



Modélisation et évaluation intégrées des systèmes et territoires agricoles :



Olivier Therond - INRAE Colmar – UMR LAE

*Ecole Chercheur MAELE
10-12 mai 2022 - Rennes*



Contexte et enjeux sociétaux

Enjeux environnementaux exprimés à l'échelle du territoire : eau, sol, air, biodiversité, services éco. (régulations)...

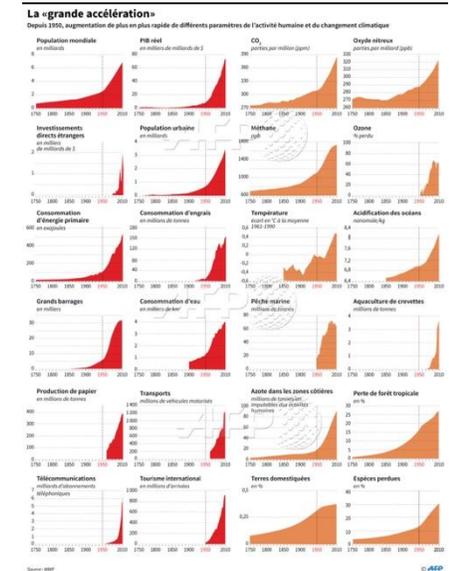
Transitions agroécologique, bioéconomique, écologique, énergétique, alimentaire. **Atténuation et adaptation au CC.**

Leviers de durabilité à l'échelle du territoire : économie circulaire, gestion du paysage...

Projets de développement à l'échelle du territoire : Plan Climat-Air-Energie, Projet Alimentaire Territorial, projet de développement intégré...

→ Des **innovations et interactions multiples** : des performances difficiles à appréhender

→ L'agriculture au cœur des débats





Landscape design/planning and management :

Concevoir des configurations spatiotemporelles des activités pour atteindre des objectifs en termes de ressources naturelles et performances socio-économiques

Conception de Territoires agricoles (Landscape Design) : « *a social–ecological system comprising a dynamic mosaic of land uses* »

Expérimentation in situ difficile --> **Importance des outils de modélisation pour concevoir et évaluer des scénarios de structures et fonctionnement de territoires durables**

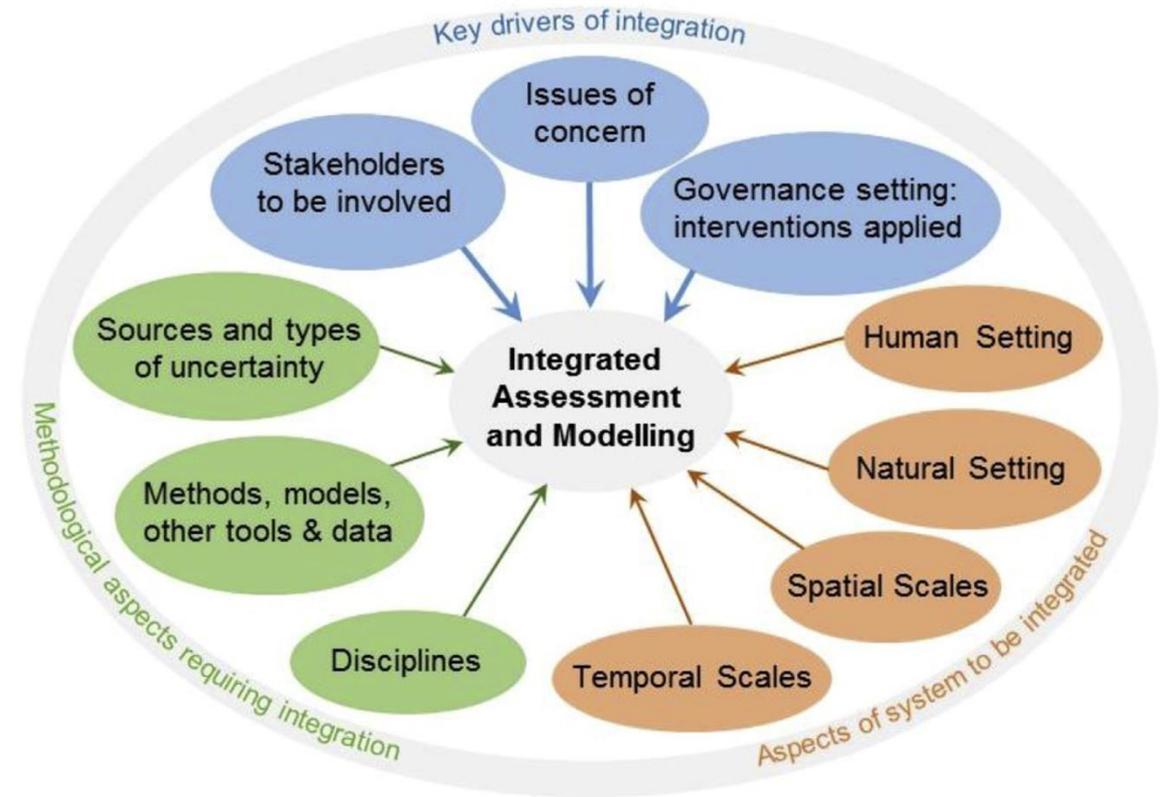
Nassauer and Opdam 2008 ; Cumming et al. 2013 ; Parrott and Meyer 2012 ; Parrott 2011

Sayer et al. 2013 ; Schouten et al. 2012 ; Wu 2013 ;



Integrated Assessment and Modelling – IAM

Les modèles une voie d'intégration des connaissances génériques et locales pour accompagner la conception, exploration et évaluation de systèmes socio-écologiques (territoires)



10 « dimensions of integration » in IAM

Hamilton et al. 2015



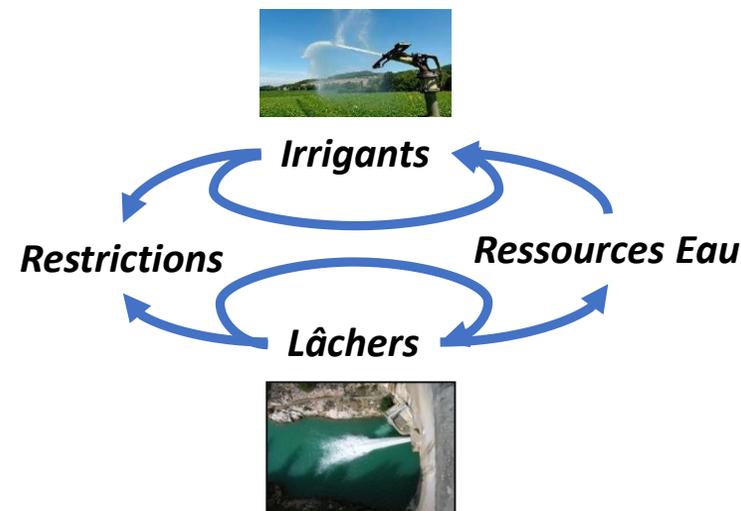
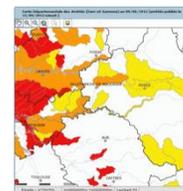
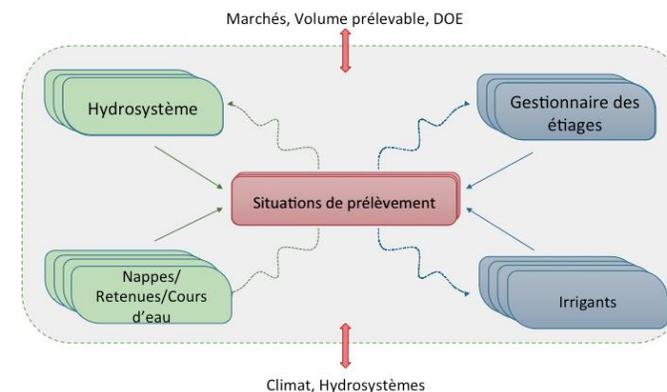
Enjeux de modélisation des systèmes agricoles

Modélisation :

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

Evaluation :

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

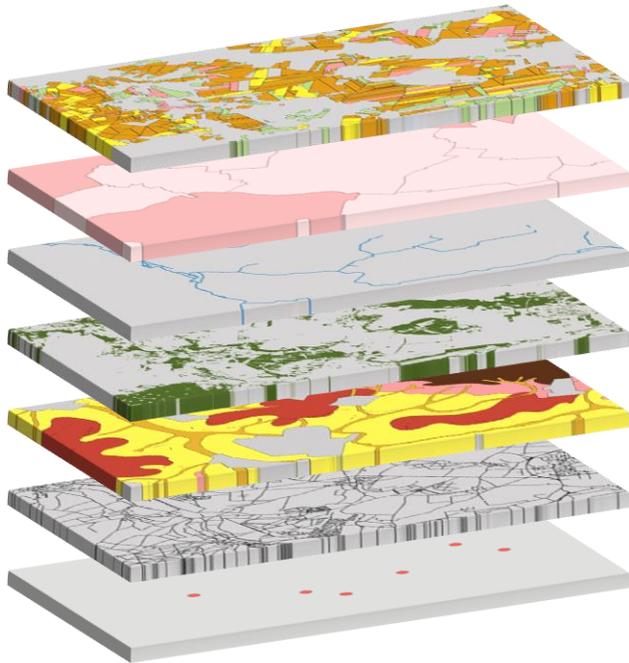


Plateforme de modélisation et simulation



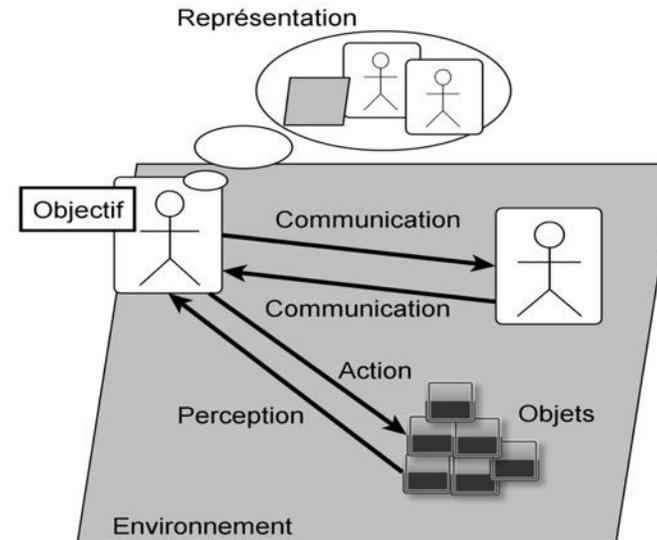
Systeme multi-agent spatialisé

Base de données géoréférencées
-> *structure*



+

Chaîne de modèles
-> *dynamique*



Modèles couplés :

- Sol-plante
- Hydrologie
- Transformation
- Gestionnaire
- ...

Therond et al. 2014

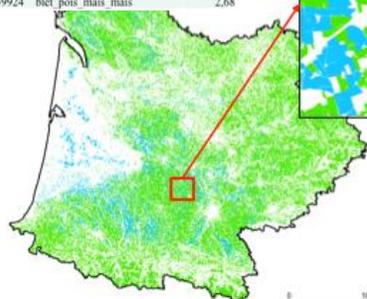
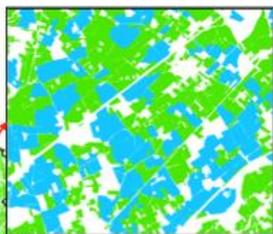


Structure du territoire : intégration de données hétérogènes

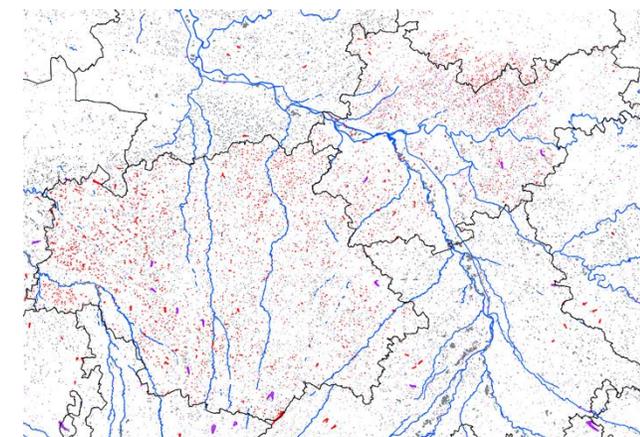
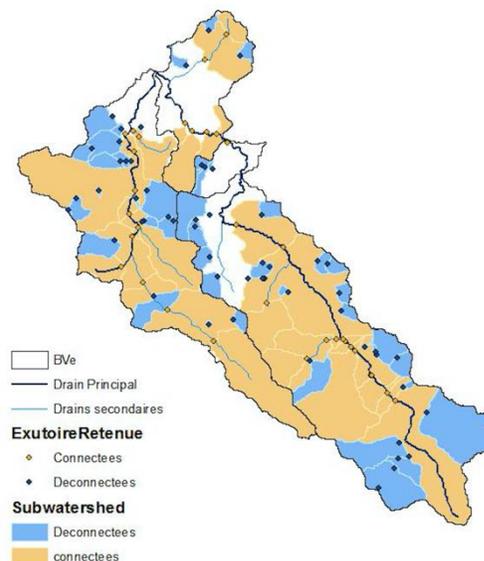
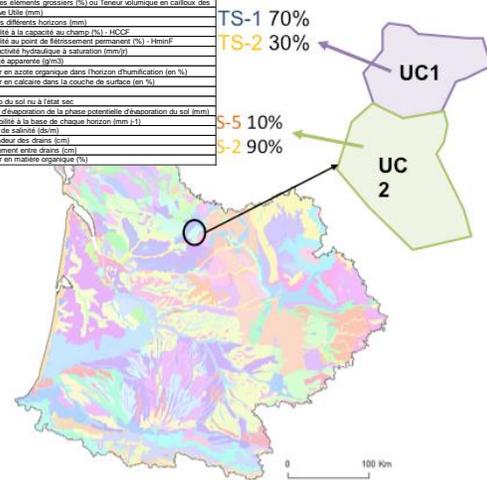
Intégration de données :

- Sols (cartes au 1/50 000 → 250 000) et Climats (grilles 8 ou 6 km)
- Registre Parcellaire Graphique (RPG) et Séquences de culture observées
- Stratégies de conduites des cultures (enquêtes)
- Ressources en eau (Agences, IGN, BRGM...)
- Réseau routiers
- Structures de production et transformation...

ID lot	Séquence	Surface
24836	gelbe_gelbe_gelbe_gelbe	1,64
37875	cereale_pois_cereale_tour	2,67
37890	orge_soja_cereale_cereale	5,20
37958	cereale_pois_cereale_soja	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

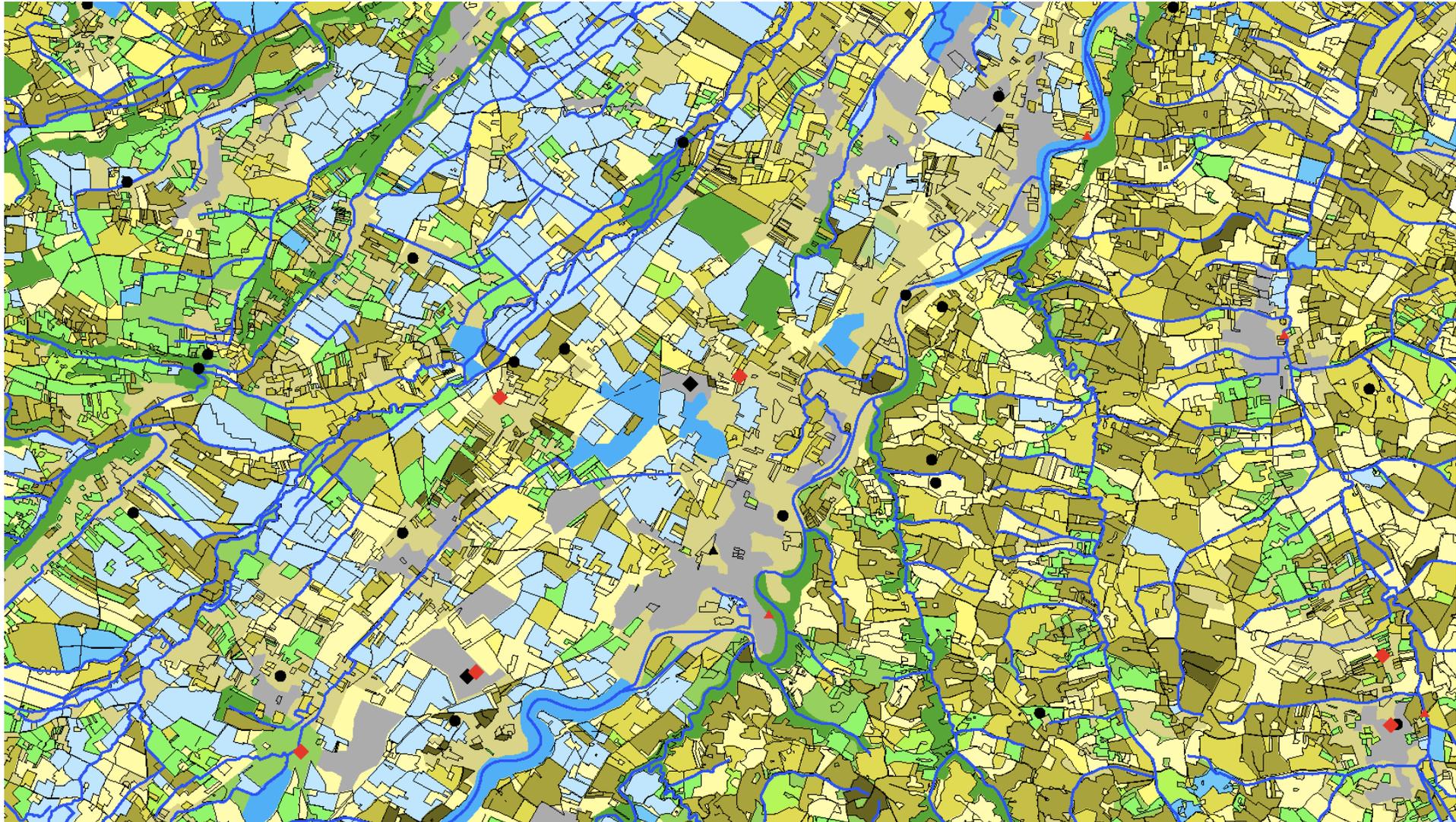


Variables sols	
Nombre d'horizons	
Épaisseur des horizons (m)	
Classe de classement du Profondeur d'enracinement (m)	
Présence d'un horizon imperméable (profondeur en cm)	
Teneur en argile (%)	
Teneur en sable (%)	
Teneur en limons (%)	
Part des éléments organiques (%) ou Teneur volumique en cailloux de Réserve Ultra (mm)	
SU des différents horizons (mm)	
Humidité à la capacité au champ (%) - HCCF	
Humidité au point de flétrissement permanent (%) - HminF	
Conductivité hydraulique à saturation (mm/s)	
Densité apparente (g/cm³)	
Teneur en azote organique dans l'horizon d'humification (en %)	
Teneur en calcium dans la couche de surface (en %)	
pH	
Albedo du sol nu à l'état sec	
Limite d'évaporation de la classe potentielle d'évaporation du sol (mm)	
Infiltrabilité à la base de chaque horizon (mm x 1)	
Densité volumique (g/cm³)	
Profondeur des drains (cm)	
Écartement entre drains (cm)	
Teneur en matière organique (%)	



SURFACE EAU bd Topo® x Données MISE

Intégration des données → structure fine du territoire



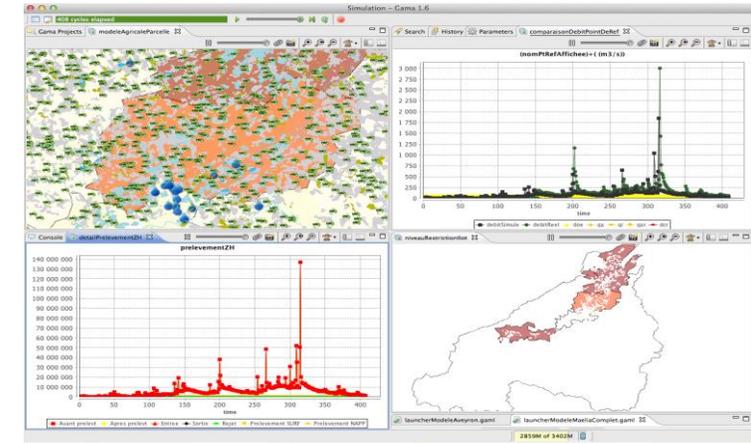
Intégration/développement de modèles « pattern-modelling », « simples » et robustes :

Processus écologiques et biotechniques :

- Sol-plante : modèle de culture **AqYield** et prairie **Herb'Sim**
- Hydrologie : modèle **SWAT**[®]
- Transformation de biomasse : modèle SYS-Métha
- ...

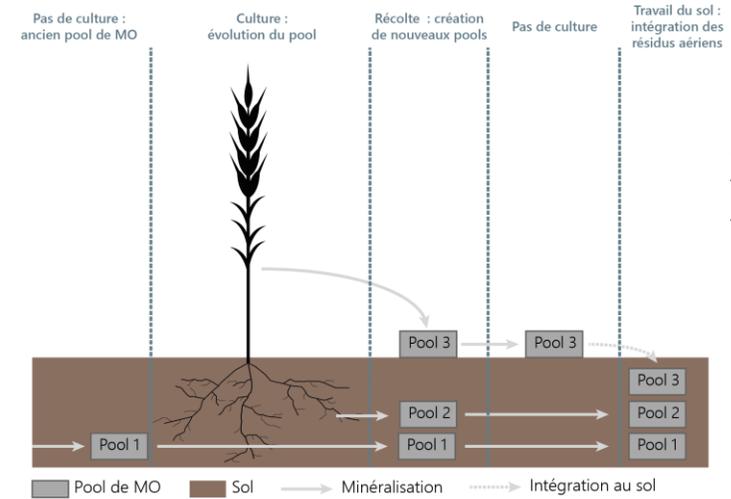
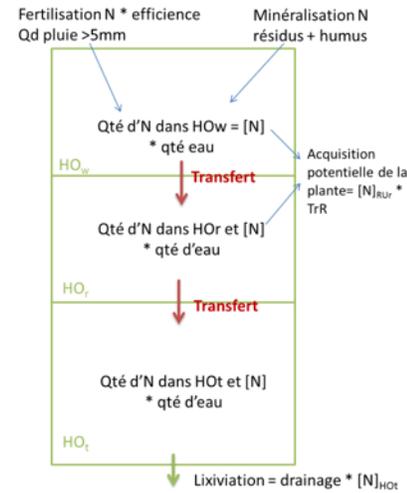
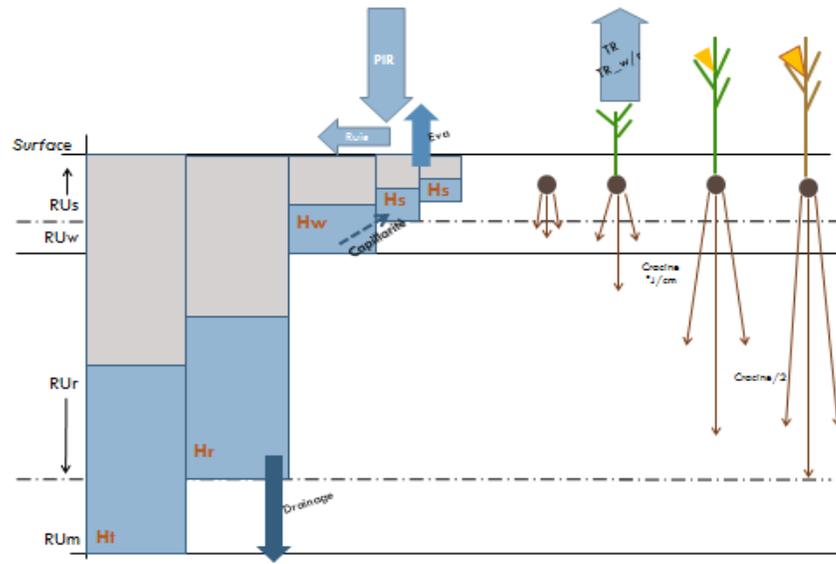
Processus décisionnels :

- Agriculteurs
- Gestionnaires de ressources
- Gouvernances des usages des ressources



Modèle de culture : cycles eau, azote, carbone et GES

Aqyield



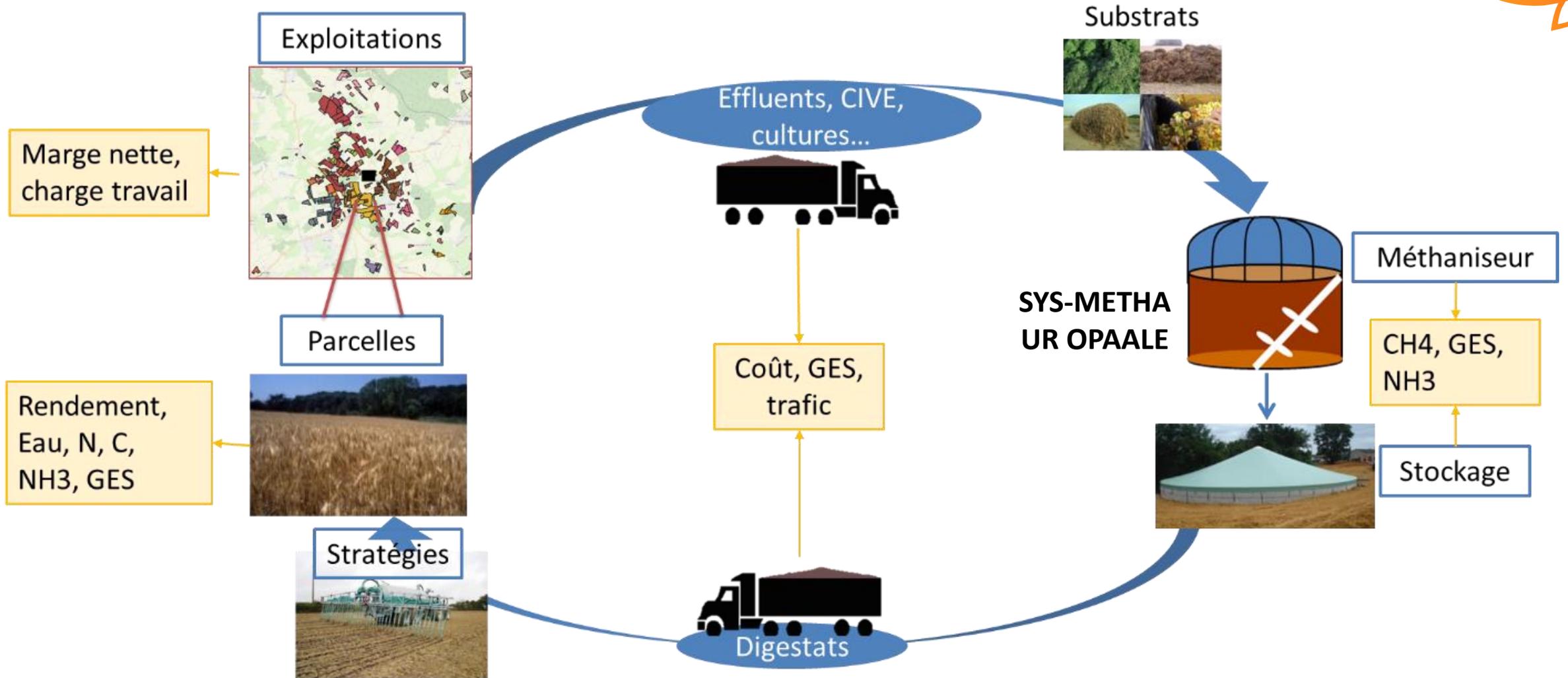
Constantin et al. 2015
Tribouillois et al. 2018
Tribouillois 2020

Indicateurs :

- Cycles eau, N et rendement
- Stockage de C
- Emissions directes et indirectes de GES
- Emissions amonts (ACV)
- Indicateur(s) de structure du sol



MAELIA Métha



Modélisation des stratégies des agriculteurs

Choix
d'assolement de
Systèmes de
Culture (SdC)

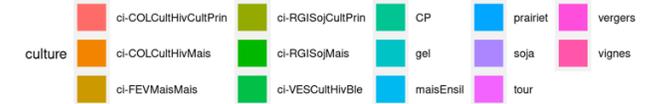


Conduite
des
cultures

- (i) Données d'entrée (RPG, acteurs)
- (ii) Rationalité limitée : architecture Belief-Desire-Intention + fonction de croyance + Apprentissage
- (iii) Optimisation (couplage avec CAPFARM de l'UMR BAGAP)

- Travail du sol (Labour/reprise labour)
- Semis
- Protection des cultures (contraintes temps de travail)
- Binage
- Fertilisation (contraintes temps de travail)
- Irrigation
- Récolte

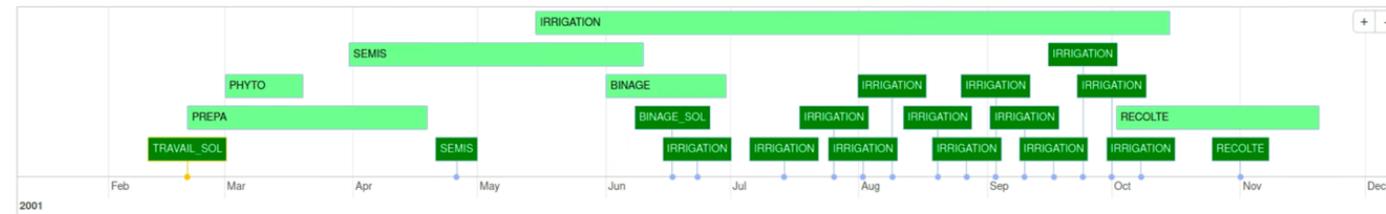
Rotations par parcelle



Agent agriculteur : conduite des cultures

Représentation des **stratégies de conduite des cultures** sous forme de règles SI – ALORS
- f(état du climat passé & futur, sol, plante, ressource en eau, régulation)

ITK maisDP: maisDP_mais_ble_irr_alluvions+_integrale



ITK CP: CP_irr_alluvions+_integrale

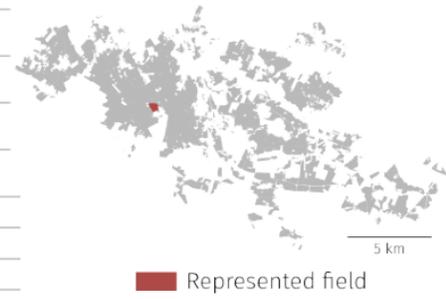
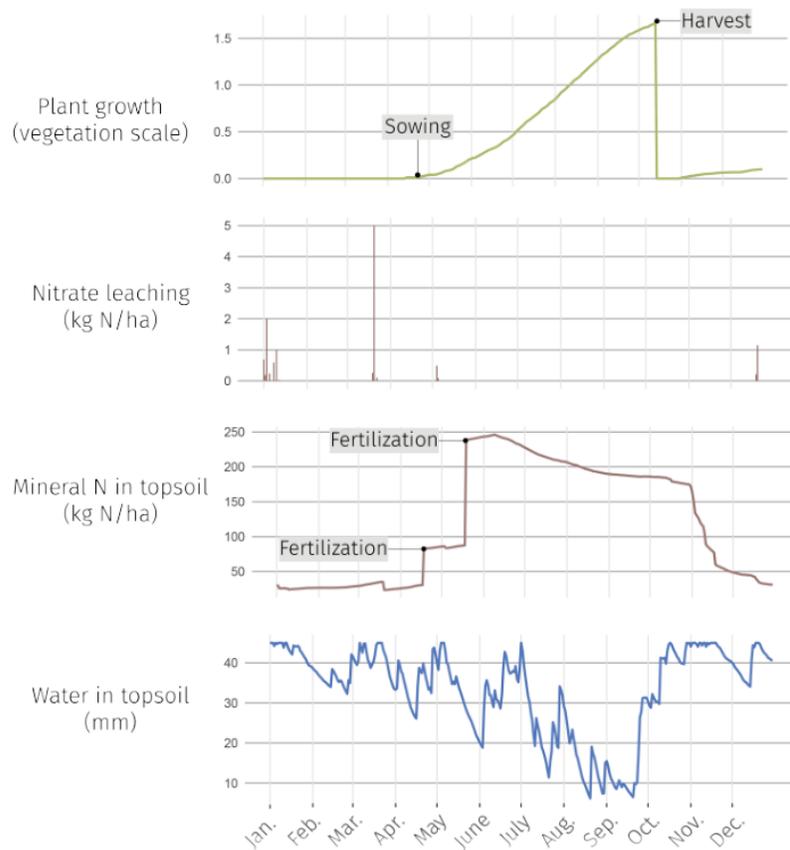


Représentation du **fonctionnement de l'exploitation** :

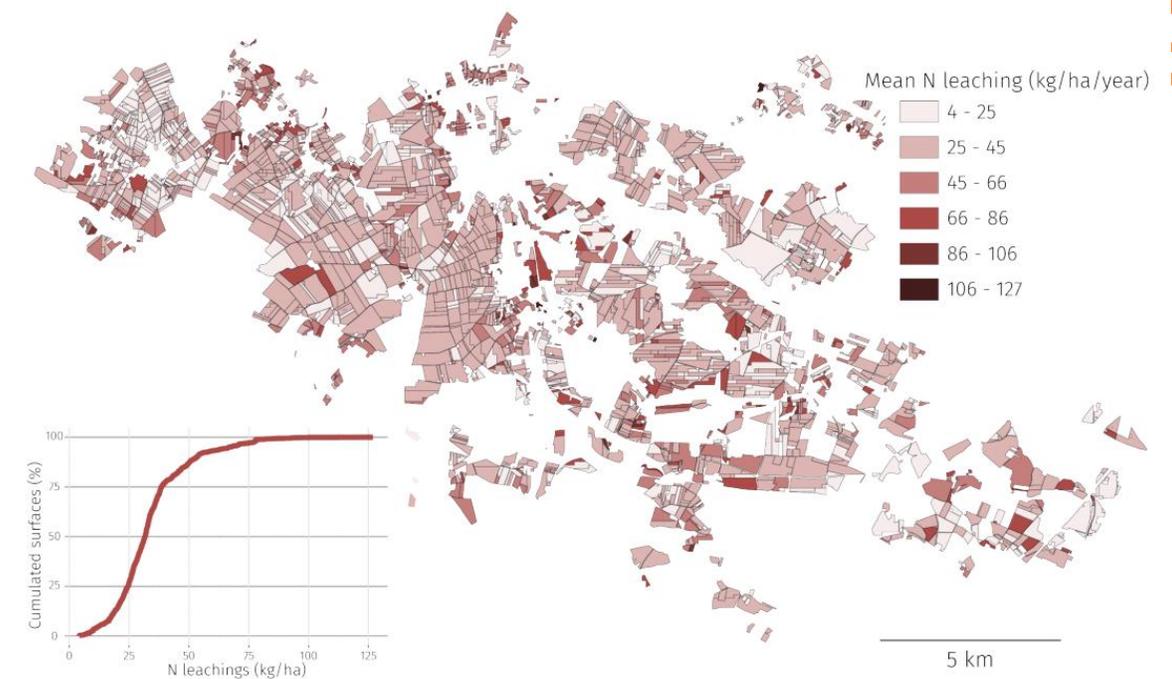
- Contraintes de disponibilité en travail : débit de chantier associé à chaque opération culturale
- Priorité entre les opérations techniques et entre ressources (eau, PRO)
- Distribution spatiale des parcelles



Résultats temporels détaillés à la parcelle



Simulated year : 1992
Crop : maize
Fertilizations :
- NP : 55 kg N/ha
- N solution : 165 kg N/ha



Misslin et al. in revision

- ➔ 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

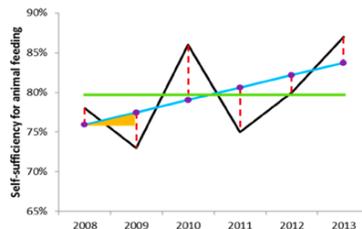
- Biophysique : climat, ressource
- Economique : prix, primes
- Social : contraintes sur le travail...

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

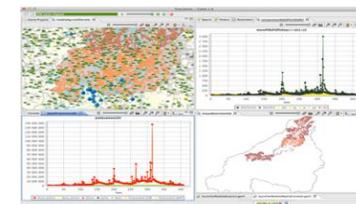
- Cycle eau, N et C, fertilités des sols
- Rendements
- Services écosystémiques, ACV
- Contaminants (phyto, ETM)...

Economiques

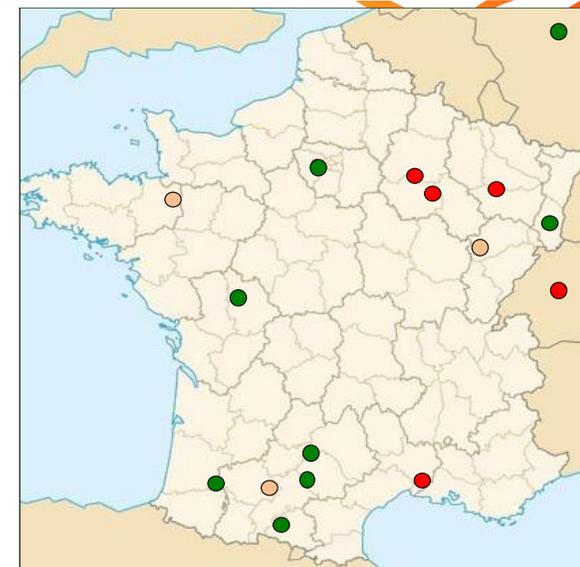
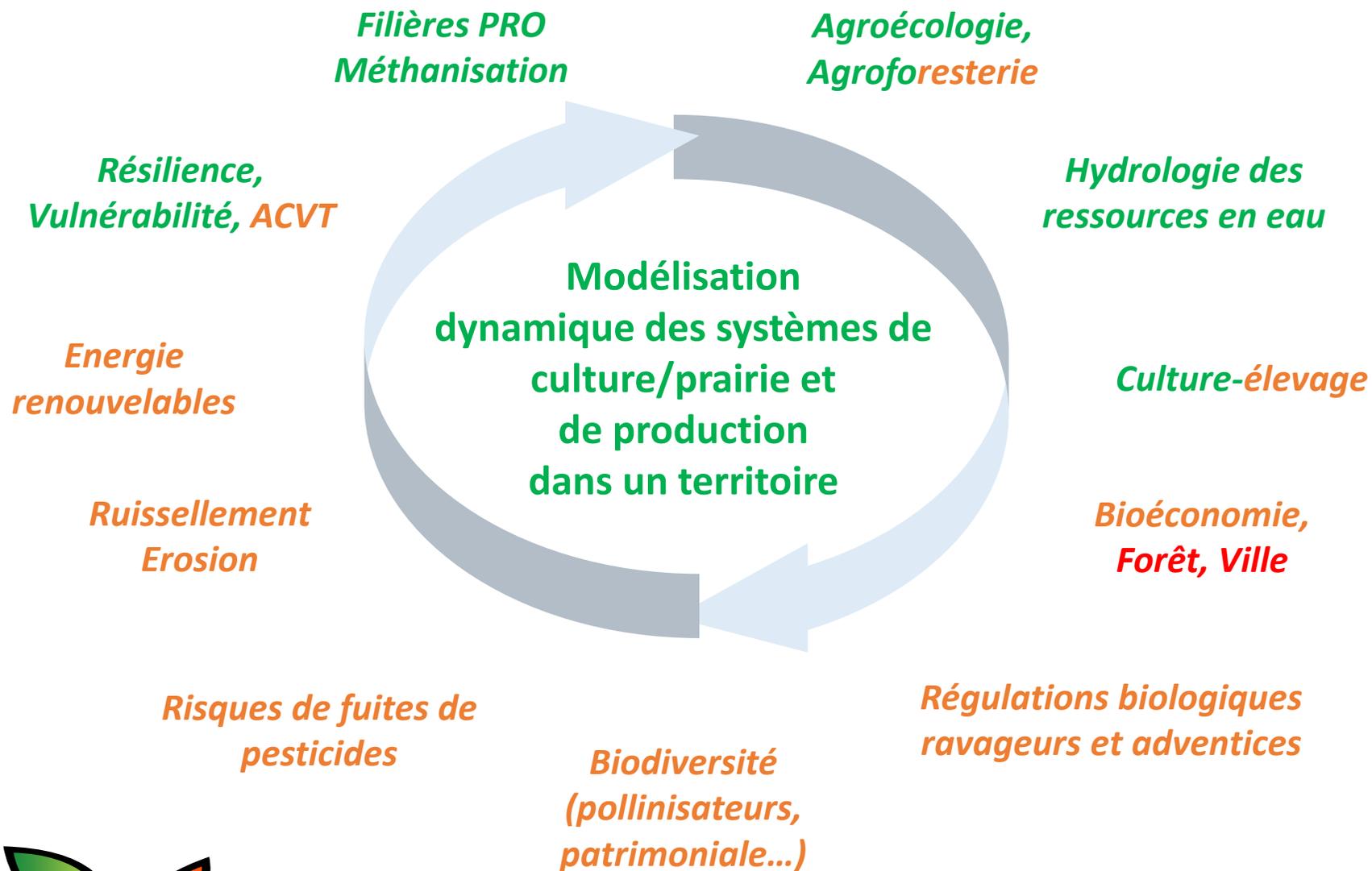
- Marges brutes et semi-nette
- Production, conso et efficience
- Souverainetés, autonomies ...

Sociaux

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



Amplification des fonctionnalités de MAELIA

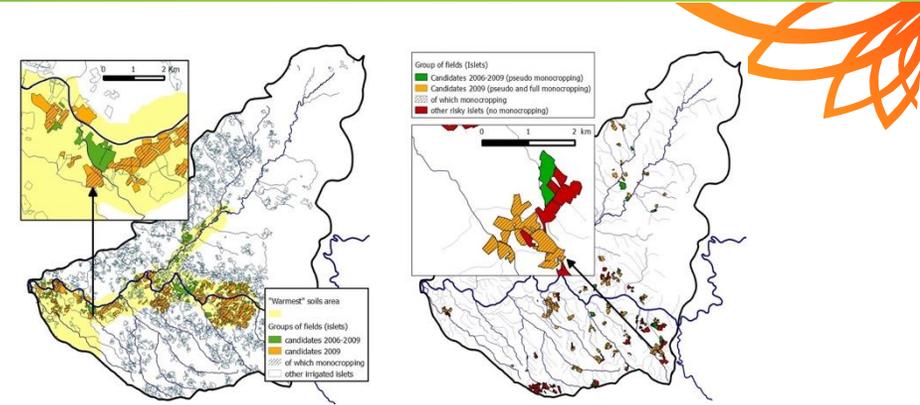


Exemples de cas d'application

Gestion intégrée de l'eau : quels systèmes de culture, ressources (retenues collinaires) et modes de gestion de l'eau ? Quels antagonismes eau verte vs. eau bleue ?

- Bassins Aveyron, Tarn, Adour-Amont...

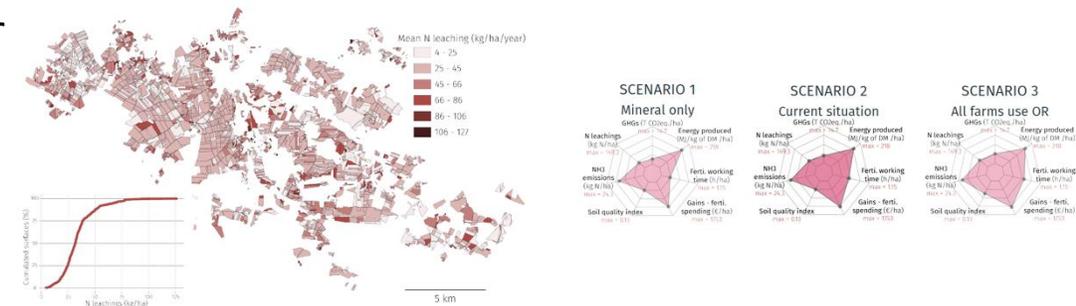
Murgue et al. 2015, 2016; Martin et al. 2016; Allain et al. 2018, 2020, Tribouillois 2021



Gestion territoriale des ressources organiques : quels PRO, pour quels systèmes de culture, pour quelles multiperformances ?

- Plaines de Versailles, Alsace...

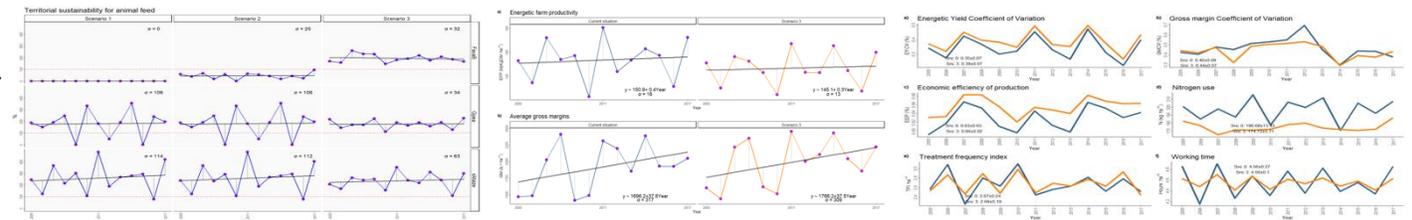
Misslin et al., 2019, 2020, in revision



Echanges entre exploitations culture-élevage : quels échanges pour quelles performances et résiliences ?

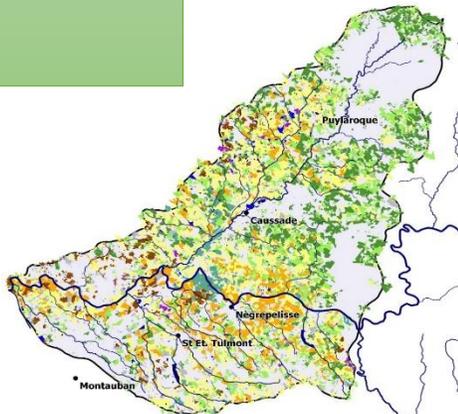
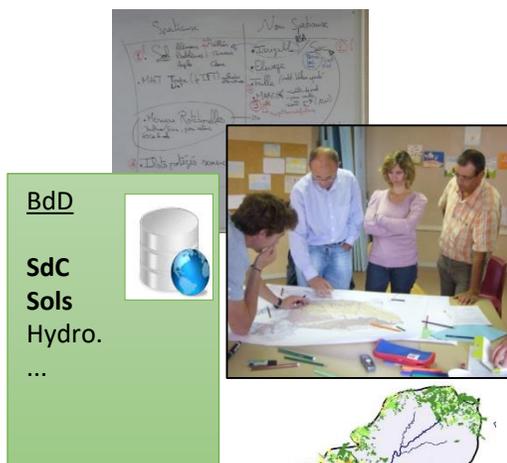
- Collectif exploitations en Vendée

Catarino et al. 2020, 2021a,b, Dardonville et al. in progress



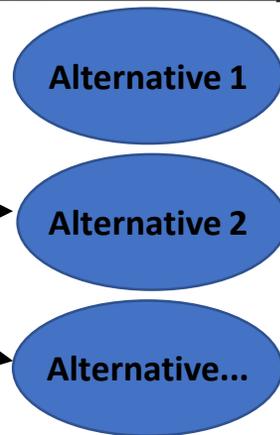
Application de MAELIA avec les acteurs

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



800 km², 1150 exploitations
18 000 parcelles,
140 conduites de culture

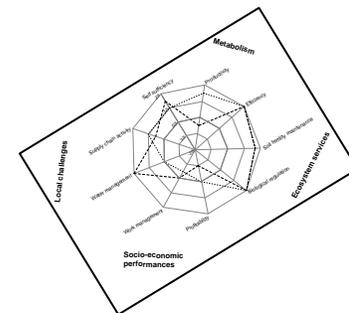
2- Co-conception d'**alternatives** de structure/fonctionnement



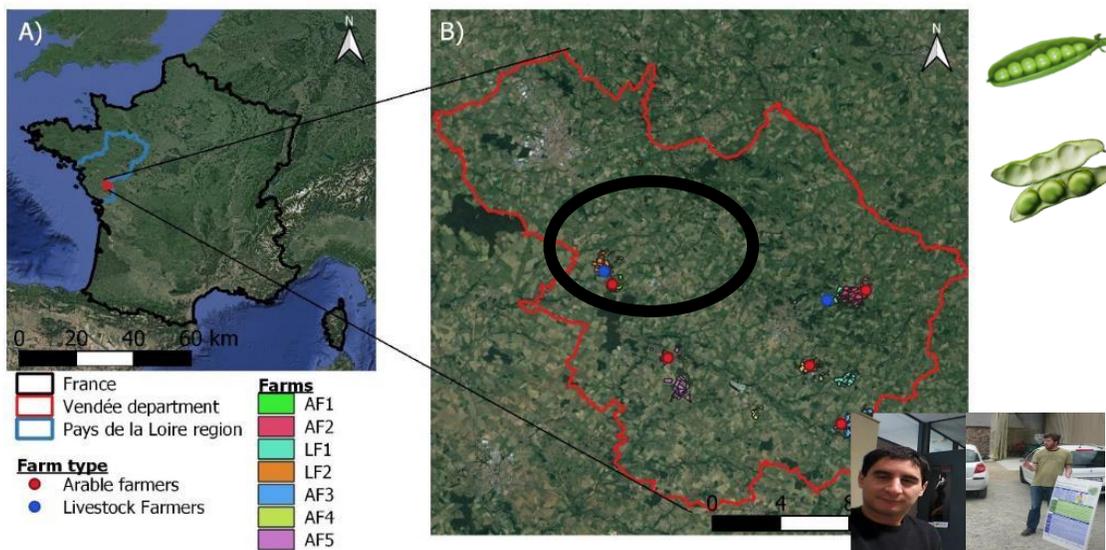
Simulations



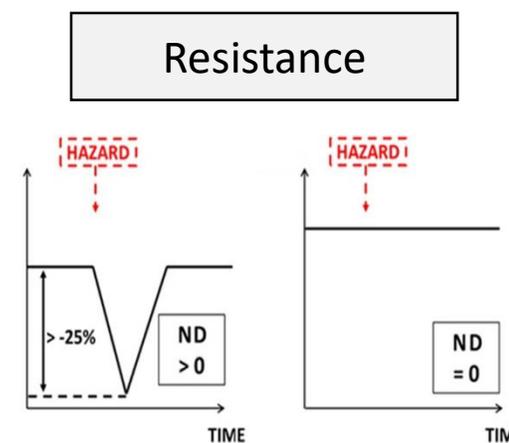
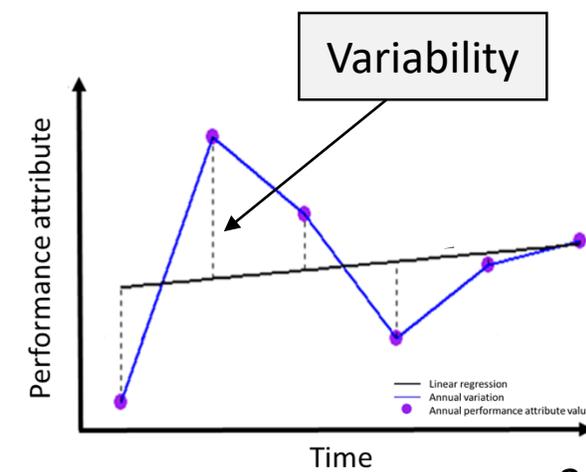
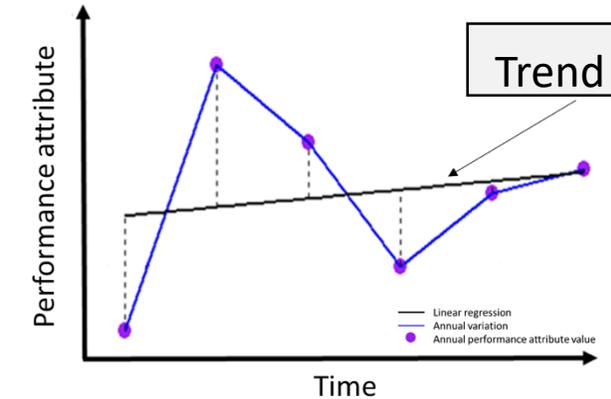
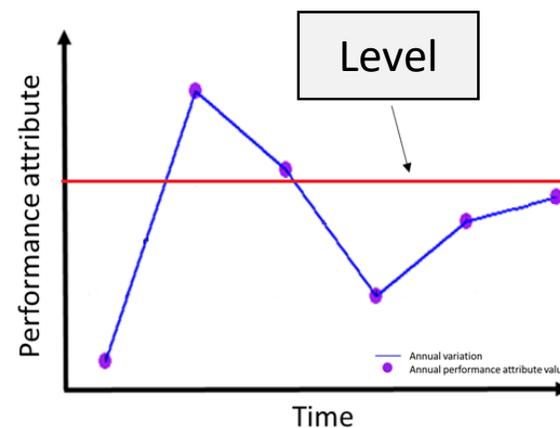
Robustesse à la variabilité climatique



Territorial crop-livestock systems



12 indicateurs and 4 critères de dynamique



24

- Approche participative
- Scénarios d'échange de pois et féveroles entre 5 céréaliers et 2 éleveurs bovin lait
- Données détaillées sur sols et 56 systèmes de culture



Synergetic vs. baseline scenario

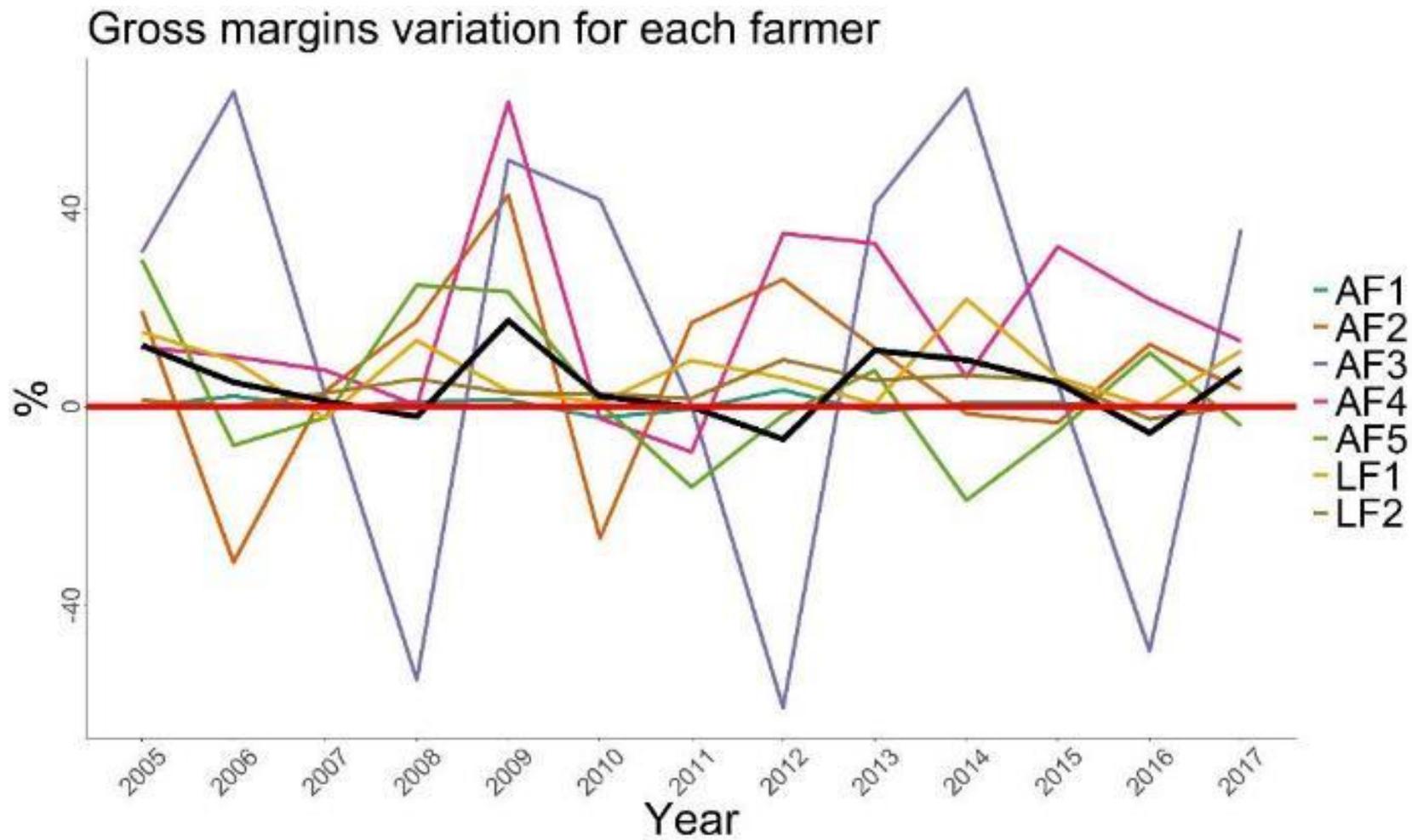


		Economic perf.				Ecosys. Services & Impacts						Social	
		Ener. yield	Prot. yield	Gross margin	Econ. depend.	N supply	Soil structure	Carb. seques.	Water quality	Pestic. active ingredien	Blue water	GHG	Workload
Criteria of dynamics	Level	↘	↗	↗	→	↗	↘	↘	↗	→	→	↘↗	↘
	Slope	↗	↘	↗	→	↘	→	→	↗	→	→	↘	→
	Variability	↗	↘↗	↗	→	↗	→	→	→	↘	↘↗	↘	↗
	Nb of bad disruptions	→	→	↗	↘	→	→	→	→	→	→	→	↗

Criteria of dynamics



Analyse à l'échelle des exploitations agricoles



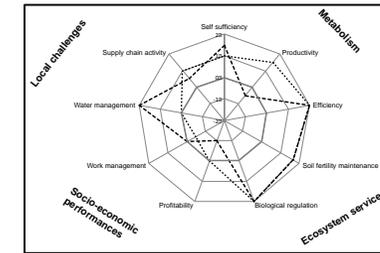
MAELIA : intérêts et limites

Intérêts :

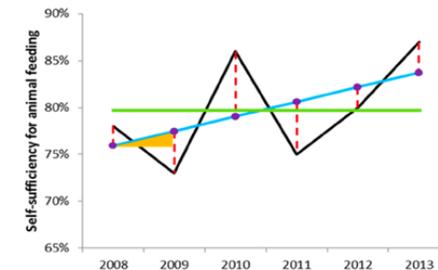
- **Multicritère et multi-leviers** : dépasser les approches en « silos »
- **Hétérogénéités & dynamiques** : dépasser les bilans standardisés et statiques
- **Niveaux d'organisation** : dépasser les approches « multi points »
- **Intégration connaissances génériques et locales** : intérêt et acceptabilité pour les acteurs

Limites :

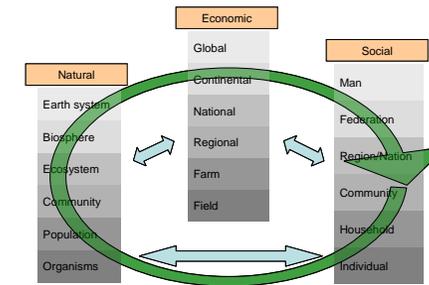
- **Besoins de données et temps** : procédures d'automatisation
- **Expertise multi-domaines requise**



Catarino et al.
2021



Dardonville et al.
2020, 2021



Ewert et al.
2011



Murgue et al.
2015, 2016



Merci de votre attention

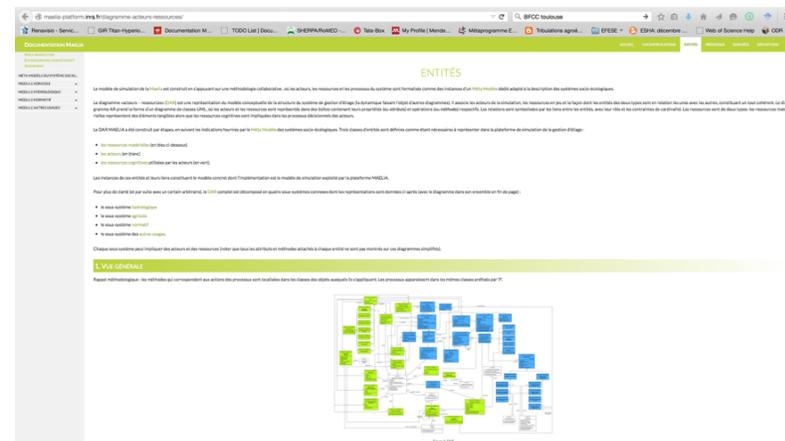
Club des contributeurs au développement de MAELIA

- Laboratoires : AGIR, CIRAD, DYNAFOR, ECOSYS, EEF, GET, IRIT, LAE, MIAT, BAGAPE, AGRONOMIE, SYSTEM, Tour du Valat, LISAH, G-EAU...
- Acteurs : ARVALIS, CACG, ATRT, CRAGE, APCA...
- Coordination : LAE (INRAE)

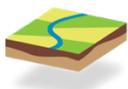
MAELIA



<http://maelia-platform.inra.fr/>



@MAELIA_platform

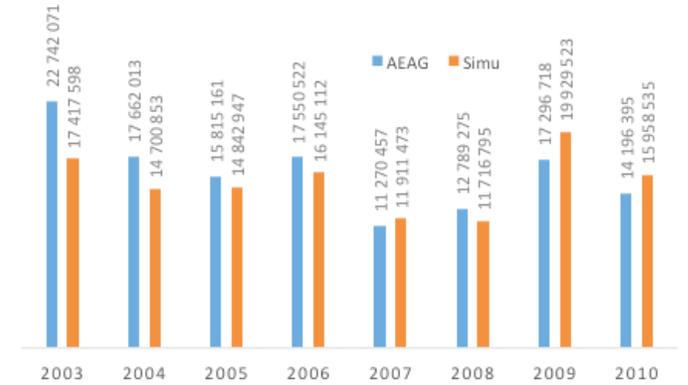


MAELAB

Evaluation du modèle

- **Evaluations quantitatives** en labo et avec les acteurs (ex. hydrologie, prélèvements)

- **Evaluations qualitatives à dire d'experts** locaux (ex. dynamiques spatiotemporelles des opérations techniques)



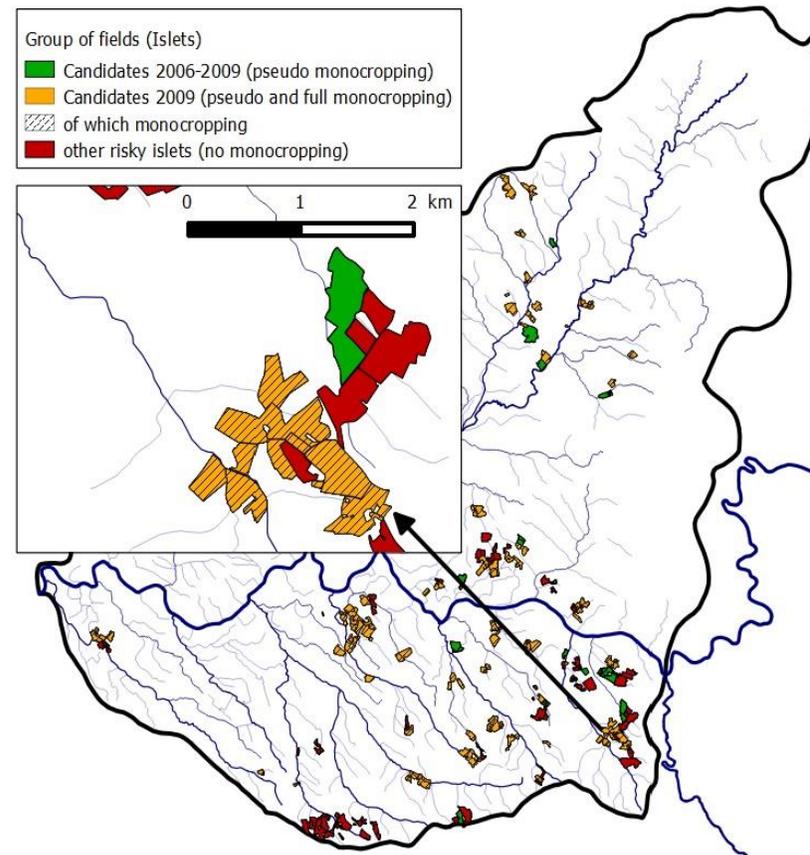
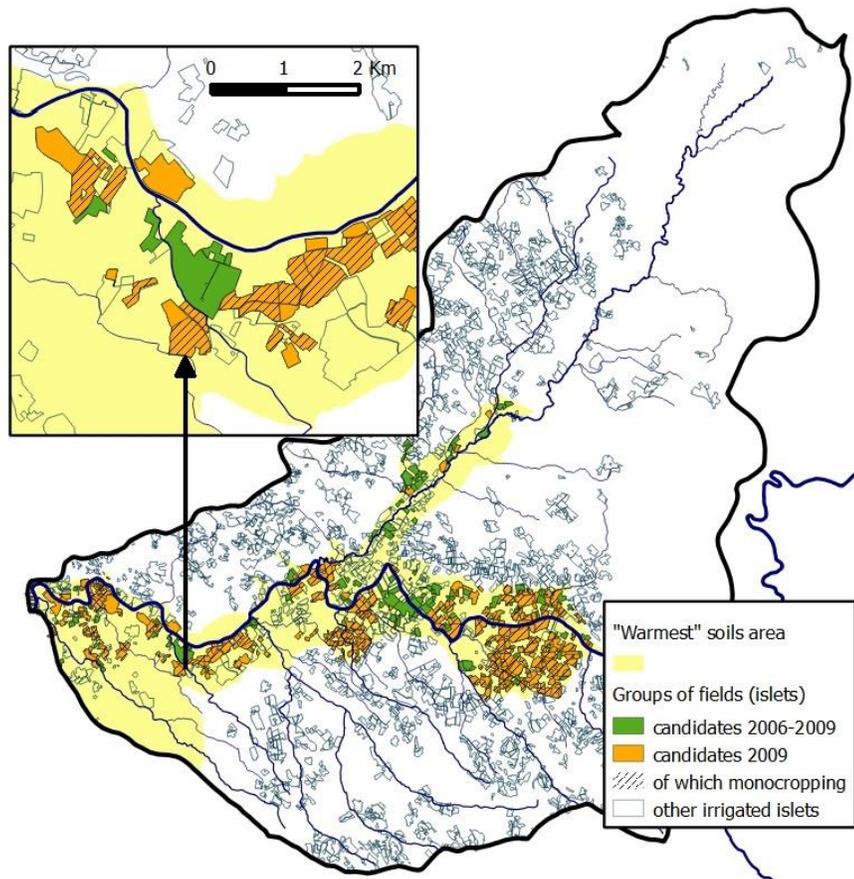
Extrait des pratiques en Maïs gr. Monoculture, tous sols confondus

moyennes	Date Irrig. 1	Date fin irrig.	Nb. TD	dose [mm]
2003	23/5	15/9	14	288
2004	4/6	1/10	13	287
2005	3/6	4/10	12	268
2006	25/5	2/9	12	263
2007	23/6	21/9	10	255

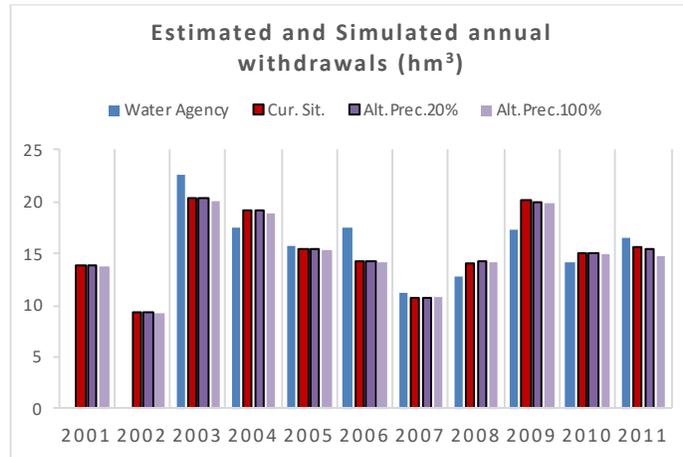
- Une représentation numérique du SSE jugée cohérente et adaptée pour analyser le fonctionnement et évaluer les effets de changements dans le SSE
- Demande des acteurs de détailler les situations d'action (ex. sol, SdC, ressources en eau, contraintes de gestion...) !



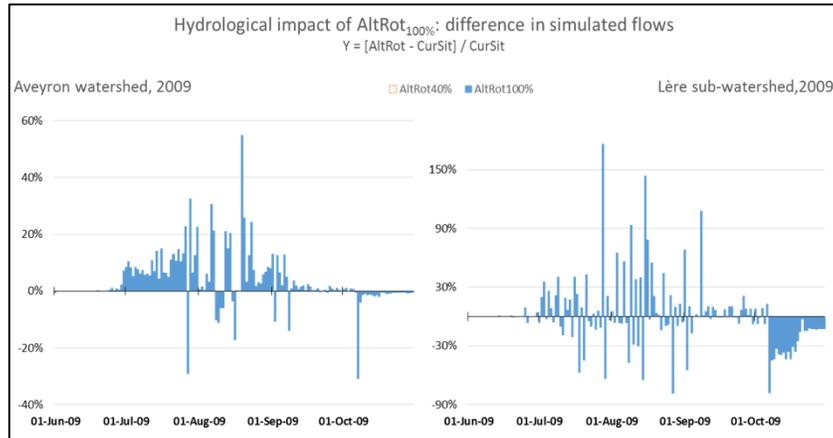
Formalisation des scénarios



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



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

➔ 7-8 ans d'interactions autour de MAELIA

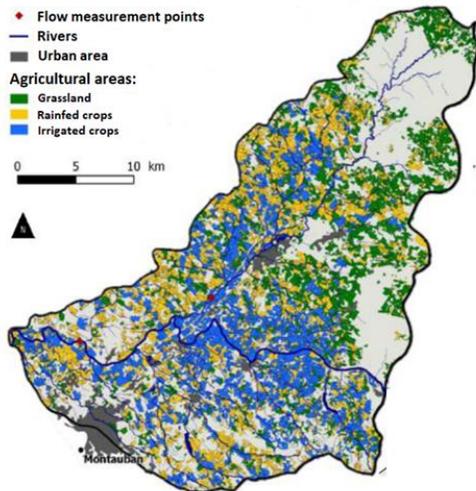
Allain et al. 2018



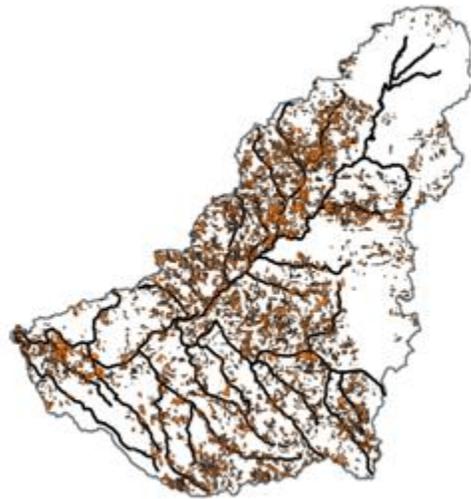
Cultures intermédiaires et flux d'eau

Scénario Référence (S_ref)

RPG déclarée en 2014
Aveyron aval

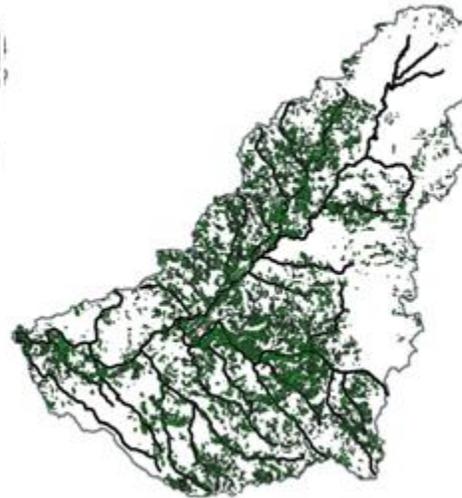


Scénario CI courtes



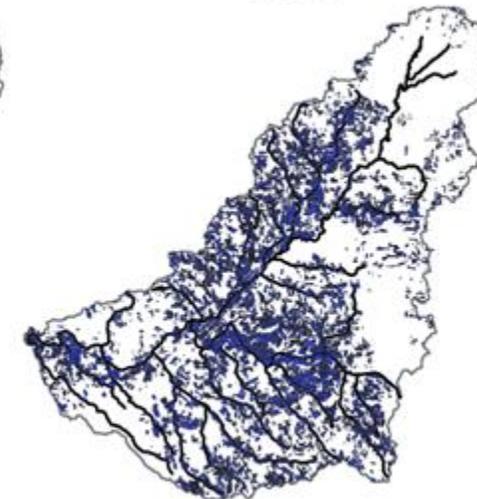
6 900 parcelles soit 17 300 ha
900 exploitations

Scénario CI longues



8 000 parcelles soit 21 400 ha
940 exploitations

Scénario diversification
et CI

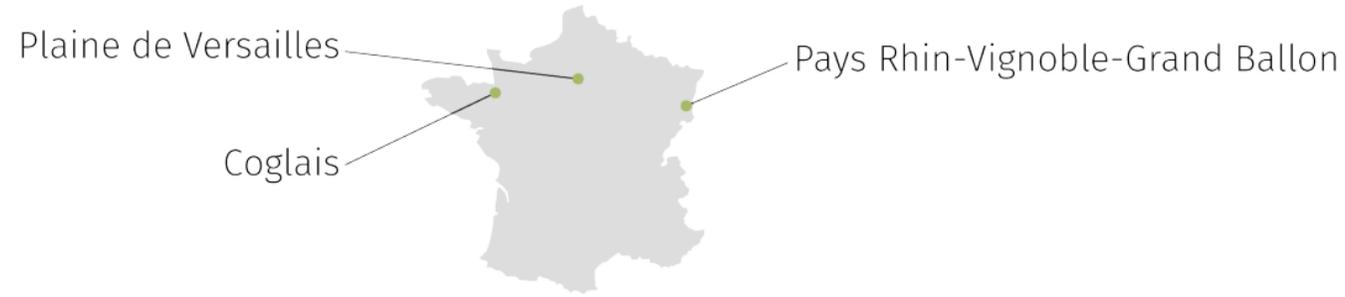


8 000 parcelles soit 21 400 ha
940 exploitations

- Peu d'effets sur les prélèvements et les débits, malgré un effet sur le drainage de - 5 à 10 mm (-1,5%) 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 ?



Gestion territoriale des PRO : PROTERR



Coglais



- Élevage bovin et porcin
- Maïs, blé et prairies
- Projet de méthaniseur

Plaine de Versailles



- Colza, blé, maïs
- Peu d'élevage
- Production importante de boues urbaines et de composts de déchets verts

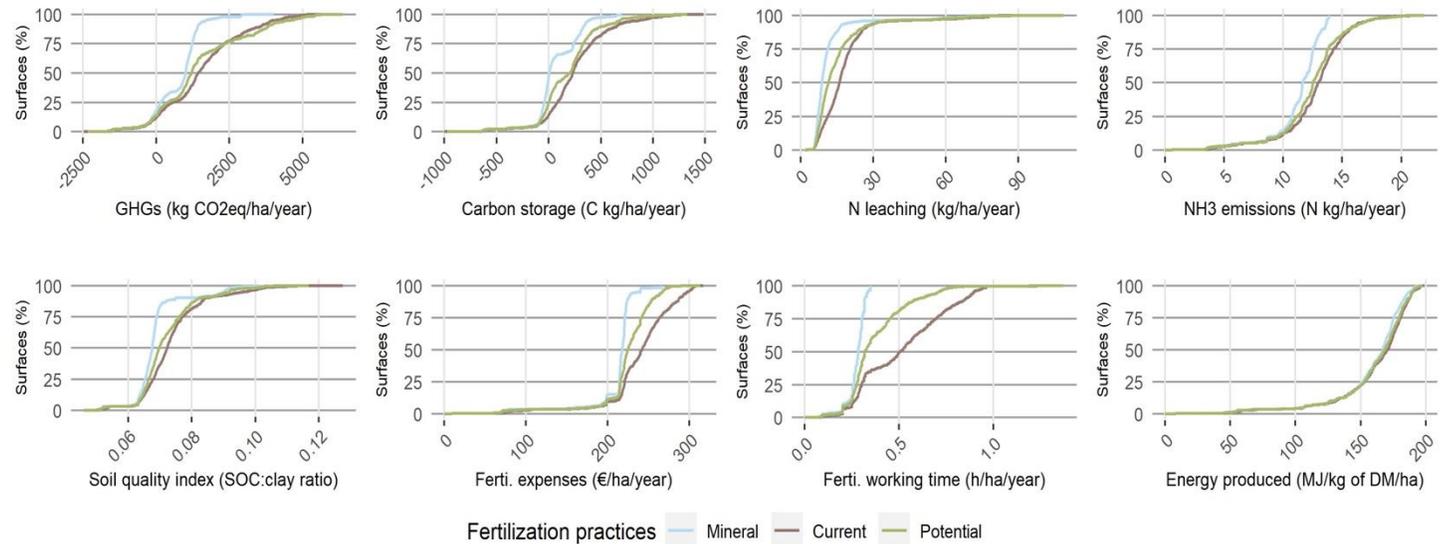
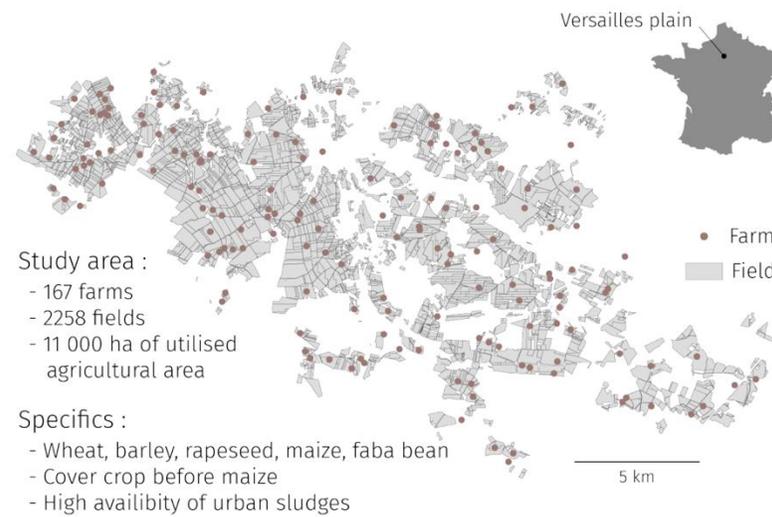
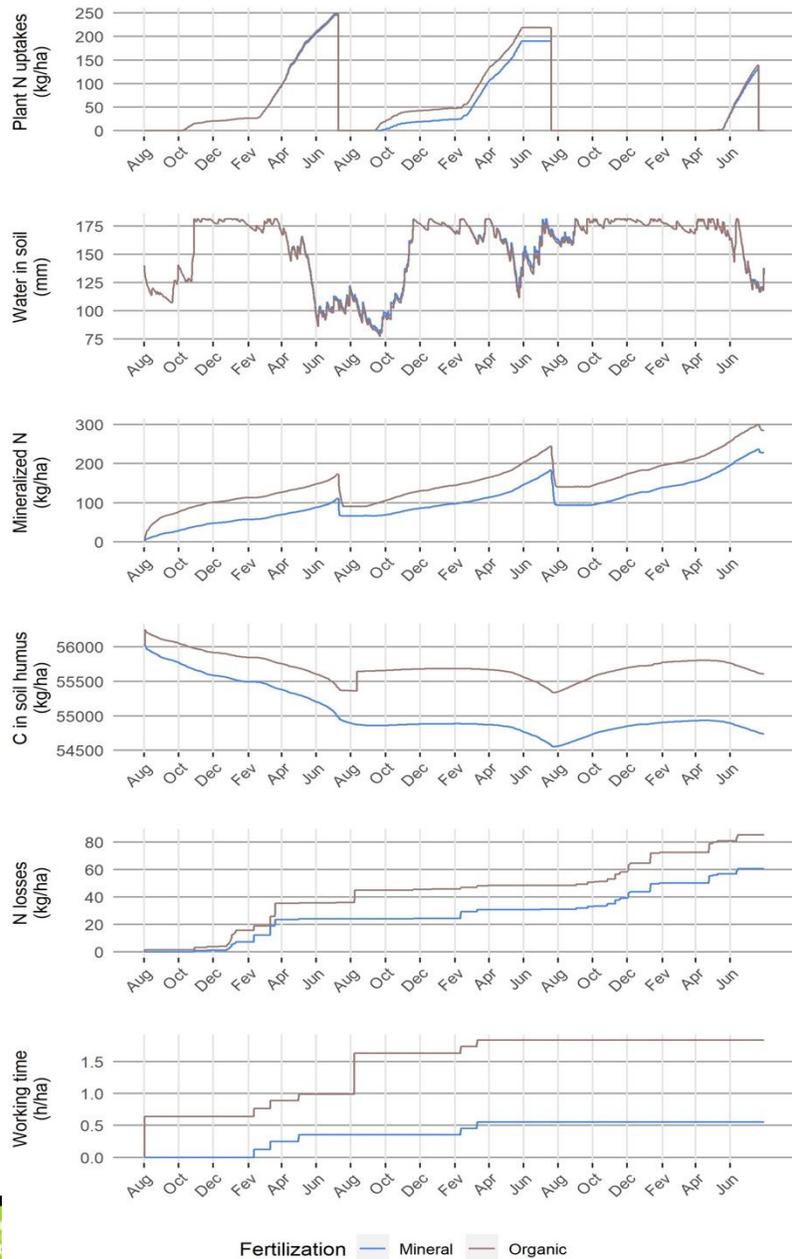
Pays Rhin-Vign.-G.B.



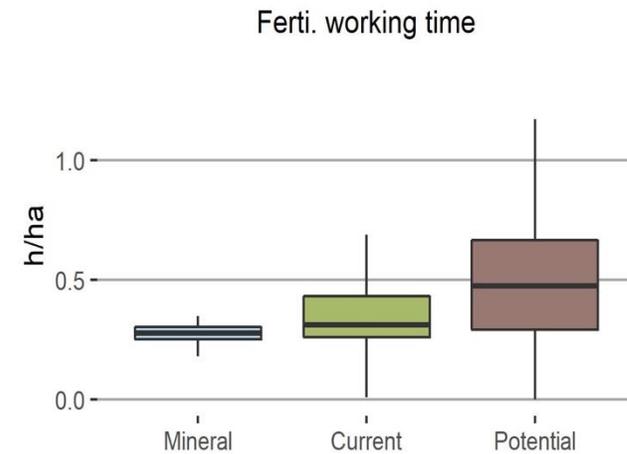
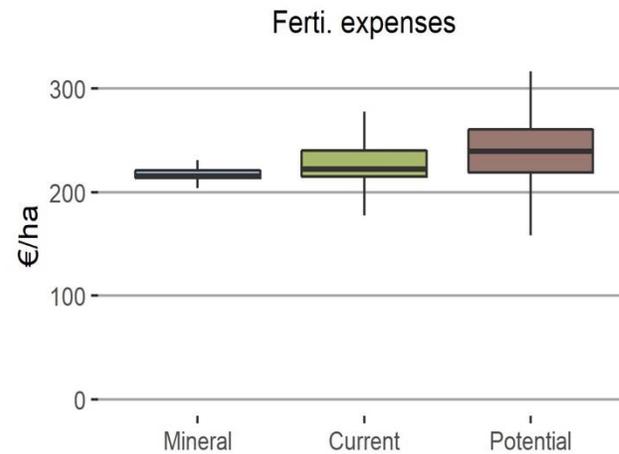
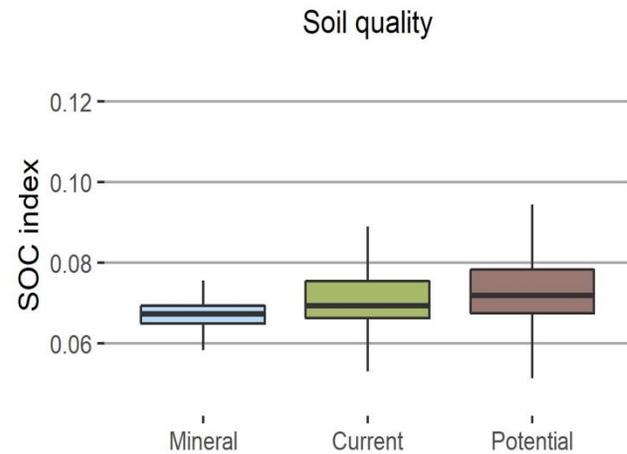
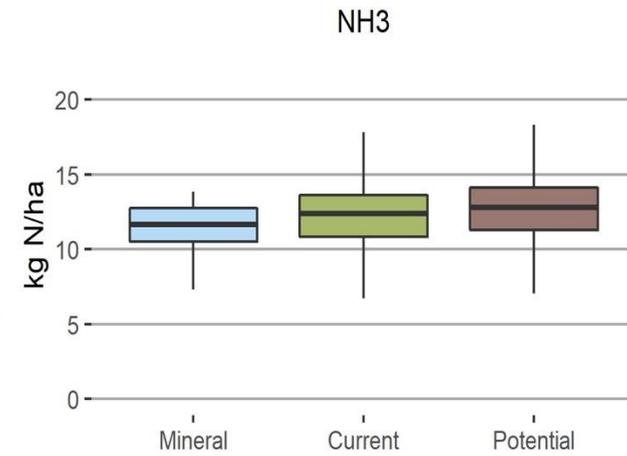
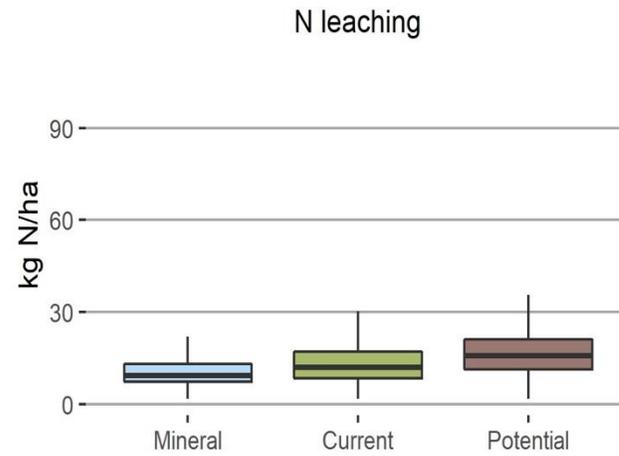
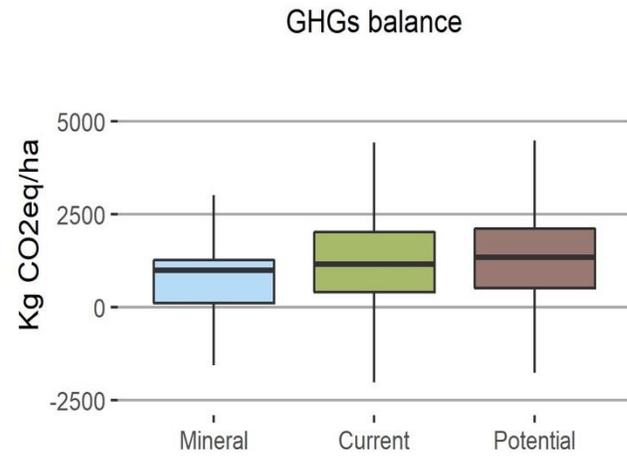
- Monoculture de maïs
- Peu de PRO, peu d'élevage



Exemple de résultats



Evaluation globale des scénarios



Misslin et al. submitted



Une constante dans les résultats : variabilité entre cas d'étude et situations d'action

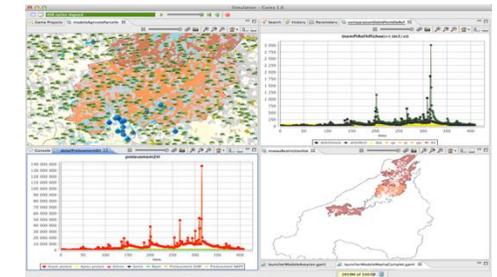
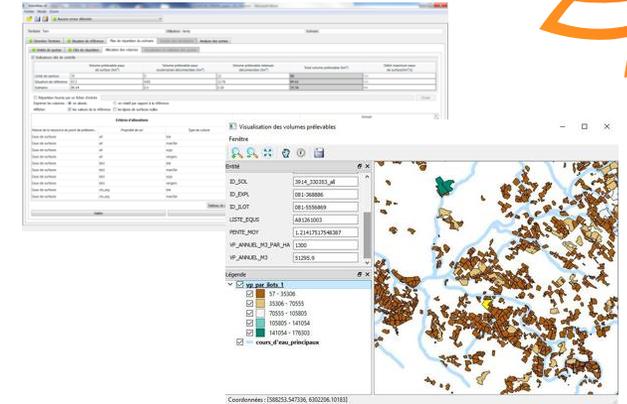
→ Confirme le besoin d'approches territoriales fines

→ Besoin d'une diversité de cas d'étude pour monter en genericité



MAELIA : différentes utilisations

- **Outils expert** pour gestionnaires et bureau d'étude
→ ingénieurs transfert MAELIA 3 ans chez ARVALIS et CACG
- **Développement d'outils/services** pour les gestionnaires de l'eau
→ projet CASDAR pour développement interfaces, procédures d'utilisation, bases de paramètres
- **Recherche en laboratoire** : une plateforme « d'expérimentations virtuelles » pour analyser les interactions agriculture-eau
→ publications
- **Recherche intervention** : équiper les acteurs pour penser de nouvelles organisations territoriales/fonctionnement du SSE



→ Thèses C. Murgue 2011-2014, Sandrine Allain