

## Microbioterre : Intégrer des indicateurs de microbiologie dans l'analyse de terre pour améliorer la gestion des restitutions organiques dans les systèmes de grande culture et polyculture élevage

**Riah-Anglet Wassila<sup>1</sup>, Cusset Elodie<sup>1</sup>, Bennegadi-Laurent Nadia<sup>1</sup>, Barbot Christophe<sup>2</sup>, Bouthier Alain<sup>3</sup>, Deschamps Thibaud<sup>3</sup>, Houot Sabine<sup>4</sup>, Leclerc Blaise<sup>5</sup>, Perrin Anne-Sophie<sup>6</sup>, Recous Sylvie<sup>7</sup>, Roussel Pierre-Yves<sup>8</sup>, Trinsoutrot-Gattin Isabelle<sup>1</sup>, Tscheiller Romain<sup>3</sup>, Valé Matthieu<sup>9</sup>**

<sup>1</sup>UNILASALLE- Campus Rouen, <sup>2</sup>Chambre d'agriculture d'Alsace, <sup>3</sup>ARVALIS, <sup>4</sup>INRAE- UMR ECOSYS, <sup>5</sup>ITAB, <sup>6</sup>TERRES INOVIA, <sup>7</sup>INRAE - UMR FARE, <sup>8</sup>Chambre d'agriculture de Bretagne, <sup>9</sup>AUREA AgroSciences

### Pilote



### Partenaires financés



### Partenaires non financés



### Soutien



# Contexte du projet Microbioterre

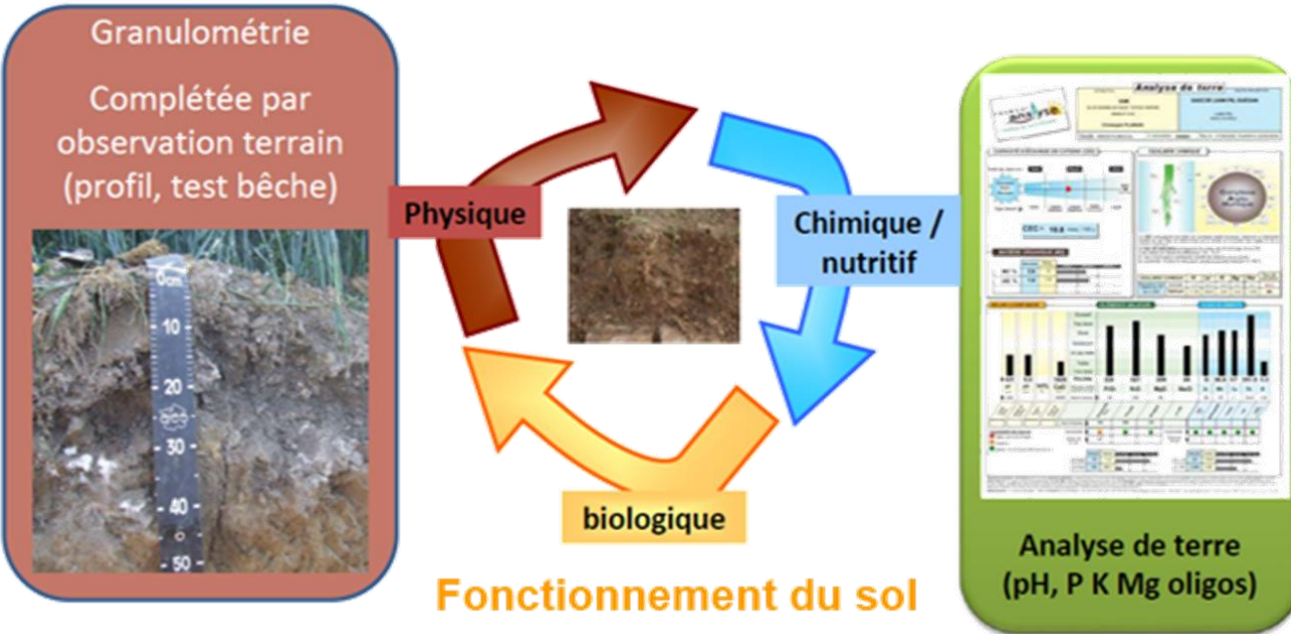
- ❖ Développer des pratiques favorables à un **fonctionnement biologique du sol** qui contribuent à un meilleur recyclage des nutriments, dont l'azote.
- ❖ **Réduction de la dépendance aux engrais minéraux** de synthèse des systèmes
- ❖ Volonté des agriculteurs de faire évoluer leurs systèmes de culture vers des **systèmes plus durables**



# Projet Microbioterre

## Contexte

## Objectif



Référencer des **indicateurs de microbiologie des sols** en vue de les intégrer dans l'**analyse de terre de routine**, et **améliorer la gestion des restitutions organiques** dans les systèmes de grande culture et polyculture élevage

Un besoin de référencement d'indicateurs du fonctionnement des sols (Cycles C & N)



# Microbioterre : *De l'indicateur au conseil agronomique*

- **Stratégie méthodologique**
  - Dispositifs expérimentaux & pratiques culturales
  - Indicateurs physico-chimiques & biologiques mesurés
- **Sélection des indicateurs de l'outil Microbioterre**
  - Critères de choix des indicateurs du menu analytique
    - ✓ Liens indicateurs – pratiques culturales
    - ✓ Liens indicateurs – 3 fonctions du sol (16 sous-fonctions)
- **L'outil Microbioterre**
  - Construction du référentiel d'interprétation
  - Déploiement du menu & diagnostic
  - Proposition de leviers agronomiques
- **Conclusions & perspectives du projet**

# Microbioterre : *De l'indicateur au conseil agronomique*

- **Stratégie méthodologique**
  - Dispositifs expérimentaux & pratiques culturales
  - Indicateurs physico-chimiques & biologiques mesurés
- Sélection des indicateurs de l'outil Microbioterre
  - Critères de choix des indicateurs du menu analytique
    - ✓ Liens indicateurs – pratiques culturales
    - ✓ Liens indicateurs – 3 fonctions du sol (16 sous-fonctions)
- L'outil Microbioterre
  - Construction du référentiel d'interprétation
  - Déploiement du menu & diagnostic
  - Proposition de leviers agronomiques
- Conclusions & perspectives du projet

# Sites expérimentaux et pratiques culturelles

Prélèvement des  
différents sites aux  
**printemps 2017 &  
2018**

**Cahier des charges :** Essais  $\geq 5$  ans

- **18 sites** (20 essais)
- 61 modalités agronomiques
- Profondeur de prélèvement

0 – 20 cm

**Pratiques culturelles :**

5 pratiques culturelles :

**Durée de la rotation**

Rotation longue vs. Rotation courte (ref.)

**Travail du sol**

Travail superficiel ou SD vs. Labour (ref.)

**Couverts Intermédiaires**

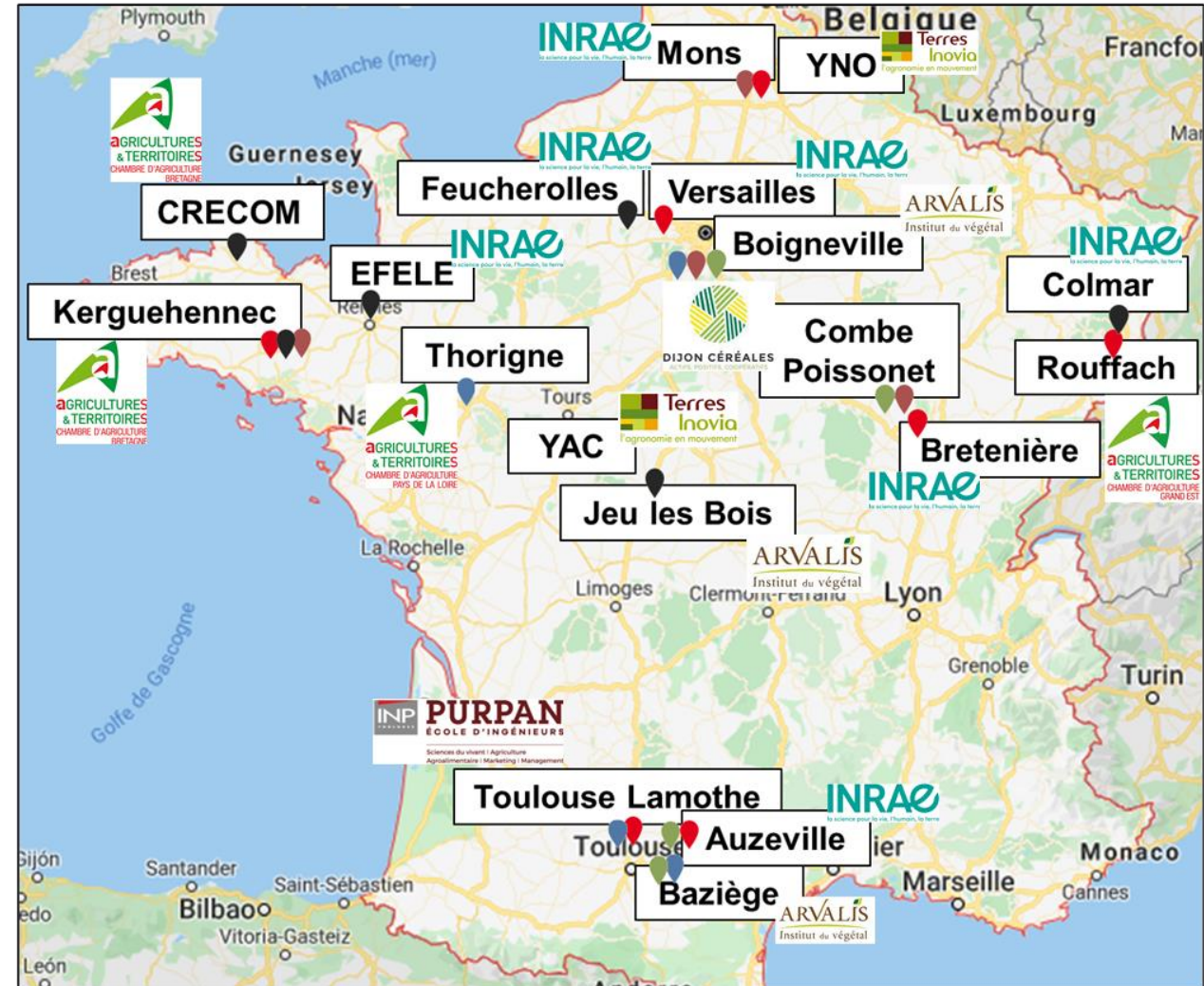
Avec vs. sans couverts (ref.)

**Produits résiduels organiques**

Avec vs. sans apport PRO (ref.)

**Systèmes de culture**

Syst. Innovant ou bio. vs. Syst. conventionnel (ref.)



# Indicateurs physico-chimiques mesurés

| Variable                      |                                           | Description de la variable                    | Méthode de mesure ou de calcul                                    | Laboratoire |
|-------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------|
| Carbone C<br>(10 indicateurs) | Carbone Organique                         | C org. total                                  | Oxydation sulfochromique + spectrophotométrie (NF ISO 14235)      | AUREA       |
|                               | Carbone Organique Rock-Eval               |                                               | Analyseur thermique Rock-Eval 6 (Vinci Technologies)              | IRSTEA      |
|                               | C fraction 50-200 µm                      | C org. labile                                 | Fractionnement granulométrique : tamisage sous eau (NF X31-516)   | AUREA       |
|                               | C fraction 200-2000 µm                    |                                               |                                                                   |             |
|                               | C fraction 50-2000 µm                     |                                               | Modèle Soucémariadin <i>et al.</i> (en préparation) (Rock-Eval 6) | IRSTEA      |
|                               | Concentration de carbone labile à 20 ans  |                                               |                                                                   |             |
|                               | Carbone actif Rock-Eval *                 |                                               | C org. - C stable 100 ans (Rock-Eval)                             | SEMSE       |
|                               | Carbone oxydé                             |                                               | Oxydation par KMnO4 + spectrophotométrie                          | SEMSE       |
|                               | C fraction 0-50 µm                        | C org. stable                                 | Fractionnement granulométrique : tamisage sous eau (NF X31-516)   | AUREA       |
|                               | Concentration de carbone stable à 100 ans |                                               | Modèle Soucémariadin <i>et al.</i> (en préparation) (Rock-Eval 6) | IRSTEA      |
| Azote N<br>(5 indicateurs)    | Azote Dumas                               | N total                                       | Méthode Dumas (NF ISO 13878)                                      | AUREA       |
|                               | N fraction 50-200 µm                      | N fraction labile                             | Fractionnement granulométrique : tamisage sous eau (NF X31-516)   | AUREA       |
|                               | N fraction 200-2000 µm                    |                                               |                                                                   |             |
|                               | N fraction 50 2000 µm                     |                                               |                                                                   |             |
|                               | N fraction 0-50 µm                        | N fraction stable                             | Fractionnement granulométrique : tamisage sous eau (NF X31-516)   | AUREA       |
| C / N                         | C/N                                       | Rapports Carbone / Azote<br>Total & fractions |                                                                   | AUREA       |
|                               | C/N fraction 0-50 µm                      |                                               |                                                                   |             |
|                               | C/N fraction 50-200 µm                    |                                               |                                                                   |             |
|                               | C/N fraction 200-2000 µm                  |                                               |                                                                   |             |
|                               | C/N fraction 50-2000 µm                   |                                               |                                                                   |             |

Caractérisation physico-chimique du sol & humidité

Observations terrain au moment du prélèvement

Niveau de compaction du sol : Test bêche

Variable calculée \*



Fractions labiles de la MO



Fractions stables de la MO

# Indicateurs microbiologiques mesurés

|                         | Variable                                      | Description de la variable               | Indicateur étudié                                                                    | Laboratoire         |
|-------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| Abondances microbiennes | ADN total                                     | Microorganismes totaux                   | Biomasse moléculaire totale                                                          | UniLaSalle          |
|                         | Biomasse microbienne (TOC)                    |                                          | C Org. total des micro-organismes (NF ISO 14240-2)                                   | AUREA               |
|                         | Biomasse bactérienne 16S                      | Bactéries totales                        | ADN r spécifiques des bactéries                                                      | RITTMO / UniLaSalle |
|                         | Biomasse fongique 18S                         | Champignons totaux                       | ADN r spécifiques des champignons                                                    | RITTMO / UniLaSalle |
|                         | Ergostérols total (MAE) & libre (GONG)        |                                          | Biomasse fongique totale & morte                                                     | UniLaSalle          |
| Activités microbiennes  | Hydrolyse de la Fluoresceine di-acétate (FDA) | Activité enzymatique globale             | Hydrolyse FDA (substrat universel)                                                   | SEMSE               |
|                         | Activité $\beta$ -glucosidase (Glu)           | Activités enzymatiques<br><i>Cycle C</i> | Hydrolyse de liaisons osidiques (ISO 20130:2018)                                     | UniLaSalle          |
|                         | C minéralisé moyen                            | Potentiel de minéralisation C            | Potentiel de minéralisation C (NF EN ISO 16072)                                      | CELESTA LAB         |
|                         | Activité protéase                             | Activités enzymatiques<br><i>Cycle N</i> | Dégradation de protéines et petpides<br><br>AryIN (ISO 20130:2018)                   | Université Lorraine |
|                         | Activité leucine aminopeptidase (LAP)         |                                          |                                                                                      | Université Lorraine |
|                         | Activité arylamidase (aryIN)                  |                                          |                                                                                      | RITTMO / UniLaSalle |
|                         | Azote Potentiellement Minéralisable           | Potentiel de minéralisation N            | Double distillation (tampon phosphate borate et KCl)<br>(Giannello et Bremner, 1986) | AUREA               |
|                         | Azote Biologiquement Minéralisable            |                                          | Incubation anaérobie 7 jours, 40 °C                                                  | AUREA               |
|                         | N minéralisé moyen                            |                                          | Potentiel de minéralisation N (XP U44-163 et NF ISO 14238)                           | CELESTA LAB         |

# Microbioterre : *De l'indicateur au conseil agronomique*

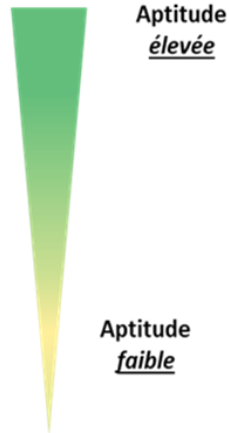
- Stratégie méthodologique
  - Dispositifs expérimentaux & pratiques culturales
  - Indicateurs physico-chimiques & biologiques mesurés
- **Sélection des indicateurs de l'outil Microbioterre**
  - **Critères de choix des indicateurs du menu analytique**
    - ✓ Liens indicateurs – pratiques culturales
    - ✓ Liens indicateurs – 3 fonctions du sol (16 sous-fonctions)
- L'outil Microbioterre
  - Construction du référentiel d'interprétation
  - Déploiement du menu & diagnostic
  - Proposition de leviers agronomiques
- Conclusions & perspectives du projet

# Réponse des variables aux pratiques culturales

## Aptitude des indicateurs à discriminer les modalités agronomiques

 2 indicateurs de « référence » mesurés en routine (Benintende *et al.*, 2014)

Aptitude à discriminer les pratiques



| Variables                   |                                | PRO<br>13 comp. | Couverts<br>intermédiaires<br>10 comp. | Travail du sol<br>11 comp. | Rotations<br>5 comp. | Systèmes<br>de culture<br>7 comp. | Toutes<br>pratiques |
|-----------------------------|--------------------------------|-----------------|----------------------------------------|----------------------------|----------------------|-----------------------------------|---------------------|
| Variables physico-chimiques | C org (%)                      |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |
|                             | C org Rock-Eval (g/kg)         |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |
|                             | C stable 100 ans (g/kg)        |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |
|                             | C 0-50 (%)                     |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |
|                             | C 50-200 (%)                   |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |
|                             | C 200-2000 (%)                 |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |
|                             | C 50-2000 (%)                  |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |
|                             | Carbone actif (g/kg)           |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |
|                             | C oxydé (mg/kg)                |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |
|                             | C labile 20 ans (g/kg)         |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |
|                             | N total (%)                    |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |
|                             | N 0-50 (%)                     |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |
|                             | N 50-200 (%)                   |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |
|                             | N 200-2000 (%)                 |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |
|                             | N 50-2000 (%)                  |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |
| Variables biologiques       | ADN total (µg/g)               |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |
|                             | Biomasse microbienne (mg/kg)   |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |
|                             | 16S (copies/g)                 |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |
|                             | 18S (copies/g)                 |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |
|                             | Ergostérol total (mg/kg)       |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |
|                             | Ergostérol libre (mg/kg)       |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |
|                             | Ergostérol lié (mg/kg)         |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |
|                             | 18S/16S                        |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |
|                             | FDA (nmol/min/g)               |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |
|                             | Activité protéase (nmol/min/g) |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |
|                             | LAP (nmol/min/g)               |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |
|                             | Arylamidase (nmol/min/g)       |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |
|                             | N minéralisé (mg/kg 28 j)      |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |
|                             | APM (mg/kg)                    |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |
|                             | ABM (mg/kg)                    |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |
|                             | Glucosidase (nmol/min/g)       |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |
|                             | C minéralisé (mg/kg 28j)       |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |

# Réponse des variables aux pratiques culturales

## Aptitude des indicateurs à discriminer les modalités agronomiques

 2 indicateurs de « référence » mesurés en routine (Benintende *et al.*, 2014)

 Variables retenues comme indicateurs menu Microbioterre selon leur aptitude discriminante toutes pratiques confondues

Aptitude à discriminer les pratiques



10  
indicateurs  
retenus

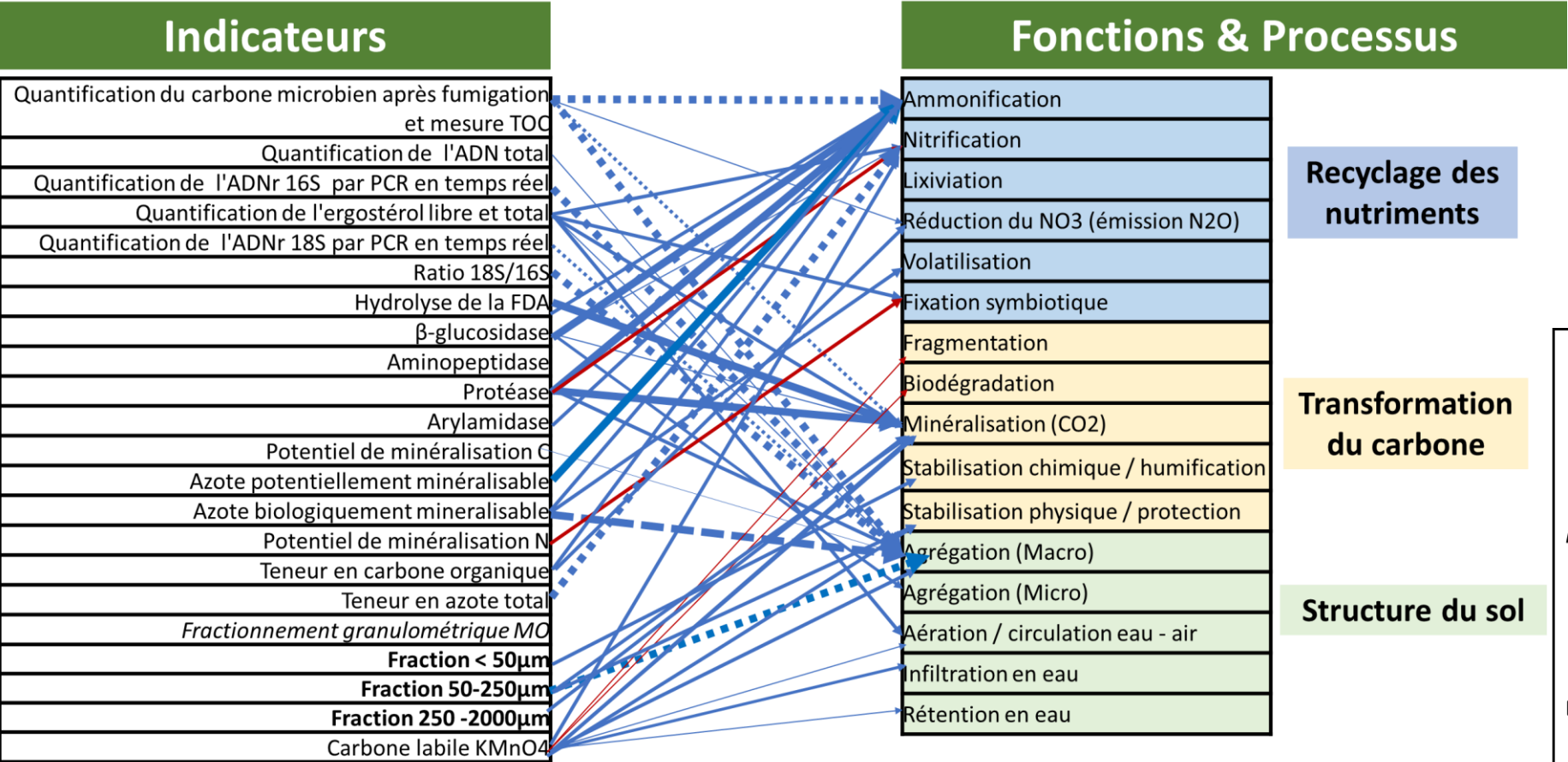
7  
indicateurs  
retenus

|                             | Variables                      | PRO<br>13 comp. | Couverts<br>intermédiaires<br>10 comp. | Travail du sol<br>11 comp. | Rotations<br>5 comp. | Systèmes<br>de culture<br>7 comp. | Toutes<br>pratiques |
|-----------------------------|--------------------------------|-----------------|----------------------------------------|----------------------------|----------------------|-----------------------------------|---------------------|
| Variables physico-chimiques | C org (%)                      |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |
|                             | C org Rock-Eval (g/kg)         |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |
|                             | C stable 100 ans (g/kg)        |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |
|                             | C 0-50 (%)                     |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |
|                             | C 50-200 (%)                   |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |
|                             | C 200-2000 (%)                 |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |
|                             | C 50-2000 (%)                  |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |
|                             | Carbone actif (g/kg)           |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |
|                             | C oxydé (mg/kg)                |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |
|                             | C labile 20 ans (g/kg)         |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |
|                             | N total (%)                    |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |
|                             | N 0-50 (%)                     |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |
|                             | N 50-200 (%)                   |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |
|                             | N 200-2000 (%)                 |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |
|                             | N 50-2000 (%)                  |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |
| Variables biologiques       | ADN total (µg/g)               |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |
|                             | Biomasse microbienne (mg/kg)   |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |
|                             | 16S (copies/g)                 |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |
|                             | 18S (copies/g)                 |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |
|                             | Ergostérol total (mg/kg)       |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |
|                             | Ergostérol libre (mg/kg)       |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |
|                             | Ergostérol lié (mg/kg)         |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |
|                             | 18S/16S                        |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |
|                             | FDA (nmol/min/g)               |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |
|                             | Activité protéase (nmol/min/g) |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |
|                             | LAP (nmol/min/g)               |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |
|                             | Arylamidase (nmol/min/g)       |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |
|                             | N minéralisé (mg/kg 28 j)      |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |
|                             | APM (mg/kg)                    |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |
|                             | ABM (mg/kg)                    |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |
|                             | Glucosidase (nmol/min/g)       |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |
|                             | C minéralisé (mg/kg 28j)       |                 |                                        |                            |                      |                                   |                     |

# Aptitude des indicateurs à renseigner les niveaux de fonctions

Etude bibliographique (80 articles)  
Et à dire d'experts

Partenaires  
Microbioterre



**Relations positives I/F**

- Relation positive faible entre I/F ( $r < 0.4$ )
- Relation positive moyenne entre I/F ( $0.4 < r < 0.8$ )
- Relation positive forte entre I/F ( $r > 0.8$ )

**Relations négatives I/F**

- Relation négative faible entre I/F ( $r < 0.4$ )
- Relation négative moyenne entre I/F ( $0.4 < r < 0.8$ )
- Relation négative forte entre I/F ( $r > 0.8$ )

Flèches pleines : Absence d'équation reliant I/F  
Flèches en discontinu : Equation reliant I/F

# Aptitude des indicateurs à renseigner les niveaux de fonctions

Etude bibliographique (80 articles) & à dire d'experts

| Indicateurs du menu   | Recyclage des nutriments |               |                      |                  |                | Transformation du carbone |                |                      |                        |                        | Structure du sol   |                    |                                |                     |                  |
|-----------------------|--------------------------|---------------|----------------------|------------------|----------------|---------------------------|----------------|----------------------|------------------------|------------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------|---------------------|------------------|
|                       | Fourniture N             |               |                      | Perte N          |                | Transformation MO         |                | Perte MO             | Augmentation MO        |                        | Erosion Battance   |                    | Porosité                       |                     | Stockage eau     |
|                       | Ammonification           | Nitrification | Fixation symbiotique | Réduction du NO3 | Volatilisation | Fragmentation             | Biodégradation | Minéralisation (CO2) | Stabilisation chimique | Stabilisation physique | Agrégation (Macro) | Agrégation (Micro) | Aération/Circulation eau - air | Infiltration en eau | Rétention en eau |
| C org (%)             | +                        | +             |                      | +                |                |                           |                | +                    | +                      | +                      | +                  | +                  | +                              | +                   | +                |
| C 0-50 µm (%)         |                          |               |                      |                  |                |                           |                |                      | +                      |                        |                    |                    |                                |                     |                  |
| C 50-200 µm (%)       |                          |               |                      |                  |                |                           |                | +                    |                        | +                      | +                  |                    |                                |                     |                  |
| C 200-2000 µm (%)     |                          |               |                      |                  |                |                           |                | +                    |                        | +                      |                    |                    |                                |                     |                  |
| C 50-2000 µm (%)      |                          |               |                      |                  |                |                           |                |                      |                        |                        |                    |                    |                                |                     |                  |
| C KMnO4 (mg/kg)       |                          |               |                      | +                |                | -                         | -              | +                    |                        |                        | +                  |                    | +                              | +                   | +                |
| N total (%)           | +                        | +             | -                    |                  |                |                           |                |                      |                        |                        |                    |                    |                                |                     |                  |
| N 0-50 µm (%)         |                          |               |                      |                  |                |                           |                |                      |                        |                        |                    |                    |                                |                     |                  |
| N 50-200 µm (%)       | +                        | +             |                      |                  |                |                           |                |                      |                        |                        |                    |                    |                                |                     |                  |
| N 50-2000 µm (%)      |                          |               |                      |                  |                |                           |                |                      |                        |                        |                    |                    |                                |                     |                  |
| C microbien (mg/kg)   | +                        |               |                      | +                |                |                           |                | +                    |                        |                        | +                  |                    |                                |                     |                  |
| 18S (copies/g)        |                          |               |                      |                  |                |                           |                |                      |                        |                        | +                  |                    |                                |                     |                  |
| Protéase (nmol/min/g) | +                        | -             |                      |                  |                |                           |                | +                    |                        |                        | +                  |                    |                                |                     |                  |
| LAP (nmol/min/g)      |                          |               |                      |                  |                |                           |                |                      |                        |                        |                    |                    |                                |                     |                  |
| ARYLN (nmol/min/g)    | +                        |               |                      |                  |                |                           |                |                      |                        |                        |                    |                    |                                |                     |                  |
| ABM (mg/kg)           | +                        |               |                      |                  | +              |                           |                |                      |                        |                        | +                  |                    |                                |                     |                  |
| B-Glu (nmol/min/g)    | +                        | +             |                      |                  |                |                           |                | +                    |                        |                        |                    | +                  |                                |                     |                  |

| Lien Indicateur / Fonction               |                   |                   |
|------------------------------------------|-------------------|-------------------|
|                                          | Relation positive | Relation négative |
| Relation forte<br>$r > 0,8$              | +                 | -                 |
| Relation moyenne<br>$r$ entre 0,4 et 0,8 | +                 | -                 |
| Relation faible<br>$r < 0,4$             | +                 | -                 |
| Avis d'experts                           | +                 | -                 |
| Lien <u>non identifié</u>                |                   |                   |

- Globalement, chaque **indicateur** retenu nous renseigne sur **au moins une fonction du sol**
- Résultats valorisés dans le **diagnostic Microbioterre**

# Microbioterre : *De l'indicateur au conseil agronomique*

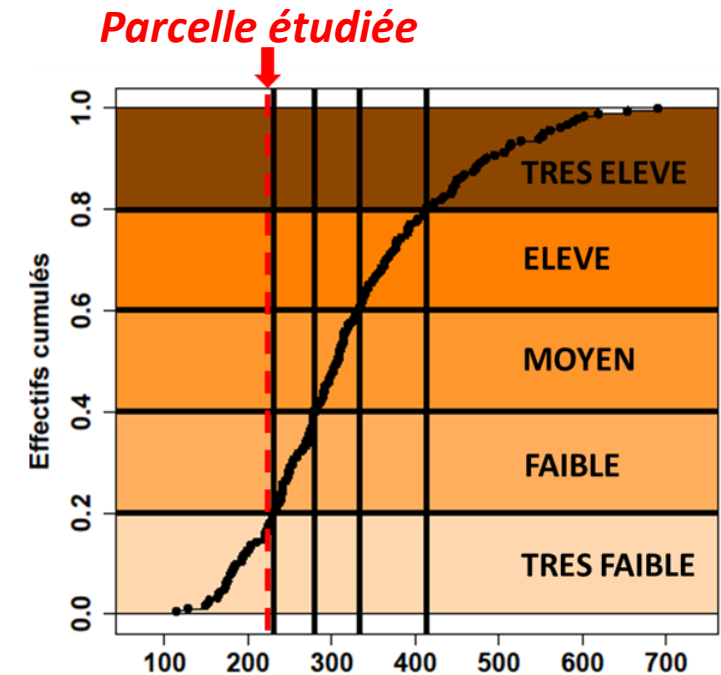
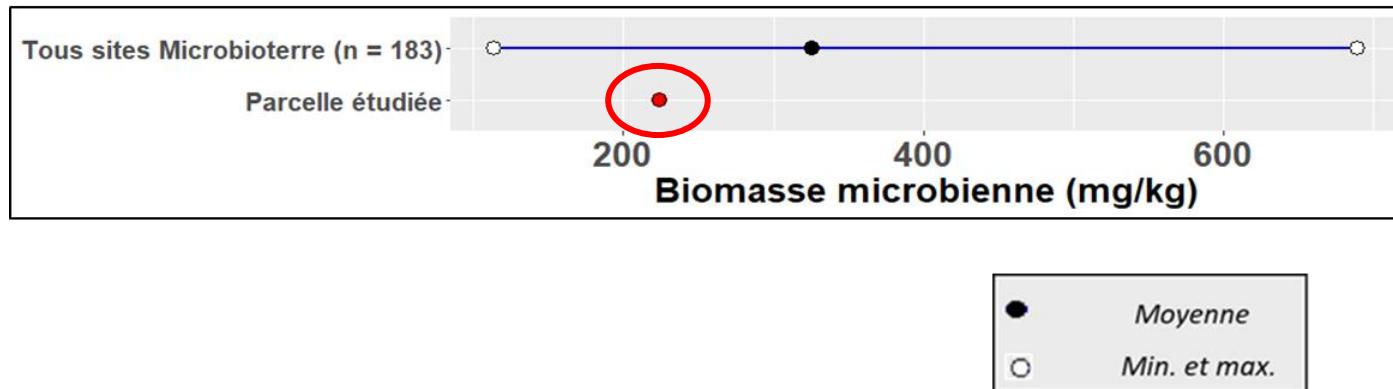
- Stratégie méthodologique
  - Dispositifs expérimentaux & pratiques culturales
  - Indicateurs physico-chimiques & biologiques mesurés
- Sélection des indicateurs de l'outil Microbioterre
  - Critères de choix des indicateurs du menu analytique
    - ✓ Liens indicateurs – pratiques culturales
    - ✓ Liens indicateurs – 3 fonctions du sol (16 sous-fonctions)
- **L'outil Microbioterre**
  - **Construction du référentiel d'interprétation**
  - **Déploiement du menu & diagnostic**
  - **Proposition de leviers agronomiques**
- Conclusions & perspectives du projet

# Construction du référentiel global

**1<sup>er</sup> niveau d'interprétation** : Valeur comprise dans le référentiel MicrobioTerre ?

**2<sup>ème</sup> niveau d'interprétation** : Niveau de l'indicateur ?

Exemple d'un indicateur  $\mu$ biologique :  
**Biomasse microbienne**



à partir des travaux de l'Université Cornell (2017)

→ **Valeur de biomasse microbienne comprise** dans référentiel Microbioterre

→ **Valeur très faible** de l'indicateur

# Cas d'étude d'un diagnostic : *ITK et texture du sol*

Exemple d'une modalité d'un essai  
Site KERGUEHENNEC

Données agronomiques  
Année de prélèvement : 2018

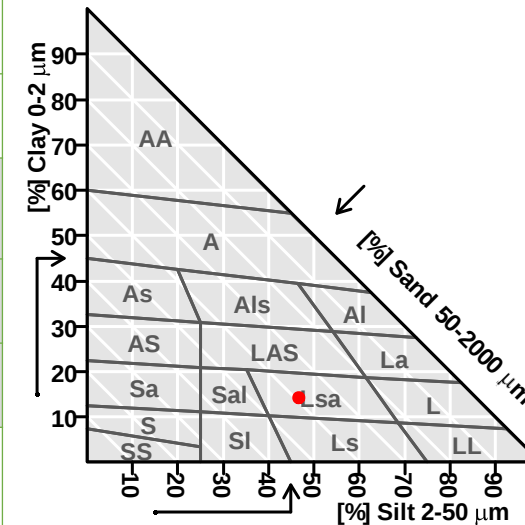
**Pratiques étudiées :**

- PRO
- Travail du sol

## Modalité TCS & Fumier de volaille

|                                            | Rotation                                    | Maïs / Blé / Colza / Blé / Couverts (Phacélie)      |
|--------------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| <b>Cultures principales</b>                | Rendement par culture (15 dernières années) | Maïs : 9,3 t/ha<br>Blé : 7,7 t/ha<br>Colza : 3 t/ha |
|                                            | Devenir des résidus                         | Pailles broyées                                     |
| <b>Travail du sol</b>                      | Types de travail du sol & d'outil           | Déchaumage (Canadien)                               |
|                                            | Profondeur                                  | 10 cm                                               |
|                                            | Nombre moyen de passages                    | 2                                                   |
| <b>Couverts intermédiaires</b>             | Composition                                 | Repousses (Colza, céréales); Phacélie               |
|                                            | Biomasse moyenne                            | Faible à moyenne                                    |
| <b>Produits résiduels organiques (PRO)</b> | Type de PRO                                 | Fumier volaille                                     |
|                                            | Fréquence & quantité d'apport               | Tous les ans (8,5 t/ha/an MB)                       |
|                                            | AMG 30 ans : Δ C sur 30 ans – 30 cm         | + 23 % (en % du stock initial)                      |

**Limon  
sablo-argileux**



# Cas d'étude d'un diagnostic : *Indicateurs analysés*

Exemple d'une modalité d'un essai  
Site KERGUEHENNEC  
Modalité TCS Fumier de volaille

Relations entre les indicateurs mesurés et les **fonctions du sol**

| Indicateurs           | Valeurs indicateurs | Niveaux indicateurs<br>Référétiel global<br>(n=209 obs.) | Recyclage des nutriments |               |                      |                  |                | Transformation du carbone |                |                      |                        |                        | Structure du sol   |                    |                                |                     |                  |
|-----------------------|---------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------|---------------|----------------------|------------------|----------------|---------------------------|----------------|----------------------|------------------------|------------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------|---------------------|------------------|
|                       |                     |                                                          | Fourniture N             |               |                      | Perte N          |                | Transformation MO         |                | Perte MO             | Augmentation MO        |                        | Erosion Battance   |                    | Porosité                       |                     | Stockage eau     |
|                       |                     |                                                          | Ammonification           | Nitrification | Fixation symbiotique | Réduction du NO3 | Volatilisation | Fragmentation             | Biodégradation | Minéralisation (CO2) | Stabilisation chimique | Stabilisation physique | Agrégation (Macro) | Agrégation (Micro) | Aération/Circulation eau - air | Infiltration en eau | Rétention en eau |
| C org (%)             | 2,2                 | Très élevé                                               | +                        | +             |                      | +                |                |                           |                | +                    | +                      | +                      | +                  | +                  | +                              | +                   | +                |
| C 0-50 µm (%)         | 83,6                | Faible                                                   |                          |               |                      |                  |                |                           |                |                      | +                      |                        |                    |                    |                                |                     |                  |
| C 50-200 µm (%)       | 10,5                | Très élevé                                               |                          |               |                      |                  |                |                           |                | +                    |                        | +                      | +                  |                    |                                |                     |                  |
| C 200-2000 µm (%)     | 5,9                 | Elevé                                                    |                          |               |                      |                  |                |                           |                | +                    |                        | +                      |                    |                    |                                |                     |                  |
| C 50-2000 µm (%)      | 16,4                | Elevé                                                    |                          |               |                      |                  |                |                           |                | +                    |                        | +                      |                    |                    |                                |                     |                  |
| C KMnO4 (mg/kg)       | 1110,0              | Très élevé                                               |                          |               |                      | +                |                | -                         | -              | +                    |                        |                        | +                  |                    | +                              | +                   | +                |
| N total (%)           | 0,22                | Très élevé                                               | +                        | +             | -                    |                  |                |                           |                |                      |                        |                        |                    |                    |                                |                     |                  |
| N 0-50 µm (%)         | 85,9                | Très faible                                              |                          |               |                      |                  |                |                           |                |                      |                        |                        |                    |                    |                                |                     |                  |
| N 50-200 µm (%)       | 9,1                 | Très élevé                                               | +                        | +             |                      |                  |                |                           |                |                      |                        |                        |                    |                    |                                |                     |                  |
| N 50-2000 µm (%)      | 14,1                | Très élevé                                               |                          |               |                      |                  |                |                           |                |                      |                        |                        |                    |                    |                                |                     |                  |
| C microbien (mg/kg)   | 449,9               | Très élevé                                               | +                        |               |                      | +                |                |                           |                | +                    |                        |                        | +                  |                    |                                |                     |                  |
| 18S (copies/g)        | 3,8E+12             | Très élevé                                               |                          |               |                      |                  |                |                           |                |                      |                        |                        | +                  |                    |                                |                     |                  |
| Protéase (nmol/min/g) | 10,6                | Très élevé                                               | +                        | -             |                      |                  |                |                           |                | +                    |                        |                        | +                  |                    |                                |                     |                  |
| LAP (nmol/min/g)      | 10,0                | Moyen                                                    |                          |               |                      |                  |                |                           |                |                      |                        |                        |                    |                    |                                |                     |                  |
| ARYLN (nmol/min/g)    | 4,7                 | Moyen                                                    | +                        |               |                      |                  |                |                           |                |                      |                        |                        |                    |                    |                                |                     |                  |
| ABM (mg/kg)           | 26,7                | Elevé                                                    | +                        |               |                      |                  | +              |                           |                |                      |                        |                        | +                  |                    |                                |                     |                  |
| B-Glu (nmol/min/g)    | 30,3                | Très élevé                                               | +                        | +             |                      |                  |                |                           |                | +                    |                        |                        |                    | +                  |                                |                     |                  |

Liens Indicateurs – Fonctions \*

Relation positive  
Relation négative

\* : Résultats issus de la revue bibliographique (80 articles) – Partenaires Microbioterre

# Cas d'étude d'un diagnostic : *Indicateurs analysés*

Exemple d'une modalité d'un essai  
Site KERGUEHENNEC  
Modalité TCS Fumier de volaille

- L'ensemble des fonctions de recyclage des nutriments, transformation du carbone et structure du sol sont activées
- Point d'attention : fournitures N élevées → perte potentielle N par lixiviation

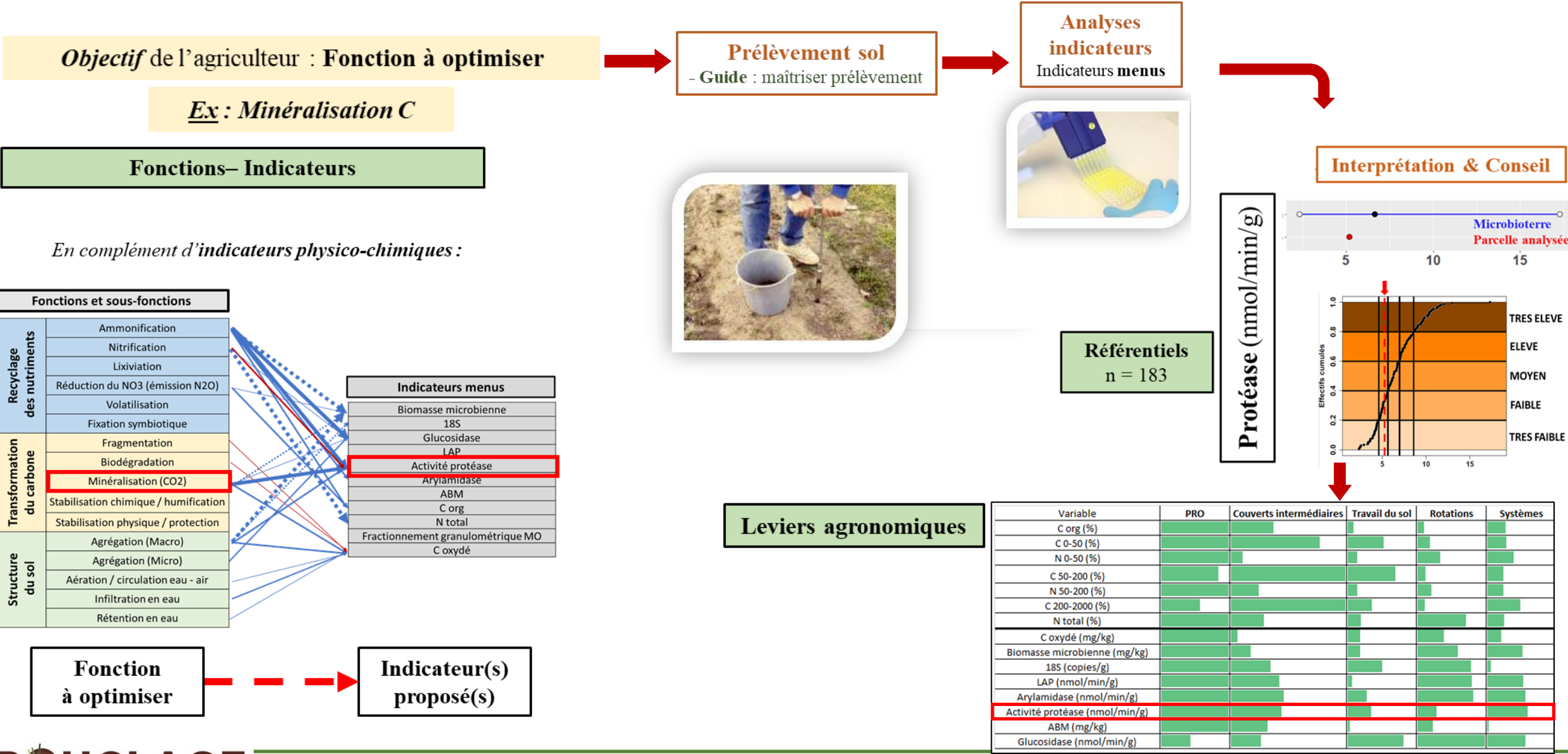
## Plan d'action selon les objectifs de l'agriculteur

Option: remplacer apports fumier par couverts végétaux ?

- Couvert court entre blé et colza,
- Viser davantage de biomasse en interculture longue ou double couvert.

|                                                                 | Année récolte                                                             | n-3               | n-2              | n-1                   | n                  | Objectifs exploitant                                                                                                                                  |
|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|-------------------|------------------|-----------------------|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                 | Culture                                                                   | Mais grain        | Blé tendre hiver | Colza hiver           | Blé tendre hiver   | • Maintien de la rotation, rendements moyens sur colza (semis plus précoce à prévoir)                                                                 |
| Travail du sol à l'interculture (de la récolte au semis inclus) | Type de travail du sol le plus profond                                    | Déchaumage        | Déchaumage       | Déchaumage            | Déchaumage         | • Maintien en non labour. Limitation du nb de passages de travail du sol.                                                                             |
|                                                                 | Profondeur travail le plus profond (cm)                                   | 12                | 10               | 10                    | 10                 |                                                                                                                                                       |
|                                                                 | Type d'outil                                                              | Canadien          | Canadien         | Canadien              | Canadien           |                                                                                                                                                       |
|                                                                 | Nb de passages de travail du sol entre récolte précédent et semis compris | 3                 | 2                | 2                     | 2                  |                                                                                                                                                       |
| Travail du sol après semis                                      | Type                                                                      | aucun             | aucun            | aucun                 | aucun              | • Introduction du désherbage mécanique sur maïs ?                                                                                                     |
|                                                                 | Nombre de passages                                                        |                   |                  |                       |                    |                                                                                                                                                       |
| Culture principale                                              | Type d'organe récolté                                                     | Grain             | Grain            | Grain                 | Grain              | • Exportation/valorisation extérieure des pailles ?                                                                                                   |
|                                                                 | Rendement récolte (t/ha ou t MS/ha) aux normes                            | 12.3              | 7.5              | 2.4                   | 8.9                |                                                                                                                                                       |
|                                                                 | Devenir des résidus                                                       | Cannes broyées    | Paille broyée    | Paille broyée         | Paille broyée      |                                                                                                                                                       |
| CIPAN, CIVE, culture dérobée et repousses                       | Composition                                                               | Phacélie          | Non concerné     | Repousses de céréales | Repousses de colza | • Tester l'introduction de couverts courts<br><br>• Augmenter la biomasse du couvert entre blé et maïs en semant plus tôt.<br><br>•                   |
|                                                                 | Estimation de la biomasse                                                 | Moyenne (2Tms/ha) |                  | Faible (<1Tms/ha)     | Faible (1.5Tms/ha) |                                                                                                                                                       |
|                                                                 | Date de levée                                                             | 1/9               |                  | 5/8                   | 5/8                |                                                                                                                                                       |
|                                                                 | Date destruction                                                          | 1/3               |                  | 4/9                   | 01/10              |                                                                                                                                                       |
|                                                                 | Mode de destruction                                                       | Chimique          |                  | Chimique              | Chimique           |                                                                                                                                                       |
|                                                                 | Devenir de la biomasse                                                    | Restituée         |                  | Restituée             | Restituée          |                                                                                                                                                       |
|                                                                 | Mode incorporation dans le sol                                            | Canadien          |                  | Canadien              | Canadien           |                                                                                                                                                       |
| Couvert associé à la culture                                    | Couvert ou culture                                                        | Aucun             | Aucun            | Aucun                 | Aucun              |                                                                                                                                                       |
| Produits résiduels organiques (PRO) : produit 1                 | Type de PRO                                                               | Fumier volaille   | Fumier volaille  | Fumier volaille       | Fumier volaille    | • Manque de disponibilité du fumier de volaille à moyen terme.<br><br>• Echange paille/fumier à renégocier.                                           |
|                                                                 | Quantité apportée (t/ha de matière brute, MB)                             | 9,0               | 9,0              | 6,0                   | 8,5                |                                                                                                                                                       |
|                                                                 | % matière sèche (M.S.)                                                    | 52,2              | 50,6             | 44,4                  | 79,7               |                                                                                                                                                       |
|                                                                 | C total ( % MB)                                                           | 336               | 392              | 140                   | 305                |                                                                                                                                                       |
|                                                                 | N total (% MB)                                                            | 23,9              | 21,5             | 21,0                  | 22,8               |                                                                                                                                                       |
|                                                                 | C/N                                                                       | 14,0              | 18,2             | 6,6                   | 13,3               |                                                                                                                                                       |
|                                                                 | mois d'épandage de PRO                                                    | avril             | mars             | septembre             | mars               |                                                                                                                                                       |
| Amendement                                                      | Type                                                                      | Pas d'amendement  |                  |                       |                    | • pH entretenu par les apports de fumier de volaille                                                                                                  |
| Fertilisation minérale                                          | N (kg/a)                                                                  | 0                 | 60               | 90                    | 70                 | • Ajuster les apports minéraux après analyse du lot de fumier de volaille épandu et/ou vérifier les niveaux de rendements sur zone témoin sans apport |
|                                                                 | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg/ha)                                     | 0                 | 0                | 0                     | 0                  |                                                                                                                                                       |
|                                                                 | K <sub>2</sub> O (kg/ha)                                                  | 0                 | 0                | 0                     | 0                  |                                                                                                                                                       |

# Outil Microbioterre : Du prélèvement de sol au conseil agronomique



# Microbioterre : *De l'indicateur au conseil agronomique*

- **Stratégie méthodologique**
  - Dispositifs expérimentaux & pratiques culturales
  - Indicateurs physico-chimiques & biologiques mesurés
- **Sélection des indicateurs de l'outil Microbioterre**
  - Critères de choix des indicateurs du menu analytique
    - ✓ Liens indicateurs – pratiques culturales
    - ✓ Liens indicateurs – 3 fonctions du sol (16 sous-fonctions)
- **L'outil Microbioterre**
  - Construction du référentiel d'interprétation
  - Déploiement du menu & diagnostic
  - Proposition de leviers agronomiques
- **Conclusions & perspectives du projet**

# Conclusions et perspectives du projet

## Apports du projet

- **Identification des indicateurs physico-chimiques et microbiologiques** à mesurer pour évaluer la fertilité biologique des sols en lien avec les fonctions de dégradation des matières organiques et le recyclage de nutriments (Liens indicateurs – Pratiques & indicateurs – Fonctions)
- **Interprétation** de la valeur des indicateurs mesurés: mise en place d'un référentiel d'interprétation des indicateurs
- **Identification des leviers agronomiques** (pratiques) à mettre en œuvre pour optimiser les fonctions des sols selon les **objectifs spécifiques de l'agriculteur**

## Perspectives

- **Référentiels à consolider** (*Textures diversifiées; Types de pratiques agricoles étudiés sur plusieurs sites; Référentiels régionaux*)
- **Relations indicateurs – fonctions** à approfondir (seules 7 équations identifiées)
- **Notion d'états souhaitables** à consolider : *Quelle teneur en MO souhaitable par ex. ?*

# Microbioterre

Merci de votre attention  
Merci aux contributeurs du projet

## Pilote



## Partenaires financés



## Partenaires non financés



## Soutien



# Choix des indicateurs du menu Microbioterre

## Coût et faisabilité technique des indicateurs

| Variable                           | Technicité et appareillage<br>1 : facile à 3 : difficile | Délai analyse<br>1 : faible délai à 3 :<br>délai élevé | Coût<br>1 : coût faible à 3 : coût<br>élevé | Sol sec ou brut     | Envoi / réception | Norme disponible<br>1 : norme<br>2 : méthodes publiées mais pas de norme<br>3 : différentes méthodes | Autre référentiel accessible<br>(autre que MicrobioTerre) :<br>oui/non |
|------------------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| <b>Variables physico-chimiques</b> |                                                          |                                                        |                                             |                     |                   |                                                                                                      |                                                                        |
| C org (%)                          | 1                                                        | 1 (2 semaines)                                         | 1                                           | Sol sec             | 1                 | 1                                                                                                    | oui                                                                    |
| C org Rock-Eval (g/kg)             | 3                                                        | 3                                                      | 3 (120 - 150 euros)                         | Sol sec             | 1                 | 2                                                                                                    | non                                                                    |
| C stable 100 ans (g/kg)            | 3                                                        | 3                                                      | 3 (120 - 150 euros)                         | Sol sec             | 1                 | 2                                                                                                    | non                                                                    |
| C 0-50 (%)                         | 2                                                        | 1 (2 à 3 semaines)                                     | 2                                           | Sol sec             | 1                 | 1                                                                                                    | RMQS (accessible?)                                                     |
| C 50-200 (%)                       | 2                                                        | 1 (2 à 3 semaines)                                     | 2                                           | Sol sec             | 1                 | 1                                                                                                    | RMQS (accessible?)                                                     |
| C 50-2000 (%)                      | 2                                                        | 1 (2 à 3 semaines)                                     | 2                                           | Sol sec             | 1                 | 1                                                                                                    | RMQS (accessible?)                                                     |
| C 200-2000 (%)                     | 2                                                        | 1 (2 à 3 semaines)                                     | 2                                           | Sol sec             | 1                 | 1                                                                                                    | RMQS (accessible?)                                                     |
| Carbone actif (g/kg)               | 3                                                        | 3                                                      | 3 (120 - 150 euros)                         | Sol sec             | 1                 | 2                                                                                                    | non                                                                    |
| C oxydé (mg/kg)                    | 1                                                        | 1 (2 à 3 semaines)                                     | 1                                           | Sol sec             | 1                 | 2                                                                                                    | non (ref. internationales)                                             |
| C labile 20 ans (g/kg)             | 3                                                        | 3                                                      | 3 (120 - 150 euros)                         | Sol sec             | 1                 | 2                                                                                                    | non                                                                    |
| N 0-50 (%)                         | 2                                                        | 1 (2 à 3 semaines)                                     | 2                                           | Sol sec             | 1                 | 1                                                                                                    | RMQS (accessible?)                                                     |
| N 50-200 (%)                       | 2                                                        | 1 (2 à 3 semaines)                                     | 2                                           | Sol sec             | 1                 | 1                                                                                                    | RMQS (accessible?)                                                     |
| N 200-2000 (%)                     | 2                                                        | 1 (2 à 3 semaines)                                     | 2                                           | Sol sec             | 1                 | 1                                                                                                    | RMQS (accessible?)                                                     |
| N 50-2000 (%)                      | 2                                                        | 1 (2 à 3 semaines)                                     | 2                                           | Sol sec             | 1                 | 1                                                                                                    | RMQS (accessible?)                                                     |
| <b>Variables biologiques</b>       |                                                          |                                                        |                                             |                     |                   |                                                                                                      |                                                                        |
| ADN total (µg/g)                   | 1                                                        | 1                                                      | 1                                           | Sol brut            | 3                 | 2                                                                                                    | oui                                                                    |
| Biomasse microbienne (mg/kg)       | 3                                                        | 2                                                      | 3                                           | Sol brut            | 2                 | 1                                                                                                    | Référentiel Bioindicateurs                                             |
| 16S (copies/g)                     | 2                                                        | 1                                                      | 3                                           | Sol brut            | 3                 | 3                                                                                                    | non (dépendant des amorces)                                            |
| 18S (copies/g)                     | 2                                                        | 1                                                      | 3                                           | Sol brut            | 3                 | 3                                                                                                    | non (dépendant des amorces)                                            |
| Ergostérol total (mg/kg)           | 3                                                        | 1                                                      | 2                                           | Sol congelé (-80°C) | 3                 | 2                                                                                                    | oui                                                                    |
| Ergostérol libre (mg/kg)           | 3                                                        | 1                                                      | 2                                           | Sol congelé (-80°C) | 3                 | 1                                                                                                    | oui                                                                    |
| Ergostérol lié (mg/kg)             | 3                                                        | 1                                                      | 2                                           | Sol congelé (-80°C) | 3                 | 1                                                                                                    | oui                                                                    |
| 18S/16S                            | 2                                                        | 1                                                      | 3                                           | Sol brut            | 3                 | 3                                                                                                    | non (dépendant des amorces)                                            |
| FDA (nmol/min/g)                   | 1                                                        | 1                                                      | 1 à 2 (40 euros)                            | Sol brut            | 3                 | 2                                                                                                    | Oui (Bioindicateurs)                                                   |
| Activité protéase (nmol/min/g)     | 2                                                        | 1                                                      | 2                                           | Sol brut            | 3                 | 2                                                                                                    | non                                                                    |
| LAP (nmol/min/g)                   | 2                                                        | 1                                                      | 2                                           | Sol brut            | 3                 | 2                                                                                                    | non                                                                    |
| Arylamidase (nmol/min/g)           | 1                                                        | 1                                                      | 2                                           | Sol brut            | 3                 | 1                                                                                                    | non                                                                    |
| N minéralisé (mg/kg 28 j)          | 2                                                        | 3                                                      | 3 (70 - 100 euros)                          | Sol brut            | 2                 | 1                                                                                                    | oui (conversions eq. kg/ha)                                            |
| APM (mg/kg)                        | 2                                                        | 2                                                      | 2                                           | Sol sec             | 1                 | 2                                                                                                    | oui (conversions eq. kg/ha)                                            |
| ABM (mg/kg)                        | 1                                                        | 1 (2 à 3 semaines)                                     | 2                                           | Sol brut            | 2 à 3             | 2                                                                                                    | oui (conversions eq. kg/ha)                                            |
| Glucosidase (nmol/min/g)           | 1                                                        | 1                                                      | 2                                           | Sol brut            | 3                 | 1                                                                                                    | oui                                                                    |
| C minéralisé (mg/kg 28j)           | 2                                                        | 3                                                      | 3 (70 - 100 euros)                          | Sol brut            | 2                 | 1                                                                                                    | oui (conversions eq. kg/ha)                                            |

**Variables physico-chimiques :**  
**Variables Rock-Eval** en cours de  
stabilisation : non retenues

**Variables ubiologiques :**  
**Mesures + chères, contraintes**  
sol frais

Notion de coût et faisabilité technique :

