



# Contexte

## > L'aquifère de Beauce est stratégique

- eau potable, agriculture, écosystème Loire ...
- Plus de 650 000 ha cultivés (dt ~150 000 irrigués)

## > Régulation de l'accès depuis les années 90

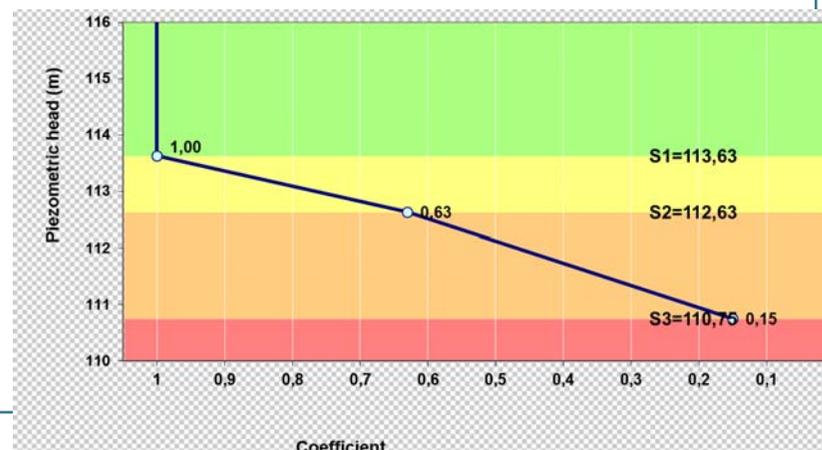
- Quotas annuels révisables depuis 1997 / 4 zones réglementaires
- Non suffisant, restrictions supplémentaire (par ex. été 2011)
- Volumes totaux de 420 Mm<sup>3</sup>/an

## > Nécessité d'envisager un système plus efficace

- Renforcement des contraintes actuelles
- Explorer des mécanismes alternatifs (plus de régionalisation, taxes, transferts de quotas...)

## > Prise en compte du changement climatique

- baisse de la disponibilité en eau



# Objectifs

**Développer une méthode pour répondre aux questions suivantes:**

- **Le système de régulation est-il /sera-t-il toujours efficace ? Suffisant ? Avec le changement climatique ?**
  - **Si non quels sont les instruments alternatifs que l'on peut considérer?**
    - **Sont t'ils plus efficace pour préserver les niveaux piézométriques?**
    - **A quel coût pour l'agriculture?**
- Un modèle économique développé auparavant (Graveline & Mérel, 2014)*
- **Comment considérer l'incertitude liée au changement climatique et la variabilité « naturelle » des années climatiques ?**

# Aperçu de la méthodologie

## > Développement d'un modèle hydro-économique

- Intégré (holistique) : Une plateforme unique (logiciel GAMS)
- Choix des régions (critère d'homogénéité)
- Définition du modèle hydrogéologique
- Définition du modèle économique
- Calibration indépendante des deux modèles

## > Définition des scénarios

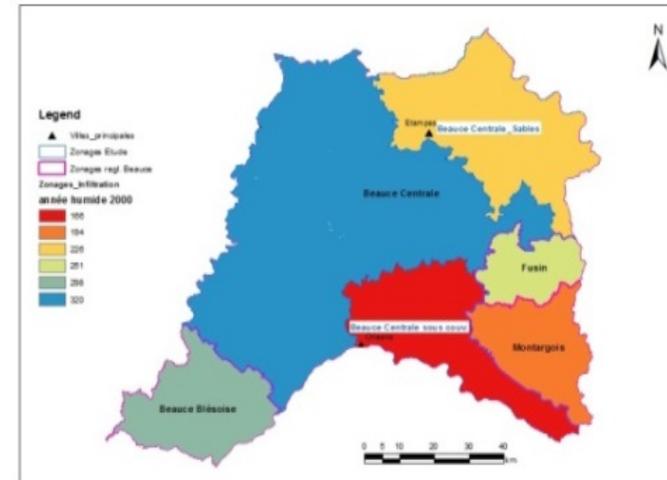
- Scénarios de changement climatique
- Instruments alternatifs

## > Simulations Monte Carlo

- 2010-2040 (pas de temps annuel)

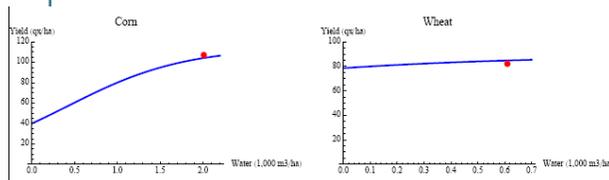
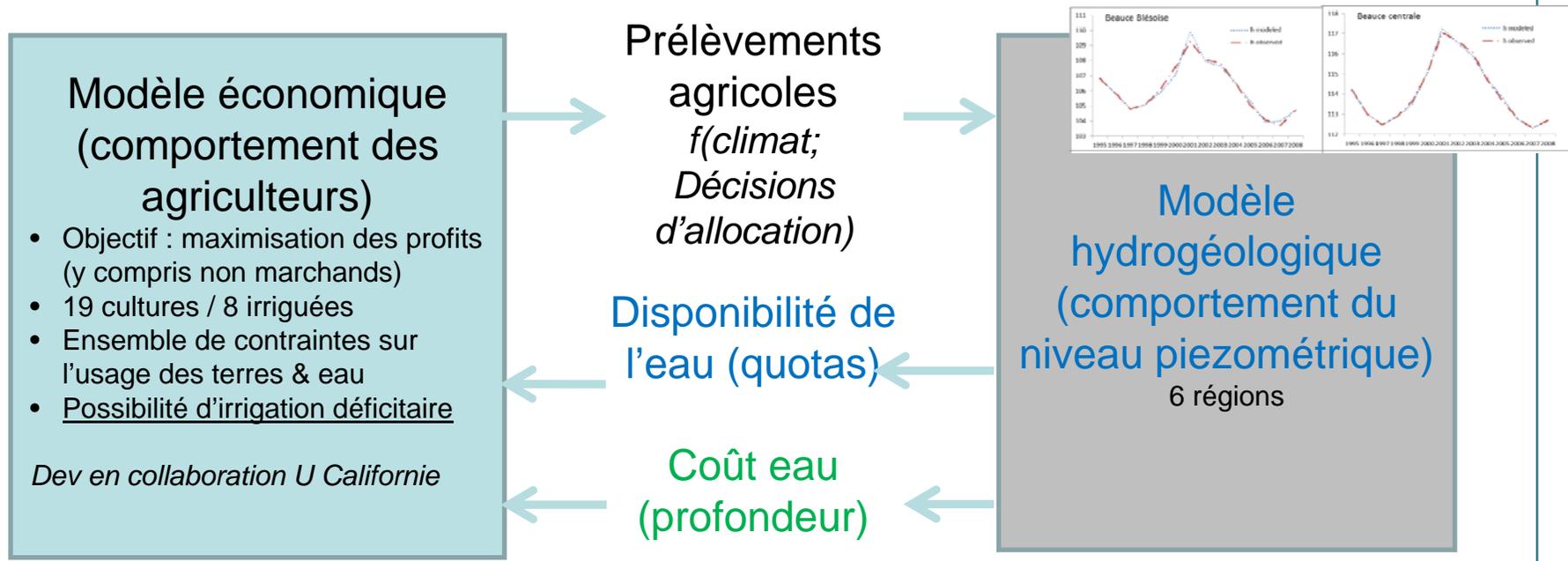
## > Traitement des résultats

- Approche classique, trade-offs niveaux piézométrique/coûts
- Calcul d'indicateurs de robustesse



# Le modèle hydro-économique

## > Modèle dynamique / récursif avec optimisation annuelle



Modèle à rendement marginaux décroissant,  
Elasticité constante de substitution (CES) entre terre et eau

$$H_n = H_{n-1} + \frac{\text{Recharge} - \text{Conso} - \text{Drainage}}{S * C_{en}}$$

$$H_n = H_{n-1} + \frac{\left\{ \frac{(R_{n-1} + c_r * R_{n-2})}{1 + c_r} - \sum_t [(1 - \beta_t) * C_t] - Dra \right\}}{S * C_{en}}$$

surface
Storage coefficient (given)

$$Dra_n = Dra_{n-1} * (1 + C_{Dra}) * (H_n - H_{n-1})$$

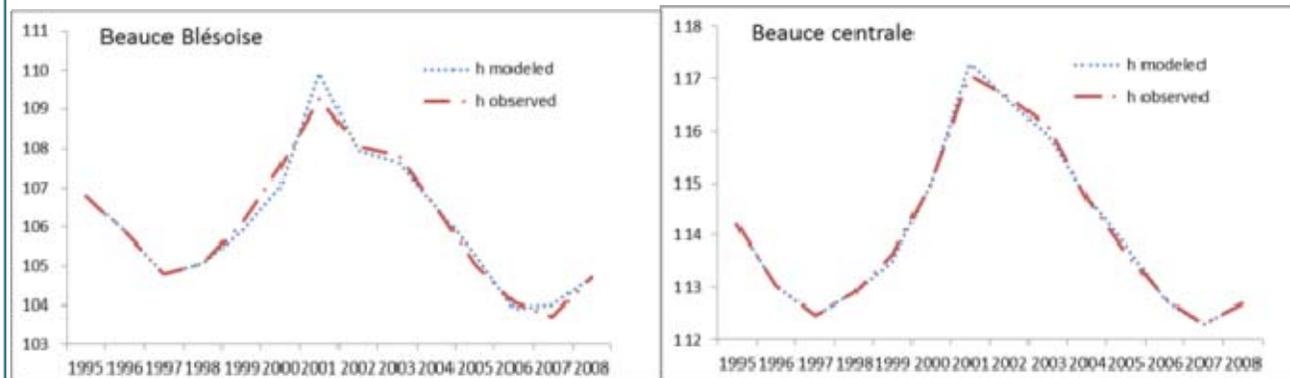
# Calibration pour garantir le réalisme du modèle

## > **Modèle hydrogéologique**

- Calibré sur 10 années de niveaux piézométriques
- Données de pluie, Indice d'infiltration (IDPR), prélèvements

## > **Modèle économique**

- Réplication des assolements initiaux
- Calibré sur une année (plutôt sèche) 2009
- Réplication de la réponse du rendement à l'eau
- Prix, assolements, coût de production, rendements



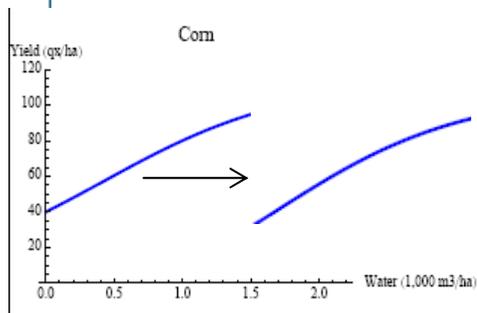
# Scénarios climatiques 2010 -2040

## > Hypothèses

- D'après Boe et al, 2009 ; Ducharne et al. (2010) qui donne des baisses de la précipitation et de l'infiltration, de la recharge des eaux souterraines (Seine & Loire)
- => coefficient de changement climatique entre -10 et -30%

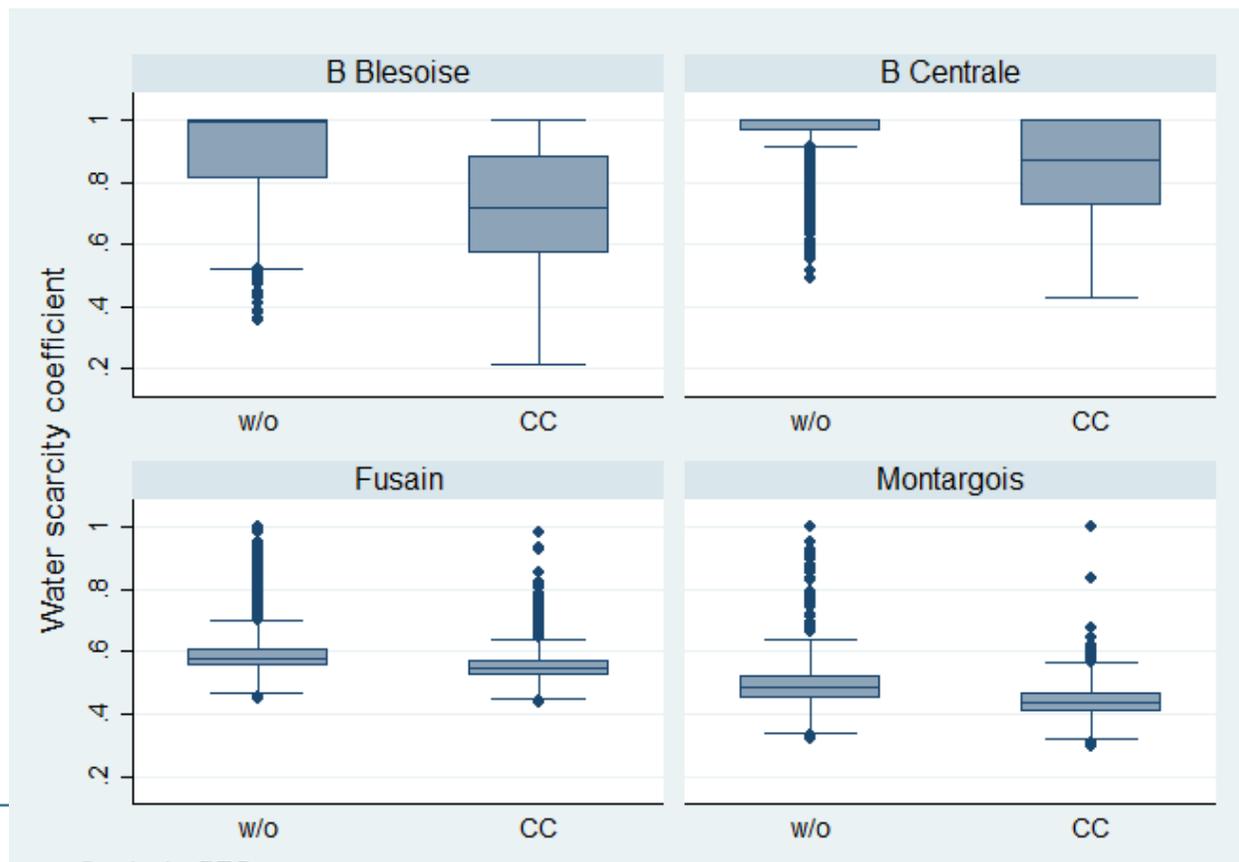
## > Simulations

- 100 scénarios de CC: tirages aléatoires du coefficient de CC dans [ -10%;-30%]
- Pour chaque année de 2010 à 2040 :
  - tirage aléatoire dans les années passées [1971-2009]
  - Application du coefficient de CC > 2020, impacte
    - L'infiltration (modèle hydrogéologique)
    - Le besoin en eau des plantes (translation de la fonction de production qui lie le rendement et la dose d'eau par culture)



# Résultats : Impact du changement climatique sur la nappe

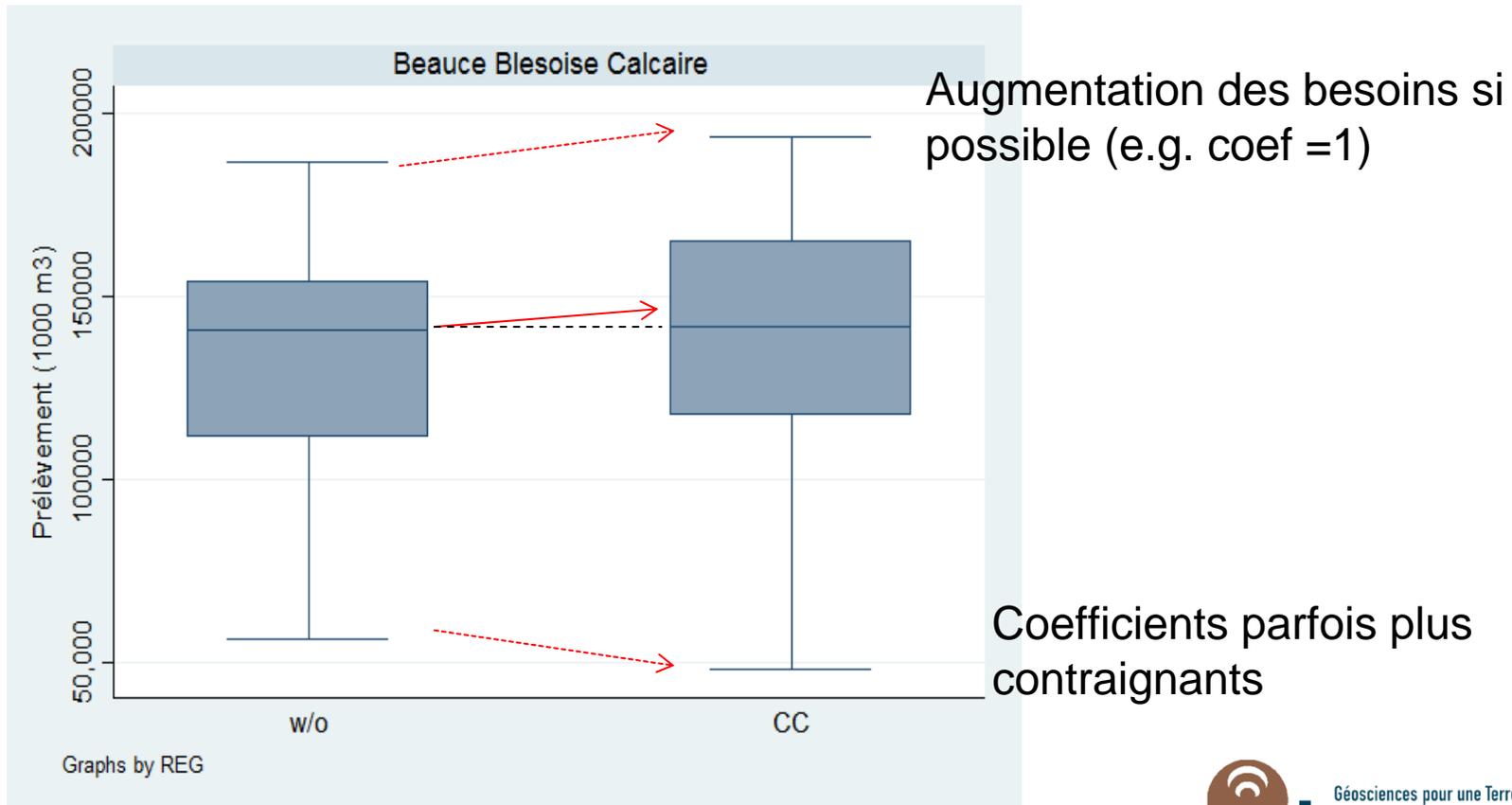
- Impact significatif pour B. Blésoise
- franchissement de seuil supplémentaire d'alerte pour certaines régions
- L'instrument actuel n'arrive pas à compenser la baisse de disponibilité en eau lié au changement climatique ...
- alors que sa conception pouvait le laisser entendre



# Impact du changement climatique sur les prélèvements

## Deux types de changements

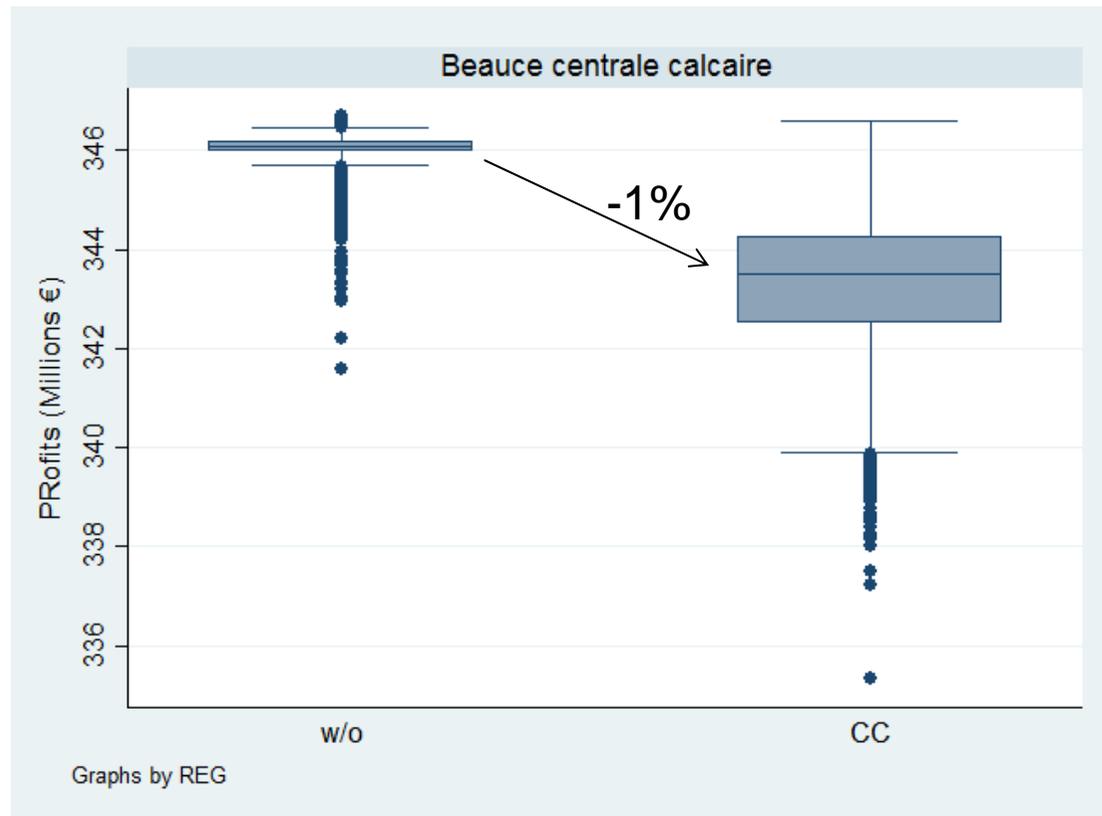
- Augmentation du besoin unitaire
- Baisse des coefficients/quotas



Souplesse de l'instrument

# Impact économique du changement climatique

- **Impact économique très faible (-1% des profits en moyenne)**



Augmentation des besoins (pour le même obj rendement) induit une baisse des surfaces irriguées

Marges d'adaptations peu coûteuses (sur la région, globalement)

Voir Graveline & Mérel, 2014

**⇒ révision de l'instrument actuel**

# Exploration de l'effet d'instruments alternatifs

## > Instruments testés

- Système de quotas
  - REF : Système actuel de quotas variables
  - REF6 : Avec une différenciation régionale accrue (Beauce centrale => 3 sous régions)
  - LAG : Décalage ( $n$ ,  $n-1$ ,  $n-2$ ) dans le calcul du quota
  - FIX: Quotas fixes
- Système de référence (REF) +
  - TAX: Taxe sur le prélèvement d'eau (basé sur le niveau piézométrique) (~ taxe ambiante)
  - TRANSF: Transfert autorisé
  - SUBSTI : Substitution (stockage dans retenues ~0,24 €/m<sup>3</sup>)

# Résultats sur les instruments

## > Deux indicateurs

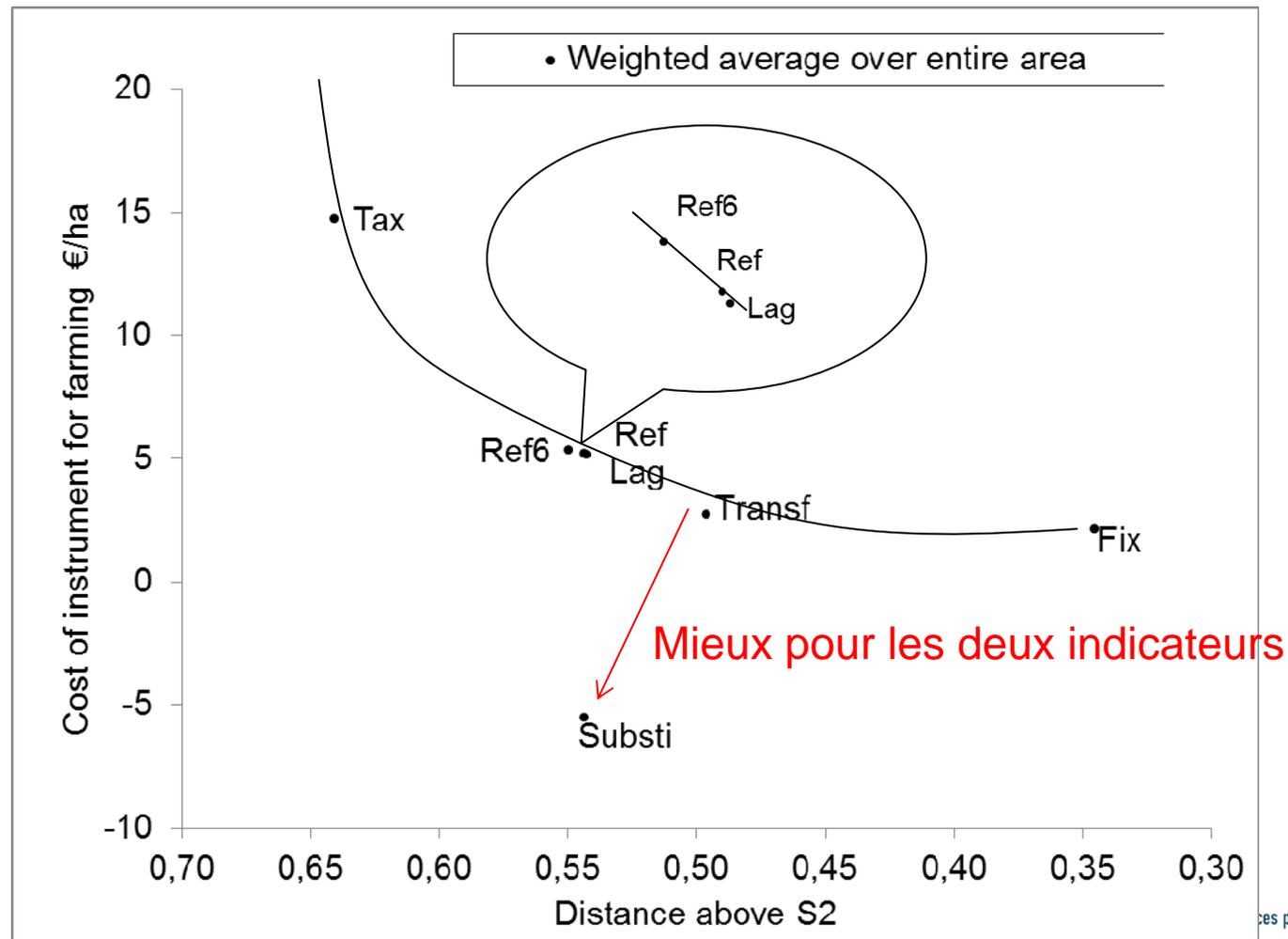
- Coût pour l'agriculture (€/ha) = Profit Instrument – Profit sans régulation
- Distance au 2<sup>nd</sup> seuil piézométrique (permet de comparer les régions)

		Ref	Fix	Ref6	Tax	Transf	Substi	Lag
Dist. to S2 (m)	Mean	0,54	0,35	0,55	0,64	0,50	0,54	0,54
Total profit (1000 k€)	Mean	537,7	540,7	537,5	528,4	540,1	537,7	537,7
	Min	525,9	537,7	525,7	520,1	530,8	526,1	526,9
	Max	543,8	543,8	543,8	542,9	545,2	543,8	543,6
	St. D	2,5	1,7	2,6	2,9	3,1	2,5	2,3
Cost** €/ha	Mean	5,20	2,11	5,35	14,75	2,73	-5,51	5,17
Water use (1000 m3)	Mean	169	215	169	149	181	170	170
	Min	61	148	60	61	81	64	72
	Max	255	256	255	255	246	255	253
	St. D	42	35	42	30	40	41	41
Coefficient	Mean	0.69	1	0.70	0.71	0.70	0.69	0.69
	St.D.***	0.17	0	0,21	0.20	0.21	0.18	0.18

Table 2: Performance of alternative instruments relative to piezometric levels (\*distance to threshold S2) and profits or cost of policy (\*\*Cost : Profit loss compared to no regulation).\*\*\*Mean standard deviation between regions

- > Des différences relativement faibles entre instruments
- > Des différences de résultats entre les régions
- > Plus de variations dans les coefficients

# Trade-offs entre coût pour l'agriculture & niveau piézométrique



- > Supériorité de l'instrument substitution
- > Difficulté de conclure davantage

# Résultats détaillés par instrument

## > Instruments qui sont au moins aussi performant que l'instrument de référence

- « 6 régions » :
  - Pertinent de distinguer davantage les régions (4=>6)
  - Très faible coût 1,20€/ha pour une région
- « Taxe » :
  - efficace pour atteindre des niveaux plus élevés, coûts relativement plus important
  - Non efficace pour 2 régions
- « Substi » :
  - meilleure solution (coût & efficacité), substitution effective en B. Blésoise, Montargois (Fusain)

## > Moins bons que l'instrument de référence

- « Lag » :
  - non pertinent, n'améliore pas les niveaux piézométriques
- « Transf » :
  - moins couteux (par construction).
  - 3 régions exportatrices >10% de réduction de leur prélèvement (très variable)
- « Fix » :
  - Presque plus contraignant pour l'agriculture
  - Peu satisfaisant du point de vue de la nappe

# Analyse de la robustesse

## > Principe

- Prendre en compte l'ensemble de la distribution des résultats (et pas que la moyenne)
- 3 dimensions d'incertitude ou de variations : 30 ans de simulation (2010-2040)\* 100 scénarios \* 6 régions

## > Un critère de robustesse, le MinMaxRegret

- Regret : écart pour chaque scénario entre l'instrument et l'instrument optimal
- calcul du maximum regret de chaque instrument
- Sélection de l'instrument qui a le plus petit maximum regret
- Classement des instruments du plus robuste ou moins robuste

## > On peut considérer toute ou partie des dimensions de variabilité

## Résultats - Robustesse

	Piezometric indicator		Profit		Combined rob
	Optimum	C & T. rob	Optimum	C&T. rob	
B. Blesoise	Transf	Tax	Fix	Fix	Transf
B. c. Calcaire	Transf	Transf	Fix	Fix	Transf
B. c. Sables	Transf	Transf	Fix	Fix	Transf
B. ss couverture	Ref 6	Ref 6	Transf	Transf	Lag
Fusain	Lag	Lag	Fix	Fix	Lag
Montargois	Lag	Lag	Transf	Fix	Lag/Substi
All	Tax	Tax	Transf	Fix	Substi
All incl. space rob.		Transf		Transf	Transf
Space rob. only		Transf		Transf	Transf

Table 3: Selection of instruments based on the best environmental performance and best economic performance for the two criteria (i) optimality and (ii) robustness. Piezometric indicator : distance above S2; “C&T. rob.” stands for “climatic and time robustness”

- > **Peu de différences entre l'approche classique et celle de robustesse**
- > **Généraliser l'incertitude (para éco)**



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

# Conclusion

- > **L'avantage d'un modèle intégré**
  - pour les simulations
  - la spécification du modèle
- > **L'enjeu du développement de méthodes d'analyse de la diversité des résultats / robustesse avec les parties prenantes/décideurs**
- > **Perspectives**
  - Combiner les instruments
  - Généraliser l'analyse de la robustesse du système face à une diversité d'incertitude (volatilité des prix, l'introduction de nouvelles cultures/ biocarburant...)
  - Un outil / des résultats pour animer la discussion sur les possibilités d'améliorer la gestion de la nappe // validation de l'intérêt par les parties prenantes

# Action ONEMA – Modèles hydro-économiques

- > Organisation d'un séminaire visant à discuter de l'intérêt de ces approches pour la gestion de l'eau en France
- > Rédaction d'un « comprendre pour agir » (ONEMA) sur les modèles hydro-économiques



> **Merci**