

# L'Evaluation intégrée pour la gestion des aires de captage d'eau potable sujettes à la pollution par les pesticides

**Françoise Vernier, Odile Leccia, Jean-Marie Lescot**

Irstea, UR ETBX, 50 Avenue de Verdun, F-33612 Cestas cedex, France

45<sup>ème</sup> congrès du Groupe Français des Pesticides,  
27-29 mai 2015, Versailles

Session 5: Approches innovantes en modélisation du devenir et des effets des pesticides



[www.irstea.fr](http://www.irstea.fr)



# Contexte

## Captages de Coulonge-Saint Hippolyte (Charente Maritime)

### Captages prioritaires pollutions diffuses

Bon état écologique des masses d'eau exigé par la Directive-Cadre Européenne sur l'eau (2000/60/CE). Programme Ecophyto 2018. Programme Grenelle 2,

- Problèmes hydro-morphologiques et de gestion d'étiage
- Qualité de l'eau (nitrates et pesticides ) des nappes et eaux superficielles

Scénarios agro-environnementaux pertinents pour atteindre dans les délais impartis > bon état écologique

Mieux comprendre les relations pressions agricoles-impact sur la qualité des eaux.

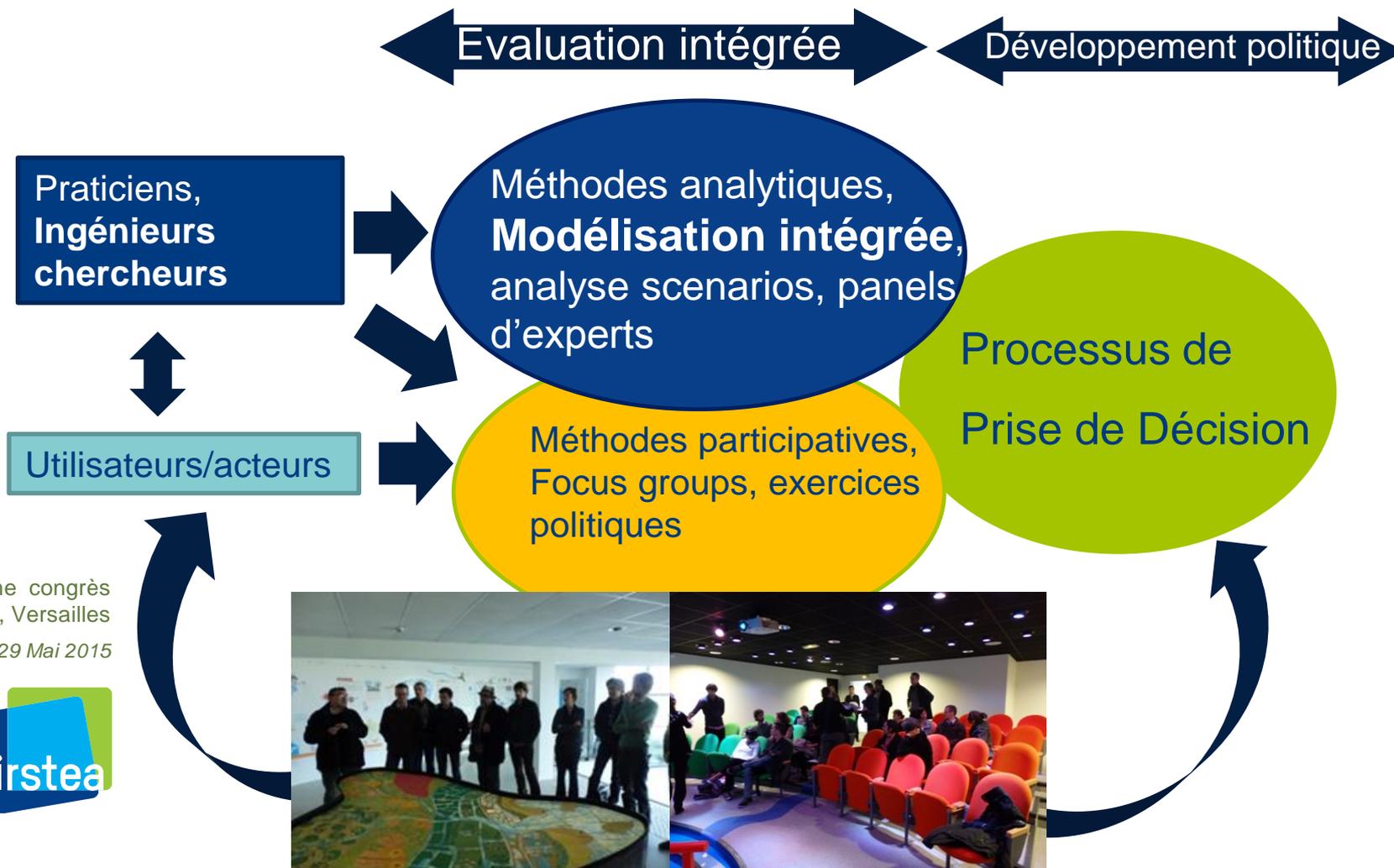
45ème congrès  
GFP, Versailles

27-29 Mai 2015



# Cadre de l'évaluation intégrée (Integrated assessment)

(O Callaghan, 1996; Lacroix 2006, Volk et al. 2008; Jakeman et al. 2003)



45ème congrès  
GFP, Versailles  
27-29 Mai 2015

# Démarche générale

Evaluation par modélisation intégrée des effets de trajectoires d'évolution de l'agriculture traduits en scénarios sous différentes contraintes environnementales, économiques et réglementaires

## Modélisation des systèmes agricoles et définition de scénarios spatialisés

(Mesures Agro-environnementales spatialisées)

Gestionnaires  
locaux

Modèle  
MARTHE  
(BRGM)  
ESO- Nitrates  
BV Boutonne

Modèle Bio-  
économique  
PM GAMS  
(niveau HRU)

Modèle agro environnemental  
SWAT (Soil and Water Assessment Tool)  
Usage du sol et pratiques  
niveau HRU (Unite de Réponse  
Hydrologique )

Indicateurs agri-  
environnementaux  
IFT (H et HH), PREMA (pression MA),  
ARTHUR et indicateur composite  
(Usage du sol, rotations et pratiques,  
unité spatiale de référence identique)

Evaluation des coûts  
directs de mise en place  
des mesures

Evaluation de l'Efficacité environnementale  
**Pression, risque potentiel (Indicateurs)**  
Réduction des concentrations (SWAT)  
Confrontation modèle / indicateurs

Analyse Cout-Efficacité distribuée  
Apport des modèles ESO/ESU

Choix et localisation des mesures  
Vers un transfert des méthodes et outils

45ème congrès  
GFP, Versailles  
27-29 Mai 2015

irstea

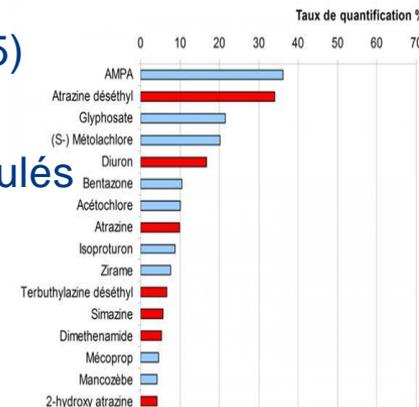
# Différentes étapes (1)

## Calcul des indicateurs programmes R pour

- **Déterminer la succession culturale** sur six années pour chaque îlot à partir des **rotations-types** affectées à chaque îlot
- **Calculer différents indicateurs** pour chaque année de la succession et pour chaque îlot
- **Agréger des indicateurs à l'îlot** (moyenne sur les six années), au sous Bassin Versant et au Bassin Versant (possibilité de calculer à un niveau regroupant plusieurs SBV)

## Simulation des transferts et devenir de 10 molécules « traceurs » et de l'azote

- Importation des **données de pratiques agricoles** (types définies précédemment), dans SWAT avec l'application **GenLU2**
- **Calibration des débits** (2006-2012) et **validation** (2000-2005)
- **Calibration des paramètres de qualité**
- Résultats obtenus : **Débits, concentrations, rendements simulés**



taux de quantification des 16 principaux produits phytosanitaires dans les eaux de surface de Poitou-Charentes en 2006-2010 (Données : Agences de l'Eau)

## Différentes étapes (2)

### Simulation des coûts des scénarios

- Calcul des coûts de production à partir des itinéraires techniques
- Développement d'un modèle bioéconomique avec pris en compte du risque (Programmation mathématique, GAMS)
- Calcul des coûts marginaux (échelle HRU) et coûts totaux des scénarios sous bassin, Bassin)

### Entrepôt de données

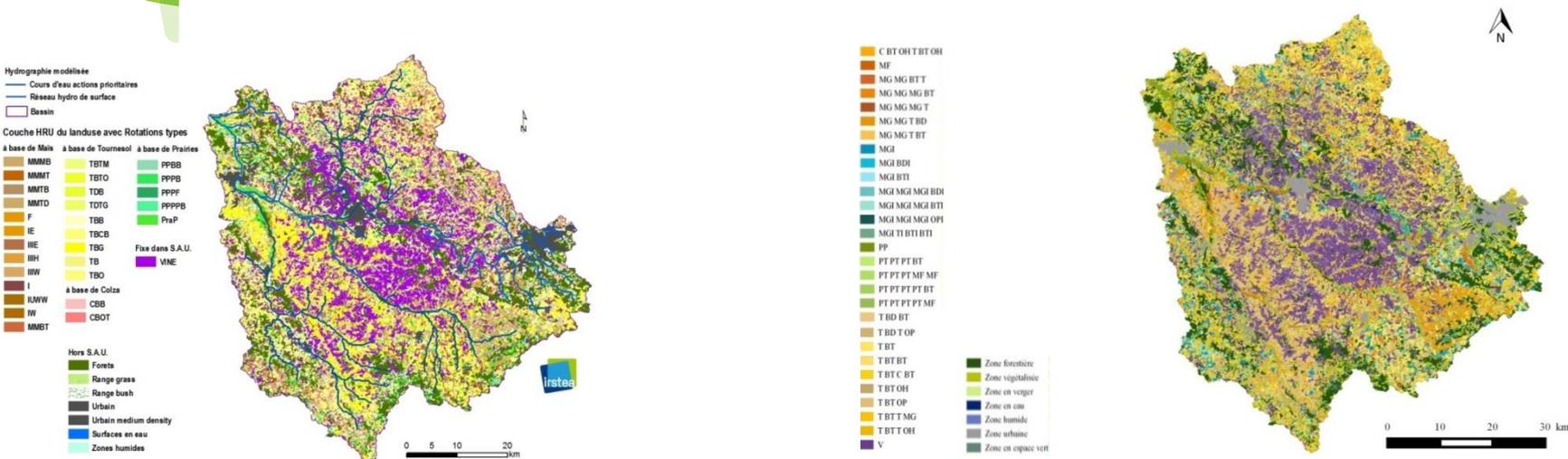
45ème congrès  
GFP, Versailles  
27-29 Mai 2015





# Données d'entrée pour les différentes étapes

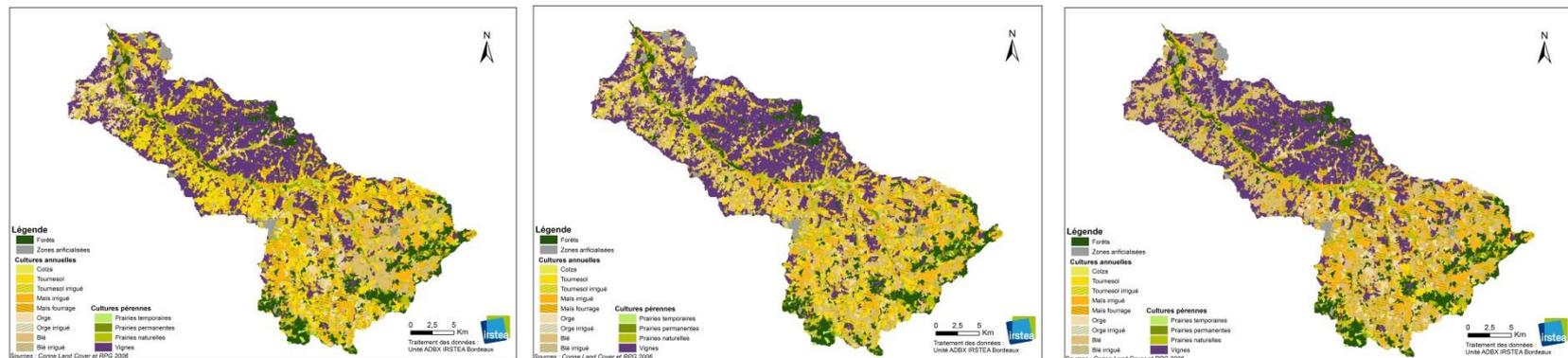
Base de données communes et Simulation du scénario de référence



Rotations simulées par SWAT-GenLU2 (3659 HRU définies) -s0

Rotations types affectées aux ilots - s0

## Occupation du sol scénario de référence



Modélisation SWAT/GENLU

Indicateurs

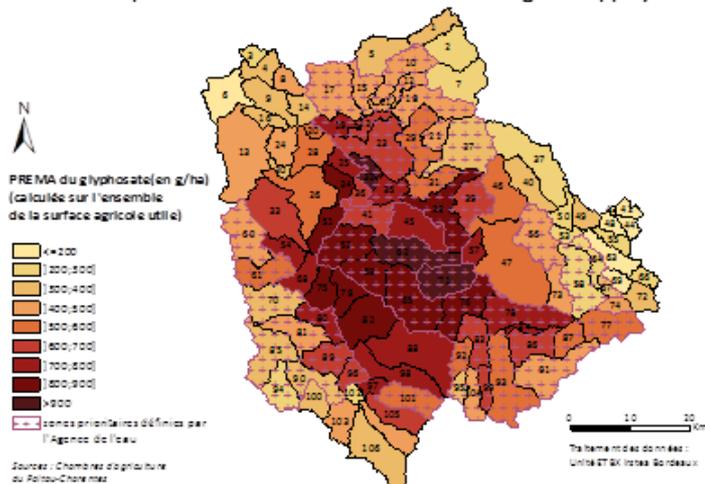
modèle Bio-économique

45ème congrès  
GFP, Versailles  
27-29 Mai 2015

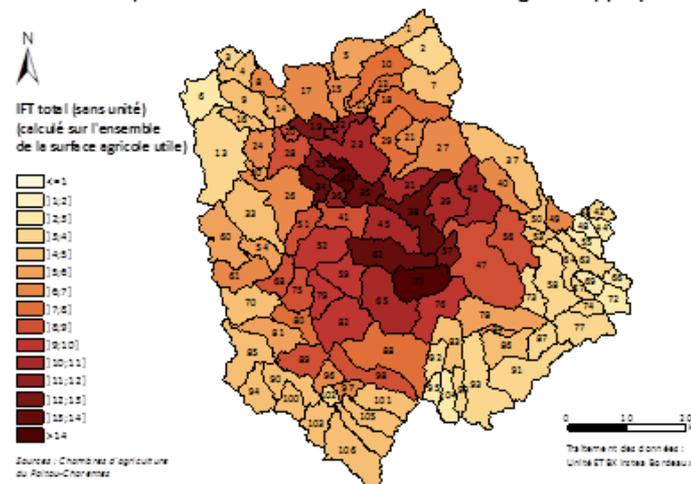


# Indicateurs environnementaux spatialisés

50-BIS Pression par matière active (PREMA) du glyphosate par sous-bassin versant sur l'AAC Coulonge-St-Hippolyte



50-BIS Indice de fréquence de traitement (IFT) total par sous-bassin versant sur l'AAC Coulonge-St-Hippolyte



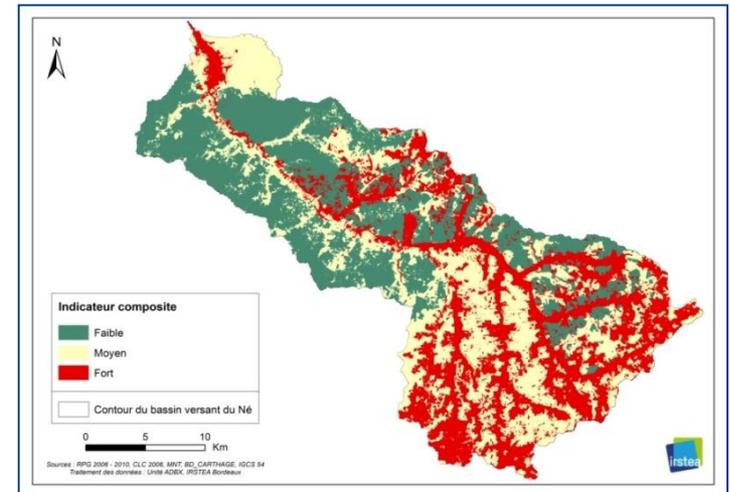
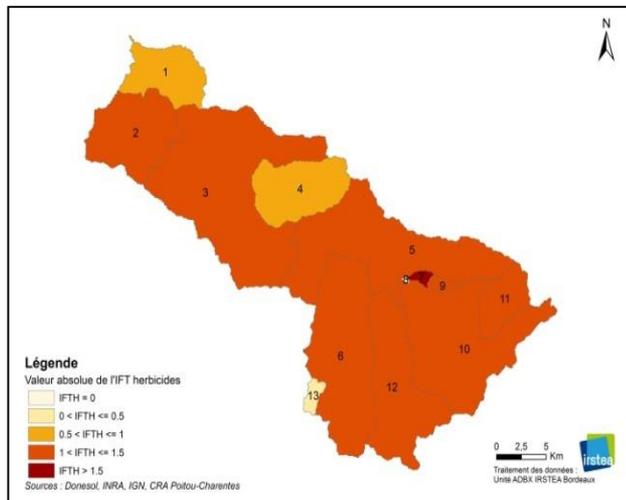
Dans le cadre de l'appui au programme BAC Coulonges, plusieurs indicateurs sont calculés :

- Les **IFT** (total, herbicide, non herbicide) à l'échelle de l'ilot agricole puis agrégés à l'échelle du **sous-bassin versant** pour confrontation aux modèles
- Un indicateur « azote » **SystN**
- Des **indicateurs de pression** pour chaque molécule modélisée

# Indicateurs de risque potentiel de transfert à l'échelle du territoire

Absence d'indicateur, mobilisable de manière institutionnelle, qui combine **vulnérabilité et pression** à l'échelle du **sous-bassin versant**

Passer des **indicateurs de pression** (IFT herbicide) à une combinaison de la **pression** et de la **vulnérabilité** du milieu pour un **meilleur ciblage des actions**



Atouts potentiels mais difficultés de mise en œuvre de ces indicateurs (Vernier et al, 2014, Minette, 2007).

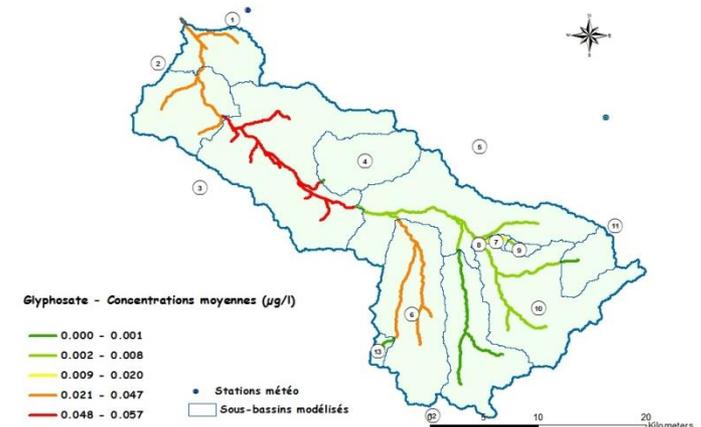
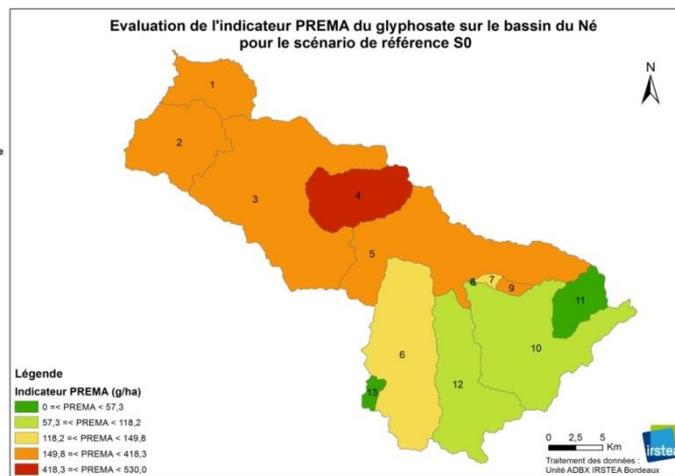
# Intégrer le résultat de simulations comme des "indicateurs"

L'attente des acteurs est de pouvoir **évaluer l'impact de changement de systèmes** et de **pratiques** jusqu'au **transfert** dans les cours d'eau

Problèmes :

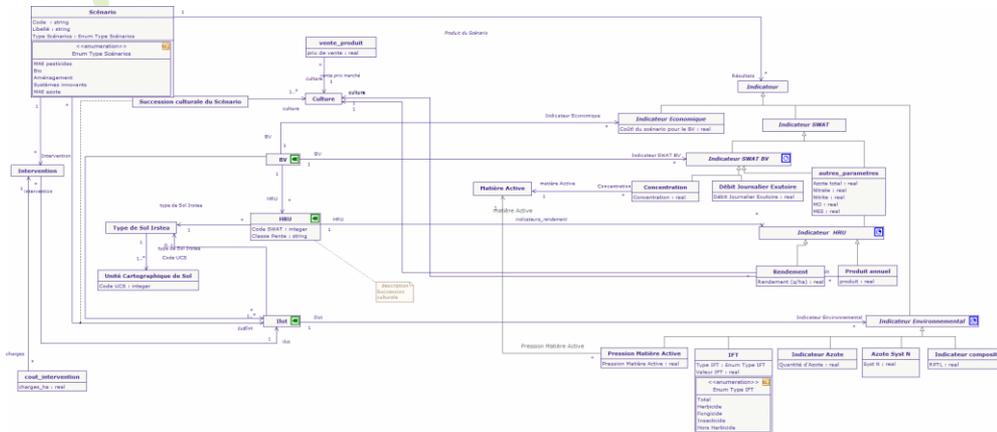
**Calage** et **fiabilité** de ces **modèles**, appropriation par les acteurs, comment les intégrer dans le système d'information : à quel pas temporel et spatial ?

Comment les confronter aux **mesures de monitoring** et aussi aux **pressions agricoles** ?



# Construction du SI et de l'entrepôt de données

Première version en cours



Zone prioritaire

BV

SBV

Production et  
Agrégation  
des résultats  
des scénarios  
aux échelles  
spatiales

HRU

ilot

Identifier l'**information pertinente** pour chaque scénario

Identifier les **résultats produits** pour chaque scénario (hors calcul ou agrégation)

**Organiser l'information**

Définir des axes d'analyse et les **restitutions** souhaitées aux différentes échelles

**Echanges avec les acteurs locaux et futurs usagers**

SOLAP (Spatial Online Analytical Processing)

Outils d'exploitation d'entrepôts de données combinant OLAP et fonctionnalités géospaciales

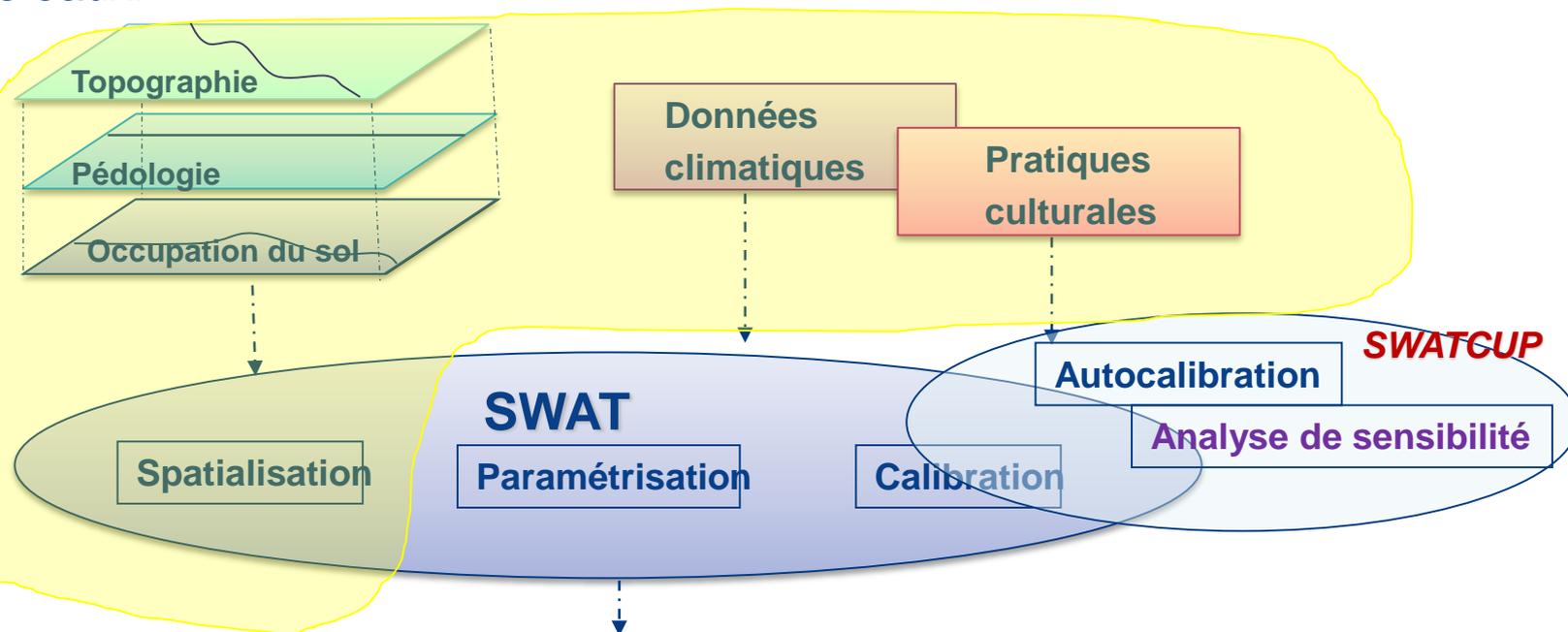
MAP4Decision cartographie

# Simulation des transferts

**Calage par les débits journaliers** pour l'ensemble du BV et pour les sous BV dont l'exutoire correspond à des stations de mesures (avec données validées et exhaustives)

## Nouvelles simulations

**Analyse critique /concentrations** mesurées en Nitrate et Pesticides dans les eaux.



45ème congrès  
GFP, Versailles  
27-29 Mai 2015

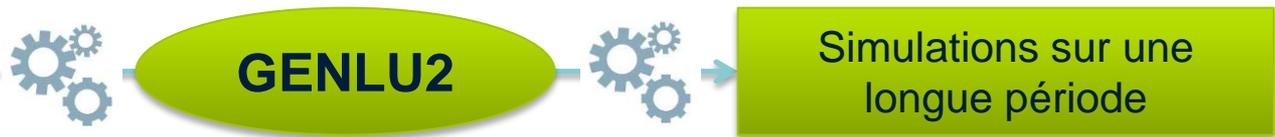


Données de sortie

Données sur les nutriments, l'eau, les matières en suspension, les produits phytosanitaires dans les sols, les nappes et les rivières

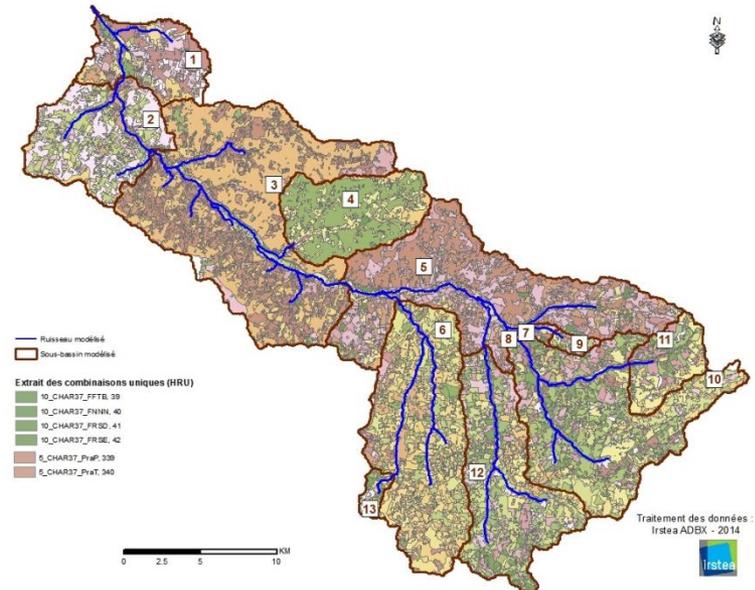
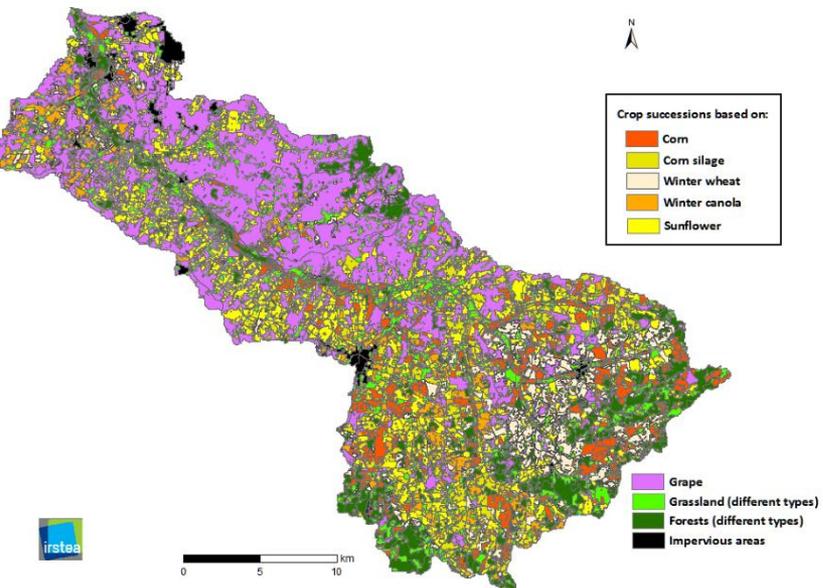
# Données d'entrée pour les différentes étapes

Sols	Rotations-types non irriguées	Rotations-types irriguées
Grèzes superficielles	colza - bléT - bléT	maïsG - maïsG - maïsG
	colza - bléT - tournesol - bléT	maïsG - maïsG - bléT
	tournesol - bléT - orge four	
	tournesol - bléT - tournesol - bléT	
Grèzes moyennes à profondes	tournesol - bléT - tournesol - bléT	maïsG - maïsG - maïsG
	tournesol - bléT - colza - bléT	maïsG - maïsG - bléT
	colza - bléT - orgeT - tournesol - bléT - orgeT	
	tournesol - bléT - bléT	
Grèzes marneuses	tournesol - bléT - tournesol - bléT	maïsG - maïsG - maïsG - bléT
	colza - bléT - orgeT - tournesol - bléT - orgeT	maïsG - maïsG - maïsG
	tournesol - bléT - bléT	maïsG - bléT - bléT - bléT
	colza - bléT - tournesol - bléT	maïsG - maïsG - maïsG
Sols battants des plateaux limousins = "Bocules limousines" = "Bocules angevines" = "Bocules angevines hydromorphes"	Prairie perm.	maïsG - maïsG - maïsG
	tournesol - bléT - tournesol - bléT	maïsG - bléT - maïsG - bléT
	Prairie temp. (6 ans) - bléT	maïsG - maïsG - maïsG - bléT
	tournesol - bléT - colza - bléT	
Terres de champagnes superficielles	Vignes	maïsG - maïsG - orgeP
	tournesol - bléT - tournesol - bléT	maïsG - maïsG - maïsG - bléD
Terres de champagnes moyennes à profondes	tournesol - bléT - orge P	maïsG - maïsG - maïsG
	maïs - maïs - tournesol - bléD	maïsG - bléD - maïsG - bléD
Vallées et marais Terreuses	tournesol - bléT - bléT	
	PrairieP	maïsG - maïsG - maïsG
Collines et plateaux des massifs anciens	maïs four - maïs four	maïsG - bléT - maïsG - bléT
	Prairie temp. (6 ans) - maïs four	maïsG - maïsG - maïs
Doucins sableux	Forêt	maïsG - maïsG - maïs
	Vignes	maïsG - maïsG - bléT
	PrairieP	
	tournesol - bléT - tournesol - bléT	
	Prairie temp. (6 ans) - bléT	



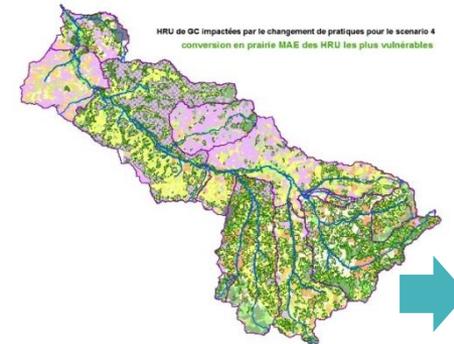
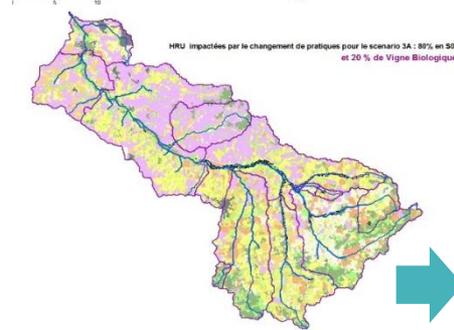
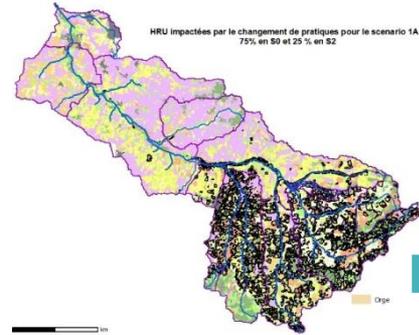
Fichier pratiques par scénario

Affectation des rotations et pratiques à la HRU



# scénarios (0,1,...n)

Scénario	Description du scénario	Pourcentage d'application
S0	Scénario initial et de référence, efficacité des pratiques agricoles et simulation de l'occupation agricole du Bassin Versant du Né	100% du Bassin Versant
S9	Scénario considérant des conditions extrêmes, et donc des pratiques intensives	100% du Bassin Versant
S1A	Combinaison des scénarios S0 et S2	75% de la SAU en S0 et 25% en S2 (25% des Grandes Cultures et 25% des Vignes)
S2	Prise en compte des MAET FERTI_01-PHYTO_04 pour les Grandes Cultures et PHYTO_04 et phyto_10 pour la vigne	100% du Bassin Versant
S3	S3A Conversion d'une partie des surfaces de Vigne (Conventionnel ou MAET) en Vigne Biologique	20% des vignes en Vigne Biologique, 80% en S0 (Vigne Conventionnel) Grandes Cultures en S0
	S3B	20% des vignes en Vigne Biologique, 80% en S2 (Vigne MAET) Grandes Cultures en S2
S4	Conversion des surfaces en grandes cultures au bord des cours d'eau en prairies temporaires sous cahier des charges MAET	100% des surfaces en Grandes Cultures situées à moins de 20 mètres des cours d'eau, le reste en S0



Calculs des Concentrations moyennes sur les 10 dernières années de simulation

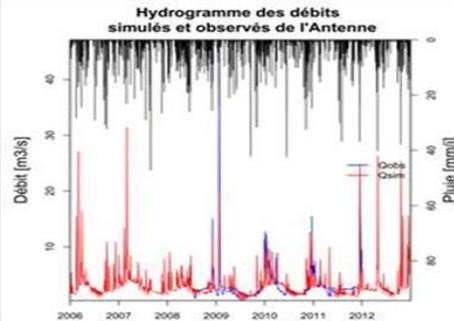
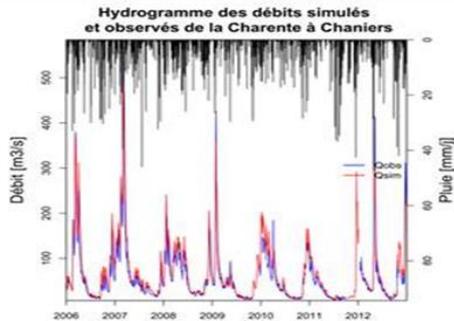
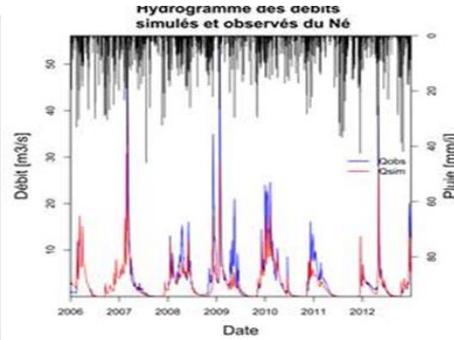
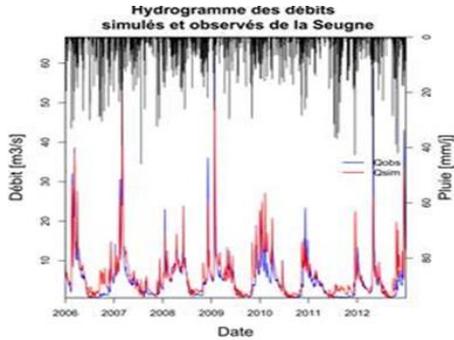
Efficacité du scénario pour réduire les concentrations par rapport au scénario de référence  
 - par molécule,  
 - à l'échelle sous bassin et bassin

+ scénarios complémentaires sur l'AAC

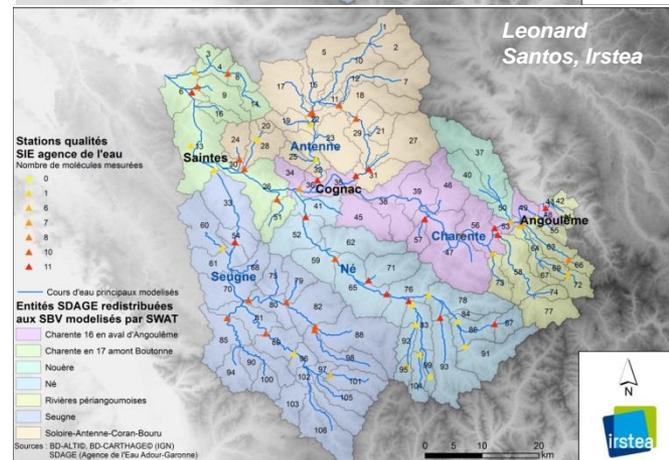
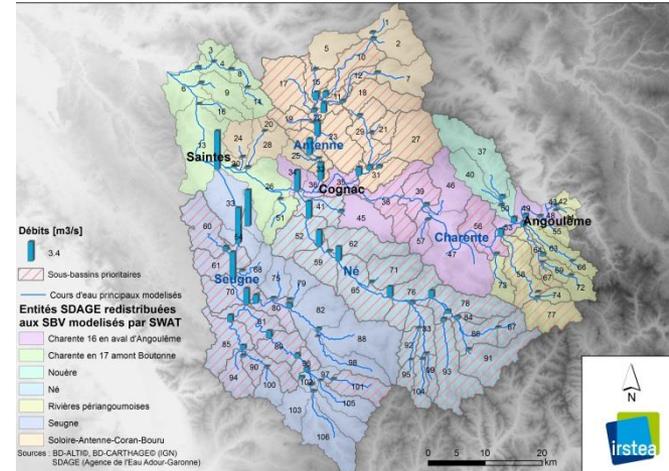
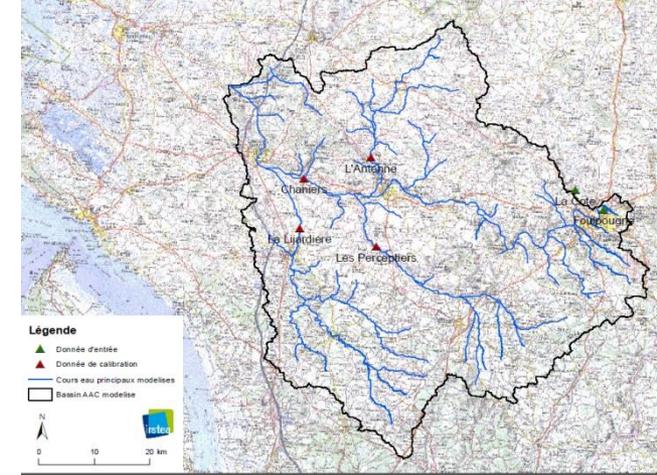
Spatialisation des successions culturales et pratiques associées.



# Calibration et validation



Station hydrométrique	Nash des logs des débits	Nash des débits naturels
Antenne (St-Sulpice-de-Cognac)	0.334	0.428
Charente (Chaniers)	0.849	0.671
Né (Salles-d'Angles)	0.838	0.728
Seugne (St-Seurin-de-Palenne)	0.699	0.742



45ème congrès  
GFP, Versailles

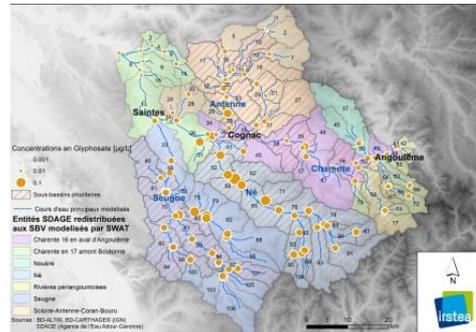
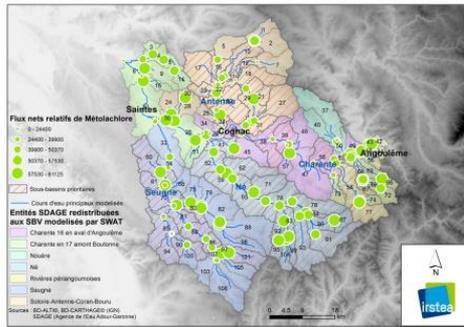
27-29 Mai 2015



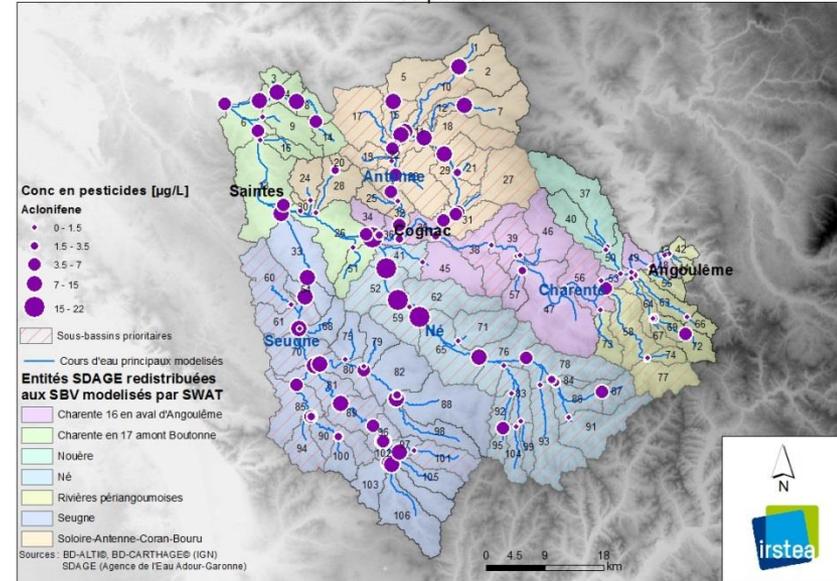
Pour les débits, mesures en continu: Calibration et validation

Pour les concentrations: Confrontation aux mesures ponctuelles de qualité

# Flux et concentrations simulés

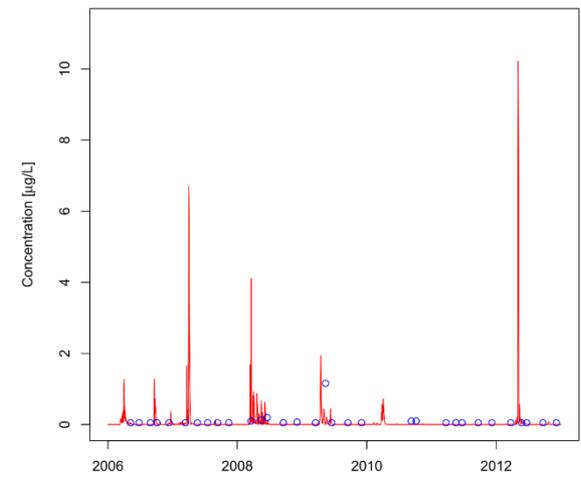
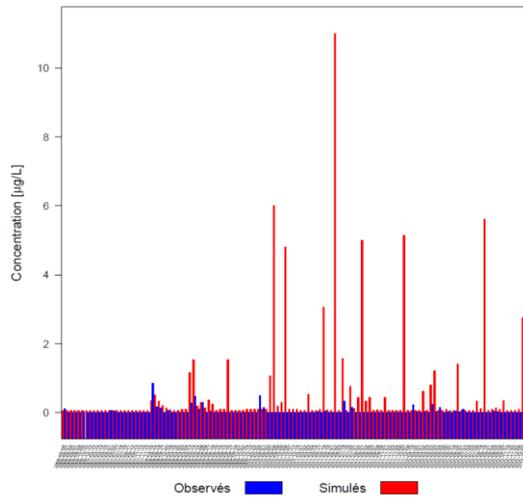


Répartition des concentrations maximales en Aclonifène simulées par SWAT



Analyse des sorties en cours. Calibration PEST, Leonard Santos, Irstea

Différences entre concentrations observées et simulées en Glyphosate



Date SBV Né exutoire sbv 52

Chroniques concentrations simulées/valeurs mesurées à l'exutoire

45ème congrès  
GFP, Versailles  
27-29 Mai 2015



# HRU: maille commune à SWAT et au modèle Bio-économique

```

EXECUTION TIME = 0.452 SECONDS 12 MB 24.2.3 r46072 WEX-WEI
GAMS 24.2.3 r46072 Released May 22, 2014 WEX-WEI x86_64/MS
A concept model for crop farm adopting environmental friendl
Solution Report SOLVE MODCHARM_SO Using MIP From line 72

      SOLVE      SUMMARY
MODEL  MODCHARM_SO      OBJECTIVE vZBV
TYPE   MIP              DIRECTION MAXIMIZE
SOLVER CPLEX           FROM LINE 719

**** SOLVER STATUS      1 Normal Completion
**** MODEL STATUS      1 Optimal
**** OBJECTIVE VALUE    163487019.3640

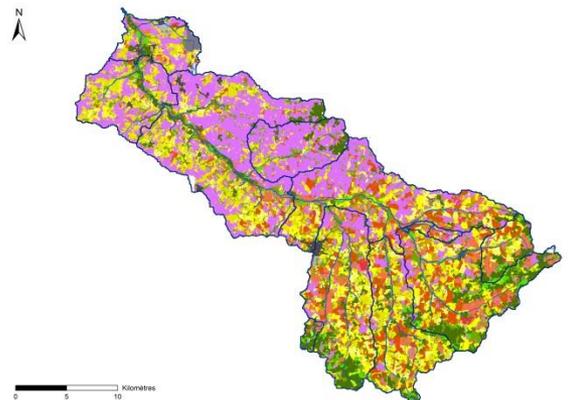
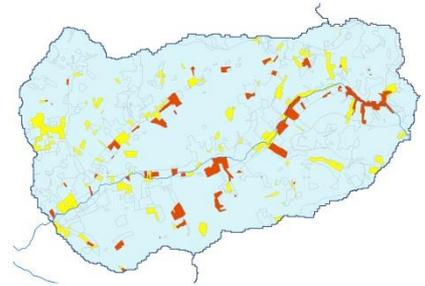
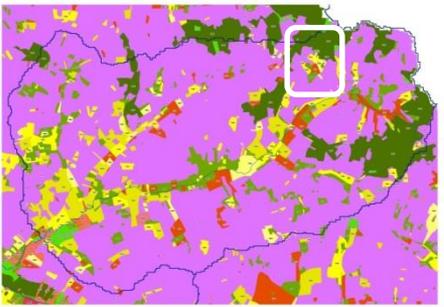
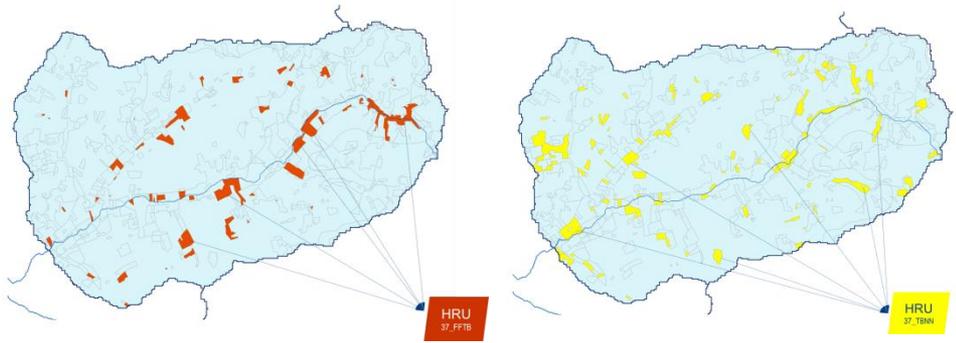
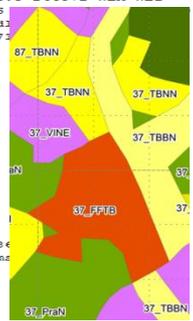
RESOURCE USAGE, LIMIT      0.312 1000.000
ITERATION COUNT, LIMIT    0 2000000000

IBM ILOG CPLEX 24.2.3 r46072 Released May 22, 2014 WEI x86
--- GAMS/Cplex licensed for continuous and discrete problems
Cplex 12.6.0.0

Space for names approximately 0.67 Mb
Use option 'names no' to turn use of names off
LP status(1): optimal
Cplex Time: 0.09sec (det. 11.98 s)
Optimal solution found.
Objective : 163487019.363984

**** REPORT SUMMARY :
0
0 IN
0 U
GAMS 24.2.3 r46072 Released May
A concept model for crop farm ad
E x e c u t i o n

----- 742 PARAMETER Landuse_Hru
      MAIS1      MAIS2
10026
10027
10028
10031
10032
10040      3.501
10041
    
```



45ème congrès  
GFP, Versailles  
27-29 Mai 2015





# Methode de calcul des coûts des scénarios

MAXIMISER

$E(MB)_{HRU, \text{scenario 0}}$

+

$E(MB)_{HRU, \text{scenario 1}}$

+

$Incitation_{\text{scenario 1}}$

Coût marginal de la mesure  $C'$   
Surface optimale avec mesure  $X^*$

$$\left[ inc_{Sx} \times X_{Sx, hru} - C_{Sx, hru} (X_{Sx, hru}) \right]$$

$$\frac{\partial (inc_{Sx} \times X_{Sx, hru} - C_{Sx, hru} (X_{Sx, hru}))}{\partial X_{Sx, hru}} = \left[ -C'_{Sx, hru} (X^*_{Sx, hru}) + inc_{Sx} \right] = 0$$

Intégration des coûts marginaux par sous-bassin

COÛT TOTAL annuel du scénario par sous bassin et Bassin versant

COÛT TOTAL du scénario = Somme actualisée des CT annuels sur la période de simulation

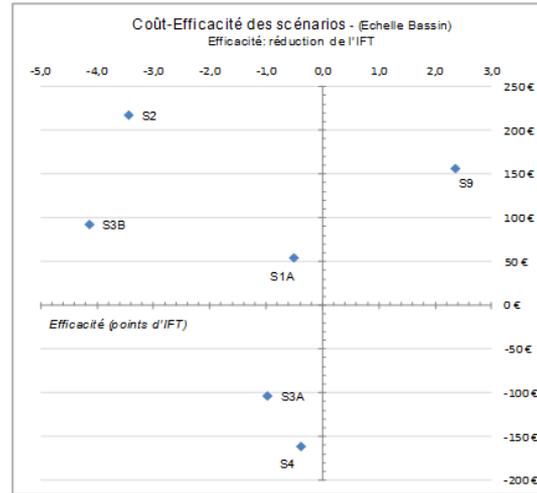
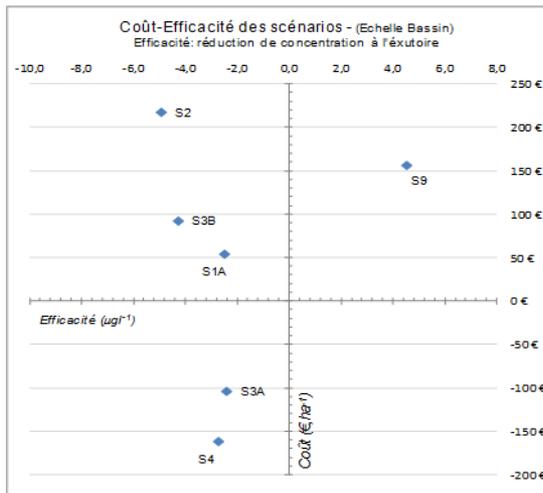
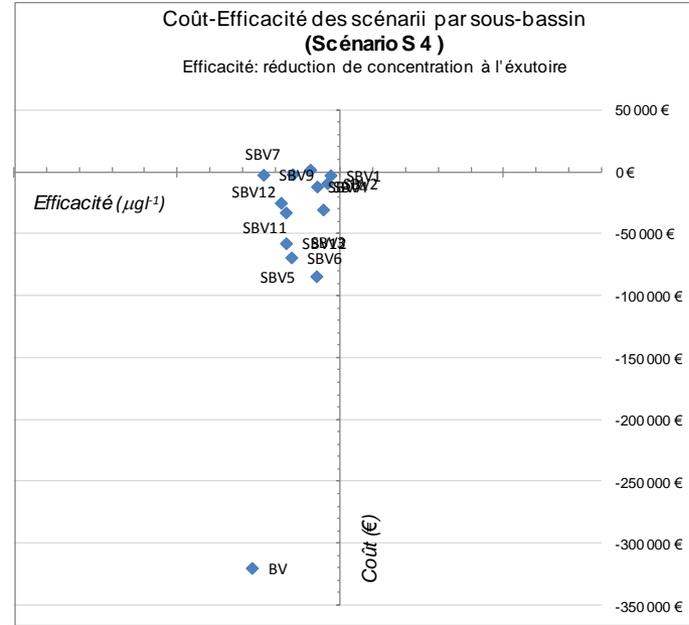
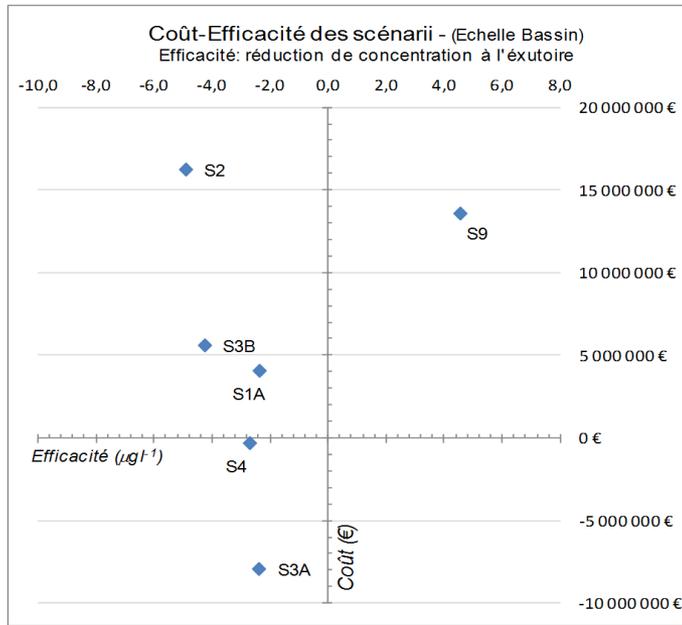
$$CT = \sum_{t=1}^T C_{tBV} \times (1+r)^{-t}$$

$CT$ : Coût total

$C_{tBV}$ : Coût annuel (€);  $t$ : années de la période de simulation;  $r$ : taux d'actualisation.

Analyse COÛT-EFFICACITE du scénario

# Analyse Coût-Efficacité spatialisée



Scénario	Description du scénario	Pourcentage d'application
S0	Scénario initial et de référence, efficience des pratiques agricoles et simulation de l'occupation agricole du Bassin Versant du Né	100% du Bassin Versant
S9	Scénario considérant des conditions extrêmes, et donc des pratiques intensives	100% du Bassin Versant
S1A	Combinaison des scénarios S0 et S2	75% de la SAU en S0 et 25% en S2 (25% des Grandes Cultures et 25% des Vignes)
S2	Prise en compte des MAET FERTL_01-PHYTO_04 pour les Grandes Cultures et PHYTO_04 et phyto_10 pour la vigne	100% du Bassin Versant
S3	S3A	20% des vignes en Vigne Biologique, 80% en S0 (Vigne Conventionnel)
	S3B	20% des vignes en Vigne Biologique, 80% en S2 (Vigne MAET)
S4	Conversion des surfaces en grandes cultures au bord des cours d'eau en prairies temporaires, sous cahier des charges MAET	100% des surfaces en Grandes Cultures situées à moins de 20 mètres des cours d'eau, le reste en S0

45ème congrès  
GFP, Versailles  
27-29 Mai 2015



# Conclusions et perspectives

**Développement méthodologique** (GENLU, chaînes de calcul R, modèle PM Gams) qui permet une bonne intégration des données et des échelles et la prise en compte dynamique de l'agriculture.

**Appréciation globale du cout-efficacité de chaque scénario** à l'ensemble du bassin proches entre indicateurs et SWAT (à confirmer)

**Coûts et efficacités entre scénarios** varient entre **sous-bassin versants**.

## Perspectives

Portabilité en cours de la méthode dans un **contexte d'appui à programme d'action AAC Grenelle (Projets Modchar – AEAG)** avec évaluation de scénarios à l'échelle de l'AAC (MAET, bio, systèmes innovants, bandes enherbées...)

**Retour vers les acteurs** (association préalable à la définition des scénarios)

**Echanges sur les résultats** : Confirmer/infirmier les résultats obtenus avec la réalité terrain, limites et discussion sur les travaux complémentaires à mener

**Mise en œuvre de programmes d'action**



45ème congrès  
GFP, Versailles  
27-29 Mai 2015



# Merci de votre attention

## POUR EN SAVOIR PLUS

VERNIER, F., BORDENAVE, P., CHAVENT, M., LECCIA, O., PETIT, K. - 2010. Modelling scenarios of agriculture changes on freshwater uses and water quality at a large watershed scale: the case of the Charente watershed (France). **International congress on environmental modeling and software** 05/07/2010-08/07/2010, Ottawa, CAN. 9 p. [ ]

VERNIER F., MIRALLES A., PETIT K., GOUY V., CARLUER N., PINET F (2012). EIS Pesticides: an Environmental Information System to characterize agricultural activities and calculate agro-environmental indicators at embedded watershed scales. **Agricultural Systems**.

LESCOT J.-M., ET AL. 2013 A spatially-distributed Cost-Effectiveness Analysis framework for controlling water pollution, **Environmental Modelling & Software** 41(0): 107-122.).

LESCOT, J.M., BORDENAVE, P., PETIT, K., LECCIA, O., SANCHEZ PEREZ, J.M., SAUVAGE, S., PROBST, J.L. (2011). Cost-effectiveness analysis for controlling water pollution by pesticides using SWAT and bio-economical modelling. **2011 International SWAT Conference Soil and Water Assessment Tool** 15/06/2011-17/06/2011, Toledo, ESP. 16 p.

