



HAL
open science

Caractérisation de la capacité des sols à réduire N₂O : sélection et prélèvement des échantillons de sols, mesure de leur capacité à réduire N₂O

Nicolas Saby, Céline Ratié, Adeline Ayzac

► To cite this version:

Nicolas Saby, Céline Ratié, Adeline Ayzac. Caractérisation de la capacité des sols à réduire N₂O : sélection et prélèvement des échantillons de sols, mesure de leur capacité à réduire N₂O. Séminaire de restitution des projets SOLGES & PUIGES, Oct 2017, Orléans, France. diapos 24 à 43. hal-02791604

HAL Id: hal-02791604

<https://hal.inrae.fr/hal-02791604v1>

Submitted on 5 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Introduction Générale aux projets SOLGES et PUIGES



SOLGES Capacité des SOLs à réduire le Gaz à Effet de Serre N₂O










PUIGES Cultures Puits du Gaz à Effet de Serre N₂O

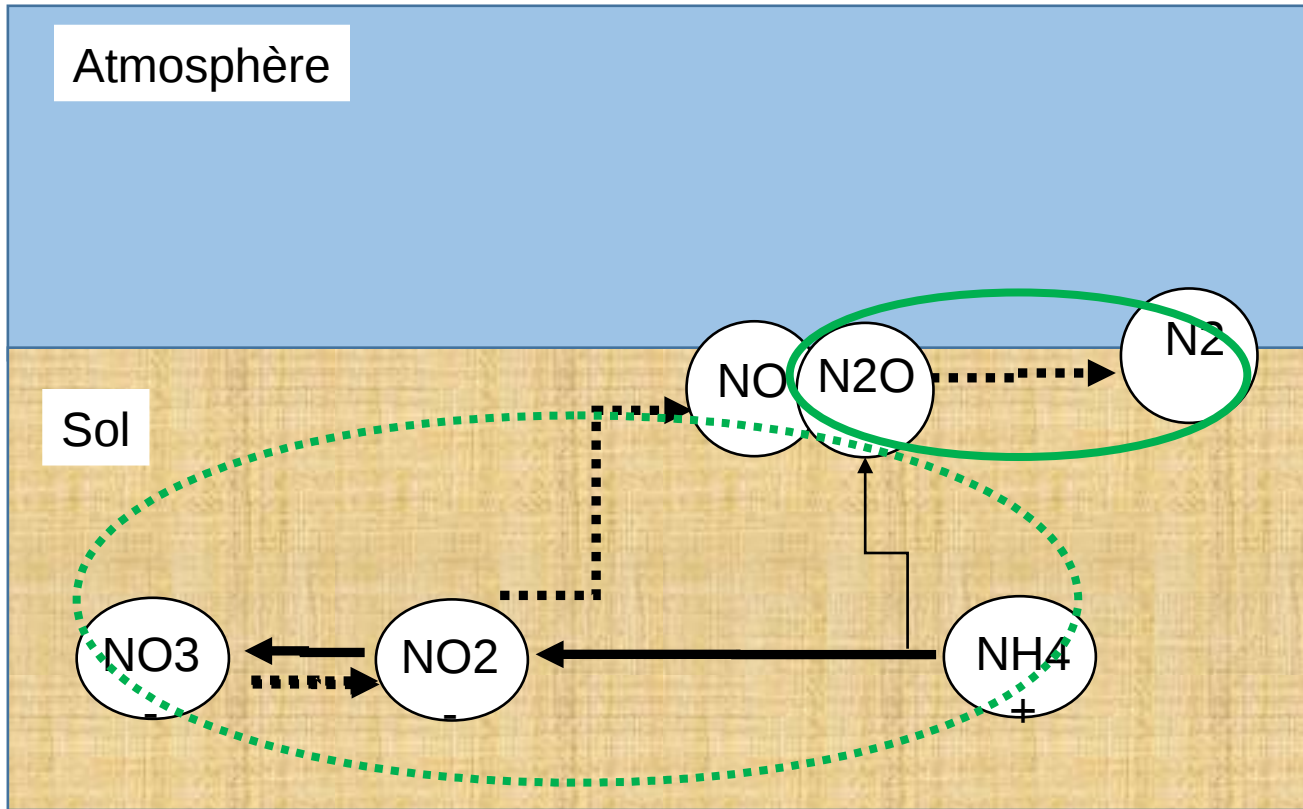









Cadre Scientifique

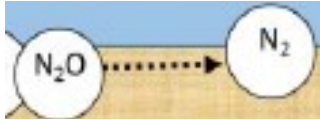


la nitrification (\leftarrow) observée en conditions de bonne aération du sol
 $\dots \rightarrow$

la dénitrification ($\dots \rightarrow$) observée en conditions de faible aération

Stimuler le fonctionnement de la transformation du N2O en N2





Cadre Scientifique

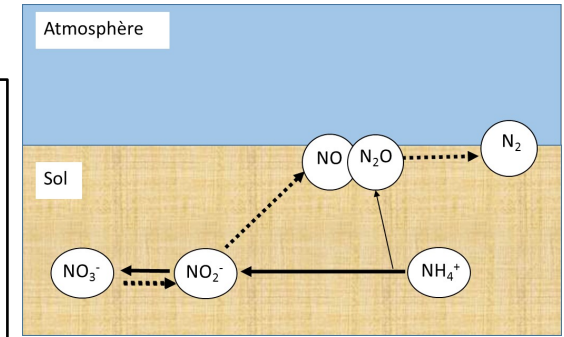
Spécificités d'un travail sur l'étape de transformation de N₂O en N₂

- La forme recherchée, N₂, est inerte dans l'environnement et sur la base des connaissances actuelles, pas de relargage de produits intermédiaires □ pas de transfert de pollution sur le cycle de l'azote
- Cette étape du cycle de l'azote est catalysée par une enzyme (N₂O réductase, codée par le gène *NosZ*). Le contour et les connaissances sur cette transformation sont relativement bien précisés, avec connaissance d'un inhibiteur de cette transformation (acétylène)
- Des travaux antérieurs montrent une variabilité de fonctionnement de cette transformation dans les sols, et suggèrent un lien avec l'intensité des émissions de N₂O

Démarche Générale



Stimuler le fonctionnement de la transformation du N₂O en N₂



1. Gérer les propriétés physico-chimiques des sols (SOLGES) [SOL(pH_a, CEC_a, Ca, ...)] **PhN₂ORed-** ⇒ [SOL(pH_b, CEC_b, C_b, ...)] **PhN₂ORed+**



2. Introduire dans le sol des souches capables de réduire N₂O,

en s'appuyant sur des synergies entre plantes et microorganismes (PUIGES)

[SOL] **PhN₂ORed-** + [Plante + Inoculant] **PhN₂ORed+** □ [SOL + Plante + Inoculant] **PhN₂ORed+**





SOLGES Capacité des SOLs à réduire le Gaz à Effet de Serre N₂O

1. Gérer les propriétés physico-chimiques des sols

(SOLGES) [SOL(pH_a, CEC_a, Ca, ...)] **PhN2ORed-** ⇒ [SOL(pH_b, CEC_b, C_b, **PhN2ORed+**)]



Hypothèses du projet



Gérer les propriétés physico-chimiques des sols

~~[SOL(CECa, Ca,...)]PhN2ORed-~~ ⇒ [SOL(pHb, CECb, Cb, ...)]PhN2ORed+

1. Les sols qui ont une faible capacité à réduire N2O en N2 potentiellement émettront *in situ* davantage de N2O que des sols présentant une forte capacité à réduire N2O en N2, toute autre propriété équivalente par ailleurs.
2. La capacité des sols à réduire N2O en N2 est déterminée par leurs propriétés physico-chimiques avec des hypothèses fortes qui concernent le rôle du pH et des matières organiques du sol (Stehfest et Bouwman, 2006).
3. En intervenant sur les propriétés physico-chimiques des sols, on peut modifier leur capacité à réduire N2O en N2. Cela a pu être démontré au laboratoire.
4. Ces résultats sont applicables *in situ*.

Objectifs spécifiques annoncés

1. Développer des connaissances nouvelles sur la fonction de réduction du N₂O en N₂ dans les sols.
 - son potentiel de fonctionnement dans de nombreux sols
 - la proportion de sols présentant une faible capacité de réduction de N₂O parmi un échantillonnage de taille importante,
 - le déterminisme de ce potentiel par les caractéristiques des sols,
3. Consolider la relation entre une faible capacité des sols à réduire N₂O en N₂ et l'intensité des émissions de N₂O *in situ*.
4. Intervenir *in situ* sur les propriétés des sols pour atténuer leurs émissions de N₂O
5. Tester par modélisation, à différentes échelles spatiales et temporelles, le potentiel d'atténuation des émissions de N₂O par les solutions biotechniques proposées

L
A
B
O

T
E
R
R
A
I
N

M
O
D
E
L

Structuration du projet

| | Responsable Nom | Unité | Suppléant Nom | Unité |
|--|--------------------|---------|------------------|---------|
| Tâche 1 : coordination communication | Hénault C. | UR SOLS | C. Legall | CETIOM |
| Tâche 2 : Répartition spatiale des sols présentant une faible capacité à réduire N2O | N. Saby | Infosol | Hénault C. | UR SOLS |
| Volet 1 : Ré-échantillonnage des sites RMQS | C. Ratié | Infosol | | |
| Volet 2 : Réalisation du test de réduction de N2O en N2 | A. Ayzac | UR SOLS | | |
| Volet 3 : Re-vérification de la pertinence du test | M. Seger | UR SOLS | | |
| Tâche 3 : Développement de solutions biotechniques | C. Legall | CETIOM | Hénault C. | UR SOLS |
| Volet 1 : Essai pH | JP Cohan | ARVALIS | | |
| Volet 2 : Essai MO et pH | C. Legall | CETIOM | | |
| Tâche 4 : Traitement des données et modélisation | H. Bourennane | UR SOLS | N. Saby | InfoSol |

Evolution significative des concepts



Introduction du concept de l'étude GES (Pellerin et al., 2013):

Potentiel d'atténuation = assiette x abattement

Assiette : surface de sol sur laquelle on peut agir

Abattement : Taux de réduction des émissions de N₂O obtenu par l'action

Plan des interventions

1. Protocole de caractérisation au laboratoire de la capacité des sols à réduire N₂O en N₂ (A.Ayzac, C. Hénault)
2. Caractérisation de la capacité des sols français à réduire N₂O : échantillonnage des sols et résultats ponctuels (N. Saby, C. Ratié, A. Ayzac)
3. Définition de fonctions de pédotransfert (H. Bourennane, N. Saby)
4. Application in situ à l'échelle de la parcelle agricole (C. Le Gall, JP Cohan, C. Hénault)
5. Potentiels d'atténuation des émissions de N₂O par cette approche à l'échelle nationale (H. Bourennane, N. Saby, C. Hénault)
6. Conclusions, Discussions, Perspectives

Protocole de Caractérisation de la capacité des sols à réduire N₂O

Adeline Ayzac, Catherine Hénault

Objectifs spécifiques

- ❑ Définir un protocole de mesure de la capacité des sols à réduire N2O
 - ❑ applicable à tous types de sol et reproductible
 - ❑ Réalisable en « semi-routine »
 - ❑ Fournisseur d'une information sous forme « d'indicateur chiffré »

Démarche retenue

- ❑ Etude bibliographique
- ❑ Démarche de normalisation ISO
incluant un essai circulaire international
(adossement à SOLGES d'un financement spécifique –
ADEME – pour un travail avec le groupe
d'écotoxicologie terrestre AFNOR)

Résultats de l'étude bibliographique

- ❑ Protocoles utilisant les propriétés inhibitrices de l'acétylène
 - ❑ Smith *et al.*, 1979 : incubations très courtes (2h) d'échantillons de sol en absence et en présence d'acétylène : Denitrifying Enzyme Activities
 - ❑ Hénault *et al.*, 2001 : incubations d'une semaine d'échantillons de sol en absence et en présence d'acétylène : Soils' capacity to reduce N₂O

- ❑ Protocole basé sur l'isotopie des formes N₂O et N₂
 - ❑ Pas mûr, notamment pour une application en semi-routine

Résultats de l'étude bibliographique

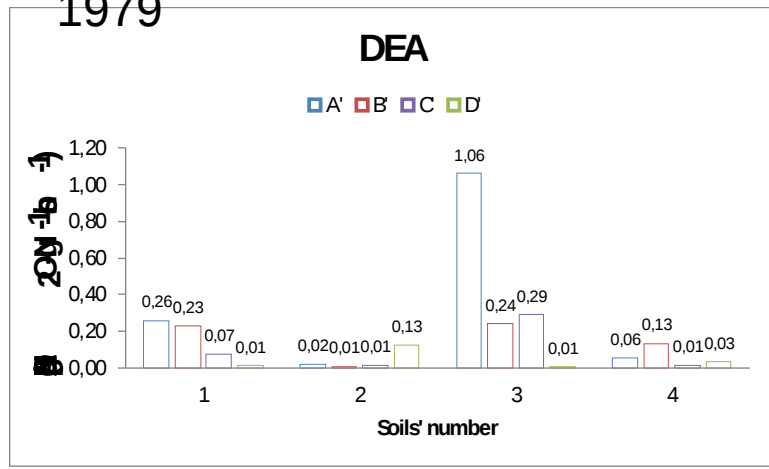


| | Soil denitrifying enzymes activities | Soil capacity to reduce N2O |
|--|--|--|
| Principles of the methodology | Anaerobiosis to optimize the denitrification process | |
| | Use of acetylene to inhibit the N2O reductase | |
| | Substrate addition — Nitrate — Carbon | Substrate addition — Nitrate — N2O (optionally) |
| | Chloramphenicol addition | |
| Ability to assess field denitrification | The test reveals the concentration of functional denitrifying enzymes in sample at the time of sample collection. In certain cases, correlations had been observed between DEA and annual denitrification in soils | |
| Ability to assess N2O emission | No evidence | Results could be used — by themselves to discriminate soils with potentially high levels of N2O emission on the field scale — Combined in the NOE model to calculate soil N2O emission |
| Number (n) of publications in which the text has been used | n > 100 | 10 > n > 100 |

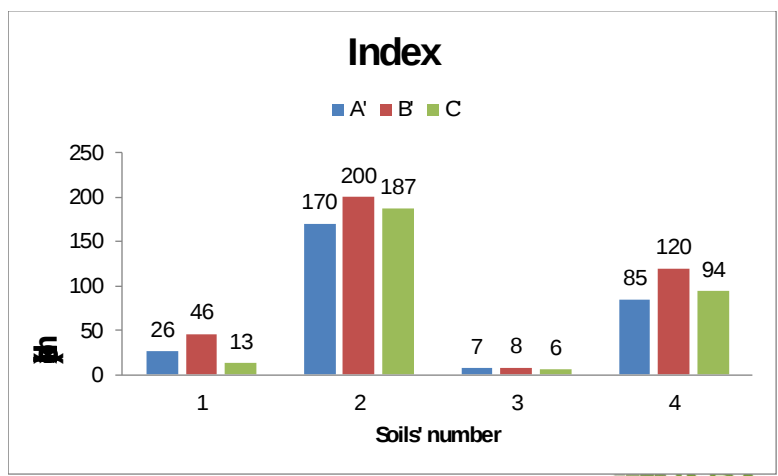
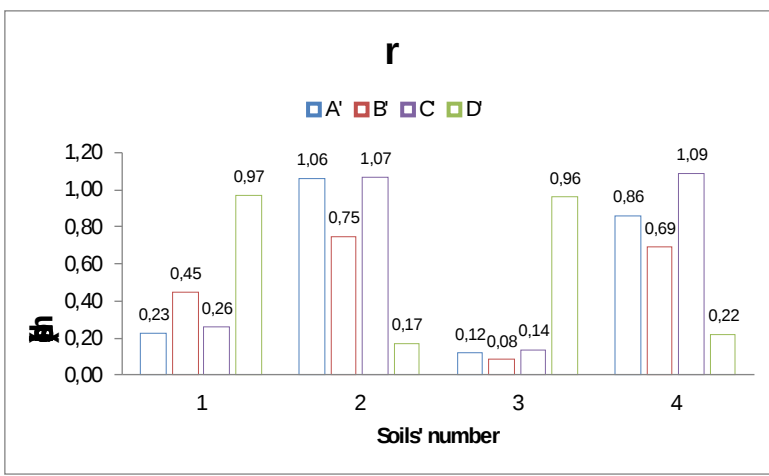
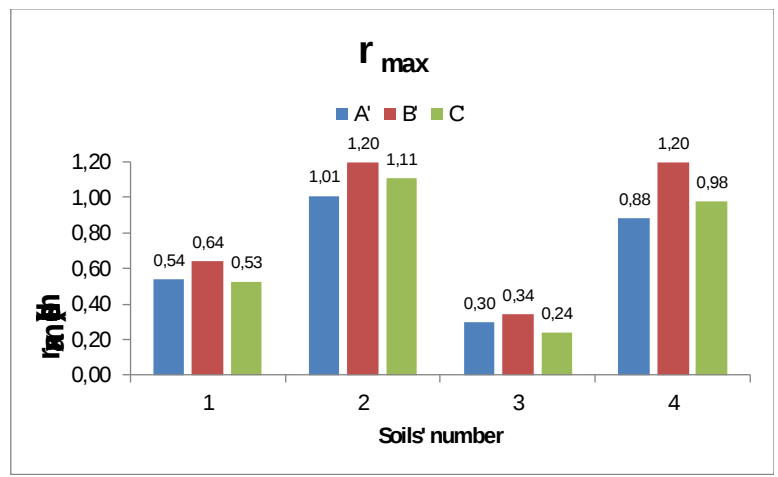
Résultats de l'essai circulaire



Protocole issu de Smith et al., 1979



Protocole issu de Hénault et al., 2001



Présentation détaillée du protocole

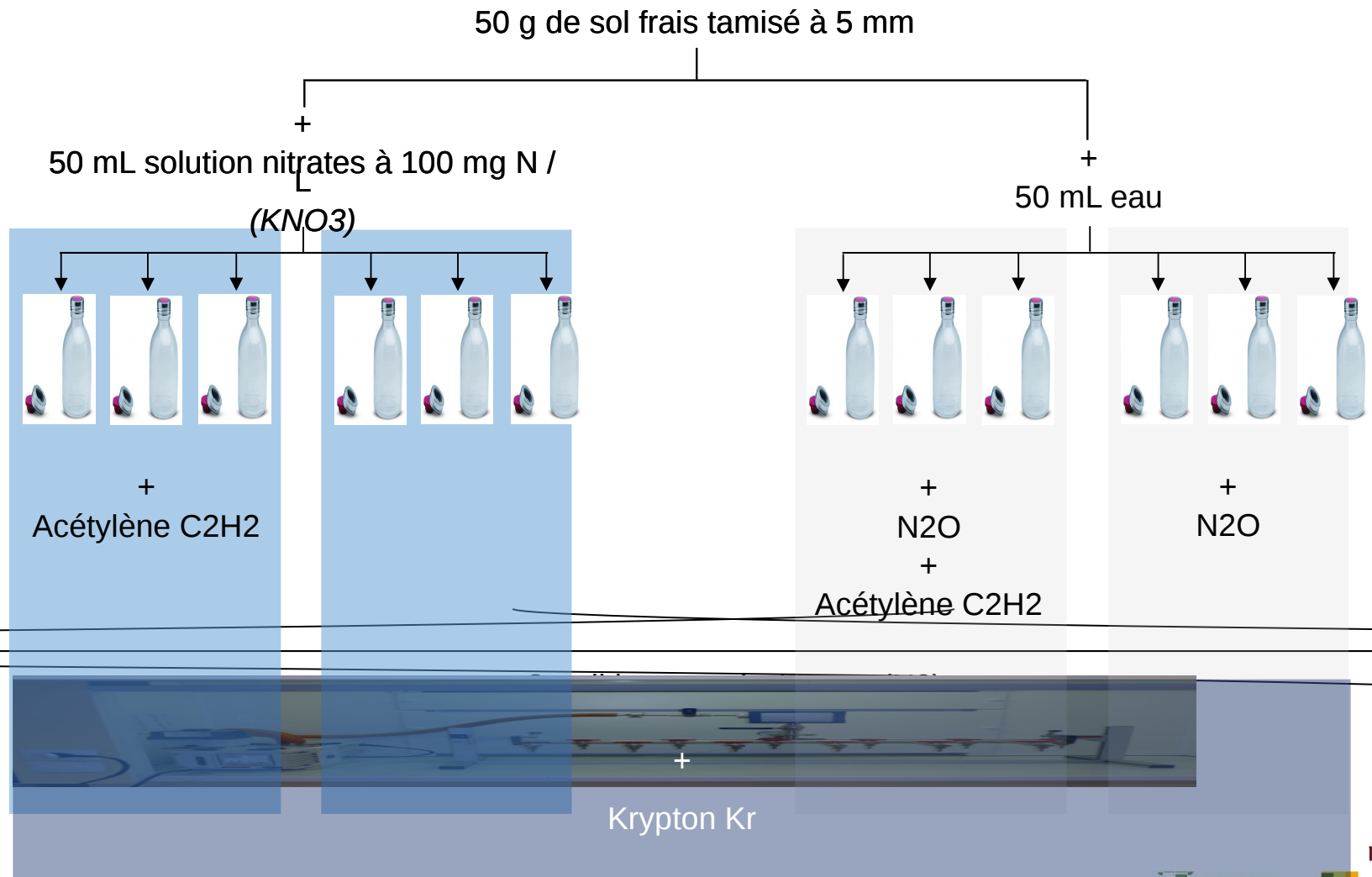
PRINCIPE

- ❑ Quantification du N₂O produit ou consommé au cours de la dénitrification par du sol mis en incubation au laboratoire

- ❑ 4 étapes
 - 1 / Conditionnement des échantillons de sol
 - 2 / Incubation de sol et prélèvement d'échantillons gazeux
 - 3 / Analyse des échantillons gazeux par CPG
 - 4 / Traitement des données

- ❑ Calcul d'indicateurs

Présentation détaillée du protocole : 1. Conditionnement



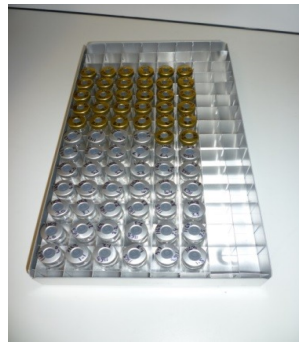
Présentation détaillée du protocole : 2. Incubation



- ❑ Agitation orbitale à 180 rpm pendant une semaine
- ❑ T = 20°C

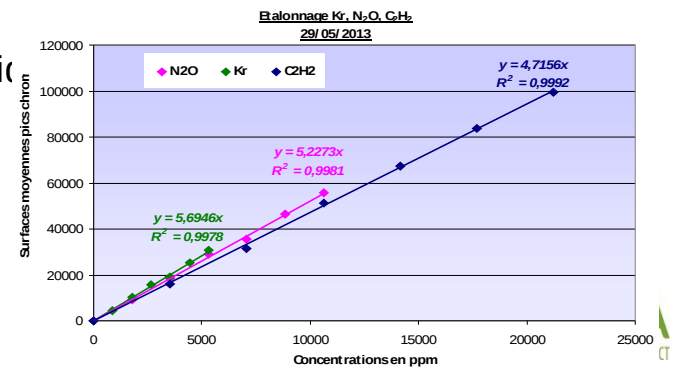
- ❑ Echantillonnage de l'atmosphère des fioles à t =

- 0
- 24 h
- 48 h
- 72 h
- 96 h
- Et 168 h



Présentation détaillée du protocole : 3. Analyse gazeuse

- ❑ MicroGC T-3000 (SRA Instruments)
- ❑ Passeur automatique d'échantillons 48 positions
- ❑ 2 modules de mesure
 - Voie A : dosage du N2 et O2
 - Tamis moléculaire, 90°C
 - Voie B : dosage du N2O, CO2, C2H2 et Kr
 - Colonne Porapak Q, 60°C
 - Nano-Détecteurs à Conductivité Thermique
 - Gaz vecteur : hélium
 - Temps d'analyse : env. 3 min / éch.



❑ Gammes de mesures

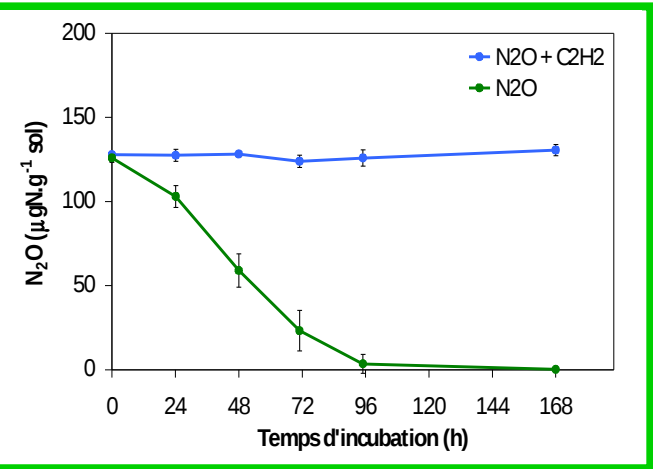
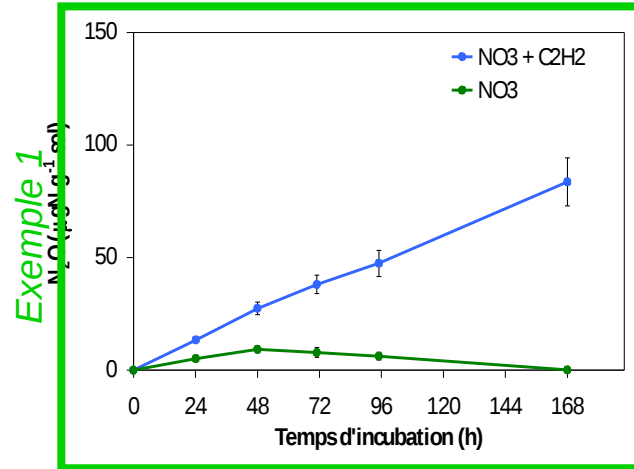
18 octobre 2017 – Salle D.

- N2O : 0,2 à 1 % (1800 à 10500 ppm)

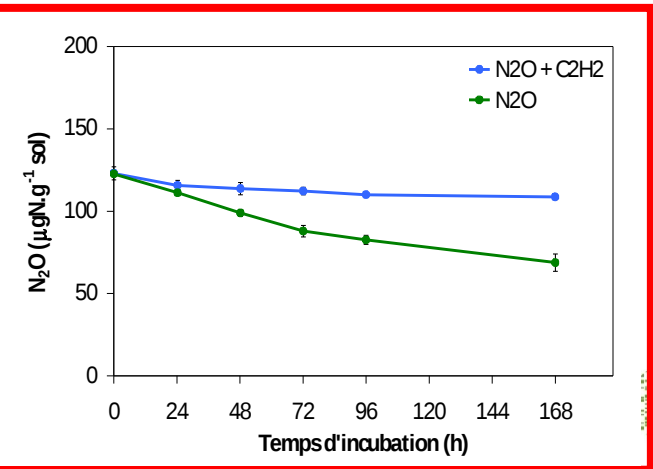
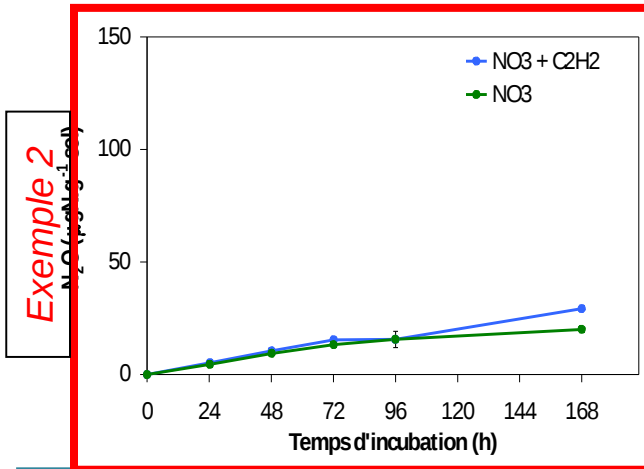
Présentation détaillée du protocole : 4. Traitement

☐ Accumulation du N₂O
(modalités avec apport de nitrates)

☐ Réduction du N₂O
(modalités avec apport de N₂O)



Bonne capacité à réduire N₂O
PhN₂Ored+

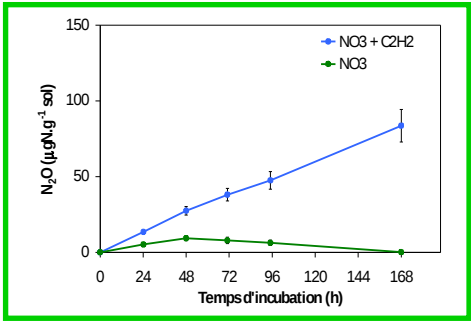


Faible capacité à réduire N₂O
PhN₂Ored-

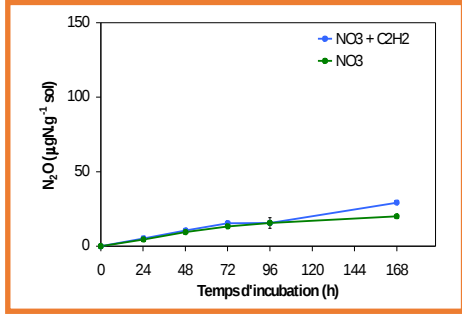
Présentation détaillée du protocole : 4. Traitement

- Tracé des cinétiques de production de N2O après apport de nitrates

Exemple 1



Exemple 2



- Calcul du ratio maximum $r_{max} = \frac{N_2O \text{ acc. sans } C_2H_2}{N_2O \text{ acc. en présence de } C_2H_2}$

rmax = 0,38

rmax = 1,00

- Durée d'accumulation du N2O au cours de la cinétique

t = 48

t > 168

- Calcul de l'index : $r_{max} \times t$

i = 18

i > 168

Conclusions

- ❑ Définition d'un protocole répondant aux critères initiaux

- ❑ Livrables produits
 - ❑ Norme technique ISO/TS20121-2:2017 incluant un essai circulaire
 - ❑ Création d'un film décrivant les étapes de conditionnement et d'incubation des échantillons de sol

- ❑ Possibilité de réaliser ce protocole dans le cadre du projet sur environ 100 échantillons



Sélection et prélèvement des échantillons de sol Mesure de leur capacité à réduire N₂O

Nicolas Saby, Céline Ratié et Adeline Ayzac



Objectifs spécifiques

- ❑ Construire un plan d'échantillonnage s'appuyant sur des sols déjà caractérisés, situés dans le dispositif RMQS
- ❑ Construire un plan d'échantillonnage optimisant sa représentativité en termes de
 - ❑ couverture spatiale,
 - ❑ d'étendue des données
 - ❑ de facteurs de contrôle de la capacité des sols à réduire N₂O.
- ❑ Réaliser les prélèvements des échantillons de sol
- ❑ Mesurer au laboratoire la capacité des échantillons de sol à réduire N₂O

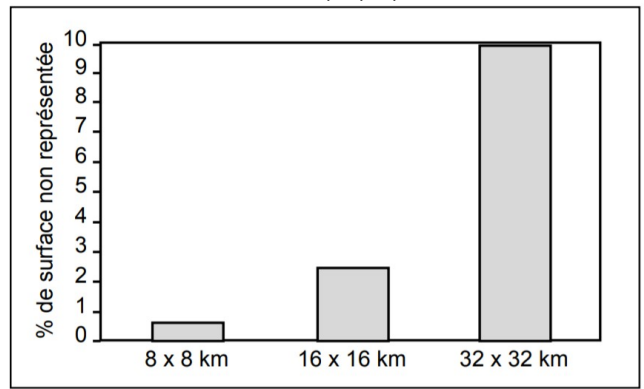
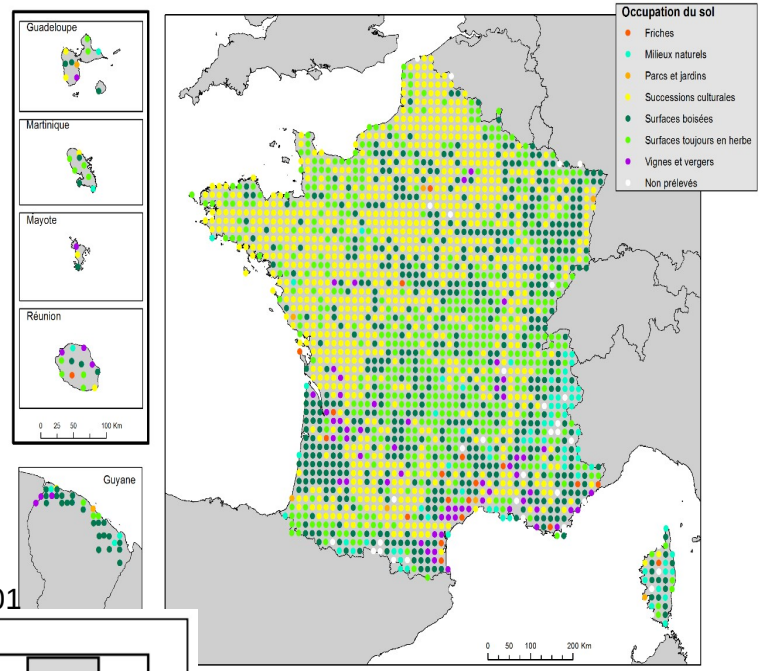


Rappels : Qu'est ce que le RMQS ?

Réseau de Mesures de la Qualité des Sols

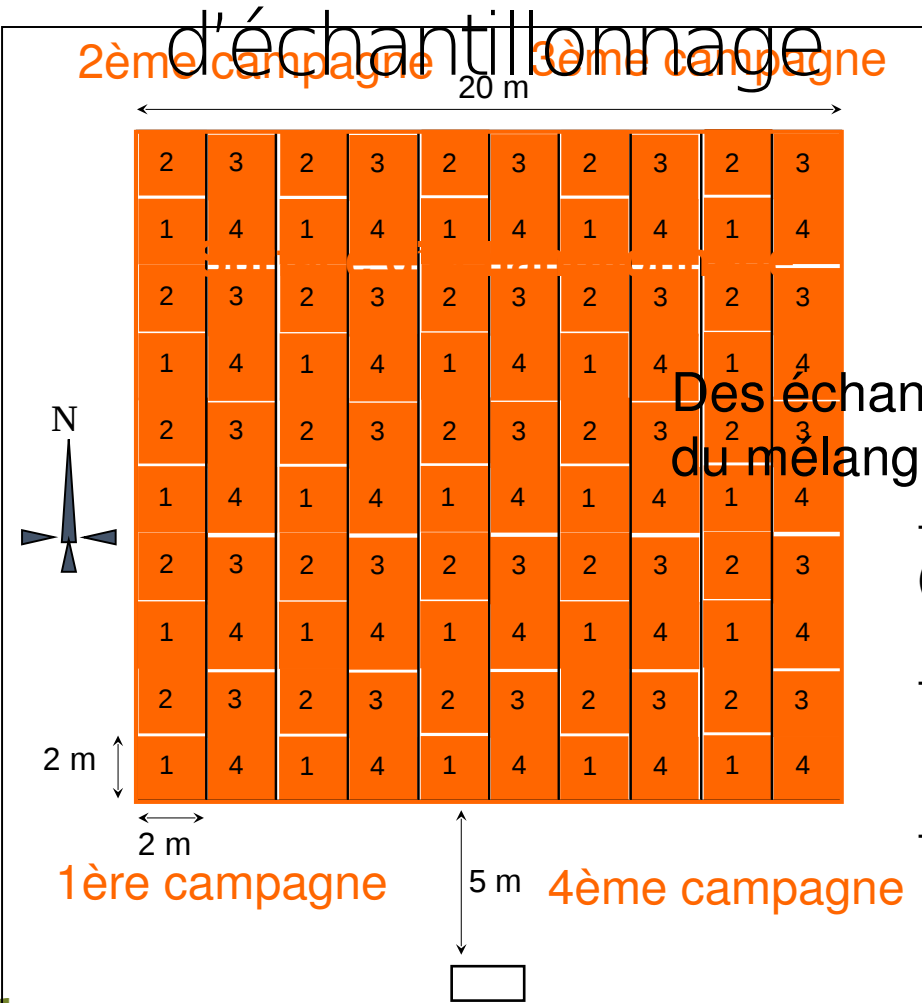
- Une grille systématique de 16 km de côté avec un point tous les 16 km
- Une bonne couverture spatiale et des **types de sols** et **d'occupations**
- Un retour sur site possible
- Un protocole de prélèvement rôdé
- Une banque d'analyses déjà disponibles

Arrouays et al.,
Étude et Gestion des Sols, 8, 1, 2001



Rappels : Qu'est ce qu'un site

La Surface RMQS ?



Des échantillons composites issus du mélange de 25 prélèvements

- horizons 0 (forêts, prairies)
 - couche travaillée, ou 0-30 cm
 - couche sous-jacente ou 30-50 cm
-



STIPA 2000 - UMIR. Sol et Environnement - INRA Montpellier

Etude RMQS N° RMQS 1463

Éléments grossiers

| Abondance (% volumique) | | Abondance FG A et B (% volumique) | |
|-------------------------|---|-----------------------------------|---|
| 1 | 3 | 1 | 3 |
| 2 | 3 | 2 | 3 |
| 3 | 3 | 3 | 3 |
| 4 | 3 | 4 | 3 |
| 5 | 3 | 5 | 3 |
| 6 | 3 | 6 | 3 |

| Forme | | Taille | | Acidité (tr. mass) | |
|-------|---|--------|---|--------------------|---|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 |
| 3 | 1 | 3 | 1 | 3 | 1 |
| 4 | 1 | 4 | 1 | 4 | 1 |
| 5 | 1 | 5 | 1 | 5 | 1 |
| 6 | 1 | 6 | 1 | 6 | 1 |

| Transformation | | Orientation globale | |
|----------------|---|---------------------|---|
| 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 1 | 2 | 1 |
| 3 | 1 | 3 | 1 |
| 4 | 1 | 4 | 1 |
| 5 | 1 | 5 | 1 |
| 6 | 1 | 6 | 1 |

Commentaires
A1: 100 g
A2: 100 g
S: 100 g
C: 100 g
on retrouve sur

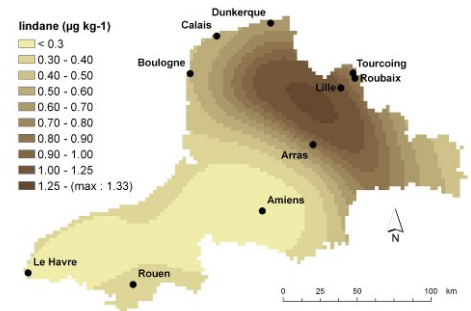


Un Conservatoire

y Jolivet (INRA Orléans)



Des analyses mobilisables

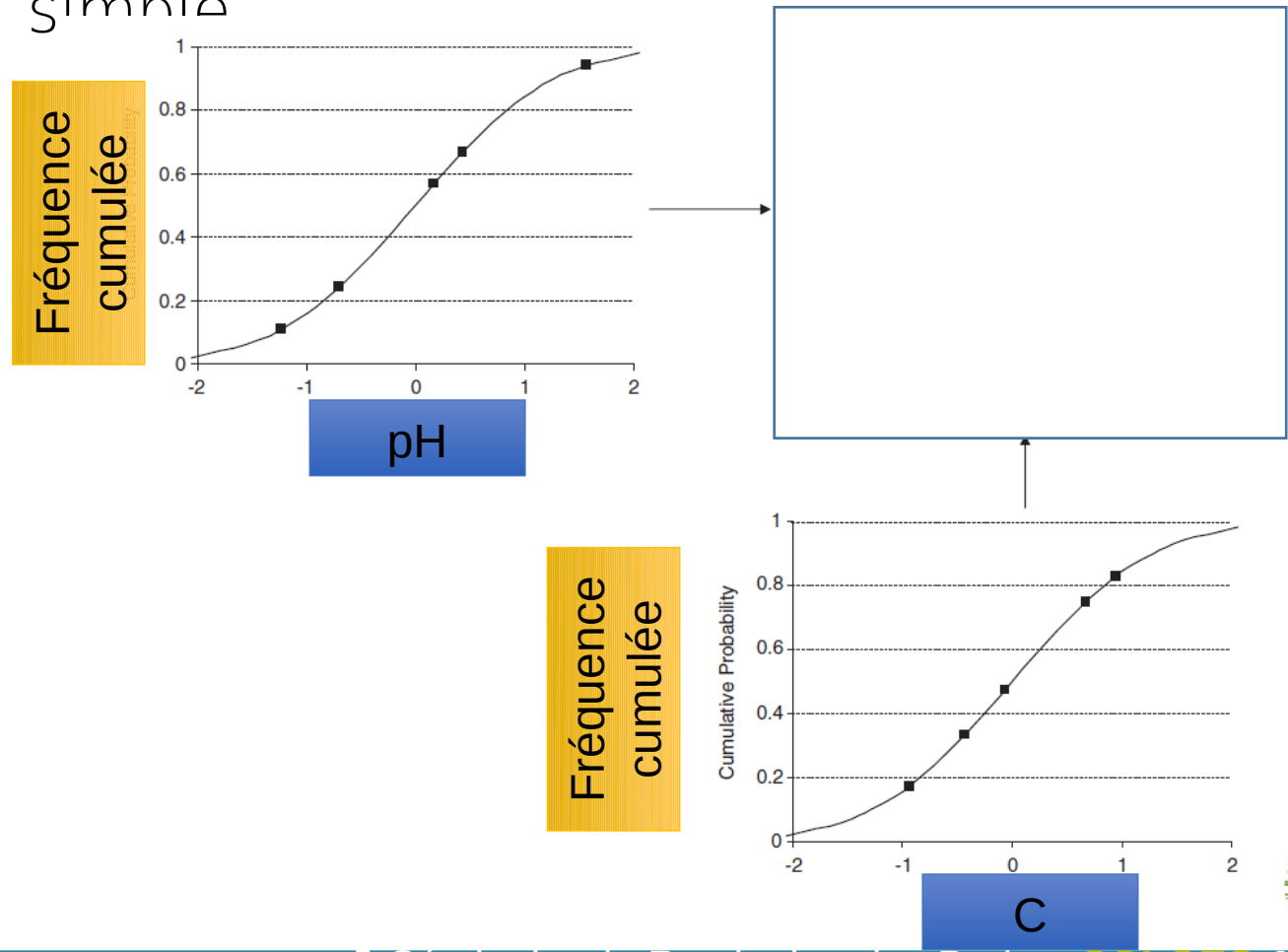


Critères retenus pour les prélèvements SOLGES

- Le pH,
- la concentration en carbone,
- l'occupation des sols,
- La coordonnée X, Y

Rappels : Méthodologie de sélection des sites

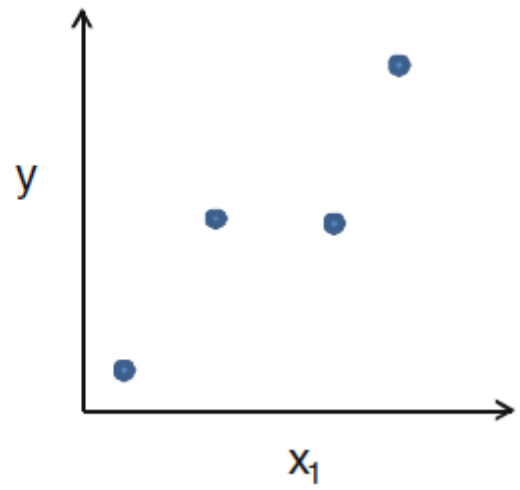
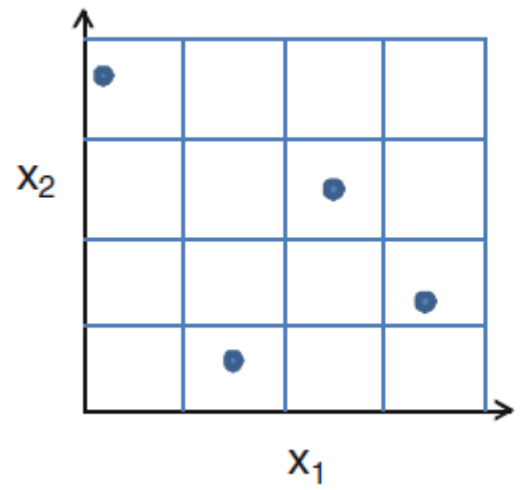
Hyper Cube Latin : Illustration d'un cas simple



Rappels : Méthodologie de sélection des sites

Hyper Cube Latin :

Relation avec la variable à prédire



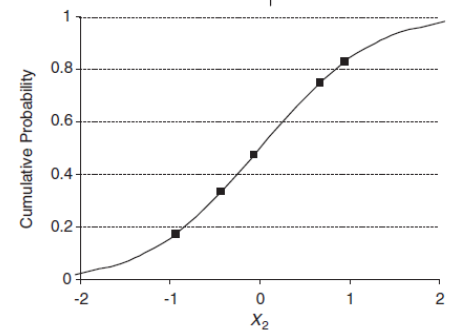
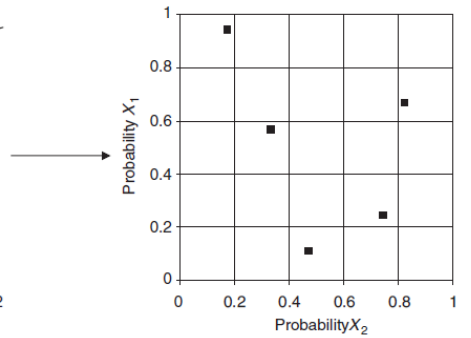
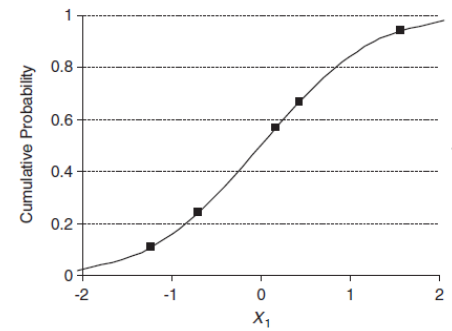
Rappels : Méthodologie de sélection des sites

Hyper Cube Latin :

Illustration d'un cas simple

Minasny B, McBratney AB (2006) A conditioned Latin hypercube method for sampling in the presence of ancillary information. *Comput Geosci* 32:1378–1388

- Démarche s'appuyant sur la stratification des variables d'entrée
- Tirages de L strates telles que toutes les classes du découpage des facteurs soient présentes une fois et une seule,
- Tirage d'un point dans chacune des L strates,
- Optimisation de la sélection par 'recuit simulé'.



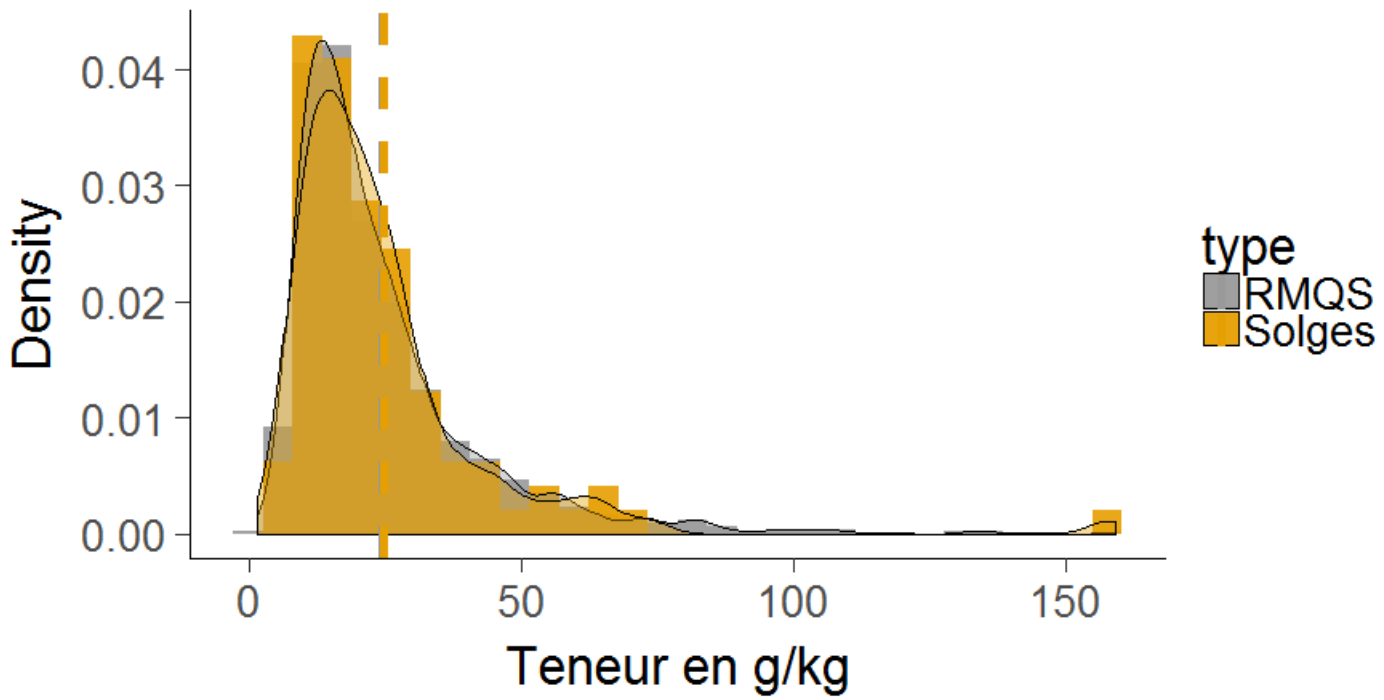
Résultats concernant la sélection des sites

- ❑ Utilisation du dispositif RMQS
 - ❑ Identification de critères basée sur la littérature et avis d'experts
 - ❑ Utilisation de la méthodologie de l'Hyper Cube Latin
-
- ❑ Sélection de 88 sites permettant un échantillonnage adapté à la problématique



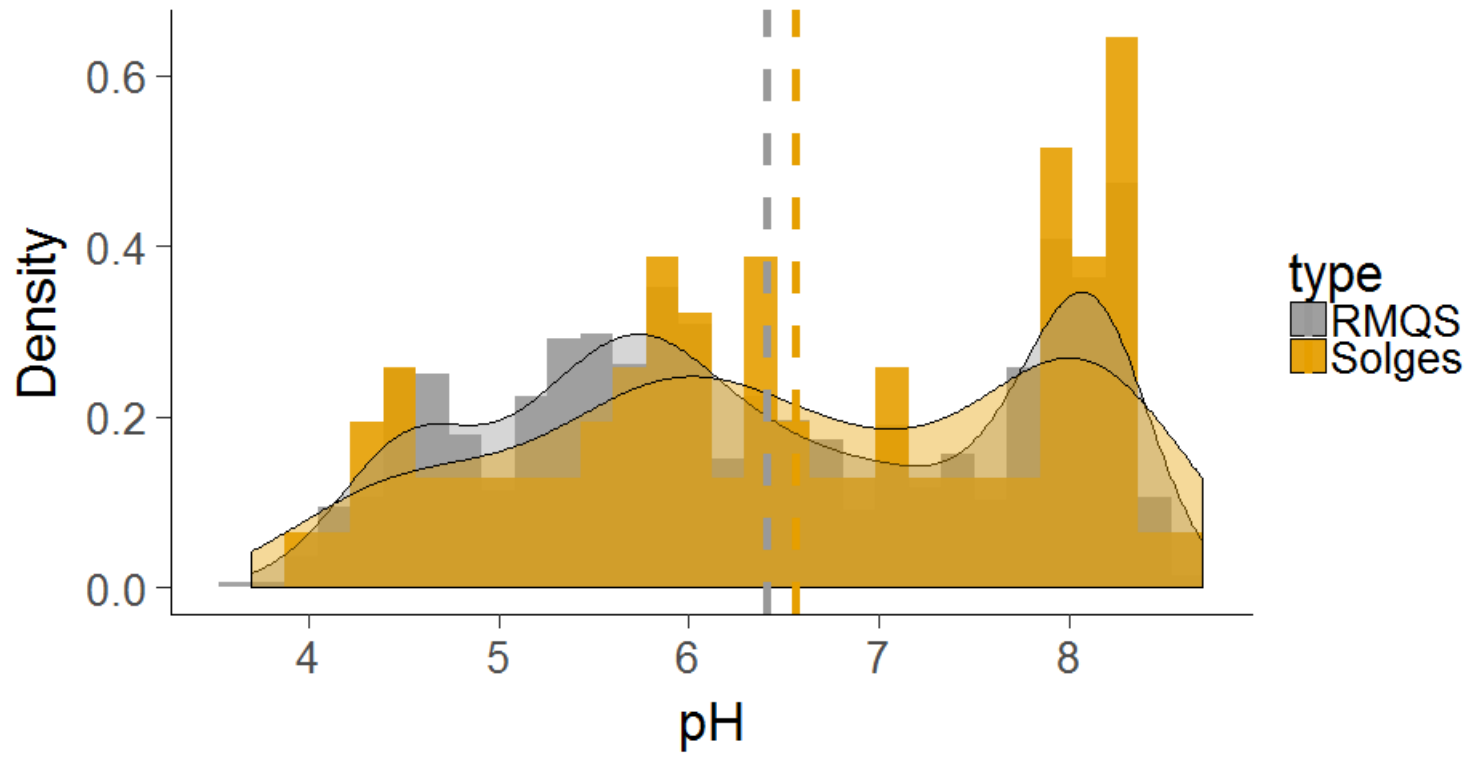
Résultats concernant la sélection des sites

Le Carbone



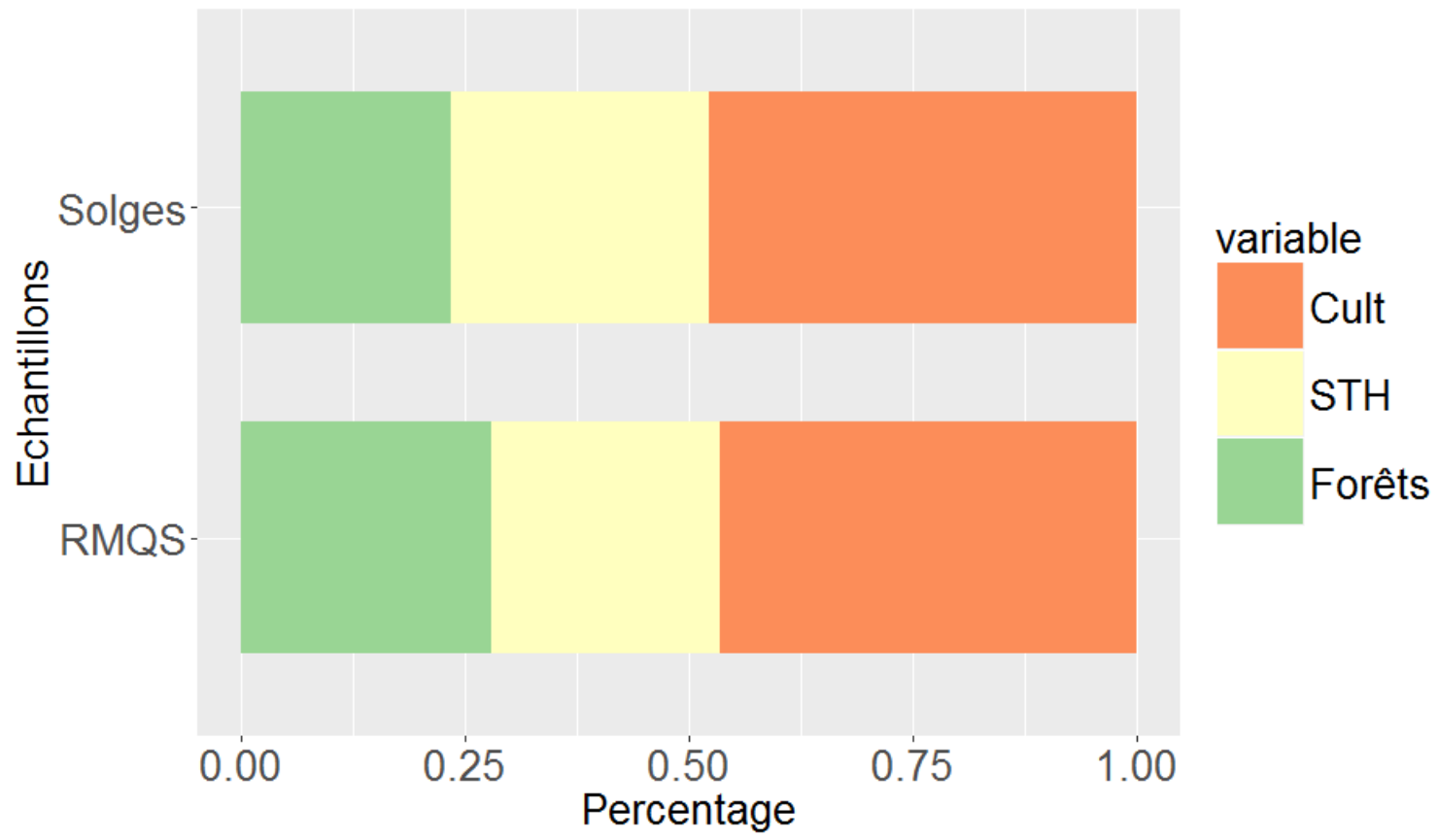
Résultats concernant la sélection des sites

Le pH



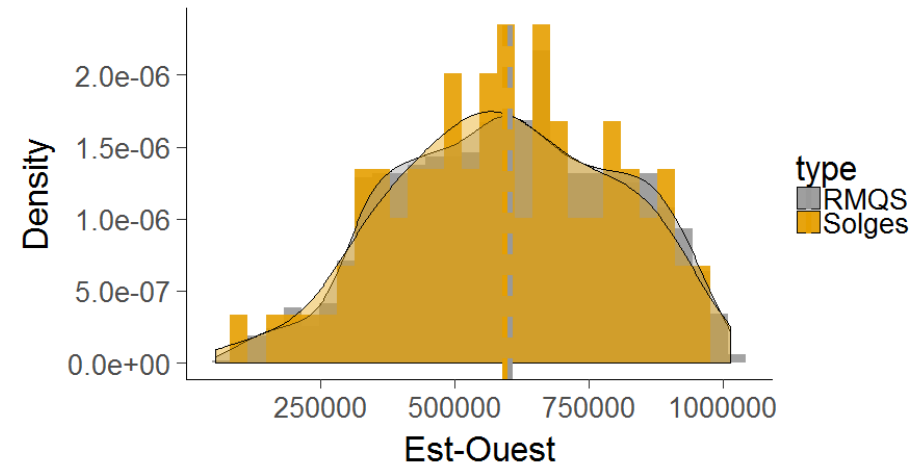
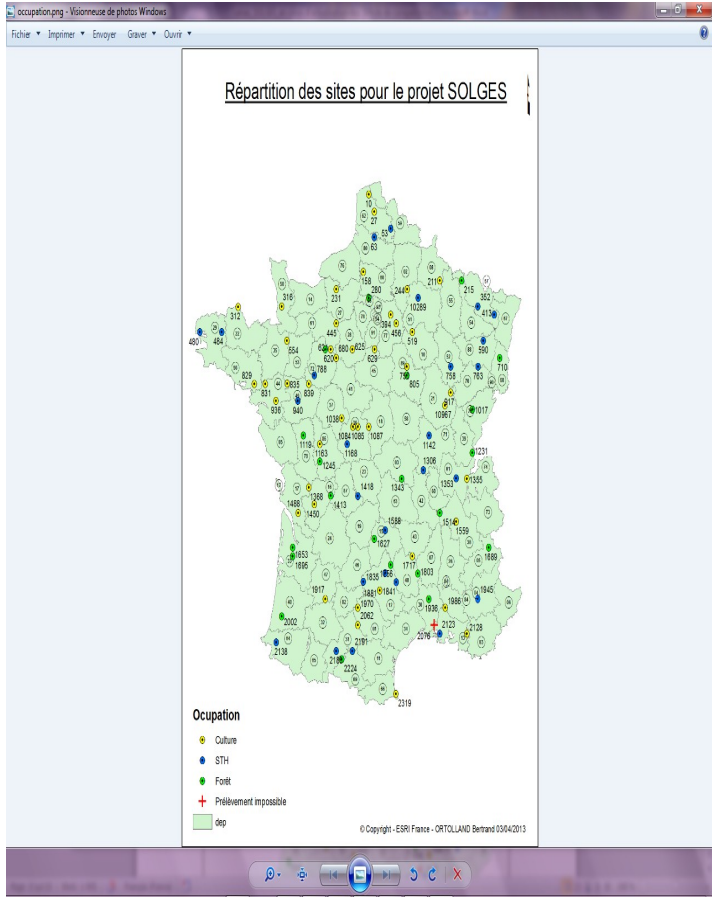
Résultats concernant la sélection des sites

L'occupation des sites



Résultats concernant la sélection des sites

La couverture spatiale



Campagnes de prélèvement



Campagnes de prélèvement



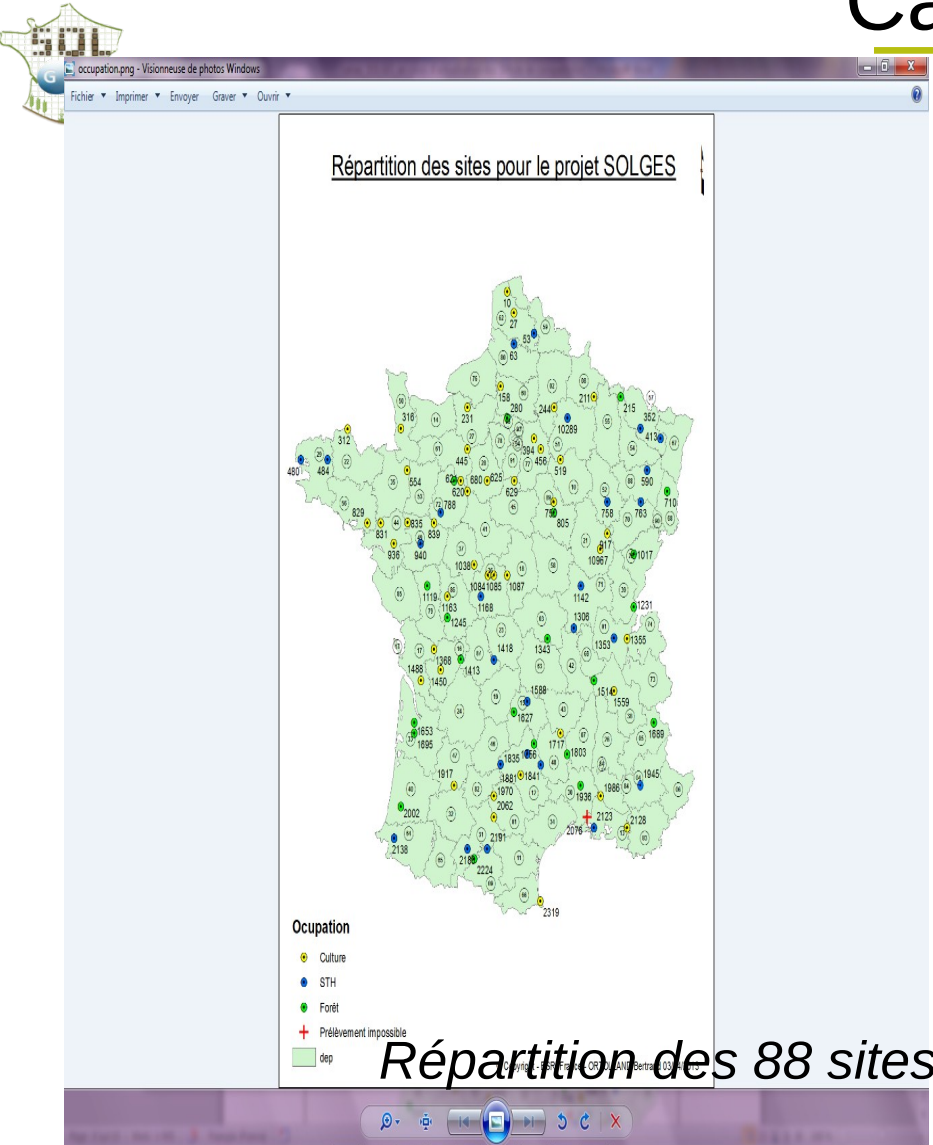
Campagnes conduites en 2013 et 2014

Ces deux campagnes de terrain et la préparation des échantillons ont été réalisées grâce au recrutement de 2 CDD, Nicolas Smialkowski et Gaëtane Chirié, pour aider le personnel de l'UR Sol et d'InfoSol.

Ces prélèvements ont été analysés sur sol frais au laboratoire de Science du Sol, certaines analyses de sols (pH, C, ...) ont été faites au Laboratoire d'Analyses des Sols d'Arras et les propriétés des sols ont ré-utilisés les données de la 1ère campagne RMQS.



Campagnes de prélèvement



Répartition des 88 sites en France

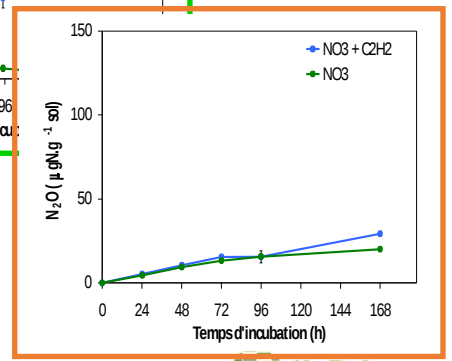
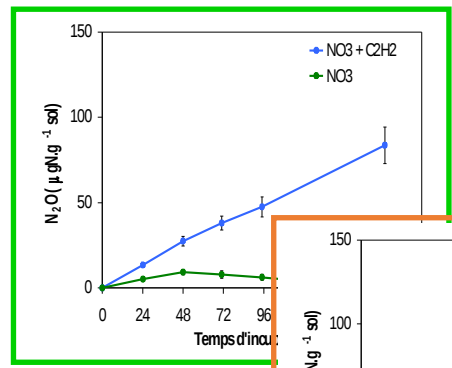
Les reliquats des échantillons de sols sont stockés au Conservatoire,

Quelques échantillons de sol ont fait l'objet d'analyses de génétique microbienne (AgroEcologie Dijon).

En Janvier 2015, Gaëtane C. a restitué les résultats d'analyses aux exploitants des 88 parcelles sélectionnées dans le projet.

Sélection et prélèvement des ~100 échantillons de sol

Mesures de la capacité des échantillons de sol à réduire

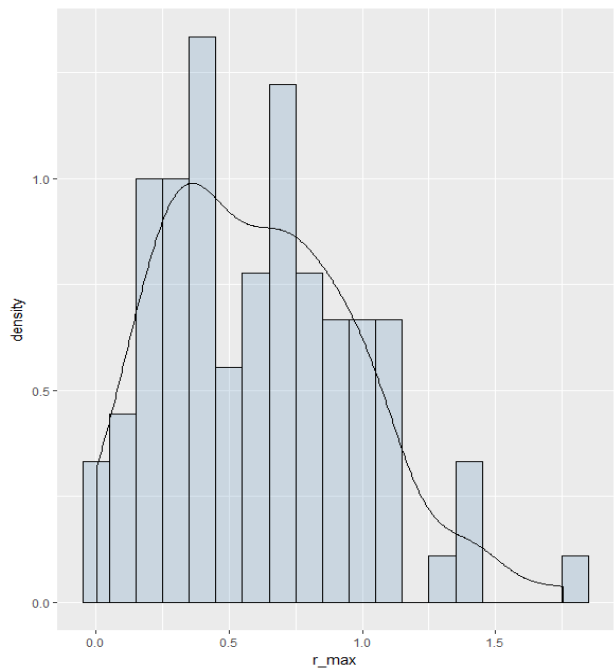
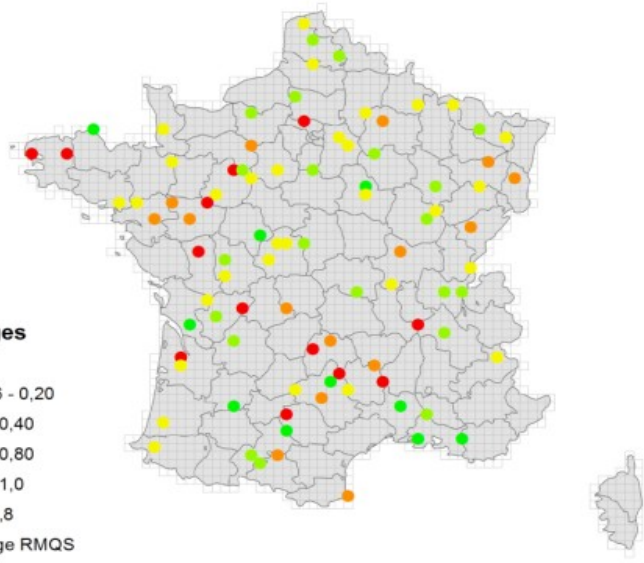




Premiers résultats (locaux)

Les données r_{max}

Sur la base des 88 sites, nous avons identifié 35 situations (40 %) avec une déficience d'efficacité de la réduction de N₂O en N₂



- La figure indique la capacité des sols à réduire N₂O en N₂
 - très efficace en vert
 - moyennement efficace en jaune
 - très peu efficace en orange, rouge)

Conclusions

- Un échantillonnage représentatif de la distribution multivariée des données du RMQS (pH, C, occupation du sol, couverture spatiale)
- Très grand intérêt d'avoir utilisé le RMQS pour définir les sites de prélèvement
- Très bonne mobilisation des exploitants du réseau : Seulement un refus
- La connaissance de la capacité de ces 88 échantillons de sol à réduire N₂O, accompagnée des propriétés physico-chimiques de ces échantillons



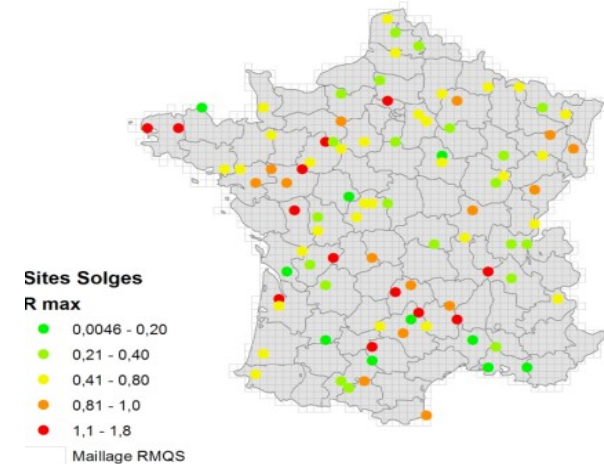
Définition des fonctions de pédotransfert

Hocine Bourennane et Nicolas Saby

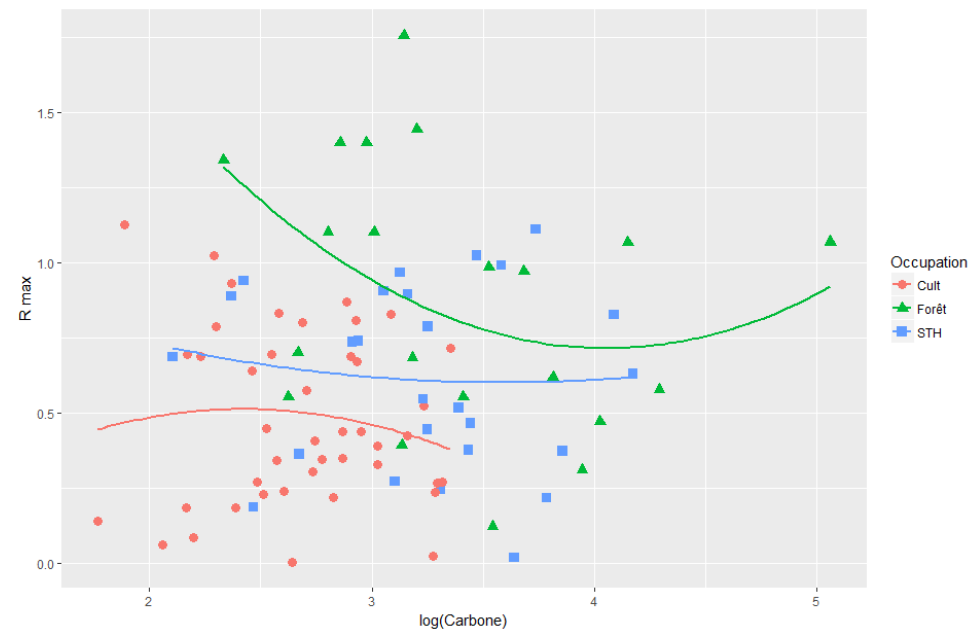
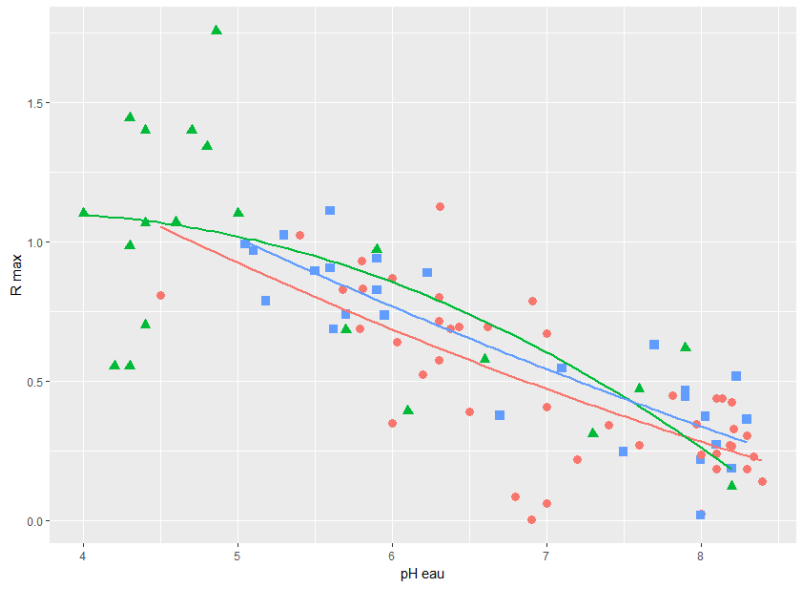


Matériels et Méthodes

- 88 valeurs d'un indicateur r_{max}
 - Obtenues à partir d'un échantillonnage issu de l'hypercube latin D-optimisé permettant de couvrir des gammes adaptées de pH, teneur en carbone, occupation, coordonnées X et Y.
 - Accompagnées des valeurs de 21 propriétés physico-chimiques (pHeau, CEC, Argile,) des sols
- Outils statistiques d'analyse
 - Régressions (simples, polynomiales,)
 - Arbre de régression boostée « GBM »
 - ACP couplée à la modélisation PLS
 - Arbres de classification et de régression couplés à l'analyse factorielle discriminante

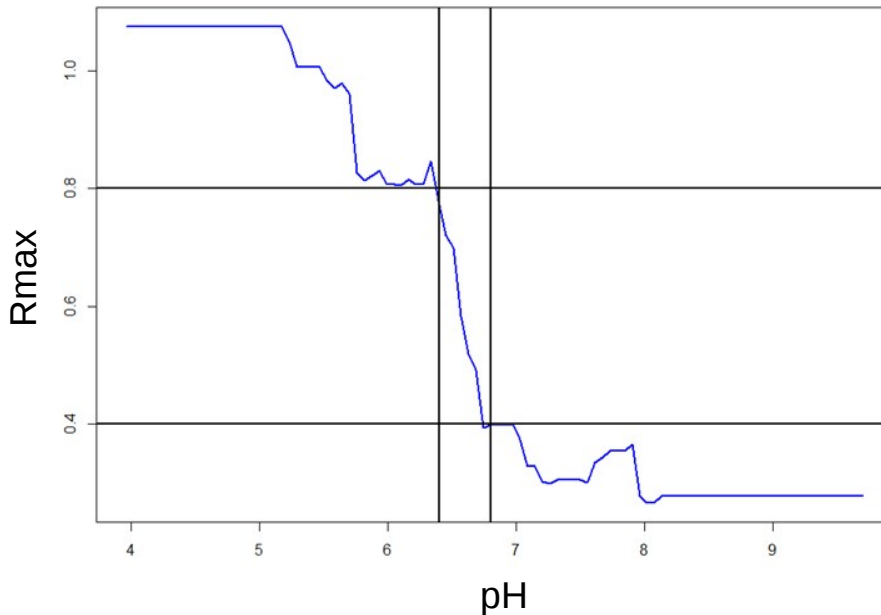


Approche par Régression



Occupation
 ● Cult
 ▲ Forêt
 ■ STH

Approche par Arbre de régression boostée « GBM »



1. $r_{max} > 0.8$ pour les $pH < 6.4$: les sols dont $pH < 6.4$, la fonction de réduction de N_2O est très peu efficace
2. r_{max} chute drastiquement pour $6.4 < pH < 6.8$, passant globalement de 0.8 à 0.4 : dans cette courte zone de variation de pH , la capacité des sols à réduire N_2O devient efficace
3. r_{max} est faible pour les $pH > 6.8$
4. Sur la base de la valeur du R^2 , la qualité de la prédiction s'élève à 72 % avec une précision de 0,2

Rappel : FPT issue ACP - modélisation

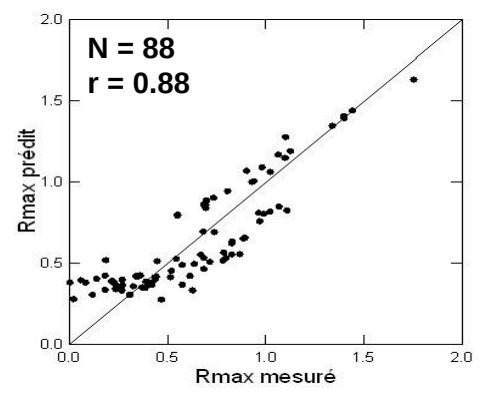
Etape de l'analyse statistique

1. Analyse en Composantes Principales (ACP) : 22 variables (Rmax plus 21 variables pédologiques)
2. ACP avec seulement Rmax , pH, argile, sable grossier, calcium échangeable et la CEC
3. Pour chaque individu, on déduit les valeurs des 4 premières composantes
4. A partir des vecteurs propres on déduit les variables latentes des 6 variables mesurées
5. Transformation inverse sur chaque variable latente pour revenir aux échelles initiales de mesure des variables
6. Régression PLS : $R_{max} = f(\text{pH, CEC, argile....})$ de l'étape 5

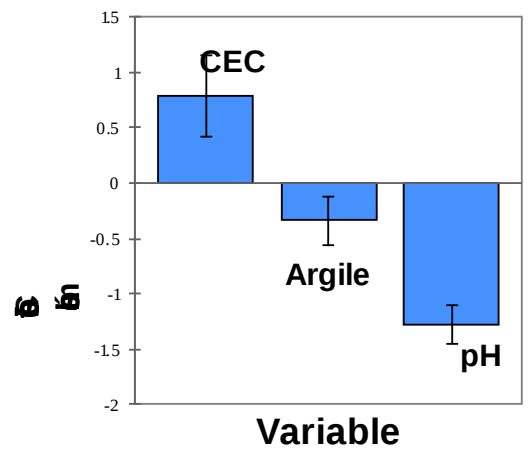


Approche par ACP couplée à l'analyse PLS

| | R_{max} |
|-----------|-----------|
| Constante | 3.131 |
| CEC | 0.026 |
| pH | -0.400 |
| Argile | -0.001 |



Capacité des sols à réduire N₂O : valeurs mesurées vs valeurs prédites par un modèle de régression PLS mettant en œuvre le pH, l'argile et la CEC des sols



| Coefficients normalisés | | | | |
|-------------------------|-------------|------------|------------------------|------------------------|
| Variable | Coefficient | Ecart-type | Borne inférieure (95%) | Borne supérieure (95%) |
| CEC | 0.79 | 0.19 | 0.42 | 1.16 |
| Argile | -0.34 | 0.11 | -0.55 | -0.12 |
| pH | -1.28 | 0.09 | -1.45 | -1.10 |

Importance relative des propriétés physico-chimiques dans le déterminisme de la capacité des sols à réduire N₂O

1. Le facteur pH du sol est un déterminant essentiel de la capacité des sols à réduire N₂O en N₂. Il explique à lui seul 60 % de la variabilité des indicateurs r_{max} (et index) des sols quel que soit le mode d'occupation des sols. La prédiction des indicateurs r_{max} et index est néanmoins améliorée par l'introduction des paramètres CEC et argile.
2. L'ajustement entre pH et r_{max} est amélioré par des approches non linéaires (ajustement polynomiale, GBM).
3. Le pH des sols peut-être directement utilisé comme indicateur de la capacité des sols à réduire N₂O. Une valeur de pH (6.4) de sol en dessous de laquelle, les sols ne sont pas capables de réduire N₂O est ressortie de cette étude par l'approche GBM sur r_{max} (ainsi que par l'approche CART AFD conduite sur l'index).
4. Une valeur de pH au-delà de laquelle les sols sont capables des réduire N₂O est aussi ressortie, à pH = 6.8 pour l'approche GBM sur r_{max}, à pH 7.0 pour l'approche CART AFD sur l'index.
5. Ces observations, conduisent à envisager un plan d'action pour gérer à différentes échelles spatiales les émissions de N₂O par les sols : Faire remonter le pH des sols acides, actuellement en prairie ou cultivés pour qu'ils atteignent des valeurs supérieures à 6.8.



Applications in situ à l'échelle de la parcelle

Cécile Le Gall, Jean-Pierre Cohan et Catherine Hénault





Objectifs Généraux

Nous avons mis en place des essais au champ pour vérifier si le chaulage d'un sol acide permettait de modifier sa capacité à réduire N₂O et par voie de conséquence l'intensité de ses émissions de N₂O.

Ces essais avaient aussi pour objectif d'observer le pas de temps sur lequel ces changements pouvaient s'opérer.

Le choix des sites a été réalisé sur la base des critères suivants :

faible capacité du sol à réduire le N₂O en N₂

pH acide (<=6)

↪ *teneur en matière organique <2% / pas d'apports de produits organiques depuis 2 ans*





Objectifs Généraux

- Le pH apparaît comme l'un des facteurs principaux conditionnant la capacité du sol à réduire N₂O en N₂. Plus un sol est acide, plus cette capacité est faible.
- Nos hypothèses:
 - Cette capacité est évolutive : si le pH , la capacité
 - En chaulant le sol, on augmente le pH et donc la capacité à réduire N₂O en N₂.
- Nos questions:
 - Les effets observés au laboratoire sont-ils transposables au champ?
 - Sous quel pas de temps les changements s'opèrent-ils?

Le choix des sites a été réalisé sur la base des critères suivants :

faible capacité du sol à réduire le N₂O en N₂

pH acide (<=6)

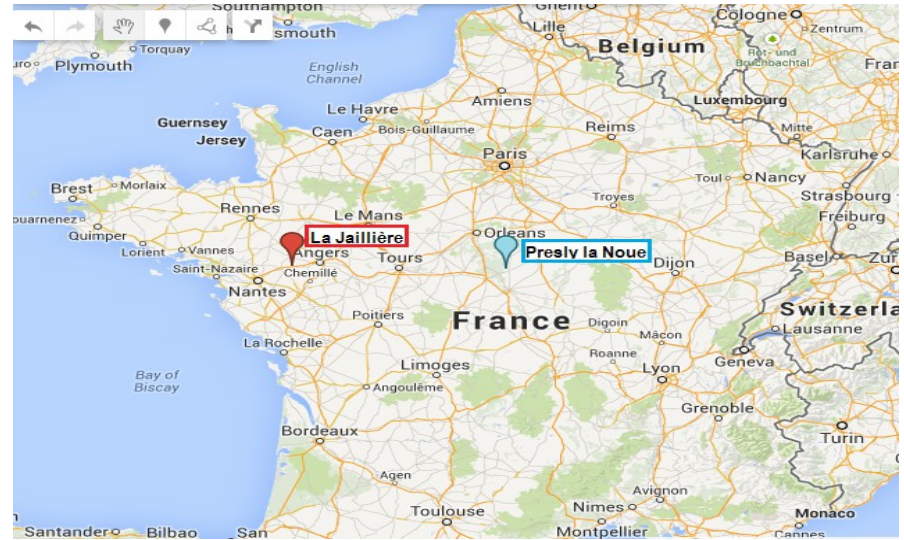


Matériels et Méthodes

Pour y répondre, deux essais ont été mis en place:

La Jaillière (44 - *Arvalis – Institut du Végétal*)
 2013-14 puis 2014-15 (même parcelle)
 Limons battants hydromorphes
 Maïs (2013-14) / blé tendre d'hiver (2014-15)
Test de l'effet de l'apport de chaux (1 T eq CaO/ha)
pH initial : 6.1 / MO: 2.3%

Presly la Noue (18 – *Terres Inovia*)
 2013-14
 Limons sableux
 Moutarde (colza initialement)
Test de l'effet de l'apport de chaux (3 eq CaO/ha) + lisier de porc (25m3/ha)
pH initial : 5.5 / MO: 1.9%



Conditions pour le choix des sites:

- faible capacité du sol à réduire le N₂O en N₂
- ☐ pH acide (<=6)
- ☛ teneur en matière organique <2,5%
- ☛ pas d'apports de PRO depuis 2 ans

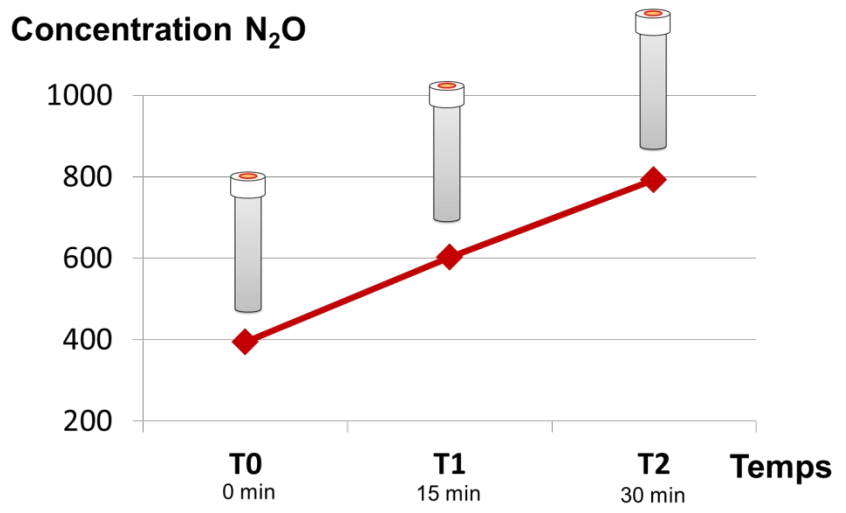
Matériels et Méthodes

- Mesures des émissions de N₂O à l'aide de chambres statiques:
 - 3 chambres/microparcelle
 - 20 mesures / campagne (□ 1 mesure/ semaine)
 - Entre février et juin car □ des températures
 - *Pour Presly la Noue : + 3 mesures à l'automne 2013 car apports de lisier et chaux réalisés avant le semis du colza*
- Mesure du pH, de la T°C du sol et du stock d'azote minéral à chaque date de prélèvement de N₂O
- Mesures régulières de la capacité des sols à réduire N₂O (1/trimestre)



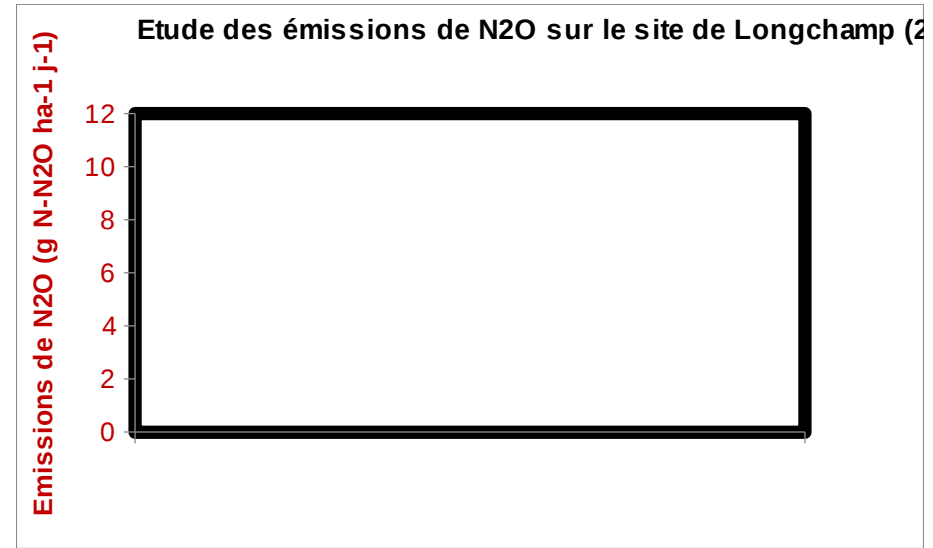
Matériels et Méthodes

- Valeur d'émission ponctuelle obtenue à partir de 3 prélèvements : T0=0min, T1=15min et T2=30min



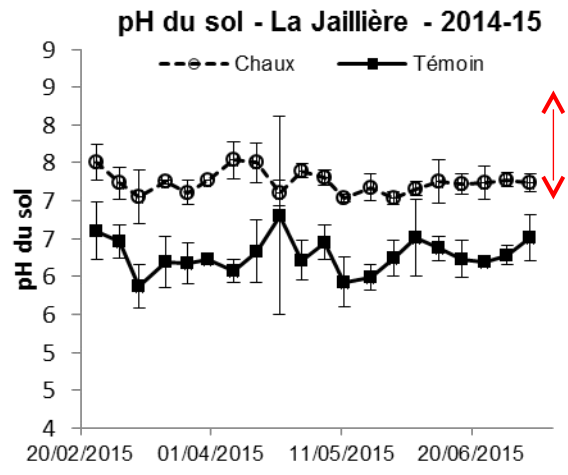
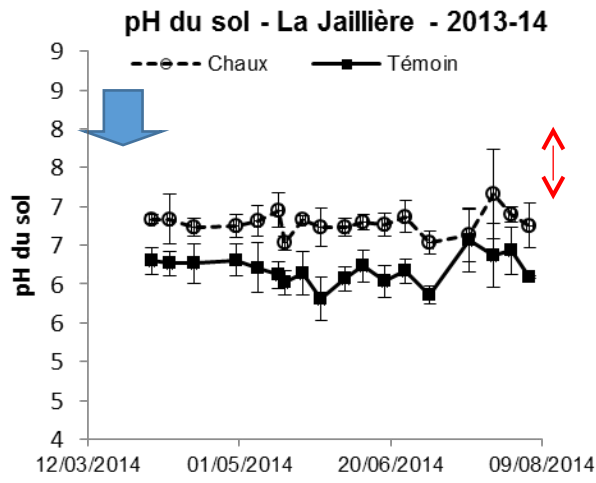
Flux ponctuel : g/ha/jour

- Cumul d'émissions calculées par interpolation linéaire (calcul de « l'aire sous la courbe »)

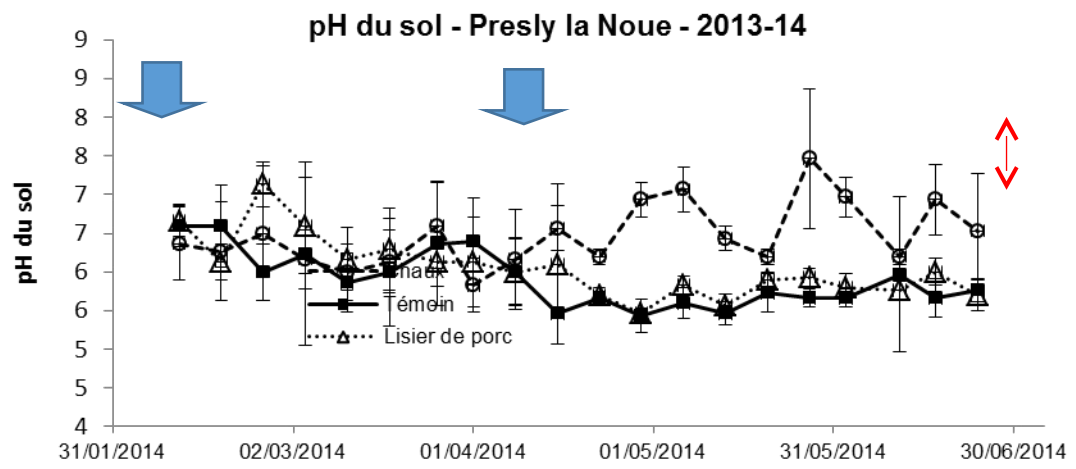


Flux cumulé : kg/ha/an

Résultats – une différenciation significative du pH au champ



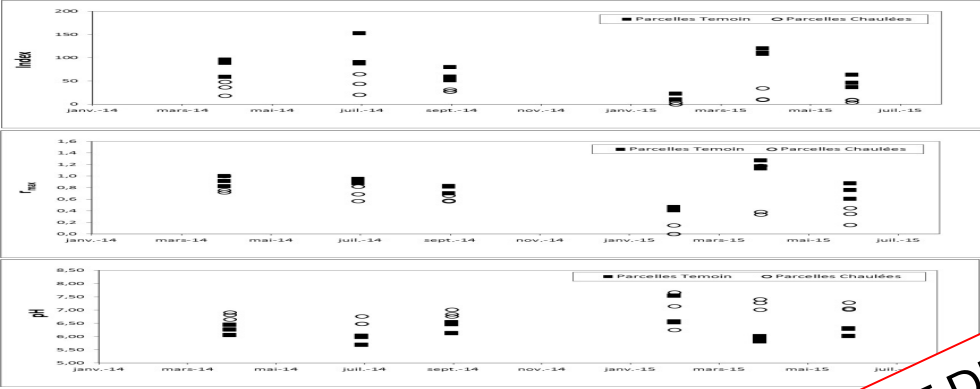
- 1 point d'écart de pH entre les modalités obtenu en 2014-15
- un écart déjà significatif en 2013-14



- un écart insuffisant obtenu à l'automne
- 1 point d'écart obtenu à la seconde moitié de l'essai
- chute à nouveau du pH en 2014-15

Résultats – une relation pH / index confirmée

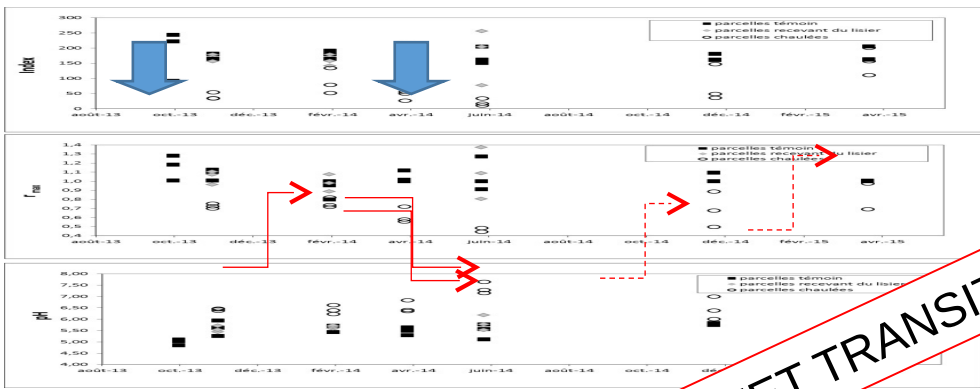
Evolution de l'index – sol de La Jaillère



- Ecart de pH qui s'est maintenue sur les 2 campagnes
- Des index sur les parcelles chaulées < 50 (au lieu de 50 à 100 sur les témoins)

EFFET DURABLE

Evolution de l'index – sol de Presly la Noue

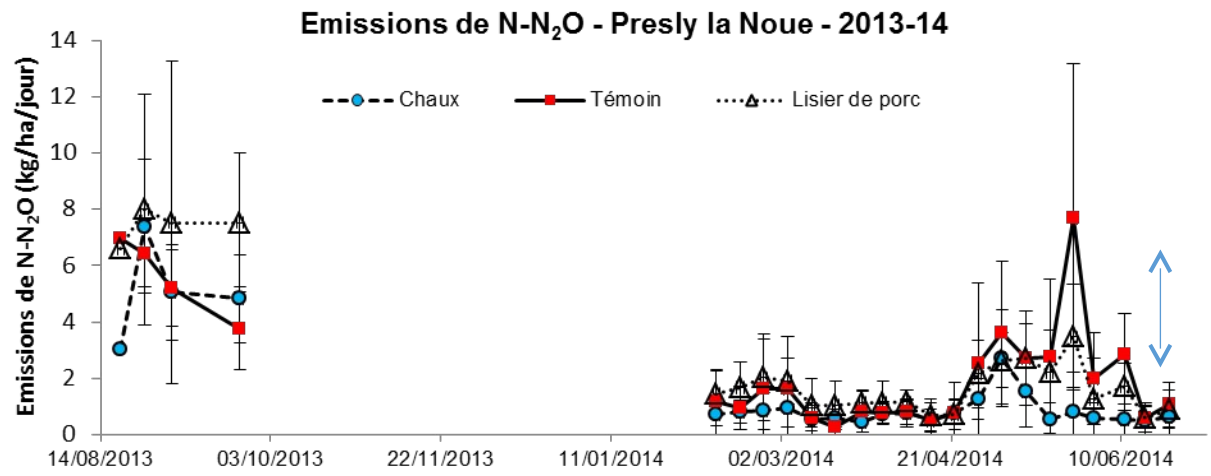
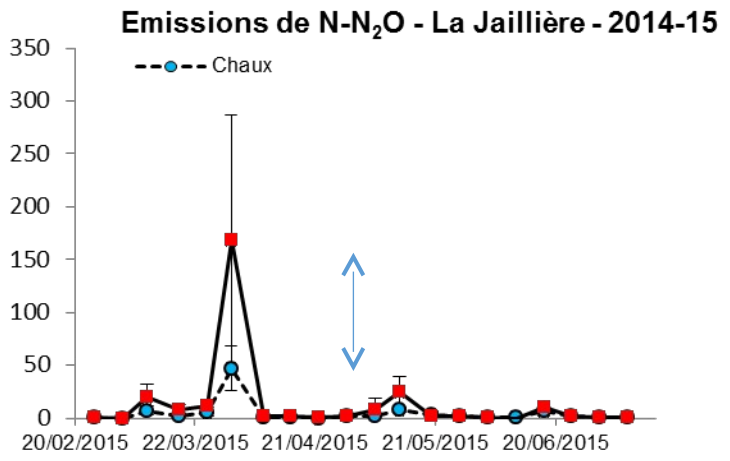
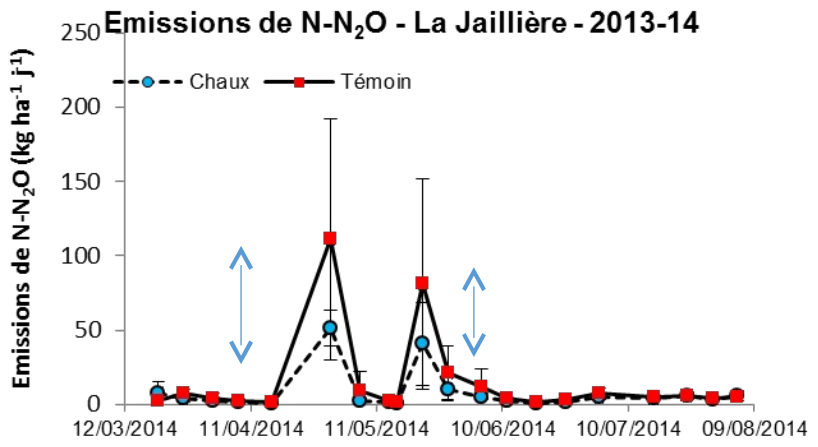


- Pas d'effet du lisier sur l'index
- Remontée du pH sur les parcelles chaulées = index < 50 (au lieu de 150 à 200 pour les témoins)

EFFET TRANSITOIRE

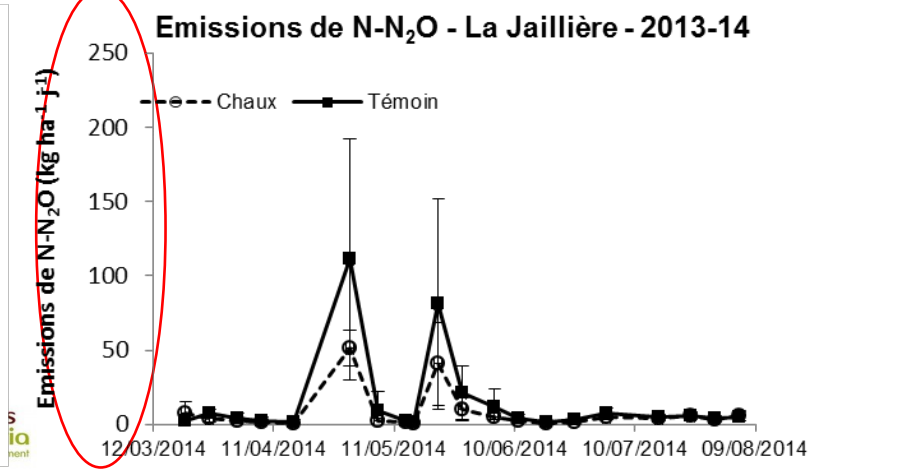
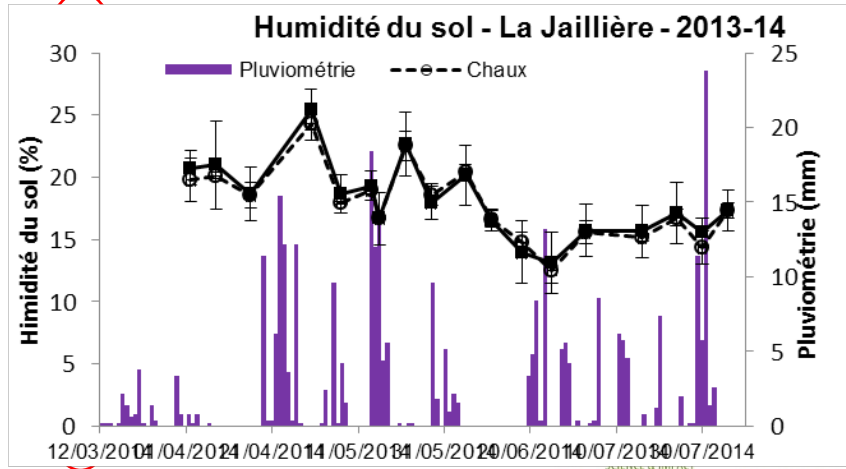
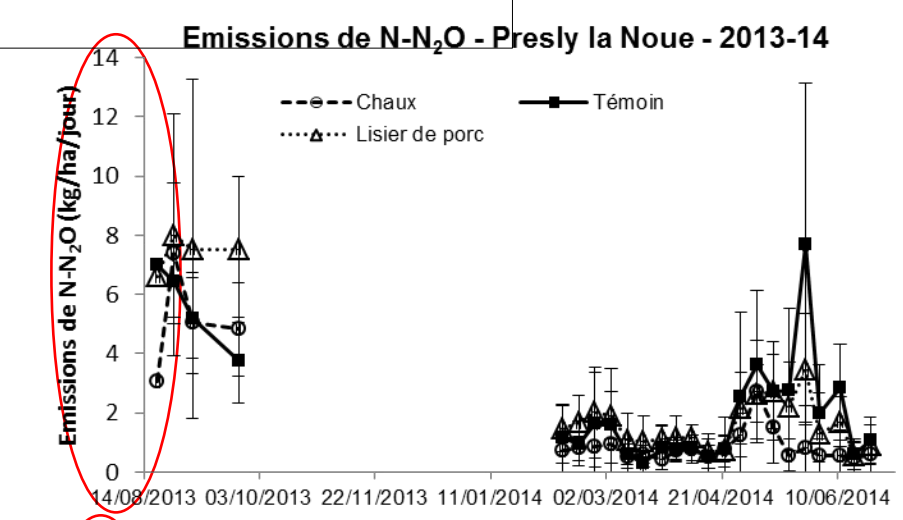
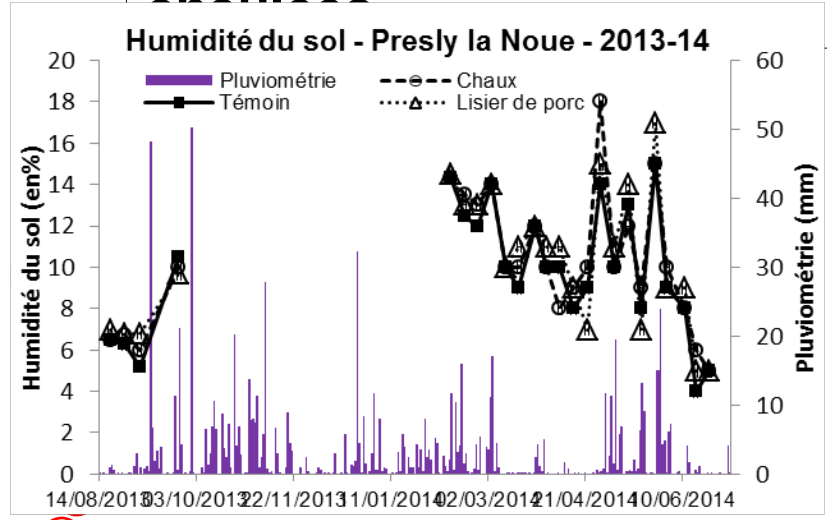
- Puis remontée de l'index progressive avec le pH sur l'année suivante

Résultats – des émissions de N₂O atténuées



-Un effet net du chaulage sur les 2 essais au moment des pics d'émissions
 -Peu d'effet (non significatif) du lisier de porc

Des émissions atténuées sur les parcelles choisées



Résultats – un effet positif du chaulage sur les émissions de N₂O

| Essai | Presly la Noue -2013-14 | La Jaillière – 2013-14 | La Jaillière – 2014-15 |
|--|--|-----------------------------|------------------------------|
| Nb de jours du suivi N ₂ O | 309* | 139 | 134 |
| Flux cumulé sur la période de suivi (kg de N-N ₂ O/ha) | Chaux: 0.69 Témoin : 0.77 <i>Lisier : 1.12</i> | Chaux: 1.2 Témoin : 2.35 | Chaux: 0.65 Témoin : 1.89 |
| % de réduction des flux de N ₂ O modalité Chaux VS Témoin | 10% | 50% | 65% |

* en comptant la partie automnale

Une réduction nette des flux cumulés de N₂O suite au chaulage (en conditions de sols initiales acides)

Résultats – un effet positif du chaulage sur les émissions de N₂O

* *en comptant la partie automnale*

Une réduction nette des flux cumulés de N₂O suite au chaulage (en conditions de sols initiales acides)

Résultats – un effet positif du chaulage sur les émissions de N₂O



| i | Presly la Noue 2014 | La Jaillière 2014 | La Jaillière 2015 | Moyenne | Médiane |
|-----|---------------------|-------------------|-------------------|---------|---------|
| (a) | 26 % | 49 % | 66 % | 44 % | 49 % |

Conclusions

- ❑ Définition d'un protocole répondant aux critères initiaux

- ❑ Livrables produits
 - ❑ Norme technique ISO/TS20121-2:2017 incluant un essai circulaire
 - ❑ Création d'un film décrivant les étapes de conditionnement et d'incubation des échantillons de sol

- ❑ Possibilité de réaliser ce protocole dans le cadre du projet sur environ 100 échantillons



Potentiel d'atténuation des émissions de N₂O à l'échelle nationale

Hocine Bourennane, Nicolas Saby et Catherine Hénault





Objectifs spécifiques

- Prédire spatialement la capacité des sols à réduire N₂O sur la base de leurs propriétés physico-chimiques : « Assiette »
- Evaluer le potentiel d'atténuation des émissions de N₂O par les sols à l'échelle nationale :

Assiette x abattement avec

| i | Presly la Noue 2014 | La Jaillière 2014 | La Jaillière 2015 | Moyenne | Médiane |
|-------------------|---------------------|-------------------|-------------------|---------|---------|
| (a _i) | 26 % | 49 % | 66 % | 44 % | 49 % |



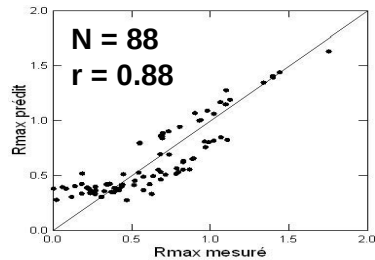
Spatialisation de la capacité des sols à réduire N₂



Matériels et Méthodes

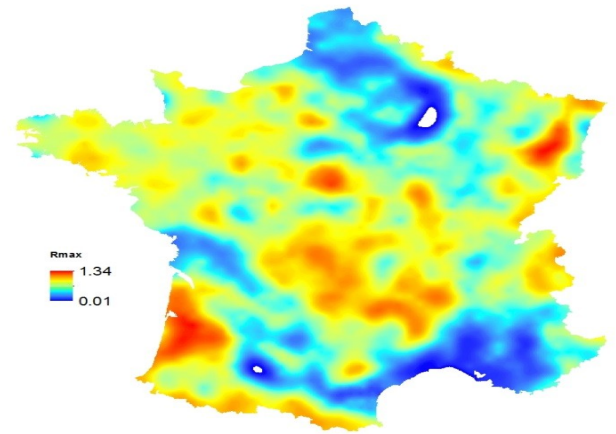
- FPT obtenue par ACP – PLS

| | Rmax |
|-----------|--------|
| Constante | 3.131 |
| CEC | 0.026 |
| pH | -0.400 |
| Argile | -0.001 |



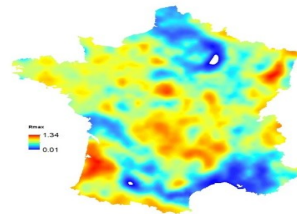
Résultats

- krigeage ordinaire au niveau du territoire à l'aide des mesures de pH, CEC et argile effectuées sur les 2148 sites du RMQS
- Possibilité aussi d'utiliser la BDAT comme base de spatialisation

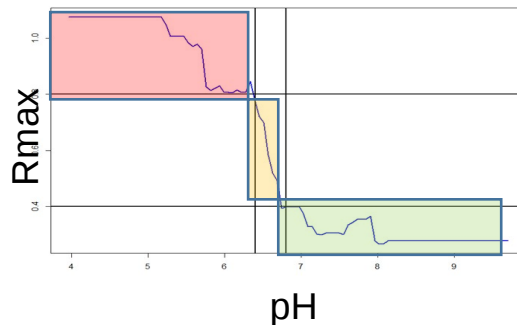


Matériels et Méthodes

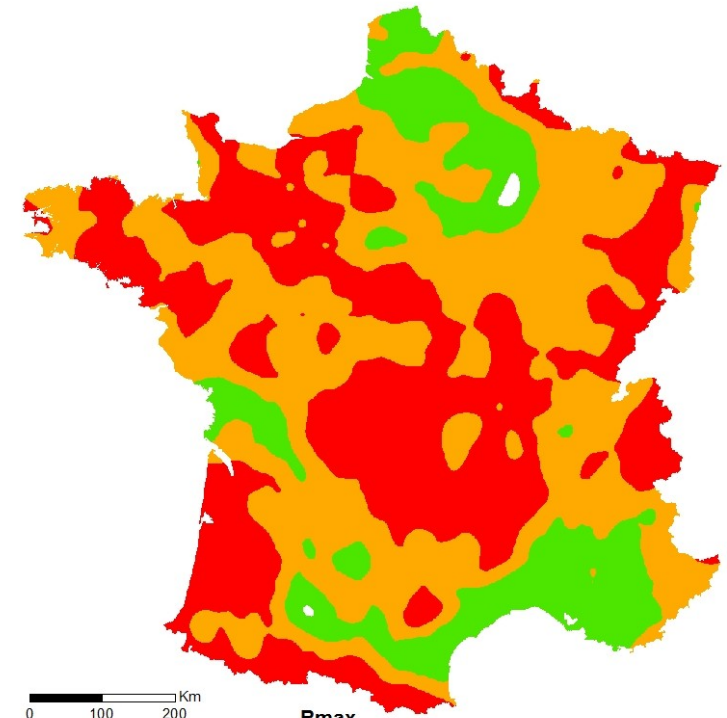
- Carte spatialisée du rmax



- Seuillage sur la base de la relation « GBM » entre pH et capacité des sols à réduire N₂O



Résultats



Compléments sur le calcul de l'assiette

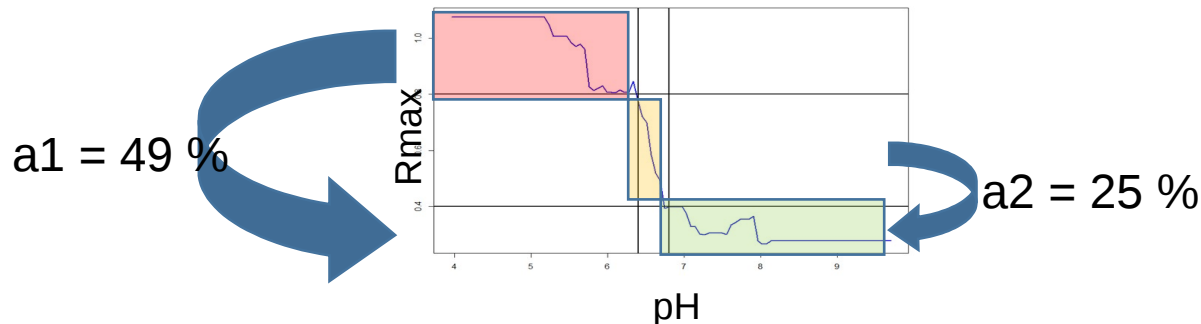
- ❑ Plusieurs approches possibles, un exemple ici détaillé
- ❑ Estimation sur la base de la carte RMQS * GBM : ass1 = 85 % dont 38 % (pH < 6,4) et 47 % (6,4 < pH < 6,8)
- ❑ Prise en compte de logiques agronomiques : le chaulage n'est envisagé que sur les surfaces couvertes par des sols cultivés (41 %) ou toujours en herbe et fertilisées (19 %) – données RMQS : ass2 = 51 %
- ❑ Distinction de 2 sous-assiettes sur lesquelles seront appliquées un abattement :
 - ❑ ass2-1 (pH < 6,4) : 23 %
 - ❑ ass2-2 (6,4 < pH < 6,8) : 28 %

Précisions sur l'abatement

☐ Abattements mesurés *in situ*

| i | Presly la Noue 2014 | La Jaillière 2014 | La Jaillière 2015 | Moyenne | Médiane |
|-------------------|---------------------|-------------------|-------------------|---------|---------|
| (a _i) | 26 % | 49 % | 66 % | 44 % | 49 % |

- ☐ Hypothèse complémentaire : ces abattements ayant été observés sur des sols présentant un $r_{max} > 0,8$, on attribue cet abattement aux sols dont le $pH < 6,4$ et on estime un abattement d'une valeur de moitié pour les sols dont $6,4 < pH < 6,8$



Calcul du potentiel d'abattement

- ❑ Potentiel d'abattement des émissions de N2O par les sols (%) (PN2O)

$$PN2O = ass1 * a1 + ass2 * a2 = 23 * 49 + 28 * 25 = 18 \%$$

- ❑ Contribution des émissions de N2O par les sols au PRG national : 6,5 %

- ❑ Potentiel d'abattement du PRG national PPRG

$$PPRG = 0,18 * 6,5 \% = 1,2 \%$$

- ❑ Résultats obtenus avec d'autres méthodes de calcul de l'assiette, convergents, entre 0,8 et 1 %

- ❑ Possibilité d'introduire des valeurs d'encadrement de ces chiffres, en introduisant des valeurs haute et basse d'abattement, exple présenté [0,62 – 1,57], toutes démarches confondues,

Conclusions Générales

- ❑ Projet qui s'est extrêmement bien déroulé avec réalisation de l'ensemble des tâches annoncées :
 - ❑ Il démontre la pertinence de travailler sur l'étape de réduction de N₂O pour diminuer les émissions de ce gaz par les sols
 - ❑ Il met en avant l'intérêt du chaulage des sols pour stimuler cette fonction
 - ❑ La démarche du projet SOLGES pourrait être appliqué à d'autres échelles et/ou sur d'autres fonctions enzymatiques des sols
 - (1) mettre en place des campagnes de mesure des émissions de N₂O pour mieux préciser l'abattement des émissions de N₂O par les sols générés par le chaulage,
 - ❑ Pour aller plus loin, il conviendra :
 - (2) accompagner ces travaux d'une meilleure connaissance du cycle de vie du chaulage. Cette analyse est peut-être déjà faite et il conviendra dans un premier temps de mettre en place des échanges adaptés sur ce point et
 - (3) approfondir la connaissance des mécanismes d'inhibition de la N₂O réductase dans les sols acides.
-
- Dans le plus long terme (5 à 10 ans), éventuellement mettre en place un plan spécifique de chaulage des sols afin de diminuer les émissions de N₂O par les sols.
 - On pourrait envisager de créer un dispositif incluant un réseau de mesures pour des estimation d'abattement, un dispositif de connaissance des surfaces chaulées et de porter ces chiffres au niveau de l'IPCC, en parallèle de la démarche réalisée par la Nouvelle Zélande avec l'utilisation d'inhibiteur de la nitrification