

Analyse des bilans normalisés

Comparaison statistique (Kruskal Wallis, seuil 5%) des bilans normalisés : $Bn_i = Mn_i / Jn_i$, pour chaque parcelle :

- Égalité du bilan normalisé entre les 3 années acceptée sur 43 parcelles (64 % de l'effectif) : $Bn_{2012} \sim Bn_{2013} \sim Bn_{2014}$,
et $Vp = \text{mean}(Bn_{2012}, Bn_{2013}, Bn_{2014})$
- Rejet de l'hypothèse d'égalité sur 24 parcelles :
 - Questionnement sur le calcul du Jn par STICS : analyse de sensibilité / suivi expérimental : *l'incertitude sur le calcul de Jn ne permet pas d'expliquer les différences S^* des valeurs de bilan normalisé sur ces parcelles.*
 - Questionnement du formalisme $Vp.Jn$, et introduction un terme supplémentaire d'Extra minéralisation (Em), t.q. : $Mh = Vp.Jn (+ Em)$



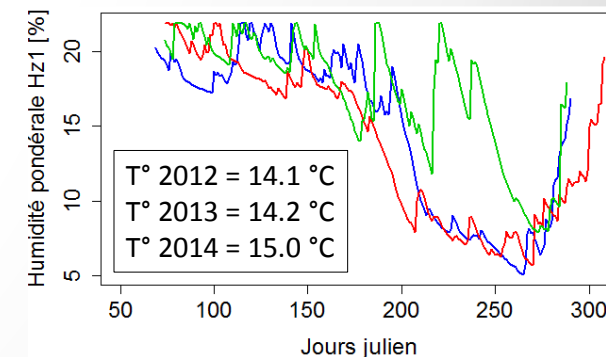
Ex de la parcelle 220100C

Parcelle 220100 C	2012	2013	2014
Bilan [kgN/ha]	128	161	149
Jn_STICS	118	112	169
Bilan normalisé [kgN/ha/Jn]	1.08	1.44	0.88
Jn 'théorique'	123	155	143

Inversion du classement du temps normalisé entre années entre 'Jn_STICS' et Jn 'théorique' :

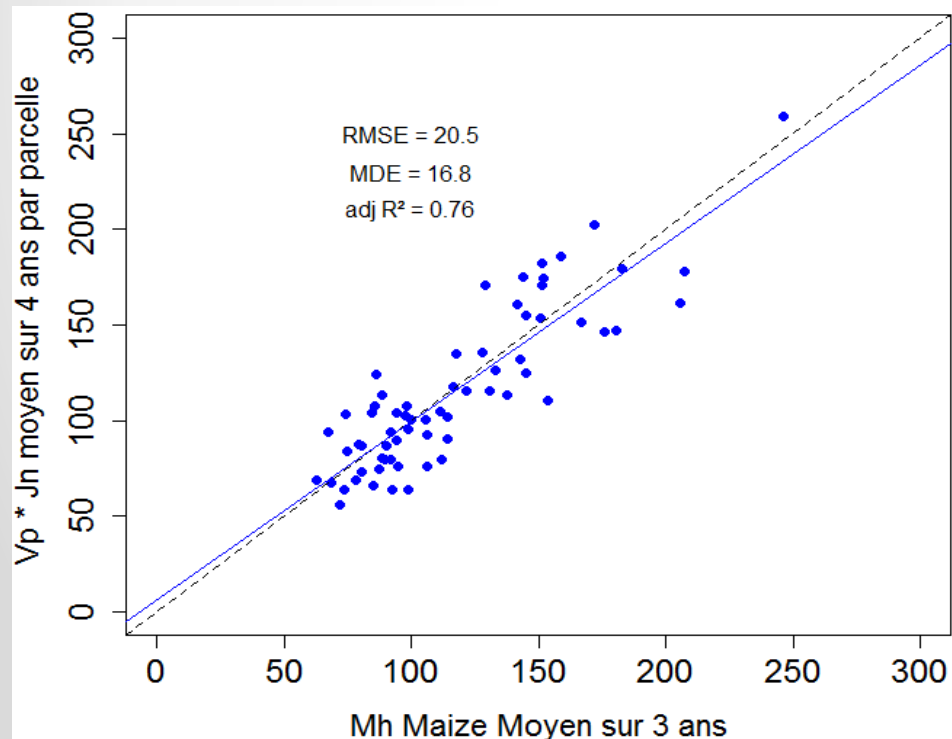
- Jn_STICS : 2012 \approx 2013 \ll 2014
- Jn 'théorique' : 2013 $>$ 2014 $>$ 2012

Impossible



Evaluation du formalisme simplifié Vp.Jn pour l'approche prédictive opérationnelle

- **Objectif du prescripteur :**
 - Donner la meilleure prédiction possible de la minéralisation pour la période pendant laquelle l'azote fourni par le sol peut être valorisé par la culture (Mh_maize)
 - Donner la meilleure prédiction possible, en moyenne, sur 3 ans, 5 ans... Critère pour une évaluation opérationnelle d'un modèle : moyenne sur 3 ans du flux Mh_Maize
- **Démarche :** évaluation de l'aptitude du formalisme simplifié : $Mh = Vp \cdot Jn$ à prédire la minéralisation moyenne du flux Mh_Maize . Jn considérés : moyenne des Jn par parcelle, pour les années 2011 à 2014

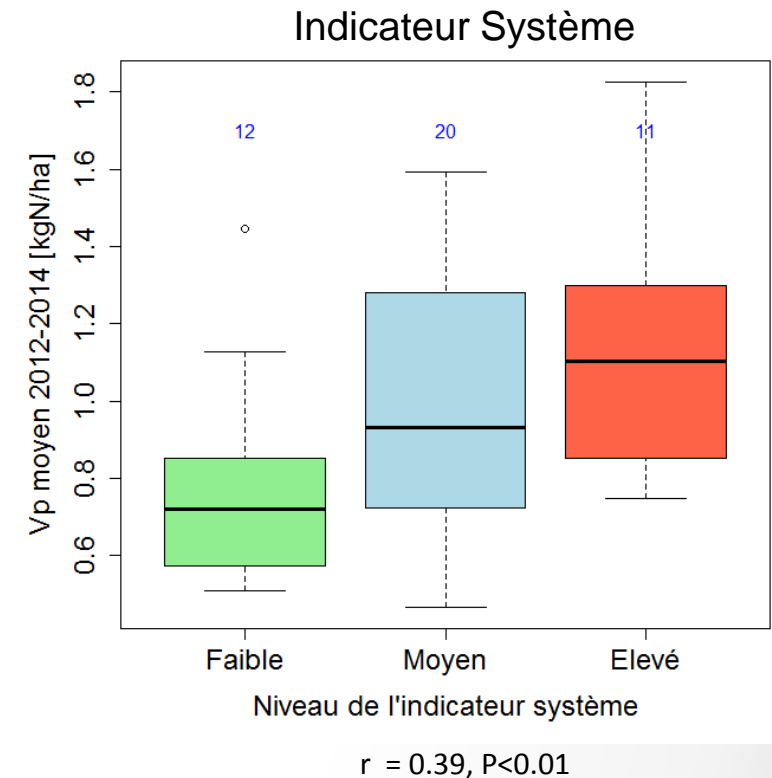
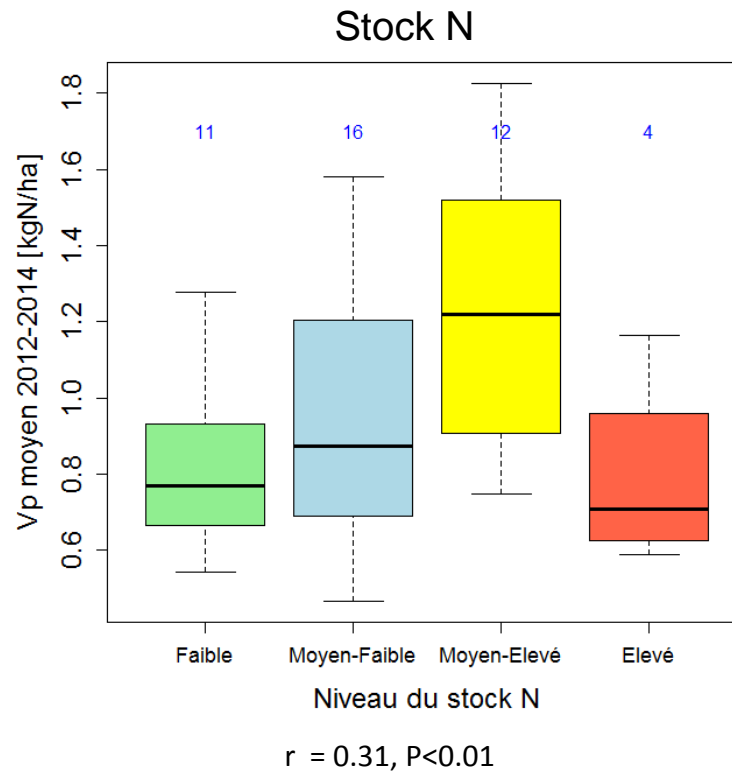
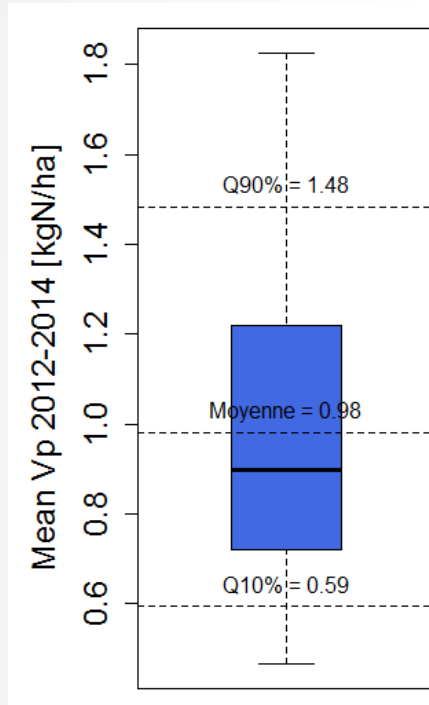


- Bonne prédiction de Mh_Maize (moyen sur 3 ans) avec le modèle 'Vp.Jn' (moyen sur 4 ans)
- 2 hypothèses pour l'expliquer :
 - Em se produit le plus souvent en fin de cycle et sur la période post absorption (flush automnal après la réhumectation des sols)
 - Em ne se produit pas chaque année, et se trouve donc "diluée" à l'échelle des 3 années.
- L'approche simplifiée de la minéralisation par la composante Vp.Jn peut être acceptée dans le cadre d'une approche opérationnelle.

Modélisation de Vp et variables explicatives ...

Gamme de variation de Vp et variables explicatives

$$Mh = Vp \cdot Jn$$



Niveaux de I Sys

Faible ≤ 62kgN/ha, **Moyen** : entre 62 et 107 kgN/ha, **Elevé** : > 107 kgN/ha

	Q10	Moyenne	Q90
Mh année (kg N/ha)	136	225	340
Mh utile maïs (kg N/ha)	83	137	207

Autres corrélations significatives avec la teneur en argiles (r = 0.37), la biomasse microbienne du sol (r = 0.45) et un indicateur de la minéralisation (APM) issu d'une extraction chimique (r = 0.48)



Prédiction de Vp à l'aide de plusieurs variables complémentaires

Méthode d'élaboration d'un modèle prédictif de V_p



Méthode Statistique GAM : Generalized Additive Model

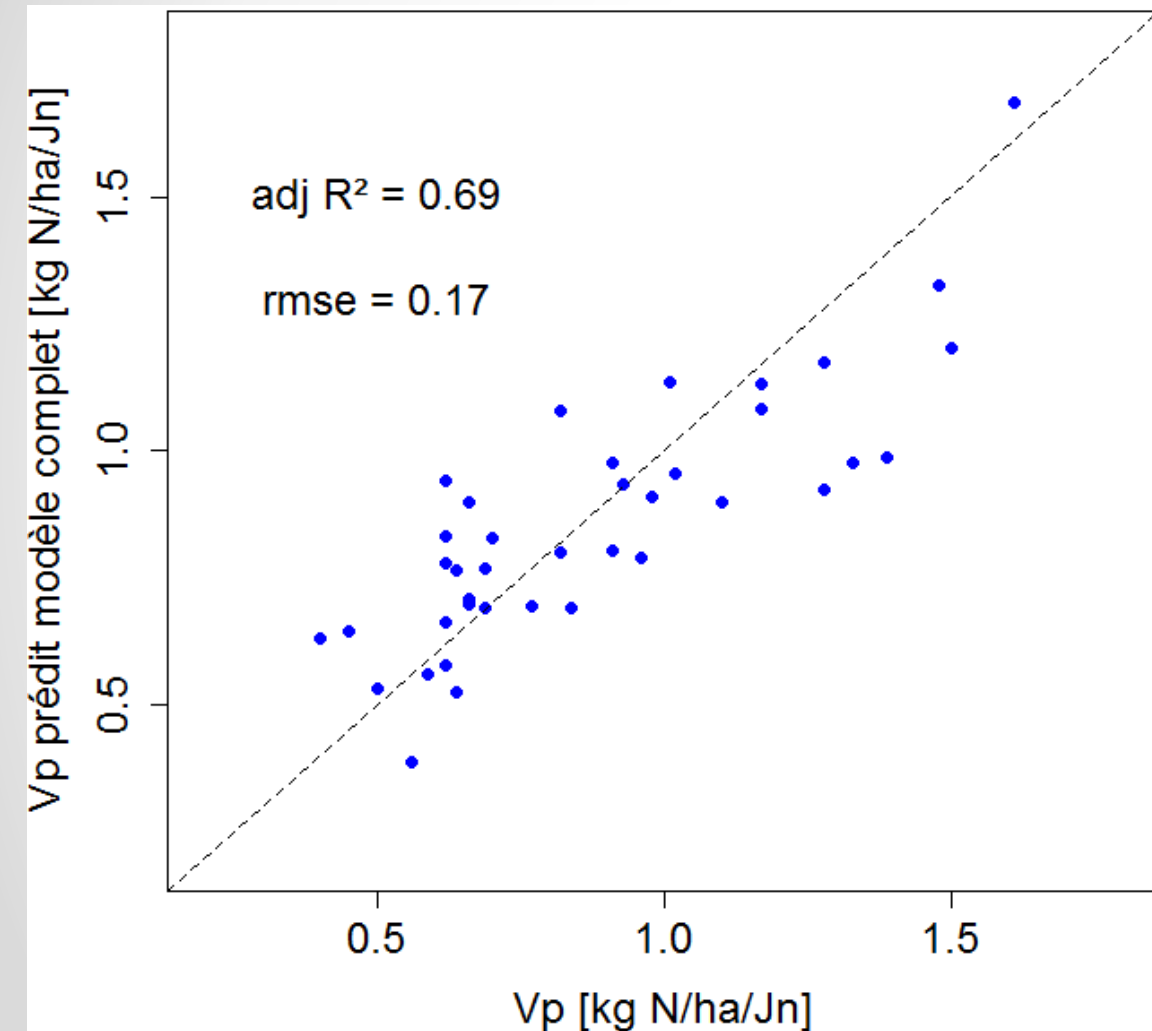
- Permet de créer un modèle additif (permet d'appréhender l'importance de chaque composante dans le modèle)
- Permet de considérer des réponses linéaires, carrées, cubiques, polynômiales...



Choix des variables et de leur forme par minimisation du MSEP (Mean Square Error of Prediction) : critère Statistique

- Evalue la qualité **prédictive** du modèle
- Méthode de validation interne du modèle
- Permet d'éviter le sur-ajustement du modèle aux données

Evaluation de la prédiction de Vp : modèle complet



- Ce modèle contient :

	Forme
Lf	Linéaire
Sf	Linéaire
CECsurArg	Polynôme de degré 2
POM gN	Linéaire
APM_kg_ha	Linéaire
Biom_kg_ha	Linéaire
I_Sys_V3	Linéaire

Propriétés des sols

Propriétés de la MO

Indicateurs de min

Indicateurs hist cult

- Bonne prédiction de Vp avec ce modèle
 - 44% des points à +/- 0.1 et 74% des points à +/- 0.2 kgN.ha⁻¹.Jn⁻¹

Dans une optique de prédiction...

- Le modèle complet requiert des propriétés des sols parfois difficiles à obtenir (i.e. Biomasse microbienne, fractionnement granulométrique de la MO...)
- Dans une optique de prédiction opérationnelle de Mh, nous avons réalisé d'autres modèles de prédiction :
 - un modèle contenant uniquement **l'indicateur système**, I_Sys (~BPR)
 - un modèle contenant uniquement des **propriétés des sols** relativement accessibles et **I_Sys** (Modèle Sol-I_Sys)
 - en ajoutant en plus un **indicateur de la minéralisation**

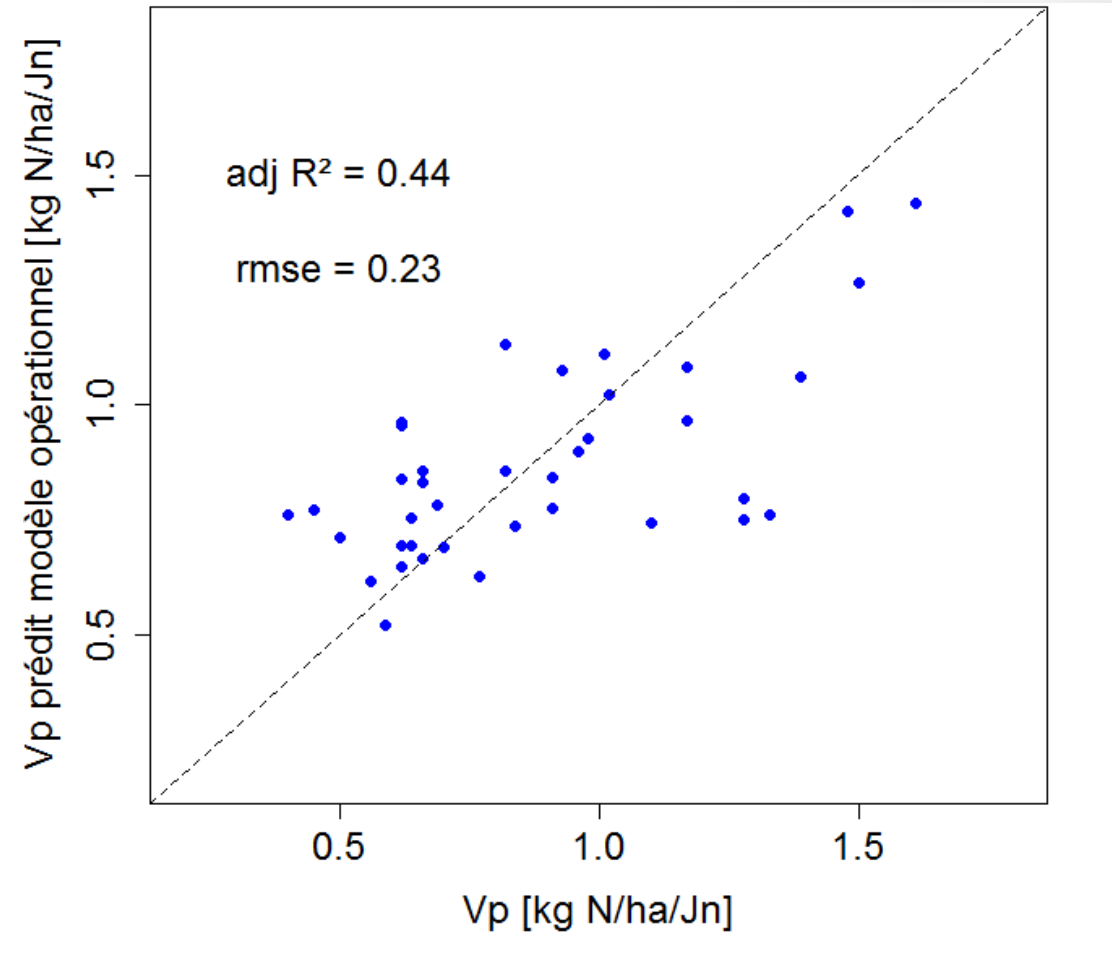
Comparaison des différents modèles de prédiction de Vp

Modèle	Variables	R ² ajusté	MSEP	RPIQ
I_Sys	I_Sys	0.16	0.074	1.51
Sol + I_Sys	I_Sys, Sf, Sg, C/N	0.34	0.065	1.61
Sol + I_Sys + APM	I_Sys, Sg, Ten_N, CEC/Arg, APM	0.5	0.049	1.86
Sol + I_Sys + Biom	I_Sys, Sg, C/N, Hcc, P Olsen, pH, Biom	0.6	0.044	1.96
Complet	I_Sys, Sf, Lf, CEC/Arg, POM_gN, APM, Biom	0.67	0.038	2.1

- ❖ **Modèle opérationnel : Sol + I_Sys + APM**
 - car APM est plus facile à mesurer que Biom et est relativement stable dans le temps
 - compromis entre facilité d'obtention des variables et qualité de prédiction

Evaluation de la prédiction de Vp : modèle opérationnel

- Ce modèle contient :
 - des propriétés du sol (Sg et CEC/Arg) et de la MO (Ten_N)
 - un indicateur de la minéralisation (APM)
 - l'indicateur de l'histoire culturale
- Prédiction correcte de Vp avec ce modèle
 - 44% des points à +/- 0.1 et 64% des points à +/- 0.2 kgN.ha⁻¹.Jn⁻¹



	Forme	dMSEP
APM_kg_ha	Linéaire	0.441
I_Sys_V3	Linéaire	0.304
Sg	Linéaire	0.137
CECsurArg	Polynôme de degré 2	0.078
Ten_N	Linéaire	0.056

Vers un nouveau calcul de la fourniture de l'azote du sol: Mh

Actuellement:

- grilles pour la Bretagne

Transition:

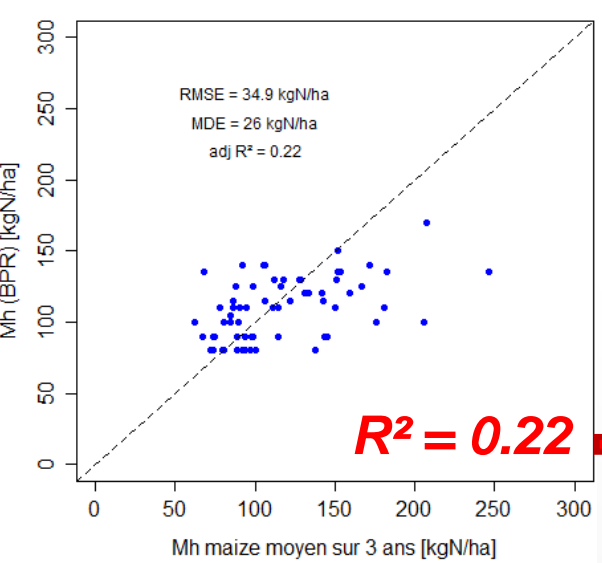
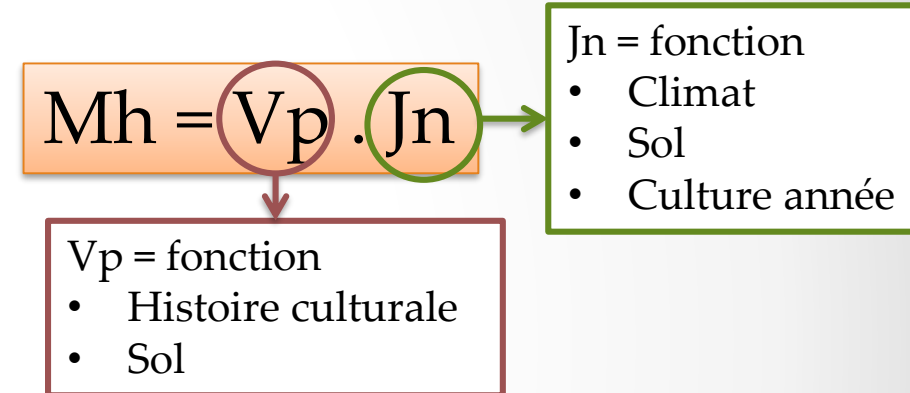
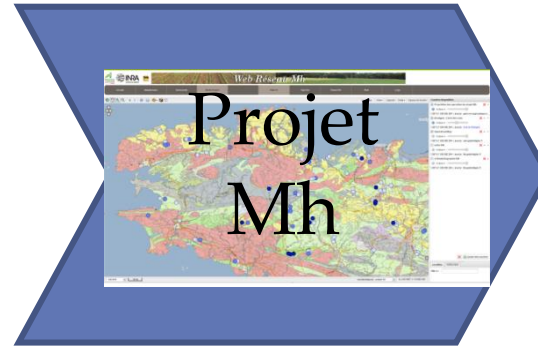
- Projet Mh

Futur:

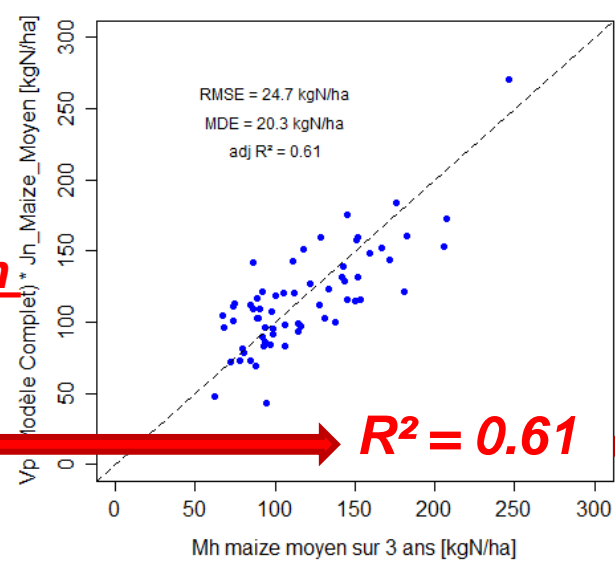
- Sol-AID avec nouveau modèle de calcul de Mh

7. Contribution de l'humus du sol et du système de cultures

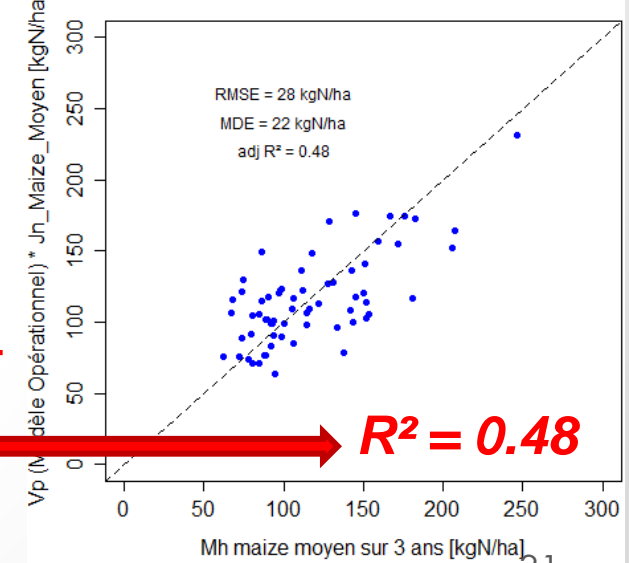
Système de cultures		kg N/ha
Maïs - Céréales	Rotation maïs ensilage et céréales (cipan)	80
	Rotation maïs grain et céréales (cipan)	90
Prairies pâturées avec 3 pâturages par an	3 années de prairie sur 10	90
	5 années de prairie sur 10	100
	8 années de prairie sur 10	110
Légumes	Système endivier et terres de st Malo	70
	Légumes céréales ou lég. Industries	100
	Légumes frais 100 %	110



Amélioration du calcul de Mh



Calcul opérationnel de Mh

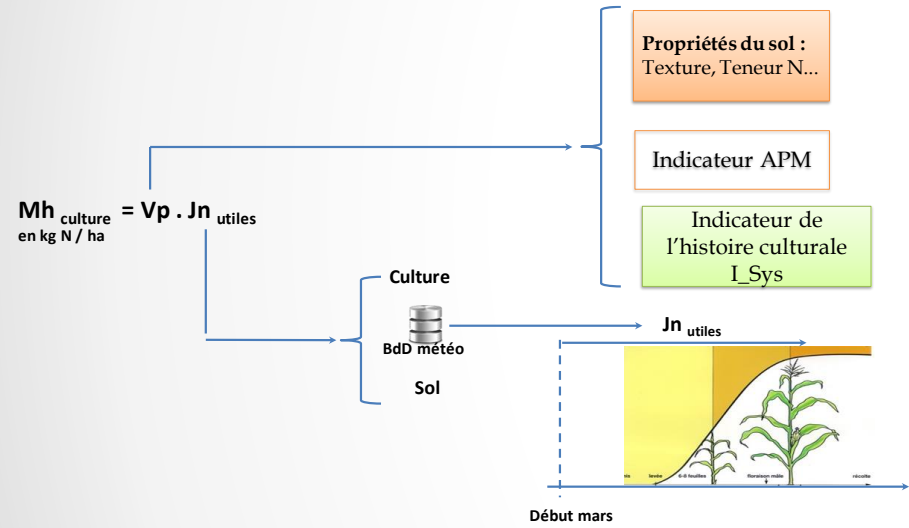


Sol-AID

Un outil innovant pour calculer
la minéralisation de l'azote du
sol en Bretagne

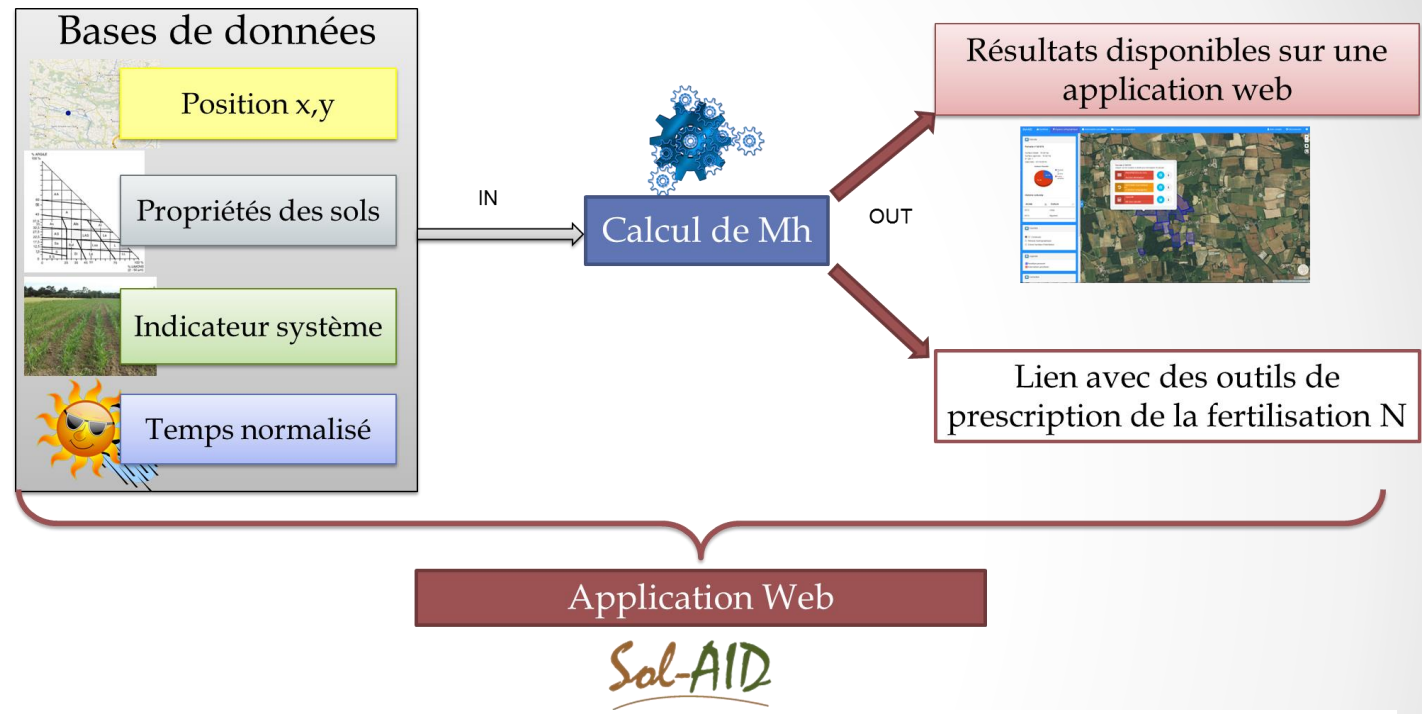
Le projet Sol-AID: un outil Web et un volet expérimental

Projet Mh (2010 – 2015) : Modèle prédictif de la minéralisation



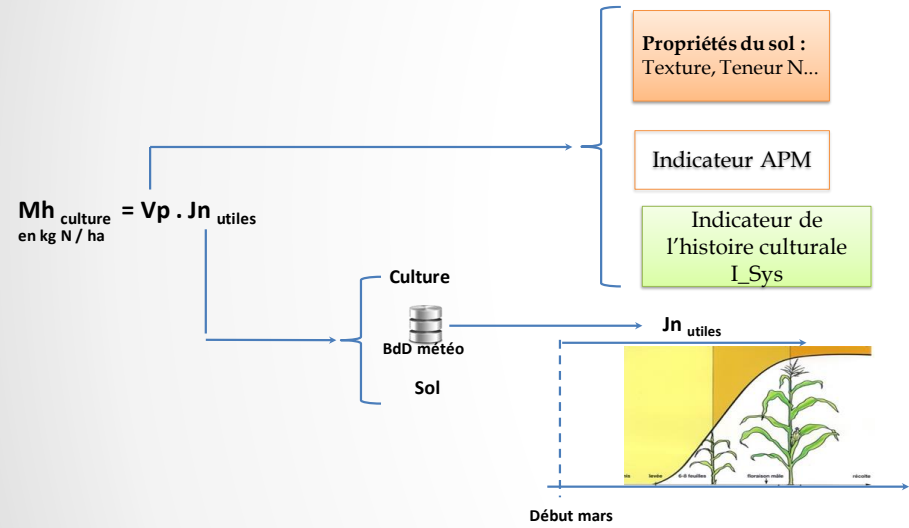
$Vp = f(\text{Teneur N}, \text{APM}, Sg, \text{CEC/Arg}, I_Sys)$

Durée : 4 ans (mars 2016 à mars 2020)



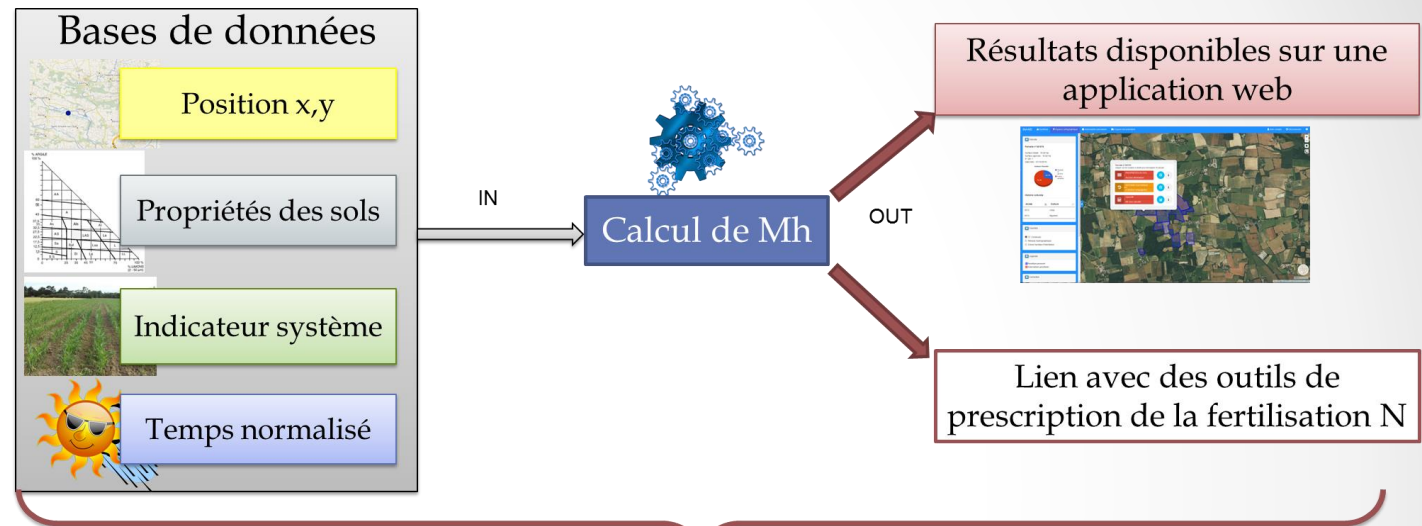
Le projet Sol-AID: un outil Web et un volet expérimental

Projet Mh (2010 – 2015) : Modèle prédictif de la minéralisation




$Vp = f(\text{Teneur N, APM, } Sg, \text{ CEC/Arg, } I_Sys)$

Durée : 4 ans (mars 2016 à mars 2020)



Application Web
Sol-AID
Volet expérimental

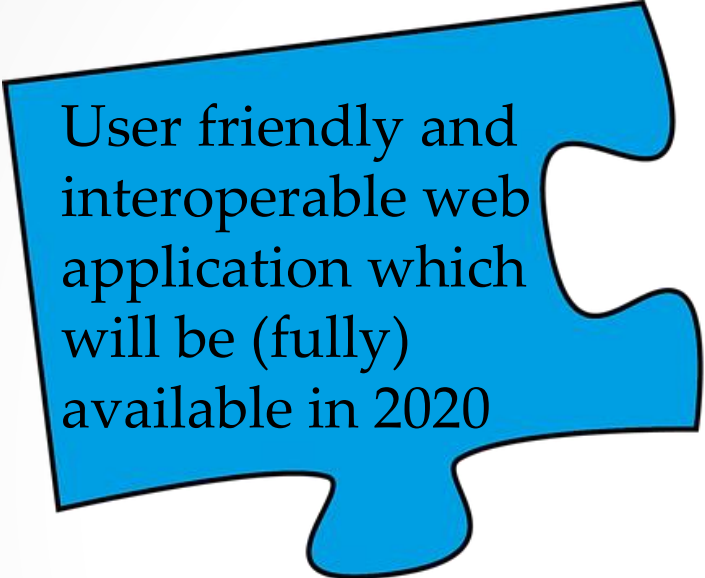


Courbes de réponse à l'azote

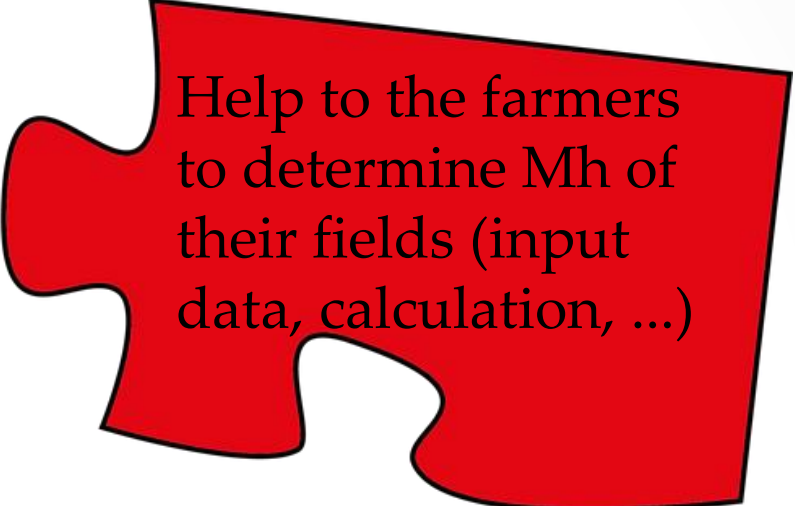
Stabilité de l'APM

Graphs showing APM mars 2011 (mg/kg) vs APM mars 2017 (mg/kg) with $r = 1.06$, $r^2 = 0.99$, and Rendement (T/ha) vs Quantité d'azote apportée (kgN/ha).

What is Sol-AID?



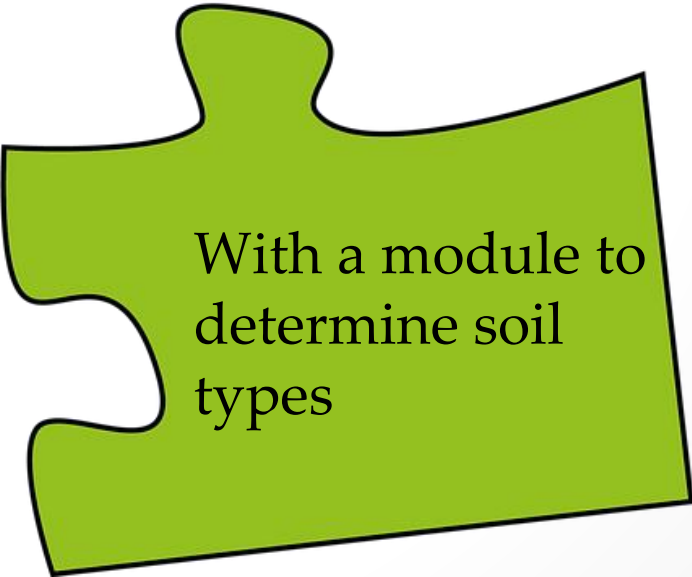
User friendly and interoperable web application which will be (fully) available in 2020



Help to the farmers to determine Mh of their fields (input data, calculation, ...)

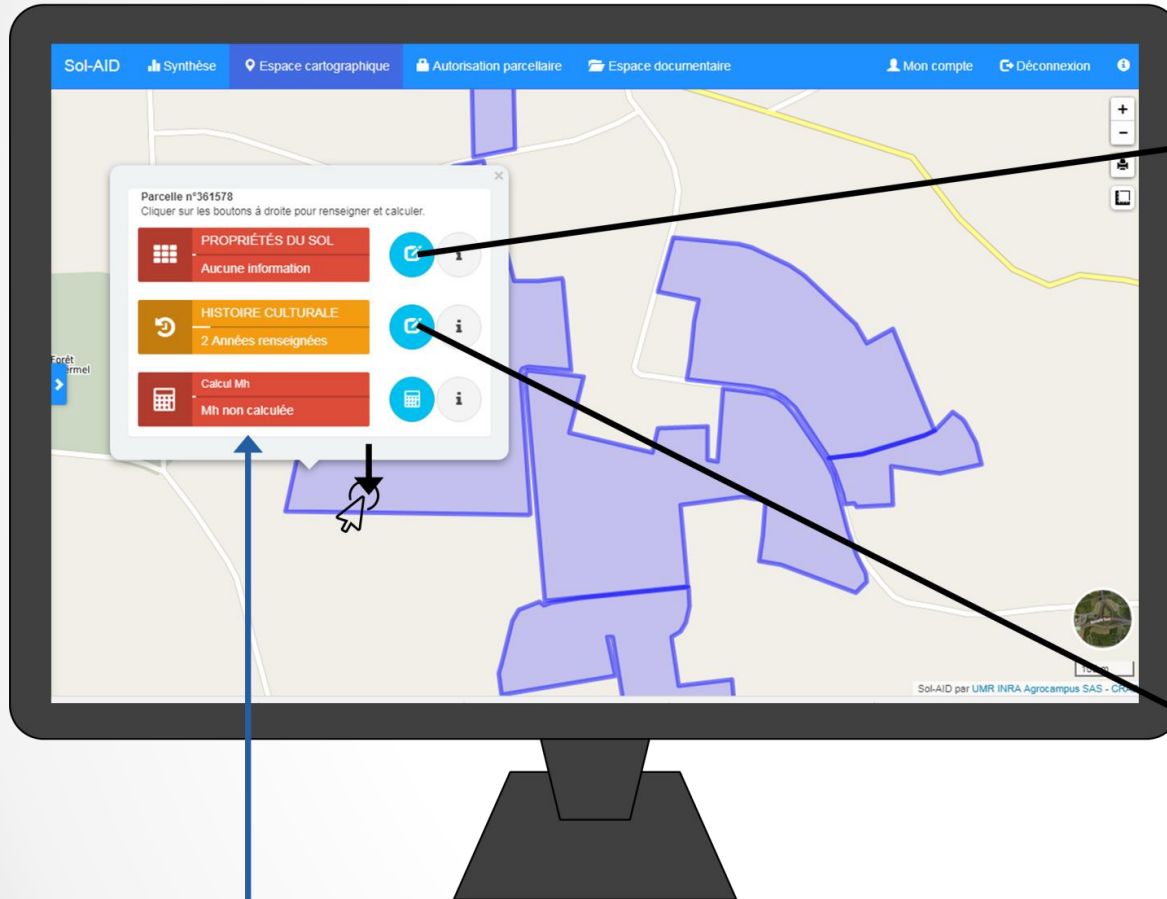


Modular application



With a module to determine soil types

L'outil web Sol-AID



Module Sol

Carte 1:250 000 des UCS en Bretagne (source: Sols de Bretagne)

Détermination du type de sol à partir d'un arbre de décision propre à chaque unité cartographique de sol (UCS)

Base de données avec les propriétés des sols utiles au calcul de Mh

Horizon	0 - 30 cm
Argile	240 g/kg
Limon fin	180 g/kg
Limon gros	310 g/kg
Sable	270 g/kg
Teneur C	31.4 g/kg
CEC	13.8 cmol/kg
APM	73 kg/ha

Propriétés des sols

Module Climat

Calcul du temps normalisé (Jn) à la parcelle avec le modèle STICS pour les propriétés du sol et la culture de l'année

Jn utiles

Module Histoire Culturelle

Calcul d'un indicateur de l'effet système (I_Sys) sur les restitutions d'azote:

$$I_{Sys} = \text{effet rotation} + \text{effet PRO}$$

I_Sys

Module Mh

Calcul de Mh utile à la culture:

$$Mh = f(\text{Sol}, \text{APM}^*, I_{Sys}) \cdot Jn$$

* APM: indicateur de minéralisation de l'azote à l'aide d'un tampon phosphate-borate²