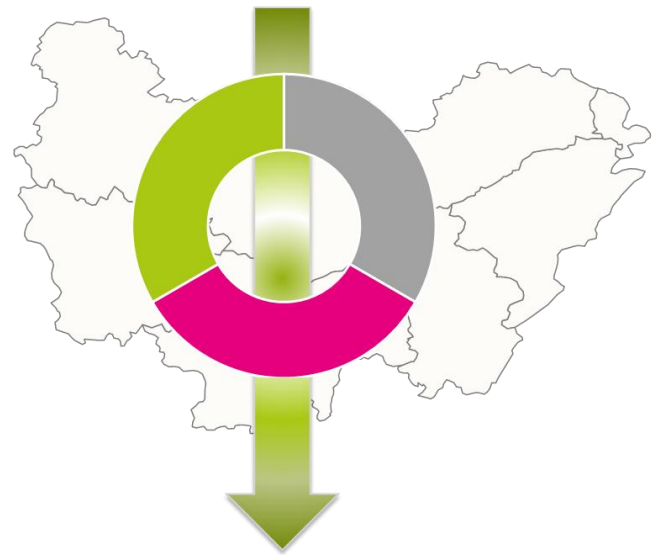


Bienvenue à

# NatAdGES – AG - Copil n° 5

Evitement à plusieurs échelles des émissions du Gaz à Effet de Serre N<sub>2</sub>O des sols par l'utilisation d'Additifs ou de micro-organismes, Naturels



## ➤ NatAdGES : Un projet qui s'inscrit (malheureusement) dans l'actualité de la crise climatique

**giec**  
GROUPE D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAL SUR l'évolution du climat

2021/17/PR

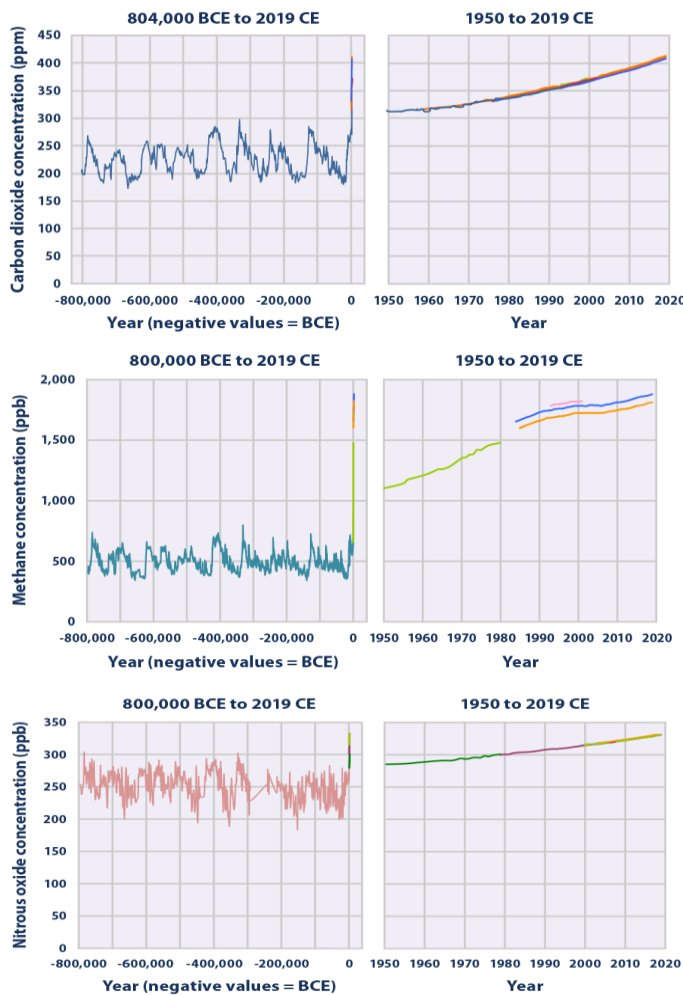
### COMMUNIQUÉ DE PRESSE

9 août 2021

### Changement climatique généralisé et rapide, d'intensité croissante – GIEC

GENÈVE, le 9 août – Les scientifiques observent l'évolution du climat dans toutes les régions de la planète et dans l'ensemble du système climatique, selon le dernier rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) publié aujourd'hui. Nombre des changements relevés sont sans précédent depuis des milliers, voire des centaines de milliers d'années, et certains phénomènes déjà en cours – comme l'élévation continue du niveau de la mer – sont irréversibles sur des centaines ou des milliers d'années.

Toutefois, des réductions fortes et soutenues des émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et d'autres gaz à effet de serre limiteraient le changement climatique. Alors que la qualité de l'air en bénéficierait rapidement, la stabilisation des températures mondiales pourrait prendre 20 à 30 ans, selon le rapport du Groupe de travail I du GIEC intitulé *Changement climatique 2021: les éléments scientifiques*. Ce document a été approuvé vendredi par 195 gouvernements membres du GIEC à l'issue d'une session d'approbation virtuelle de deux semaines amorcée le 26 juillet.



<https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-atmospheric-concentrations-greenhouse-gases>

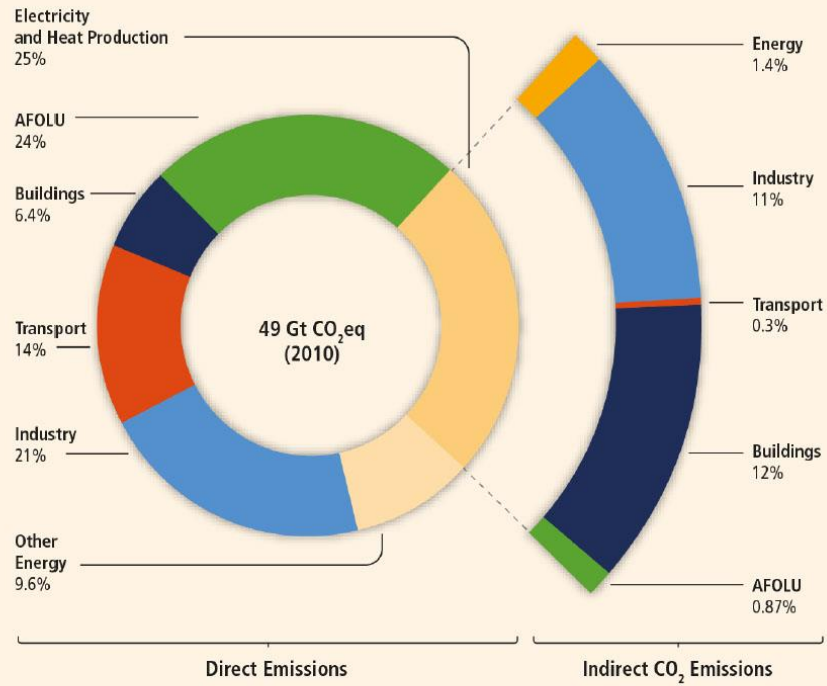


## ➤ Une forte contribution du secteur 'AFOLU' aux émissions de GES

'AFOLU' : Agriculture, Forest and other Land Use / terres émergées



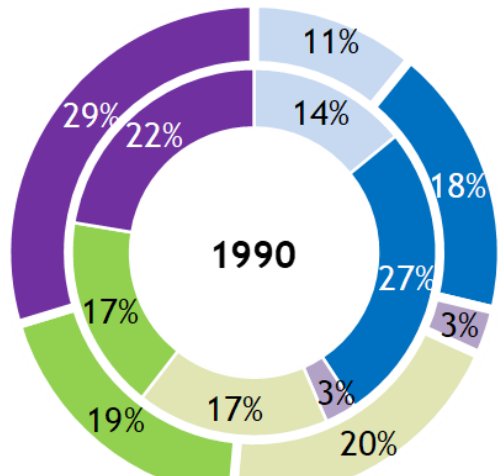
Global greenhouse gas emissions by economic sectors, 2010



Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change, IPCC Working Group III



2017



[Le Citepa publie les données d'émission de polluants et de GES : Secten, édition 2019 - Citepa](#)

N<sub>2</sub>O : 42 %  
 CH<sub>4</sub> : 46 %  
 CO<sub>2</sub> : 12 %

- Transformation énergie
- Industrie manufacturière
- Traitement centralisé des déchets
- Résidentiel/ tertiaire
- Agriculture/sylviculture
- Transports



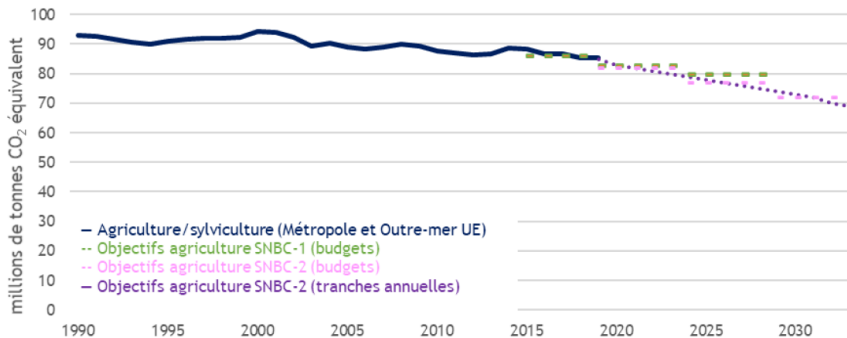
## ➤ Un engagement des pays à réduire leurs émissions de GES (Accords de Paris)

### • SNBC (Stratégie Nationale Bas Carbone)

- Feuille de route de la France pour lutter contre le changement climatique
- Deux ambitions : atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050 et réduire l'empreinte carbone de la consommation des Français.
- Les décideurs publics, à l'échelle nationale comme territoriale, doivent la prendre en compte.



Emissions de GES du secteur et objectifs SNBC



Tendance d'évolution des émissions de GES de l'Agriculture

Citepa. Rapport Secten édition 2020

Emissions de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques en France

### Agriculture et sylviculture

Rédaction

ANIS DURAND  
Gwenaelle LE BORGNE  
Etienne MATIAS

#### Techniques de réduction

Peu de solutions techniques sont actuellement disponibles pour limiter les émissions de N<sub>2</sub>O des sols, qui sont très dépendantes des conditions pédoclimatiques (les plus fortes émissions ayant lieu, après les épandages d'azote et après des épisodes pluvieux) : la variabilité interannuelle des émissions est par conséquent très forte.

L'optimisation de la fertilisation azotée en lien avec les préconisations d'apports adaptés aux besoins des cultures est déjà bien avancée et il est donc aujourd'hui difficile de prévoir une réduction forte de la fertilisation azotée dans les années futures.

Le développement de sélections variétales adaptées à un bas niveau d'intrants ou encore l'amélioration des conditions du sol pour diminuer les émissions de N<sub>2</sub>O (pH, par exemple, effet du chaulage) sont des pistes en phase d'expérimentation actuellement.



### AGRICULTURE

#### OBJECTIFS de RÉDUCTION des ÉMISSIONS de GES PAR RAPPORT À 2015

2030 : -19%  
2050 : -46%

#### COMMENT ?

- Développer l'agroécologie, l'agroforesterie et l'agriculture de précision, notamment pour réduire au maximum les surplus d'engrais azotés.
- Développer la bioéconomie pour fournir énergie et matériaux moins émetteurs de GES à l'économie française.
- Faire évoluer la demande alimentaire (produits de meilleure qualité ou issus de l'agriculture biologique, prise en compte des préconisations nutritionnelles) et réduire le gaspillage alimentaire.





## ➤ Un engagement des pays à réduire leurs émissions de GES (Accords de Paris)

- **SNBC (Stratégie Nationale Bas Carbone)**

- Feuille de route de la France pour lutter contre le changement climatique
- Deux ambitions : atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050 et réduire l'empreinte carbone de la consommation des Français.
- Les décideurs publics, à l'échelle nationale comme territoriale, doivent la prendre en compte.



### Techniques de réduction

Peu de solutions techniques sont actuellement disponibles pour limiter les émissions de N<sub>2</sub>O des sols, qui sont très dépendantes des conditions pédoclimatiques (les plus fortes émissions ayant lieu, après les épandages d'azote et après des épisodes pluvieux) : la variabilité interannuelle des émissions est par conséquent très forte.

L'optimisation de la fertilisation azotée en lien avec les préconisations d'apports adaptés aux besoins des cultures est déjà bien avancée et il est donc aujourd'hui difficile de prévoir une réduction forte de la fertilisation azotée dans les années futures.

Le développement de sélections variétales adaptées à un bas niveau d'intrants ou encore l'amélioration des conditions du sol pour diminuer les émissions de N<sub>2</sub>O (pH, par exemple, effet du chaulage) sont des pistes en phase d'expérimentation actuellement.



## ➤ Les sols interviennent dans la régulation du climat !

CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>
<p><b>Figure 5 : le cycle du carbone</b></p> <p>→ Flux naturels en GT C/an.              → Flux supplémentaires dus aux activités humaines en GT C/an.</p> <p>GT C = milliard de tonnes de carbone.              Source : valeur pour les années 1990, d'après GIEC 4<sup>e</sup> rapport 2007.</p> <p>5 - Gigatonne (GT) = 1 milliard de tonnes</p>	<p>dénitrification (anaérobie)              nitrification (aérobie)</p>	<p><b>Emission et consommation de CH<sub>4</sub> par les sols</b></p> <p>Soils submergés ou engorgés (anaérobies)              Soils exondés oxygènes (aérobies)</p> <p>Production (Bactéries méthanogènes) → Transport (Végétation) → Consommation (Bactéries méthanotrophes sens strict)</p>
<p><b>Propositions par IPCC, 2014 (« Supply-side and Demand-side ») concernant les cultures</b></p>		
<p><b>Projets à différentes échelles</b></p>		
<p>Initiative 4 pour mille qui vise à <b>stocker du carbone dans les sols</b></p>	<p><i>NatAdGES, dans la continuité du projet SOLGES (financement ADEME) - Hénault et al., 2019 et du projet SYMGES – Hénault et Revellin, 2011</i></p>	



## ➤ Les caractéristiques des interventions sur le gaz $N_2O$



- Le très fort **Pouvoir de Réchauffement Global** de ce gaz

	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>
PRG <sub>100</sub> (base molaire) – IPCC 2006	1	298	23
PRG <sub>100</sub> (base molaire) – IPCC 2019	1	265	28

- Concept **d'efficacité d'atténuation**

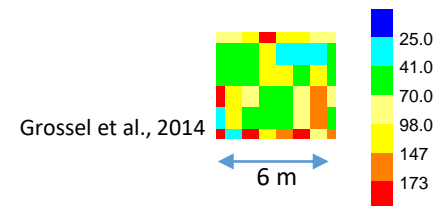
- non-permanence / reversibility (IPCC, 2014) :

- « Various types of carbon sinks have an inherent risk of future reversals »
- « Certain types of mitigation activities (e.g. avoided N<sub>2</sub>O from fertilizer, ....) are effectively permanent since the emissions, once avoided, can not be re-emitted »

- Concept **d'évitement d'émissions** (Raymer, 2006 ; EPE, 2017) qui peut être appliqué dans ce cas : évitement d'émission de N<sub>2</sub>O, utile pour la valorisation



- Difficulté de la quantification des émissions du fait de leur **très grande variabilité spatiale et temporelle**



- **Décalage des échelles :**

- Production / impact « humain »



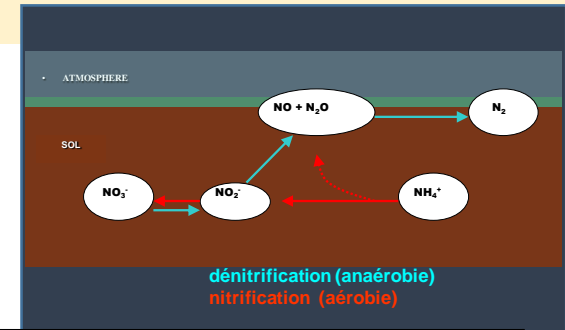
- Intervention / bénéfiques



- **Besoin en Protéines**



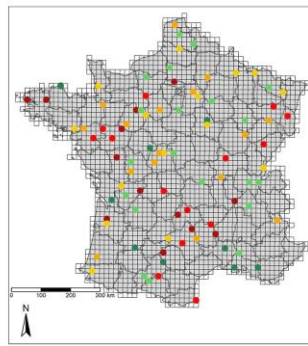
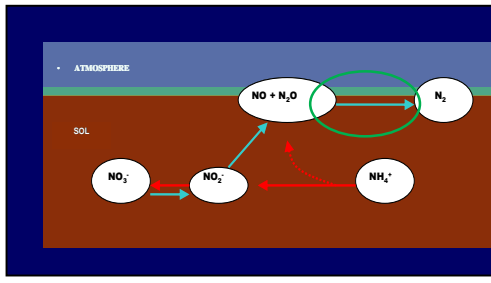
➤ **Les propositions techniques d'intervention sur les émissions de N<sub>2</sub>O ?**



Propositions formulées par IPCC, 2014 (Supply-side)		Propositions complémentaires étudiées dans NatAdGES ➤ To manage the microbial processes by the use of natural additives	
Plant management	Improve N efficiency	To promote N <sub>2</sub> O reduction into N <sub>2</sub>	- By the use of liming products - Liu et al., 2014 - <i>mBio</i> - Shaaban et al., 2015 – <i>Env Sci Pollut Res</i> - Hénault et al., 2019 – <i>Sci Rep</i>
Nutrient management	Change N fertilizer application rate, fertilizer-type, timing precision application, inhibitors		- By the use of leguminous crops inoculated with Rhizobia strains able to reduce N <sub>2</sub> O - Sameshima-Saito et al., 2006 - - Hénault et Revellin, 2011 – <i>Plant Soil</i> , - ...
Water management	Drainage, run-off management;		
Set aside and LUC	N inputs decrease		
Biochar application	Reduce N inputs	To manage soil nitrification	- By the use of BNI - Subbarao et al., 2012 - ...

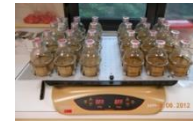


## ➤ Quelques éléments sur l'utilisation des produits chaulant pour réduire les émissions de GES



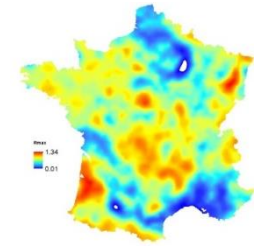
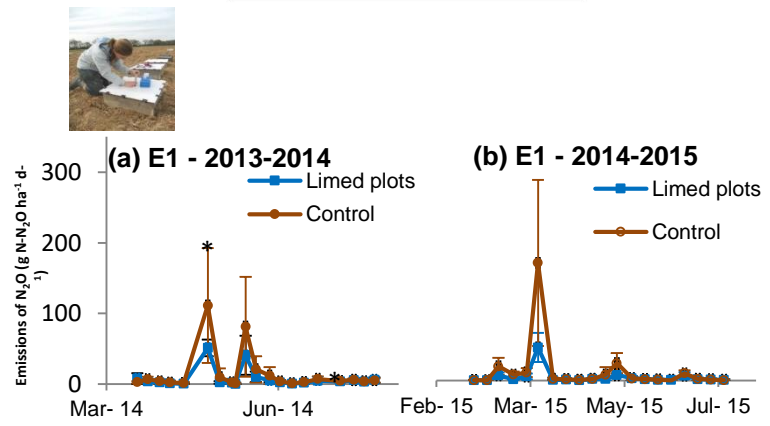
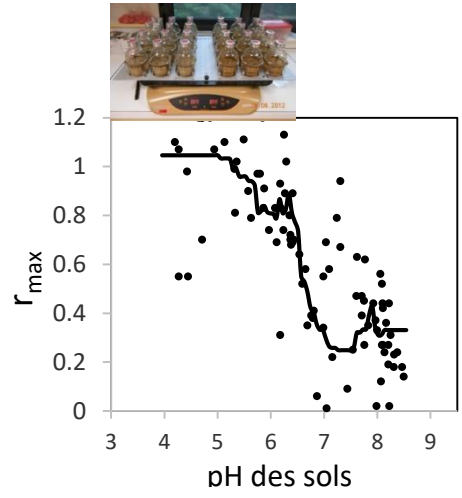
$r_{max}$

- <0,2
- 0,2-0,4
- 0,4-0,6
- 0,6-0,8
- 0,8-1
- >1

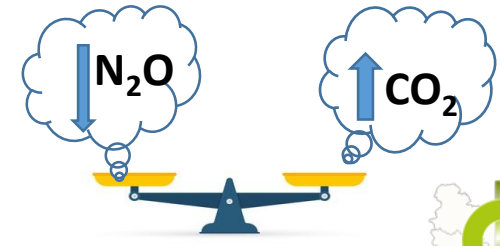
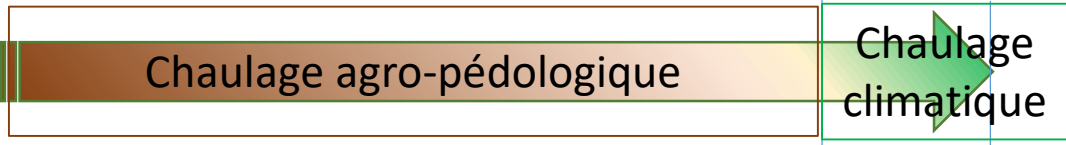


Hénault *et al.*, 2019  
- Sci. Reports

Phénotype du sol	[sol] <sub>PHNZORED-</sub>	[sol] <sub>PHNZORED+/-</sub>	[sol] <sub>PHNZORED+</sub>
Valeur de l'indicateur $r_{max}$	> 0,8	0,4 < $r_{max}$ < 0,8	< 0,4
% des échantillons RMQS	40	28	32

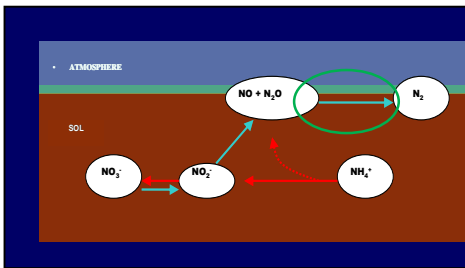


- Potentiel d'abattement de N<sub>2</sub>O estimé à 15.7% (8.3% – 21.2%)
- Soit 1.02% (0.5% – 1.4%) des émissions totales DE GES



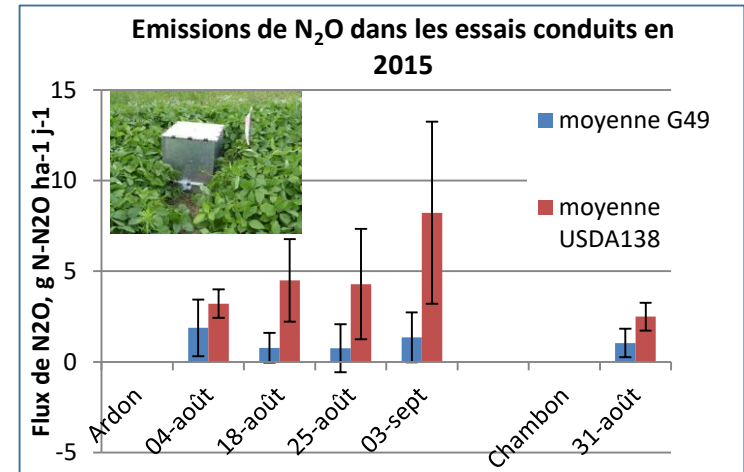
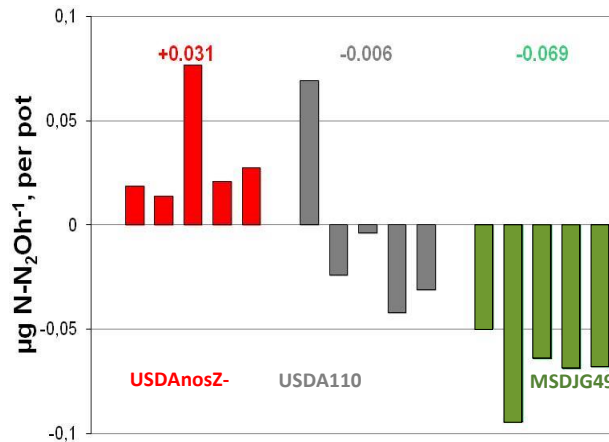


## ➤ Quelques éléments sur l'utilisation des rhizobia pour réduire les émissions de GES



L'azote des graines des Légumineuses est naturellement puisé dans l'air

Plante	Teneur en Protéine de la graine	Principale source d'azote utilisée pour la production de la graine	Processus permettant l'apport d'azote à la plante
BLE	~10 %	Engrais azoté	Synthèse industrielle et épandage mécanisé
SOJA	~30 %	Azote de l'air	Fixation symbiotique par le complexe <i>Rhizobia</i> -Légumineuse

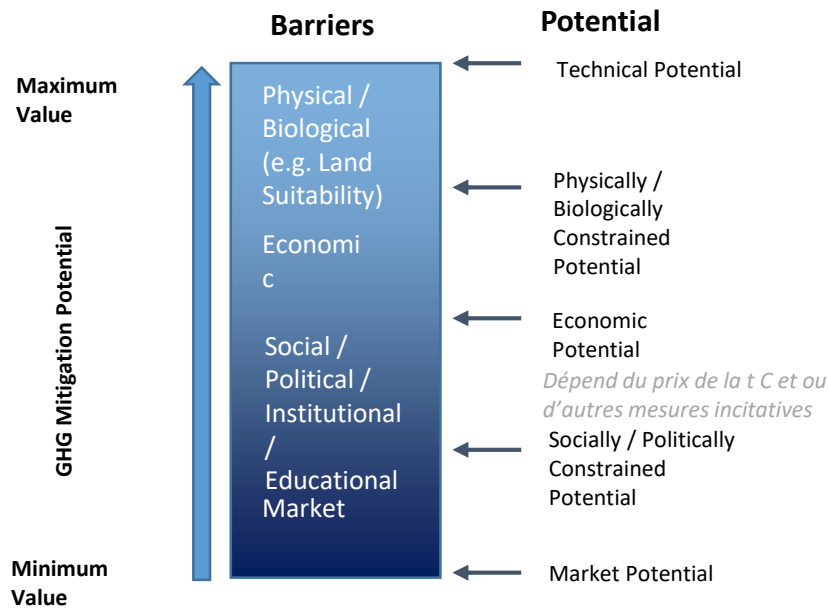


Hénault, C., Revellin, C. 2011. Inoculants of leguminous crops for mitigating soil emissions of the greenhouse gas nitrous oxide. *Plant Soil*. DOI10.1007/s11104-011-0820-0

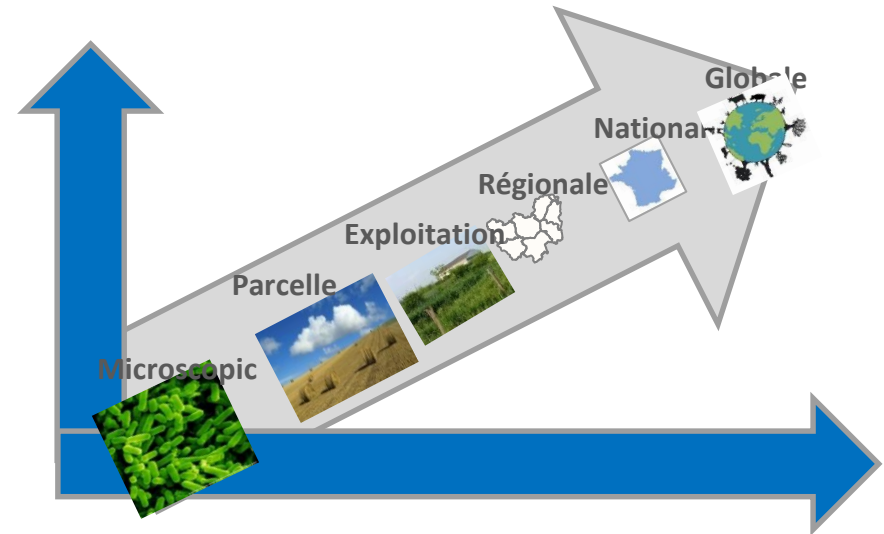


➤ **Au-delà du technique, quels verrous et quelles précautions prendre pour l'application ?**

**Les freins socio-économiques**



**La prise en compte des décalage des échelles**



« Costs and Potentials » (Smith et al., 2014)

⇒ **Nécessité d'approches pluridisciplinaires**

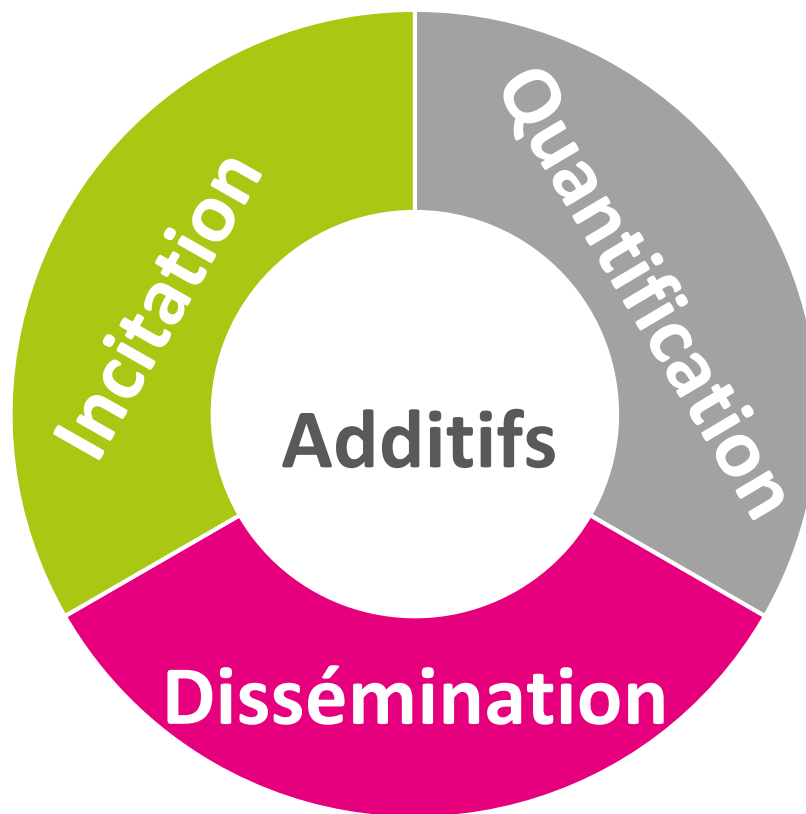


## ➤ Objectifs de NatAdGES

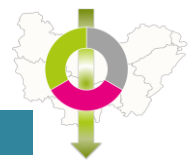
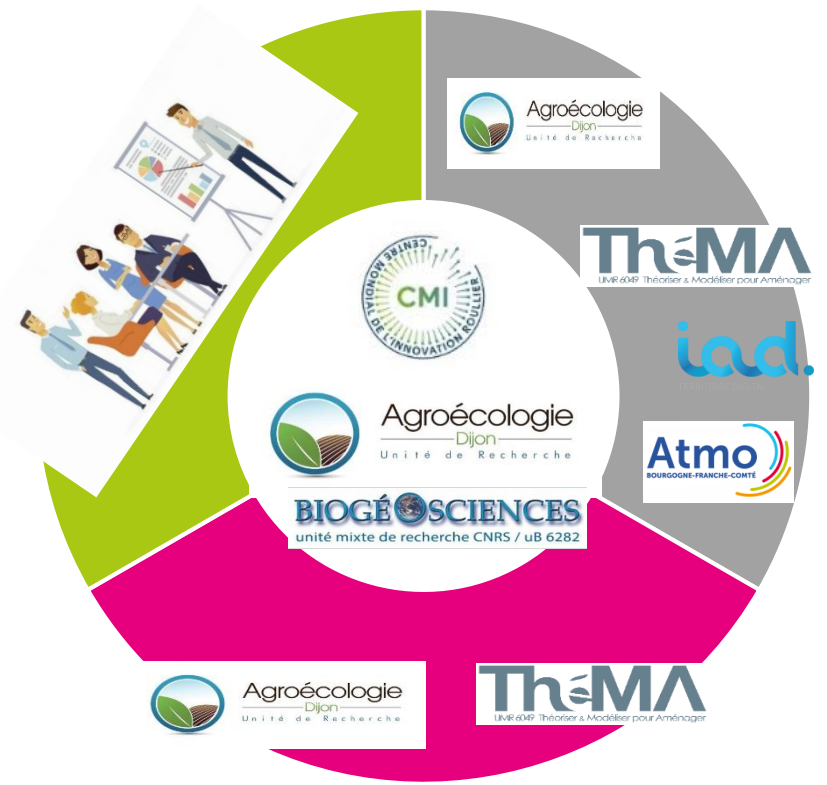
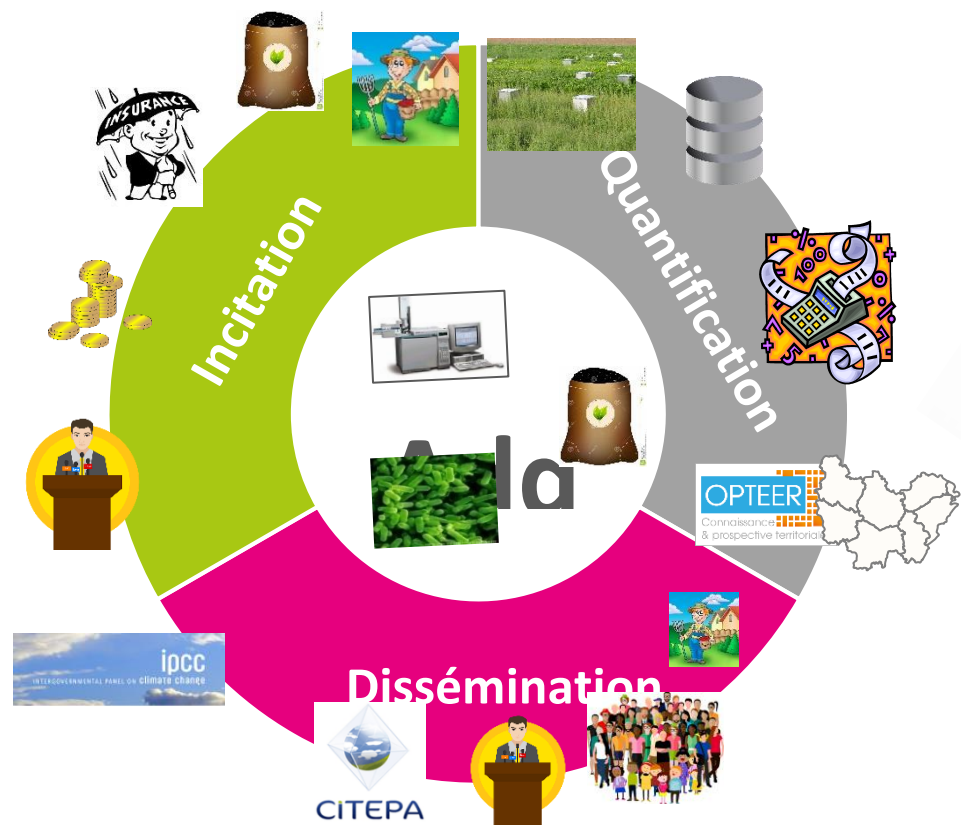
- Développer **des solutions biotechniques** permettant
  - de **diminuer les émissions de N<sub>2</sub>O par le secteur agricole**
    - En respectant la production agricole et sans transfert de pollution (azotée)
    - pouvant faire l'objet d'une quantification des évitements
- Créer les **outils « socio-techniques »** permettant
  - de **mesurer les effets** des actions mises en œuvre  
(= évitements d'émissions de N<sub>2</sub>O) au niveau local
  - de créer les outils permettant le changement d'échelles du local au régional
- Créer **la dynamique collective** nécessaire à la mise en place des solutions



➤ **Structuration de NatAdGES**



➤ Structuration de NatAdGES





## ➤ Synthèse

- Un projet **partenarial pluridisciplinaire**
- Développement de solutions
  - Biotechniques naturelles pour réduire les émissions de GES par l'agriculture
  - Numériques assurer un suivi spatialisé des évitements d'émission
- **Potentiel d'innovation** sur les
  - Produits (additifs, micro-organismes développés)
  - Outils numériques
- Mobilisation de concepts de l'agriculture durable et de l'Agroécologie
- Proposition d'une entrée positive de l'Agriculture (toute forme d'agriculture) vis-à-vis de la problématique du changement climatique



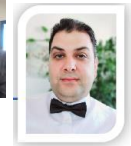
## ➤ Moyens et leur affectation

- Un projet **partenarial pluridisciplinaire**, débuté en juin 2019, dépenses UBFC éligibles jusqu'au 31 octobre 2022
- Bénéficiaire d'un **budget total de 2 021 841 €**
  - 830 161 € salaires permanents académiques
  - 400 617 € All – groupe Roullier dont 100 000 € versé à INRAE
  - 69 649 € IAD – Territoire Digital
  - 432 000 € Isite BFC
  - 144 300 € FRI Région
  - 92 206 € FEDER Région
  - 30 000 € Région Besançon à destination IAD
  - 22 908 € ADEME
- Projet labellisé par le pôle Vitagora
- Projet s'appuyant aussi sur **des sous-traitants**
  - (Atmo / Opteer)
  - Artisans et agriculteurs en Région
- **Accord de Consortium - signé par tous en février 2021**
- **Investissement d'Avenir par**
  - **L'acquisition de nouveaux équipements**  
**Budget Investissement 155 000€**  
(engagement de 75 % : CPG, station terrain, ...)
  - **L'accueil de nombreux jeunes**  
**Secteur académique :**  
**Budget RH de l'ordre de 450 000 €**  
(secteur académique - engagement de 100 %)
  - Budget fonctionnement (170 000 € - engagement ~ 70 %)



➤ **Recrutements CDD et stagiaires**

- **Doctorant : Iheb Ouerghi (01/10/2019 – 30/09/2022) – UMR AgroEcologie – WP1**
- Postdoc : Ibrahima Thiaw (01/11/2019 – 31/10/2020) – UMR Théma – WP2
- **Postdoc : Mohamed Alkassem (01/02/2021 – 31/07/2022) - UMR AgroEcologie – WP2**
- **Postdoc : Camille Rousset (01/05/2021 – 31/07/2022) – UMR AgroEcologie – WP1**
- Ingénieur d’Etudes : Chloé Caurel (01/05/2020 – 31/07/2020) – UMR AgroEcologie – WP4
- M2 : Clémentine Jouin (01/04/2020 – 31/08/2020) – UMR AgroEcologie – WP2
- M2 : Victor Decourt (01/04/2021 – 30/09/2021) – UMR Théma – WP2/3
- **Apprenti Ingénieur Agronome : Henri Brefort (01/10/2020 – 31/08/2023 – 1mois/2) – UMR AgroEcologie – WP1**
- **Adjoint technique : Guillaume Guyerdet (01/09/2021 – 31/08/2022) – UMR AgroEcologie – WP1**
- Stagiaires CyPI (02/2021) : Camille, Théo, Qhadira, Malo, Pierre, ... - UMR AgroEcologie – WP1, WP3
- MOO : Youenn Petite, + 3 MOO (juillet 2021) - UMR AgroEcologie - WP1



## ➤ **Mode de fonctionnement interne**

### - **Interne au projet**

- Echanges par WP
- Echanges internes à la partie académique
  - Réunion hebdomadaire structurée avec rédaction d'un compte-rendu mis à disposition de tous
  - CR mensuel partagé (plus en vigueur)
- Relations avec les partenaires économiques
  - Via les réunions de WP (notamment celles préparatoires au copil)
  - Echanges à la demande
- Relations avec le prestataire identifié
  - Via les réunions de WP avec engagement de commande
  - Echanges spécifiques

### - **En interaction avec le comité de pilotage**

- Reunion tous les 6 mois (09/19 – 03/20 – 09/20 – 03/21 – 10/21, ...)
- A la demande si besoin

### - **Globale de projet**

- Réunion annuelle rassemblant l'ensemble des acteurs du projet et le copil



## ➤ **Production actuelle**

Articles dans revue à comité de lecture : 0 (En cours de rédaction : 3)

Article dans dossier scientifique avec comité de lecture : 1

Communication orale dans colloque scientifique : 4

Communication poster dans colloque scientifique : 2

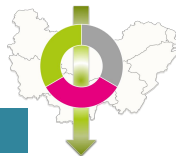
Webinaire : 1

Rapports de projet : 1

Rapports de stage : 4

Site Web : 1

Séminaires internes : 2





## ➤ Organisation de ces 2 jours

### JEUDI 14 OCTOBRE AM

Lieu : INRAE, Batiment Divoux, salle de conférence

**9h00 – 9h30** : Café d'accueil

**9h30 – 10h30** : Rappels sur le projet NatAdGES, déroulement du COPIL et grandes lignes sur les réalisations actuelles (Catherine)

**10h30 – 11h30** : Visite des installations mises en place sur le site INRAE ainsi qu'un aperçu de l'expérimentation terrain (Equipe NatAdGES-WP1).

**11h30 – 12h** : Déplacement vers l'hôtel Philippe Le Bon prévu en Tram (faibles émissions de GES ) ou véhicule personnel

**12h00 – 14h** : Repas à La Closerie.



### JEUDI 14 OCTOBRE PM

Lieu : Hôtel Maison Philippe Le Bon

**14h00 – 15h45** : Présentation des travaux conduits dans le cadre des WP1 et WP4 (Equipe NatAdGES-WP1 et WP4)

**15h45– 16h15** : Entracte

**16h15 – 17h30** : Discussion sur les travaux des WP1 et WP4.

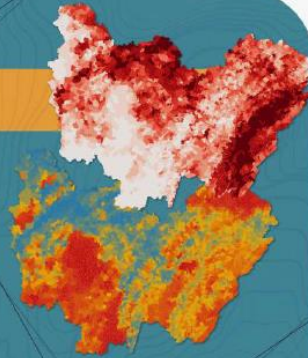
**19h30 – Jusqu'à épuisement** : Rendez-vous pour déguster des mets typiques de la région au Bistrot des Halles.



## ➤ Organisation de ces 2 jours

### VENDREDI 15 OCTOBRE AM

Lieu : Hôtel Maison  
Philippe Le Bon



**9h00 – 10h30** : Présentation des travaux  
conduits dans le cadre des WP2 (Quanti-  
fication multi-échelle) et 3 (Dissémina-  
tion) Equipe NatAdGES-WP2 et WP3.

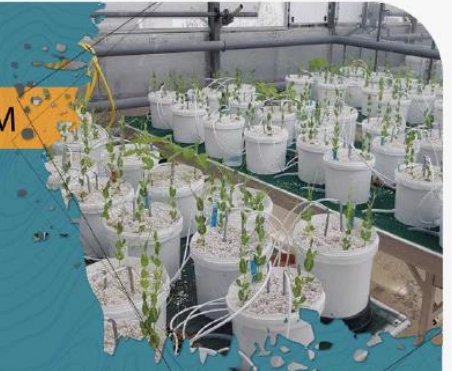
**10h30 – 11h** : Entracte

**11h00 – 12h15** : Discussion sur les travaux des  
WP2 et WP3.

**12h15 – 13h45** : Repas à La Closerie.

### VENDREDI 15 OCTOBRE PM

Lieu : Hôtel Maison  
Philippe le Bon



**13h45 – 14h15** : Quelle continuité pour le  
projet NatAdGES ?  
(Catherine)

**14h15– 15h45** : Discussion et vos retours sur le  
déroulement du projet.

**16h00** : The end

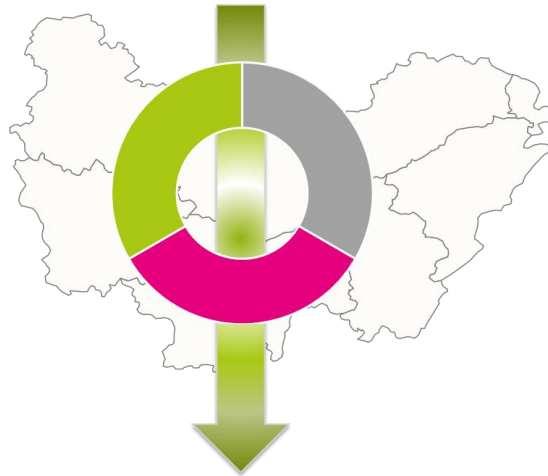






# NatAdGES – AG – Copil n°5

Trimestre 6 - 7



Agroécologie  
Dijon  
Unité de Recherche



WP1 : Développement des additifs qui permettent de réduire les émissions de N<sub>2</sub>O par les sols

WP4 : Mesures incitatives



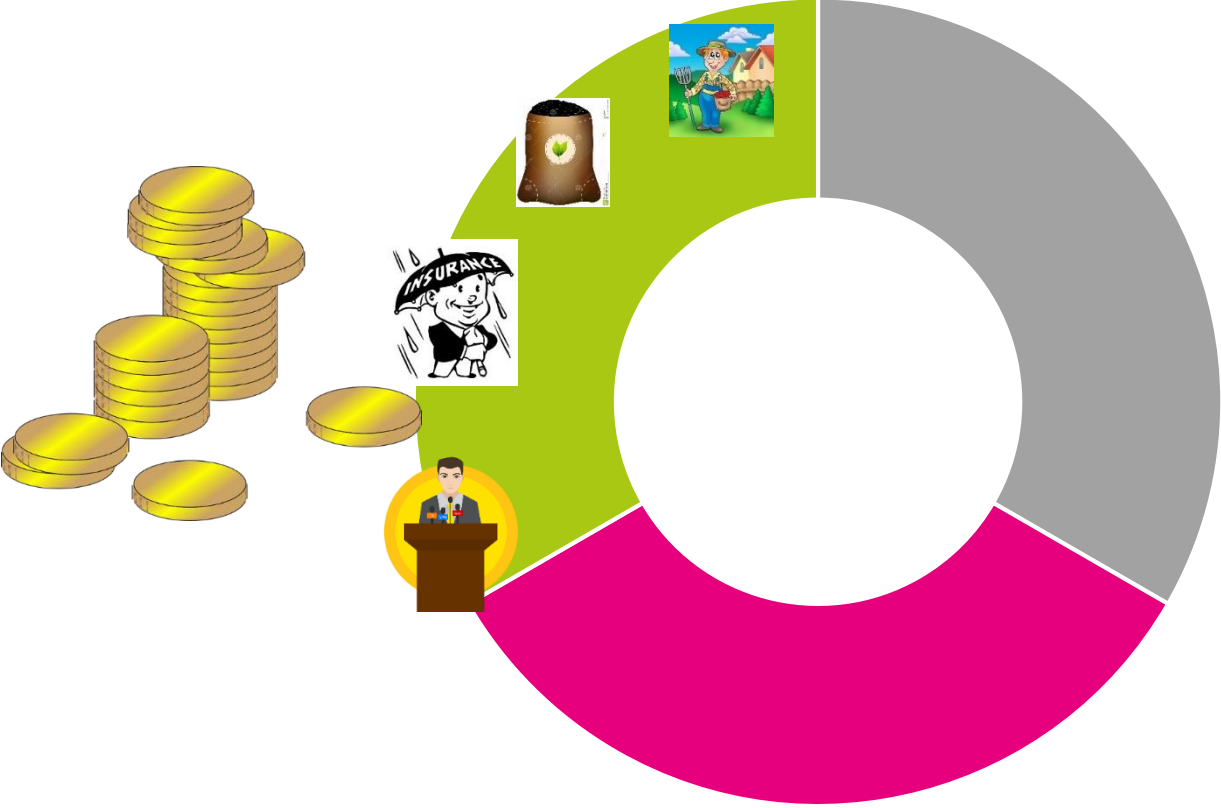
# Table des matières

- I. Introduction WP1 et WP4 – Rappel des objectifs globaux et du contexte
- II. Présentation des principaux résultats pour le WP1:
  - A. L'expérimentation sur les rhizobia du pois – caractérisation phénotypique sur plantes entières
  - B. Les inhibiteurs de la nitrification
  - C. Les produits chaulant
- III. Programmation des travaux à venir pour les WP1 et WP4





# Contexte du WP4



## Contexte national : mise en place de la Méthodologie du Label Bas Carbone en Grandes Cultures

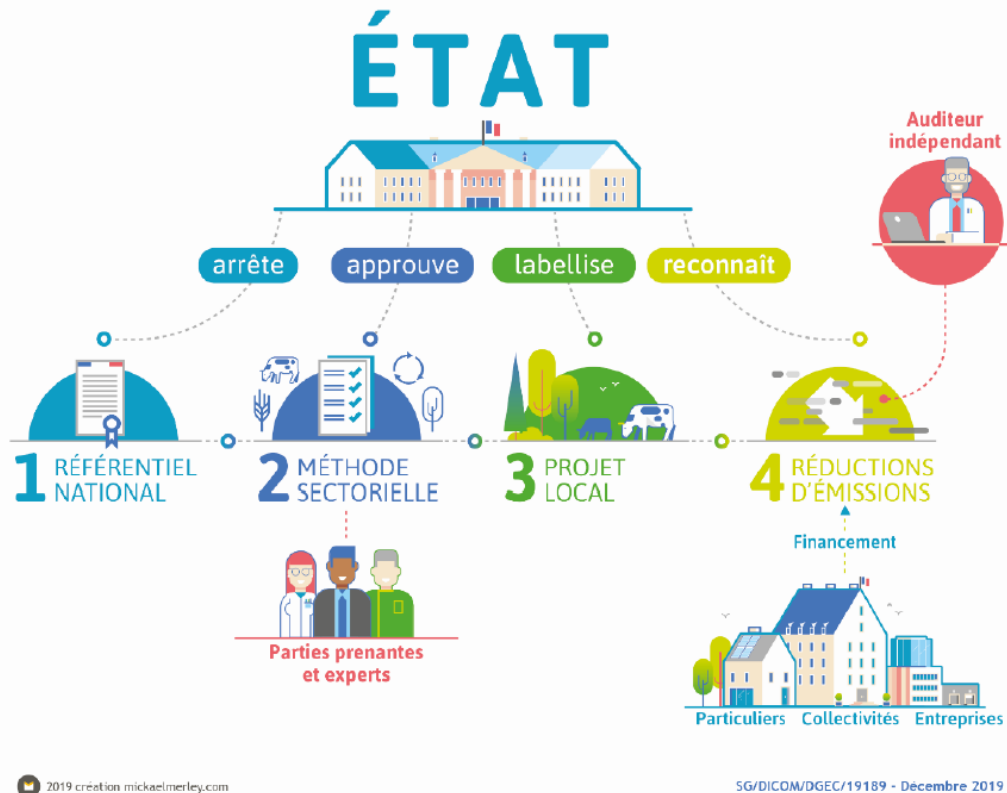


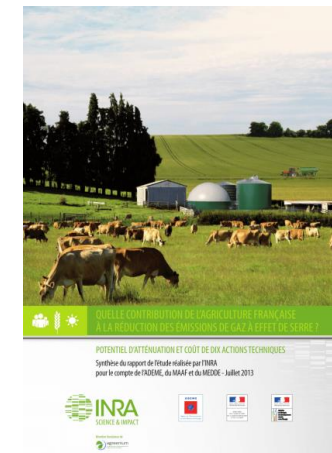
Figure 1 : Le label bas-carbone résumé

Rédaction de la Méthodologie en Grandes Cultures confiée à *Arvalis*

*Qui s'est entouré*

- d'un comité scientifique
- d'un comité d'experts
- d'un comité des usagers

Travail conduit en 2020,  
S'appuyant entre autre sur :

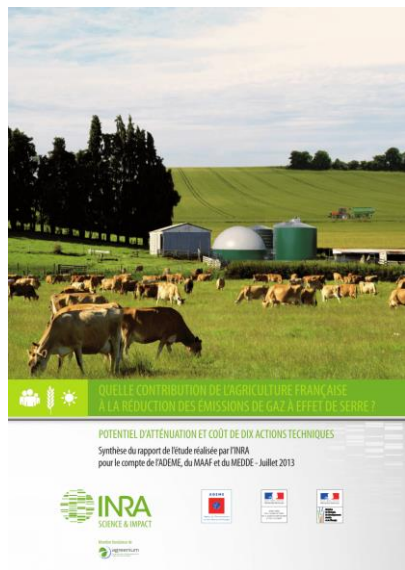


# I- Introduction (WP4)

## Contexte national : mise en place de la Méthodologie du Label Bas Carbone en Grandes Cultures

Tableau 4. Description des sous-actions et résultats des calculs unitaires d'atténuation et de coût.

Sous-actions		A. Réduire la dose d'azote	B. Mieux valoriser les apports organiques	C. Améliorer l'efficacité de l'azote		
Contenu technique	Situation initiale	Apport d'azote minéral excédentaire, par surestimation des objectifs de rendement	Apports organiques insuffisamment pris en compte dans calcul de fertilisation, et sous-utilisés	Faible efficacité de l'azote minéral apporté (pertes par lixiviation de nitrate et volatilisation d'ammoniac)		
	Gestion de la fertilisation proposée	A. Faire un calcul de bilan azoté avec un objectif de rendement mieux ajusté	B1. Mieux prendre en compte le N organique B2. Réduire les pertes par volatilisation B3. Augmenter le volume de déchets recyclés	C1. Suppression du premier apport d'N	C2. Utiliser des inhibiteurs de nitrification	C3. Enfourer les engrais dans le sol
	Réduction permise d'engrais minéral	19,7 kg N/ha (14,8 à 29,4)	B1 + B2 + B3 : 14,4 kg N/ha (9,8 à 22,2)	15 kg N/ha	10,2 kg N/ha	12,3 kg N/ha (0 à -18,4)
Potentiel d'atténuation unitaire	Émissions* de N <sub>2</sub> O (directes + indirectes) kg CO <sub>2</sub> e/ha/an	Moins d'apport azoté et/ou meilleure efficacité				
		108 / 192 + 82 / 30 = 190 / 222	141 / 159	34 / 173	98 / 259	129 / 204
	Émissions* directes de CO <sub>2</sub> (gazole)	-	-	↓ épandage : 30	↓ épandage : 3	-
	Total émissions* directes + indirectes	190 / 222 142 à 282 / 170 à 315	138 / 156 94 à 214 / 107 à 236	147 / 231	101 / 262	86 / 154 0 à 129 / 47 à 204
	Émissions induites (amont) de CO <sub>2</sub> et N <sub>2</sub> O	109 78 à 156	76 52 à 118	87	55	65 0 à 98
Total* kg CO <sub>2</sub> e/ha/an	299 / 331	214 / 232	234 / 318	156 / 317	151 / 219	



- 5 catégories:
- Contenu technique
  - Potentiel d'atténuation unitaire
  - Coût unitaire
  - Assiette
  - Scénario de diffusion

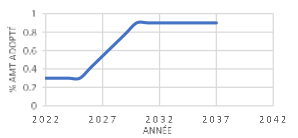
Sous-actions		A. Réduire la dose d'azote	B. Mieux valoriser les apports organiques	C. Améliorer l'efficacité de l'azote		
Coût unitaire	Achats €/ha	outil de pilotage : 9,3 (10 €/ha x 93 %)	surcoût enfouissement (B2) : 1,5	inhibiteur : 31,2 (0,34 €/kg N)	équipement fertiliseur pour semoir : 2	
	Économies €/ha/an	↓ engrais : - 18 (- 13,5 à - 26,8)	↓ engrais : - 13,1	↓ engrais : - 9,3 - 0,95 épandage : - 6,1	↓ engrais : - 11,2	
	Total €/ha/an	- 8,7 (- 4,1 à - 17,5)	- 11,6 (- 7,5 à 18,7)	- 22,7	15,8	- 9,1 (2,1 à - 14,7)
Assiette	Assiette théorique	toutes les grandes cultures fertilisées + maïs ensilage		grandes cultures d'hiver : 7,8 Mha	toutes grandes cultures sauf tournesol et riz	
	Critères techniques	sauf betterave	sauf riz	surfaces à fort reliquat de N en sortie d'hiver	inhibiteur associé à 20 % de la dose N totale (ou 1 an/5)	
	Ass. maximale technique (AMT)	11,7 Mha	12,0 Mha	1,8 Mha	2,3 Mha (320 000 tN/an)	3,7 Mha
Scénario de diffusion	État de référence 2010	7 %	0 %	7 %	1,6 %	10 %
	Scénario de diffusion	hypothèse : AMT atteinte en 2022	hypothèse : AMT atteinte en 2028	hypothèse : AMT atteinte en 2022	hypothèse : AMT atteinte en 2022	équipement nécessaire : AMT atteinte en 2030



# I- Introduction (WP4)

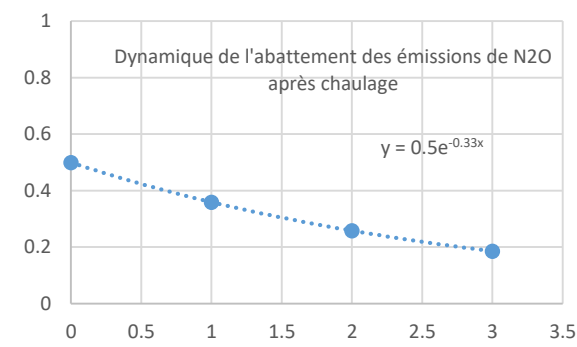
## Rédaction d'une fiche action complémentaire, relative au chaulage des sols acides

Contenu technique	Situation initiale	Application de 2.4 Mt de produits chaulant dont on estime émettre 0.18 Mt CO <sub>2e</sub> dans les estimations actuelles (chiffre à vérifier auprès du CITEPA). On peut aussi estimer que le chaulage concerne 2.5 M ha (chiffre à vérifier auprès du COMIFER)		
	Gestion du chaulage proposée	Atteindre progressivement un pH des sols cultivés et des sols en prairie de 6.8, soit un apport de 1 t VN pour un gain de 0.5 point de pH		
		Chaulage d'entretien (1 t VN / 4 ans)	Chaulage de redressement (2.5 t VN puis 5 ans après chaulage d'entretien)	
	Reduction permise d'émissions de N2O	1.50 / 1.08 / 0.78 / 0.56 kg N-N2O / ha / an	1.50 / 1.08 / 0.78 / 0.56 / 0.4 kg N-N2O / ha / an	
Potentiel d'atténuation unitaire	Emissions de N2O (directes + indirectes) Kg CO2e/ha/an	698 / 502 / 363 / 260 moyenne 456	698 / 502 / 363 / 260 / 186 moyenne 402	
	Emissions de CO2 Kg CO2e/ha/an	330 les 2 premières années puis 0	550 les 3 premières années puis 0	
	Total émissions directes + indirectes (Kg CO2/ha/an)	370 / 173 / 362 / 260 moyenne 291	150 / -47 / -188 / 260 / 187 / 370 / 173 / 362 / 260 moyenne 188	
	Emissions induites (amont) de CO2 et N2O (Kg CO2/ha/an)	22 / 0 / 0 / 0 moyenne négligeable	54 / 0 / 0 / 0 moyenne négligeable	
	Total Kg CO2e/ha/an	370 / 173 / 362 / 260 moyenne 291	150 / -47 / -188 / 260 / 187 / 370 / 173 / 362 / 260 moyenne 188	
Coût unitaire	Achats € / ha / an	100 / 0 / 0 / 0 / 100 / ...	200 / 0 / 0 / 0 / 0 / 100 / 0 / 0 / ...	
	Economies € / ha / an	gain de production 0		75 / 54 / 39 / 27 / 20
	Total € / ha / an	100 / 0 / 0 / 0 / 100 / ...	125 / -54 / -39 / -27 / -20	
Assiette	Assiette théorique	Sols de culture et de prairie dont le pH est compris entre 6.2 et 6.8 : 2 Mha		Sols de culture et de prairie dont le pH est inférieure 6.2 : 5.5 Mha
	Modalité d'application	Application des produits chaulant 1 fois tous les 4 ans soit sur 0,5 Mha / an		Application des produits chaulant 1 fois tous les 5 ans soit sur 1,1 Mh / an
	Assiette maximale (AMT)	2 Mha		5,5 Mha
	Assiette maximale annuelle (AMTa)	0,5 Mha/an		1,1 Mha/an
	Bilan total en MtCO <sub>2e</sub> /an	0.37 / 0.54 / 0.91 / 1.16 / 1.16 ....		0.15 / 0.10 / -0.08 / 0.18 / 0.36 / 0.58 / 0.80 / 1.35 / 1.53 / 1.34
Scénario de diffusion	Situation	Besoin de xMt / an produit et actuellement livraison du 1/3		
	Scénario de diffusion horizon 2030	90 % AMT, atteinte en 2030		



Hénault C., Caurel C., Jouin C., Diattara M., Pasquier C., Saby N., Bourennane H. 2020. CHAUGES, Evaluation du potentiel d'atténuation des émissions de GES par le chaulage des sols en France et proposition d'une méthodologie de prise en compte dans les inventaires nationaux. Rapport de projet, 68 p.

**Abatement des émissions dégressif au fil du temps selon la dynamique expert suivante**



Emissions de CO<sub>2</sub> à partir des produits chaulant de 75 % (moyenne IPCC et West et al., 2005) du carbone de produits carbonatés apportés (12 %) réparties sur les 2 premières années de l'apport





## Méthodologie LBCGC publiée au cours de l'été 2021

### 2.1 La diminution des émissions de GES associées à la fertilisation azotée

Tableau 1 : Liste des leviers « fertilisation azotée »

Leviers de réduction des émissions de GES	Potentiel de RE
<p>Réduire la dose d'azote minéral apportée sur le système de culture</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Ajustement du calcul de dose prévisionnelle grâce à une meilleure prise en compte des apports et des objectifs de rendements réalistes</li> <li>Prise en compte des conditions climatiques pour le déclenchement des apports</li> <li>Utilisation d'outils de pilotage</li> <li>Modulation intraparcellaire</li> </ul>	<p>Environ -12,7 kgeqCO<sub>2</sub>/kgN minéral évité (en considérant la réduction d'émissions directes au champ et indirectes liée à la fabrication des engrais)</p>
<p>Améliorer l'efficacité de l'azote apporté et valorisé par la plante en limitant la nitrification/dénitrification, la volatilisation et la lixiviation – Agir sur la nitrification / dénitrification :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Utilisation d'inhibiteurs de nitrification</li> <li>Chaulage des sols acides (uniquement pour les pHeau initial &lt; 6.8 et dans l'objectif d'atteindre une</li> </ul>	<p>Utiliser des inhibiteurs de nitrification : -317 kg CO<sub>2</sub> eq/ha/an (Pellerin et al., 2013)</p> <p>Substituer 100 kgN d'urée par 100 kgN d'ammonitrate : -114 kgeqCO<sub>2</sub>/ha/an</p>

Page | 18

#### Méthode LBC Grandes Cultures (version 1.1)

<p>valeur de 6.8)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Utilisation de formes d'engrais moins émettrices (réduction de l'utilisation des formes uréiques, inhibiteurs d'uréase)</li> <li>Enfouissement des apports organiques et minéraux</li> </ul>	<p>Enfouir les engrais dans le sol : -219 kgeqCO<sub>2</sub>/ha/a (Pellerin et al., 2013)</p>
<p>Introduire des légumineuses fixatrices d'azote dans la rotation (en culture principale, associée ou intermédiaire) ou des cultures/varétés à plus faible besoin en azote</p>	<p>Jusqu'à -2000 à -2200 kgeqCO<sub>2</sub>/ha pour une fève/roli un pois, un soja ou un lupin en culture principale non fertilisée par rapport à une culture fertilisée comme le blé (références AGRIBALYSE).</p> <p>A cela s'ajoute la réduction de dose sur la culture suivante (références ECOALIM) :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>environ -200 kgeqCO<sub>2</sub>/ha pour un précédent soja ou pois (par exemple 170 kgeqCO<sub>2</sub>/ha pour le maïs suivant et 230 kgeqCO<sub>2</sub>/ha pour le blé suivant)</li> <li>environ -1990 kgeqCO<sub>2</sub>/ha pour une luzerne et -1600 kgeqCO<sub>2</sub>/ha pour une prairie temporaire mixte avec trèfle</li> </ul>

➤ **N2O\_directes<sub>i,k</sub>** : émissions directes de protoxyde d'azote associées à la fertilisation minérale, à la fertilisation organique, aux résidus de cultures et à l'azote minéralisé du sol, associées au système de culture *i* en année *k*, exprimée en kg N<sub>2</sub>O-N et déterminées selon l'équation suivante :

$$N2O\_directes_{i,k} = [ (QN\_min_{i,k} + (QN\_inhib_{i,k} * C\_inhibiteur)) * EF1\_min ] + [ (QN\_org_{i,k} + (QN\_org\_inhib_{i,k} * C\_inhibiteur) + QN\_résidus_{i,k} + QN\_minéralisé_{i,k}) * EF1\_org ] * C\_chaulage_{i,k}$$

Equation 5: Calcul des émissions de N<sub>2</sub>O directes

(Source : IPCC 2019 adaptée)

- **C\_chaulage<sub>i,k</sub>**, le coefficient d'abattement des émissions directes de N<sub>2</sub>O sur le système de culture *i* en année *k*, dans le cas de la mobilisation du levier « Chaulage des sols acides (pHeau initial < 6,8 pour atteindre un pHeau=6,8) ». Ce coefficient d'abattement devra être calculé selon la formule suivante :

$$C\_chaulage_{i,k} = 1 - \left[ \frac{\min(pH_{final} - pH_{initial}; 0,4)}{0,4} \times (0,5 \times \exp(-0,33 * k\_chaulage)) \right]$$

Equation 7: Calcul du coefficient d'abattement associé au chaulage des sols acides

(Source : méthode Expert issue des travaux Hénault et al. 2019)

Avec :

- **k\_chaulage**, le nombre d'années après l'application de l'amendement basique
- **pH<sub>initial</sub>**, le pHeau initial moyen des parcelles concernées par le chaulage. Dans le cas d'un pHeau initial > 6,8, le levier chaulage ne peut être mobilisé (il n'y a pas d'abattement des émissions de N<sub>2</sub>O possible) et **C\_chaulage<sub>i,k</sub> = 1**
- **pH<sub>final</sub>**, le pHeau obtenu après redressement sur l'ensemble des parcelles concernées par le chaulage (pHeau final doit être compris entre 6,4 et 6,8). Dans le cas d'un pHeau final < 6,4, il n'y a pas d'abattement des émissions de N<sub>2</sub>O et **C\_chaulage<sub>i,k</sub> = 1**

Ce coefficient devra être calculé uniquement dans le cas de la mobilisation du levier «Chaulage des sols acides » par l'exploitation et appliqué seulement pour le calcul des émissions de GES du scénario projet (Emissions\_ha\_ferti\_Projet\_(i,k)). Pour le calcul des émissions de GES du scénario de référence et dans les cas où le levier n'est pas activé, **C\_chaulage<sub>i,k</sub> = 1**

Page | 42



## Points clefs du WP4

### Eventuelles difficultés

*Pas d'économiste actuellement dans le projet*

A nuancer avec l'opportunité du calendrier de la méthodologie bas carbone et du travail réalisé dans ChauGES

### Principales perspectives - Programmation

*Consolider le projet avec des économistes et recruter un post-doc – calendrier soumis aux appels d'offre*

La publication de la méthodologie du LBCGC correspond aux attentes du WP même si nous ne sommes pas auteur

### Communication

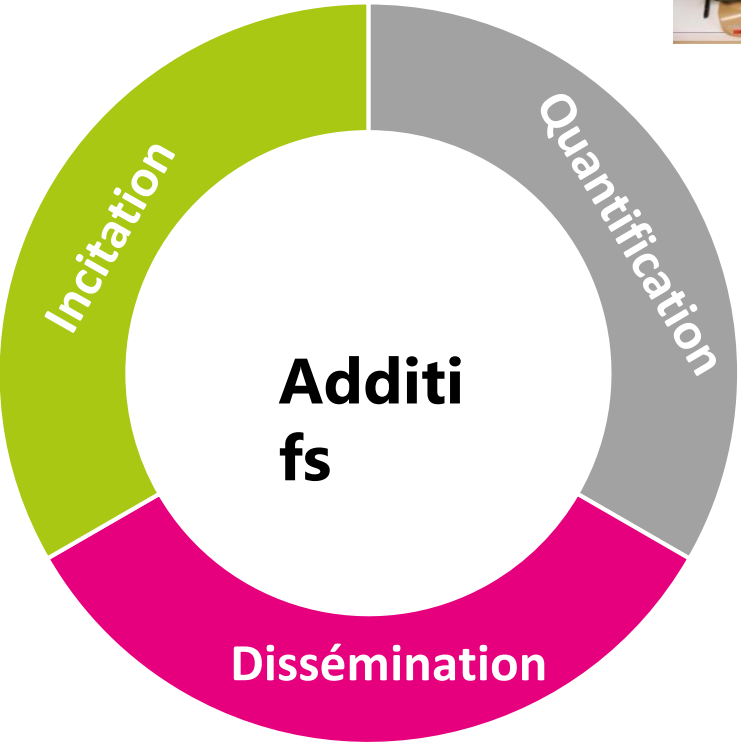
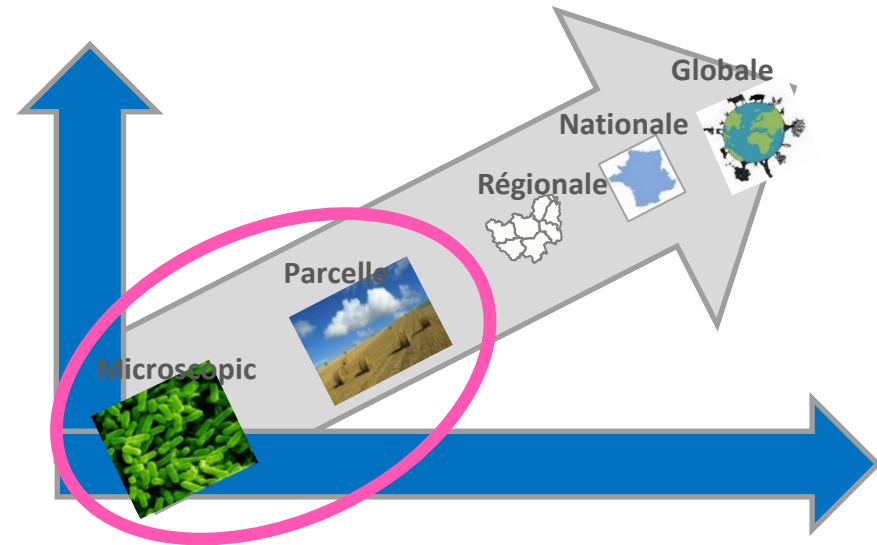
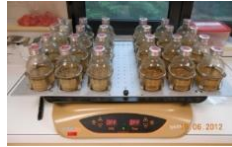
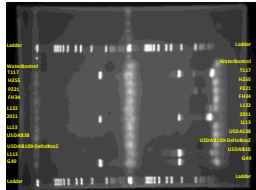
InterSoil 2020

Rapport ChauGES – Fiche action « chaulage climatique »

Méthodologie Label Bas Carbone (experts consultés)



## Cadre général du WP1





### II. A. Etude sur les rhizobia du pois



# Introduction et contexte de l'étude sur les rhizobia du pois

**Table 1** N<sub>2</sub>O consumption rates measured under different nodule conditions and assessed on different scales

Strain	Status of nodules	[N <sub>2</sub> O]	N <sub>2</sub> O consumption rate <sup>S1</sup>			
			Direct estimation		Field extrapolation (g N-N <sub>2</sub> O ha <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> )	
			μg N-N <sub>2</sub> O pot <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup>	μg N-N <sub>2</sub> O g <sup>-1</sup> nodules h <sup>-1</sup>	direct from pot to field	by considering nodules and plant density in field <sup>S2</sup>
USDA110	Attached	atmospheric	0.037	0.042	0.29	0.13
	Detached	atmospheric		0.013		
	Detached	30 μl l <sup>-1</sup>		0.95		
MSDJ G49	Attached	atmospheric	0.10	0.11	0.78	0.36
	Detached	atmospheric		0.03		
	Detached	30 μl l <sup>-1</sup>		1.2		

<sup>S1</sup> Rates calculated by taking the soil N<sub>2</sub>O production (0.031 μg N-N<sub>2</sub>O pot<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>) into account

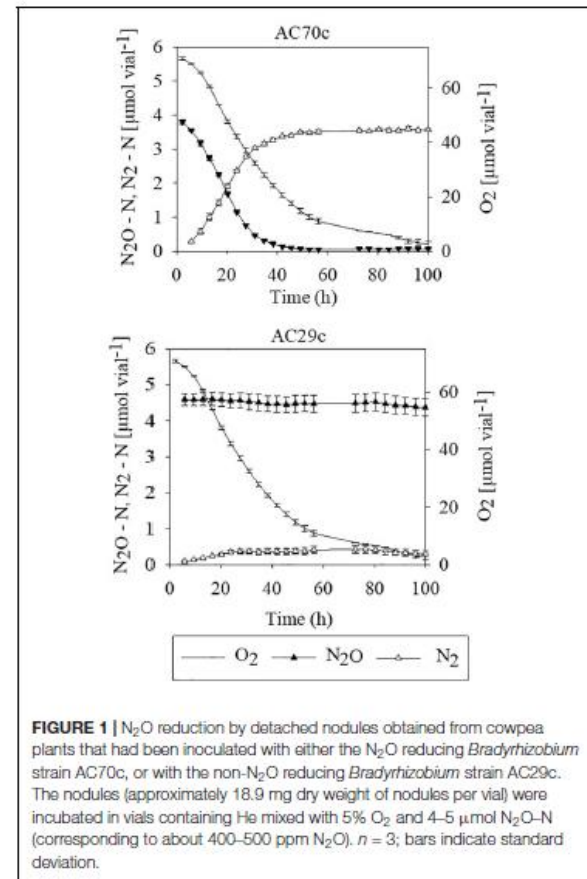
<sup>S2</sup> Rates calculated by taking into account the density of nodules that were globally 2.2 times higher in the pots (0.88 g per pot of 0.031 m<sup>2</sup>, i.e. 284 kg nodules per ha) during the greenhouse experiment, than generally observed in an inoculated soybean field (130 kg per ha).

Hénault et Revellin, 2011 Plant and Soil

	Annual N <sub>2</sub> O emission	Nodule decomposition period N <sub>2</sub> O emission	Reduction rate
	(kgN ha <sup>-1</sup> )	(kgN ha <sup>-1</sup> )	(%)
<b>2013</b>	(from March 18, 2013 to March 17, 2014)	(from Aug 29 to Nov 15, 2013)	
Native	0.287 ± 0.104	0.180 ± 0.076	—
<i>nosZ+</i>	0.260 ± 0.115	0.130 ± 0.045	28
<b>2014</b>	(from March 3, 2014 to March 2, 2015)	(from Aug 29 to Nov 15, 2014)	
Native	0.246 ± 0.078	0.121 ± 0.034	—
<i>nosZ+</i>	0.235 ± 0.098	0.084 ± 0.033	30
Statistical significance <sup>a</sup>	ns	P < 0.05	

**Table 3. Cumulative N<sub>2</sub>O emission in the field experiment.** Soybean seeds were inoculated at sowing with a mixed culture of *B. diazoefficiens* strains C110 (*nosZ+*) or native strains (Native; *nosZ-* dominant). <sup>a</sup>Statistical significance for N<sub>2</sub>O emission was tested using a mixed linear model based on two years of field data.

Akiyama et al., 2016 Sci. Reports



Wolij et al., 2019 Frontiers in Microbiology



A notre connaissance,

- Rien sur le couple pois - *r. leguminosarum* / N<sub>2</sub>O
- Or importance du pois dans nos système de culture
- Un travail engagé par notre équipe il y a environ 10 ans :

**INRA SCIENCE & IMPACT**

With the financial support of

**Impact of pea genetic variability on the control of N<sub>2</sub>O reduction by soil-microorganisms-plant systems**

Key words : greenhouse gas N<sub>2</sub>O, pea genetic variability, hypernodulating mutants, *Rhizobium leguminosarum biovar viciae*

Bourion V.<sup>(1)</sup>, Revellin C.<sup>(1)</sup>, Bizouard F.<sup>(1)</sup>, De Larambergue H.<sup>(1)</sup>, Aubert V.<sup>(1)</sup>, Duc G.<sup>(1)</sup>, Ferré A.S.<sup>(1)</sup>, Hénault C.<sup>(2)</sup>

(1) INRA, UMR AgroEcologie, 21000 Dijon France  
 (2) INRA, UR SOLS, 0272, 45075 Orleans Cedex, France

**1. Introduction**

- Agriculture, through soil emissions, is an important anthropogenic source of the greenhouse gas N<sub>2</sub>O that has a Global Warming Potential 300 times higher than CO<sub>2</sub> on a molar basis (UNEP, 2013).
- In soils, N<sub>2</sub>O is mainly produced through the microbial processes of denitrification and nitrification. The last step of the denitrification process is currently the only known pathway for the terrestrial removal of N<sub>2</sub>O. N<sub>2</sub>O reduction is catalyzed by the N<sub>2</sub>O reductase enzyme encoded by the *nosZ* gene (illustr 1).
- Strategies to mitigate N<sub>2</sub>O emissions from agricultural soils could be based on the promotion of the N<sub>2</sub>O reduction, for example by inoculating crops with microorganisms able to reduce N<sub>2</sub>O. Previous studies have demonstrated that soybean roots nodulated by *Rhizobia* strains carrying the *nosZ* gene are able to reduce the greenhouse gas N<sub>2</sub>O (Sameshima-Saito *et al.*, 2006; Hénault and Revellin, 2011).
- Legume crops play a major role in sustainable agricultural systems as their nitrogen demand is mainly satisfied by the root endo-symbiosis they establish with nitrogen-fixing bacteria (*Rhizobia*) from the soil. Pea is an important legume crop (illustr 2). However, from our knowledge, the *nosZ* gene has not yet been observed in any isolated strain of *Rhizobium leguminosarum biovar viciae*.
- The aim of this study was to assess the ability of reducing N<sub>2</sub>O of different systems involving pea genotypes varying for their nodulation abilities.

**2. Materials and Methods**

- Five different pea genotypes were chosen from their varying nodulation abilities. They were (i) the old cultivar Frisson and (ii) the more recent one Austin ; hypernodulating mutants, respectively (iii) Frisson-*sym29* (Bourion *et al.*, 2007) and (iv) Austin-*sym29*, and (v) P2 a non-nodulating mutant of Frisson. All mutants were obtained from ethyl methane sulfonate mutagenesis.
- All these five genotypes (illustr 3) plus a control (bare soil) were cultivated in a greenhouse (6 pots per genotypes, 3 plants per pot) on a soil known as unable to reduce N<sub>2</sub>O. No inoculations were made. Nodules were established with soil indigenous strains.
- At the beginning of seed filling, pots were incubated for 48 h in airtight chambers. The N<sub>2</sub>O concentration in chambers was periodically analyzed using a GC (electron capture detector) to evaluate N<sub>2</sub>O production/reduction rates (illustr 4).

**3. Results**

- Both the number and the mass of nodules were higher for hypernodulating genotypes.
- Variations in N<sub>2</sub>O concentration in the airtight chambers after the 48 hours of incubation were observed between the pea genotypes.
- No change of the N<sub>2</sub>O concentration in chambers was observed on both the bare soil control and the system with Austin.
- A low increase of N<sub>2</sub>O concentration was observed for the system with the non-nodulating P2 genotype.
- Conversely, the hypernodulating Austin-*sym29* genotype clearly allowed a N<sub>2</sub>O consumption.
- The pea Austin-*sym29* genotype has probably enhanced the development of strains having the *nosZ* gene and able to reduce N<sub>2</sub>O.

Pea genotype	Bare soil	P2		Frisson		Frisson- <i>sym29</i>		Austin		Austin- <i>sym29</i>	
		N <sub>2</sub> O (μmol h <sup>-1</sup> pot <sup>-1</sup> )	Flux (μmol h <sup>-1</sup> pot <sup>-1</sup> )	N <sub>2</sub> O (μmol h <sup>-1</sup> pot <sup>-1</sup> )	Flux (μmol h <sup>-1</sup> pot <sup>-1</sup> )	N <sub>2</sub> O (μmol h <sup>-1</sup> pot <sup>-1</sup> )	Flux (μmol h <sup>-1</sup> pot <sup>-1</sup> )	N <sub>2</sub> O (μmol h <sup>-1</sup> pot <sup>-1</sup> )	Flux (μmol h <sup>-1</sup> pot <sup>-1</sup> )	N <sub>2</sub> O (μmol h <sup>-1</sup> pot <sup>-1</sup> )	Flux (μmol h <sup>-1</sup> pot <sup>-1</sup> )
Fr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Fr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Fr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Fr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Fr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Fr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	

Table 1 - Characteristics of nodules and best flux of N<sub>2</sub>O (μmol N<sub>2</sub>O h<sup>-1</sup> and per pot) by the soil plants with different genotypes of peas.  
 Positive values indicate a production of N<sub>2</sub>O while negative values indicate N<sub>2</sub>O consumption.

**4. Conclusions and Perspectives**

- The use of hypernodulating pea genotypes has allowed to create systems (soil-plant-microorganisms) able to reduce the greenhouse gas N<sub>2</sub>O
- The next step of this study is to investigate whether if the increase of nodules for the Austin-*sym29* genotype would explain the detected N<sub>2</sub>O consumption or if specific strains of *Rhizobium leguminosarum biovar viciae* with the functional *nosZ* gene has been preferentially selected by the pea Austin-*sym29*
- Therefore field tests both with pea inoculation with isolated strains or with hypernodulating Austin-*sym29* genotype would be necessary to quantify the N<sub>2</sub>O reduction by this process at the field scale.
- At the end, this study suggests that pea breeding and its interactions with soil microbial activities could contribute to promote the N<sub>2</sub>O reduction in soils, as a strategy for mitigating greenhouse gas emission by agriculture.

**References**

Hénault C., Revellin C. 2011. Inoculation of leguminous crops for mitigating soil emissions of the greenhouse gas nitrous oxide. Plant and Soil 344:283-290.

Sameshima-Saito, Takaki, *et al.*, 2006. Limited distribution of soilborne N<sub>2</sub>O reducing bacteria in the rhizosphere of soybean in the field. Appl. Env. Microb. 72:3036-3042.

UNEP (2013) - An IPCC assessment. UNEP, Geneva, Kenya.

Bourion V., Legrand A. *et al.*, 2007. Genetic variability in nodulation and root growth affects nitrogen fixation and accumulation in peas. Annual of botany 100:589-596.



### Avant NatAdGES

Culture de Pois sur sol non réducteur de N<sub>2</sub>O

- Un faible signal de réduction par le système
- Un effet génotype du pois (Bourion *et al.*, 2015)

Conservation de l'intégralité des nodosités

(MERS + GEAPSI)

Isolement à partir des nodosités formées sur les génotypes Austin et Austin sym29

Collection rhizobia (208)  
(MERS)

Détection du gène *nosZ*  
72/208 isolats

(MERS)

### Projet NatAdGES

Caractérisation phénotypique (sur la fonction de réduction de N<sub>2</sub>O en N<sub>2</sub>) de 82 isolats, en cultures microbiennes pures (thèse I. Ouerghi)

Caractérisation phénotypique (sur la fonction de réduction de N<sub>2</sub>O en N<sub>2</sub>) du couple pois – rhizobia, sur plantes entières

Caractérisation de l'efficacité des isolats vis-à-vis de la croissance des plantes de pois



# Dispositif des cultures en serre

<b>Dispositif</b>	Blocs	Nombre de blocs	4
<b>Facteur 1</b>	Variété pois	Kayanne Astronaute	2
<b>Facteur 2</b>	Rhizobia	12 isolats nosZ <sup>+</sup> , 1 isolat nosZ <sup>-</sup> , souche de référence pour efficacité (P221 nosZ <sup>-</sup> )	14
<b>Autres témoins</b>	Couple légumineuse-rhizobia de référence	Soja - <i>Bradyrhizobia</i> (G49 - nosZ <sup>+</sup> et USDA138 - nosZ <sup>-</sup> )	2
<b>Nombre total de modalités</b>	(2 x 14) + 2		30
<b>Pot de 5 litres</b>	4 plantes / pot	Substrat inerte sans azote : PERLITE  Solution nutritive sans azote	120





22/06/2021 : 20 jours

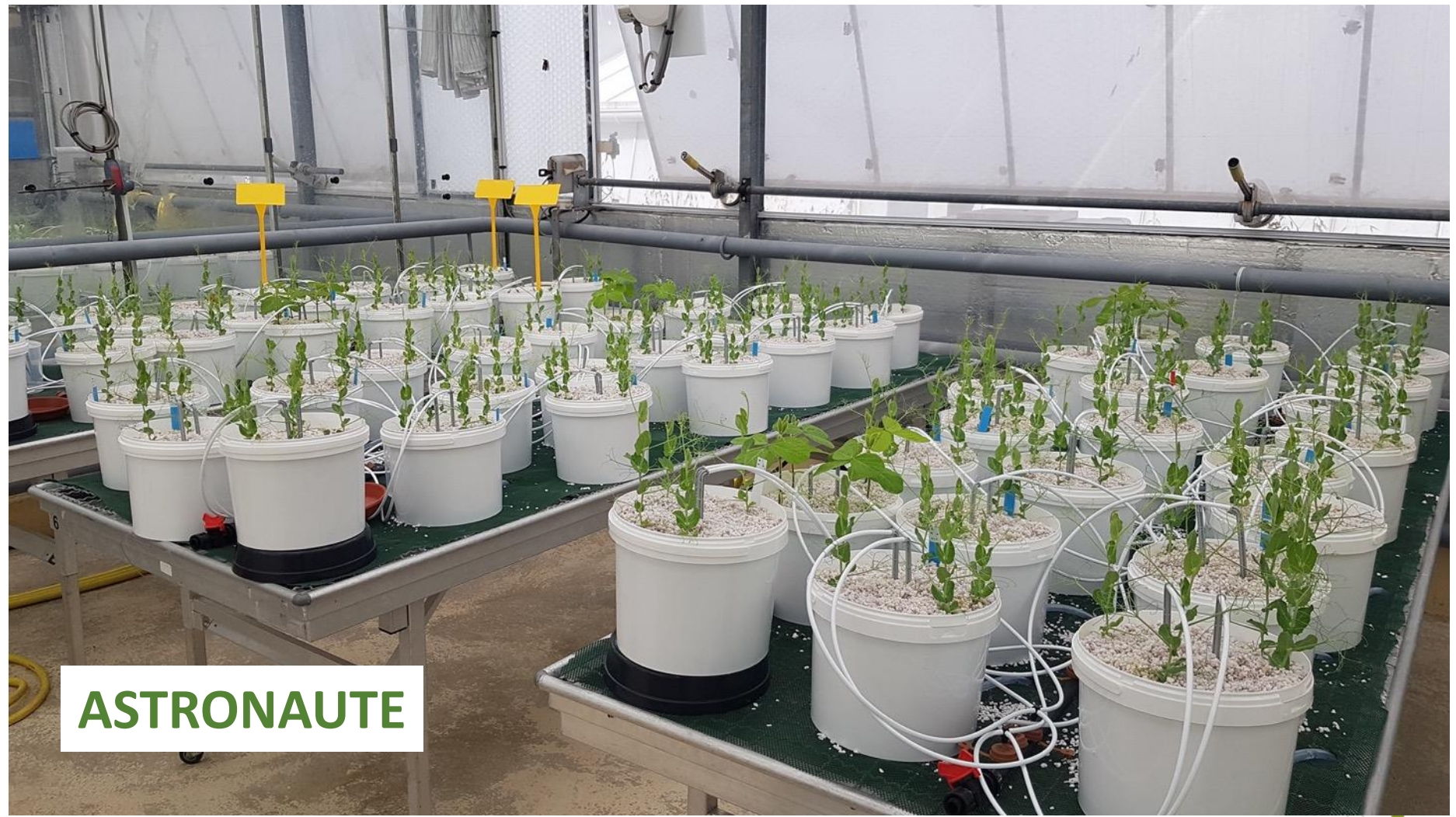


**KAYANNE**





22/06/2021 : 20 jours



**ASTRONAUTE**



## Dispositif de mesures

« Tonneaux » / Kayanne



Cinétique d'évolution de la concentration en  $N_2O$  sur 48 h, après ajout  $N_2O$  pour être environ à la concentration de 3 ppm. Introduction de Kr (étalon interne)

- R1 – Bloc 1 ; R2 – Bloc 2 ; R3 – Bloc 3

« Bocaux » / Kayanne et Astonaute



Détermination de la concentration en  $N_2O$  à t0 et après 24 h d'incubation, après ajout  $N_2O$  pour être à la concentration de 3 ppm.

Introduction de Kr (étalon interne)

1 bocal par pot (ensemble des systèmes racinaires)



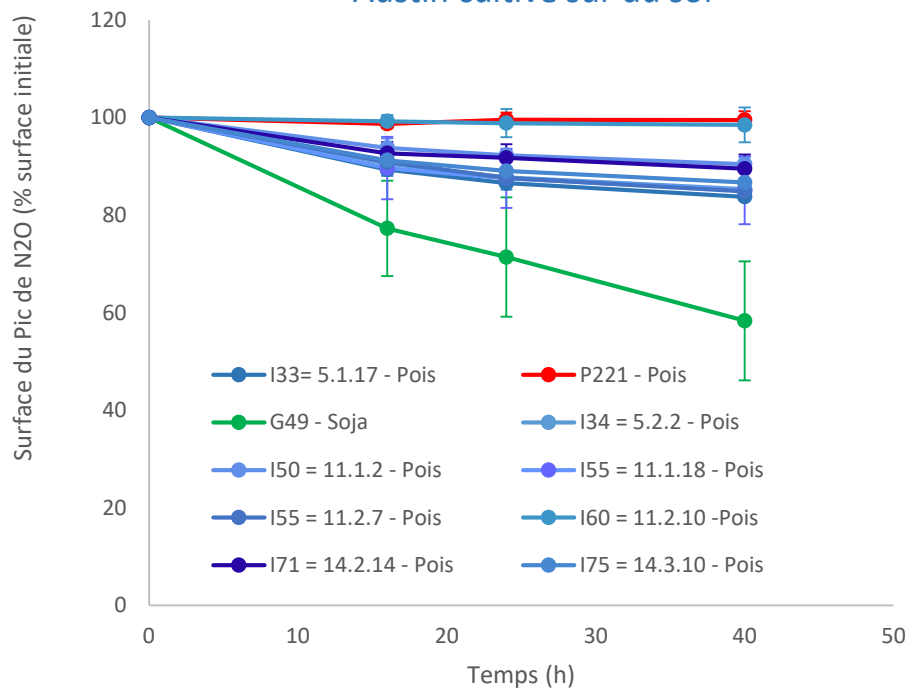


## Evolution du gaz N<sub>2</sub>O dans les « Tonneaux »

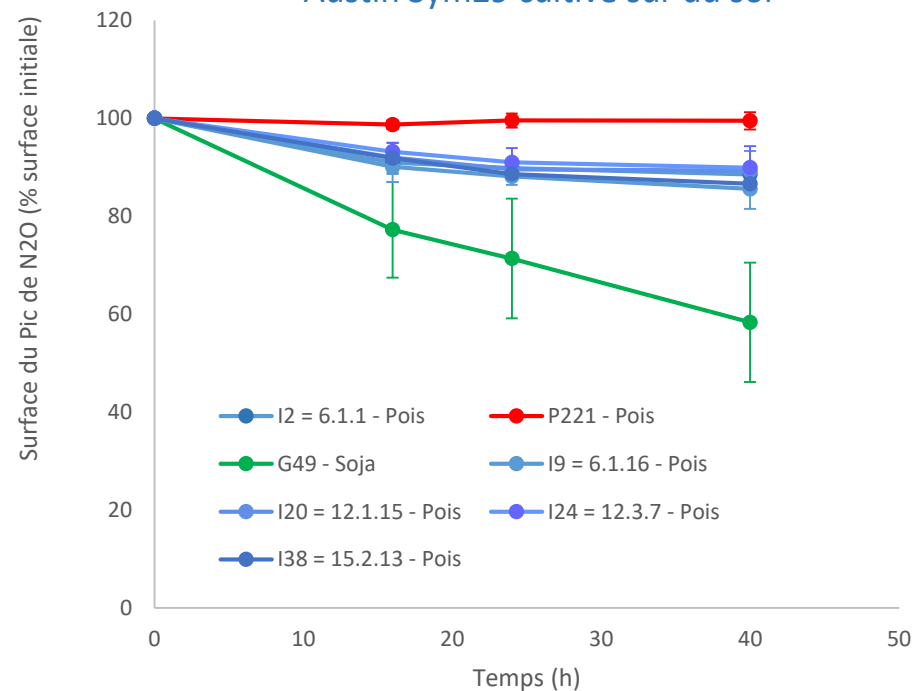
- P221
- G49
- Isolats testés



Isolats issus des nodosités du génotype de pois Austin cultivé sur du sol



Isolats issus des nodosités du génotype de pois Austin Sym29 cultivé sur du sol



## Consommation de N<sub>2</sub>O par les systèmes racinaires incubant dans les bocaux

Concentration initiale en N<sub>2</sub>O ~ 3 ppm



N2O consommé (%)	Serre 25 / Kayanne					
	1	2	3	4	moyenne	ecartype
P221	0.05	1.17	5.16	-1.42	1.24	2.82
I2	68.04	58.37	58.13	50.42	58.74	7.22
I9	56.60	62.55	68.01	48.13	58.82	8.52
I20	63.73	69.83	52.50	46.62	58.17	10.53
I24	59.24	67.08	57.45	40.29	56.01	11.29
I33	63.32	61.35	61.32	46.29	58.07	7.91
I34	56.22	67.43	59.18	62.14	61.24	4.78
I38	66.76	52.53	59.70	61.97	60.24	5.92
I50	51.57	53.84	66.29	6.16	44.46	26.34
I55	68.96	73.40	31.74	54.03	57.03	18.79
I57	63.18	57.63	79.83	43.34	61.00	15.08
I60	1.31	4.85	1.10	1.34	2.15	1.80
I71	57.96	64.74	55.90	39.58	54.54	10.67
I75	54.31	50.88	53.51	50.33	52.25	1.95
G49	95.83	94.03	95.37	94.97	95.05	0.76

N2O consommé (%)	Serre 26 / Astronaute					
	1	2	3	4	moyenne	ecartype
P221	-3.84	-1.14	-0.83	-1.45	-1.82	1.37
I2	69.07	62.63	60.40	66.98	64.77	3.96
I9	55.74	58.35	60.78	41.41	54.07	8.69
I20	54.93	53.26	64.85	65.78	59.71	6.53
I24	59.61	54.15	48.03	54.82	54.15	4.75
I33	59.92	63.47	52.00	43.73	54.78	8.79
I34	52.54	70.37	52.77	57.57	58.31	8.37
I38	62.99	62.01	64.33	38.59	56.98	12.30
I50	55.18	63.07	50.29	48.27	54.20	6.58
I55	50.95	52.36	58.12	65.97	56.85	6.82
I57	57.83	71.73	56.07	57.13	60.69	7.39
I60	-4.05	-3.51	-1.11	1.67	-1.75	2.61
I71	61.80	59.28	47.55	66.18	58.70	7.96
I75	68.85	44.02	43.59	70.00	56.62	14.80
USDA138	-9.98	-5.95	-4.73	-3.00	-5.92	2.97



## Conclusions partielles

Dispositif mobilisé : Résultats cohérents « tonneaux » / « bocaux » avec des avantages et inconvénients de chacun

La majorité des isolats testés réduisent N<sub>2</sub>O lorsqu'elles sont en symbiose avec le pois

Peu de variabilité entre les isolats (excepté *a priori* S60 qui ne réduit pas)

Un taux de réduction à calculer et à resituer par rapport à la BDD que l'on constitue sur ce thème

Effet génotype des plantes pas mis en évidence ici.

Liens seront à faire avec l'efficacité des isolats.



## Mesures relatives à l'efficacité de la fixation symbiotique

- Variables issues des pesées de l'ensemble des 4 plantes d'un même pot
  - Poids sec parties aériennes = proxi de l'efficacité
  - Poids sec racines (sans nodosités) : pour Kayanne
  - Poids sec nodosités : pour Kayanne
- Variables mesurées au dépotage sur les 4 plantes de chacun des pots
  - Hauteur parties aériennes
  - Nombre de ramifications
  - Numéro du 1<sup>er</sup> étage fructifère
  - Nombre d'étages fructifères
  - Numéro des étages avec gousses avortées
  - Stade (Nombre de nœuds total)



*Les Dénodulants de l'Eté 2021 !*

Photo : V. Nowak





## Statistiques comparatives sur efficacité

Variables mesurées au dépotage sur les 4 plantes de chacun des pots

- Ex Hauteur parties aériennes

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F	value	Pr(>F)
Cultivar	1	29741	29740.6	375.8820	<2.2e-16	***
isolat	13	4508	346.8	4.3831	6.033e-07	***
Bloc	3	4950	1650.0	20.8542	1.412e-12	***
Cultivar:isolat	13	1041	80.1	1.0122	0.4383	
Residuals	402	31807	79.1			

Variables issues des pesées de l'ensemble des 4 plantes d'un même pot

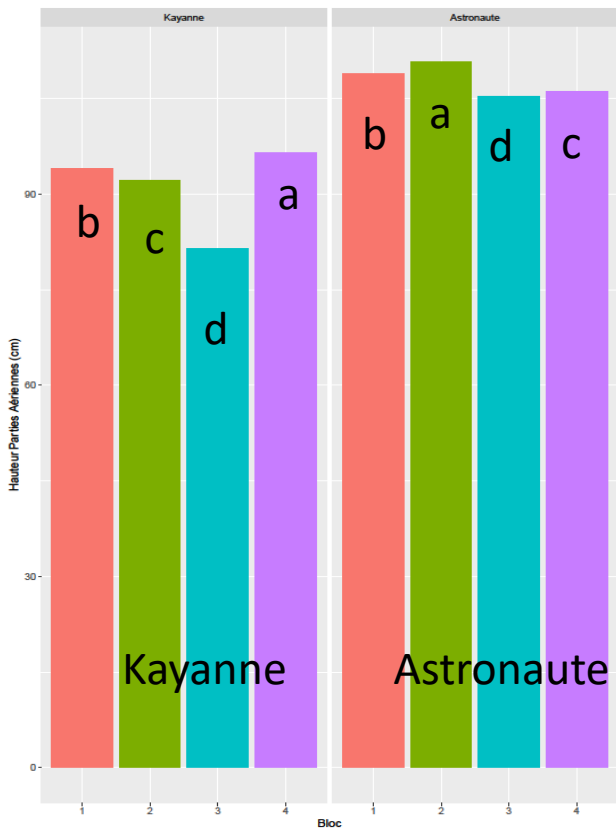
- Ex Poids sec parties aériennes

Df	Sum Sq	Mean Sq	F	value	Pr(>F)	
Cultivar		1213.590	213.590	156.9751	<2.2e-16	***
isolat		1342.114	3.240	2.3808	0.009569	**
Bloc		322.208	7.403	5.4406	0.001892	**
Cultivar:isolat		1314.064	1.082	0.7951	0.663167	
Residuals		78106.131	1.361			

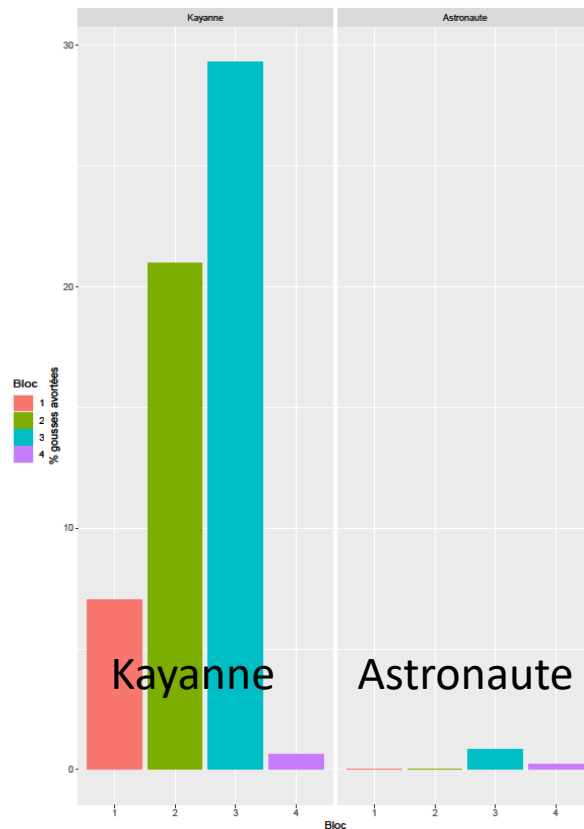
- ✓ Effets cultivar, isolat et bloc
- ✓ Pas effet interaction cultivar x isolat



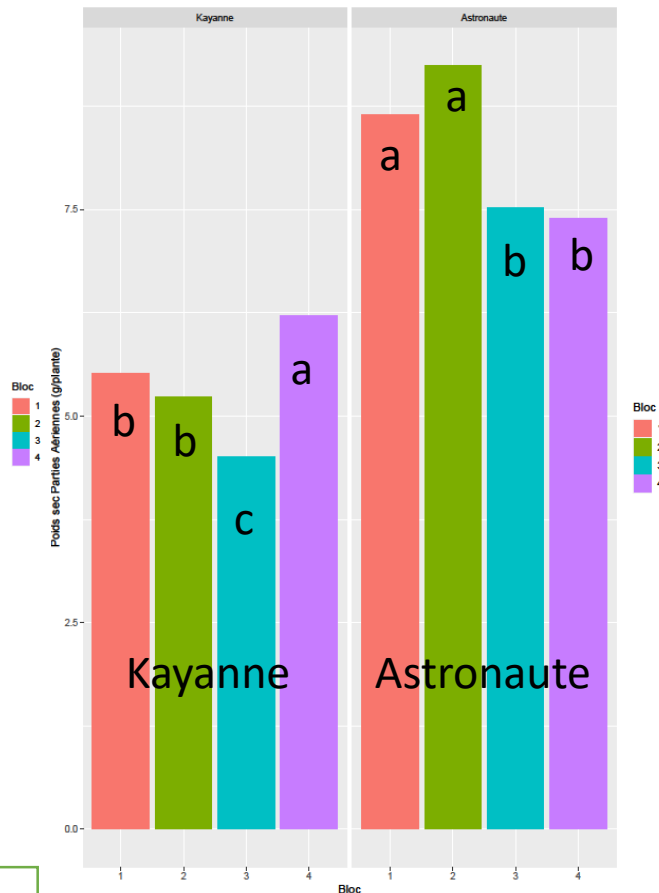
## Hauteur des plantes



## Nombre de gousses avortées



## Poids sec Aérien



- ✓ Effet cultivar sur la hauteur des plantes
- ✓ Kayanne : effet passage en tonneaux sur blocs 1, 2 & 3

- ✓ Kayanne : Effet passage en tonneaux très net
- Avortement de gousses

- ✓ Effet cultivar sur poids sec des parties aériennes
- ✓ Des effets blocs



## Statistiques comparatives sur isolats

### Hauteur des plantes

### Poids sec des parties aériennes

#### Kayanne

#### Astronaute

#### Kayanne

#### Astronaute

S33	96.93750	a	S55	112.81250	a
S57	94.81250	b	<b>S20 111.31250</b>	<b>b</b>	
S2	94.68750	b	S60	111.25000	b
<b>S20 92.87500</b>	<b>c</b>		S57	109.68750	c
S34	92.65625	c	<b>P221 109.56250</b>	<b>c</b>	
S55	92.00000	d	S33	108.31250	d
S24	91.62500	de	S24	107.18750	e
<b>P221 91.33333</b>	<b>de</b>		S75	106.90909	e
S71	91.15625	e	S34	106.68750	e
S60	89.96667	f	S9	106.68750	e
S9	89.25000	g	S2	106.12500	ef
S38	88.87500	gh	S38	105.31250	f
S75	88.50000	h	S71	103.83333	g
<b>S50 80.56250</b>	<b>i</b>		<b>S50 98.16667</b>	<b>h</b>	

S33	6.188125	a	S24	9.320000	a
<b>P221 5.984375</b>	<b>a</b>		S60	9.093125	a
S57	5.943125	a	<b>S20 8.776875</b>	<b>ab</b>	
S24	5.788064	ab	S75	8.621667	ab
<b>S20 5.783125</b>	<b>ab</b>		S57	8.583349	ab
S2	5.636616	ab	S2	8.558529	ab
S34	5.568750	ab	<b>P221 8.230625</b>	<b>ab</b>	
S9	5.344375	ab	S33	8.216875	ab
S55	5.271939	ab	S38	8.061875	ab
S38	5.198750	ab	S9	7.856617	ab
S71	5.080823	ab	S55	7.803750	ab
S75	4.794375	ab	S34	7.722951	ab
S60	4.704375	ab	S71	6.937500	ab
<b>S50 3.847500</b>	<b>b</b>		<b>S50 5.766667</b>	<b>b</b>	

✓ Effet isolat sur la hauteur des plantes et sur le poids sec des parties aériennes : des valeurs supérieures ou équivalentes obtenues avec certains isolats en comparaison avec la souche P221 = témoin efficient

✓ Pas d'effet isolat significatif sur poids sec racines et nodosités pour Kayanne



## Conclusions partielles

Des résultats très encourageants concernant l'efficacité :

- La plupart des isolats ont une efficacité équivalente à celle de P221
- Un seul isolat est moins efficace

Pour aller plus dans l'analyse, vont être calculés :

- Poids sec parties aériennes/poids sec nodosités : efficacité isolat
- Poids sec nodosités/poids sec racines

Dénodulation d'Astronaute selon les résultats des analyses mentionnées ci-dessus

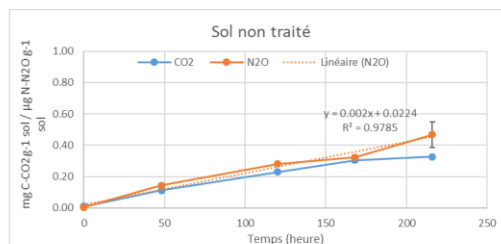
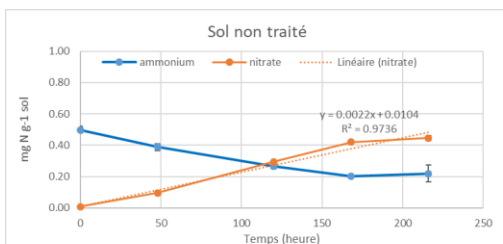


# II. B. Etude sur les inhibiteurs de la dénitrification

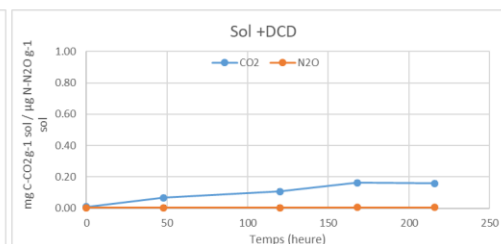
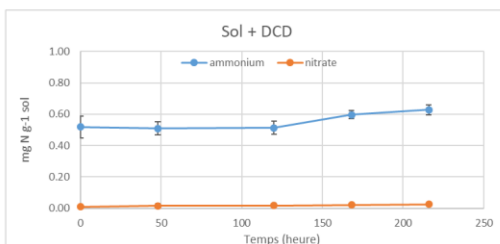


## II- B. Les inhibiteurs de la nitrification

- Mise en place d'un protocole de caractérisation de la nitrification dans les sols pouvant être appliqué en séries (Garrido et al., 2002)



DCD : inhibiteur chimique de la nitrification, commercialisé



- Partage de ce protocole entre les partenaires (en cours)
- Formulation de différents produits (Groupe Roullier)
- Test de quelques produits (en cours)
- Test sur de nouvelles formulation à venir avec une répartition du travail (AgroEcologie / Groupe Roullier) en réflexion







# Les effets positifs des produits chaulant

- Augmenter le pH des sols acides, ce qui leur permet de devenir plus productifs.

## Residual effects of superficial liming on tropical soil under no-tillage system

Claudio Hideo Martins da Costa<sup>(1)</sup>, Carlos Alexandre Costa Crusciol<sup>(2)</sup>,  
 Jayme Ferrari Neto<sup>(2)</sup> e Gustavo Spadotti Castro<sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup>Universidade Federal de Goiás, Regional Jataí, Campus Cidade Universitária, BR 364, km 195, nº 3.800, CEP 75801-615 Jataí, GO, Brazil. E-mail: c\_hideo@hotmail.com  
<sup>(2)</sup>Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias, Campus de Botucatu, Caixa Postal 237, CEP 18603-970 Botucatu, SP, Brazil. E-mail: carloscrusciol@unesp.br  
<sup>(3)</sup>Embrapa, Unidade de Pesquisa, Avenida Soldado Passarinho, nº 303, Fazenda Jardim Chapadão CEP 13070-115 Campinas, SP, Brazil. E-mail: gustavo.astro@embrapa.br

**Abstract** – The present study was conducted to evaluate the residual effects of superficial liming on soil fertility and on the mineral nutrition and grain yield of soybean, and of black oat and sorghum in crop succession. The experiment was carried out on a clayey Oxisol in a randomized complete block design with four replicates. Treatments consisted of lime doses of 0, 2, 4, 6, 8, 10 and 12 t/ha applied in October 2002 and November 2004. Soil samples were collected at five soil layers, down to 0.60-m depth. Surface liming was effective in reducing soil acidity and increasing Ca<sup>2+</sup> and Mg<sup>2+</sup> contents in the subsurface. Moreover, it increased available phosphorus contents and soil organic matter in the long term (48 to 60 months after the last lime application). **Surface liming improved plant nutrition, mainly for N, Ca, and Mg, and increased dry matter production and grain yield of the crops, even in years with regular distribution of rainfall.** The greatest productivities of soybean, black oat, and sorghum were obtained with the respective estimated lime doses of 4,000, 2,333, and 3,281 kg ha<sup>-1</sup>, for shoot dry matter, and of 2,550, 3,555, and over 4,000 kg ha<sup>-1</sup>, for grain yield.

**Index terms:** crop rotation, long-term experiment, plant nutrition, soil fertility, subsurface soil acidity, yield components.

<http://dx.doi.org/10.1590/1678-4499.0346>

## Effects of surface application of dolomitic limestone and calcium-magnesium silicate on soybean and maize in rotation with green manure in a tropical region

Cláudio Spadotti Castro<sup>(1)</sup>, Carlos Alexandre Costa Crusciol<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup>Embrapa, Unidade de Pesquisa, Avenida Soldado Passarinho, nº 303, Fazenda Jardim Chapadão CEP 13070-115 Campinas, SP, Brazil. E-mail: gustavo.astro@embrapa.br  
<sup>(2)</sup>Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP), Departamento de Produção Vegetal, Rua José Barbosa de Barros, 1780, 18610-307 Botucatu (SP), Brasil.  
 Corresponding author: gspadotti@embrapa.br

Received: Oct. 1, 2014; Accepted: Feb. 26, 2015

### Abstract

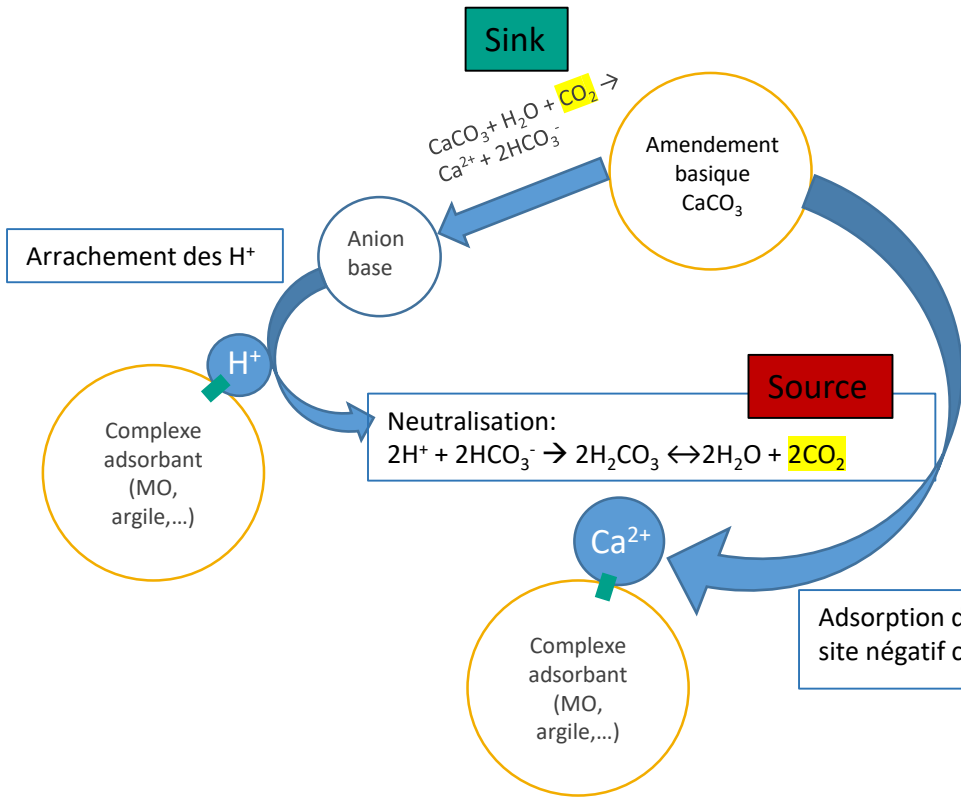
Although lime is currently the material most frequently used to ameliorate soil acidity in Brazil, silicate could efficiently replace this source because of its greater solubility and its greater silicon content, which are beneficial for plant development. This study aimed to evaluate the effects of superficial lime and silicate application on soil chemical attributes as well as on soybean and maize nutrition and grain yields when these crops are grown in rotation with green manure. The experimental design was a complete randomized block with sixteen replicates. Plots were treated with one of two materials for acidity correction (dolomitic lime and calcium/magnesium silicate) or with no soil correction, as a control. Silicate corrected soil acidity and increased exchangeable base levels in soil at greater depths faster than does liming. The application of both acidity-correcting materials increased N, Ca and Mg leaf concentrations, and all yield components and grain yield in soybean; but in maize, just silicate also increased N and Si when compared with lime, whereas both acidity-correcting increased just two yield components: grains per ear and mass of 100 grains, resulting in highest grain yield. **The application of both acidity-correcting materials increased dry matter production of green manures, but for pigeon pea the silicate provided the best result in this dry-winter region.**

**Key words:** soil acidity correction, crop yield, silicon, mineral nutrition, no tillage.



# Le devenir du C dans l'apport des produits chaulant

Pour un sol à pH > 5:



Pour un sol à pH < 5:

Neutralisation d'un acide fort (ex:  $\text{HNO}_3^-$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ):

$\text{CaCO}_3 + 2\text{HNO}_3^- \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{NO}_3^- + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$

**Source**

Fertilisant azoté (nitrification: oxydation du  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{H}^+$  est créé et peut réagir avec le nitrate)



# La controverse de départ

Le groupe d'experts intergouvernemental sur le climat (GIEC/IPCC) a suggéré que 100% des carbones apportés par les produits chaulant sont éventuellement émis sous forme de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère (2001).

Cependant, cette hypothèse est actuellement contestée par certains recherches ([Hamilton et al., 2007](#), [West and McBride, 2005](#)).

“This suggests that the mass-balance approach as proposed by the IPCC Tier 1 methodology, which assumes that all carbon in lime ends up as CO<sub>2</sub> in the atmosphere, overestimates the emissions from lime.”

“More importantly, our review of terrestrial and ocean C dynamics indicates that it is unlikely that all C from aglime is released to the atmosphere following application to soils.”



# Questionnement sur les produits chaulant

## 2 axes majeurs

- Mieux connaître l'action des produits chaulant sur le fonctionnement de la  $N_2O$  réductase
- Améliorer les connaissances sur le bilan GES ( $CO_2 - N_2O$ ) des apports de produits chaulant (émissions directes)

*Axe complémentaire : les modalités d'apport des produits chaulant*





## Matériels et Méthodes

### Déclinaison expérimentale à différentes échelles

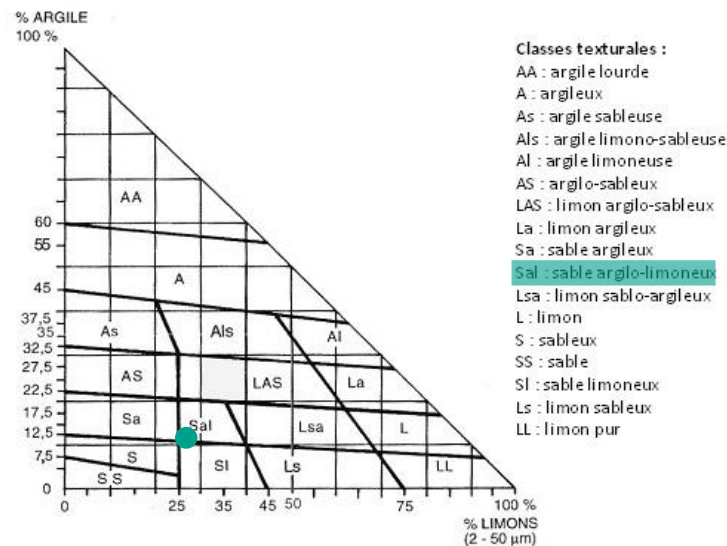
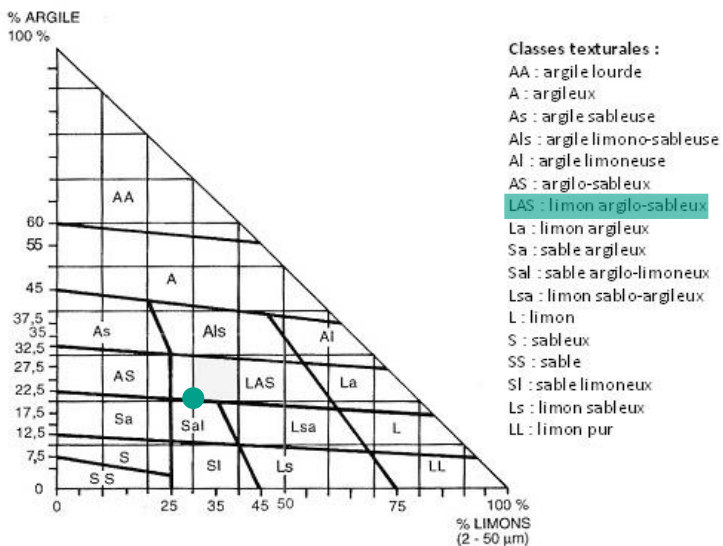
- Sur sol déstructuré (sol de Fourches) : fonctionnement de la  $N_2O$  réductase et du bilan émissions gazeuses (couverture quasi-exhaustive des émissions)
- Sur cylindres non remanié (sol de Digoin et sol de Fourches) : constitution d'un important jeu de données d'émission de  $N_2O$  et de  $CO_2$  (+ variables explicatives accessibles) avec des conditions variables de teneur en eau du sol
- Sur terrain (Fourches) : préparatoire à l'essai au champ



# Caractéristiques du sol de Digoin et de Fourches

Site de Digoin: sol limoneux argilo-sableux  
 pH initial de 5.5  
 pH moyen final de 6.34 le jour du prélèvement  
 (06/10/2021) – apport de fumier

Site de Fourche: sol argilo limoneux  
 pH<sub>eau</sub> = 5.6  
 MO: taux élevé (42.8g/kg)  
 Faible CEC (130 mé/kg)



**Triangle du GEPPA (1963)**  
 Source : BAIZE D., 1995. Guide pour la description des sols, INRA Editions.  
 \* GEPPA : Groupe d'Etude pour les Problèmes de Pédologie Appliquée

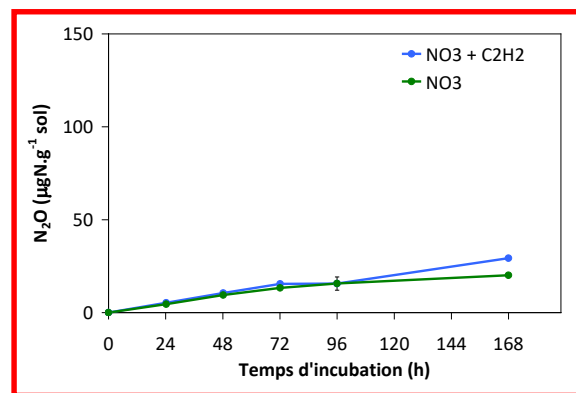
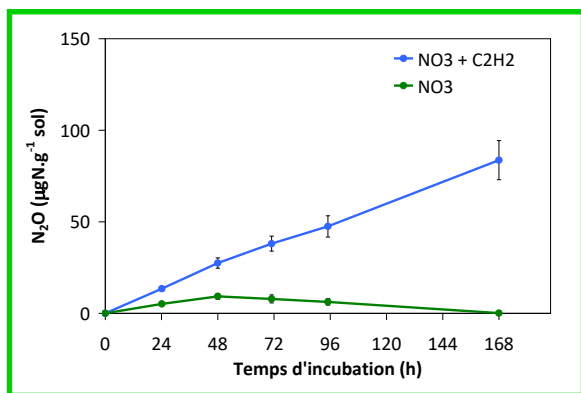
**Triangle du GEPPA (1963)**  
 Source : BAIZE D., 1995. Guide pour la description des sols, INRA Editions.  
 \* GEPPA : Groupe d'Etude pour les Problèmes de Pédologie Appliquée



# Caractérisation de la capacité des sols à réduire le N<sub>2</sub>O

→ Une technique basée sur un test de laboratoire certifié ISO (XP ISO/TS 20131-2)

Brièvement, des échantillons de sol incubent en conditions d'anaérobiose dans des flacons après addition d'une solution de nitrate en absence et en présence d'acétylène (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>). La concentration de N<sub>2</sub>O dans les flacons est régulièrement mesurée (24h, 48h, 72h, 96h et 168h).



Calcul d'indicateurs avec des règles d'interprétation

Phénotype	Caractéristique de fonctionnement du sol	Règle
N <sub>2</sub> ORED+	Présente la capacité de réduire N <sub>2</sub> O	r <sub>max</sub> et index respectivement inférieur à 0.4 et 30
N <sub>2</sub> ORED-	Présente une très faible capacité à réduire N <sub>2</sub> O	r <sub>max</sub> > 0.8 ou index > 50
N <sub>2</sub> ORED+/-	Présente une capacité intermédiaire à réduire N <sub>2</sub> O	autres

r<sub>max</sub> le ratio maximum du N<sub>2</sub>O accumulé

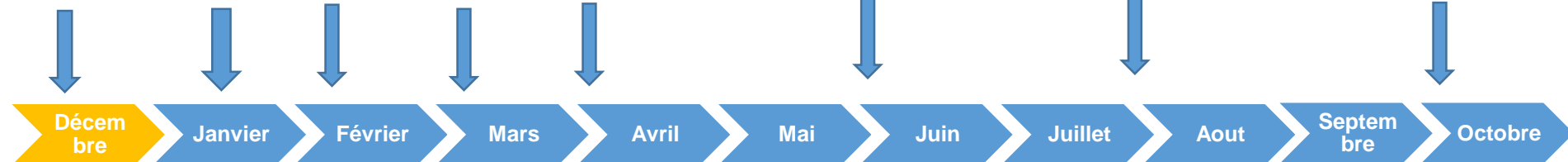
Index obtenue en multipliant le r<sub>max</sub> et le temps t



## II- C. Les produits chaulant



Prélèvement de sol  
09/12/2020



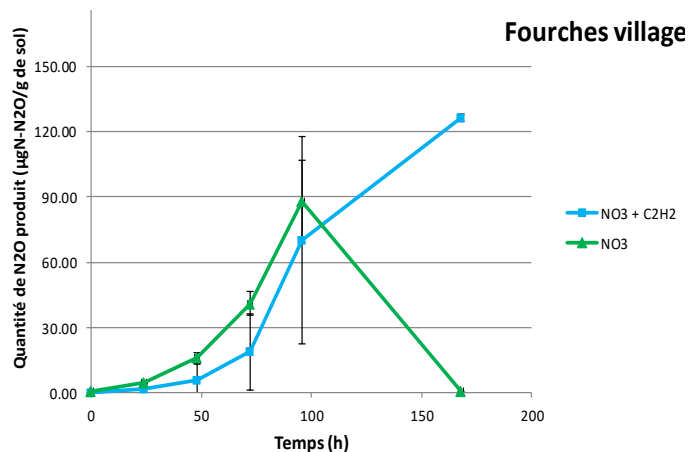
11/12/2020 : mise en incubation avec apport de produits chaulant : (3000 VN)

★ 18/01/2021 : apport d'une solution de  $KNO_3$  (50U de N)

Analyses de  $CO_2 + N_2O$  toute les semaines

Suivi quasi-exhaustif de la production de  $N_2O$  et de  $CO_2$  par les échantillons de sol

- ★ Prélèvement périodiquement d'un aliquote de sol pour
- Mesure de pH
  - Capacité du sol à réduire le  $N_2O$
  - Extraction de N minéral
  - Conservation d'échantillons de sol



# Cylindres non remaniés

24 cylindres hermétiques dans une salle thermostatée (20°C)

Pour Digoïn  
 3 traitements:

- Témoin
- AMPC (eq 4t VN/ha)
- CaCO<sub>3</sub> (eq 4t VN/ha)



Pour Fourches  
 3 traitements:

- Mag V
- CGE (fertilisant seul)
- CGE + AMPC

En cours...

Terminée

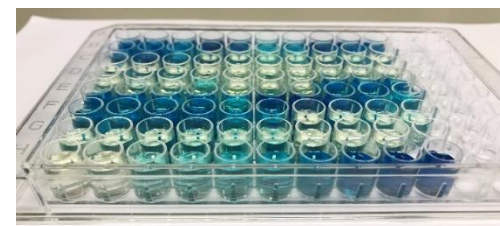
Bilan d'eau effectué tout au long des expériences avec des apports pour augmenter le WFPS jusqu'à la capacité au champs et saturation.

Échantillons de gaz:

- N<sub>2</sub>O flux
- CO<sub>2</sub> flux
- Kr concentration (test en cas de fuite)

Lixiviats analyses:

- NO<sub>3</sub><sup>-</sup>
- NH<sub>4</sub><sup>+</sup>
- pH
- Volume
- DIC/DOC





# Jour de destruction et analyses de sol



- Tamisage des sols à 5mm
- Mesure des humidités massiques ( $g_{\text{water}}/g_{\text{dry soil}}$ )
- $\text{pH}_{\text{eau}}$  du sol
- Extraction de l’N minéral du sol ( $\text{NH}_4^+$  et  $\text{NO}_3^-$ ) suivie par analyse spectrométrique pour déterminer les concentrations ( $\mu\text{g NH}_4\text{-N g}^{-1}\text{ soil}^{-1}$  et  $\mu\text{g NO}_3\text{-N g}^{-1}\text{ soil}^{-1}$ , respectivement)
- Capacité du sol à réduire le  $\text{N}_2\text{O}$  (XP ISO/TS 20131-2)



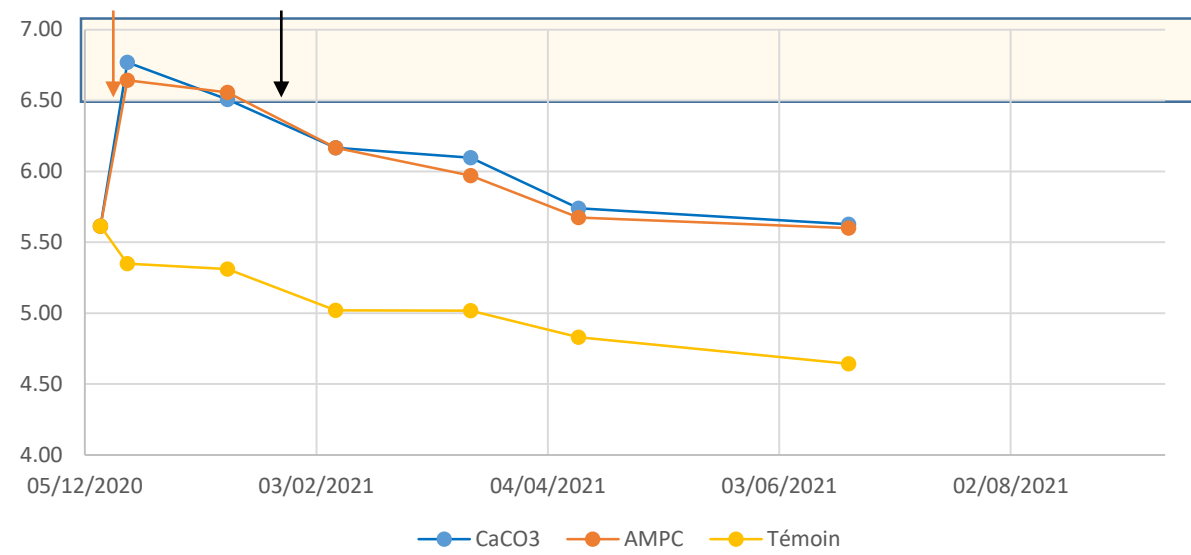
# Mieux connaître l'action des produits chaulant sur le fonctionnement de la N<sub>2</sub>O réductase

- Expérimentation sur sol déstructuré de Fourches
- Expérimentation sur cylindres non remaniés de Fourches au jour de destruction





# Evolution du pH au cours du temps



L'augmentation du pH est rapide et importante pour les produits  $\text{CaCO}_3$  et AMPC  
 Baisse du pH observée, mais la cause de cette diminution est difficile à attribuer à l'apport de nitrates ou à l'évolution du système



# Capacité du sol à réduire le N<sub>2</sub>O en N<sub>2</sub>



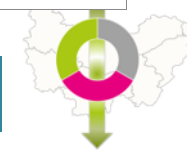
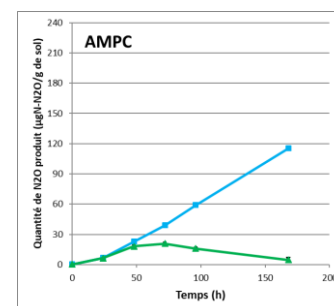
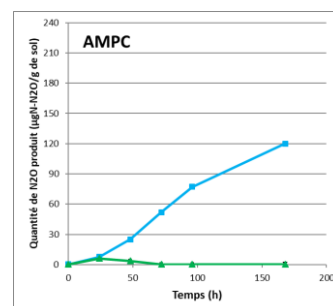
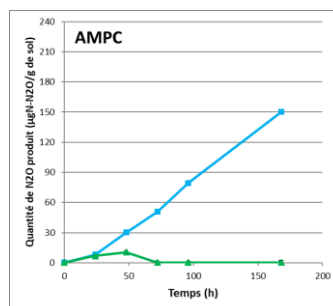
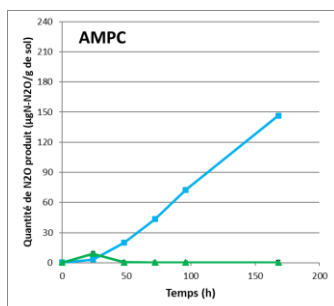
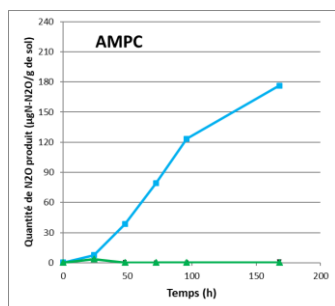
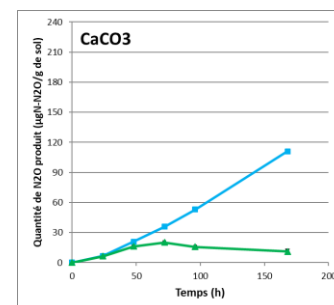
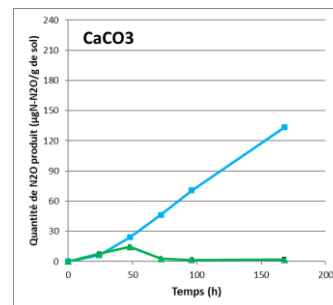
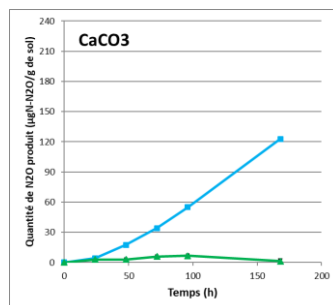
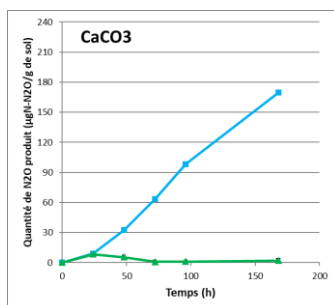
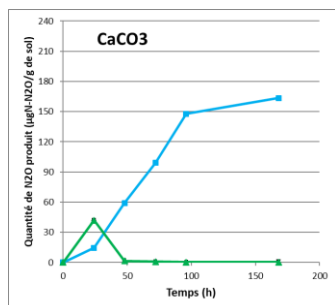
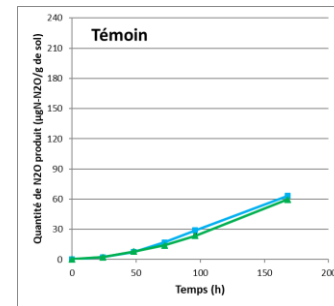
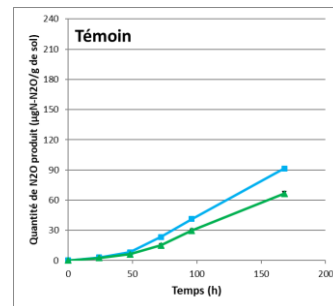
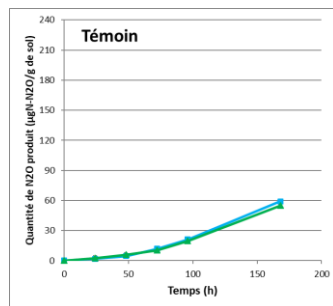
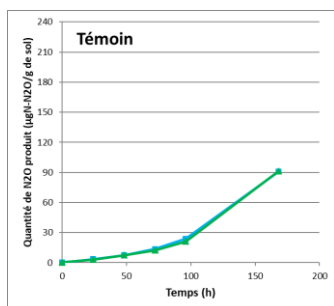
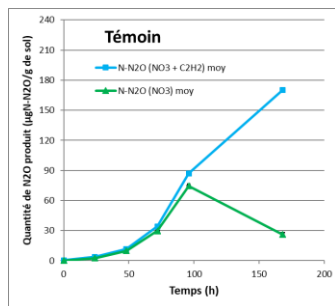
11/01/2021

08/02/2021

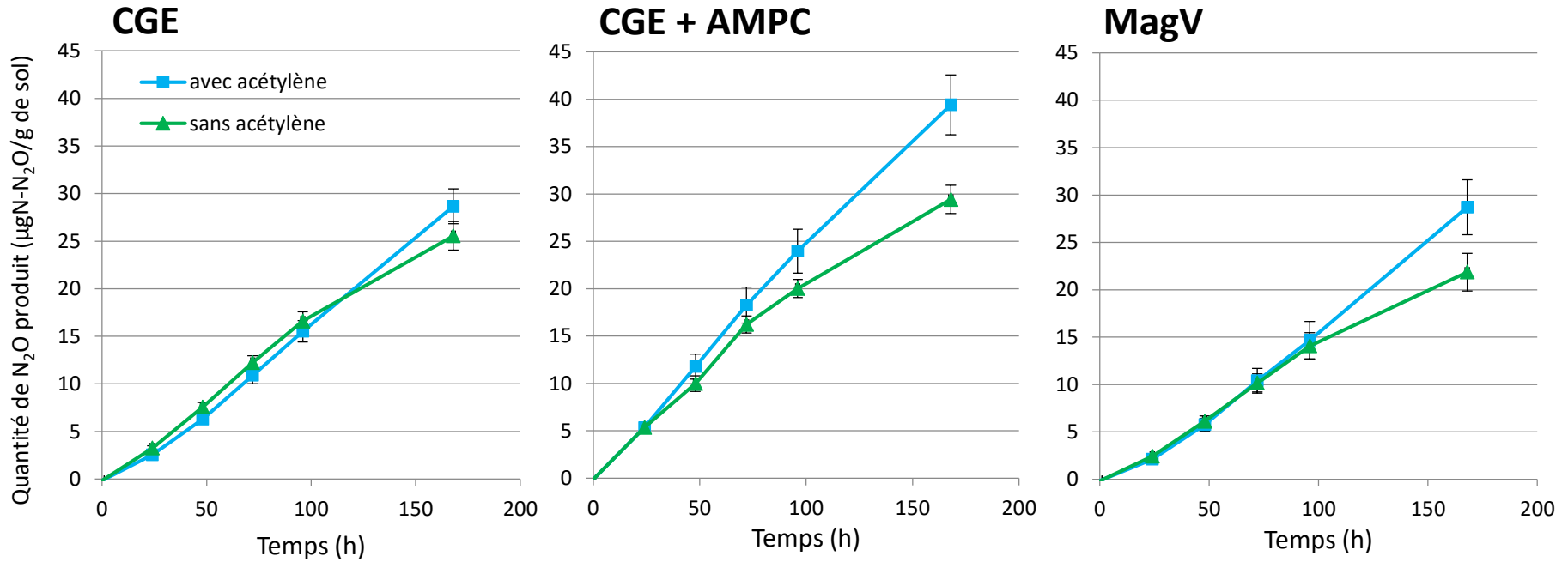
12/04/2021

21/06/2021

23/08/2021



## Capacité du sol à réduire le N<sub>2</sub>O en N<sub>2</sub>



Treatments	rmax	INDEX
MacV	1.01	169.20
CGE	1.14	190.47
CGE+AMPC	0.94	157.36

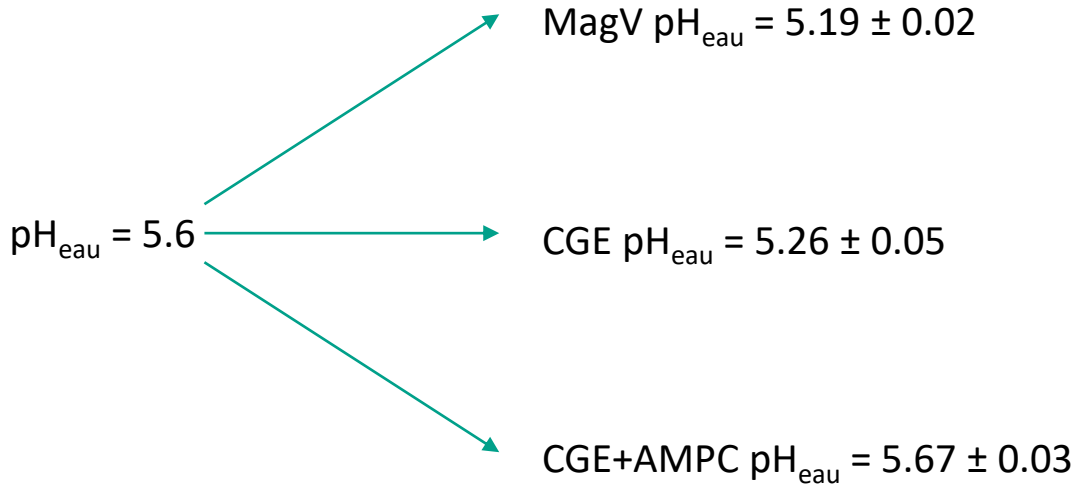
Pour chaque traitement l'index > 50 donc les sols peuvent emmètre de large quantité de N<sub>2</sub>O comme observé.







# Évolution du pH<sub>eau</sub> début vs fin expérience



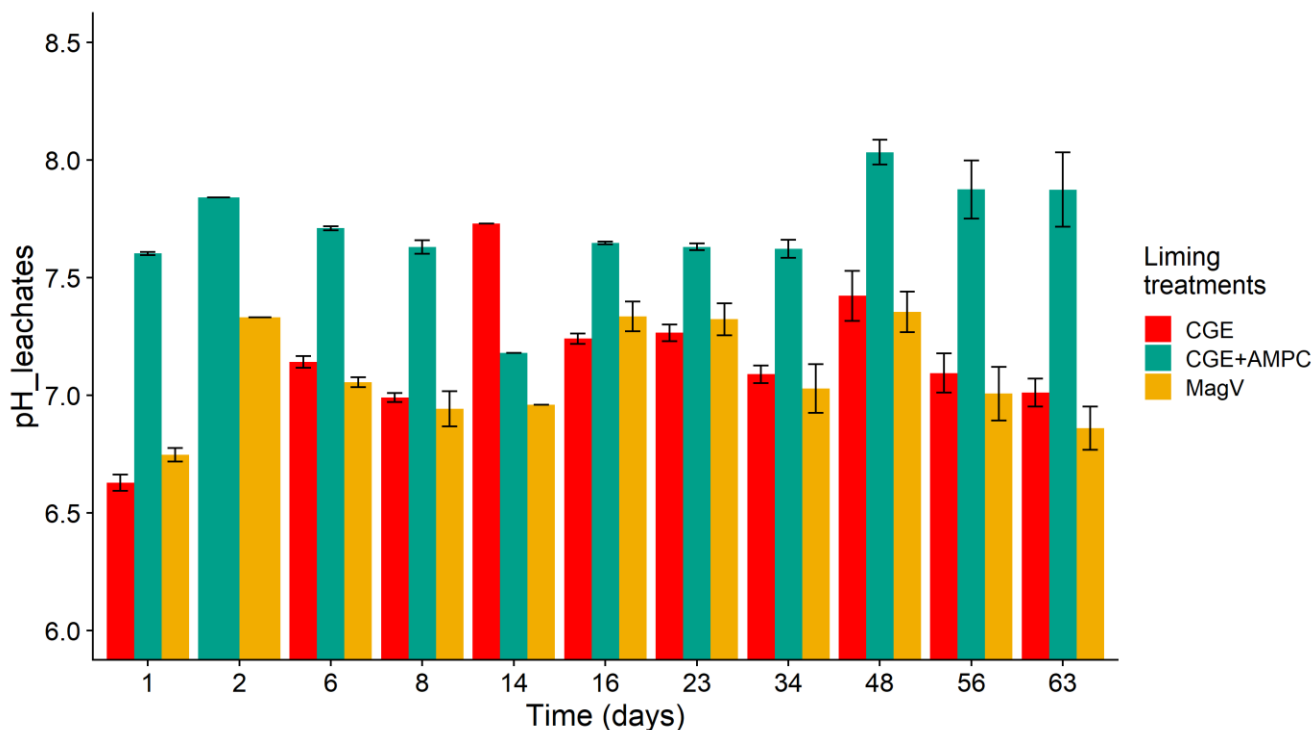
D'après les résultats du test de Kruskal-Wallis, nous savons qu'il existe une différence significative entre les groupes de traitements.

```
# A tibble: 3 x 9
  .y. group1 group2 n1 n2 statistic p p.adj p.adj.signif
* <chr> <chr> <chr> <int> <int> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>
1 pH CGE CGE+AMPC 24 24 4.96 0.000000711 0.00000213 ****
2 pH CGE MagV 24 24 -0.973 0.331 0.992 ns
3 pH CGE+AMPC MagV 24 24 -5.93 0.0000000301 0.0000000902 ****
```

- Pas d'élévation de pH comparé au pH initial
- MagV et CGE ont des pH significativement plus bas que CGE+AMPC



# Évolution du pH des lixiviats au cours du temps (Fourches)



- pH élevé dans les lixiviats en particulier pour le traitement CGE+AMPC significativement plus élevé ( $P > 0.05$ )
- Perte importante des produits chaulant dans les lixiviats ?



# Conclusions partielles

Dans l'expérimentation sur sol déstructuré, on observe une augmentation rapide du pH, avec des pH supérieur à 6.5 (propice à l'activation de la N<sub>2</sub>O réductase) pour l'AMPC et le CaCO<sub>3</sub>. L'hypothèse d'une observation similaire peut être avancée pour l'expérimentation sur cylindre avec un pH acide de nouveau à la fin de l'expérimentation.

La N<sub>2</sub>O réductase semble s'être activée rapidement et semble toujours fonctionner malgré une ré-acidification du sol (baisse du pH proche de sa valeur initiale de 5.6) sur le sol déstructuré.

Malgré une différence notable avec ajout de AMPC sur les cylindres de Fourches, la N<sub>2</sub>O réductase ne semble pas être restée active, hypothèse des produits chaulant lessivés avancée. Méthode d'application des produits chaulant ?



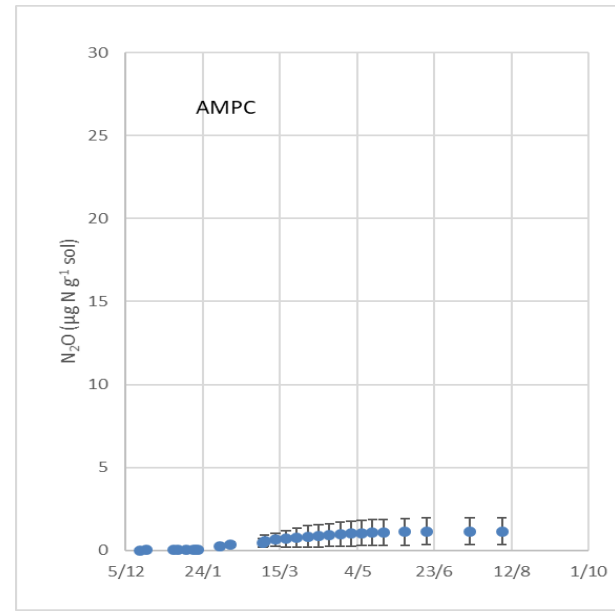
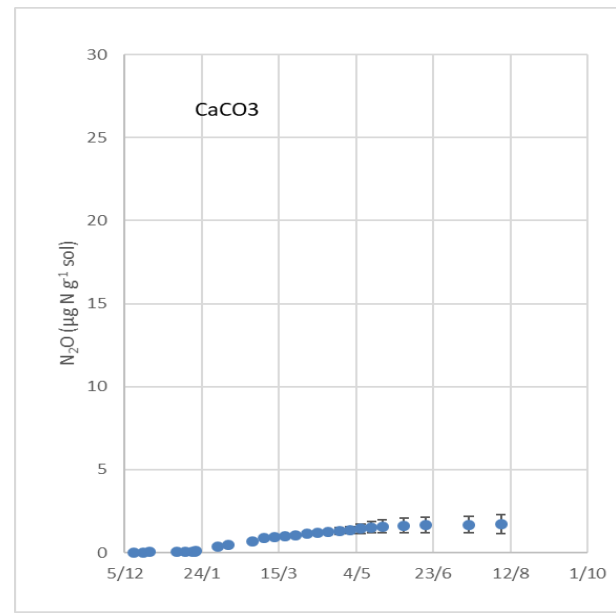
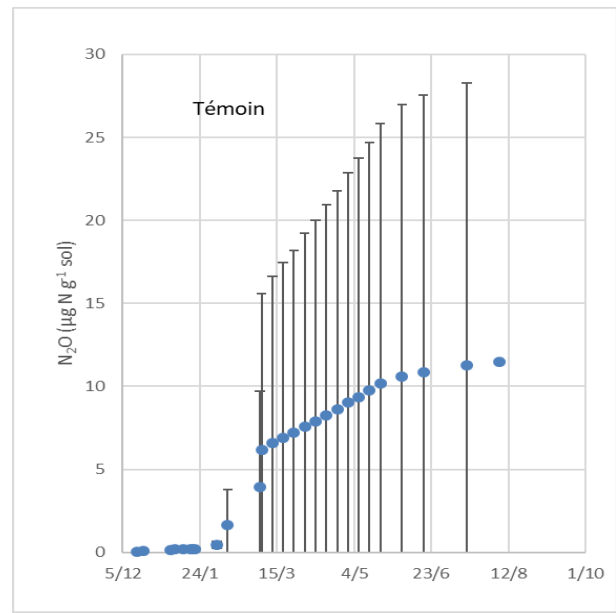
# Améliorer les connaissances sur le bilan GES (CO<sub>2</sub> – N<sub>2</sub>O) des apports de produits chaulant (émissions directes)

- Expérimentation sur sol déstructuré de Fourches
- Expérimentation sur cylindres non remaniés de Fourches et de Digoin
- Expérimentation de terrain



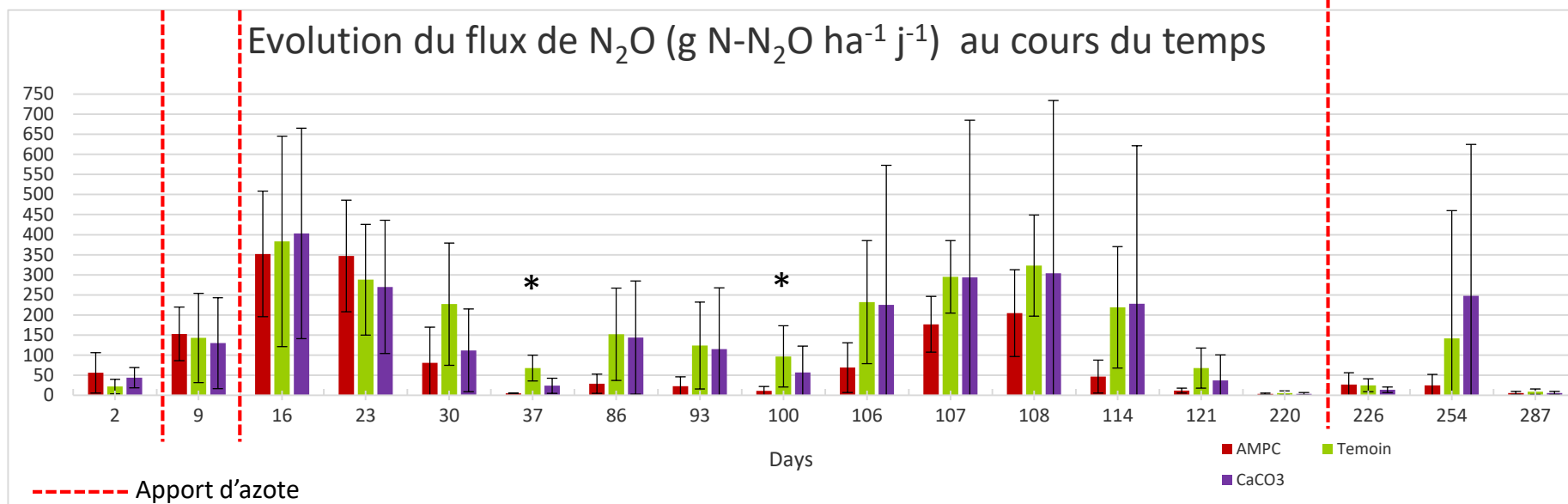


# Évolution des flux de N<sub>2</sub>O au cours du temps (sol déstructuré)





# Évolution des flux de N<sub>2</sub>O au cours du temps (Digoin)

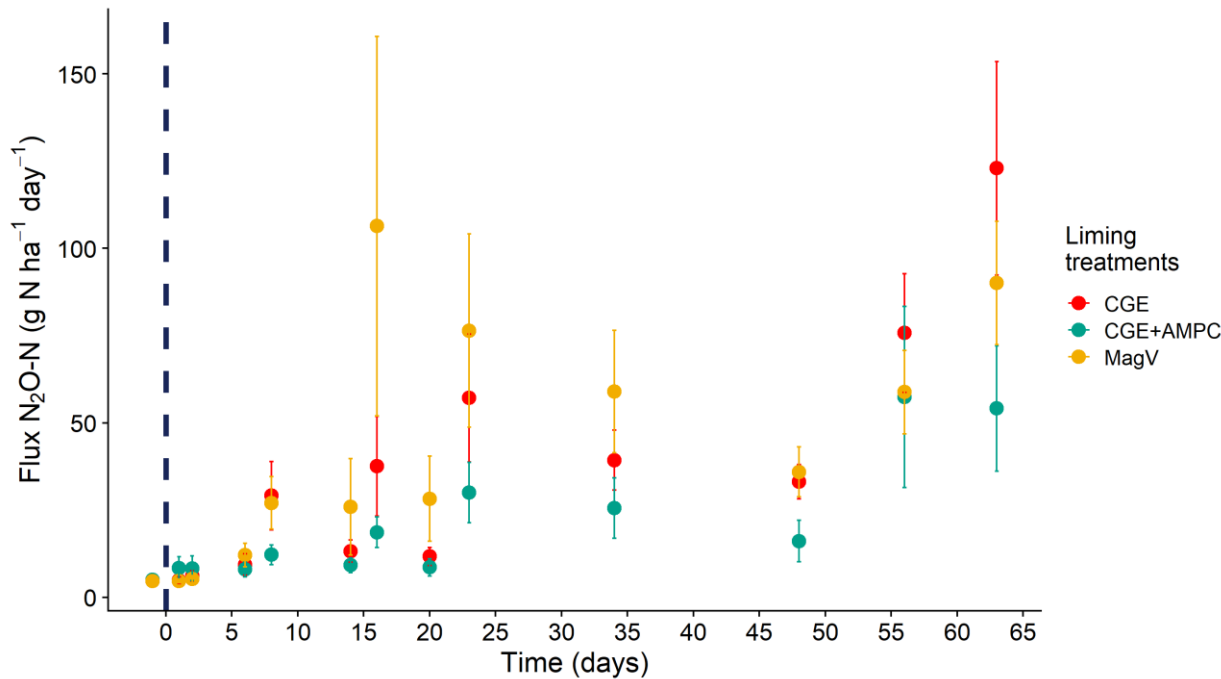


Augmentation des flux après apport d'azote.

Tendance à la baisse pour le traitement avec AMPC comparé au témoin à partir du 30<sup>ème</sup> jour.



# Évolution des flux de N<sub>2</sub>O au cours du temps (Fourches)



- Effet global significatif du traitement sur les flux de N<sub>2</sub>O (P < 0.05)
- AMPC traitement = diminution des flux de N<sub>2</sub>O par rapport aux flux du traitement CGE seul et MagV
- Pas de différence significative entre MagV et CGE

ANOVA Table (type II tests)

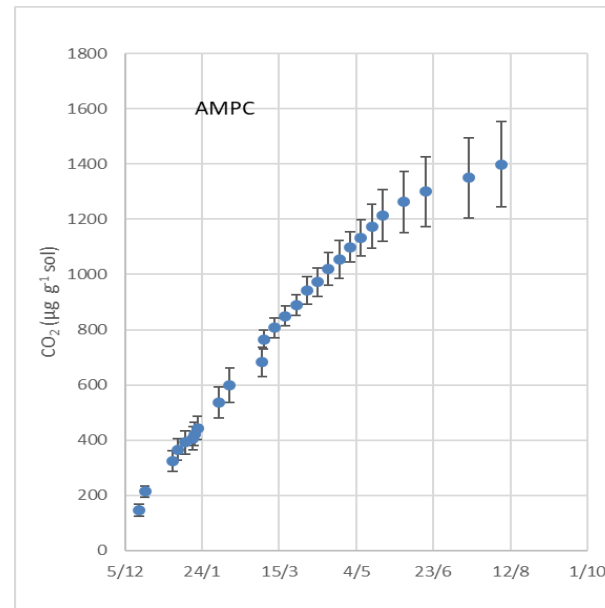
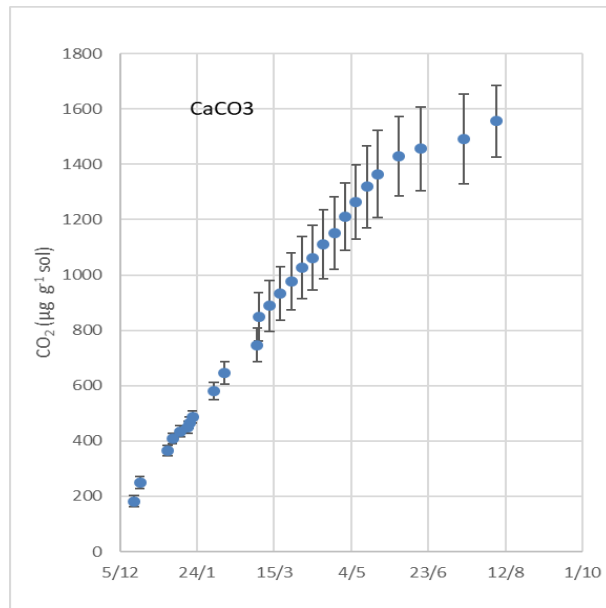
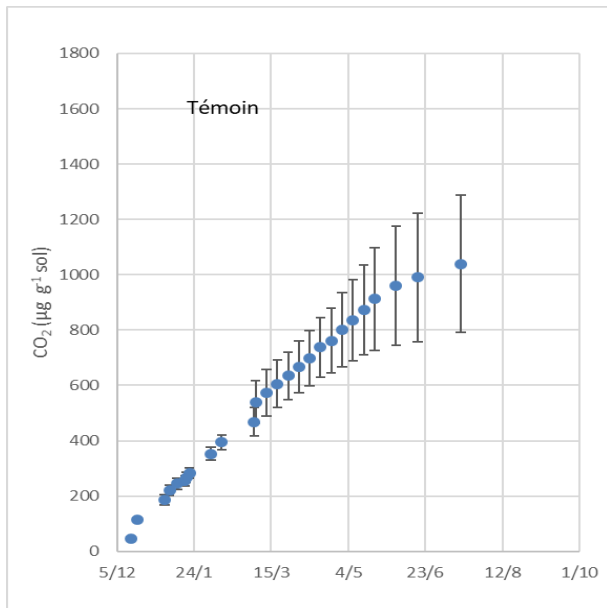
	Effect	DFn	DFd	F	p	p < .05	ges
1	treatments	2	255	11.541	1.59e-05	*	0.083
2	days2	12	255	22.777	5.60e-34	*	0.517
3	treatments:days2	24	255	1.040	4.15e-01		0.089

\$treatments

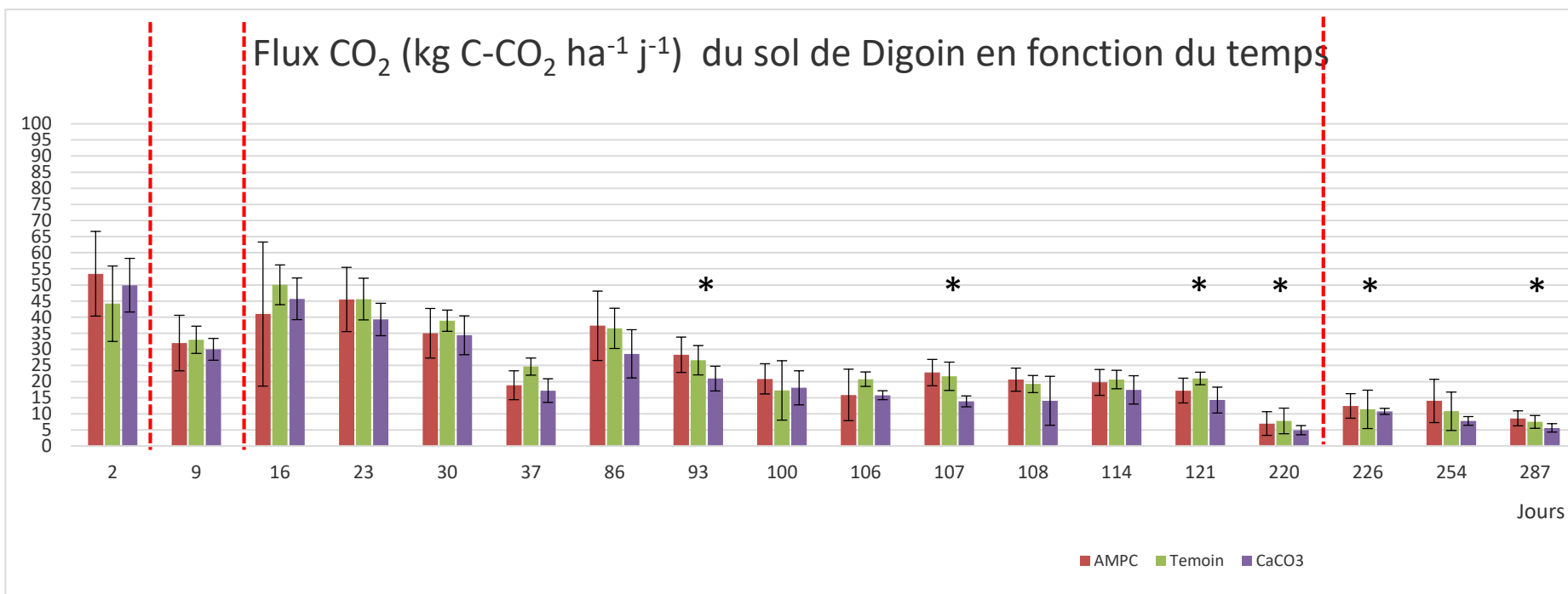
	diff	lwr	upr	p adj
CGE+AMPC-CGE	-0.26889180	-0.44472991	-0.09305368	0.0010898
MagV-CGE	0.08187953	-0.08837499	0.25213405	0.4941841
MagV-CGE+AMPC	0.35077132	0.17493321	0.52660944	0.0000125



# Évolution des flux de CO<sub>2</sub> au cours du temps (sol déstructuré)



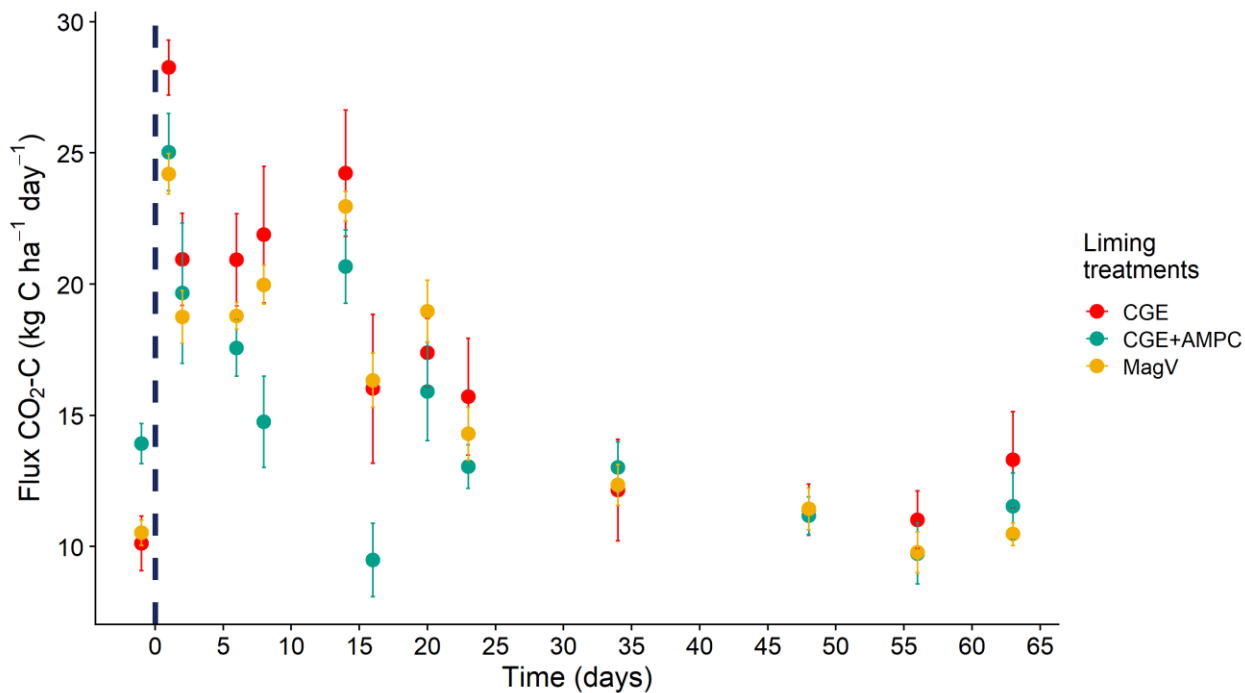
# Évolution des flux de CO<sub>2</sub> au cours du temps (Digoin)



CO<sub>2</sub> qui augmente après les apports d'azote → activité microbienne  
 Pas de différence globale avec les différents traitements mais des différences significatives ponctuelles pour le traitement avec le CaCO<sub>3</sub>



# Évolution des flux de CO<sub>2</sub> au cours du temps (Fourches)



- Le flux de CO<sub>2</sub> diminue au cours du temps → milieu de plus en plus anaérobie
- Augmentation significative après les fertilisants corrélée à l'augmentation de l'activité microbienne
- Un effet traitements surtout en début d'expérience

ANOVA Table (type II tests)

Effect	DFn	DFd	F	p	p < .05	ges
1 treatments	2	236	4.417	1.30e-02	*	0.036
2 days2	12	236	30.199	3.78e-41	*	0.606
3 treatments:days2	24	236	1.429	9.40e-02		0.127

\$treatments

	diff	lwr	upr	p adj
CGE+AMPC-CGE	-0.35078327	-0.6629689	-0.03859767	0.0232700
MagV-CGE	-0.09564114	-0.3965766	0.20529429	0.7341711
MagV-CGE+AMPC	0.25514213	-0.0547569	0.56504115	0.1293186







# Synthèse des résultats



## N<sub>2</sub>O :

- les résultats avec le produit AMPC sont conformes à l'hypothèse initiale (réduction des émissions de N<sub>2</sub>O par mise en fctt de la N<sub>2</sub>O réductase grâce à la remontée de pH)
- En revanche ceux avec CaCO<sub>3</sub> de labo ne le sont pas (hypothèse : importance des propriétés physiques des produits apportés – pH très élevé des lessivats obtenus avec ce traitement)
- De même avec les résultats de MagV avec un **effet dose** observé car la valeur neutralisante dans le traitement MagV était plus faible que celle du traitement AMPC

## CO<sub>2</sub> :

- les résultats obtenus ne sont pas conformes à l'hypothèse initiale (augmentation conséquente des émissions de CO<sub>2</sub> suite à la réaction dans le sol des carbonates apportés)

## GES

- Observation d'un abattement des émissions combinées GES avec apport des produits chaulant



### Conclusions pour les 2 axes majeurs

- Mieux connaître l'action des produits chaulant sur le fonctionnement de la  $N_2O$  réductase
- **L'apport des produits chaulant modifie le fonctionnement de la  $N_2O$  réductase dans la durée, au-delà de l'impact sur le pH des sols**
- Améliorer les connaissances sur le bilan GES ( $CO_2 - N_2O$ ) des apports de produits chaulant (émissions directes)
- **Nous observons une baisse des émissions de  $N_2O$  après l'apport des produits chaulant (conformément à la littérature)**
- **Nous n'avons pas observé d'augmentation d'émission de  $CO_2$  (dans la durée) après l'apport des produits chaulant**



# Discussion

Expérimentation toujours en cours pour celle de Digoin et pour le sol déstructuré dans les bidons

Les résultats de ces expérimentations vont bien dans le sens de l'intérêt des produits chaulant pour réduire les émissions de GES par les sols, y compris après un apport de MO dans le sol.

Néanmoins, ils appellent à approfondir :

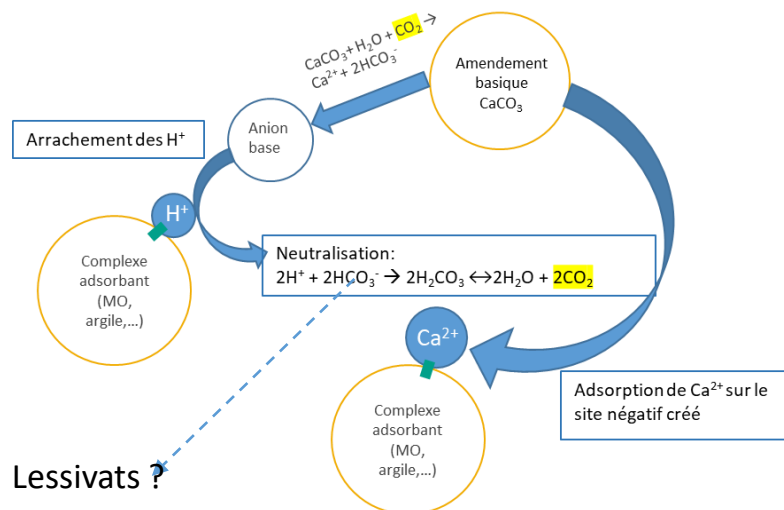
- la maîtrise des produits chaulant apportés (que s'est-il réellement passé avec le  $\text{CaCO}_3$  de labo, cela peut-il se produire *in situ*) ?
- La connaissance du devenir des produits chaulant dans le sol, pourquoi n'observons nous pas plus d'émission de  $\text{CO}_2$  ?



# Nouveau questionnement sur les produits chaulant

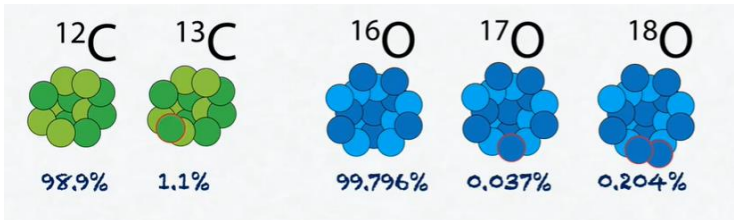
## 2 axes majeurs

- Démonstration directe de la formation de N<sub>2</sub> (à partir de N<sub>2</sub>O) par les sols amendés avec des produits carbonatés.
- Evaluation du facteur d'émission de CO<sub>2</sub> des apports de produits chaulant sur les sols agricoles – comprendre les mécanismes de réaction des produits chaulant dans les sols



# L'isotopie: un outil puissant pour apporter des éléments complémentaires à cette controverse

Sans l'utilisation d'un substrat marqué, c'est presque impossible de distinguer l'addition des carbones par ce dernier, des C originaires du sol car la quantité de C apportés est normalement comprise entre 5-10% des carbones déjà présent dans le sol (Coleman and Fry, 1991)



## δ "delta" notation

natural variations in isotope ratios are small, we use δ, which denotes part per 1000 difference in ratio.

$$\delta^H X = \left( \frac{R_{\text{sample}}}{R_{\text{standard}}} - 1 \right) \times 1000$$

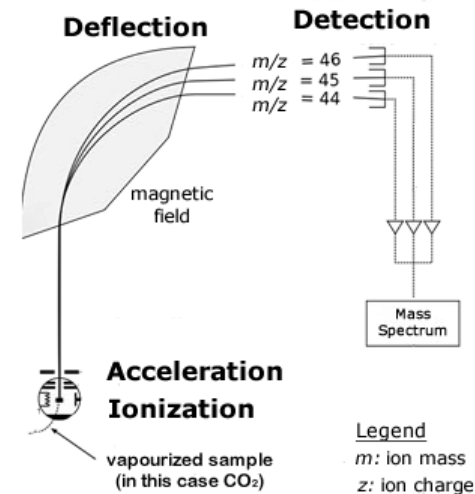
X= the element

H= the heavy isotope (by convention)

R= the heavy/light isotope ratio

$$R = \frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}}$$

Pour différencier le CO<sub>2</sub> dérivé des produits chaulant de celui émis par la respiration biotique du sol, le δ<sup>13</sup>C du CO<sub>2</sub> émis sera déterminé (ex: Biasi et al. 2008) par IRMS.



# L'isotopie: pas seulement pour le suivi du C...

L'isotope stable  $^{15}\text{N}$  est utilisé pour mieux comprendre le cycle de l'azote, et plus particulièrement mesurer le  $\text{N}_2\text{O}$ , le  $\text{N}_2$  et leurs sources.

L'isotope stable  $^{15}\text{N}$  nous permet de quantifier la perte de  $\text{N}_2$  du sol lors de la dernière étape de dénitrification contre un énorme fond atmosphérique de  $\text{N}_2$ .





## Questions de départ

### Azote

Le devenir du  $N_2O$  après un apport de produits chaulant; renforcer l'hypothèse de la réduction du  $N_2O$  en  $N_2$  par isotopie

- Q2: Introduire une démonstration directe de la transformation de  $N_2O$  en  $N_2$  ?

### Carbone

Le devenir du carbone apporté par les produits chaulant:

- Q1: le C des produits chaulant est entièrement transformé en  $CO_2$  dans le sol? Une augmentation des émissions de  $CO_2$  est-elle visible ?

Les effets de l'application de produits chaulant sur la décomposition des carbones organiques du sol (SOC) en raison d'une augmentation du pH:

- Q3: une augmentation du pH par les produits chaulant va-t-elle engendrer un accroissement de la minéralisation des SOC?

Les résultats en terme de GES (bilan  $N_2O$  et  $CO_2$ ):

- Q4: un bilan GES mitigé avec les produits chaulant?





# Possible configuration pour une expérience préliminaire en labo

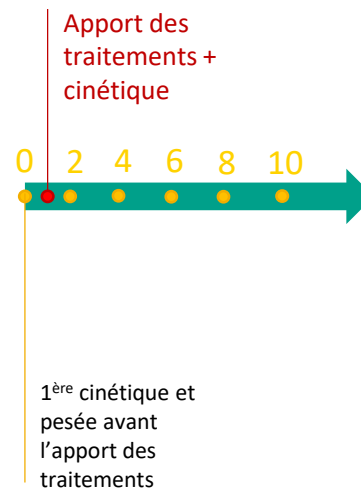
4 traitements:

- Contrôle (sol nu)
- Carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ )
- AMPC
- Carbonate de calcium marqué ( $\text{Ca}^{13}\text{CO}_3$ )

pH cible = 6.8

Conditions en faveur de la dénitrification:

- Incubation du sol à une valeur de  $D_p/D_o < 0.006$  → condition anaérobie
- Une solution de  $\text{KNO}_3^-$  pour que l'azote ne soit pas limitant.



# Les analyses

## Échantillons gazeux:

- $N_2O$  fluxes
- $CO_2$  fluxes
- Kr concentrations (pour vérifier les possibles fuites)

## Analyse par Spectromètre de masse à rapport isotopique à flux continu (IRMS):

- Le  $\delta^{13}C$  du  $CO_2$
- Le  $\delta^{15}N$  du  $N_2$  et du  $N_2O$  ?
- Carbonate du sol ?

## Sol analyses:

- $NO_3^-$
- $NH_4^+$
- pH
- Carbone
- $HCO_3^-$  ?

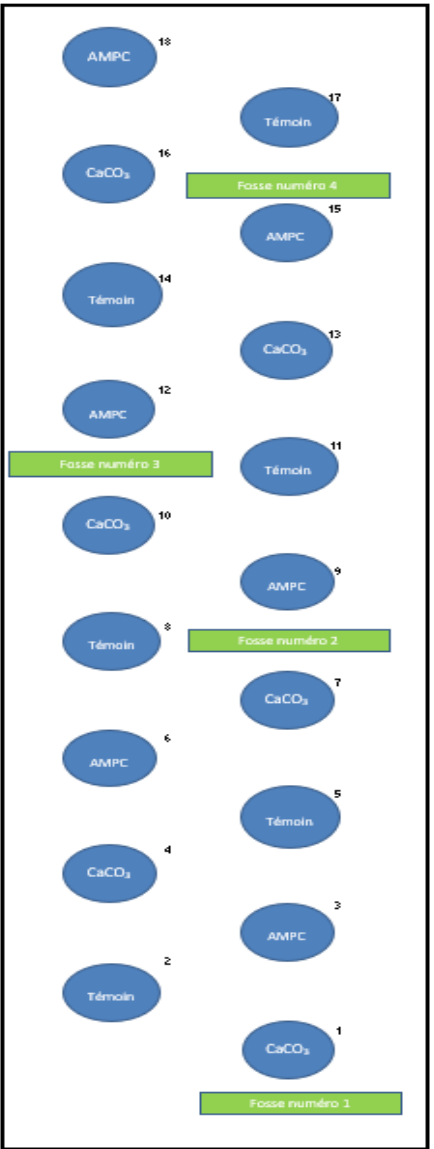


# Résultats attendus

- % du C-CO<sub>2</sub> provenant du C des produits chaulant apportés
- SOC concentration dans notre sol
- Démonstration directe de la réduction du N<sub>2</sub>O en N<sub>2</sub>
- Mesure du HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> pour possible perte dans les lixiviats envisagée?
- Bilan C et Bilan N dans notre système clos en labo en vue de tester sur des système in situ ou sur cylindre.



# Premier essai expérimentation au champ



CaCo3 121 g/chambre AMPC 157 g/chambre

Date	Manipulations effectuées
26/03/2021	1 <sup>er</sup> apport de produit chaulant (la moitié de la dose)
26/04/2021	Cinétique + prélèvement de sol
11/05/2021	Cinétique + prélèvement de sol + apport solution N
02/06/2021	Cinétique + prélèvement de sol
17/06/2021	Cinétique + prélèvement de sol
30/06/2021	Cinétique + prélèvement de sol + 2 <sup>ème</sup> apport de produit chaulant
08/07/2021	Cinétique + prélèvement de sol
23/07/2021	Cinétique + prélèvement de sol
30/07/2021	Prélèvement de sol + démontage chambre







# Résultat du pH sur le terrain

	26-avr	11-mai	02-juin	17-juin	30-juin	08-juil	23-juil	30-juil
CaCO3				6.64	6.47	6.63	6.72	7.18
Témoin	5.49	6.10	5.87	5.94	6.13	5.90	5.58	5.80
AMPC				6.22	6.30	6.30	6.15	6.77

- Flux
- Variables auxiliaires (pH, Nmin, Hm)





# Discussion

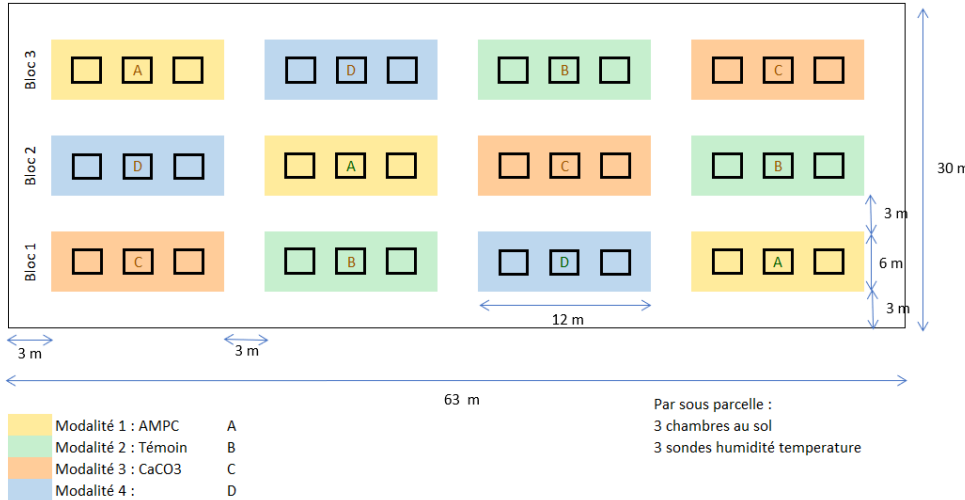
- Progression vis-à-vis de la réalisation de l'essai complet
  - Mesures
    - Dispositif de mesure des flux OK
    - Nécessité des variables auxiliaires (parcelles de l'essai complet / apport à l'échelle des chambres)
  - Connaissances du sol
    - Respecter les doses à apporter (à consolider avec les suivis de pH)
    - Maîtrise de la dynamique de réponse du sol aux apports à consolider
  - Relations avec l'agriculteur



- Protocole (rédaction bien avancée)
- Schéma du dispositif
- Photo de la station météo
- Tableau des apports (VN et qté produit) – equation
- Calendrier prévisionnel
- Résultats attendus :
  - Chronique des variables auxiliaires
  - Dynamique de la capacité des sols à réduire N<sub>2</sub>O
  - Flux (ponctuels) d'émission de N<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> - Bilan
  - Simulation des émissions de N<sub>2</sub>O (NOE)



# Matériels et méthodes



**Modèle non linéaire (Rémy et Marin Lafîche, 1974) :**  

$$BEB_{red} = [0,055 \times (ARG + 5 \times M.O.) \times (exp^{pHs/1,5} - exp^{pHa/1,5})] \times P.T.F./1000$$

Avec :  
**BEB<sub>red</sub>** = Besoin En Bases de redressement en unités de VN/ha.  
**ARG** = Teneur en argile en ‰  
**M.O.** = Teneur en matière organique en ‰  
**P.T.F.** = Poids de terre fine en tonnes/ha = densité x profondeur en cm x % de terre fine

Argile pour mille	147
MO pour mille	42,8
pHsouhaité	6,8
pHactuel	5,6
pHs/1,5	4,53333333
pHa/1,5	3,73333333
da calculée à partir des cinétiques	1,52
Profondeur cm	20
% de terre fine	95
<b>VN/ha</b>	<b>2938,74</b>

<b>AMPC</b>	
VN	40
kg de produit / ha	7346,847
Taille d'une sous parcelle (m <sup>2</sup> )	72
AMPC/sous parcelle (kg)	52,897

<b>CaCO<sub>3</sub></b>	
VN	52
kg de produit / ha	5651,420
Taille d'une sous parcelle (m <sup>2</sup> )	72
CaCO3/sous parcelle (kg)	40,690

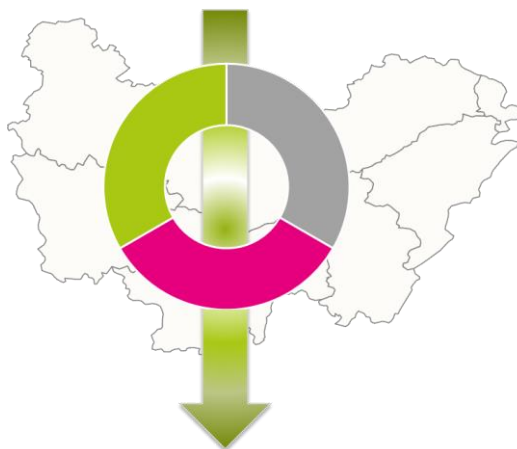
Calendrier prévisionnel	
Mi octobre (post-COPI)	Novembre
Tracé de l'essai + Epannage des produits chaulant	Installation Station météo + sondes TDR
Incorporation au sol avec travail du sol	
Cinétique 2 jours après incorporation	
Semis de l'agriculteur	
Cinétique 1 fois par semaine	

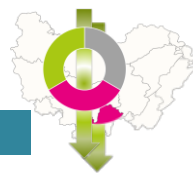
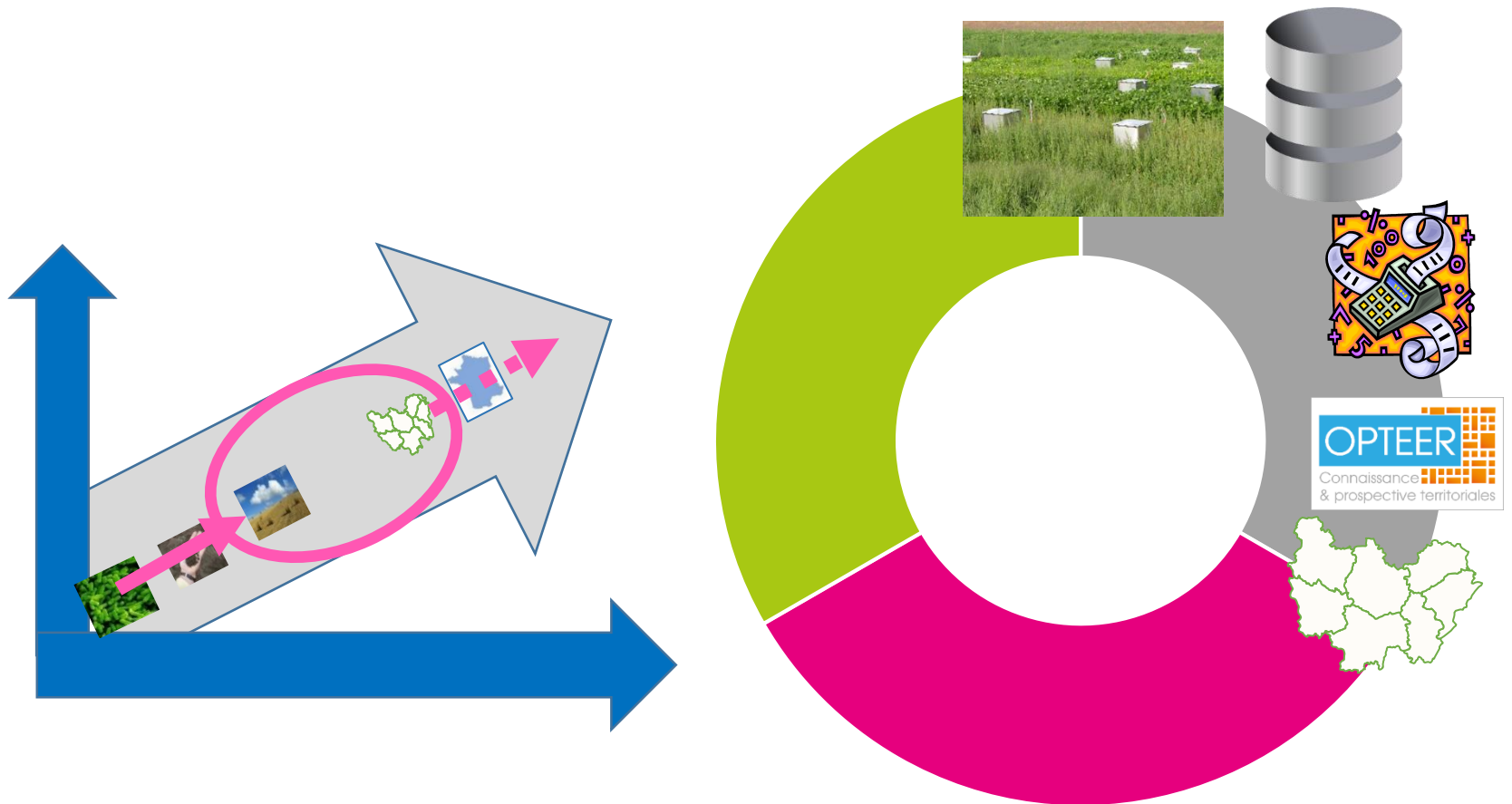
Capteurs :  
 Pluviomètre  
 Anémomètre sonique  
 Sonde couplée température et humidité relative  
 Pyranomètre  
 Capteur de photon Skye  
 Humidimètre TDR (time domain reflectometry)  
 Paratonnerre  
 Panneau solaire



# WP2 : Quantification, changement d'échelle de la parcelle cultivée à la Région

*Mohamed Alkassem (INRAE), Stéphane François (Atmo-BFC), Marie-H. de Sède-Marceau (ThéMA), Souleymane Thiam (I@D Territoire Digital)*





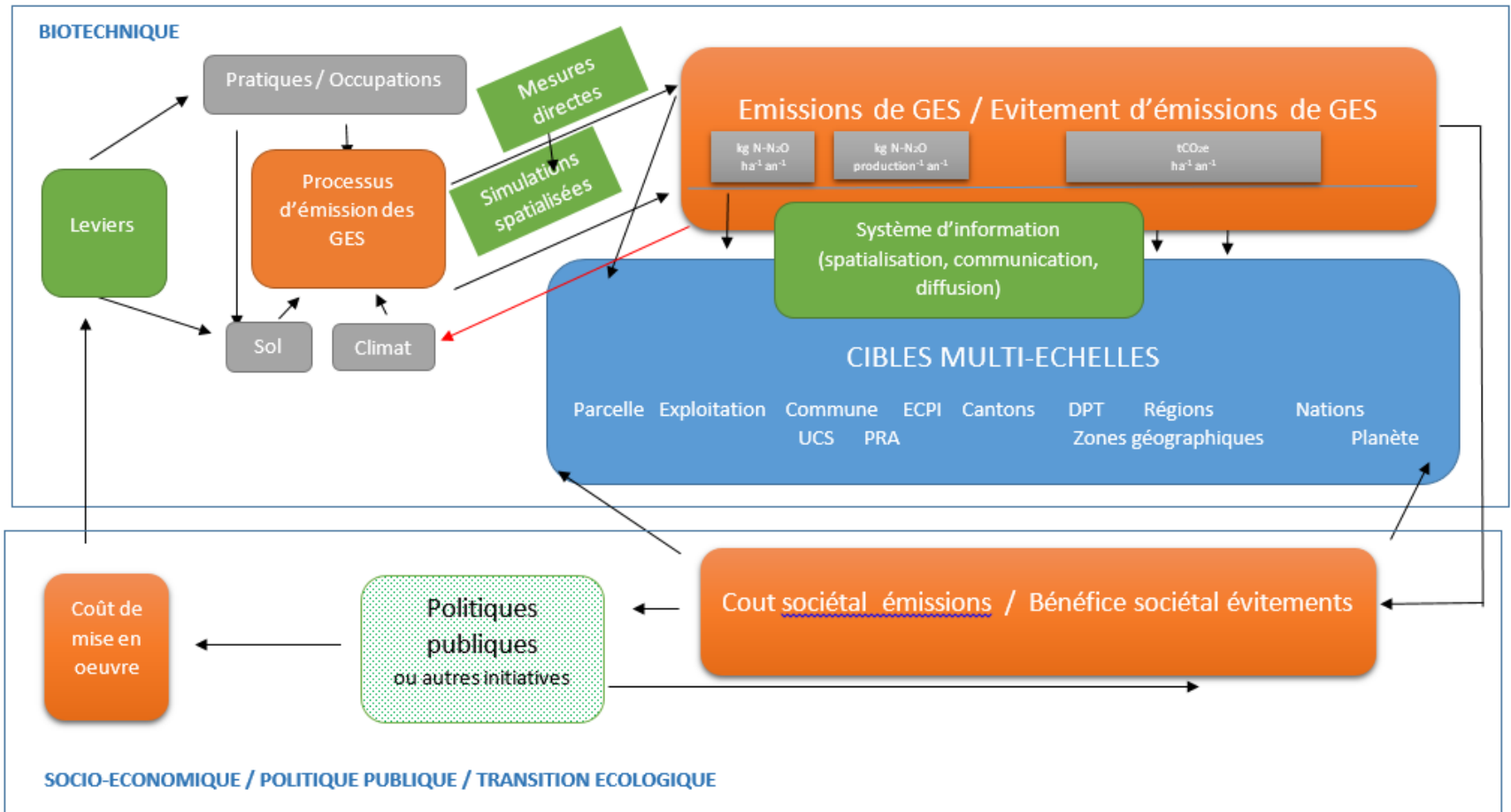


- o Rappel des objectifs annoncés
  - Remise en contexte
  - Quantification, spatialisation, changement d'échelle
  - Typologie/indicateurs pour l'aide à la décision publique
  - Dissémination des résultats via une plateforme existante, la plateforme OPTEER
- o Bilan des réalisations
  - Modélisations Tier 2: mise en œuvre à l'échelle de la BFC, analyse et comparaison des résultats obtenus via différents modèles et différentes sources
  - Première approche de typologie de zones potentiellement réductrices (Rmax) /émettrices (zones favorables au développement de conditions anaérobies)
  - Propositions d'architectures de BD, de métadonnées et d'interopérabilité entre BD sources
- o Programmation des activités à réaliser
- o Eventuelles difficultés / questionnements

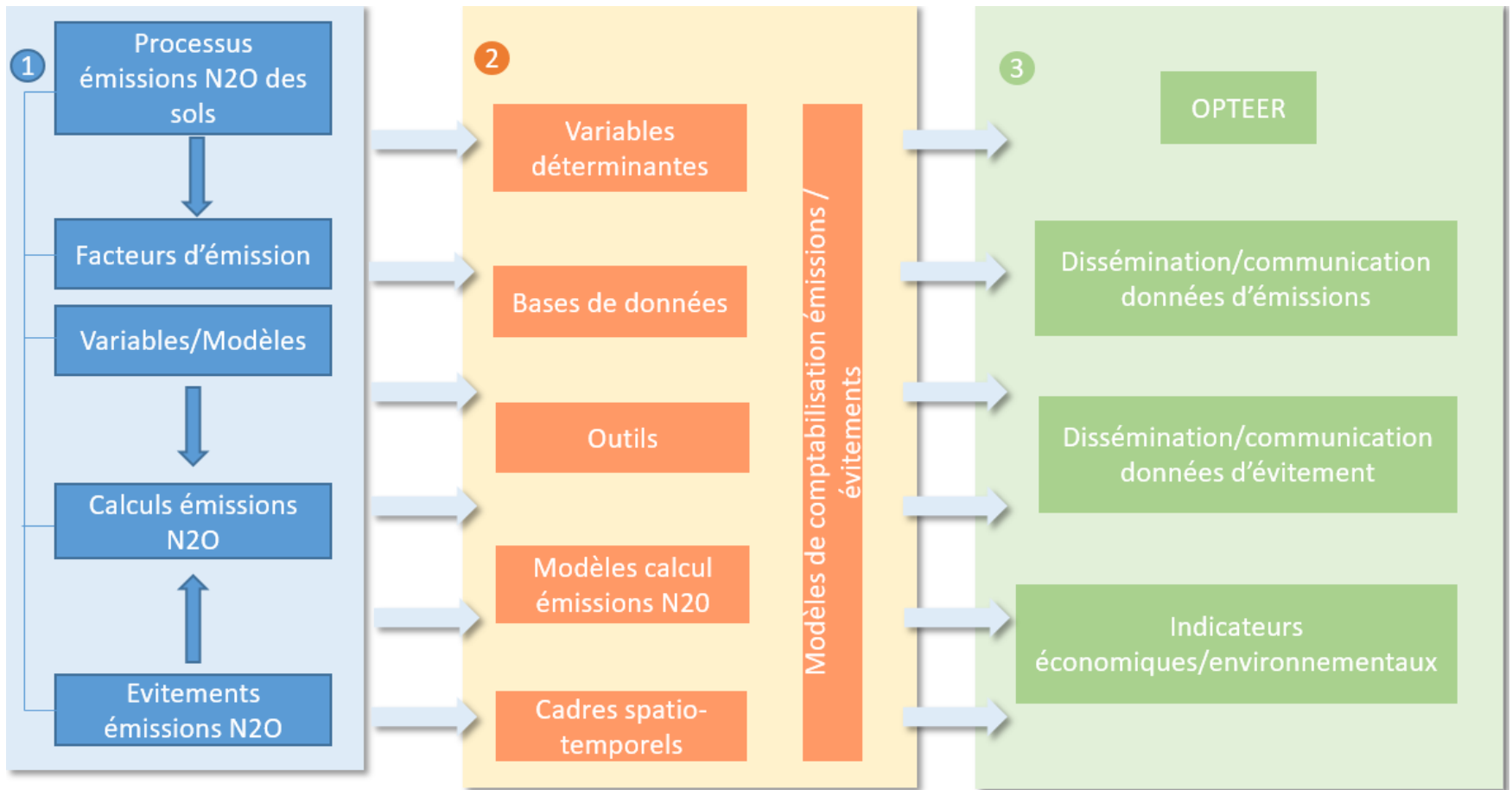


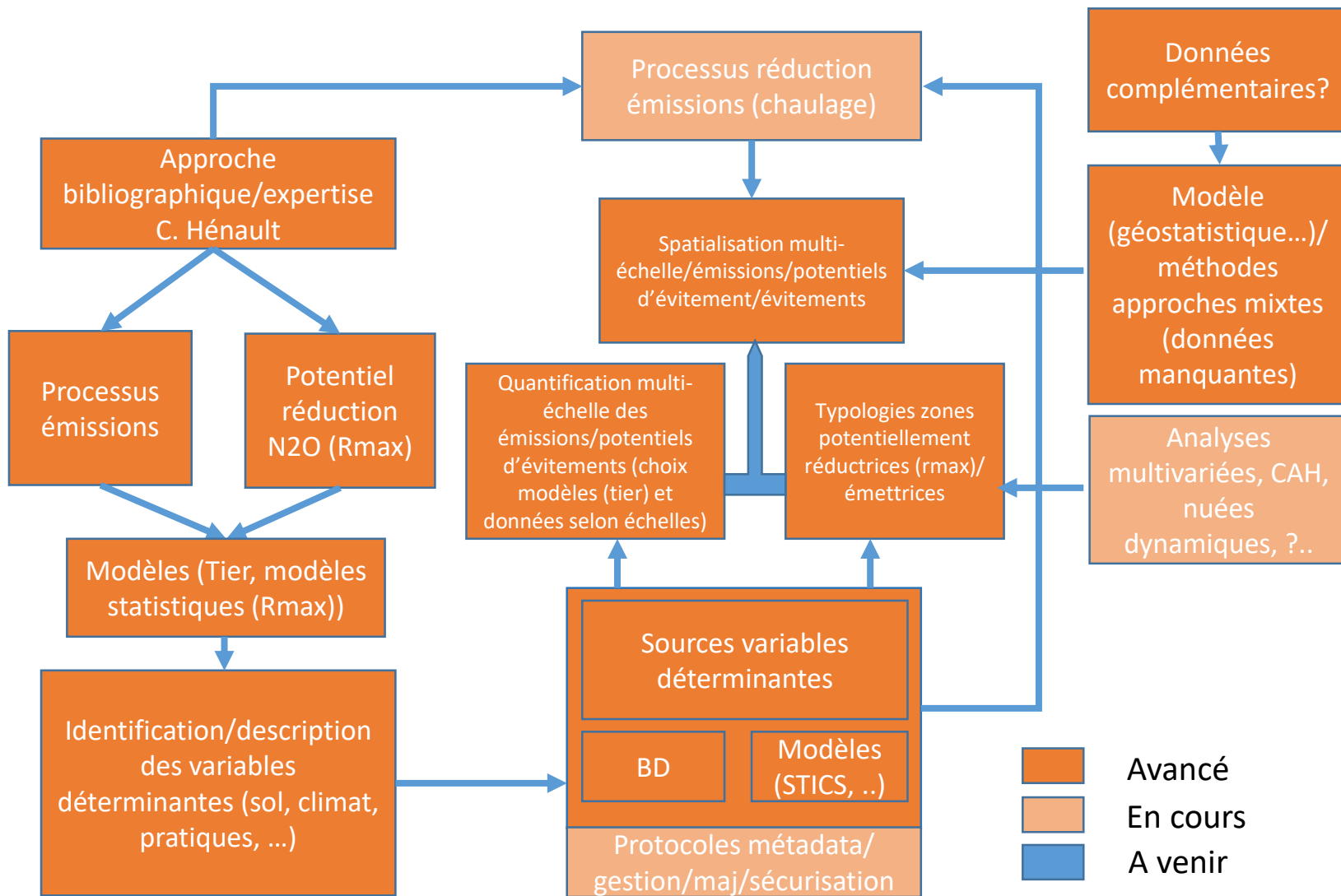
# Remise en contexte des objectifs du WP2

*Synthèse des classes d'éléments et des circuits à mobiliser pour réduire les émissions de GES par les sols*



### Quantification, spatialisation et territorialisation, dissémination





# Spatialisation des émissions de N<sub>2</sub>O en Bourgogne Franche-Comté à l'aide des modèles de Stehfest et Bouwman et Le Gall

Différents objectifs :

1. Faire apparaître les leviers d'atténuation des émissions dans les calculs des émissions pour pouvoir valoriser les évitements réalisés
2. Evaluer l'incertitude sur les estimations d'émission, basée sur
  - La diversité des méthodes de calcul
  - La diversité des données source mobilisées



### Equation proposée par Le Gall et al., variables: Nmin, Norg, pH, Pluvio cumulée /an

$$\text{Log}(N-N_2O) = 1.661 (+/- 1.533) + 0.005473 * Norg (+/- 0.001386) + 0.004894 * Nmin (+/- 0.001147) - 0.6599 * pH (+/- 0.1945) + 0.003442 * Pluvio\_cum\_an (+/- 0.0006965)$$

Equation établie à partir de données de flux de N<sub>2</sub>O mesurées en France plutôt sur des sols cultivés dans des situations variées en termes de conditions météorologiques et pédologiques.

### Equation proposée par Stehfest et Bouwman, 2006, variables Nmin, Norg, pH, zone climatique, texture, Corg, culture

$$\text{Log}(N-N_2O) \text{ (kg/ha/an)} = -1.516 + 0.038 * (Norg + Nmin) + EFCorg + EFpH + EFTexture + EFClimat + EFCulture + 1.99$$

Avec: EFCorg: facteur d'émission lié à la teneur en carbone organique du sol, EFpH: facteur d'émission lié au pH du sol, EFTexture: facteur d'émission liée à la classe texturale du sol, EFCulture: facteur d'émission lié à l'espèce cultivée.

Equation établie à partir de données de flux de N<sub>2</sub>O mesurée dans le Monde (1000 references). C'est à partir de cette même base de données que le coefficient EF1 = 1% a été déterminé).







### NO GAS II – Base de données

- ✓ Flux de N<sub>2</sub>O : 0.008 à 13.4 kg de N-N<sub>2</sub>O/ha/an – moyenne : 1.63 kg de N-N<sub>2</sub>O/ha/an – médiane : 0.74 kg de N-N<sub>2</sub>O/ha/an
- ✓ Température annuelle : 10 à 14°C – médiane : 11.4 °C
- ✓ Pluviométrie annuelle : 414 à 1058 mm – médiane : 622 mm
- ✓ Caractéristiques des sols:

Indicateur	pH	MO	Sables	Argile
Maximum	8.4	4.7 %	57%	31 %
Médiane	7.2	2.2 %	9.5 %	20 %
Minimum	5.9	1.3 %	0.05 %	9 %

- ✓ Caractéristiques des pratiques :

Indicateur	Cultures	Travail du sol	Fertilisation
Données	Colza=41%, BTH=26%	Labour=45%, TS=50%, semis direct =5%	Majoritairement basée sur des engrais de synthèse (produits organiques =23%)

- ➔ La BDD couvre une large gamme de situations (extrêmes représentés)
- ➔ Mais une majorité de données issues de situations similaires



### - Données relatives à l'occupation des sols :

Martin, P. et al., 2021, "RPG Explorer Crop successions France 2007-2014, 2007-2019, 2015-2019", <https://doi.org/10.15454/XH84QB>, Portail Data INRAE, V2, UNF:6:WJbvCafksh00/+PmNI2Zcg

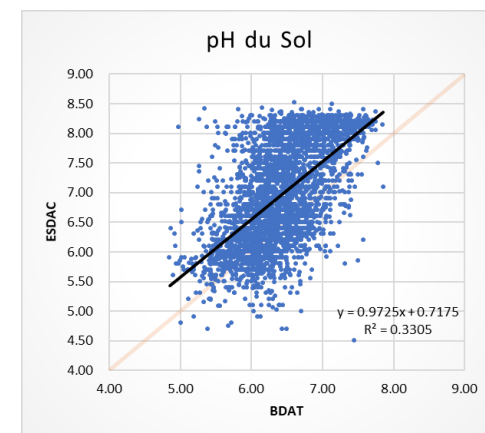
### - Données relatives à l'application d'azote dans les sols :

- Methodologie des inventaires territoriaux des émissions atmosphériques (Atmo)
- Calcul des apports à partir des tableaux du document DrealBFC-17-SBEP-PAR (chiffres de 2011 couplés à la spatialisation des zones vulnérables de 2018)

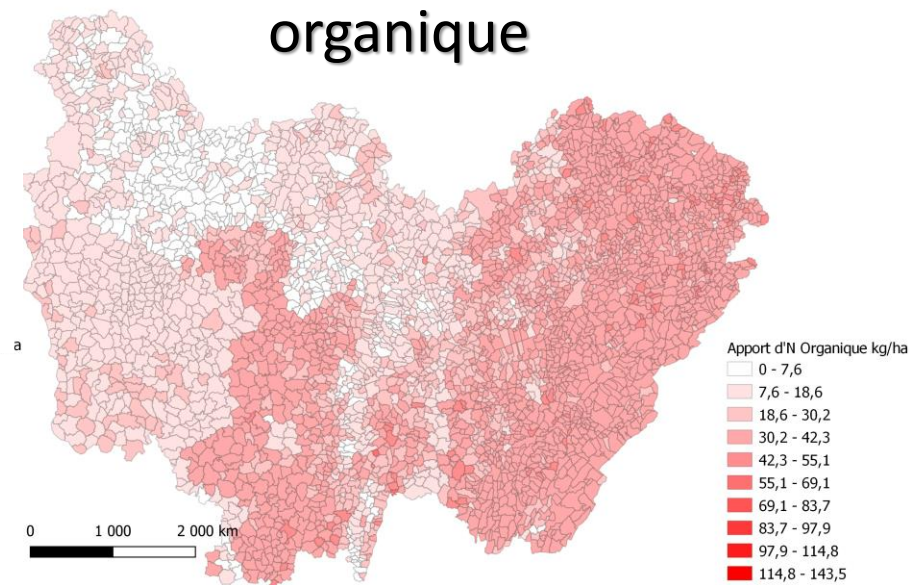
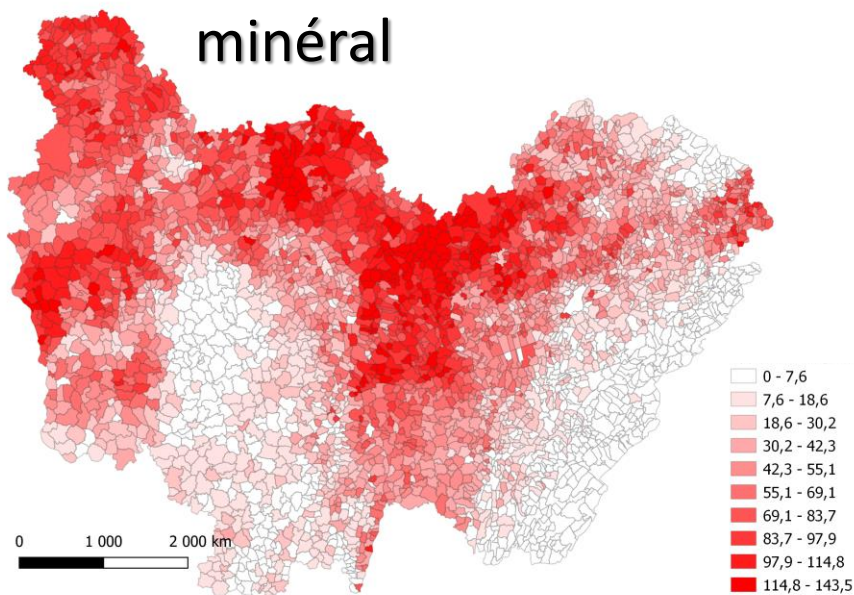
### - Données sols : « Beaucoup d'écarts entre les sources de données peuvent être constatés ».

- BDAT
  - ESDAC
  - Données BRGM (stage de Victor)
- Néanmoins, une certaine cohérence sur les données pH

### - Données DRIAS pour le volet précipitations



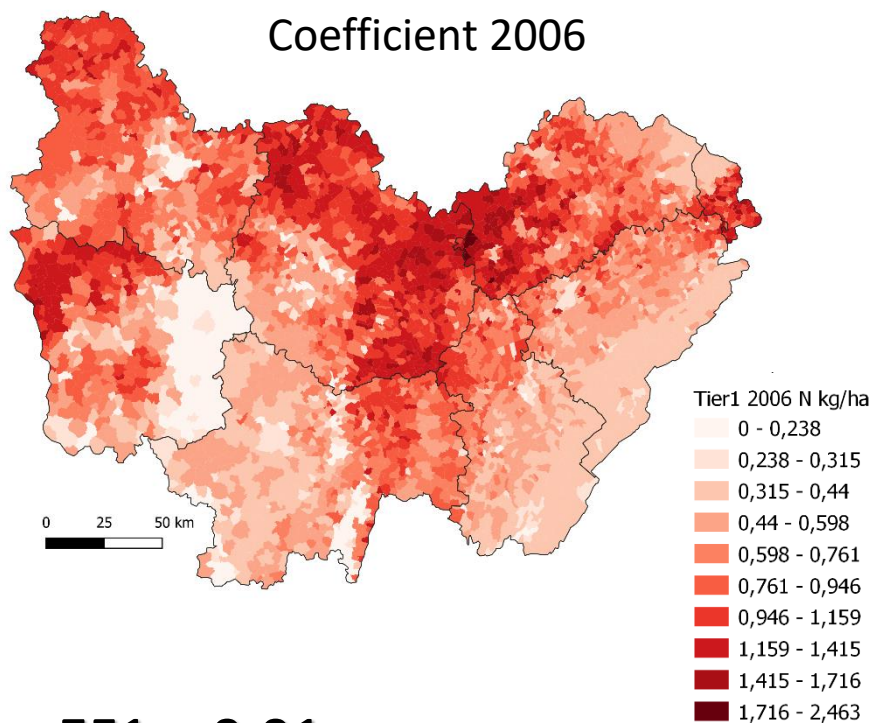
### Apports d'azote (kg / ha) représentés à la maille communale



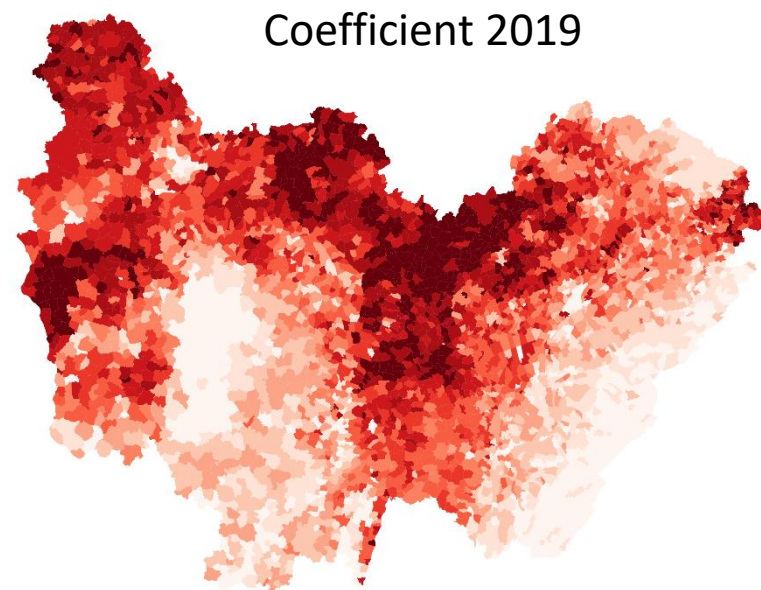
Calculés à partir des tableaux du document DrealBFC-17-SBEP-PAR (chiffres de 2011 couplés à la spatialisation des zones vulnérables de 2018)



### Émissions de N<sub>2</sub>O (issues de l'azote des fertilisants apportés, estimées selon la méthodologie Tier1) (kg N-N<sub>2</sub>O / ha) – Représentation à la maille communale



EF1 = 0,01



EF1 (Nmin) = 0,016

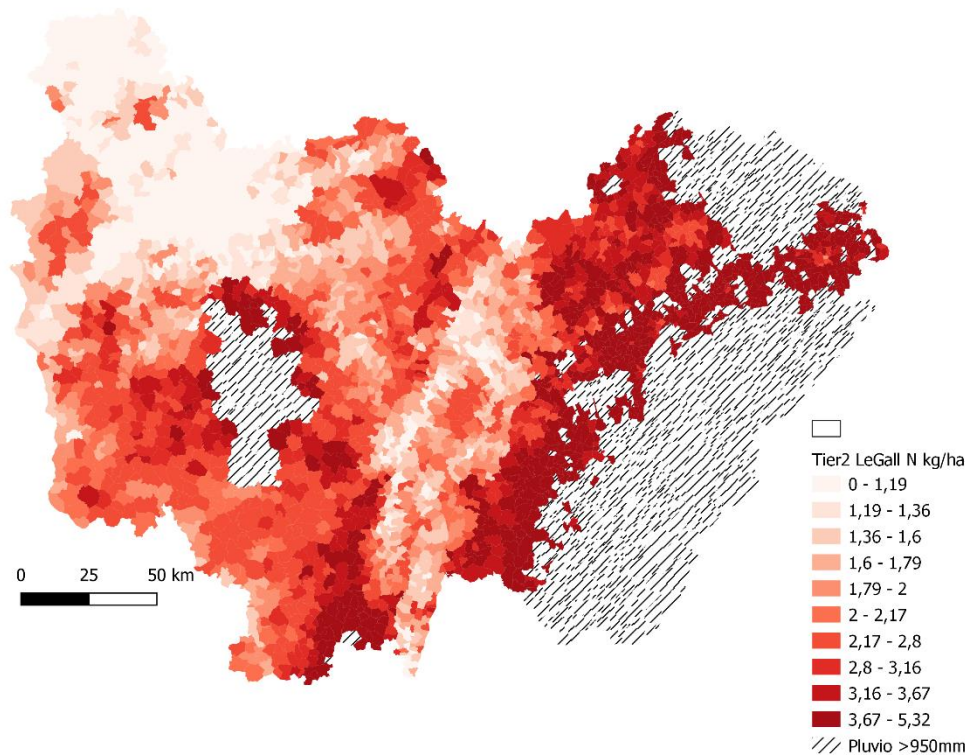
EF1 (Norg) = 0,006



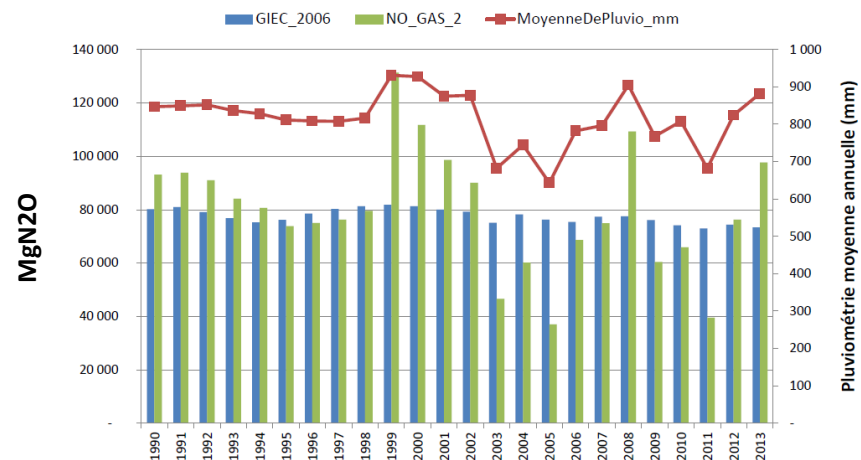


### Spatialisation Tier2: Modèle de LeGall

#### Émission de N2O (kg/ha) Représentation à la maille communale



### NO GAS II – Résultats & Performances



**ATTENTION :** équation appliqué à l'ensemble de la SAU des cantons, en incluant les prairies + cultures légumières

→ **En tendance:** un niveau d'émissions moyen comparable à celui du tier 1 (au contraire de la tendance observée dans le calcul de la RMSEp)

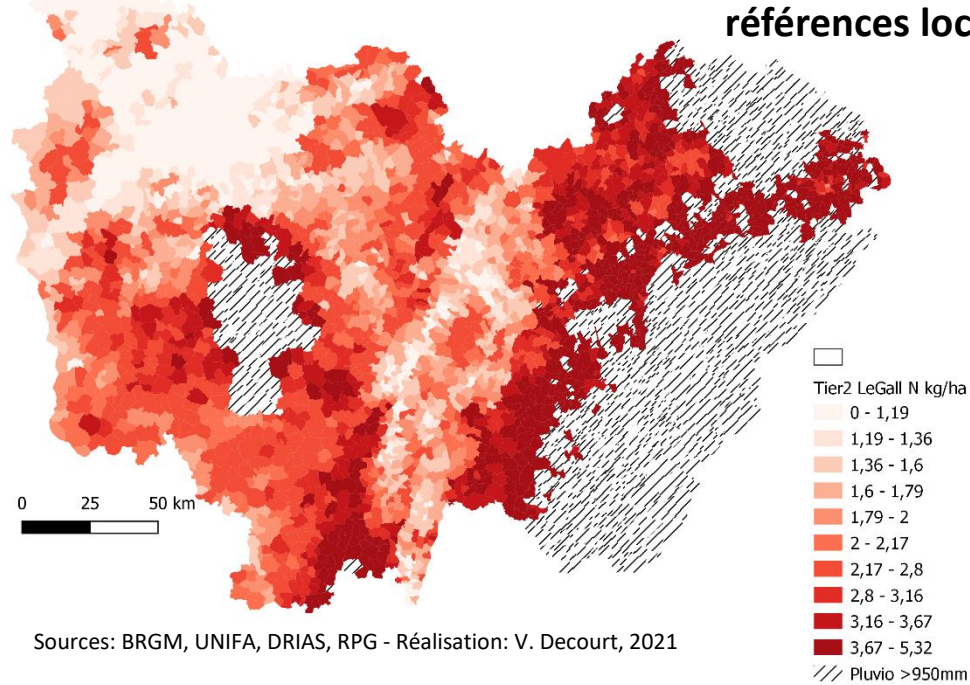
Projet NO GAS II - CoPil 3 - 15 avril 2015

Sources: BRGM, UNIFA, DRIAS, RPG - Réalisation: V. Decourt, 2021



### Spatialisation Tier2: Modèle de LeGall

## Émission de N<sub>2</sub>O (kg/ha) Représentation à la maille communale / Comparaison avec des références locales



Sources: BRGM, UNIFA, DRIAS, RPG - Réalisation: V. Decourt, 2021

**Tableau 3 : Effets comparés de différents facteurs agronomiques sur la proportion d'azote appliqué émise sous forme de N<sub>2</sub>O au cours des cinq mois suivant l'apport des fertilisants ; les quantités émises ramenées aux quantités de fertilisants apportées reposent sur la différence des flux entre les parcelles fertilisées et les témoins non fertilisées.**

*Table 3 : Comparison of the effect of different agricultural factors on the proportion of applied nitrogen lost as N<sub>2</sub>O over a five month period following the nitrogen fertilization, evaluated as the difference of emissions between fertilized and control fields.*

Facteurs étudiés			% de N appliqué émis sous forme de N <sub>2</sub> O
agronomique	climatique	pédologique	
Colza fertilisé (170 kg N ha <sup>-1</sup> ) - nitrate d'ammonium - sulfate d'ammonium - urée - nitrate de potassium	Nord-Est de la France 1997	Luvisol <sup>(1)</sup>	0,53 0,55 0,42 0,42
Colza fertilisé, dose - suboptimale - suboptimale + 100 kg ha <sup>-1</sup>	Nord-Est de la France 1995	Moyenne de 3 types de sols différents	1,00 1,10
Culture fertilisée (170 kg ha <sup>-1</sup> ) - Blé - Colza Colza avec fertilisation suboptimale (220)	Nord-Est de la France 1997  Nord-Est de la France - 1995 - 1997	Luvisol <sup>(1)</sup>  Luvisol <sup>(1)</sup>	0,33 0,53  2,49 0,53
Colza avec fertilisation suboptimale	Nord-Est de la France 1995	Luvisol <sup>(1)</sup> Rendosol <sup>(1)</sup> Calcosol <sup>(1)</sup>	2,49 0,18 0,66

5,5 kg N  
3,2  
→ 40

<sup>(1)</sup> Luvisol : sol brun lessivé de la plaine de la Saône ; rendosol : rendzine sur craie de Champagne ; calcosol : sol brun calcaire superficiel (Petite Terre des plateaux de Côte-d'Or).  
<sup>(1)</sup> Luvisol from plaine de la Saône ; rendosol from Champagne ; calcosol : superficial soil from plateaux de Côte-d'Or.

Système de culture	kg N / ha / an
Domaine INRAE Bretenières	
S1	0,33
S2	5,3
S3	0,18
S5	0,78

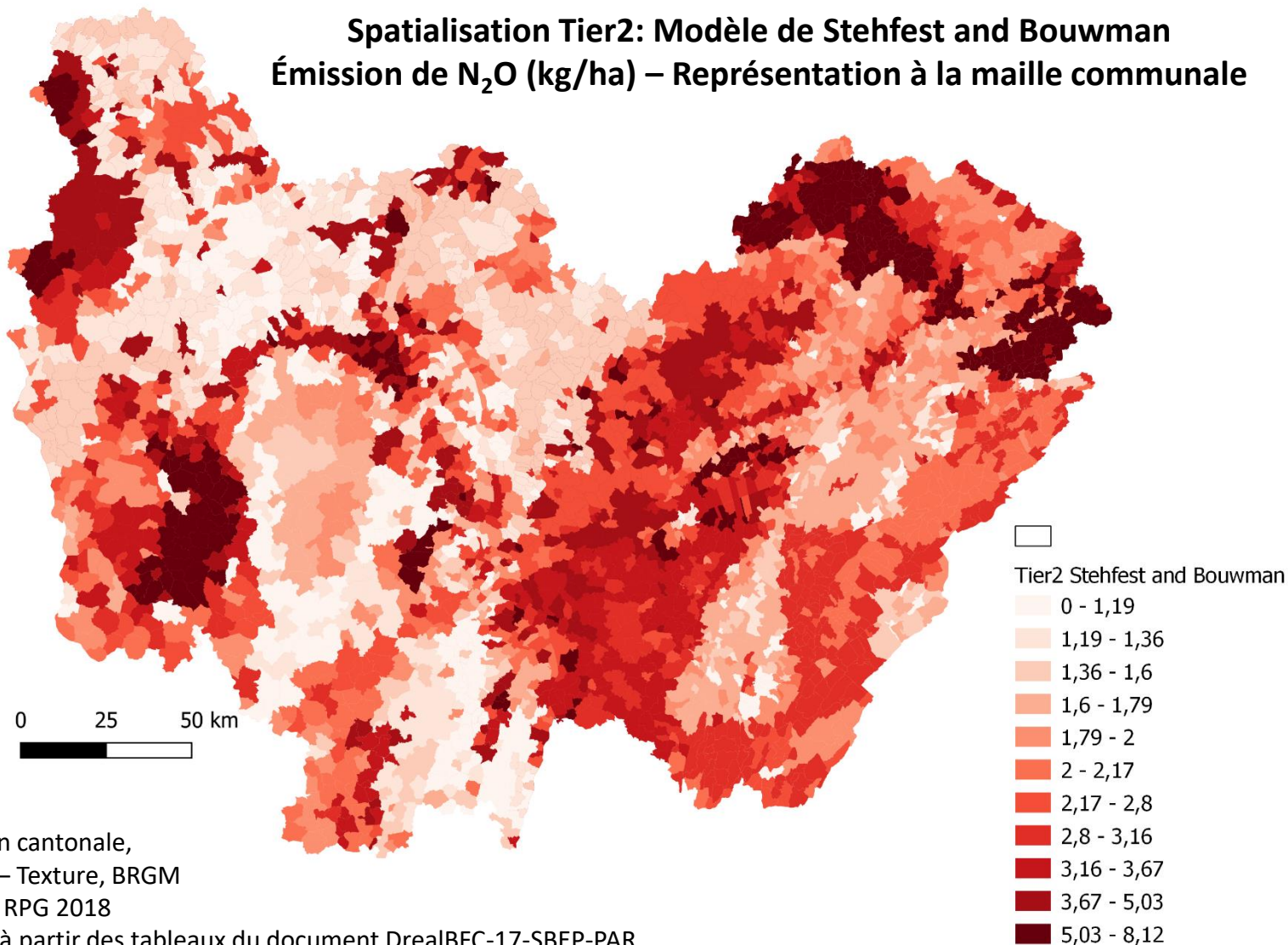
Germon et al., 2003

Vermue et al., 2013





### Spatialisation Tier2: Modèle de Stehfest and Bouwman Émission de N<sub>2</sub>O (kg/ha) – Représentation à la maille communale



Données « sol » :

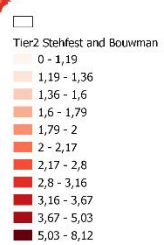
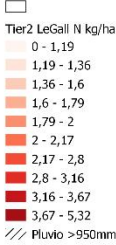
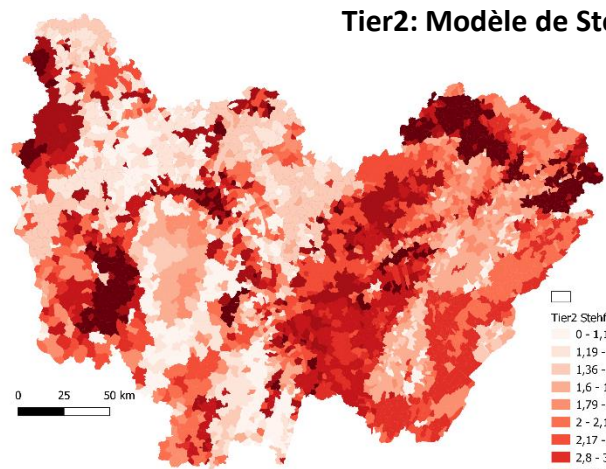
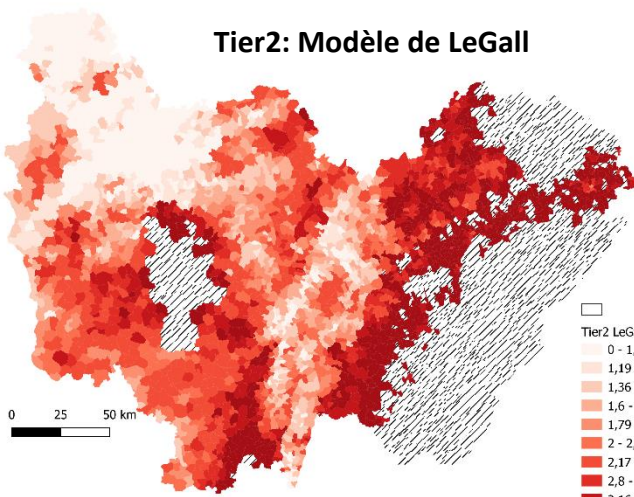
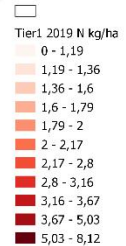
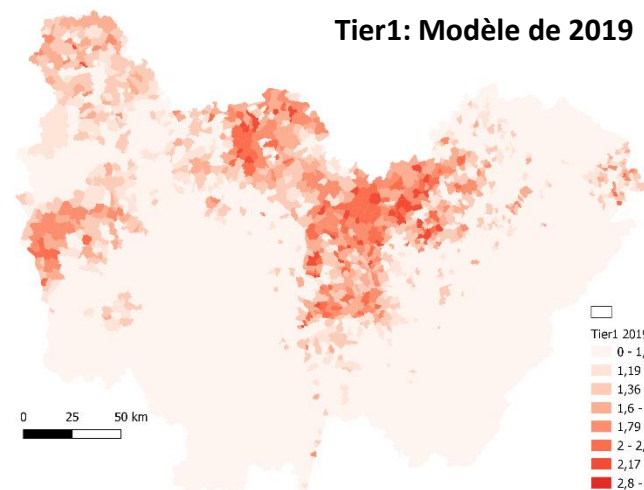
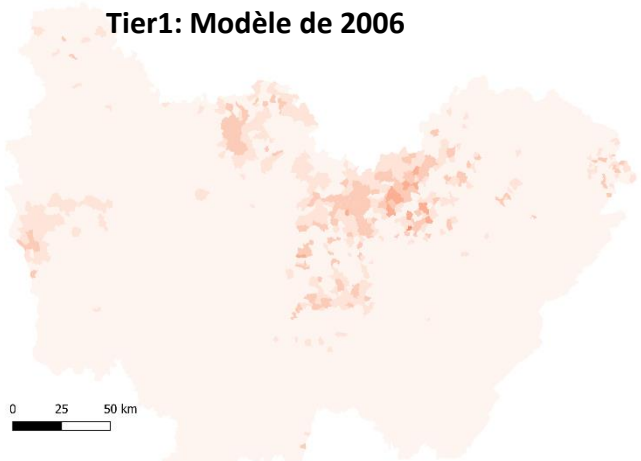
- pH BDAT, résolution cantonale,
- Corg, ESDAC 2004 – Texture, BRGM

Données « culture » : RPG 2018

Données N : Calculés à partir des tableaux du document DrealBFC-17-SBEP-PAR  
(chiffres de 2011 couplés à la spatialisation des zones vulnérables de 2018)



### Spatialisation Émission de N2O (kg/ha) Représentation à la maille communale



Sources: BRGM, UNIFA, DRIAS, RPG - Réalisation: V. Decourt, 2021

Sources: voir diapo précédente



## Synthèse et 1<sup>ères</sup> estimations d'abattement des émissions obtenues en remontant le pH des sols acides à 6.8 pour la Région et par département

		Emissions de N <sub>2</sub> O (kg N-N <sub>2</sub> O)		
		au pH actuel	après chaulage agropédo-climatique	abattement
Toute la région				
Tier 1	2006	1141921		
	2019	1561733		
Tier 2	S & B	5876005	4465467	24%
Partie de la Région ou pluviométrie < 950 mm / an				
Tier 2	Le Gall et al.	2991062	2259149	24%
	S & B	3982207	3188528	20%

	LeGall								
	21	25	39	58	70	71	89	90	
pH actuel	800 364	-	10 014	706 972	370 317	699 956	394 250	9 189	
après chaulage climatique	704 803	-	7 178	487 273	274 708	430 351	348 238	6 597	
% abattement	11.94	-	28.32	31.08	25.82	38.52	11.67	28.20	
	S&B								
pH actuel	1 088 273	643 498	765 976	967 168	819 719	801 071	751 260	86 527	
après chaulage climatique	939 418	426 015	519 954	699 982	541 430	575 653	715 927	57 177	
% abattement	13.68	33.80	32.12	27.63	33.95	28.14	4.70	33.92	



### Constats:

- avec les mêmes sources de données, résultats très différents, ce qui n'est pas étonnant vu les modèles
- Disparités constatées entre sources de données (BDAT-BRGM par exemple) ce qui pose la question du choix des sources (en cours d'analyse)

### Questionnements sur données:

- BDAT : les données BDAT ne sont pas géolocalisées, elles ne sont localisées qu'à la commune (lieu de prélèvement ou siège de l'exploitation, ... , à la discrétion du demandeur) . Cela pose des questions sur la précision de ces données versus les usages que l'on peut en faire. De plus, conformément à la suggestion de Nicolas Saby, les données issues des communes sur lesquelles, il y a plus de 1000 analyses réalisées sont écartées (exemple Dijon).
- Suggestion: privilégier la base de données Donesol si elle présente moins d'approximation même si elle ne couvre que la Bourgogne et mener l'ensemble de la démarche sur une sous zone renseignée par Donesol. Envisager de faire évoluer l'acquisition des données.





## Réflexions, discussion

Questions sur la solidité des données azote, notamment sur les sources (UNIFA à la région) mais aussi concernant l'absence d'information sur les pratiques locales : agriculture bio, réelle place des épandages de déjections sur les apports dans certaines zones (sous ou sur estimation de l'apport complémentaire minéral... ?)

En attente de l'exploitation des données **RICA dont l'accès est obtenu**, qui pourront servir de référence et valider les chiffres obtenus à partir des sources UNIFA et de la méthodologie permettant de ventiler ces données à l'échelle locale. Question sur le caractère opérationnel de l'exploitation des données RICA dans des indicateurs de gouvernance s'ils sont trop parcellaires ?

Questionnements sur les modèles et l'absence de référence qui pourrait nous orienter dans nos choix **(les données acquises en Région sont mentionnées dans l'exposé)**

Priorité pour l'année à venir de stabiliser les méthodes de niveau tier 2 et passer en priorité sur les quantification d'évitement possible (y compris leur éventuelle valorisation monétaire) ? **+ Approche Tier 3 sera développée**



Quels résultats présenter et comment le faire ? Ce qui fait le lien avec le volet SI



# Méthodologie de localisation et de typologie de zones potentiellement réductrices/émettrices de N<sub>2</sub>O pour l'aide à la décision publique:

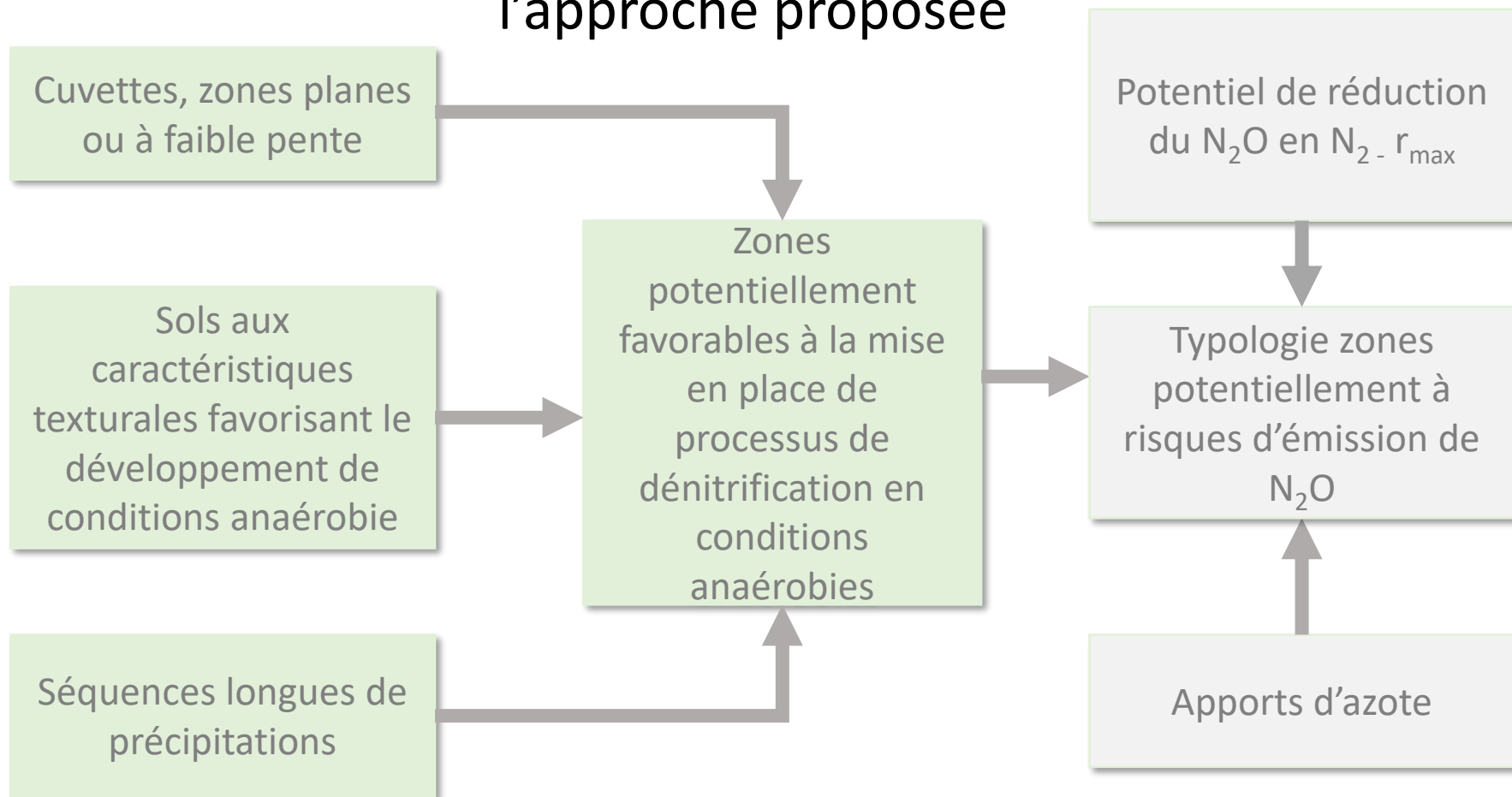
## Rappel des travaux réalisés sur le Rmax

## Approche exploratoire d'identification de zones à risque de développement de conditions anaérobies





### Description synthétique de l'approche proposée



### Spatialisation de la variable $r_{max}$ (potentiel de réduction d'émission) sur le territoire de la Bourgogne Franche-Comté

#### Contexte Général

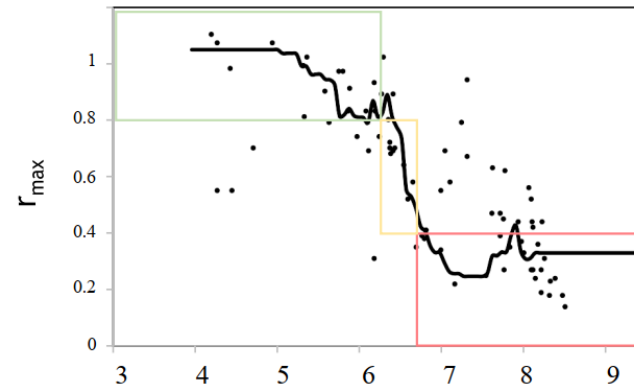
❖ **Réduction** des émissions de  $N_2O$  par l'agriculture

❖ Le **pH** des sols est un déterminant essentiel de la capacité des sols à réduire le  $N_2O$ . Il explique à lui seul 60% de la variabilité de l'indicateurs  $r_{max}$  (Hénault et al. 2019)

❖ La prédiction de l'indicateur  $r_{max}$  est améliorée par l'introduction dans l'équation de la CEC et de l'argile.

❖ Selon Hénault et al. 2019, la fonction de pédotransfert permettant le calculer du  $r_{max}$  est la suivante:

$$r_{max} = - 0,4 \text{ pH} + 0,026 \text{ CEC} - 0,001 \text{ Clay} + 3,13$$



Relation entre la capacité des sols à réduire  $N_2O$  et leur pH (Hénault et al., 2019)

#### Objectifs de l'étude

1. Calcul de l'indicateur  $r_{max}$  à partir des différentes Bases de Données disponibles

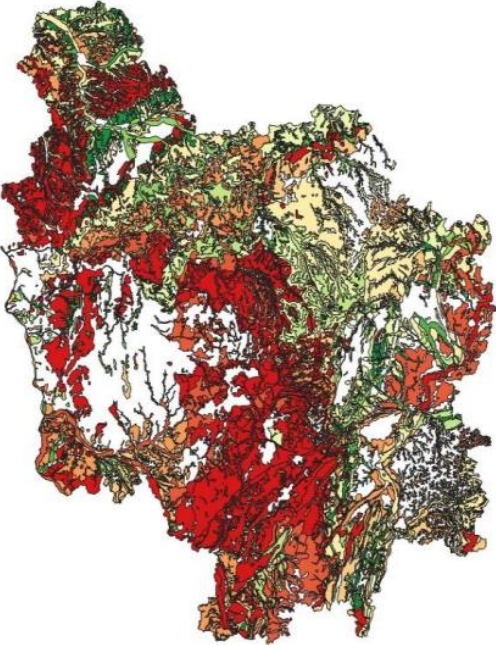
**➡ Disponibilité des données variables selon les zones**

2. Spatialisation et cartographie du  $r_{max}$  à l'échelle de la région de Bourgogne Franche Comté

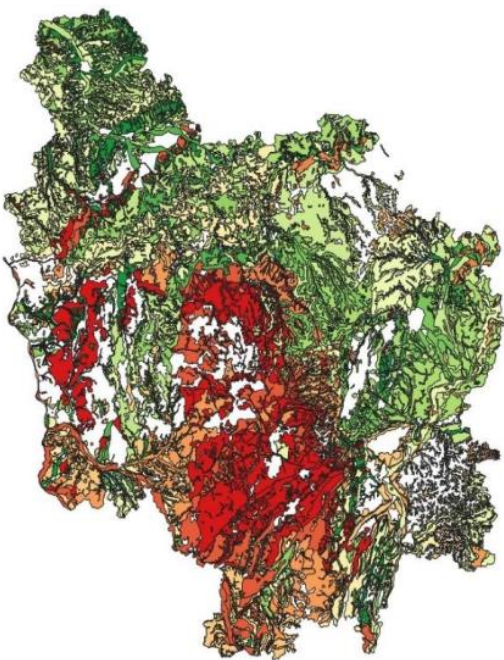


### Spatialisation du Rmax pour la région Bourgogne à partir des données sol de la BD Donesol

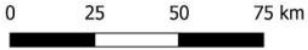
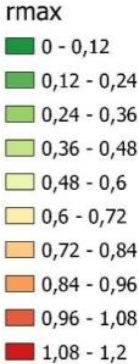
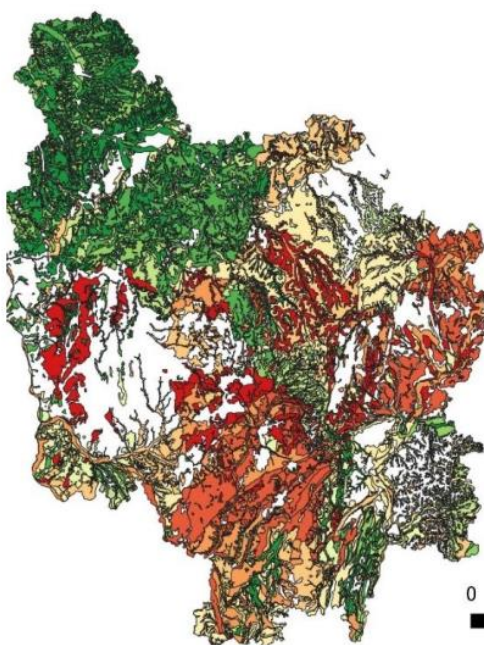
Valeurs minimales



Valeurs modales



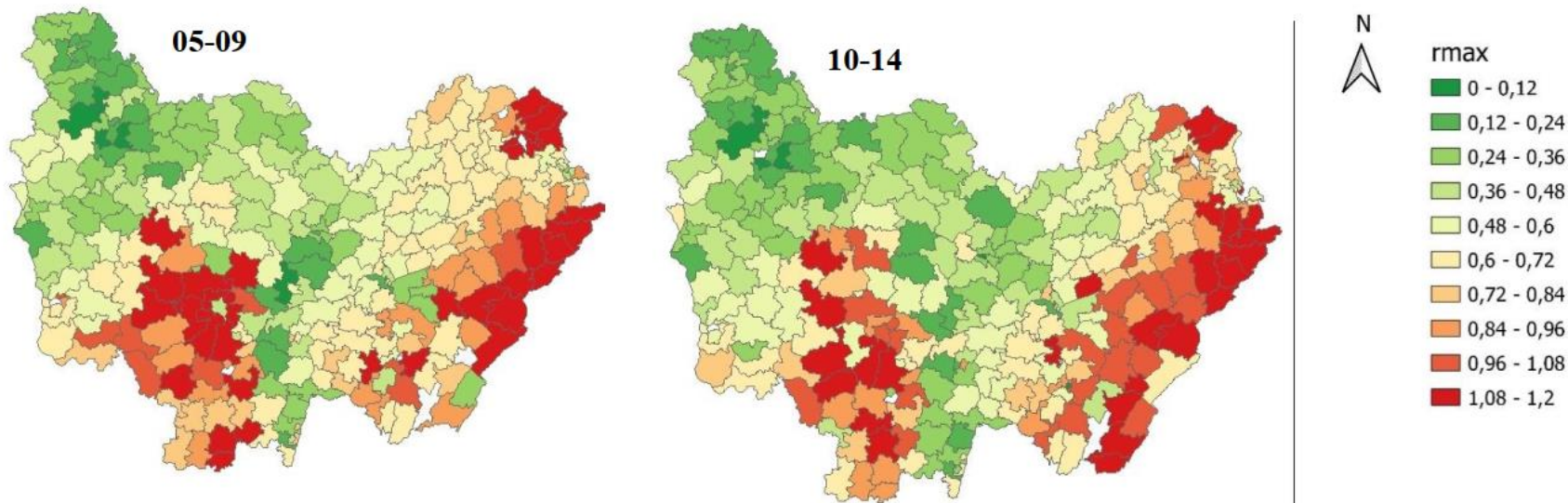
Valeurs maximales



Source: Jouin C. 2020: Spatialisation des propriétés biologiques des sols qui influencent les émissions de protoxyde d'azote Exemple de la Bourgogne Franche-Comté. Rapport de stage de Master 2 SEME de l'UB, sous la direction de C. Hénault (INRAE) dans le cadre du projet ChauGES financé par l'ADEME



### Spatialisation du $R_{max}$ pour la région Bourgogne Franche-Comté à partir des données sol de la BDAT



Représentation des valeurs médianes de  $r_{max}$  à l'échelle de la Bourgogne Franche-Comté à partir de la base BDAT

Source: Jouin C. 2020: Spatialisation des propriétés biologiques des sols qui influencent les émissions de protoxyde d'azote Exemple de la Bourgogne Franche-Comté. Rapport de stage de Master 2 SEME de l'UB, sous la direction de C. Hénault (INRAE) dans le cadre du projet ChauGES financé par l'ADEME





### Rappel du contexte et des objectifs de l'approche

Dans le cadre de la production de données de cadrage pour l'aide à la décision publique, identifier des zones qui, de par leurs caractéristiques pédologiques et les conditions climatiques auxquelles elles sont soumises, favorisant la mise en place de conditions anaérobies, sont susceptibles de développer des conditions favorables aux émissions de protoxyde d'azote.

La mise en place de conditions anaérobies sera favorisée par:

- Des apports d'eau suffisants tant en volume qu'en durée (permettant notamment l'infiltration puis la saturation des couches supérieures du sol)
- Des caractéristiques pédologiques et plus précisément des propriétés hydriques liées à la texture pouvant favoriser une saturation de la couche supérieure de sol. Des informations sur la densité seraient également intéressantes mais en l'état difficilement accessibles aux échelles loco-régionales qui nous intéressent.



### Objectifs de l'approche proposée

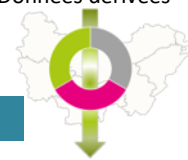
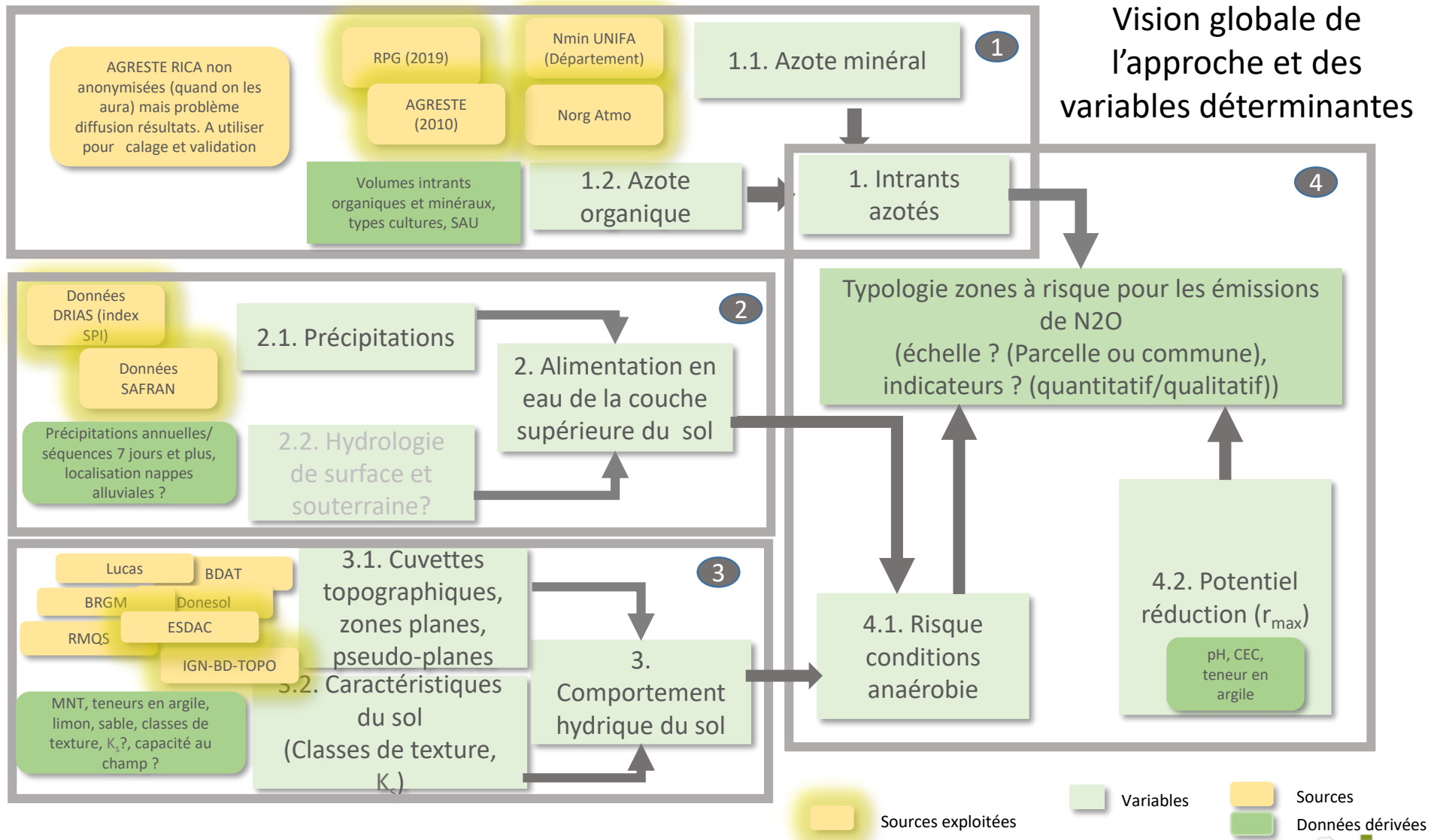
Produire une information identifiant les zones susceptibles de développer les conditions favorables aux émissions de N<sub>2</sub>O, pertinente et « facilement » mobilisable sur la base d'une **méthodologie reproductible spatialement et temporellement** pour l'aide à la décision dans le cadre des politiques publiques d'atténuation des émissions de GES de l'agriculture.

- Sur la base de données sources fiables, à une échelle fine, facilement accessibles et diffusables
- Sur la base d'une méthodologie reproductible qui pourra être intégrée dans un module de calcul interopérable avec OPTTEER
- Dont les résultats non soumis à des contraintes de diffusion pourront être intégrés à une démarche visant à définir un zonage (typologie des zones à risque) pour orienter l'action publique.



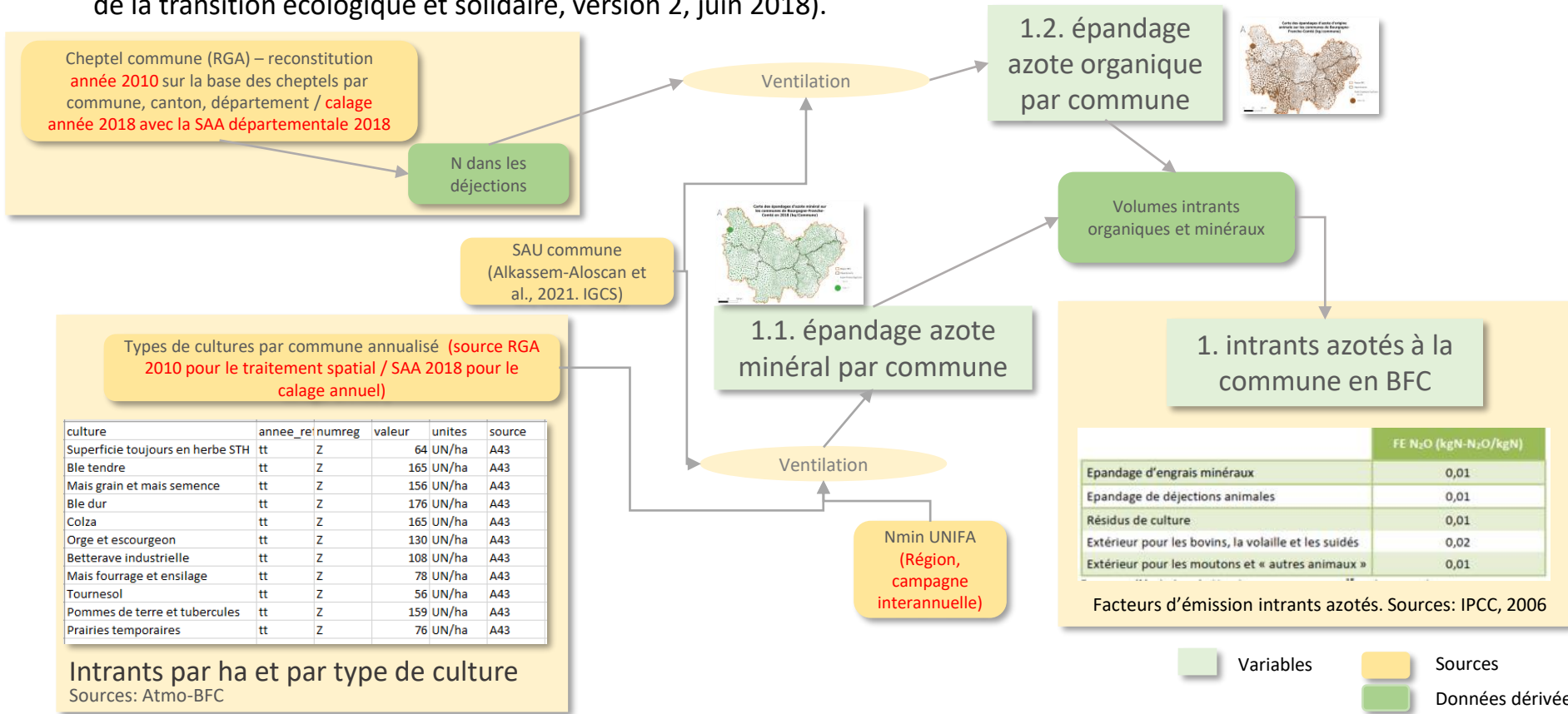


Vision globale de l'approche et des variables déterminantes

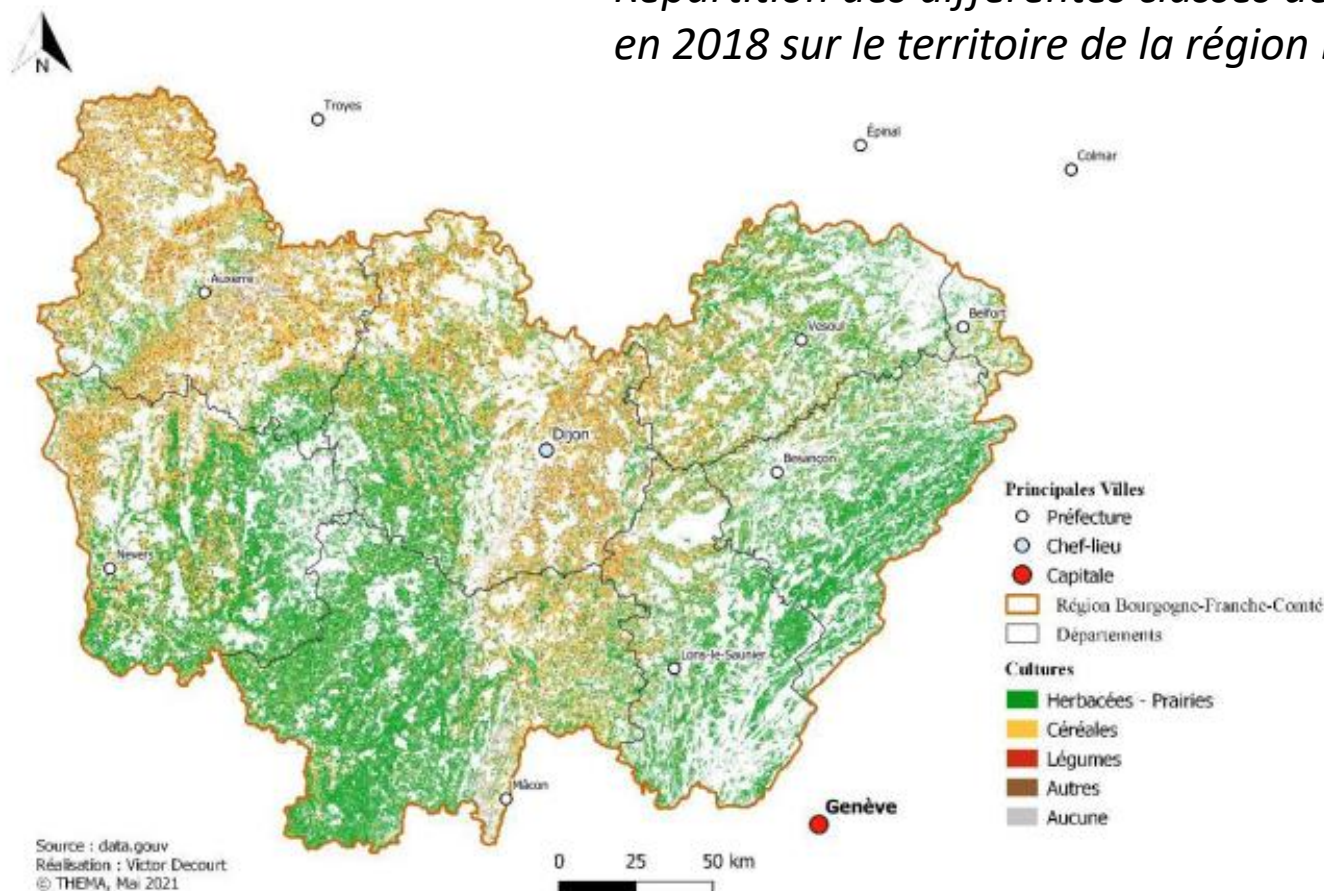


### 1. Sous système intrants azotés: processus, données et méthodologie

La méthodologie IPCC 2006 est utilisée pour calculer les émissions de N<sub>2</sub>O. Elle est mise en œuvre dans le cadre de l'élaboration des inventaires territoriaux des émissions atmosphériques (guide méthodologique du Ministère de la transition écologique et solidaire, version 2, juin 2018).



Répartition des différentes classes de cultures en 2018 sur le territoire de la région BFC



# Bilan des réalisations/Zones potentiellement réductrices/émettrices

## Approche exploratoire d'identification de zones à risque de développement de conditions anaérobies

À compléter

### 1 Intrants azotés: variables, données et méthodologies

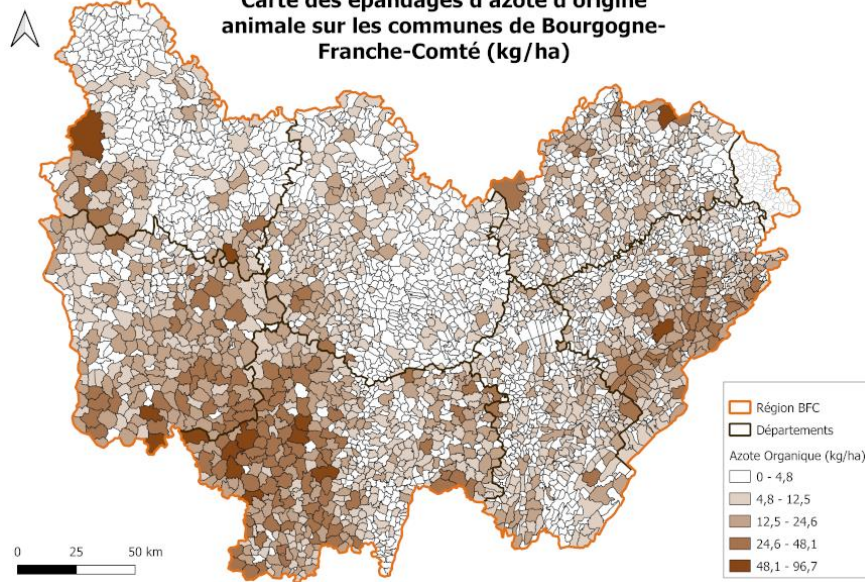
Variable	BD source	Unité	Date de référence, granularité temporelle	Thème de référence	Organisme	Localisation /couverture	Résolution	Format de distrib.	Système de référence	Restrictions d'usage	Ressources en ligne	Méthode
Nmin/com	UNIFA	tonnes	Campagne 2018/2019	fertilisant	UNIFA	France	Région	PDF	---	---	<a href="https://www.unifa.fr">https://www.unifa.fr</a>	Ventilation sur la base de la SAU/com par type de culture
	SAU-datagouv		2019	Découpage institutionnel		France	Commune	xlsx	Code commune	---	<a href="https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/sau-et-pac-par-commune-2019/">https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/sau-et-pac-par-commune-2019/</a>	
	SAU-AGRESTE		2010									
	SAU	ha			Alkassem-Aloscan et al., 2021. IGCS	Bourgogne Franche-Comté	Commune		Code commune		-	Superficie totale obtenue par ce calcul mise en comparaison avec Agreste BFC - Memento de la statistique agricole - n° 29 - Novembre 2017 (valeur de référence)



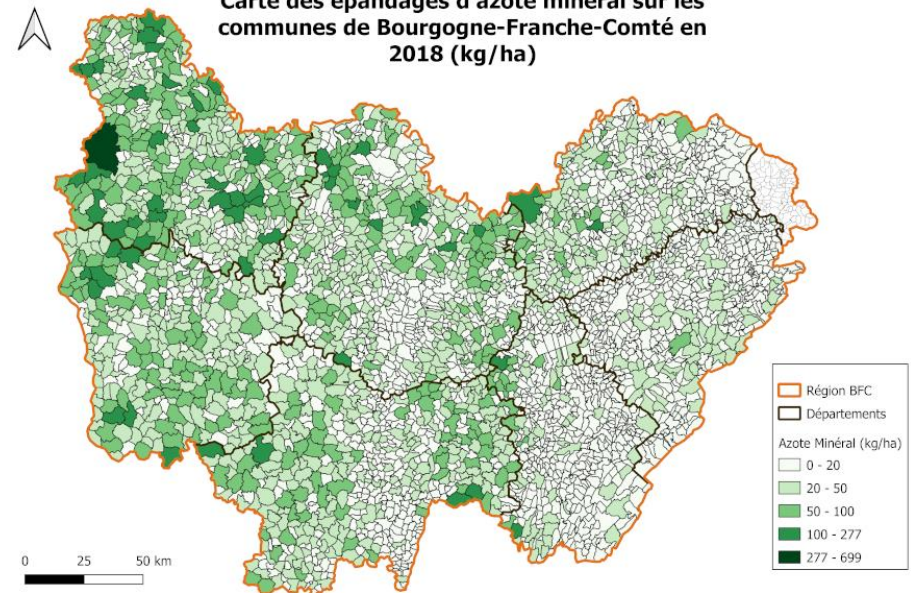


### Intrants azotés : spatialisation à l'échelle de la commune en Kg/ha

Carte des épandages d'azote d'origine animale sur les communes de Bourgogne-Franche-Comté (kg/ha)



Carte des épandages d'azote minéral sur les communes de Bourgogne-Franche-Comté en 2018 (kg/ha)



Sources: RGA, UNIFA, Atmo-BFC

Réalisation: Victor Decourt

Question: Reprendre les données recalculées en intégrant les zones vulnérables ?



### Conditions favorisant la mise en place de conditions anaérobies dans la couche supérieure du sol (4.1)

Humidité du sol fonction de 3 facteurs principaux :

- Les apports d'eau (précipitations et apports via les nappes-fonctionnement hydrologique)
- Les caractéristiques du sol influant sa capacité à infiltrer et à retenir l'eau (comportement hydrique du sol)
- La topographie, favorisant les accumulations d'eau (caractérisation des formes topographiques pour une identification des dépressions)

La question est alors d'identifier des données facilement accessibles, fiables et à échelle fine (parcelle, commune) permettant d'approximer ces différents facteurs. Pour les sols, au delà des textures, les données sur la réserve utile seraient pertinentes mais sont difficilement accessibles. Travaux ultérieurs à prévoir ...

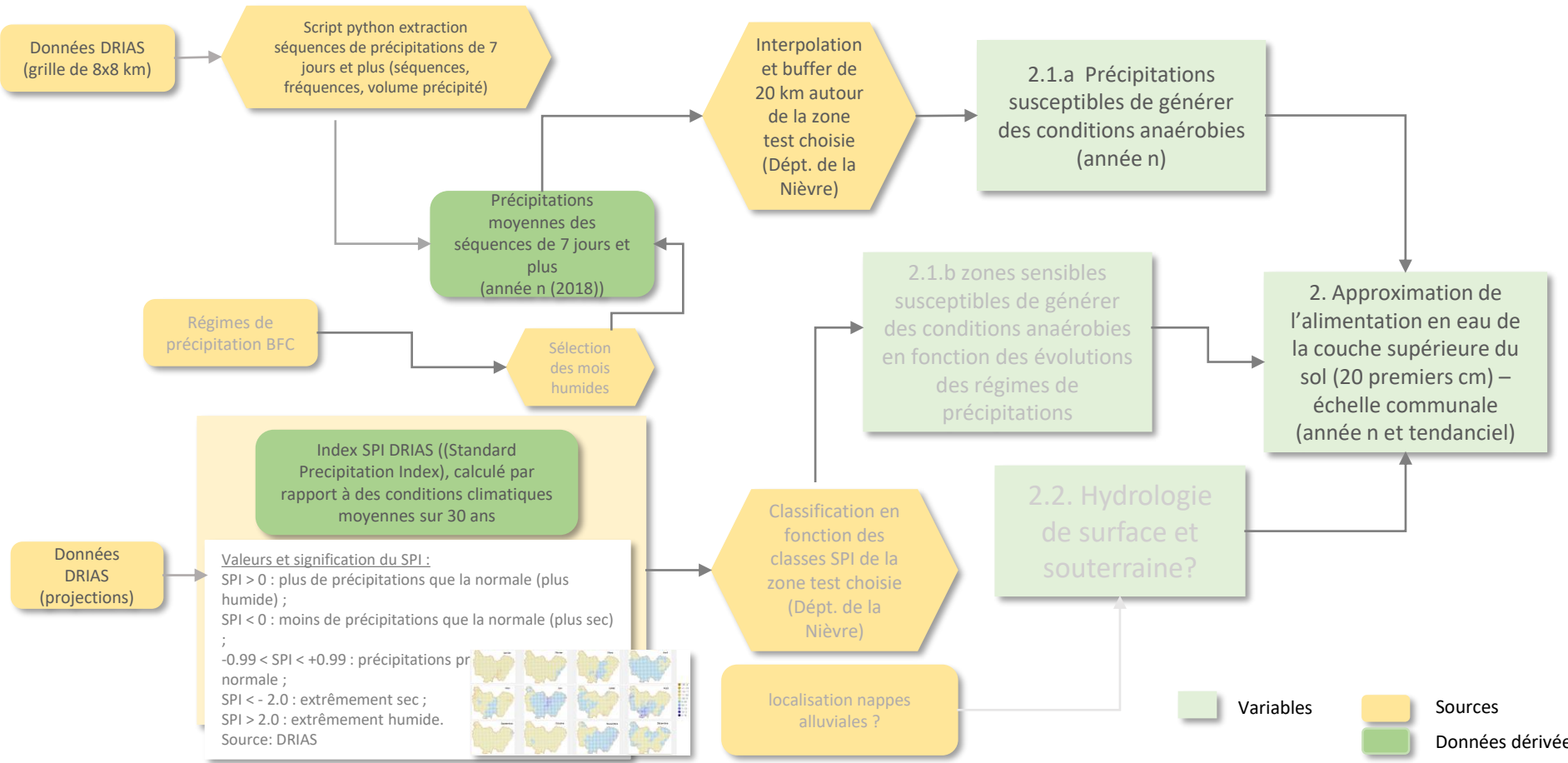




# Bilan des réalisations/Zones potentiellement réductrices/émettrices

## Approche exploratoire d'identification de zones à risque de développement de conditions anaérobies

### 2 Alimentation en eau de la couche supérieure du sol: processus, données, méthodologies



(en grisé clair: pistes évoquées mais non encore développées)



# Bilan des réalisations/Zones potentiellement réductrices/émettrices

## Approche exploratoire d'identification de zones à risque de développement de conditions anaérobies

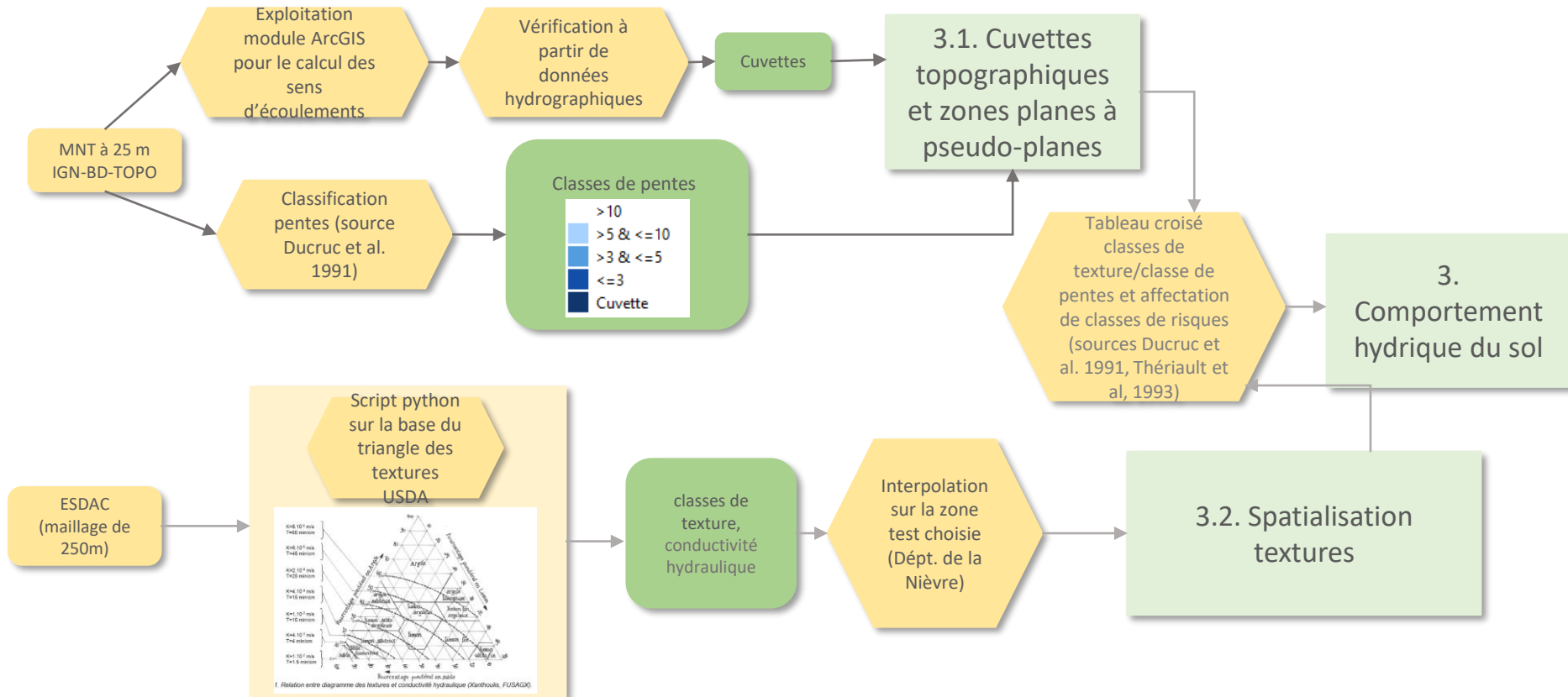
### 2 Alimentation en eau de la couche supérieure du sol: variables, données et méthodologies

Variable	BD source	Unité	Date de référence, granularité temporelle	Thème de référence	Organisme	Localisation /couverture	Résolution	Format de distrib.	Système de référence	Restrictions d'usage	Ressources en ligne	Méthode
Séquences de précipitations de + de 7jours SP7+	DRIAS	Maillage	2018	Données climatiques	Ministère de la transition écologique	Métropole et outre mer	8X8 km			non	<a href="http://www.drias-climat.fr/accueil/sections/183">http://www.drias-climat.fr/accueil/sections/183</a>	
Index SPI (Standard Precipitation Index)	DRIAS	Maillage	Mensuelle	Données climatiques	Ministère de la transition écologique	Métropole et outre mer	8X8 km			non	<a href="http://www.drias-climat.fr/accueil/sections/183">http://www.drias-climat.fr/accueil/sections/183</a>	calculé par rapport à des conditions climatiques moyennes sur 30 ans

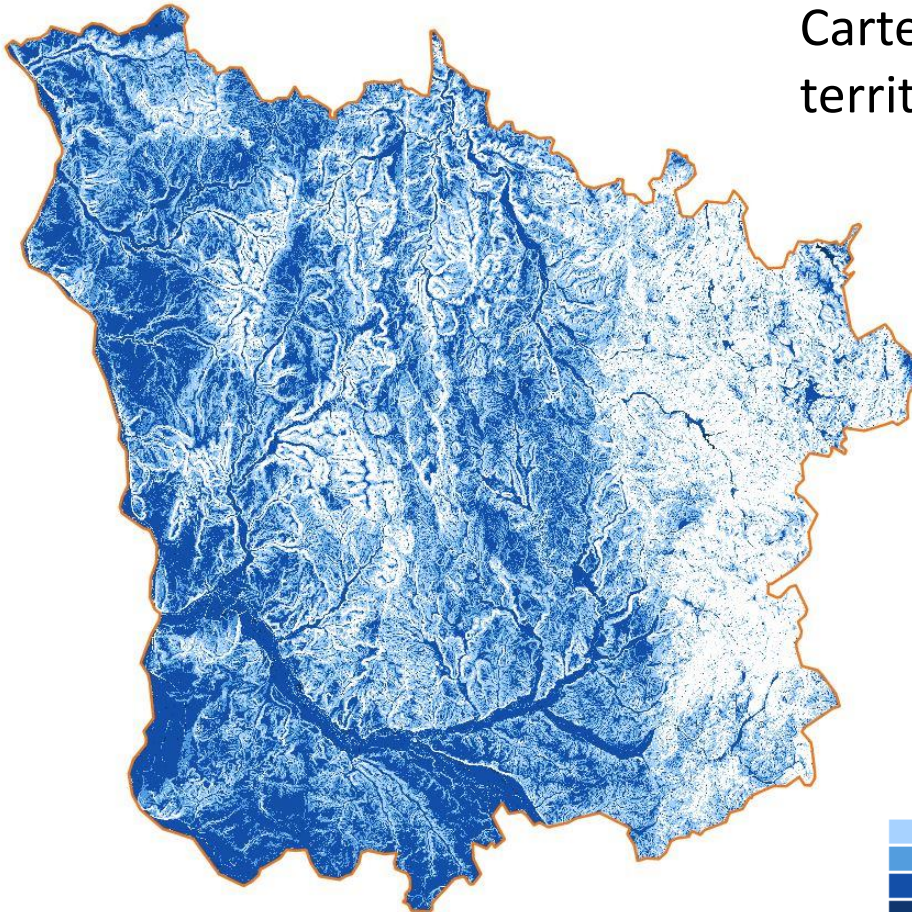
À compléter



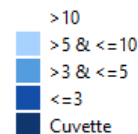
### 3 Comportement hydrique du sol: variables, données et méthodologies



### Carte des pentes et cuvettes sur le territoire de la Nièvre (zone test)



Un territoire test aux conditions climatiques et pédologiques suffisamment hétérogènes a été choisi afin de valider la méthodologie tout en réduisant les temps de calculs. Le territoire de la Nièvre a été retenu.

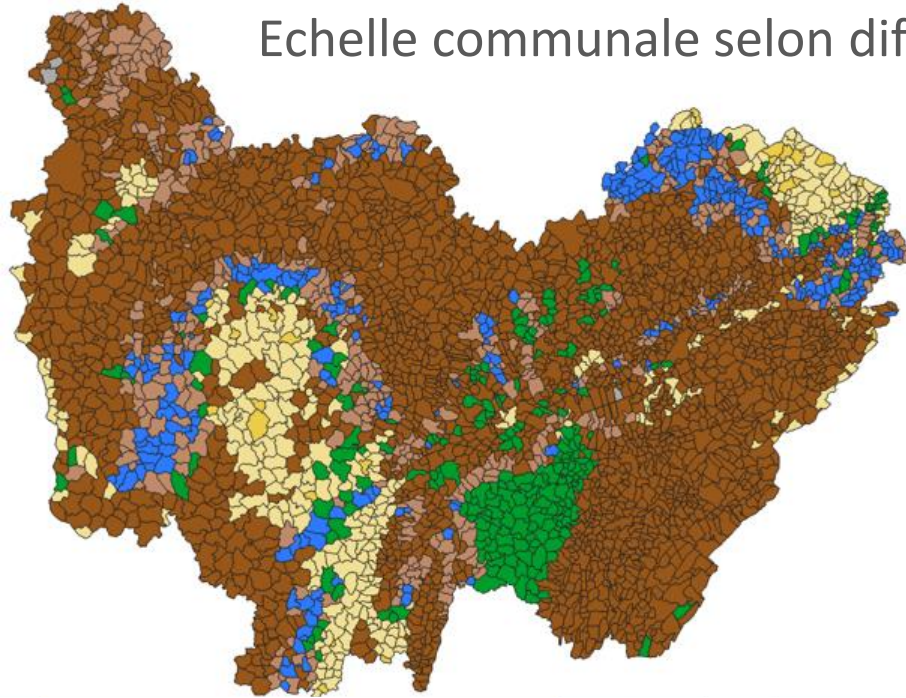


Réalisation: V. Decourt, 2021

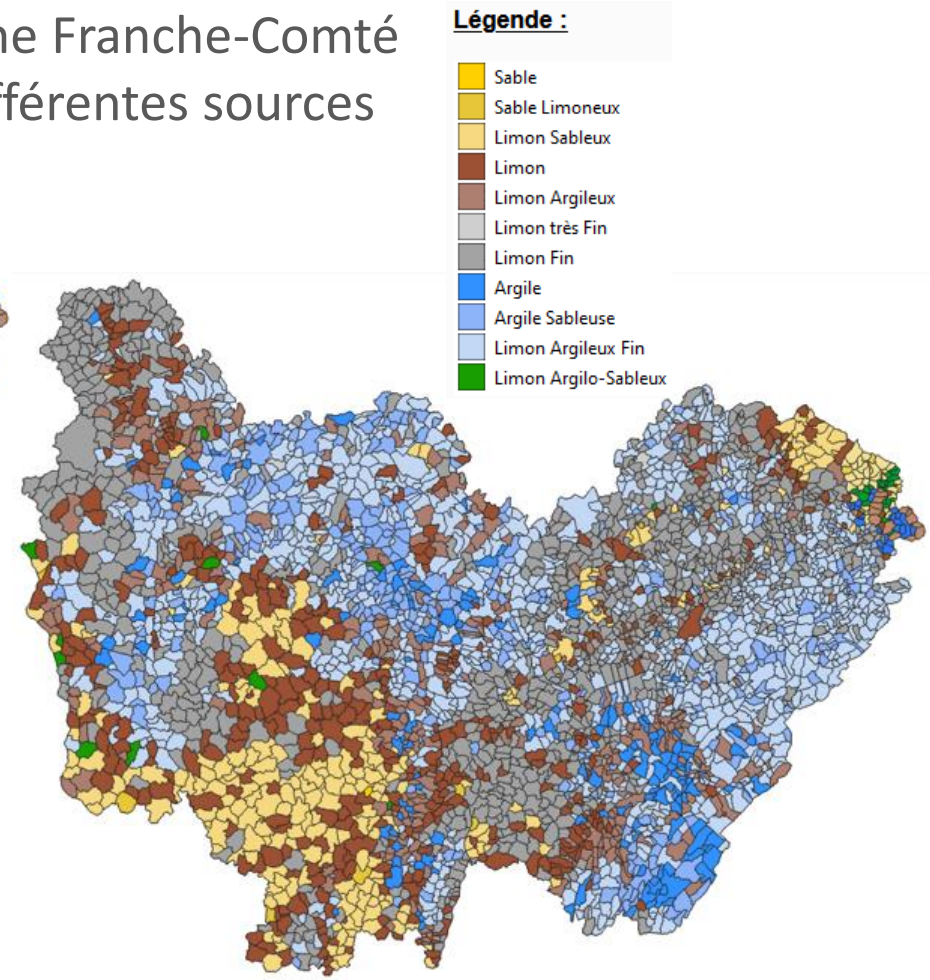




### Textures des sols de Bourgogne Franche-Comté Echelle communale selon différentes sources



Données ESDAC



Données BDAT

#### Légende :

- Sable
- Sable Limoneux
- Limon Sableux
- Limon
- Limon Argileux
- Limon très Fin
- Limon Fin
- Argile
- Argile Sableuse
- Limon Argileux Fin
- Limon Argilo-Sableux

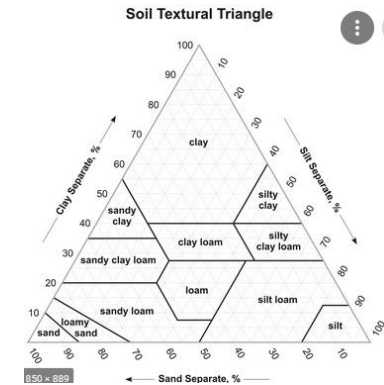


# Bilan des réalisations/Zones potentiellement réductrices/émettrices

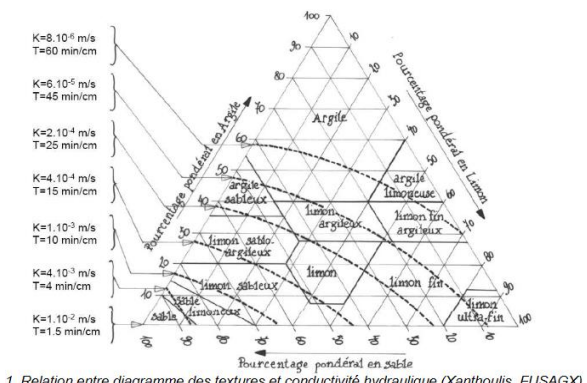
## Approche exploratoire d'identification de zones à risque de développement de conditions anaérobies

### Tableau croisé classes de textures/classes de pentes et risques de conditions anaérobies

	cuvettes	0-3%	3-5%	5-10%	Plus de 10%
Clay	6	6	5	4	3
Silty clay	6	6	5	4	3
Silty clay loam	5	5	4	3	2
silt	5	5	4	3	2
Sandy clay	4	3	2	1	1
Silt loam	3	3	2	2	2
Clay loam	4	3	2	1	1
Sandy clay loam	4	3	3	2	1
loam	4	3	3	2	1
Sandy loam	3	2	2	1	
Loamy sand	2	1	–	–	–
sand	2	1	–	–	–



Triangle des textures USDA



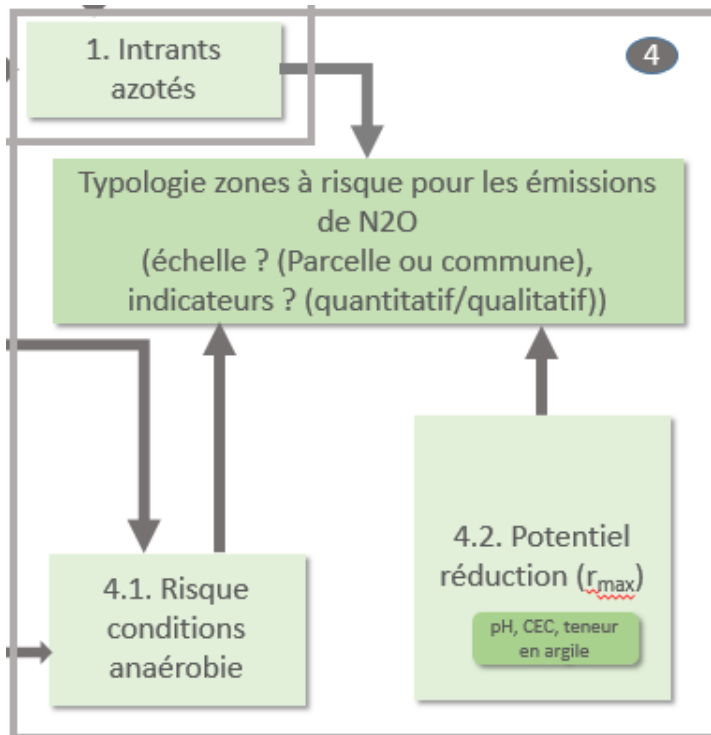
1. Relation entre diagramme des textures et conductivité hydraulique (Xanthoulis, FUSAGX).

Précision méthodologique: La valeur affectée à la combinaison est fixée en fonction d'éléments issus de la littérature et de données sur les liens entre texture et conductivité hydraulique (en attendant de travailler peut-être sur la capacité au champ et la fonction de pédotransfert qui permettrait de l'évaluer)





### 4 Zones à risque pour les émissions de N<sub>2</sub>O



### Calcul des zones à risque de développement de conditions anaérobies

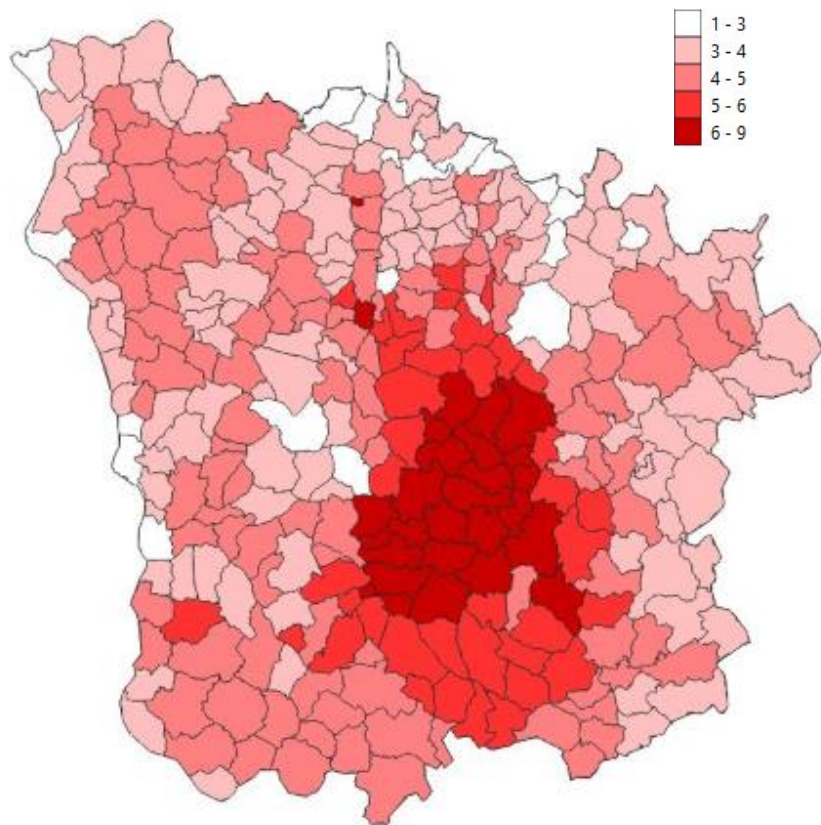
- fréquence des séquences de 7 jours et plus sur l'année
- volume de précipitation total tombé lors de ces séquences,
- moyenne de précipitations par séquences.
- classification du résultat par quantile
- Attribution à chaque classe d' une valeur entière de 1 à 5
- Addition avec les valeurs texture/pentes obtenues
- Les résultats maximum potentiels sont donc de 11 sur l'ensemble de la Région et de 10 sur la Nièvre.



# Bilan des réalisations/Zones potentiellement réductrices/émettrices

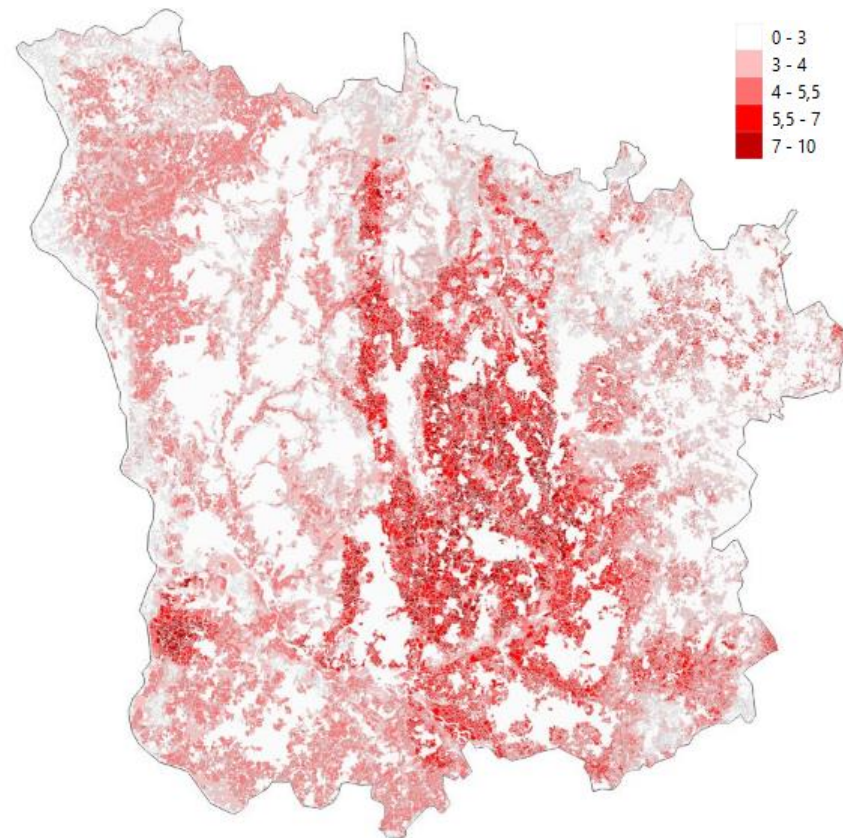
## Approche exploratoire d'identification de zones à risque de développement de conditions anaérobies

Zones potentiellement à risque de développement de conditions anaérobies



A l'échelle communale

Réalisation: V. Decourt, 2021



A l'échelle parcellaire



## Discussion, pistes d'amélioration de la méthodologie proposée

### Volet climatique:

Travailler non pas sur une année n mais sur une série longue de séquences de 7 jours et plus sur x années

Construire un indicateur croisant fréquence des séquences et volumes précipités

Introduire la dimension prospective en exploitant le SPI

Quid de la dimension « prospective de ces données sur les conditions « à risque d'anaérobies » dans un contexte climatique instable avec des précipitations de plus en plus irrégulières et/ou violentes.

### Volet textures

Refaire la démarche avec les données Donesol sur la Bourgogne

Exploiter d'autres variables (réserve utile ?, ... ) plutôt que les textures

### Granularité temporelle

Importance des rythmes cultureux et de précipitation. Leur prise en compte permettrait de mieux contextualiser les épandages sachant que le maximum d'émission de N<sub>2</sub>O se situe peu de temps après l'épandage

### Zonage/Granularité spatiale:

Exploiter au maximum l'échelle de la parcelle qui permet ensuite une meilleure articulation avec les pratiques notamment culturelles en revenant à l'échelle de la commune voire de l'EPCI pour transmission éventuelle pour tenir compte des contraintes liées à la confidentialité de certaines données .



## Propositions d'architectures de BD, de métadonnées et d'interopérabilité entre BD sources



### Tableau variables - modèles/méthodes (en cours)

Variables Modèle/ méthode	Nmin	Norg	pH	texture	CeC –capacité d'échange cationique	Corg	Variables climatiques	Humidité sol	Culture	Topographie	Conductivité hydraulique
Tier 1											
Le Gall							Pluvio cumulée /an				
S&B				Classes de texture			Grands zonages climatique		Classes cultures (herbacées/prairies , céréales, légumes, autres)		
Rochette ?											
Rmax (potentiel- réduction N20)			pH eau	Teneur en argile du sol. sans décarbon. et exprimée en g/kg	méthode au cobalthexamine, exprimée en meq/100g (ou cmol+/kg)						
Zones à risque d'émission Aléa: épandages Vulnérabilité (sol et conditions micro- climatiques)					?		Séquences de précipitations de 7 jours et plus. Manque le paramétrage des intensités et volumes reçus.			MNT 25m	? Intérêt. Disponible ESDAC donc partout en BFC
Tier 3 / STICS											

**Objectif: identifier les données de référence pour le projet**



Données		Avantages	Inconvénients
Nom	Source		
Azote	Atmo	Agrégé à la commune	Fiabilité de la donnée ? Considération sur une seule année
	UNIFA	Fiable, quantité totale d'azote minéral livré	agrégation à la région --> répartition homogène
	Site BFC	données croisées avec d'autres sources	estimation + agrégation à la région --> répartition homogène
Corg	Lucas	Donnée facilement accessible	Résultats médiocres : aucune cohérence avec les formations géologiques
	DoneSol	Donnée précise et fiable	Non disponible
	RMQS		Non disponible
	BDAT	Donnée précise et fiable	Uniquement Bourgogne
	ESDAC	Modèle créé par des experts Prise en compte des formations géologiques	Méthodologie assez floue Mauvaise transparence Données parfois étranges
pH	Lucas	Donnée facilement accessible	Résultats médiocres : aucune cohérence avec les formations géologiques
	DoneSol	Donnée précise et fiable	Non disponible
	RMQS		Non disponible
	BDAT	Donnée précise et fiable	Données anciennes (2010-2014) Données manquantes substituées par plus proche voisin Uniquement Bourgogne
	ESDAC	Modèle créé par des experts Prise en compte des formations géologiques Méthodologie détaillée	Quelques manques de données minimales Données anciennes (2010-2012)
	Atmo	Agrégé à la commune	Obtention ?
Textures	Lucas	Donnée facilement accessible	Résultats médiocres : aucune cohérence avec les formations géologiques
	DoneSol	Donnée précise et fiable	Non disponible
	BRGM	Modèle créé par des experts Prise en compte des formations géologiques Méthodologie détaillée Documentation fournie et détaillée	
RPG	datagouv	Précis, détaillé et fiable	Traitements à effectuer sur les sau concernant les épandages d'azote en fonction du type de culture
SAU	Atmo	Prise en compte du type de culture Adapté pour les épandages d'azote ? À vérifier	
Pluviométrie	DRIAS	Source fiable, bonne résolution temporelle	Maillage à 8km, Interpolation, Seulement la quantité d'eau tombée, pas forcément captée
	SAFRAN		Usage pas acquis pour l'instant

Analyse critique des données actuellement disponibles et mobilisées dans le cadre de NatAdGES (en cours)

Source: Victor Decourt, juin 2021





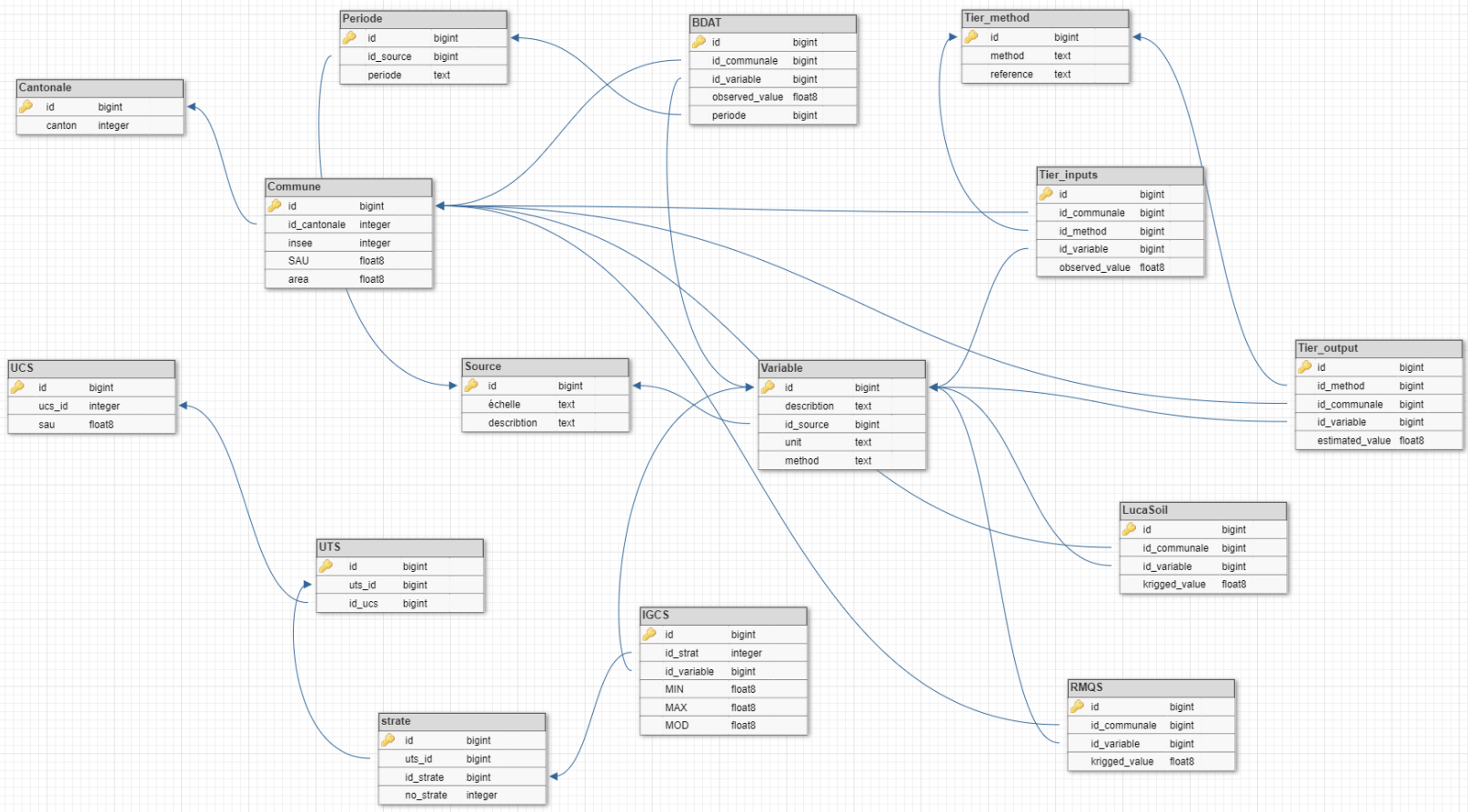
### Proposition de métadonnées en vue de l'interopérabilité/intégration OPTTEER

Métadonnées générales													
Variable	Base de Donnée source	Unité	Date de référence	Thème de référence	Organisme de référence	Localisation/couverture spatiale	Résolution	Format de distribution	Système de référence (projection)	Restrictions d'usage	Ressources en ligne	bref descriptif	Nom standard métadonnées (type ISO)
Métadonnées "qualité"													
Variable	Information sur les mises à jour	Complétude (% de zone géographique non couverte)	Précision thématique (ex: codes hors nomenclature, ...)	Méthode d'obtention	Evaluation								
					Méthode	résultats							

L'absence ou le caractère imprécis des métadonnées, notamment sur les aspects méthodologiques constitue une limite à la mise en œuvre de la qualification du niveau de confiance et de ce fait frein à la mise en œuvre d'approches intégrées.



dbdesigner.net



Version initiale



## Brève présentation de la société I@D Territoire digital

Depuis 2004, I@D Territoire Digital accompagne les collectivités, les associations et les structures privées dans leurs projets. La société intervient dans **trois domaines d'activités** :

### ÉTUDES de prospective scolaire



Études et diagnostics de territoires, analyse de la sectorisation scolaire

### OUTILS digitaux SaaS



Outils de prospective scolaire, observatoires territoriaux et cartographie dynamique

### WEB applications et sites



Création d'applications et sites responsive, gestionnaire de contenu Drupal et SPIP, framework Symfony

Forte expérience dans la réalisation de **diagnostics de territoires** (*cartographie et analyses thématiques*) et **d'études de prospective et de sectorisation scolaires** (identification des enjeux, proposition d'actions concrètes..).

Développement d'outils d'aide à la décision (*iStudy, iData et iTopo*) abordant plusieurs thématiques (*l'éducation, la démographie, l'énergie, l'emploi...*).

Compétences techniques **en gestion de bases de données** et **en développement web** permettant la conception d'applications robustes et évolutives.

### Quelques références (*iData et Web*)



- 1. Évaluation / spécification des besoins du partenaire** : quelle(s) information(s) veut-on diffuser ? Pour qui ? Dans quel(s) objectif(s) ? Sous quelle forme et à quelle maille territoriale (indicateurs géographiques, graphiques, tableaux, etc.) ? Sur la base de quelles données disponibles ?
- 2. Structuration de base de données qui alimentera l'outil et respectera ses contraintes de diffusion** : préparation des fichiers de métadonnées<sup>1</sup> et des fichiers de valeurs contenant des données brutes ou des données déjà exploitées (indicateurs). <sup>1</sup> Les métadonnées contiennent entre autre, les sources / fournisseurs, le conditions d'utilisation, le secret statistique par maille territoriale.
- 3. Intégration et configuration des indicateurs et données exploitables sous forme de cartes, graphiques statistiques, tableau ou fiche dans l'outil de diffusion**
- 4. Actualisation des données et des indicateurs** (selon la disponibilité et la mise à jour des données à intégrées).



Dans le cadre du projet NatAdGES, IAD Territoire Digital intervient principalement à la fin du projet. Son rôle est de récupérer, valoriser et intégrer dans l'outil de diffusion OPTEER les résultats des travaux de recherches menés jusqu'alors.

### Les tâches réalisées (2020 / 2021)

- Tests d'intégration de données brutes et libres sous OPTEER

### Les tâches à venir (2021 / 2022)

- 3 à 6 mois : Accompagnement INRAE à la mise en place d'une base de données exploitable par OPTEER respectant le secret statistique et toutes les contraintes de diffusion ;
  - Recensement des données « exploitables » sous OPTEER : extraction des données respectant le secret statistique.
  - Conceptualisation de la base de données « tampon » : quel modèle pour des données spatio-temporelles ? Quel support technique ? Quel service pour la diffusion ?
  - Peuplement de la base de données tampon en deux temps et phase de test :
    - Peuplement avec les données brutes respectant les contraintes de diffusions
    - Peuplement avec les indicateurs statistiques retenus

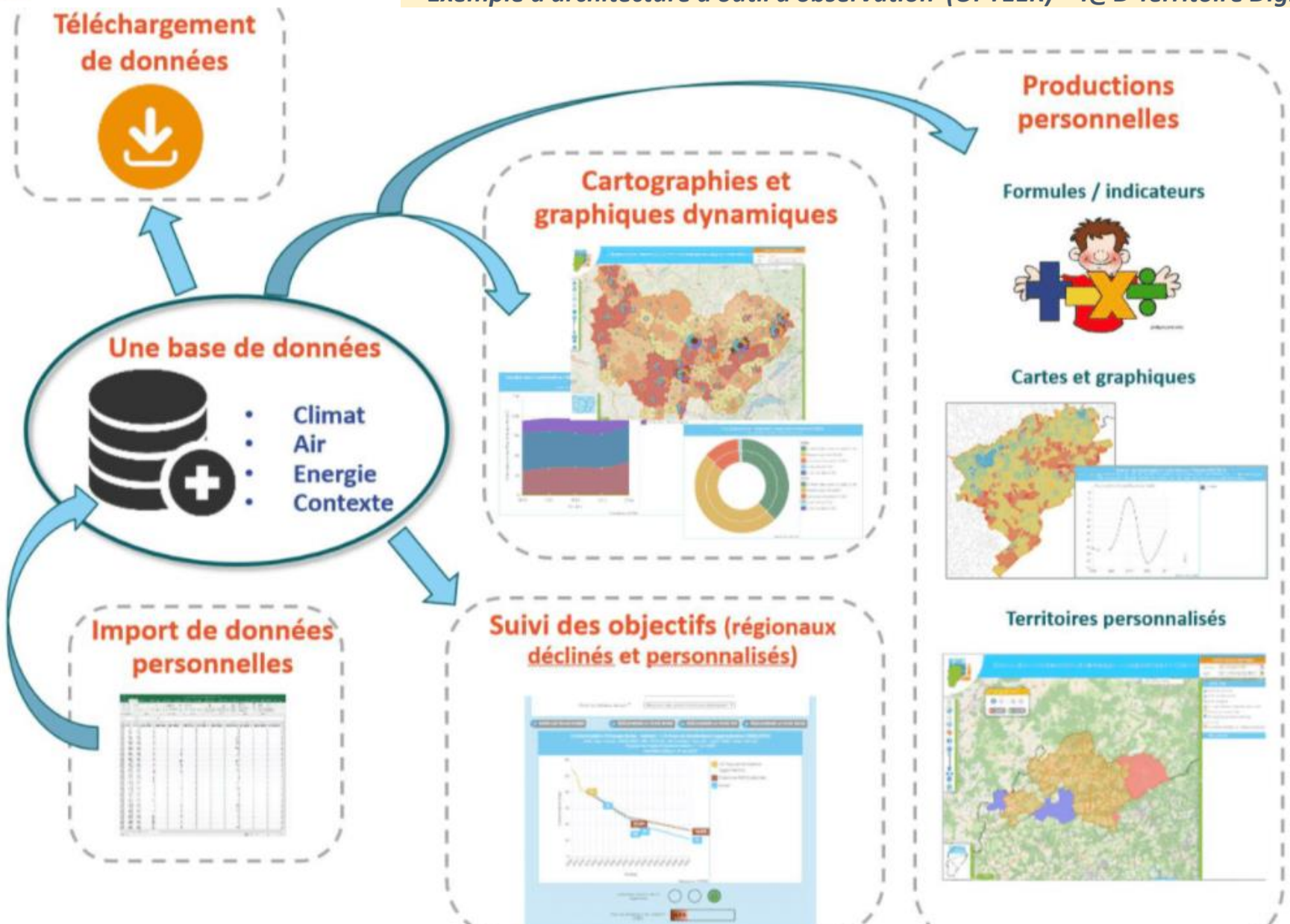


- *Au cours de l'année 2022*: Intégration des indicateurs retenus dans OPTEER sur la base des spécifications faites par Théma et INRAE (quels indicateurs, à quelle maille et selon quelles contraintes de diffusion ?).



# Bilan des réalisations: Intégration OPTEER

Exemple d'architecture d'outil d'observation (OPTEER) – I@D Territoire Digital





### Questionnements toujours d'actualité...

- Concernant les changements d'échelle, l'adaptation des modèles et le type de résultats à diffuser
- Concernant l'aide à la gouvernance: quels types d'indicateurs pour quelles cibles ?
- Concernant l'accessibilité des données et des résultats en garantissant confidentialité et qualité des données diffusées

Plus concrètement, développement avec I@D Territoire Digital afin de produire une « application prototype » autour de la transition en agriculture (prototypage donc solutions évolutives et pérennisation du dispositif)

Une nécessité: la veille et la prise en compte des évolutions en matière de scénarisation, d'incitations (le label bas carbone en agriculture, ...), de législation (décret trajectoire engrais azotés, loi climat et résilience, ... )



### 3 axes de travail durant la dernière année:

- Compléter les travaux sur la spatialisation des émissions et les évitements par l'exploitation de données complémentaires (RICA, Donesol, ...) et améliorer les approches typologiques sur les risques d'émission – partenaires du projet impliqués: INRAE, ThéMA, Atmo-BFC. 4<sup>ème</sup> trimestre 2021, 1<sup>er</sup> trimestre 2022
- Sur ces bases, proposer une série d'indicateurs à destination des acteurs (définitions, formes de diffusion, modes de dissémination, ... ). Possibilité de s'appuyer sur des groupes de travail dans le cadre du dispositif OPTTEER durant le premier semestre 2022 (enquête, interview, ateliers ?). Partenaires impliqués: INRAE, ThéMA, Atmo-BFC, I@D. 4<sup>ème</sup> trimestre 2021, 1<sup>er</sup>, 2<sup>ème</sup> trimestres 2022
- Implémentation des solutions et dissémination (WP3) des résultats via la plateforme OPTTEER (architectures de données, interopérabilité, peuplement des bases de données, ...). ThéMA, Atmo-BFC, I@D. 4<sup>ème</sup> trimestre 2021, 1<sup>er</sup>, 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> trimestres 2022

