

Sous le haut patronage



Avec le soutien



EFFET DU PH DU SOL SUR LES ÉMISSIONS DE COMPOSÉS AZOTÉS GAZEUX

REGARDS CROISÉS SUR LES ÉMISSIONS D'AMMONIAC (NH₃) ET CELLES DE PROTOXYDE D'AZOTE (N₂O)

Catherine Hénault
INRAE – AgroEcologie - Dijon

Sophie Générmont
INRAE – EcoSys – Thiverval Grignon

Sous le haut
patronage

Les émissions de composés azotés au champ



N₂O

Mécanismes

respiratoires microbiens

qq kg ha⁻¹ an⁻¹

pics conjoncturels (pluie, fertilisation...)

Changement climatique (6 %) échelle globale

Distribution logNormale des flux (spatialement et temporellement)

NH₃

Équilibres

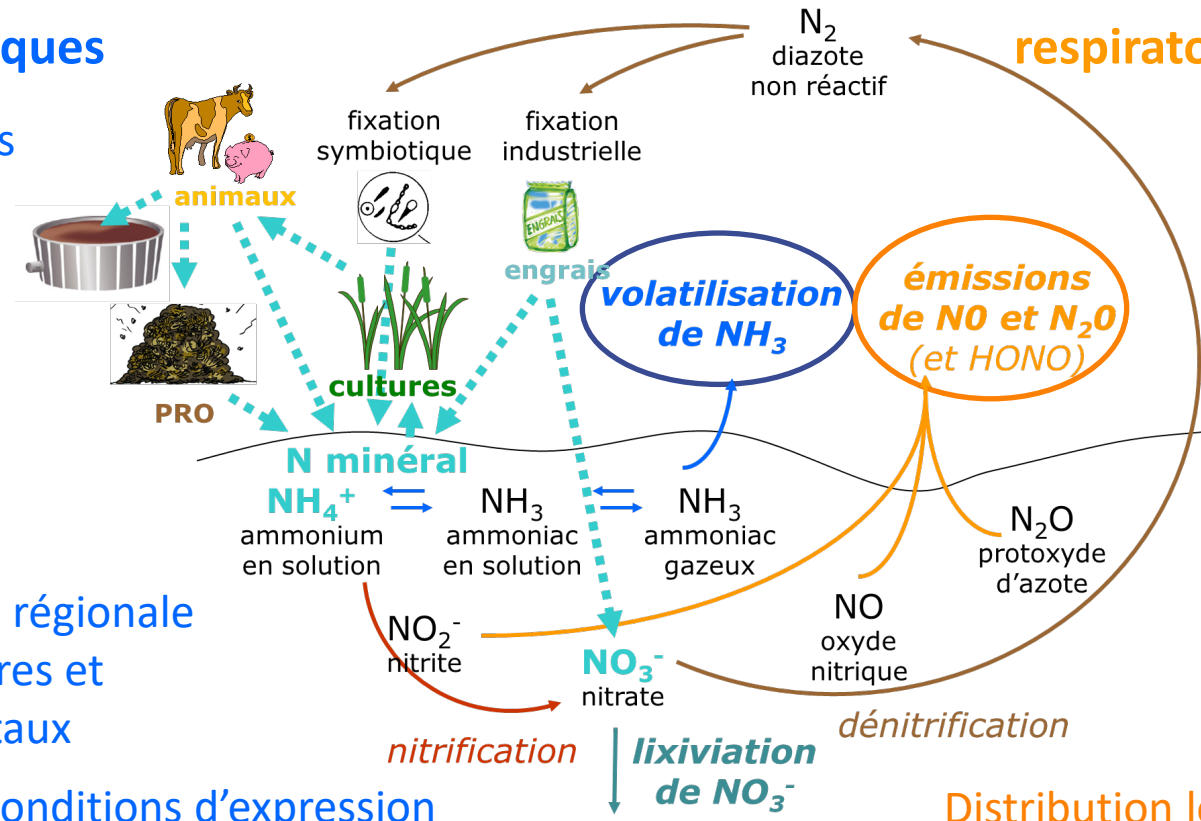
physico-chimiques

qq à qq dizaines de kg ha⁻¹ application⁻¹

en qq jours à qq semaines après l'apport

Qualité de l'air échelle locale à régionale
Impacts sanitaires et environnementaux

Variabilité des conditions d'expression des facteurs de contrôle



volatilisation de NH₃

émissions de NO et N₂O (et HONO)

N₂ diazote non réactif



animaux

fixation symbiotique

fixation industrielle



engrais

cultures

PRO

N minéral

NH₄⁺ ammonium en solution

NH₃ ammoniac en solution

NH₃ ammoniac gazeux

NO₂⁻ nitrite

NO₃⁻ nitrate

N₂O protoxyde d'azote

NO oxyde nitrique

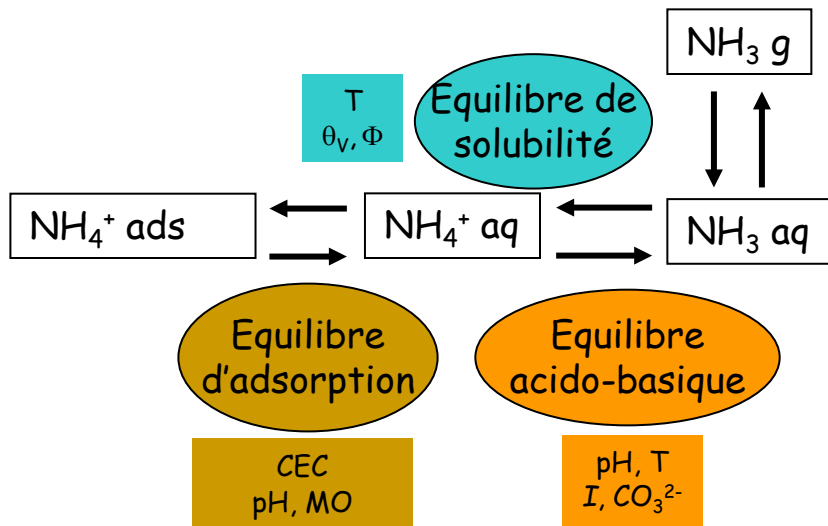
nitrification

lixiviation de NO₃⁻

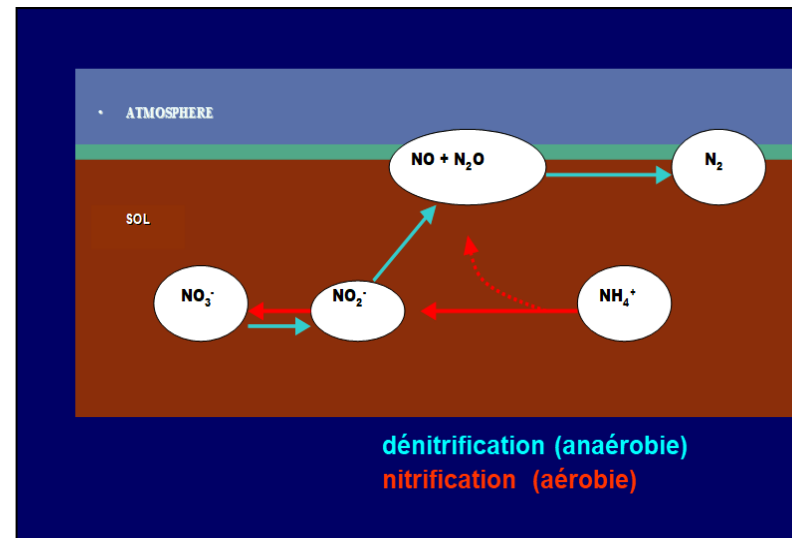
dénitrification

MÉCANISMES SOUS-JACENTS A CES ÉMISSIONS

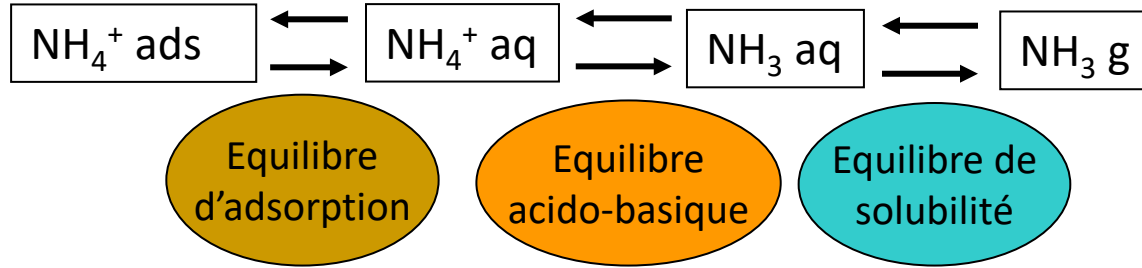
NH₃ Des équilibres physico-chimiques



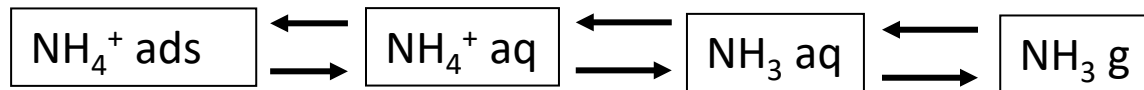
N₂O Des respirations microbiennes



Sous le haut patronage



Sous le haut patronage

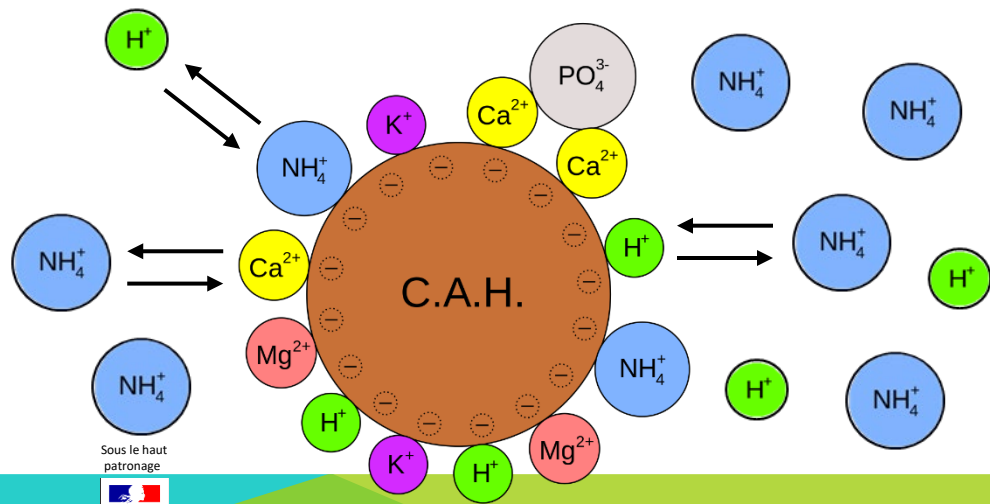


Equilibre d'adsorption

Equilibre acido-basique

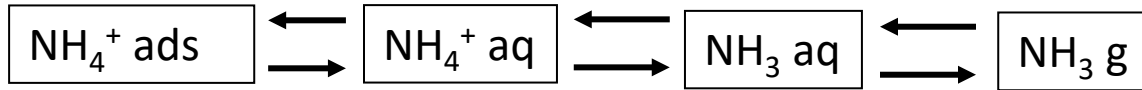
Equilibre de solubilité

CEC, pH, SS, MO



Compétition
 entre les ions NH₄⁺ et H₃O⁺
 pour les mêmes sites
 du Complexe Argilo Humique

Sous le haut patronage



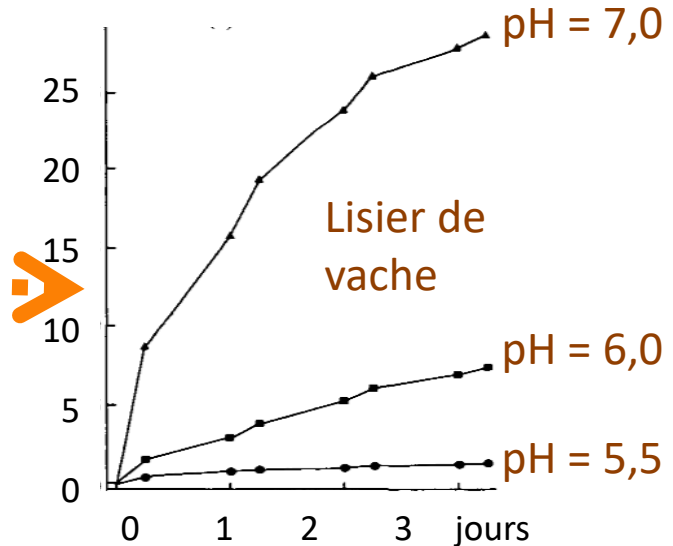
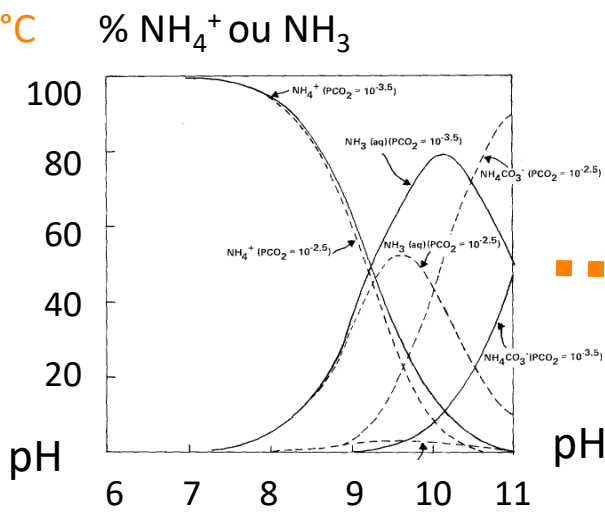
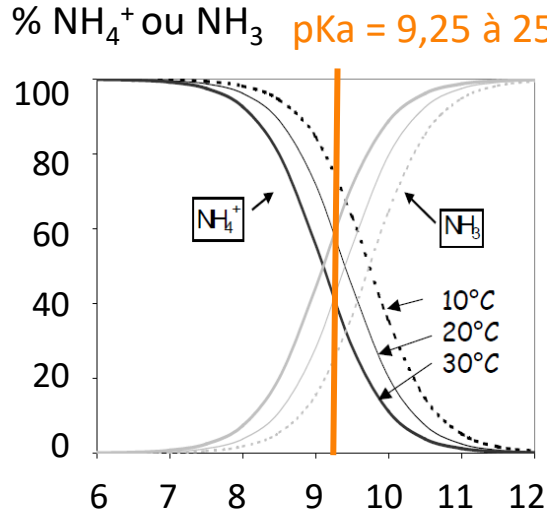
Equilibre d'adsorption

Equilibre acido-basique

Equilibre de solubilité

pH, T, I, CO₃²⁻

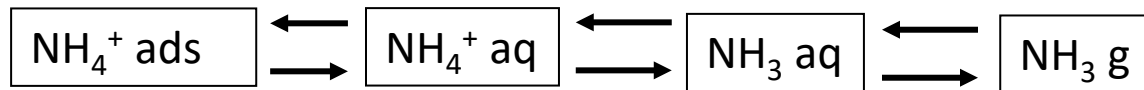
Volatilisation cumulée sur 3,25 jours (% de l'apport)



Solution aqueuse idéale
 Sommer et Olesen (1991)

En présence de composés dissous
 Vlek et Caswell (1981)

Au champ
 Stevens et al. (1989)



Equilibre d'adsorption

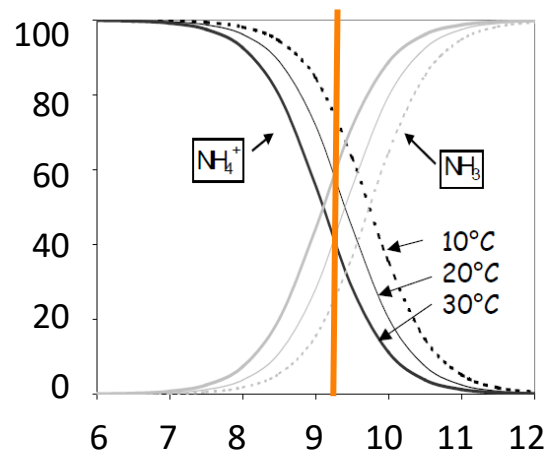
Equilibre acido-basique

Equilibre de solubilité

pH, T, I, CO₃²⁻

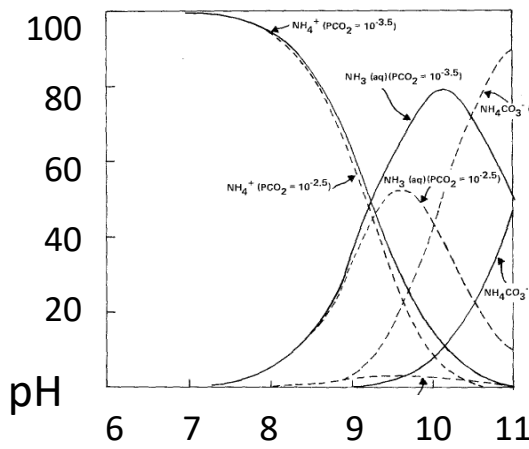
Volatilisation cumulée sur 10 jours (% de l'apport)

% NH₄⁺ ou NH₃ pKa = 9,25 à 25°C

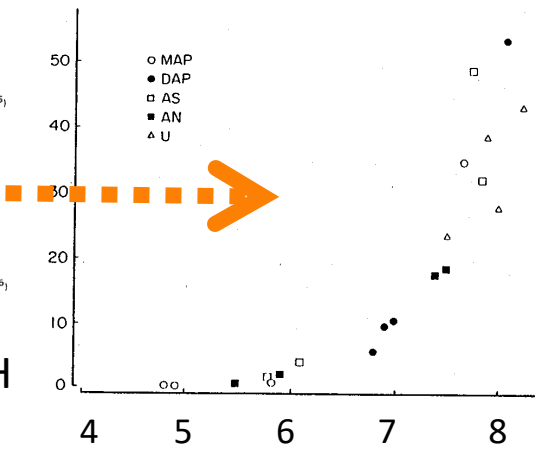


Solution aqueuse idéale
Sommer et Olesen (1991)

% NH₄⁺ ou NH₃



En présence de composés dissous
Vlek et Caswell (1981)



Au champ
Whitehead et Raistrick (1990)

pH
24h après
fertilisation

MÉCANISMES SOUS-JACENTS - NH₃, des équilibres physico-chimiques en forte interaction avec d'autres équilibres et réactions influençant le pH

Consommation de protons

- ✓ Hydrolyse de l'urée
- ✓ Volatilisation du CO₂
- ✓ Volatilisation des COV

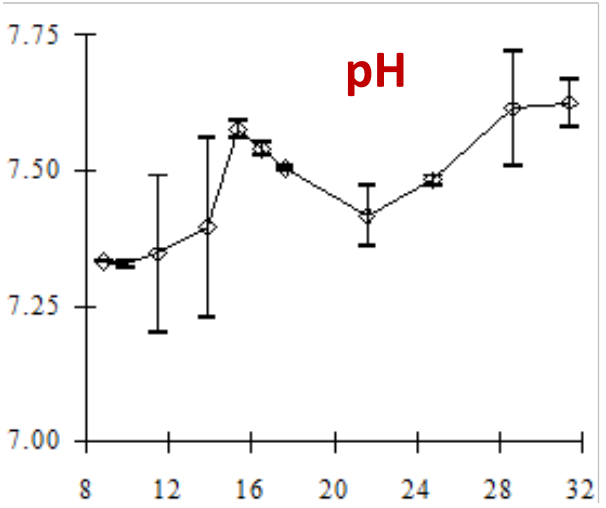
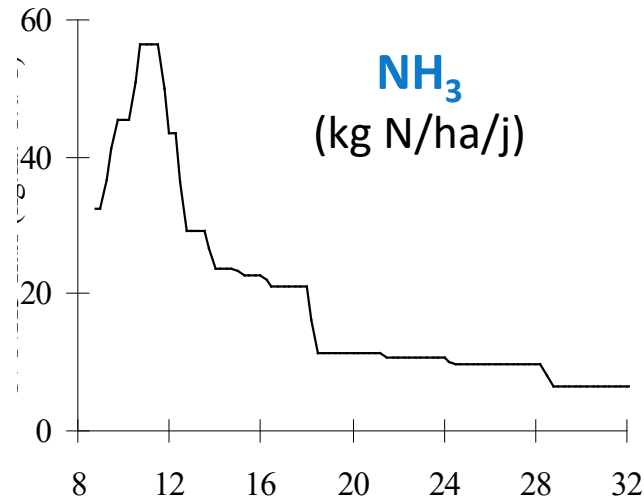
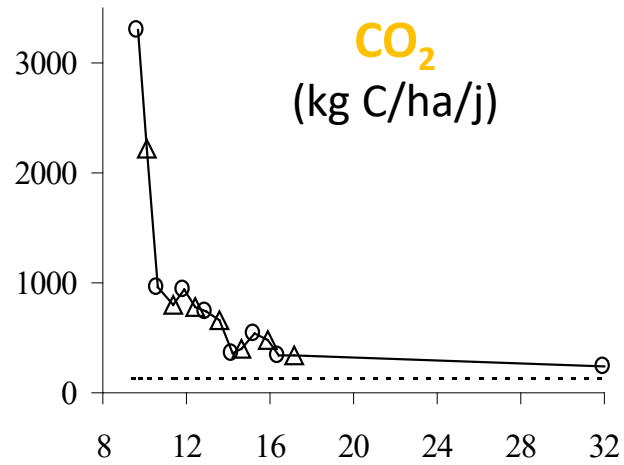
pH ↗ Volatilisation ↗

Production de protons

- ✓ Volatilisation de NH₃
- ✓ Nitrification

pH ↘ Volatilisation ↘

lisier bovin 133 m³/ha pH 7,2
 15 mars à 8h
 sol breton à pH 6,6

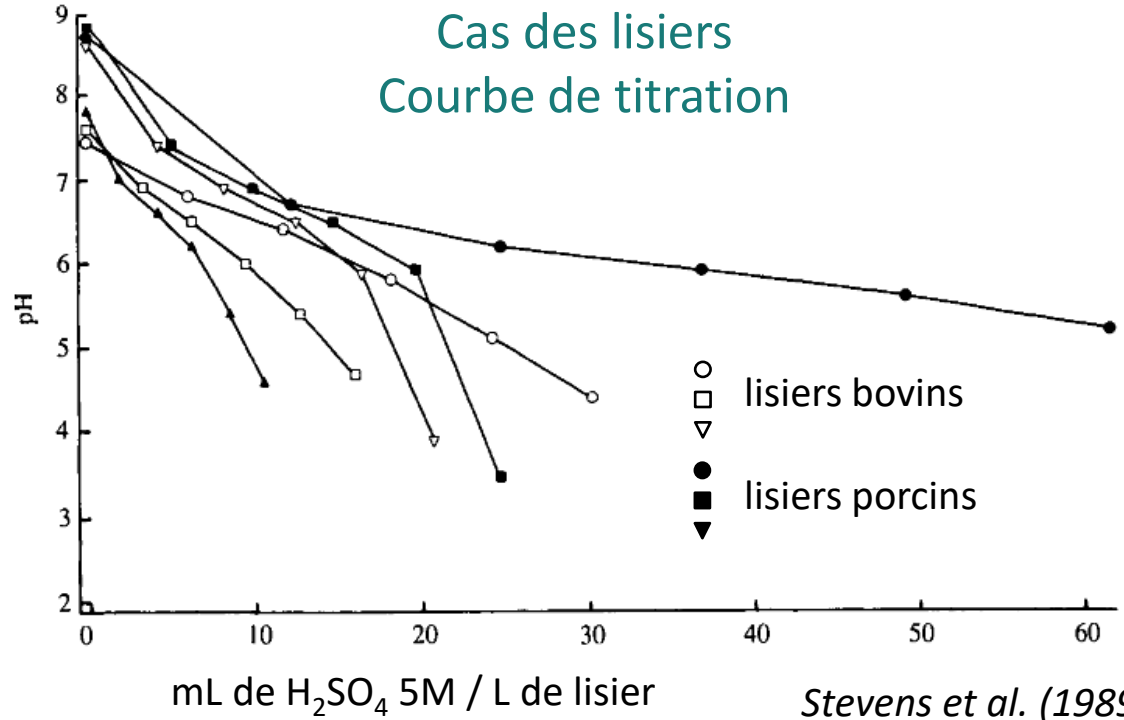




+ Rôle du pouvoir tampon β
modère les fluctuations de pH

- sol (carbonates)
- engrais

Cas des lisiers
Courbe de titration

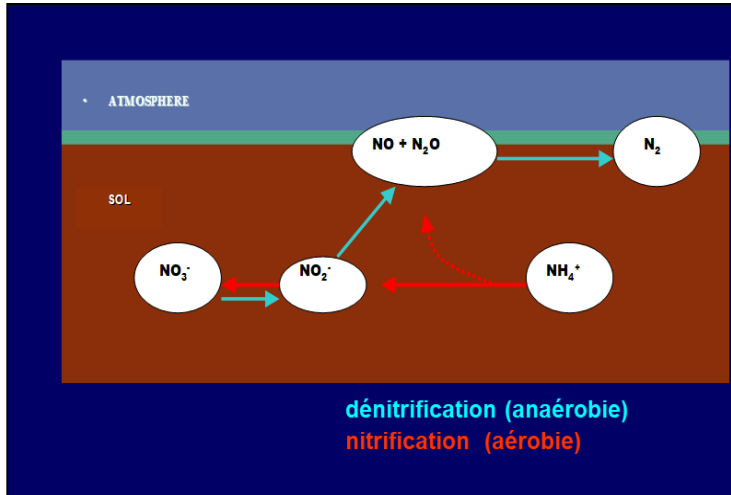


Stevens et al. (1989)

Sous le haut patronage

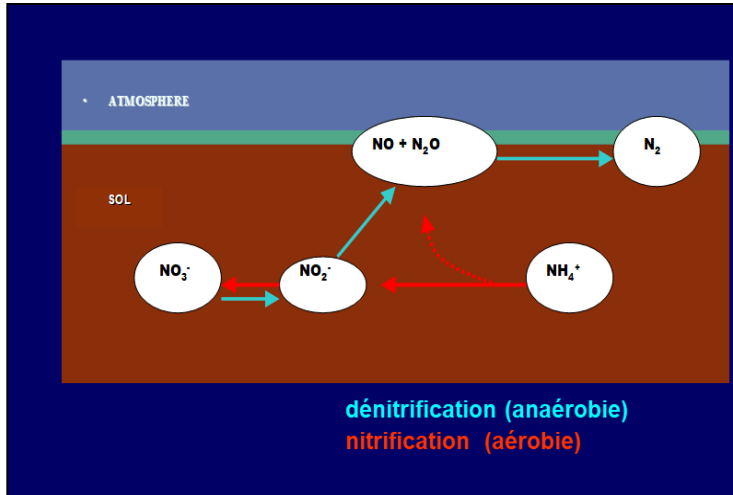


pH et émissions de N₂O

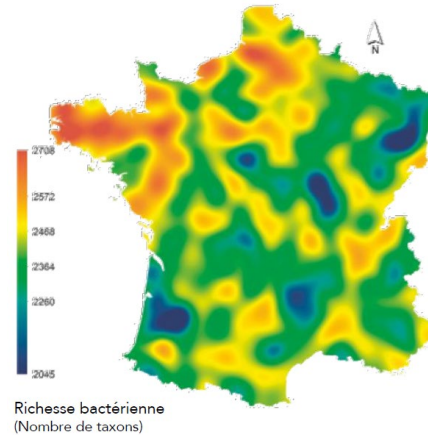


Sous le haut patronage

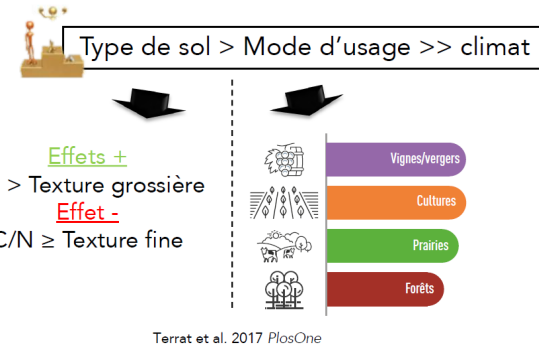
pH et émissions de N₂O



Diversité des bactéries du sol



Richesse bactérienne
(Nombre de taxons)



Terrat et al. 2017 PlosOne

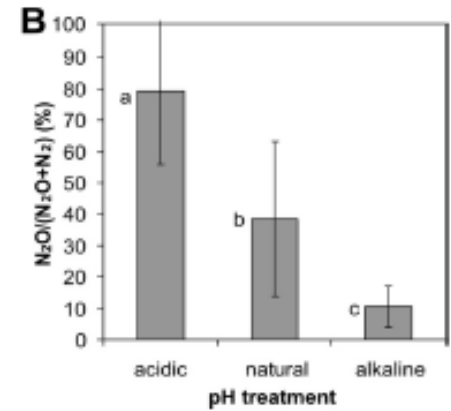
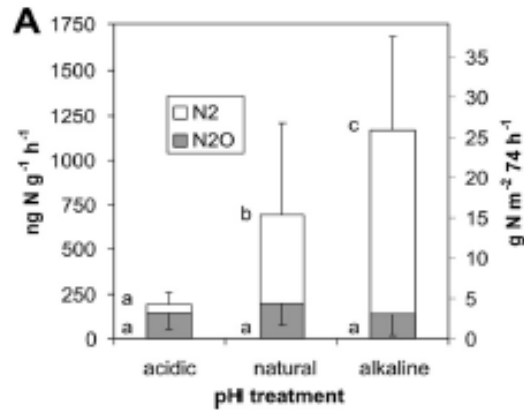
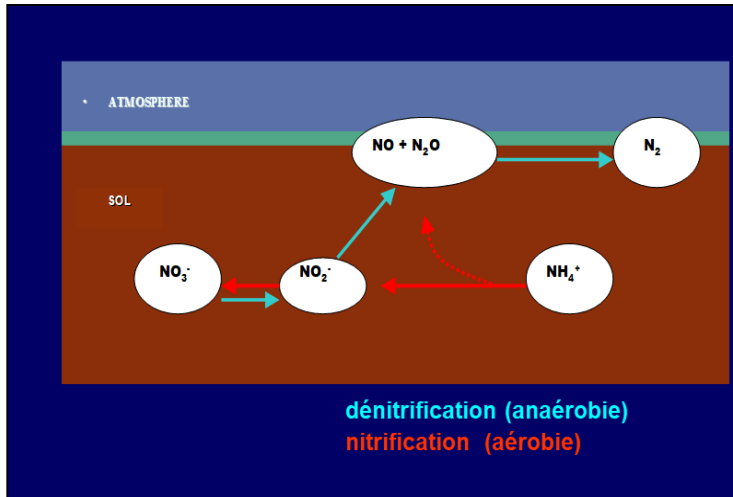
« des habitats microbiens principalement caractérisés par :

- le pH du sol
- les modes d'usage, »

Karimi et Ranjard, 2019

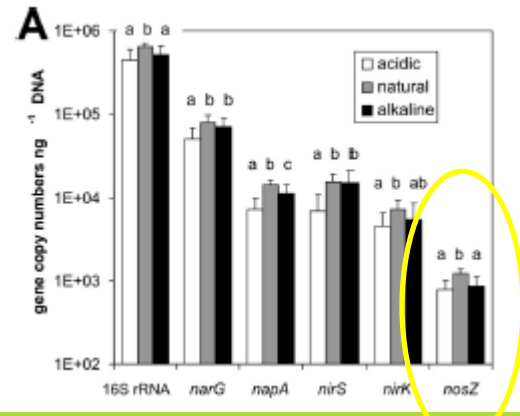
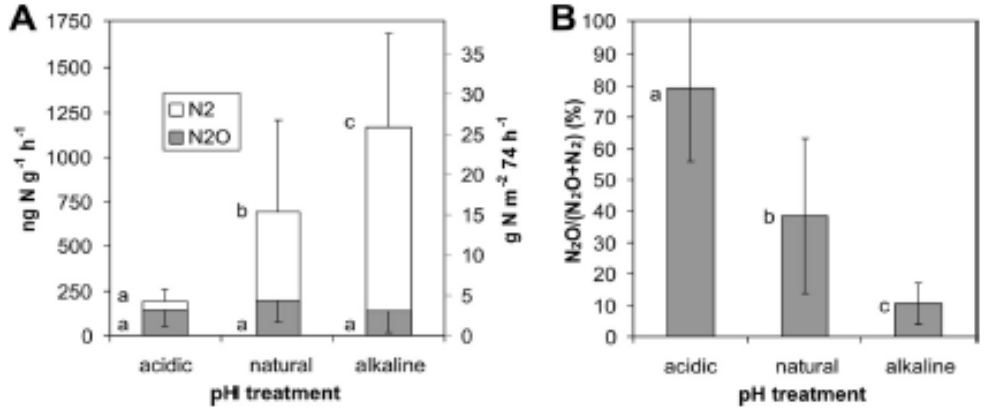
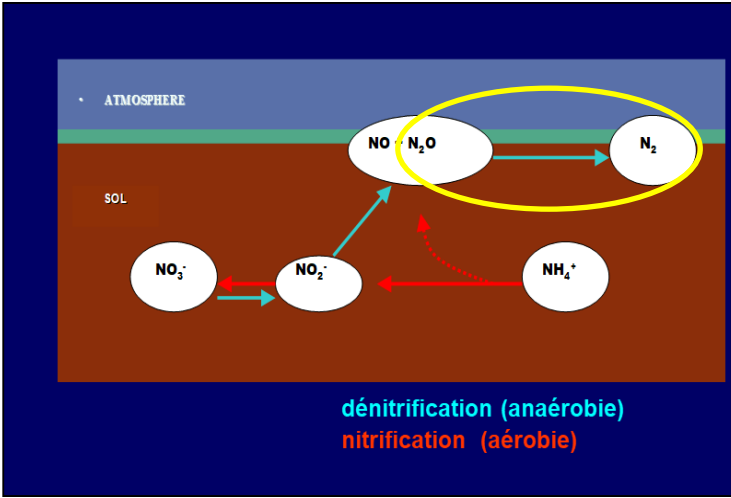
Sous le haut patronage

pH et émissions de N₂O



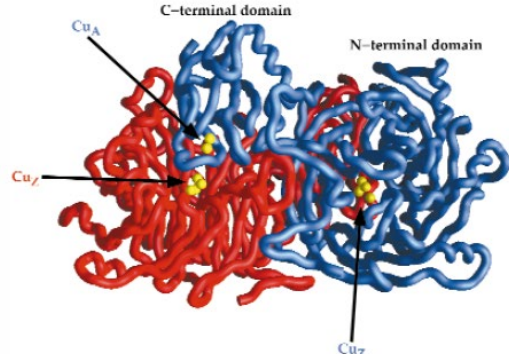
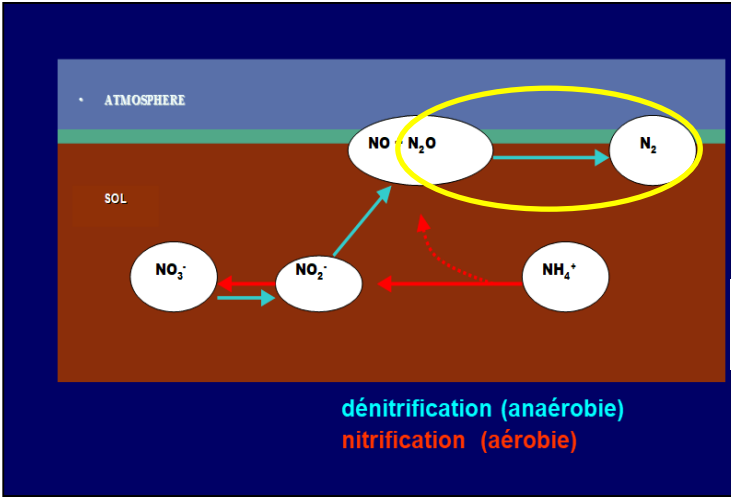
Cuhel et al., 2010

pH et émissions de N₂O



Cuhel et al., 2010

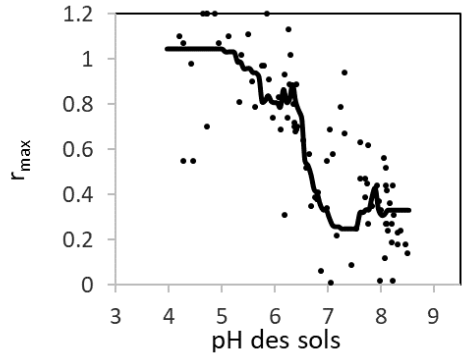
pH et émissions de N₂O



Rosenzweig, 2000

nature structural biology • volume 7 number 3 • marci

- La forme de la relation



Hénault et al., 2019

« Assemblage de l'enzyme impacté par les pH bas (de l'ordre de <6,1, ...) »

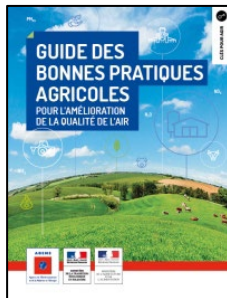
Liu et al., 2013 in Shaaban et al., 2019

Sous le haut patronage

Etat de l'art



France :
acidification
non
préconisée



Europe du Nord :

Pratique de l'acidification des lisiers



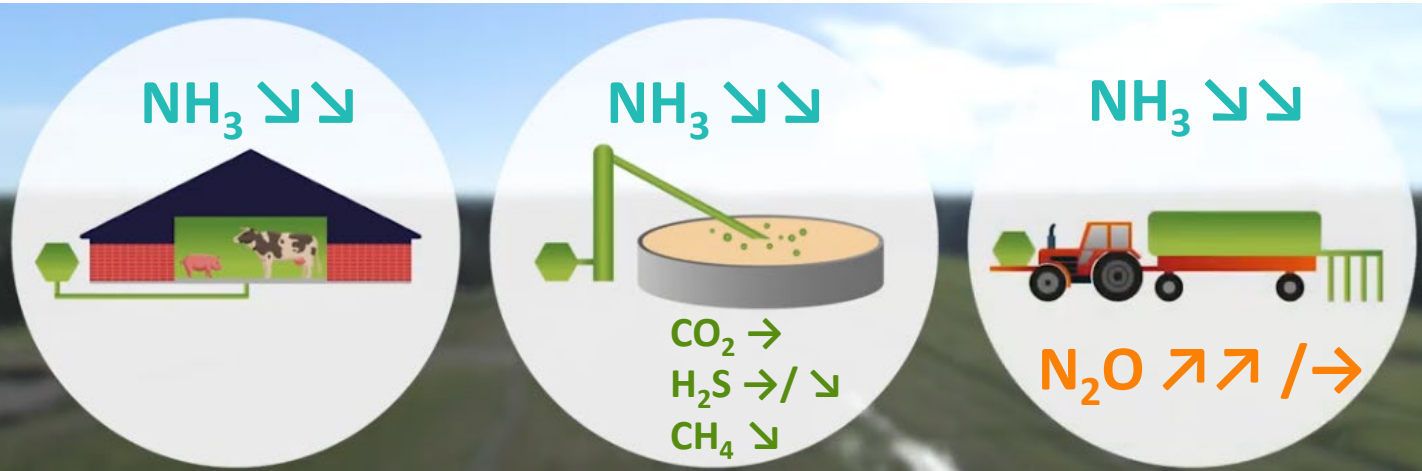
Background



- En France, solution qui n'avait pas pu être traitée dans l'étude GES (2013) par manque de connaissance ce qui a évolué (Hénault *et al.*, 2019)
- International, des positionnements différents selon les pays du fait des émissions de CO₂
- Les équipes qui travaillent sur ce thème à l'international :
 - Shaaban *et al.*
 - Dörsh *et al.* (Projet européen MAGGE)
 - Hénault *et al.* (Projet Isite-Industrie BFC NatAdGES)



NH₃ cas des lisiers

Dépend : poste (bâtiment, stockage, épandage) - type d'acide (fort/autre) - pH objectif/obtenu - type de lisier (bovin/porcin) - délai acidification/application - association séparation - météo



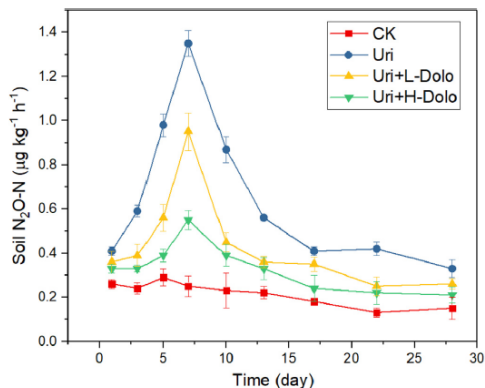
≡ séparation 
+ apport en bande
≡ injection
↗ 
↗ minéralisation
↗ disponibilité du P
↗ lixiviation du NO₃⁻

France : ➤ Cas des fumiers (et composts) et des engrais de synthèse
➤ Intérêt technico-économique
➤ Impacts à long terme ?

Sous le haut patronage

LA GESTION DU pH COMME LEVIER D'ATTÉNUATION DE CES ÉMISSIONS

N₂O



Shaaban et al., 2019

- La démonstration de l'atténuation des émissions de N₂O par les sols par la gestion du pH (↗) est bien documentée en précisant les valeurs de pH à atteindre

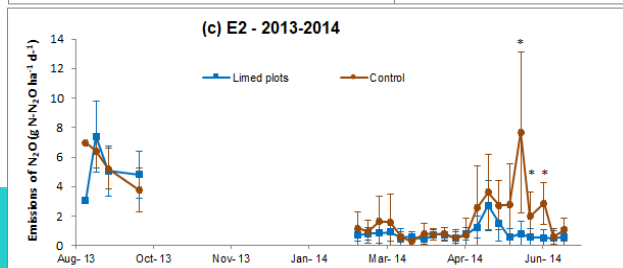
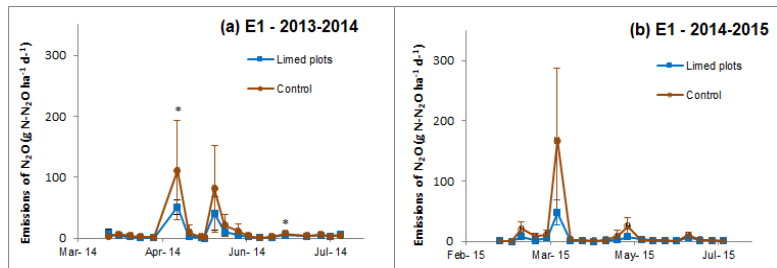
pH



Chaulage

agro-pédologique

climatique

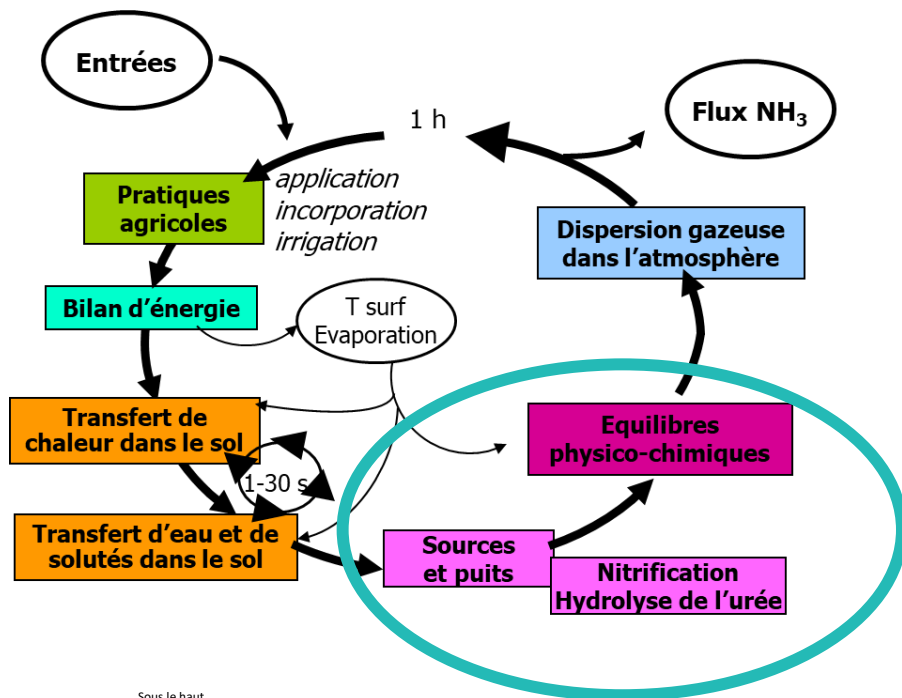


Hénault et al., 2019

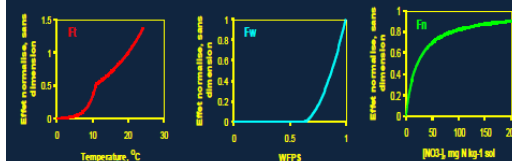
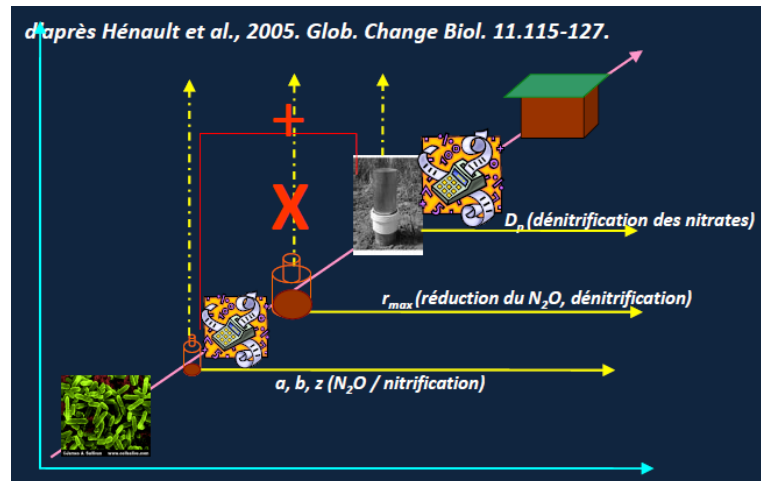
- Les points à consolider :
 - Le bilan GES complet (CO₂, N₂O) de la pratique du chaulage (devenir du carbone des carbonates, durée d'action des produits chaulant - IPCC, West et al., 2005, Hénault et al., 2019)
 - Les éventuelles interactions avec les émissions d'ammoniac
 - Notre capacité à gérer précisément le pH des sols

MODÉLISATION DES ÉMISSIONS

Modèles dédiés NH₃ VOLT'AIR



Modèles dédiés N₂O NOE



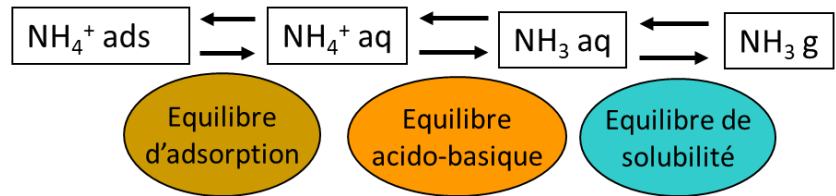
Modèle de culture

Sous le haut patronage

MODÉLISATION DES ÉMISSIONS

Explicitation de la prise en compte du pH dans VOLT'AIR

Module « Equilibres physico-chimiques »



Isothermes de Freundlich
 $[\text{NH}_4^+ \text{ ads}] = a * [\text{NH}_4^+ \text{ aq}]^b$

Dissociation
 $K_A(T) = [\text{H}_3\text{O}^+ \text{ aq}] * \frac{[\text{NH}_3 \text{ aq}]}{[\text{NH}_4^+ \text{ aq}]}$

Loi de Henry
 $K_H(T) = \frac{[\text{NH}_3 \text{ aq}]}{[\text{NH}_3 \text{ g}]}$

Résolution par itérations

PRO solides → pH du PRO
 PRO liquides }
 Solutions azotées } pH intermédiaire sol - engrais
 Granules } selon infiltration / dissolution

Module « Nitrification »

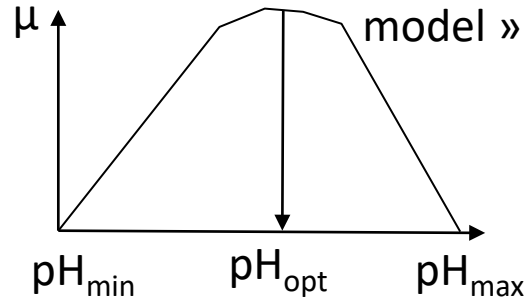
Latence puis

$$\frac{d \text{NO}_3^-}{d t} = \gamma \frac{d m}{d t}$$

$$m = m_0 \exp^{\mu t}$$

$$\mu = f(\text{pH}, T)$$

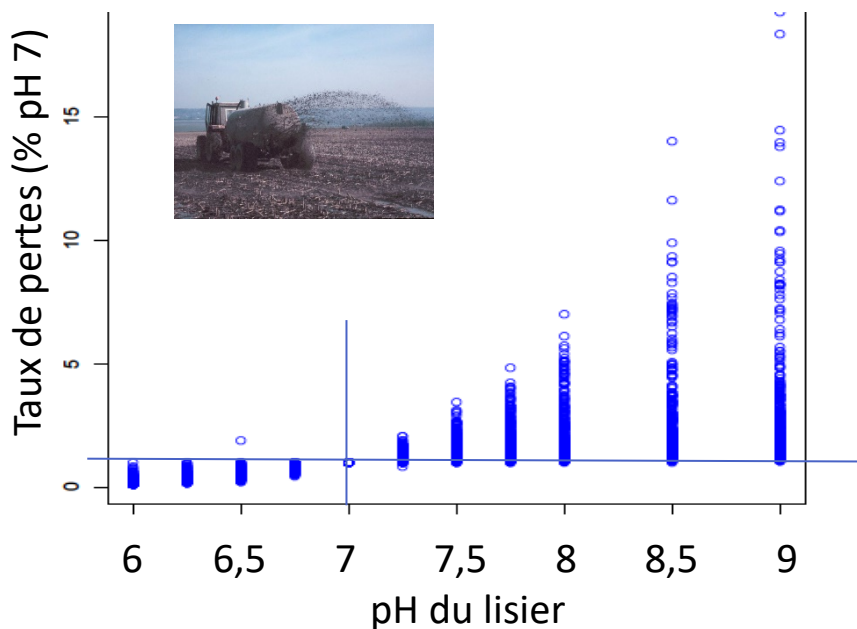
« cardinal model »



MODÉLISATION DES ÉMISSIONS

NH₃ : Sensibilité de Volt'Air au pH du sol et au pH de l'engrais

Simulations d'épandages de printemps
sur 522 sites en Europe



Simulations de fertilisations
(tout types d'engrais, toutes périodes)
en France (~160 000 situations)

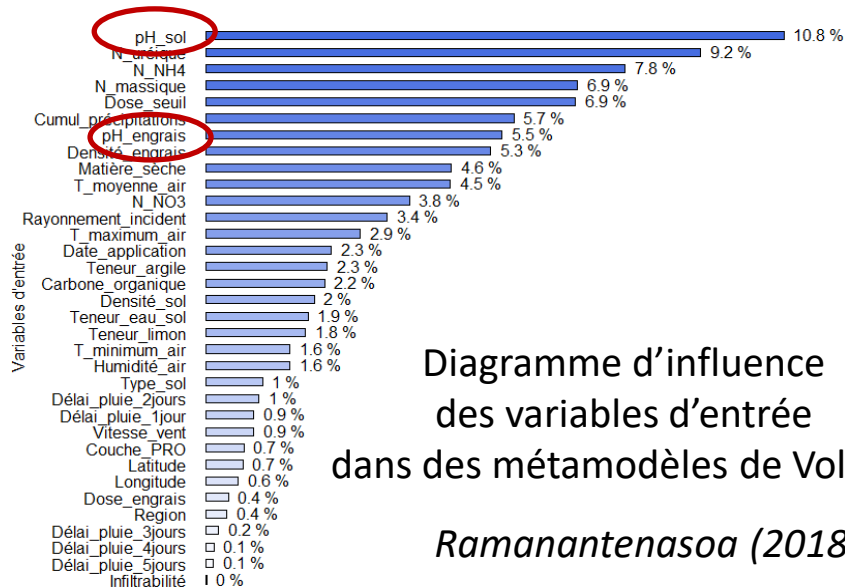


Diagramme d'influence
des variables d'entrée
dans des métamodèles de Volt'Air

Ramanantenasoa (2018)

MODÉLISATION DES ÉMISSIONS

Modèles dédiés N₂O NOE (Hénault *et al.*, 2005)

modèle NOE (Hénault *et al.*, 2005)

$$N_2O_{\text{total}} = N_2O_{\text{dénit}} + N_2O_{\text{nit}}$$

$$N_2O_{\text{total}} = r \left[(D_P * F_W * F_T * F_{NO_3^-}) + (z * N_W * N_T * N_{NH_4^+}) \right]$$

modèle NEMIS
(Hénault & Germon, 2000)

Partie nitrification
(Garrido *et al.*, 2002)

capacité du sol à réduire le N₂O
(Hénault *et al.*, 2001)

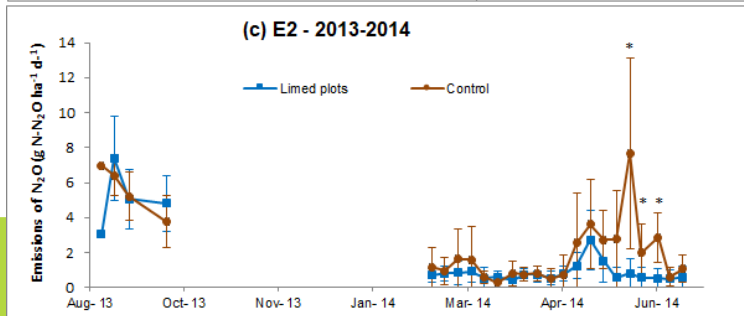
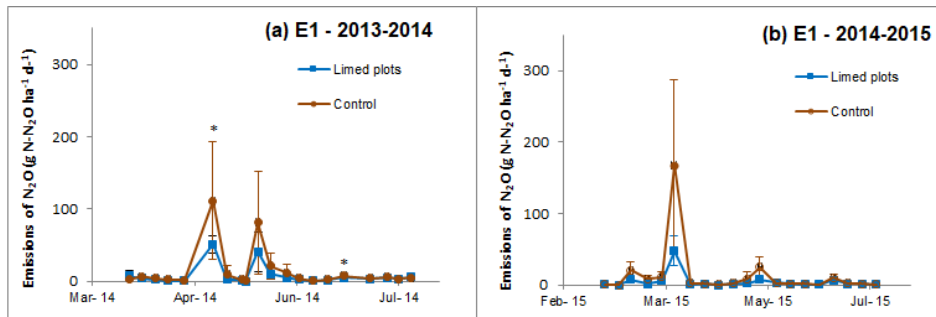
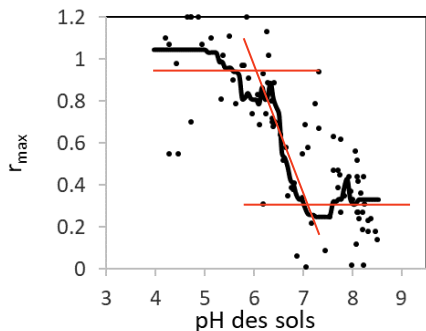
MODÉLISATION DES ÉMISSIONS

Explicitation de la prise en compte du pH dans NOE

$$N_2O_{\text{total}} = r [(D_P * F_W * F_T * F_{NO_3^-}) + (z * N_W * N_T * N_{NH_4^+})] \quad \text{NOE (basique)}$$

$$N_2O_{\text{total}} = r_{(pH)} [(D_P * F_W * F_T * F_{NO_3^-}) + (z * N_W * N_T * N_{NH_4^+})] \quad \text{NOE (pH)}$$

- Mesuré
- Simulé



MODÉLISATION DES ÉMISSIONS

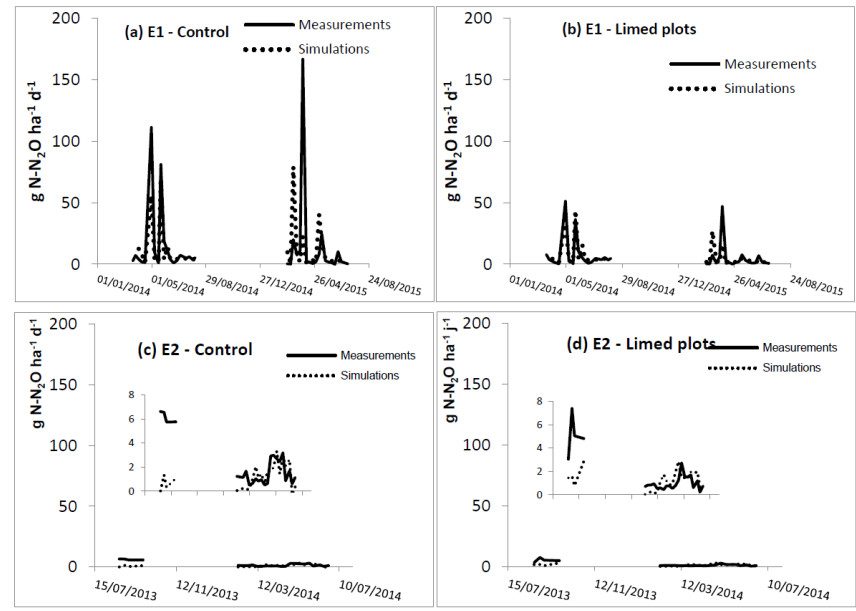
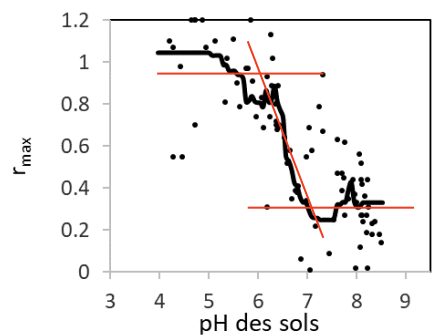
Explicitation de la prise en compte du pH dans NOE



$$N_2O_{\text{total}} = r [(D_P * F_W * F_T * F_{NO_3^-}) + (z * N_W * N_T * N_{NH_4^+})] \quad \text{NOE (basique)}$$

$$N_2O_{\text{total}} = r_{(pH)} [(D_P * F_W * F_T * F_{NO_3^-}) + (z * N_W * N_T * N_{NH_4^+})] \quad \text{NOE (pH)}$$

- Mesuré
- Simulé

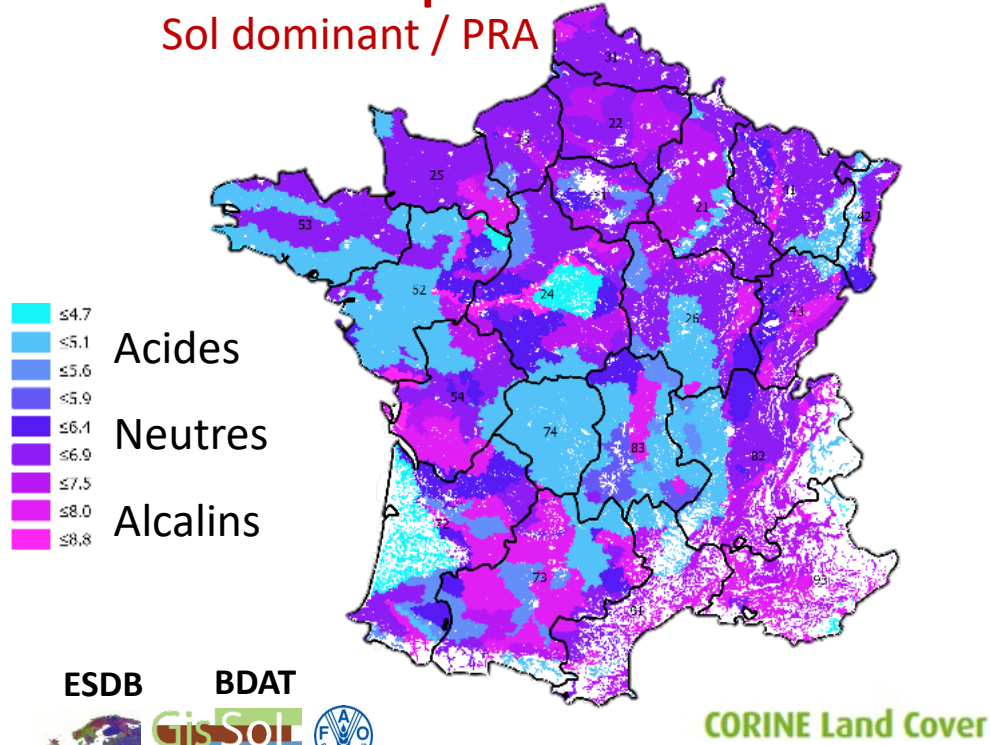


Sous le haut patronage



Hénault et al., 2019

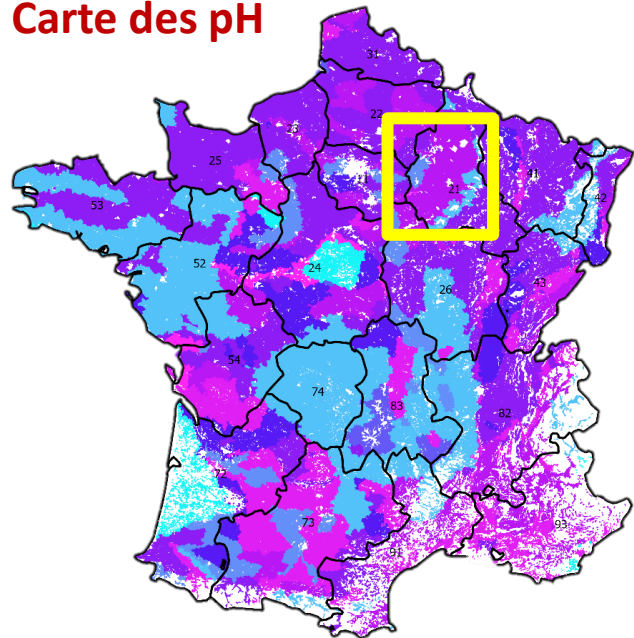
Carte des pH Sol dominant / PRA



Sous le haut patronage

SPATIALISATION Observations NH₃

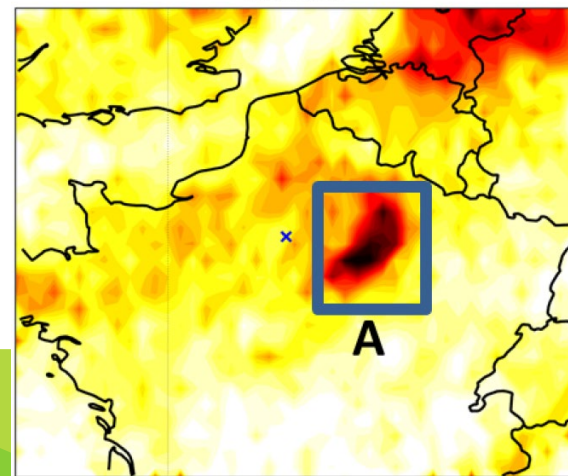
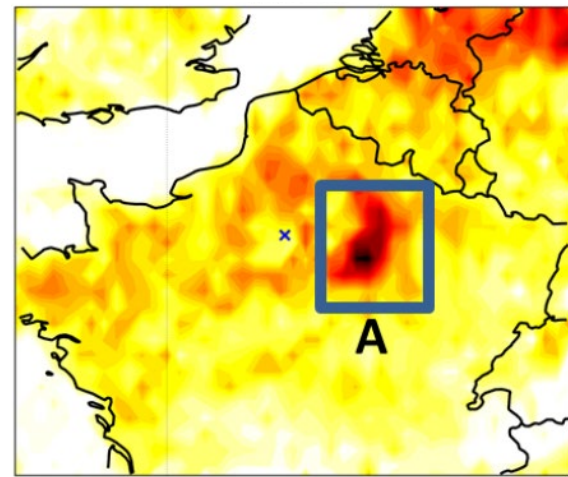
Carte des pH



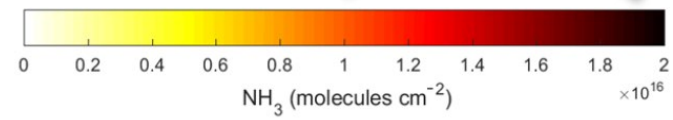
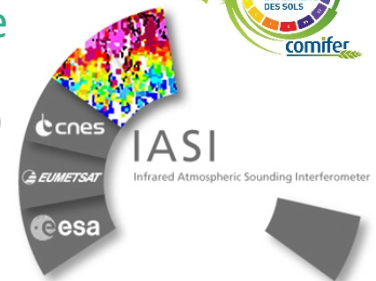
Sous le haut patronage



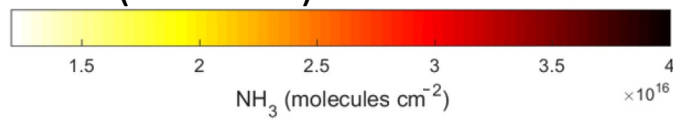
Moyenne pour le mois de mars des concentrations en NH₃ atmosphérique sur la colonne



IASI (9h30)
sur 10 ans
(2008–17)



CrIS (13h30)
sur 5 ans
(2013–17)



Viatte et al. (2020) - Atmos. Chem. Phys.

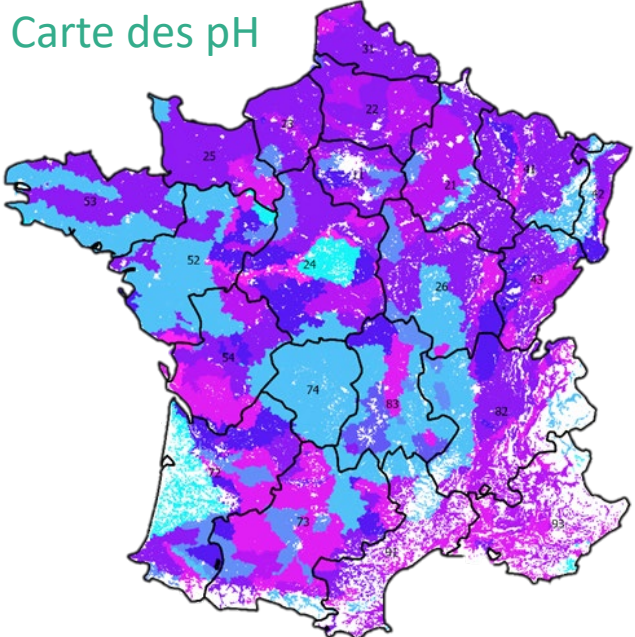


SPATIALISATION

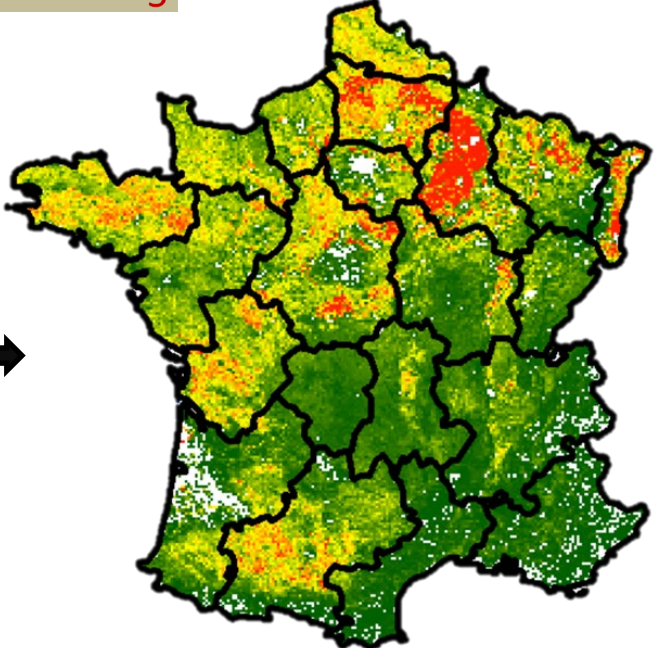
Modélisation NH₃ 2011



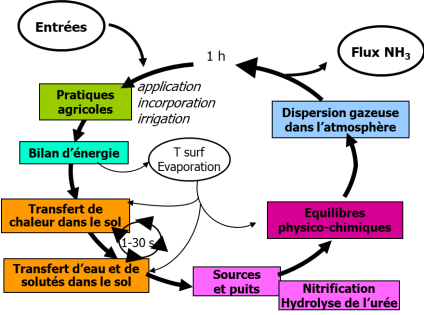
Carte des pH



+ ferti N
+ météo
+ pédo
X
Volt'Air



Elevée : 28227.
Faible : 0
t NH₃/maille
Chimere (4kmx4km)



Sous le haut patronage



Génermont et al. (2018)

SPATIALISATION

Modélisation NH₃ mars 2011



(fertilisation)

+ Skjøth et al. (2011)

(autres sources)

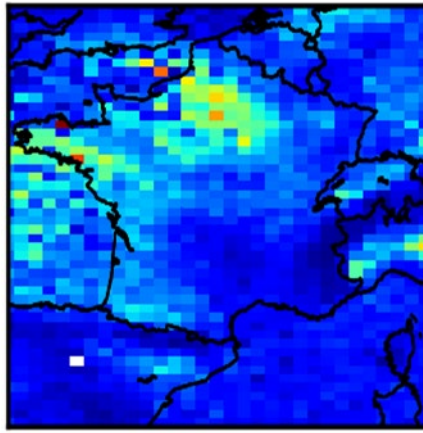
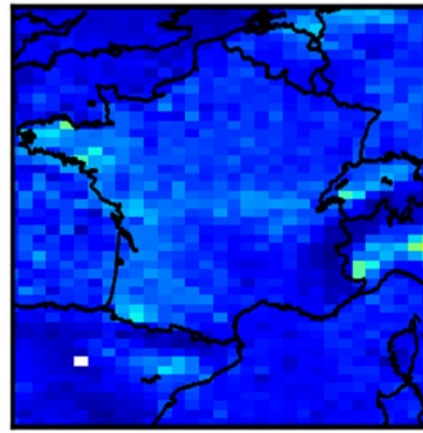
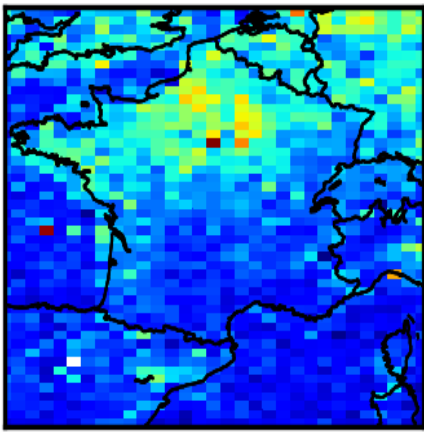


1e16

molec.cm-2

IASI

chimereTNO



Amélioration de la représentation des concentrations en PM₁₀ et PM_{2.5}



=> Pollution de fond
=> Prévion des épisodes printaniers de pollution particulaire



Génermont et al. (2019)

Fortems-Cheiney et al. (2020) - Atmos. Chem. Phys.

Projet Amp'Air

Sous le haut patronage

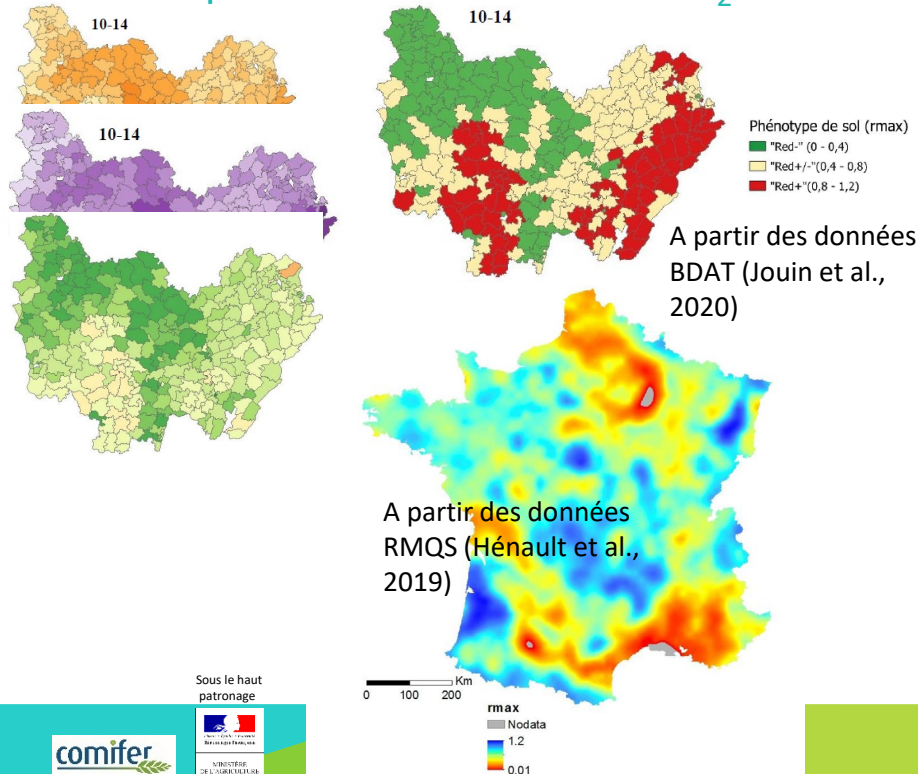


« sols » – 28 oct 2020 – Visioconférence

SPATIALISATION DES ÉMISSIONS

N₂O

Capacité des sols à réduire N₂O



+ ferti N
+ météo
+ pédo
X
NOE-pH
Dans STICS

Emissions de N₂O
Evitements d'émission

Recrutement d'un postdoc en cours
<https://jobs.inrae.fr/ot-10429>

SYNTHESE – pH DES SOLS / FERTILISANTS



- Facteur clé de l'intensité des émissions des composés azotés même si les mécanismes sous-jacents sont différents selon les formes gazeuses concernées
- La gestion du pH des sols / (fertilisants ?) est une perspective d'intérêt pour réduire les émissions de gaz – Les zones de pH, contrôle des émissions NH_3 et N_2O ne sont pas tout à fait les mêmes mais restent proches, d'où un besoin de vigilance / travaux spécifiques (éviter les déplacements de pollution)
- La connaissance du pH des sols (dynamique spatiale et temporelle)
Les développements métrologiques
Les développements des modalités de gestion
sont des questions tout à fait actuelles
- Les approches par modélisation apparaissent les plus adaptées pour se lancer dans des approches intégrées des deux gaz et autres composés (polluants)



SOUS LE HAUT
PATRONAGE

ELEMENTS GENERAUX COMPARES



Perte gazeuse	Volatilisation NH ₃		Emission N ₂ O
Nature de la fertilisation	minérale	organique	Minérale et organique
Ecosystèmes les plus concernés	Tous sols fertilisés, dont alcalins		Sols fertilisés
Quantités mises en jeu	Qq à qq dizaines de kg ha ⁻¹ application ⁻¹	Plusieurs dizaines de kg ha ⁻¹ application ⁻¹	De l'ordre de qq kg ha ⁻¹ an ⁻¹
Nature des mécanismes sous-jacents	Equilibres physico-chimiques		Différents mécanismes respiratoires microbiens
Temporalité	Rapidement (qq jours à qq semaines) après l'apport		Pics conjoncturels (pluie, fertilisation, ...)
Problèmes engendrés / échelle	Qualité de l'air : échelle locale à régionale Impacts sanitaires et environnementaux		Changement climatique (6 %) échelle planétaire
Freins à l'étude	Variabilité des conditions dans lesquelles les facteurs de contrôle s'expriment		Distribution logNormale des flux (spatiale et temporelle)
Leviers d'atténuation (outre la gestion de l'azote y compris avec les légumineuses, dans les systèmes de cultures, transversale ...)	Réduire l'exposition à l'air ambiant des fertilisants –		Gestion pH des sols pour réduire N ₂ O en N ₂
		estion du pH des fertilisants	
Freins à l'atténuation	Techniques, économiques, organisationnelles aux différentes échelles		