



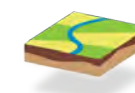
# *Modélisation et évaluation intégrées des systèmes agricoles à l'échelle du territoire*



*Olivier Therond (INRAE - MAELAB)*

*Séminaire technique de l'Observatoire de l'eau d'Alsace*

*19 novembre 2024*



MAELAB

# Agriculture et eau

## Agriculture au cœur des enjeux :

- Consommation d'eau en période d'étiage
- Retenues collinaires
- Impacts qualitatifs sur l'eau

## Variabilités intra et inter annuelles du climat et des prix

## Processus en interaction :

- eau verte vs. eau bleue, production, économie, pollutions, GES...

## Problème situé dans le temps et l'espace :

- Système, pédoclimat, ressources Nat. & Art., stratégies d'acteurs...
- Positions spatiotemporelles des opérations techniques

## Large gamme de solutions possibles et discutées :

- Systèmes de culture (SdC) : incrémentale vs. reconception
- Gestion des ressources : optimisation vs. création
- ...

→ **Modélisation et  
évaluation intégrées  
des situations de gestion**



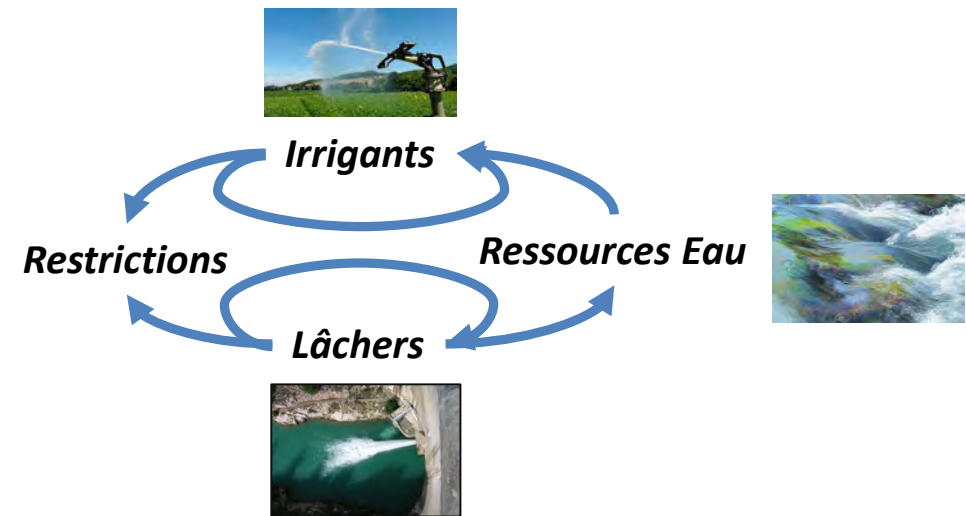
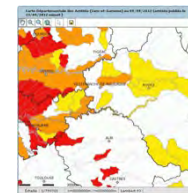
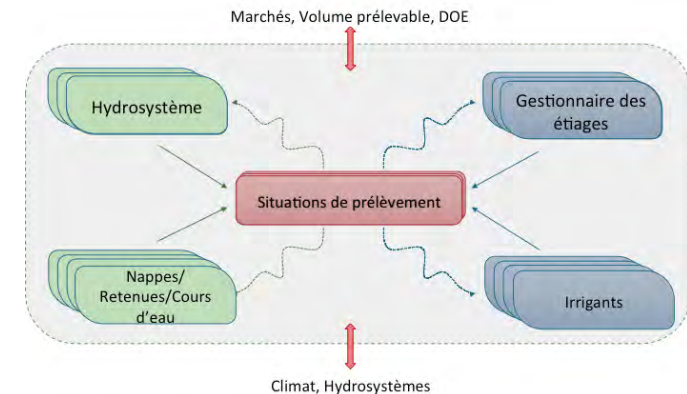
# Enjeux de modélisation et évaluation

## Modélisation :

- Structure du territoire : **hétérogénéité des situations d'action**  
→ système culture/production x pédoclimat x ressource(s)...
- **Dynamiques** spatiotemporelles écologiques et humaines  
→ **interactions et rétroactions spatiotemporelles**

## Évaluation :

- **Indicateurs** environnementaux et socio-économiques aux **échelles temporelles et spatiales adaptés aux acteurs**

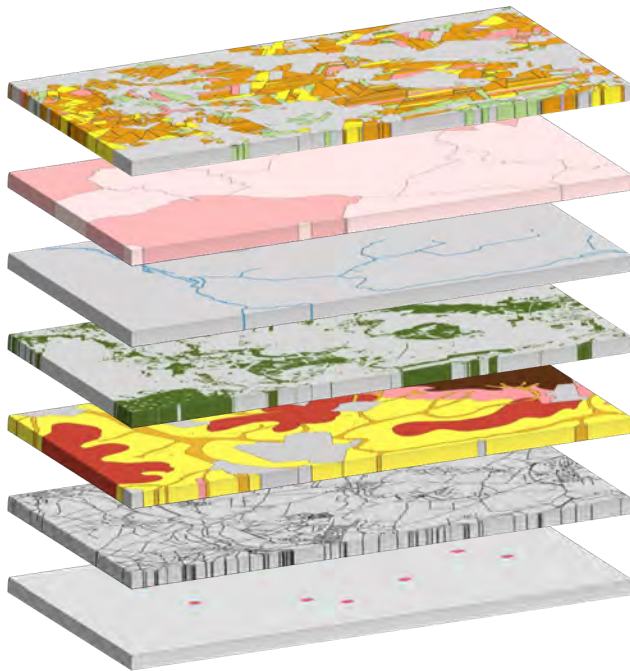


# Plateforme de modélisation et simulation

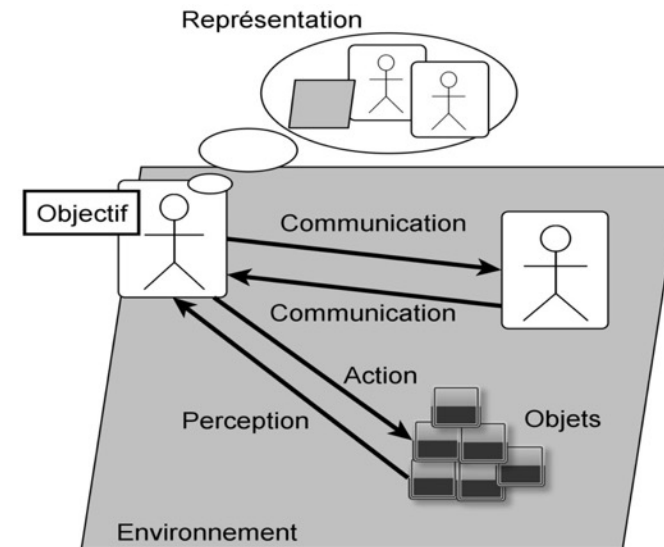


## *Système multi-agent spatialisé*

Base de données géoréférencées  
-> *structure*



Chaîne de modèles  
-> *dynamique*



### *Modèles couplés :*

- *Sol-plante*
- *Hydrologie*
- *Gestionnaire*
- ...

Therond et al. 2014

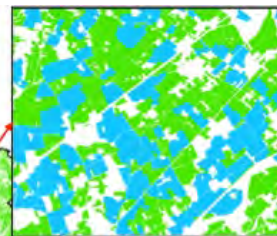


# Systeme d'information géographique

## Intégration de données :

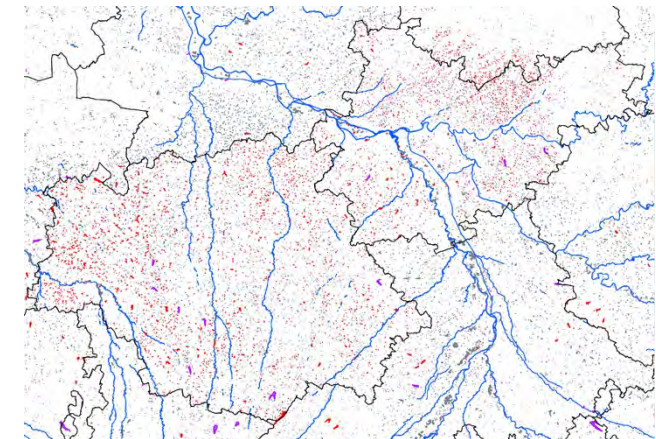
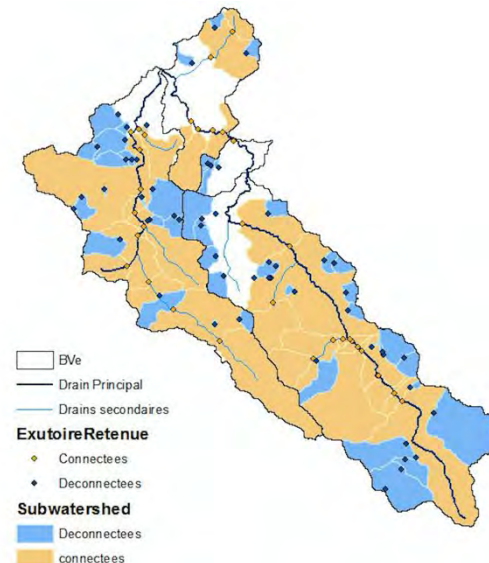
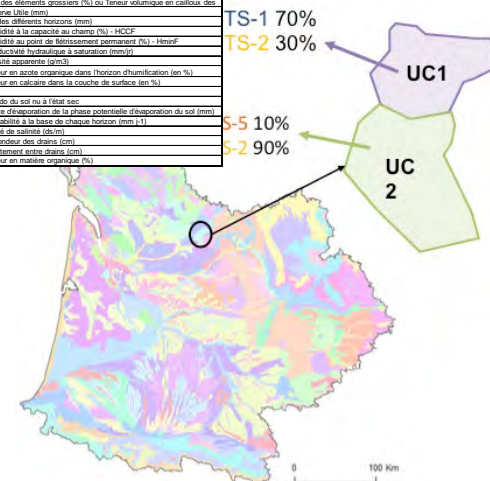
- Sols (cartes au 1/50 000 → 250 000) et **Climats** (grilles 8 km)
- Registre Parcellaire Graphique (**RPG**) et **Séquences de culture** observées
- **Ressources en eau** (Agences, IGN, BRGM...)
- **Stratégies de conduite des cultures** : enquêtes auprès des conseillers et/ou agriculteurs

ID Biot	Séquence	Surface
24836	gelbe_gelbe_gelbe_gelbe	1,64
37875	cereale_pois_cereale_tour	2,67
37890	orge_soya_cereale_cereale	5,20
37958	cereale_pois_cereale_soya	5,50
37960	gelbe_gelbe_gelbe_gelbe	3,27
40498	orge_mais_mais_mais	3,36
40575	mais_mais_mais_mais	19,15
48744	mais_mais_mais_mais	2,54
48862	mais_mais_mais_mais	2,52
48880	mais_blet_cereale_cereale	1,19
56096	gelbe_mais_mais_mais	0,45
56098	gelbe_mais_mais_mais	0,49
56196	mais_mais_mais_mais	20,56
56197	gelbe_mais_mais_mais	3,35
56215	gelbe_gelbe_gelbe_gelbe	1,47
56293	gelbe_gelbe_gelbe_gelbe	2,45
59426	mais_mais_mais_mais	4,24
59733	gelbe_gelbe_mais_mais	2,46
59918	gelbe_gelbe_mais_mais	3,52
59924	blet_pois_mais_mais	2,68



Ilots déclarés  
non irrigués  
irrigués

Variables sols
Nombre d'horizons
Epaisseur des horizons (m)
Chargée à l'assèchement du Profondeur d'assèchement (m)
Présence d'un horizon imperméable (profondeur en cm)
Teneur en argile (%)
Teneur en sable (%)
Teneur en limons (%)
Pot des éléments dissous (%) ou Teneur volumique en calcaire des
Reserve utile (mm)
RU des différents horizons (mm)
Humidité à la capacité au champ (%) - HCCF
Humidité au point de flétrissement permanent (%) - HmFP
Conductivité hydraulique à saturation (mm/s)
Densité apparente (g/cm³)
Teneur en acides organiques dans l'horizon d'humification (en %)
Teneur en calcaire dans la couche de surface (en %)
arg
Albedo du sol nu à l'état sec
Limite d'évaporation de la phase potentielle d'évaporation du sol (mm)
Perméabilité à la base de chaque horizon (mm x 1)
Profil des drains (cm)
Profondeur des drains (cm)
Ecartement entre drains (cm)
Teneur en matière organique (%)

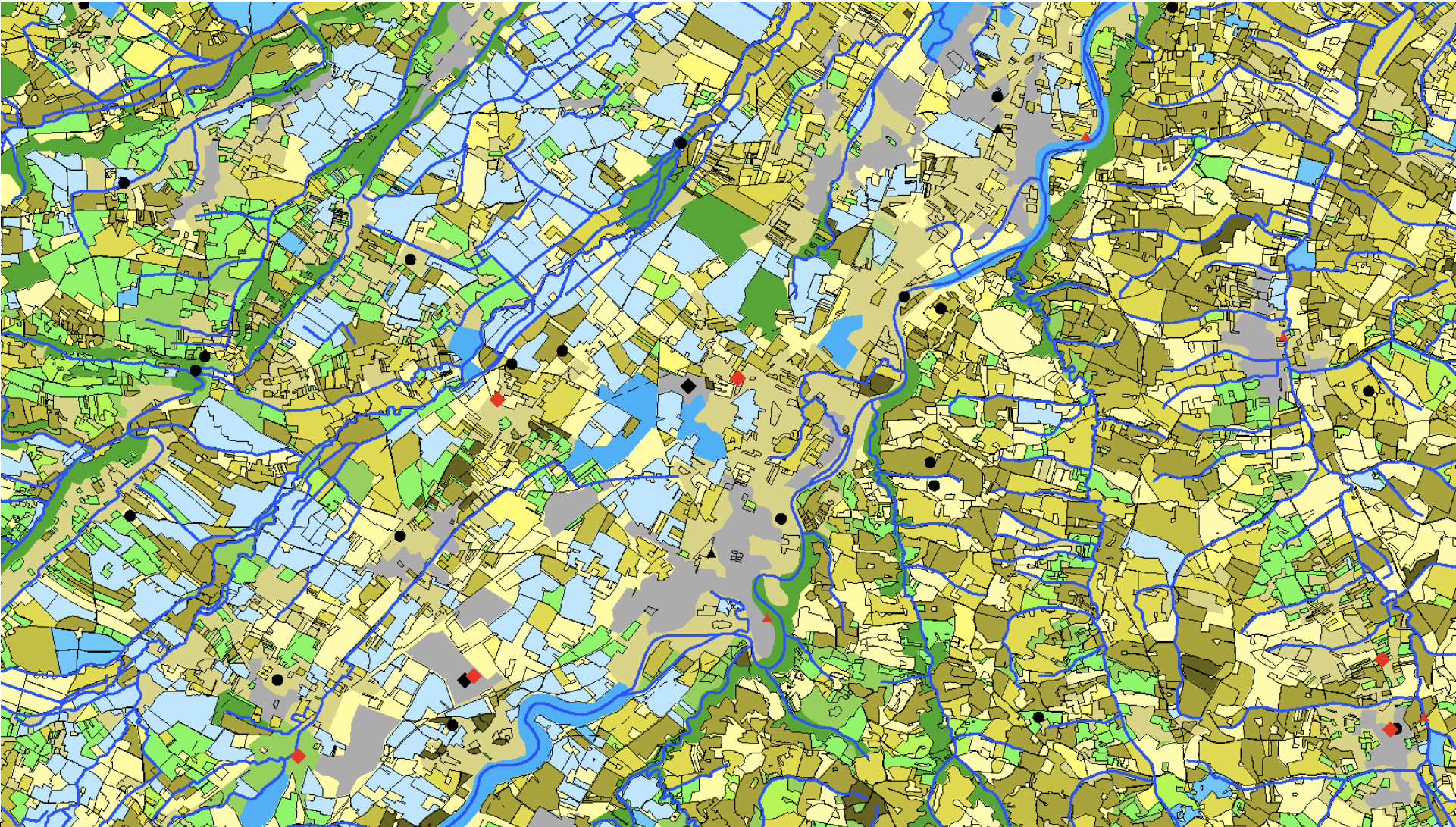


SURFACE EAU bd Topo® x Données MISE





# Intégration des données → structure fine du territoire



# Dynamiques spatiotemporelles

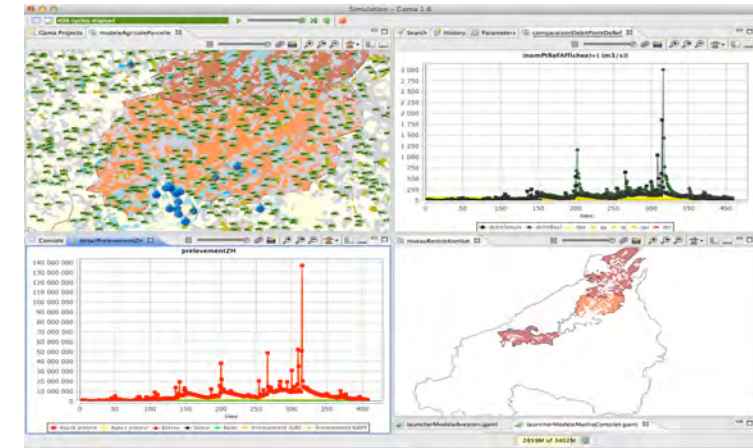
Intégration/développement de modèles « simple » et robuste :

Processus écologiques :

- Sol-plante : modèle de culture **AqYield** et prairie **Herb'Sim**
- Hydrologie : modèle **SWAT**®
- ...

Processus décisionnels :

- Agriculteur
- Gestionnaires de ressources
- Gouvernance des usages des ressources





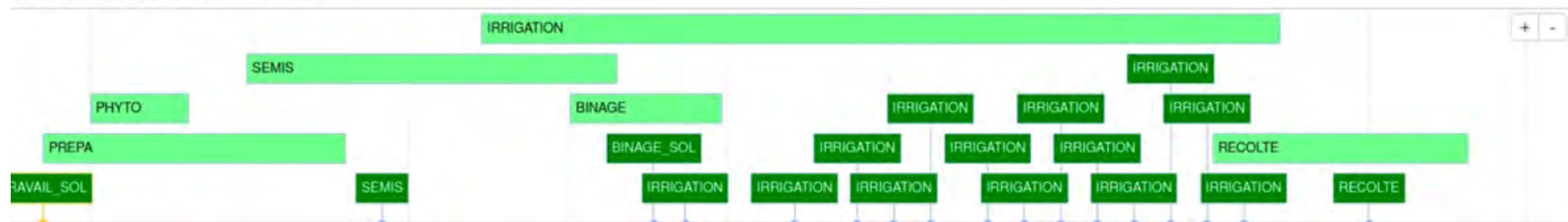
# Agent agriculteur : conduite des cultures

Représentation des **stratégies de conduite des cultures** sous forme de règles SI – ALORS

- Règles fonction du climat passé & futur, sol, plante, ressource en eau, régulation...

**Ex. Si pluie sur 7 derniers jours < 20 mm et RU < 75 % alors irrigation 40 mm**

DP\_mais\_ble\_irr\_alluvions+\_integrale

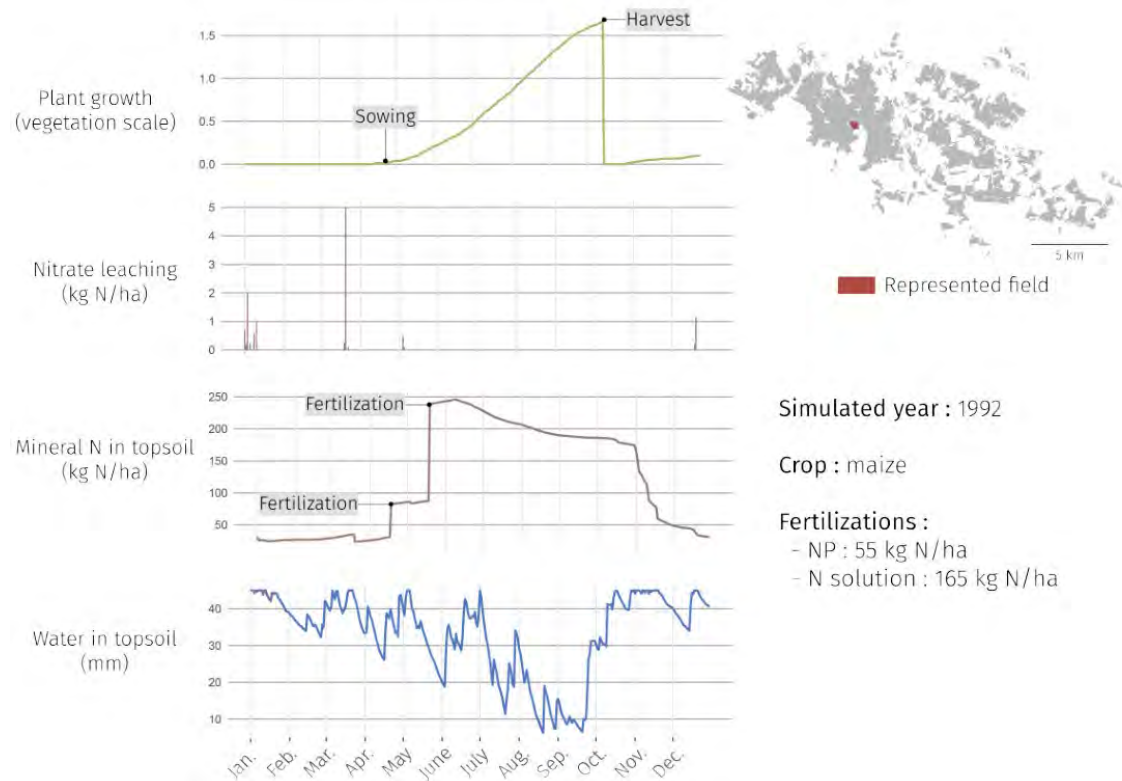


Représentation du **fonctionnement de l'exploitation** :

- Contraintes de disponibilité en travail : débit de chantier de chaque opération culturale
- Priorité entre les opérations techniques et entre ressources (eau)



# Résultats temporels détaillés à la parcelle



Simulated year : 1992

Crop : maize

Fertilizations :

- NP : 55 kg N/ha
- N solution : 165 kg N/ha



- ➔ Chaque parcelle a une dynamique fonction de ses caractéristiques et de celles de l'exploitation
- ➔ Effets ad hoc des systèmes de culture sur les cycles eau, azote et carbone et... flux de biomasses



# Scénarios

## Factoriels et combinés

### Contextes

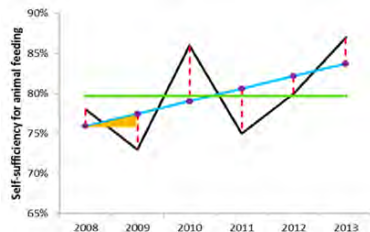
Biophysique : climat, ressource  
Economique : prix, primes  
Social : contraintes sur le travail...

### Entités (SdC, ressources, UT...)

Nature  
Distribution

### Stratégies de gestion

Exploitations  
UT, ressources...



Résultats à différents niveaux  
d'organisation  
(parcelle, SdC, SdP, zone)  
et de temps (jour --> années)

Analyse des synergies et  
antagonismes

# Indicateurs

## Performances et résiliences

### Biophysiques

Cycle eau, N et C, fertilités des sols  
Rendements  
Services écosystémiques, biodiversité

### Economiques

Marges brutes et semi-nette  
Production, efficience

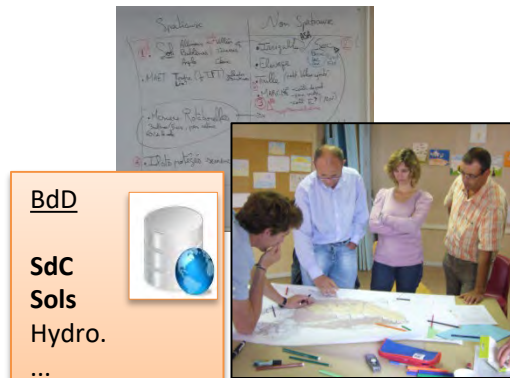
### Sociaux

Nature/volume/pic de travail  
Réseaux sociaux...



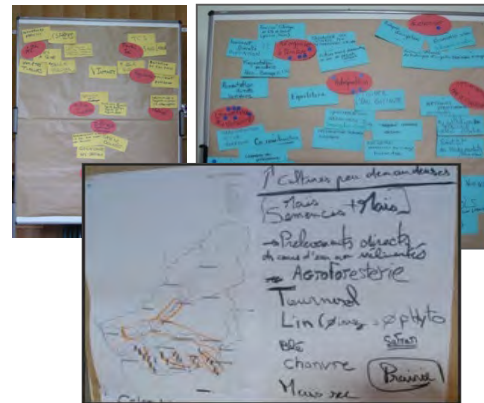
# Application de MAELIA avec les acteurs

## 1- Co-construction d'un modèle de la **situation actuelle**



800 km<sup>2</sup>, 1150 exploitations  
18 000 parcelles,  
140 conduites de culture

## 2- Co-conception d'**alternatives** de structure/fonctionnement



Alternative 1

Alternative 2

Alternative...

**Simulations**

Robustesse à la variabilité climatique





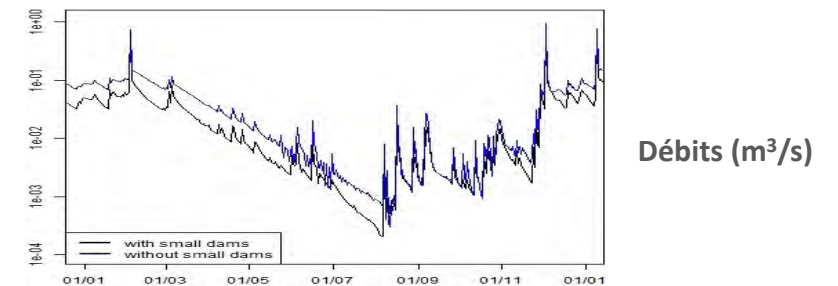
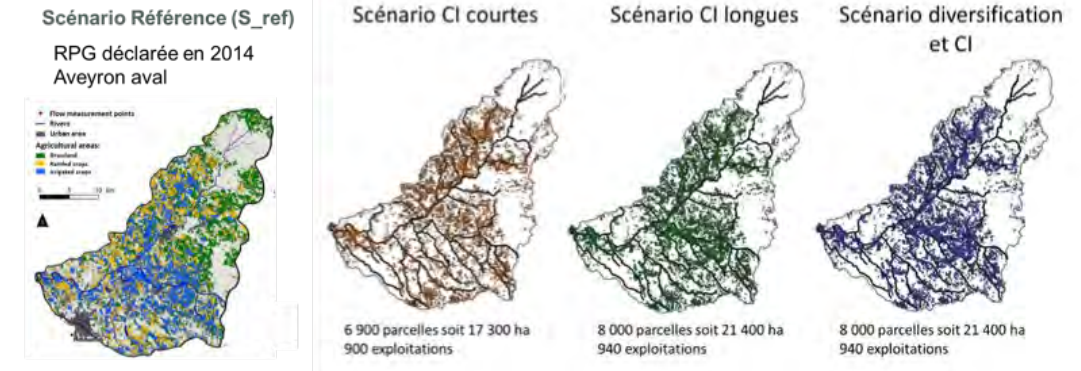
# Exemples de scénarios évalués : enjeu eau

## Co-construits :

- Optimisation irrigation
- Evitement : maïs précoce semé tôt
- Diversification des rotations : Maïs-blé
- Retenues de substitution vs. collinaires
- ...

## Demandes services/agences de l'état :

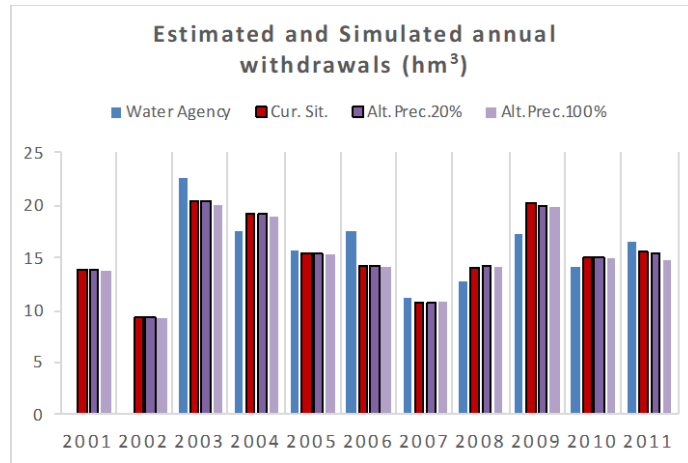
- Effets cumulés des retenues collinaires
- Impacts des cultures IntermédiaIRES (CI) courtes, longues
- Impacts agroécologie : CI longues et rotations diversifiées
- Stratégies d'atténuation et d'adaptation



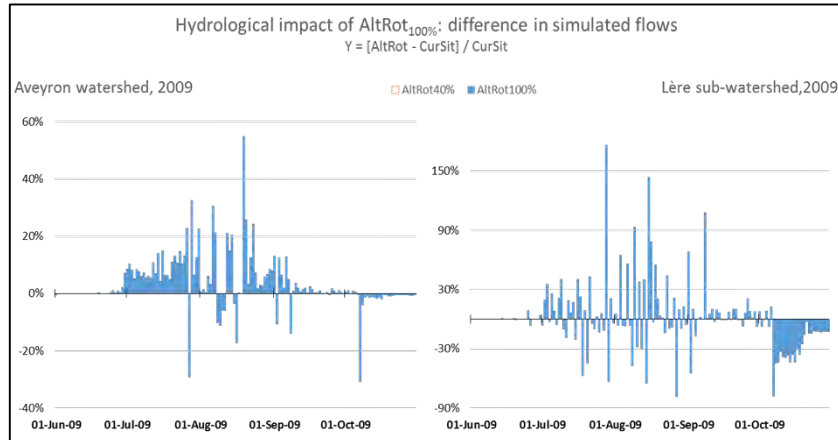
→ Effets dépendent des situations d'action : sous-bassins, SdC, périodes



# Pratiques agricoles et gestion de l'eau



**1. Semi var. et semis précoces maïs :**  
très faible effet, voire contre-effet, suivant les situations



**2. Rotation blé-maïs vs. maïs :**  
effets différenciés sur les débits suivant les bassins versant, voire contre-effet !

**➔ Besoin d'itérations conception-évaluation !**



# Conception et évaluation de nouveaux

				Reference situation	Alternatives			
Indicator		Calculation	Period considered	Inter-annual mean	1. Reduced irrigated area	2. Decision-support tool	3. Large reservoirs	4. Crop rotation
Water management	CW	Sum of daily withdrawals	Entire year	13.4 hm <sup>3</sup>	− 12%	− 33%	+ 24%	− 42%
	RR	Sum of daily reservoir releases	Entire year	5.3 hm <sup>3</sup>	− 2%	− 18%	− 6%	− 26%
	CR	Number of days below LWRF	Entire year	43 days	− 1%	− 11%	− 6%	− 14%
Environment and hydrology	M	Mean of daily flows	Low flow (June-Sept.)	11.8 m <sup>3</sup> /s	+ 0.1%	+ 1.7%	+ 1.3%	+ 2.7%
	RE	Annual value of D + R-I	Entire year	274 mm	+ 1.1%	+ 2.3%	− 1.8%	+ 6.0%
Agriculture	P	Sum of field-crop production	Entire year	119,030 t	− 11%	− 0.4%	+ 3.5%	− 12.0%
	Y	Annual value of P/A	Entire year	5.6 t/ha	− 3.9%	− 0.4%	+ 3.5%	− 12.0%
	GMH	Annual value of GM/A	Entire year	505 €/ha	− 2%	− 1%	+ 9%	− 9%

*RE* = balance of water entering water bodies = drainage (*D*) + runoff (*R*) from fields minus irrigation withdrawals (*I*)



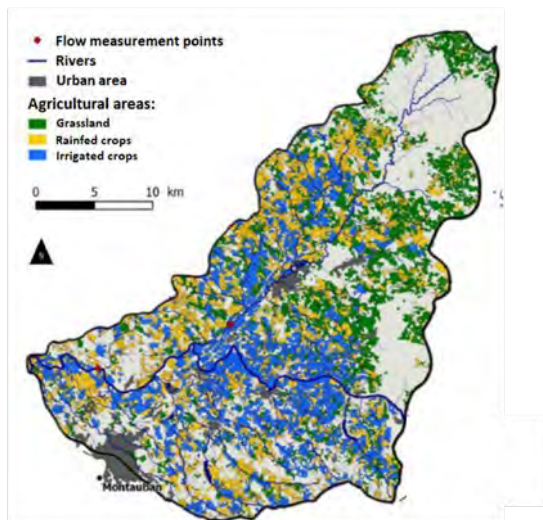
Allain et al. 2018



# Cultures intermédiaires et flux d'eau

Scénario Référence (S\_ref)

RPG déclarée en 2014  
Aveyron aval



Scénario CI courtes



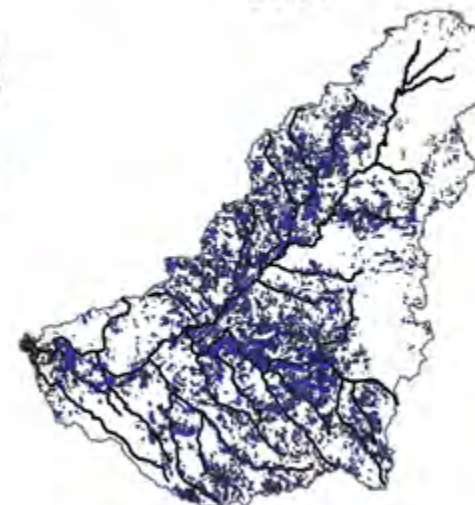
6 900 parcelles soit 17 300 ha  
900 exploitations

Scénario CI longues



8 000 parcelles soit 21 400 ha  
940 exploitations

Scénario diversification  
et CI



8 000 parcelles soit 21 400 ha  
940 exploitations

- Peu d'effets sur les prélèvements et les débits, malgré un effet sur le drainage de -5 à -10 mm mais situations avec - 40 mm (-20%)
- Peu d'effets sur les rendements sauf dans situations à sols superficiels non irriguées
- Attention aux années sèches → Effet du CC ?

➔ Effets dépendent des situations d'action : sous-bassins, SdC, périodes



# Autres domaines d'application

**Gestion territoriale des ressources organiques** : quels PRO, pour quels systèmes de culture, pour quelles multi-performances ?

- Plaines de Versailles, Alsace...

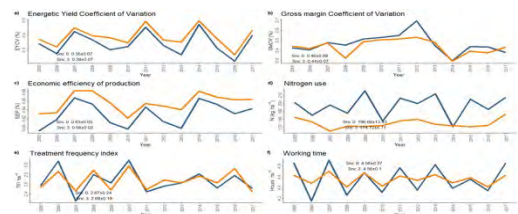
*Misslin et al., 2019, 2020, 2022*



**Système culture-élevage territorial** : quels échanges pour quelles performances et résiliences ?

- Collectif exploitations en Vendée

*Catarino et al. 2020, 2021a,b, Dardonville et al. 2023*



**Collectif de méthanisation agricole** : quels systèmes de culture pour une méthanisation durable et la neutralité carbone

- Méthaniseurs en Meuse et Vosges

*Colas et al. 2023*



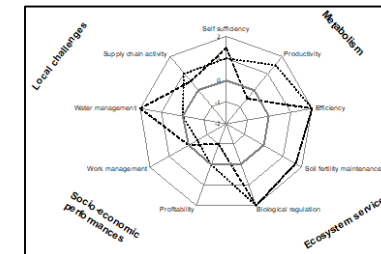
**Relation entre bioéconomie et agroécologie** : quels systèmes de culture et quelle(s) transformation(s) de biomasse pour le territoire

- Alsace, OPE

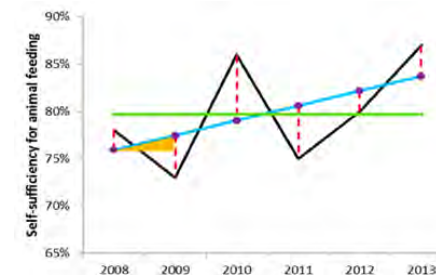


# MAELIA : avancées

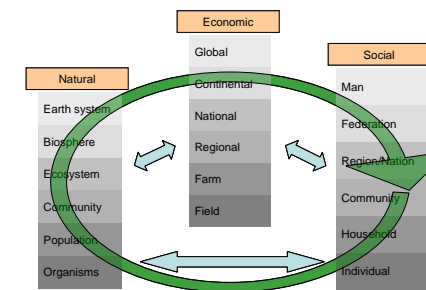
- **Intégrer les enjeux** : dépasser les approches en « silos », eau, phyto, azote, C...  
→ prendre en compte de manière cohérente les grands enjeux de l'agriculture environnementaux et socio-économiques (SSE)
- **Hétérogénéités & dynamiques** : dépasser les bilans standardisés et statiques  
→ prendre en compte les hétérogénéités spatiotemporelles et les dynamiques à l'origine des variabilités
- **Multiniveau** : dépasser les approches « multi points/locales »  
→ prendre en compte les interactions spatiales (flux de matières et d'énergie) et contraintes de fonctionnement entre niveaux d'organisation (SdC, exploitation...)
- **Intégration des connaissances génériques et locales**  
→ prendre en compte les spécificités et contraintes locales pour assurer le réalisme des solutions



Catarino et al.  
2021



Dardonville et al.  
2020, 2021



Ewert et al.  
2011



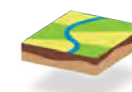
Murgue et al.  
2015, 2016





*Merci de votre attention*

MAELIA



MAELAB