



MINISTÈRE
DE L'ALIMENTATION,
DE L'AGRICULTURE
ET DE LA PÊCHE

avec la contribution financière du
compte d'affectation spéciale
« Développement agricole et rural »

Zoom. Évaluation de l'incertitude lors de l'utilisation d'un modèle pour comparer les stratégies d'irrigation du maïs.

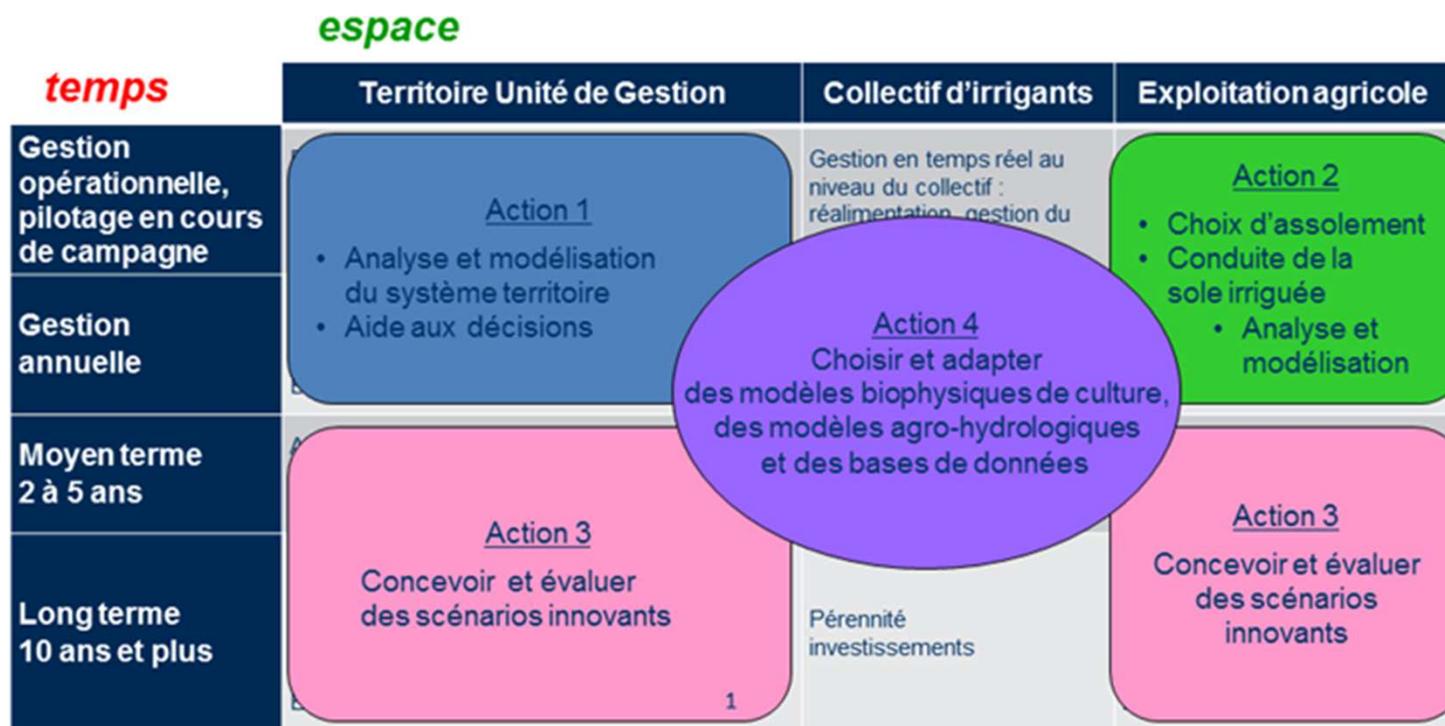
Séminaire de restitution du projet CASDAR 2010-2013
« Associer un niveau d'erreur aux prédictions
des modèles mathématiques pour l'agronomie et l'élevage. »

François Brun (ACTA), Bernard Lacroix (Arvalis – Institut du Végétal),
Daniel Wallach (INRA), Jacques-Eric Bergez (INRA), Nathalie Keussayan (CDD projet)

UMT EAU

Outils et méthodes pour la gestion quantitative de l'eau, de l'exploitation agricole au territoire

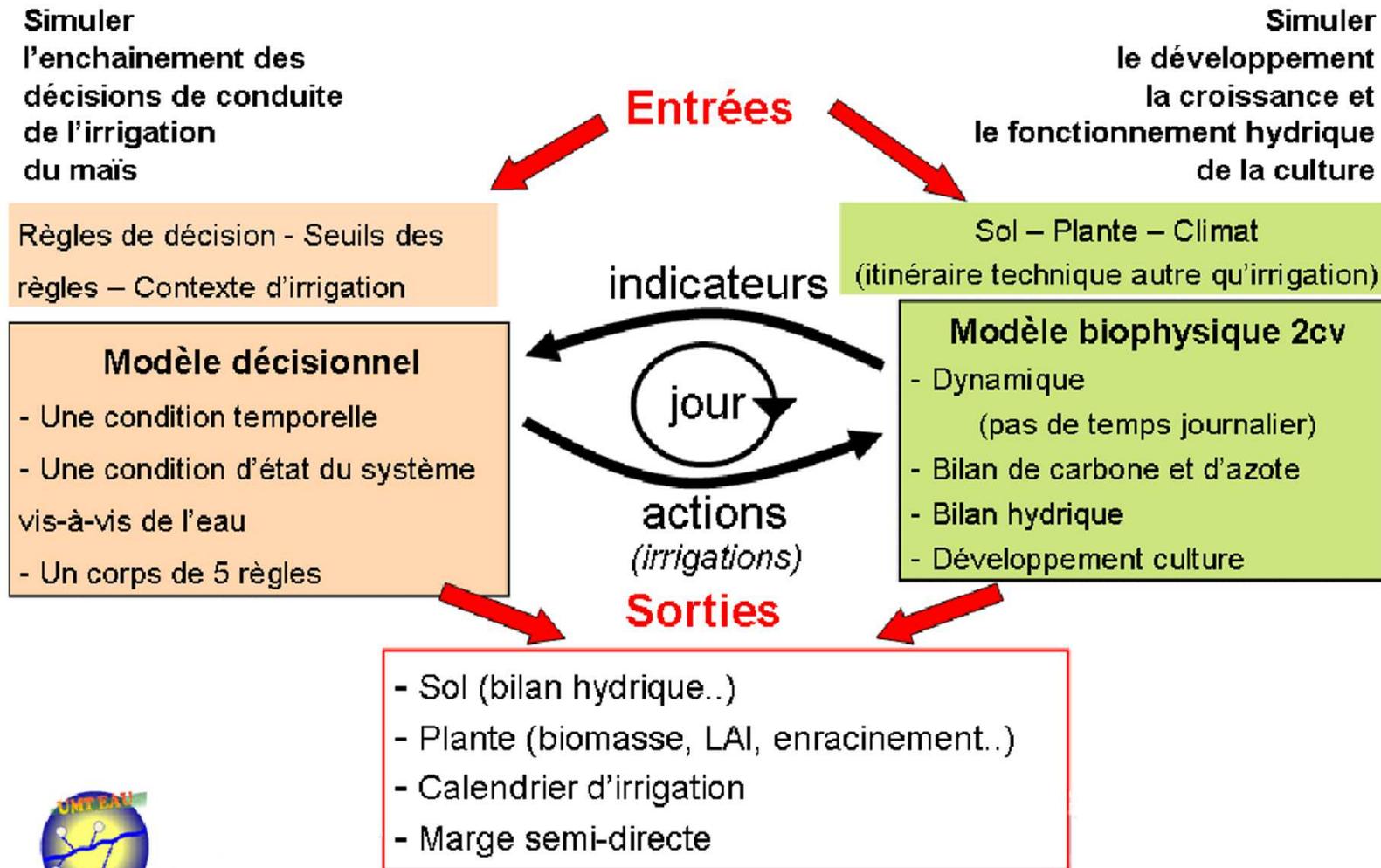
- **Décisions de gestion de l'eau** prises à différentes échelles d'espace et de temps par des acteurs partageant une **ressource limitée**.
 - *Objectif 2. Analyser et modéliser le fonctionnement de l'exploitation agricole irrigante et aider aux décisions de l'irrigant : choix d'assolement et **conduite de la sole irriguée***



Conduite de l'irrigation du maïs à l'échelle de l'îlot d'irrigation

- **Irrigation en volume limité (et souvent limitant)**
- **Conduite de l'irrigation : décisions stratégiques**
- **Déterminer les stratégies optimales:**
 - **Avec prise en compte variabilité climatique**
 - **Impossibilité d'expérimenter**
- ⇒ **Utilisation d'un outil de modélisation permettant de représenter les stratégies et leur application dans une situation donnée**

Simulateur bio-décisionnel de conduite de l'irrigation du maïs : MODERATO



Objectif du cas d'étude

- **Utiliser un modèle bio-décisionnel de culture du maïs pour la recherche de stratégies optimales de conduite de l'irrigation en volume limité (et souvent limitant).**
- **Évaluer et associer l'incertitude aux résultats de simulation**
 - **Comment fait-on ?**
 - **Quelle information supplémentaire cela apporte-t-il ?**
 - **Quelle confiance dans les résultats a-t-on ?**

Scénarios pour illustrer la démarche

- **Un contexte pédo-climatique et ressource**
 - Représentatif de Midi-Pyrénées
 - Sol : 0.9 m et RU : 140 mm
 - Climat : Blagnac (31). Série 1949-1997
 - Eau limitée à 150mm (forte contrainte ressource, avec des besoins moyens estimés à 250-300mm)
- **Une stratégie = un ensemble de règles de décisions (en fonction des conditions climatiques et du statut hydrique du sol) pour**
 - Première irrigation
 - Temps entre 2 irrigations (délais de retour)
 - Dernière irrigation
 - Suspension de l'irrigation après une pluie

Scénarios : 4 stratégies contrastées

➤ **Stratégie « floraison »**

- Irrigation centrée autour de la floraison
- 150mm eau

➤ **Stratégie « précoce »**

- Irrigation décalée un peu vers le début de la saison
- 150 mm eau

➤ **Stratégie « tardive »**

- Irrigation décalée un peu vers la fin de la saison
- 150 mm eau

➤ **Sans irrigation**

Démarche proposée

- **Définition des besoins et des contraintes**
 - 1) **explicitation des variables d'intérêt**
 - 2) **choix d'indicateurs d'incertitude pour les variables d'intérêt**
 - 3) **identification des sources d'incertitude**
 - 4) **caractérisation des informations disponibles**
- **Analyse d'incertitude**
 - 5) **quantification des sources d'incertitude**
 - 6) **propagation de l'incertitude**
 - 7) **valeur moyenne de la variable d'intérêt**
 - 8) **valeur des indicateurs d'incertitude**
- **Analyse des résultats & Vérification des hypothèses**
 - 9) **analyse des contributions des sources d'incertitude**
 - 10) **vérification avec des données**
 - 11) **explicitation et analyse des hypothèses**

1) explicitation des variables d'intérêt

= critères pour évaluer stratégies

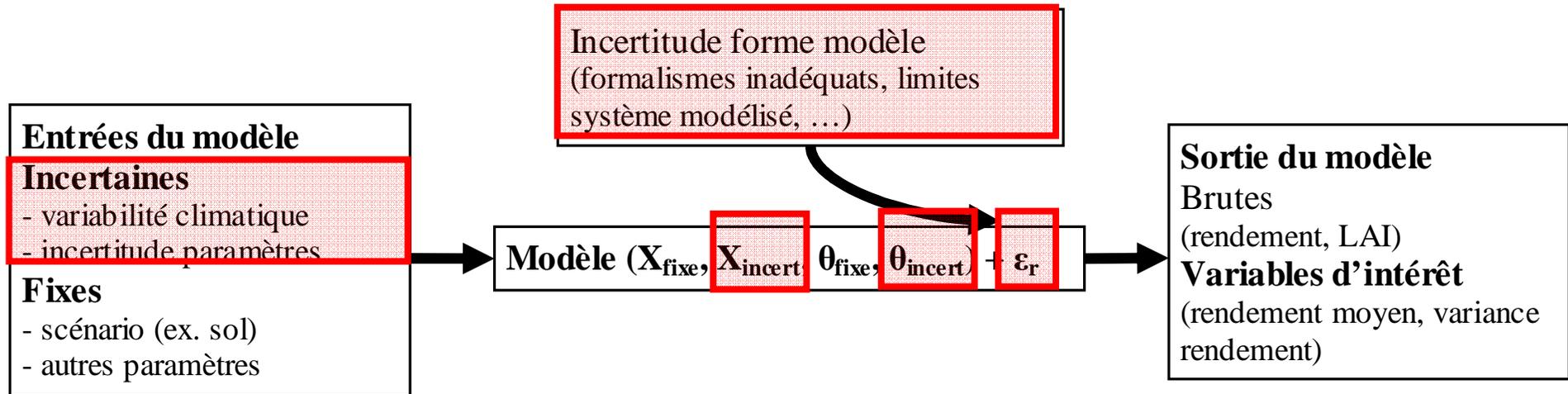
- Rendement moyen pluriannuel
- Variabilité interannuelle du rendement
- Probabilité de rendement <6t/ha

$C^{year\ i}$	Rendement pour une année
C^{ave}	Moyenne pluriannuelle du rendement
C^{sd}	Ecart-type du rendement (variabilité interannuelle)
C^{poor}	Nombre d'année avec un rendement < 6t/ha

2) choix d'indicateurs d'incertitude pour les variables d'intérêt

- **distribution de probabilité pour ces variables**
- **Valeur moyenne**
- **Intervalle de confiance à 90%**

3) identification des sources d'incertitude

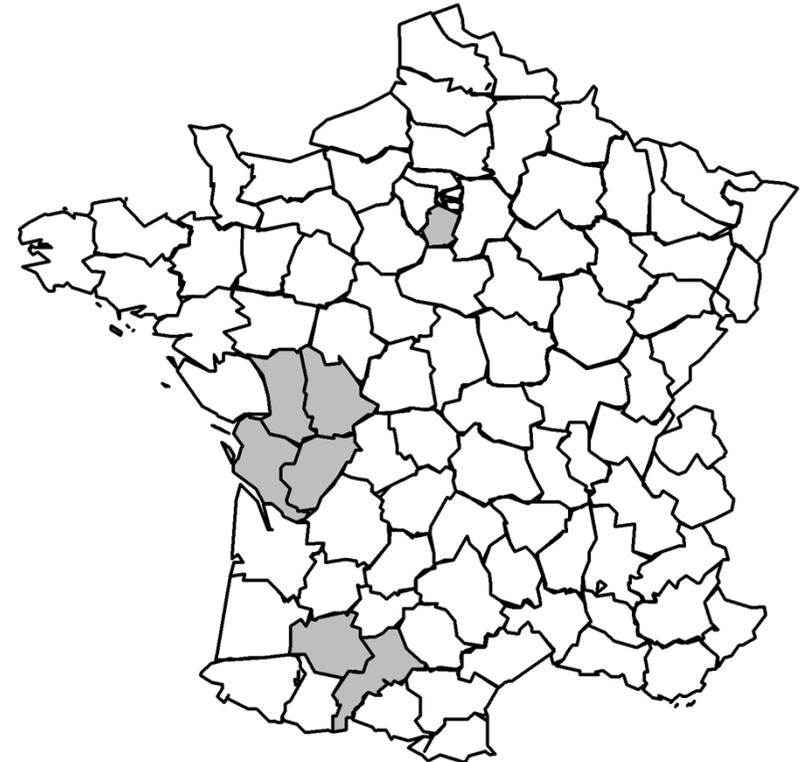


- **1. Variabilité climatique interannuelle** (\Leftrightarrow aléa)
- **2. Paramètres estimés** (\Leftrightarrow manque de connaissance)
- **3. Erreur résiduelle du modèle** (\Leftrightarrow choix formalisme & erreur de mesure)

4) caractérisation des informations disponibles

➤ Des données.

- **Expérimentations avec comme facteurs des niveaux et calendriers d'irrigation différents**
- **81 situations (site, année et irrigation)**
- **Variables mesurées**
 - Rendement
 - Dynamique LAI et Biomasse



... et des informations sur certains paramètres

- **Issus de la littérature ou contraintes liées aux formalismes du modèle (15 sur une quarantaine)**

Paramètres	Borne inf	Borne sup	Description
RUEp1	3	4	Efficienc e de conversion pot
RUEp2	3	4	Efficienc e de conversion pot
IRmax	0.45	0.55	Indice de récolte maximal
p1logi	0.65	0.99	Logistique de IF
p2logi	0.007	0.013	Logistique de IF
r1sf	0.4	1.2	réduction SF
r2sf	0.4	1.2	réduction SF
r1rue	0.0001	1	Réduction RUE
r2rue	0.0001	1	Réduction RUE
p1sen	0.001127	0.002093	Sénescence
p2sen	4.2	7.8	Sénescence
r1hi	1	2	Réduction HI
r2hi	1	2	Réduction HI
a2sen	0	1	Paramètre de sénescence
a3sen	1	2	Paramètre de sénescence

Démarche proposée

- **Définition des besoins et des contraintes**
 - 1) **explicitation des variables d'intérêt**
 - 2) **choix d'indicateurs d'incertitude pour les variables d'intérêt**
 - 3) **identification des sources d'incertitude**
 - 4) **caractérisation des informations disponibles**
- **Analyse d'incertitude**
 - 5) **quantification des sources d'incertitude**
 - 6) **propagation de l'incertitude**
 - 7) **valeur moyenne de la variable d'intérêt**
 - 8) **valeur des indicateurs d'incertitude**
- **Analyse des résultats & Vérification des hypothèses**
 - 9) **analyse des contributions des sources d'incertitude**
 - 10) **vérification avec des données**
 - 11) **explicitation et analyse des hypothèses**

5) quantification des sources d'incertitude

1) Une approche bayésienne

- intégrer données et informations sur les paramètres
- quantifier l'incertitude des paramètres et l'erreur résiduelle
- ⇒ **Algorithme de Metropolis-Hastings within Gibbs pour estimer les 15 paramètres (sur ~40) et les variances résiduelles**

2) Séries climatiques longues

- pour la variabilité climatique

Résultats du Bayésien

➤ Des millions de simulations du modèle

- correspondant aux situations expérimentales... avec 3 semaines de calcul (en parallélisant le code et sur différents ordinateurs)

➤ Distribution *a posteriori* des valeurs des paramètres:

- sous la forme de 600 vecteurs de valeurs de paramètres et des variances résiduelles.

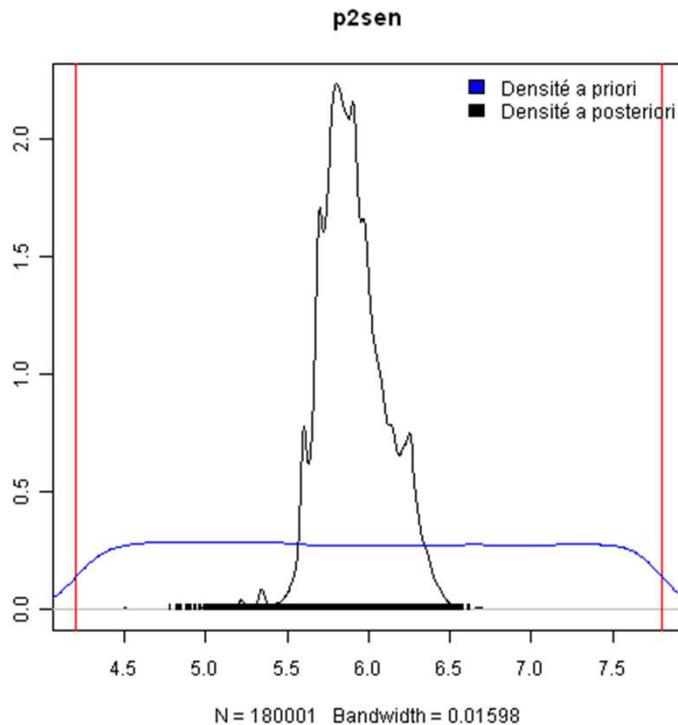
$$\theta_{1,1}, \theta_{1,2}, \dots, \theta_{1,15}, \sigma_{1,LAI}^2, \sigma_{1,BIOMASS}^2, \sigma_{1,YIELD}^2$$

$$\theta_{2,1}, \theta_{2,2}, \dots, \theta_{2,15}, \sigma_{2,LAI}^2, \sigma_{2,BIOMASS}^2, \sigma_{2,YIELD}^2$$

⋮

$$\theta_{600,1}, \theta_{600,2}, \dots, \theta_{600,15}, \sigma_{600,LAI}^2, \sigma_{600,BIOMASS}^2, \sigma_{600,YIELD}^2$$

Résultats du bayésien



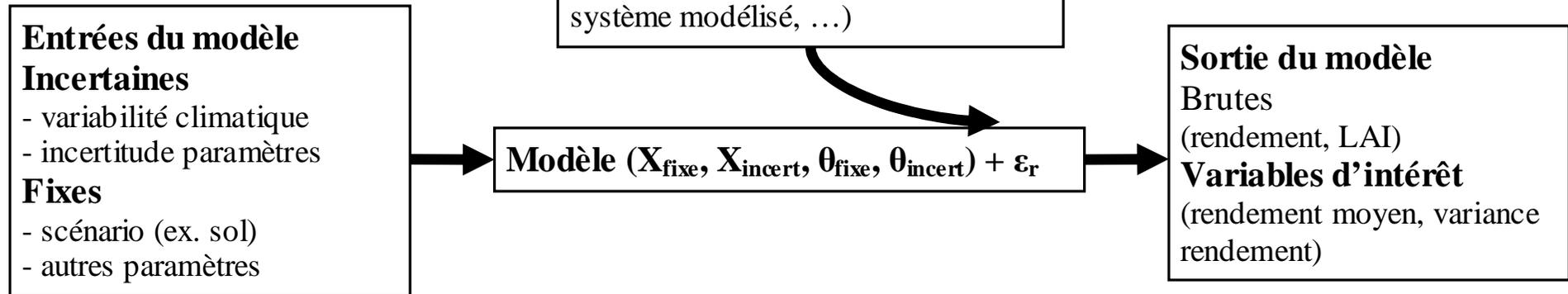
Abbreviation	Prior distribution			Posterior distribution	
	Lower bound	Upper bound	SD	Mean	SD
a2sen	0	1	0.29	0.25	0.042
a3sen	1	2	0.29	1.79	0.093
himax	0.45	0.55	0.029	0.51	0.021
p1logi	0.65	0.99	0.098	0.66	0.013
p1sen	0.0011	0.0021	0.00028	0.0019	0.0002
p2logi	0.007	0.013	0.00087	0.0086	0.00007
p2sen	4.2	7.8	1.04	5.9	0.11
r1hi	1	2	0.29	1.8	0.13
r1rue	0.0001	1	0.029	0.83	0.093
r1sf	0.4	1.2	0.23	0.96	0.19
r2hi	1	2	0.29	1.1	0.068
r2rue	0.0001	1	0.029	0.95	0.040
r2sf	0.4	1.2	0.23	0.63	0.12
rue1	3	4	0.29	3.0	0.019
rue2	3	4	0.29	3.03	0.037
σ_Y^2				1.3	0.11
σ_B^2				2.3	0.11
σ_{LAI}^2				0.81	0.032

⇒ **On a quantifié les incertitudes sur les paramètres et l'erreur résiduelle**

6) propagation de l'incertitude

Variabilité climatique
(série du passé)

Incertitude paramètre
(*a posteriori*)

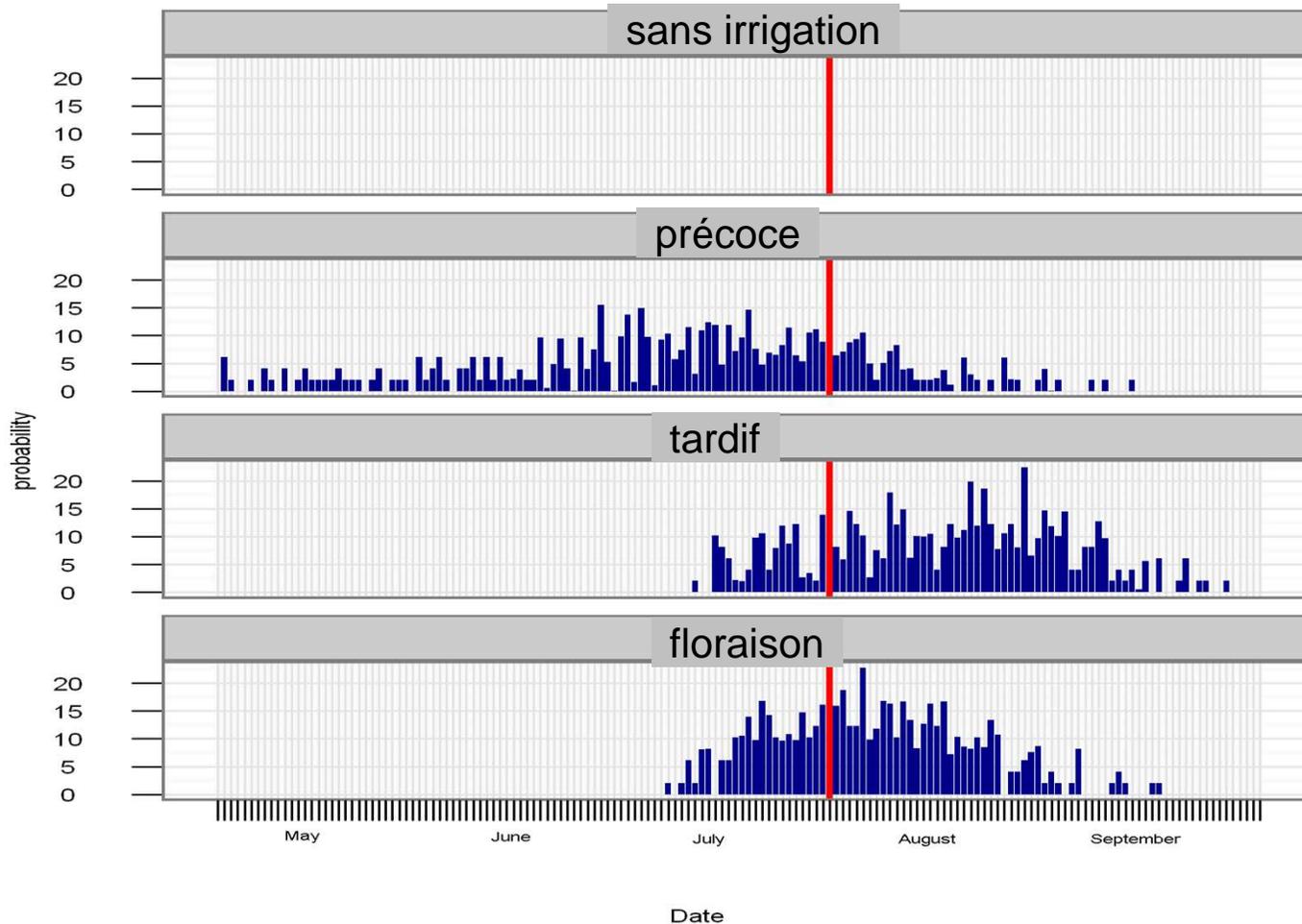


par tirage de Monte-Carlo

- a. Pour les situations correspondant aux données
- b. Pour établir les prédictions (scénarios avec les 4 stratégies)

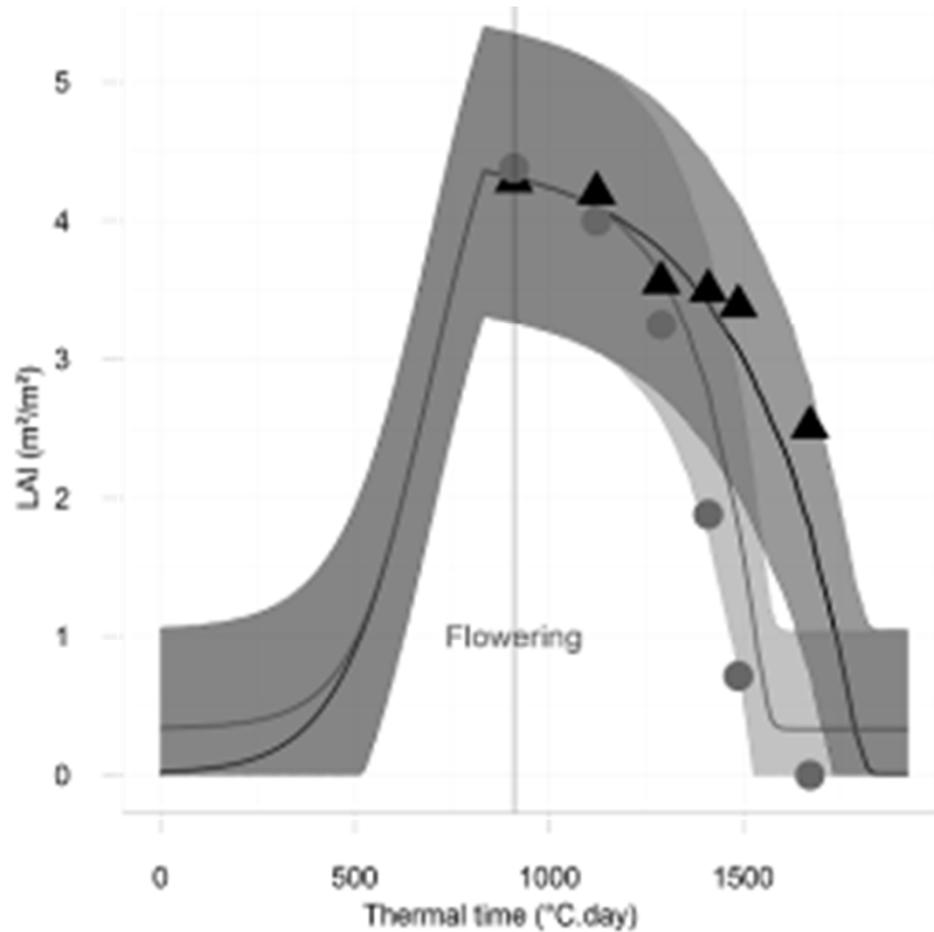
Exemples des résultats

Calendrier d'irrigation sur les 49 années en prenant en compte l'incertitude sur les paramètres.

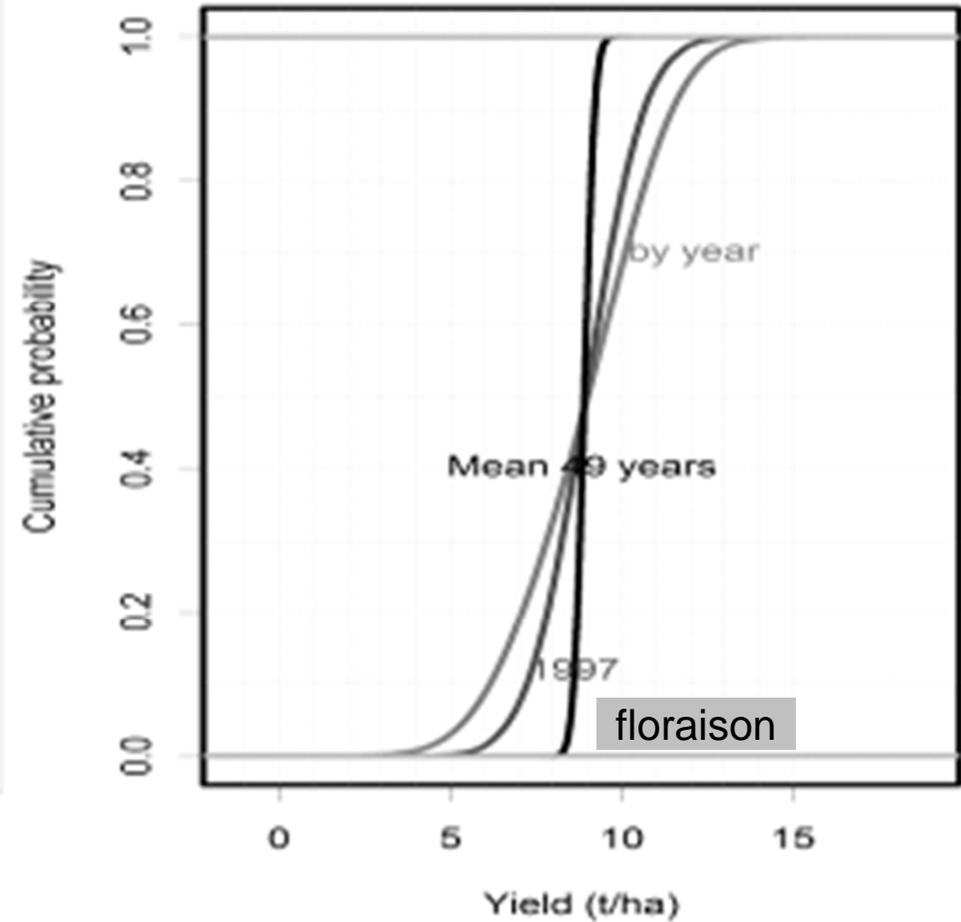


Exemples des résultats

- Sur les situations expérimentales (Intervalle de confiance)



- Sur les scénarios (distribution)



- 7) valeur moyenne de la variable d'intérêt
 8) valeur des indicateurs d'incertitude

	stratégie	moy.	e-t	IC 90%
Rendement pour un climat choisi au hasard (t/ha) <i>C^{random year}</i>	floraison	8.9	2.0	5.5-12.1
	sans irrigation	3.6	2.1	0.3-7.4
	tardif	7.9	2.3	4.1-11.6
	précoce	7.6	2.8	2.9-11.9
Rendement moyenne pluriannuelle (t/ha) <i>C^{ave}</i>	floraison	8.9	0.2	8.5- 9.3
	sans irrigation	3.6	0.3	3.1- 4.0
	tardif	7.9	0.3	7.5-8.3
	précoce	7.6	0.2	7.2-8.0
Ecart-type du Rendement (t/ha) <i>C^{sd}</i>	floraison	2.0	0.2	1.7-2.4
	sans irrigation	2.1	0.2	1.8-2.4
	tardif	2.3	0.2	2.0 -2.7
	précoce	2.8	0.2	2.5-3.1
Nombre d'année (sur 49) avec un rdt < 6t/ha <i>C^{poor}</i>	floraison	4.2	1.8	1-7
	sans irrigation	42.7	1.9	39-46
	tardif	10.9	2.5	7 -15
	précoce	14.8	2.4	11-19

Une incertitude sur le résultat très différente suivant la variable d'intérêt.

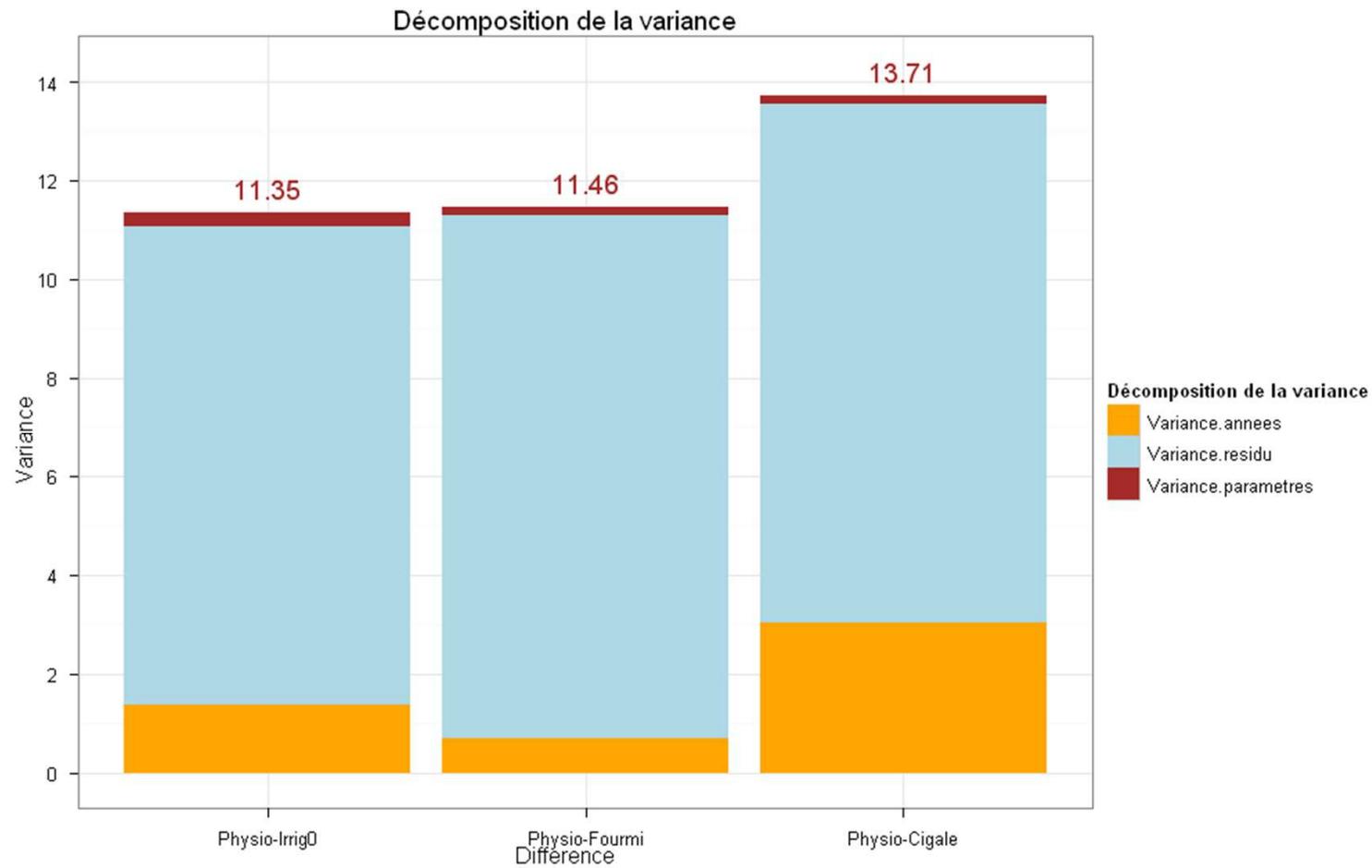
Variable d'intérêt	stratégies		
	floraison	tardif	précoce
C^{ave} Moyenne du rendement (moyenne des incertitudes)	8.9 (1.4)	7.9 (1.4)	7.6 (1.3)
$C^{year i}$ Moyenne du rendement (incertitude de la moyenne)	8.9 (0.2)	7.9 (0.3)	7.6 (0.2)

- Rendement pour une année avec climat connu: $\sigma=1.4$
- Rendement moyen pluriannuel: $\sigma=0.2$

Démarche proposée

- **Définition des besoins et des contraintes**
 - 1) **explicitation des variables d'intérêt**
 - 2) **choix d'indicateurs d'incertitude pour les variables d'intérêt**
 - 3) **identification des sources d'incertitude**
 - 4) **caractérisation des informations disponibles**
- **Analyse d'incertitude**
 - 5) **quantification des sources d'incertitude**
 - 6) **propagation de l'incertitude**
 - 7) **valeur moyenne de la variable d'intérêt**
 - 8) **valeur des indicateurs d'incertitude**
- **Analyse des résultats & Vérification des hypothèses**
 - 9) **analyse des contributions des sources d'incertitude**
 - 10) **vérification avec des données**
 - 11) **explicitation et analyse des hypothèses**

9) analyse des contributions des sources d'incertitude



10) vérification avec des données

- **Tester les intervalles de confiance pour les situations expérimentales.**
- **Nombre de valeurs mesurées incluses dans IC à 50 doit être proche de 50%**

	n	average length of 50% credible interval	percent of cases in 50% credible interval	average length of 90% credible interval	percent of cases in 90% credible interval
Site-irrigation groups with multiple members. Individual yields.	61	1.8 t/ha	54%	4.4 t/ha	95%
Site-irrigation groups with multiple members. Average yields.	17	1.0 t/ha	70%	2.5 t/ha	88%

11) explicitation et analyse des hypothèses

➤ **Bayésien:**

- **Toutes les erreurs sont indépendantes, de même variance (différente pour LAI, BM, RDT), distribution normale**

➤ **Propagation**

- **Indépendance entre paramètres et climats**
- **Variance résiduelle (inclus aussi l'erreur de mesure)**

Conclusions

- **L'approche bayésienne a permis de distinguer la contribution liée à l'incertitude sur les paramètres de celle de d'erreur résiduelle**
- **Vérification du côté « réaliste » de l'estimation de l'incertitude avec des observations**
- **Les modèles sont beaucoup plus fiables pour prédire des moyennes pluriannuelles que pour prédire les résultats d'une année particulière.**
 - ⇔ **importance de bien préciser l'objectif du travail de modélisation**

Perspectives

- **Quelle utilisation de ces résultats en lien avec le travail de recherche de stratégies optimales ?**
 - **Optimisation sachant ces incertitudes**
 - **... ou comparaison des candidats issus du travail d'optimisation**
- **Poids important de l'erreur résiduelle**
 - **Retourner au modèle**
 - **... notamment MODERATO => MOUSTICS**

Valorisations

- Daniel Wallach, Nathalie Keussayan, François Brun, Bernard Lacroix, Jacques-Eric Bergez, 2012. **Assessing the Uncertainty when Using a Model to Compare Irrigation Strategies.** Agron. J. Volume: 104 Issue: 5 Pages: 1274-1283.

[doi: 10.2134/agronj2012.0038](https://doi.org/10.2134/agronj2012.0038)

- Agrostat 2012 (Article et communication orale)
- Helsinki ESA 2012 (communication orale)