepsilon$  de la consommation d'eau totale, dénotée  $W$  (Gómez & Pérez-Blanco, 2015).

Nous supposons que les rendements de l'agriculteur sont définis par la fonction  $Y = Y(W, \varepsilon)$ , cette fonction est concave par rapport au niveau d'eau fournie et l'efficacité du système d'irrigation. Nous résolvons tout d'abord la seconde étape du programme. L'agriculteur, choisit le niveau d'eau d'irrigation  $W(\varepsilon)$  qui maximise son profit, sous contrainte du niveau d'efficacité  $\varepsilon$ .

Le programme s'écrit de la façon suivante :

$$\max_W \pi = \max_W PY(W, \varepsilon) - C_W W \quad (2)$$

La condition nécessaire de premier ordre (CPO) pour le programme (1) s'écrit :

$$\frac{\partial \pi}{\partial W} = P \frac{\partial Y}{\partial W}(W^*, \varepsilon) - C_W = 0 \quad (3)$$

Nous calculons la dérivée totale de l'équation (3) par rapport à l'efficacité ( $\varepsilon$ ) pour mesurer la variation de la demande optimale en eau d'irrigation,  $W^*(\varepsilon, P, C_W)$ , suite à une amélioration de l'efficacité.

La variation de la demande en eau suivant une variation de l'efficacité est donnée par

$$\frac{\partial W}{\partial \varepsilon} = - \frac{\frac{\partial^2 Y}{\partial \varepsilon \partial W}(W^*, \varepsilon)}{\frac{\partial^2 Y}{\partial W^2}(W^*, \varepsilon)} \quad (4)$$

Ce résultat nous montre que, dans le cas d'un coût d'extraction constant, la variation de la demande en eau suite à une variation de l'efficacité dépend du signe de la dérivée croisée entre l'efficacité et la consommation d'eau. En d'autres termes, la relation de complémentarité ou substituabilité entre les deux facteurs de productions.

Si cette dérivée a un signe positif ( $\partial^2 Y / \partial \varepsilon \partial W > 0$ ), tel que Gómez & Pérez-Blanco (2015) suggèrent, la demande en eau d'irrigation  $W$  augmente et il y aura un effet rebond (effet productivité).

Si cette dérivée a un signe négatif ( $\partial^2 Y / \partial \varepsilon \partial W < 0$ ), on observe une diminution de l'usage en eau. La politique a donc un effet positif seulement dans le cas où l'amélioration de l'efficacité diminue la productivité de l'eau.

Nous résolvons la première étape du programme, où l'agriculteur décide le niveau d'investissement dans la technologie d'irrigation. Le programme de maximisation pour cette étape est donné par :

$$\max_{\varepsilon} \pi = \max_{\varepsilon} PY(W(\varepsilon), \varepsilon) - C_w W(\varepsilon) - I(\varepsilon)\varepsilon \quad (5)$$

La condition nécessaire du premier ordre pour le programme (5) s'écrit :

$$\frac{\partial \pi}{\partial \varepsilon} = P \left[ \frac{\partial Y}{\partial W} \frac{\partial W}{\partial \varepsilon} + \frac{\partial Y}{\partial \varepsilon} \right] - C_w \frac{\partial W}{\partial \varepsilon} - \frac{\partial I}{\partial \varepsilon} \varepsilon - I(\varepsilon) = 0 \quad (6)$$

En utilisant les informations déterminées précédemment, nous remplaçons (3) sur les CPO (6), nous trouvons :

$$P \frac{\partial Y}{\partial \varepsilon} = \frac{\partial I}{\partial \varepsilon} \varepsilon + I(\varepsilon) \quad (7)$$

Cette condition nous indique que la recette marginale de l'agriculteur augmente après l'amélioration de l'efficacité du système d'irrigation.

### 2.3. Coût d'irrigation variable

Le coût d'irrigation peut se voir affecté par différents chocs exogènes pouvant modifier le coût du transport ou des facteurs de production agricoles. Comme l'énergie est un input important dans la production agricole, la variation de son prix a un impact sur les facteurs de production agricole intensifs en énergie, la demande en eau et les prix des denrées alimentaires. Cette section analyse l'effet d'une augmentation du prix de l'énergie sur l'investissement en efficacité et la demande d'eau d'irrigation.

La consommation d'eau d'irrigation sera affectée par une variation du prix de l'énergie par différents canaux. Il y a un effet direct, reflété dans l'augmentation du coût d'irrigation. De plus, il y a un effet indirect qui apparaît par le choix de la technologie d'irrigation, par le fait que les procédés d'irrigation plus efficaces nécessitent de plus d'énergie pour leur fonctionnement.

Par simplicité, dans ce modèle nous considérons qu'il n'y a pas des coûts de transport et que le seul facteur de production intensif en énergie est le niveau d'efficacité de la technologie d'irrigation. Le prix de l'énergie est dénoté  $p_e$ .

Le programme d'optimisation de l'agriculteur de la deuxième étape correspond à :

$$\max_W \pi = \max_W PY(W(\varepsilon(p_e), p_e), \varepsilon(p_e)) - C_W(\varepsilon, p_e)W(\varepsilon(p_e), p_e)) \quad (8)$$

La condition nécessaire de premier ordre (CPO) pour le programme (8) est :

$$\frac{\partial \pi}{\partial W} = P \frac{\partial Y}{\partial W} (W^*(\varepsilon(p_e), p_e), \varepsilon(p_e)) - C_W(\varepsilon, p_e) = 0 \quad (9)$$

Afin d'évaluer la variation de la demande optimale en eau d'irrigation,  $W^*(\varepsilon, C_W, P, p_e)$ , suite à un changement du prix de l'énergie, nous prenons la dérivée totale de l'équation (9) par rapport à  $p_e$ . Nous trouvons que :

$$\frac{\partial W}{\partial p_e} + \frac{\partial W}{\partial C_W} \frac{\partial C_W}{\partial p_e} = - \frac{\frac{\partial^2 Y}{\partial \varepsilon \partial W} \frac{\partial \varepsilon}{\partial p_e}}{\frac{\partial^2 Y}{\partial W^2}} + \frac{\frac{\partial C_W}{\partial p_e}}{P \frac{\partial^2 Y}{\partial W^2}} + \frac{\frac{\partial C_W}{\partial \varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial p_e}}{P \frac{\partial^2 Y}{\partial W^2}} \quad (10)$$

Ce résultat montre que la variation de la demande en eau suivant une variation du prix de l'énergie est composée de trois termes. D'abord, nous retrouvons le résultat classique, présenté dans la section précédente (équation (4)), correspondant à l'effet productivité multiplié par la variation de l'investissement en efficacité suite à une hausse du prix de l'énergie. Comme nous avons discuté précédemment, cet effet peut être négatif (économies d'eau) ou positif (effet rebond).

Le terme suivant est négatif et correspond à l'effet coût discuté dans la section précédente (Gómez & Pérez-Blanco, 2015). En effet, une augmentation du prix de l'énergie va enchérir l'irrigation d'eau.

Enfin, le troisième terme peut être positif ou négatif, son signe dépend de la variation de l'investissement en efficacité suite à une hausse du prix de l'énergie ( $\partial \varepsilon / \partial p_e$ ). Il se peut qu'une variation du prix de l'énergie modifie les incitations des agriculteurs à investir dans un système d'irrigation plus efficace. Nous évaluons ci-après, dans la première étape du programme de l'agriculteur, où il décide le niveau d'investissement dans la technologie d'irrigation.

Le programme de maximisation de la première étape, l'équation (11) ci-dessous, nous montre à nouveau que la recette marginale augmentera toujours après l'amélioration de l'efficacité du système d'irrigation :

$$\frac{\partial \pi}{\partial \varepsilon} = P \left[ \frac{\partial Y}{\partial W} \frac{\partial W}{\partial \varepsilon} + \frac{\partial Y}{\partial \varepsilon} \right] - C_W \frac{\partial W}{\partial \varepsilon} - \frac{\partial I}{\partial \varepsilon} \varepsilon - I(\varepsilon) = 0 \quad (11)$$

Afin d'évaluer l'effet d'une augmentation du prix de l'énergie sur l'investissement dans des technologies d'irrigation plus efficaces, nous prenons la dérivée totale des conditions de premier ordre (11) par rapport à  $P_e$ , ce qui nous amène à :

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial p_e} = \frac{P \frac{\partial^2 Y}{\partial \varepsilon \partial W} \frac{\partial W}{\partial p_e}}{2 \frac{\partial I}{\partial \varepsilon} - P \left[ \frac{\partial^2 Y}{\partial \varepsilon^2} + \frac{\partial^2 Y}{\partial \varepsilon \partial W} \frac{\partial W}{\partial \varepsilon} \right]} \quad (12)$$

Ce résultat suggère que si la productivité de l'eau n'augmente pas avec une irrigation plus efficace ( $\partial^2 Y / \partial \varepsilon \partial W < 0$ ), l'investissement dans une irrigation plus efficace sera intéressant pour les agriculteurs ( $\partial \varepsilon / \partial p_e > 0$ ) puisqu'ils pourront faire des économies d'eau et compenser ainsi l'augmentation du coût de production issue de la hausse du prix de l'énergie. Revenant au résultat précédent, tous les éléments de l'équation (10) seront négatifs, ce qui indique que la consommation d'eau diminuera.

En d'autres termes, plus le coût de la production est élevé (en réponse à la hausse du prix de l'énergie), plus l'agriculteur aura intérêt à investir dans une technologie d'irrigation plus efficace pour réaliser des économies d'eau.

En revanche, si la productivité de l'eau est accrue grâce à une irrigation plus efficace ( $\partial^2 Y / \partial \varepsilon \partial W > 0$ ), l'agriculteur n'aura pas d'incitation à investir en efficacité ( $\partial \varepsilon / \partial p_e < 0$ ). Si la productivité de l'eau augmente avec l'efficacité de l'irrigation, l'agriculteur aurait intérêt à augmenter la consommation d'eau pour profiter d'une productivité plus importante. En effet, dans ce cas la réduction de la consommation d'eau, exprimé dans l'équation (10), sera plus faible voire nulle.

Or, le coût de la production étant élevé en réponse à la hausse du prix de l'énergie, l'investissement en efficacité n'est pas la priorité de l'agriculteur.

### 3. Discussion : implication pour les politiques environnementales

Le modèle présenté dans la section précédente suggère que, sous certains contextes économiques, les politiques encourageant l'irrigation « verte » peuvent contribuer à augmenter la demande d'eau et, par conséquent, contribuer à la raréfaction de l'eau. Les économies d'eau ou l'effet rebond dépendent de la relation entre deux facteurs de production : l'eau et l'efficacité de l'irrigation. Le tableau 1 présente une synthèse des résultats du modèle. Nous analysons deux situations de l'économie (hausse de prix de l'énergie et hausse de prix de denrées alimentaires) par rapport à une situation de référence. La situation de référence résume l'effet d'une politique de conservation d'eau où l'on prend en compte uniquement le changement de l'efficacité (cas considéré dans la littérature).

Si la productivité de l'eau n'augmente pas avec une irrigation plus efficace, une amélioration de l'efficacité conduit toujours à une économie d'eau. Inversement, si la productivité de l'eau est accrue grâce à une irrigation plus efficace, le modèle suggère que l'ajustement de la consommation d'eau dépend de l'interaction entre l'effet productivité (qui découle du fait d'une irrigation plus efficace) et l'effet coût (qui existe du fait que la technologie plus efficace demande plus d'énergie). Les économies en eau vont alors dépendre de l'effet dominant. Si l'effet productivité domine, il y aura un effet rebond. Sinon, il y aura des économies d'eau mais qui ne seront pas si importantes que celles qui étaient escomptées.

Par ailleurs, une variation du prix de l'énergie peut avoir différents effets, jouant à la fois sur l'effet rebond et sur les incitations à investir dans un système d'irrigation plus efficace. Nous analysons ici deux cas de figure selon si la productivité de l'eau diminue (cas 1) ou augmente (cas 2) suite à l'adoption d'un système d'irrigation plus efficace. Par la suite, nous analysons un troisième cas, lorsque nous observons une hausse des prix des denrées alimentaires.

**Tableau 1. Synthèse des résultats et politiques de conservation d'eau**

		<b>Diminution de la consommation d'eau</b>	<b>Autres effets</b>	<b>Politique de conservation de l'eau</b>
<i>Situation de référence :</i>				
	$\frac{\partial^2 Y}{\partial \varepsilon \partial W} < 0$	toujours		- aide à l'investissement en efficacité
	$\frac{\partial^2 Y}{\partial \varepsilon \partial W} > 0$	faible ou inexistantes (effet rebond)		- aide à l'investissement avec régulations sur les prélèvements d'eau
<i>Augmentation du prix de l'énergie :</i>				
cas 1	$\frac{\partial^2 Y}{\partial \varepsilon \partial W} < 0$	toujours	- hausse du coût d'irrigation - incitations à investir en efficacité	- aide à l'investissement en efficacité
cas 2	$\frac{\partial^2 Y}{\partial \varepsilon \partial W} > 0$	faible ou inexistantes (effet rebond)	- hausse du coût d'irrigation - pas d'incitations à investir en efficacité	- subvention aux prix de l'énergie - aide à l'investissement avec régulations sur les prélèvements d'eau
<i>Augmentation prix des denrées alimentaires :</i>				
cas 3 (a)	$\frac{\partial^2 Y}{\partial \varepsilon \partial W} < 0$	toujours	- incitations à produire d'avantage - augmentation consommation d'eau	- aide à l'investissement en efficacité
cas 3 (b)	$\frac{\partial^2 Y}{\partial \varepsilon \partial W} > 0$	faible ou inexistantes (effet rebond)		- aide à l'investissement avec régulations sur les prélèvements d'eau

Dans le premier cas de figure (cas 1), une hausse du prix de l'énergie par rapport à la situation de référence conduit les producteurs agricoles à investir dans une technologie d'irrigation plus efficace. Ainsi, les économies d'eau issues de l'efficacité pourraient compenser l'augmentation du coût de production induit par la hausse du prix de l'énergie. Dans cette situation, une aide à l'investissement en technologies d'irrigation plus efficaces pourrait aider les agriculteurs à réduire le coût de production par le biais d'une moindre consommation d'eau.

Dans le deuxième cas de figure, une hausse du prix de l'énergie n'encourage pas les producteurs agricoles à investir dans une technologie d'irrigation plus efficace. Lorsque la productivité de l'eau augmente avec l'efficacité de l'irrigation, les économies d'eau issues de l'efficacité sont faibles, voire négatives (en raison de l'effet rebond).

Une aide à l'investissement en efficacité aurait moins d'intérêt pour les agriculteurs qui cherchent à réduire leur coût de production, étant donné que les économies d'eau sont moins conséquentes (voire nulles). C'est pourquoi, l'objectif de conservation d'eau sera atteint que si une subvention aux prix de l'énergie est mise en place pour diminuer la charge induite par la hausse de coûts, et ainsi donner des incitations à investir en efficacité. De plus, la politique d'encouragement à l'investissement doit être accompagnée d'une régulation sur la consommation d'eau de chaque agriculteur pour éviter l'effet rebond.

Le troisième cas de figure apparaît quand la hausse du prix de l'énergie provoque une réduction de l'offre de produits agricoles et, par ce biais, à la hausse des prix des denrées alimentaires. Les agriculteurs ont intérêt à produire davantage, ce qui conduit à une augmentation de la consommation d'eau liée à l'irrigation.

Dans une situation de hausse des prix des denrées alimentaires, l'effet coût direct (équation 10) sera plus faible. L'augmentation de recettes résultant du prix plus élevé viendra compenser l'augmentation du coût d'utilisation de l'eau. De ce fait, les économies d'eau attendus d'un système d'irrigation plus efficace seront plus faibles (voire négatives s'il y a un effet rebond), puisque dans tous les cas, les agriculteurs chercheront à augmenter leur production.

Ainsi, si la productivité de l'eau n'augmente pas avec une irrigation plus efficace, les instruments de politique publique doivent permettre d'encourager l'investissement dans un système d'irrigation plus efficace, pour que les producteurs agricoles augmentent la production sans augmenter la consommation d'eau. Par ailleurs, si la productivité de l'eau augmente avec l'efficacité, la régulation de la consommation d'eau de chaque agriculteur est indispensable afin d'éviter l'effet rebond.

En conclusion, le rôle des politiques publiques est primordial pour assurer la préservation de l'eau. Nos résultats suggèrent qu'il est nécessaire d'harmoniser les différents objectifs de politiques, comme le soutien aux revenus des exploitants agricoles et les objectifs environnementaux, afin que l'impact agrégé des politiques soit positif et non pas annulé.

## Conclusion

Dans cet article nous proposons un modèle de demande d'eau d'irrigation qui analyse la variation de la demande d'eau suite à une augmentation de l'efficacité du système d'irrigation. Le modèle permet d'identifier sous quelles conditions l'amélioration de l'efficacité peut entraîner un effet rebond ou paradoxe de Jevons. En effet, les producteurs agricoles utilisant des techniques plus productives peuvent avoir une incitation à utiliser plus d'eau soit, par exemple, en irriguant de nouvelles surfaces agricoles ou en cultivant d'autres cultures nécessitant plus d'eau. Notre contribution est d'endogénéiser le coût de l'eau.

Nous montrons que l'effet rebond dépend du prix de l'énergie et du prix des denrées alimentaires. Le modèle suggère que, sous certains contextes économiques, les politiques encourageant l'irrigation « verte » peuvent contribuer à augmenter la demande d'eau et, par conséquent, contribuer à la raréfaction de l'eau. En particulier, une politique de subventions à l'investissement ne peut pas conduire à une diminution de la consommation en eau dans le cas de fluctuations importantes du prix de l'énergie et du prix des denrées alimentaires.

Ce résultat a des implications importantes en matière de politiques publiques. D'autres mesures doivent, dans ce cas, être mises place. En effet, dans certains cas les subventions à l'investissement ne pourront pas permettre une économie dans l'usage de l'eau. Nos résultats suggèrent qu'il est nécessaire d'harmoniser les différents objectifs de politiques, comme le soutien aux revenus des exploitants agricoles et les objectifs environnementaux (tels que les économies d'eau), afin que l'impact agrégé des politiques soit positif et non pas annulé.

## References

- Barta, R., Broner, I., Schneekloth, J., & Waskom, R. (2004). *Colorado High Plains irrigation practices guide. Water saving options for irrigators in Eastern Colorado*. (Special Report No. 14). Colorado Water Resources Research Institute.
- Berbel, J., Gutiérrez-Martín, C., Rodríguez-Díaz, J. A., Camacho, E., & Montesinos, P. (2015). Literature review on rebound effect of water saving measures and analysis of a Spanish case study. *Water Resources Management*, 29(3), 663-678.
- Berbel, J., & Mateos, L. (2014). Does investment in irrigation technology necessarily generate rebound effects? A simulation analysis based on an agro-economic model. *Agricultural Systems*, 128, 25-34.
- European Commission. (2011). *Roadmap to a resource efficient Europe* (p. 1-25).
- FAO. (2004). L'utilisation de l'eau en agriculture. In *L'eau, l'agriculture et l'alimentation. Une contribution au Rapport mondial sur la mise en valeur des ressources en eau*.

- GIEC. (2018). *Rapport spécial du GIEC sur les conséquences d'un réchauffement*. Intergovernmental Panel on Climate Change. Retrieved from <https://www.ipcc.ch/>
- Gómez, C. M., & Pérez-Blanco, C. D. (2015). *Simple myths and basic maths about greening irrigation*. (Nota di Lavoro No. 8).
- Huffaker, R. (2008). Conservation potential of agricultural water conservation subsidies. *Water Resources Research*, 44(7). <https://doi.org/10.1029/2007WR006183>
- Huffaker, R., & Whittlesey, N. (2003). A theoretical analysis of economic incentive policies encouraging agricultural water conservation. *International Journal of Water Resources Development*, 19(1), 37-53.
- Li, H., & Zhao, J. (2018). Rebound effects of new irrigation technologies: The Role of water rights. *American Journal of Agricultural Economics*, 100(3), 786-808.
- Menet, L., Leplay, S., Deniel, E., & Nauges, C. (2018). Économiser l'eau pour l'irrigation par les changements de pratiques agricoles: Analyse comparée de politiques publiques et pistes d'amélioration en France. Oréade-Brèche.
- OCDE. (2014, May 6). *Compendium des indicateurs agro-environnementaux de l'OCDE*.
- Pfeiffer, L., & Lin, C.-Y. C. (2014a). The effects of energy prices on agricultural groundwater extraction from the High Plains aquifer. *American Journal of Agricultural Economics*, 96(5), 1349-1362.
- Pfeiffer, L., & Lin, C.-Y. C. (2014b). Does efficient irrigation technology lead to reduced groundwater extraction? Empirical evidence. *Journal of Environmental Economics and Management*, 67(2), 189-208.
- Sears, L., Caparelli, J., Lee, C., Pan, D., Strandberg, G., Vuu, L., & Lin Lawell, C.-Y. (2018). Jevons' paradox and efficient irrigation technology. *Sustainability*, 10(5), 1590.
- Song, J., Guo, Y., Wu, P., & Sun, S. (2018). The agricultural water rebound effect in China. *Ecological Economics*, 146, 497-506.
- Sorrell, S., Dimitropoulos, J., & Sommerville, M. (2009). Empirical estimates of the direct rebound effect: A review. *Energy Policy*, 37(4), 1356-1371. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.11.026>
- Wang, T., Park, S. C., & Jin, H. (2015). Will farmers save water? A theoretical analysis of groundwater conservation policies. *Water Resources and Economics*, 12, 27-39. <https://doi.org/10.1016/j.wre.2015.10.002>
- Wang, H., Zhou, P., & Zhou, D. Q. (2012). An empirical study of direct rebound effect for passenger transport in urban China. *Energy Economics*, 34(2), 452-460. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2011.09.010>
- Ward, F. A., & Pulido-Velazquez, M. (2008). Water conservation in irrigation can increase water use. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(47), 18215-18220.
- World Bank. (2016). *High and dry : Climate change, water, and the economy*. Washington, DC.
- Zilberman, D., Sproul, T., Rajagopal, D., Sexton, S., & Hellegers, P. (2008). Rising energy prices and the economics of water in agriculture. *Water Policy*, 10(S1), 11-21.