

ÉDITION 2023

---

# RAPPORT AGRONOMIQUE

---

*Résultats des expérimentations de Terrasolis Farm*



**TERRASOLIS**

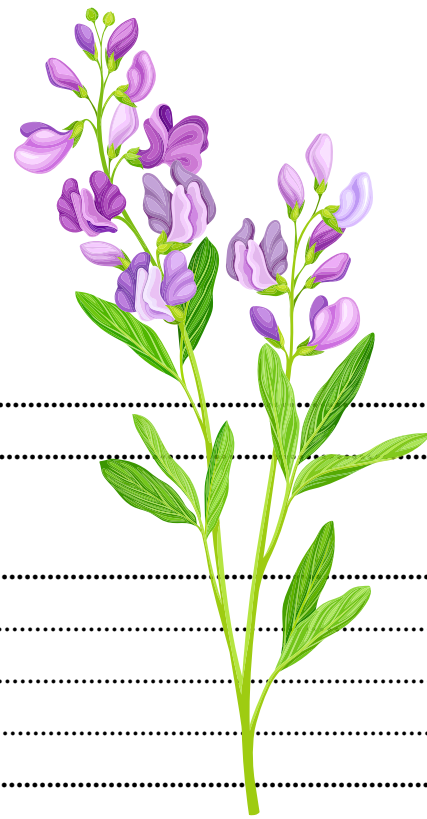
Pôle d'Innovation de l'Agriculture bas-Carbone



---

# Sommaire

---



- **Partie 1 : Introduction & présentation**

- **Présentation de TERRASOLIS.....P2**
- **Présentation de la ferme expérimentale.....P3**

- **Partie 2 : Essais Systèmes**

- **Bilan des premiers essais systèmes.....P11**
  - Objectifs.....P12
  - Présentation des systèmes.....P13
  - Résultats.....P19
- **Nouvelle méthodologie expérimentale.....P26**
  - Présentation globale.....P27
  - Nouveaux essais.....P28
- **Synthèse de l'essai système AGRERE.....P36**
  - Contexte.....P36
  - Matériels et méthodes.....P36
  - Résultats.....P37

- **Partie 3 : R&D**

- **Résultat de l'étude de la méthode d'analyse ROCK EVAL.....P40**
  - Contexte.....P40
  - Étude sur la ferme.....P40
  - Méthode.....P40
  - Résultats.....P41
  - Compléments de résultats.....P46
  - Conclusion sur analyses.....P51
  - Annexes.....P54
  - Références.....P55
- **Flux de carbone et d'azote dans les sols cultivés .....P56**
  - Contexte.....P57
  - Méthode.....P58
  - Résultats.....P58
  - Perspectives.....P58



# Terrasolis



Dans le cadre de la réaffectation de l'ancienne base aérienne 112, un projet d'envergure axé sur la recherche, le développement et l'innovation (RD&I) dans la région du Grand-Est a vu le jour. Ce projet vise à élaborer des recherches finalisées afin de fournir des solutions intégrant l'utilisateur final, à savoir l'agriculteur. Pour superviser cette initiative, le secteur agricole s'est mobilisé en créant un écosystème d'acteurs incarné par l'association TERRASOLIS.

En quelques mots, TERRASOLIS représente le pôle d'innovation dédié aux ressources "bas carbone". Notre objectif principal est d'accompagner la transition vers une agriculture et des territoires à faible empreinte carbone, en réponse aux objectifs de neutralité carbone d'ici 2050. Dans le cadre de nos activités, nous œuvrons à la mise en synergie des acteurs pour favoriser l'émergence d'un modèle d'économie circulaire durable, créateur de valeur ajoutée sur les territoires.



## Hub

Initiateur de relations et d'échanges entre les acteurs du territoire pour l'émergence de projets collaboratifs innovants, par le prisme du partage d'expérience et de l'intelligence collective.



## Farm

Démonstrateur à taille réelle d'une exploitation de grandes cultures bas Carbone performante et durable dans un objectif d'augmentation de la productivité de carbone renouvelable (+25%) associée à une réduction d'émissions de gaz à effet de serre issus de carbone fossile (-75%).



## Living Lab

Terre d'accueil d'activités, de sociétés et start-up innovantes en lien avec l'agriculture, les énergies renouvelables et la bioéconomie, proposant une offre originale d'énergies bas-Carbone.

# Terrasolis Farm



## Objectifs :

- Être le démonstrateur à taille réelle pour innover, développer, construire l'agriculture de l'agriculture « bas-Carbone » afin de répondre aux objectifs suivants : mutation des systèmes de production, mise en œuvre de l'agro-écologie, transition énergétique, multifonctionnalité, réponse aux enjeux de la bioéconomie...
- Être un outil au service de la recherche, du développement et du transfert

## Les axes de travail mis en œuvre :



Les travaux de la ferme se sont d'abord concentrés sur l'axe agronomique. Dans ce cadre, sa mission est de concevoir, de mettre en œuvre et d'évaluer des systèmes de culture innovants, en rupture à l'échelle d'une ferme, répondant ainsi aux 3 enjeux suivants :

Assurer la fourniture de la ressource agricole (carbone renouvelable) en qualité et quantité aux industries de l'aval de la région.

Assurer la productivité économique des systèmes dans une moindre dépendance aux énergies fossiles.

Prendre en compte les valeurs de durabilité attendues par la société (concept de l'agro-écologie).



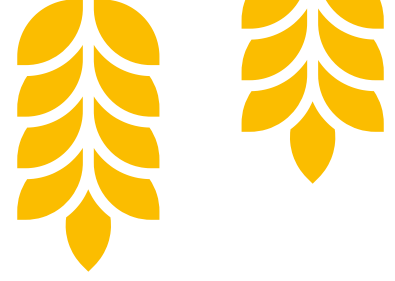


# *Cultures de la ferme* **2024**

---

# Terrasolis Farm

---



## Implantation



La ferme expérimentale, implantée sur une ancienne friche militaire, sert de vitrine pour une agriculture à faible empreinte carbone, avec pour objectif la réduction des émissions de gaz à effet de serre et la production de carbone renouvelable. À travers cet outil, l'équipe de TERRASOLIS développe des solutions innovantes pour l'agriculture régionale. Ainsi, l'agriculture est envisagée comme une activité économique durable et résiliente, génératrice de valeur ajoutée pour les agriculteurs et les territoires, contribuant aux ressources nécessaires pour répondre aux besoins et aux défis sociétaux dans la perspective de l'atteinte de la neutralité carbone d'ici 2050.

*Photo aérienne de l'ancienne base militaire 112*



## Contexte pédologique

### Le cadre physique

#### Relief et hydrographie

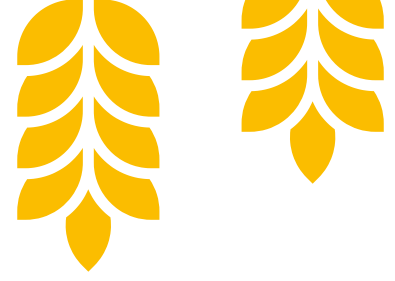
Le site, conçu pour l'aviation, présente une topographie naturellement plate. Il est toutefois délimité par deux élévations du relief : au nord-ouest se trouve la butte de Brimont, abritant le fort éponyme culminant à 170 mètres d'altitude, tandis qu'au sud-est s'élève le mont de Berru, atteignant une altitude de 270 mètres, à proximité du fort de Witry-lès-Reims situé 100 mètres plus bas. L'altitude de la base aérienne varie entre 90 et 95 mètres. La partie nord de la zone est parfaitement plane, tandis que la partie sud présente une légère bosse avec une inclinaison en direction du sud, vers Bétheny.

*Photo des parcelles sud*



Aucun cours d'eau naturel ne traverse ni ne longe directement le site. Cependant, le canal de la Marne à l'Aisne se trouve à proximité de l'extrémité ouest de la base. Le bassin versant topographique correspond à celui de la Vesle, qui coule à environ dix kilomètres au sud-ouest du site





## Géologie – hydrogéologie

La géologie locale est principalement caractérisée par la présence de craie. Il s'agit spécifiquement d'une craie blanche, fine, dépourvue de silex, du Campanien inférieur datant de la fin du Crétacé, période de la fin de l'ère Secondaire.

Les variations de température entre le gel et le dégel durant les périodes glaciaires du Quaternaire ont entraîné d'importants mouvements de convection dans le substrat crayeux, formant un motif distinct avec des remontées de craie fragmentée sous forme de "cheminées". Ces cheminées, généralement obliques et mesurant de quelques décimètres à 2 ou 3 mètres de hauteur, ainsi que les "poches" remplies d'un mélange de petits gravillons de craie et de limons calcaires d'origine distincte de la craie en place, sont des caractéristiques typiques de la région. Ce phénomène de cryoturbation, fréquemment observé en Champagne crayeuse, est à l'origine de ce que l'on appelle localement la "craie à poches".



*Photos de poches de cryoturbation*



Cette craie à poches est généralement surmontée d'un matériau limono-crayeux constitué de petits graviers de craie de quelques millimètres, enrobés de limon calcaire. Ce matériau, transporté par ruissellement ou déposé lors des phases interglaciaires par des apports fluviaux, est appelé "grèze" ou "groize". Localement, il est également connu sous le nom de "graveluche" lorsqu'il est plutôt grossier, ou de "tuff" lorsqu'il est plutôt fin.

Sur la carte géologique, ce type de formation superficielle n'est représenté que lorsqu'il est présent en grande épaisseur, par exemple dans les vallées sèches ou au bas des pentes. Dans ce cas précis, la grèze ne recouvre la craie que sur quelques décimètres d'épaisseur et n'est donc pas répertoriée sur la carte géologique.



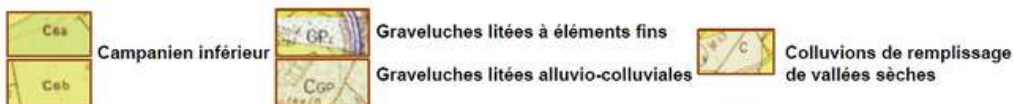
# Terrasolis Farm



Extrait de la carte géologique 1/50 000 BRGM (feuilles de Reims et Asfeld) ↻



## Légende :

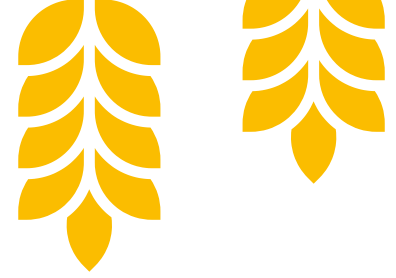


La montagne de Reims à l'ouest, ainsi que les buttes témoins émergeant de la plaine crayeuse telles que Brimont et Berru, représentent différents étages du Tertiaire, comprenant des marnes, des argiles, des sables et des calcaires.

Le vaste massif de craie, plus ou moins fracturé, constitue un important aquifère. La nappe phréatique, dont la profondeur et la vitesse d'écoulement varient considérablement, s'oriente vers l'axe de la vallée de la Vesle. Habituellement située à une profondeur de 30 à 40 cm, elle se trouve ici relativement peu profonde, voire parfois à fleur de sol selon les témoignages locaux.

Bien qu'il n'y ait pas de source d'eau potable publique à proximité, la base aérienne disposait de son propre système de captage d'eau potable, prélevée par forage sur le site même.





## Les sols

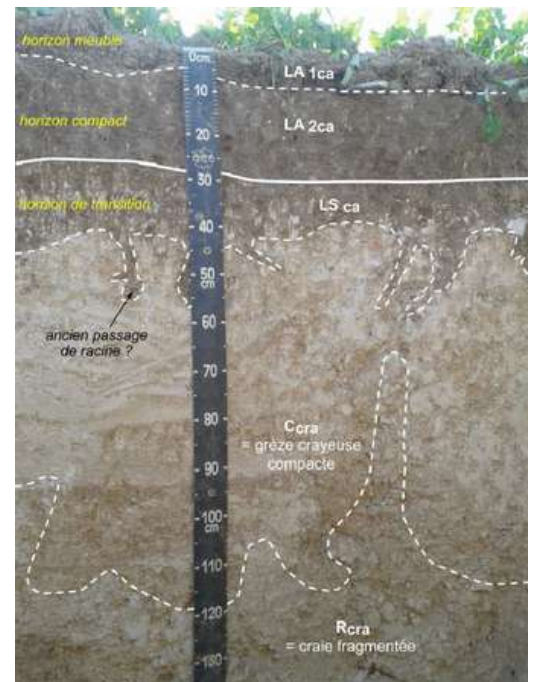
Quatre types de sols ont été identifiés grâce à une prospection initiale effectuée à la tarière manuelle, puis décrits plus en détail à partir de fosses d'observation.

### Sol sur grèze crayeuse recouvrant la craie à poches

Ce type de sol prédomine dans la région, s'étendant sur toute la zone Nord et la majeure partie de la zone Sud, dans sa partie plane. La craie cryoturbée, formée lors de périodes périglaciaires, a été soumise à des phases d'érosion, entraînant une réduction des poches et des cheminées, ainsi que des phases d'accumulation de matériaux exogènes. Dans ce sol, les cheminées sont relativement fines et partiellement tronquées, avec une épaisseur de cryoturbation variant entre 50 cm et 1 mètre. Les poches sont remplies de grèze crayeuse beige-ocre, souvent durcie mais non cimentée par le calcaire. Ce matériau forme également une couverture plus ou moins épaisse au-dessus de la craie à poches, généralement inférieure à 50 cm. La mise en culture a développé un horizon travaillé d'une trentaine de centimètres au moins, nettement humifère et contenant moins de granules de craie que le matériau de remplissage des poches. Selon l'épaisseur de cette couverture de grèze, le sol a subi une pédogénèse plus ou moins avancée.



Rendosol sur grèze et craie cryoturbée

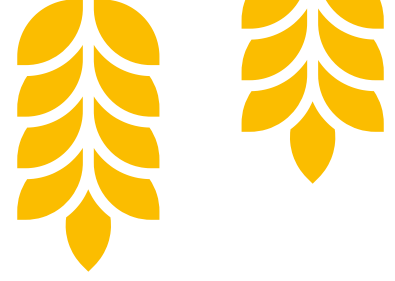


Calcisol sur grèze et craie cryoturbée



Le potentiel agronomique de ce type de sol est assez élevé en raison de l'absence de contraintes hydromorphiques et de roches dures. Cependant, la présence de grèze peut poser problème : si elle est compacte et épaisse, elle peut entraver la remontée capillaire de l'eau contenue dans le réservoir hydrique formé par la craie, rendant le sol susceptible de devenir sec. De plus, les racines ont du mal à pénétrer les poches de grèze sèche, compacte et stérile, tandis que la perméabilité relativement faible de ce matériau peut ralentir le drainage en cas de fortes précipitations.

# Terrasolis Farm

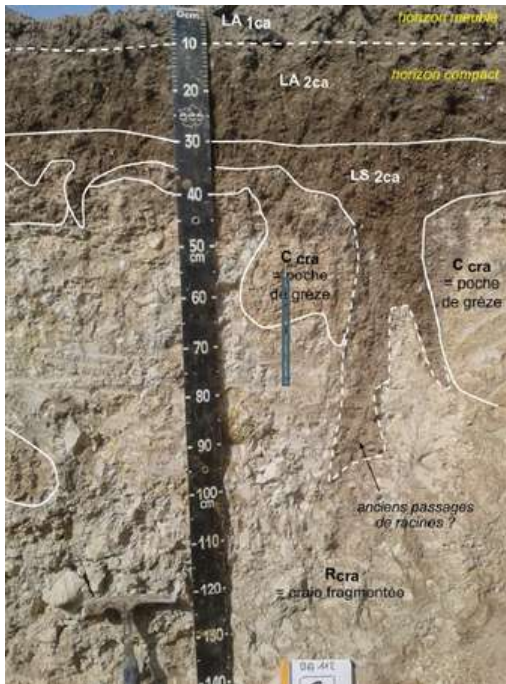


Les sols les plus favorables à l'agriculture sont ceux où la craie cryoturbée est la plus proche de la surface, permettant ainsi une meilleure exploration par les racines des cultures. Les racines d'arbres et d'arbustes peuvent également pénétrer l'horizon de grèze, comme en témoignent les indentations observées dans les profils, probablement dues à d'anciens conduits racinaires remplis de matériau humifère provenant de la surface, ce qui contribue à approfondir la couche de sol utile.

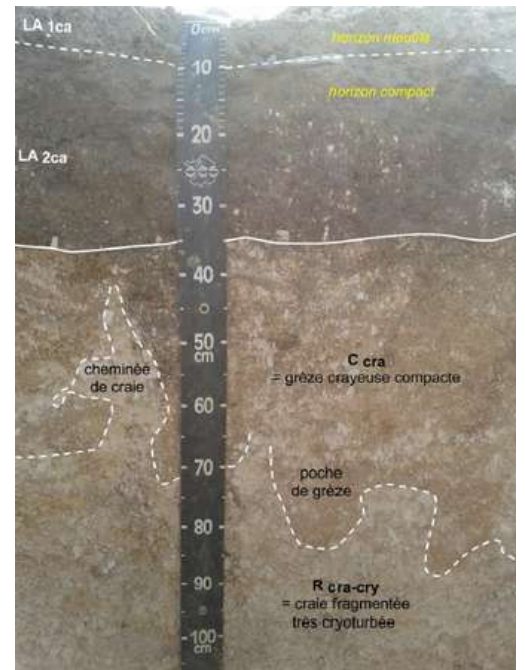
## Sol directement sur craie

Dans une petite partie de la zone Sud, légèrement bombée, la craie affleure davantage, soit naturellement en raison d'une érosion plus prononcée, soit éventuellement en raison d'un décapage lié à la construction de la base aérienne. Sous une couche superficielle travaillée de 30 à 40/50 cm, on trouve directement de la craie blanche plus ou moins tendre et pulvérulente, sans présence intermédiaire de grèze. Les cailloux de craie remontent fréquemment en surface.

Ce type de sol, appelé RENDOSOL ou rendzine sur craie en place, bénéficie d'une bonne réserve hydrique grâce à la craie qui ne constitue pas une barrière à la remontée capillaire et à l'enracinement, contrairement à la grèze.



Calcisol sur craie à poches



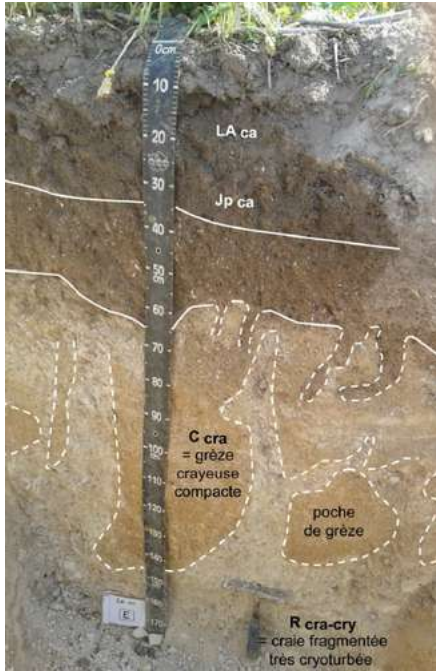
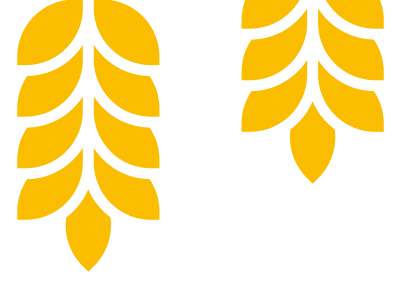
Rendosol sur craie à poches

## Sol de colluvions reposant sur grèze et craie à poches

Dans les points bas entourant la zone Sud, un processus de colluvionnement a épaissi le sol : les horizons superficiels des zones en altitude ont été érodés, entraînant une accumulation de terre humifère dans les zones plus basses. Ce phénomène se poursuit encore aujourd'hui lorsque de l'eau de ruissellement traverse des terres nues et s'accroît en cas de ruptures de pente ou en amont d'obstacles tels que des haies.

Le sol résultant de ce processus comprend une couche de terre humifère de 50 à 80 cm au-dessus de la grèze, puis de la craie. Ce sol, appelé COLLUVIOSOL ou sol peu évolué d'apport colluvial reposant sur grèze crayeuse, est relativement jeune.

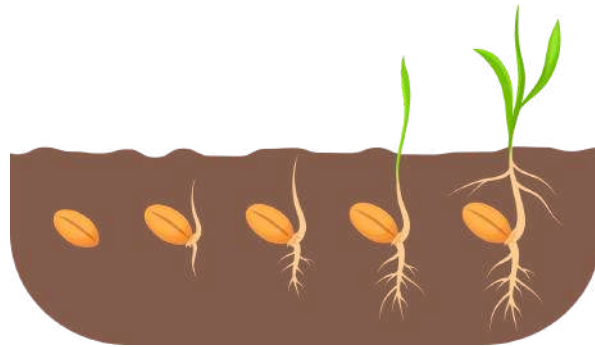
# Terrasolis Farm



*Colluviosol recouvrant la craie à poches*



Le potentiel agronomique de ce type de sol est supérieur à celui des sols précédents en raison de l'épaisseur plus importante de terre humifère, de couleur plus sombre (favorisant le réchauffement) et de la concentration de ruissellement dans les points bas (offrant une meilleure réserve hydrique).



## Sol anthropique

Localement, en dehors des zones basses décrites ci-dessus, la couche de terre humifère repérée à la tarière est épaissie, parfois jusqu'à 1 mètre, surplombant la grèze crayeuse située à une profondeur moindre. Il est probable que ces zones aient été creusées lors de la construction de la base ou à la suite de combats (tranchées, cratères de bombes ou d'obus) et aient été remblayées par la suite avec de la terre environnante. Des vestiges de charbon de bois, de tuiles, de poteries ou de projectiles pourraient témoigner de cette origine.

L'évolution et les caractéristiques de ce type de sol sont similaires à celles des sols colluvionnés décrits précédemment. Dans ce cas, il est appelé ANTHROPOSOL TRANSFORMÉ-COLLUVIOSOL.

Le potentiel agronomique de ce type de sol est similaire à celui des colluviosols, avec une possible concentration d'eau en raison de la forme en cuvette supposée de la grèze sous-jacente. Aucune dépression n'est visible en surface.





# Bilan des premiers essais systèmes

Rédaction : Mathieu SIMONNET

1. Les objectifs généraux des essais système
2. Présentation des systèmes
  - a. SDC 1, Système de référence optimisé
    - i. Présentation
  - b. SDC2, Système TCS (Techniques Culturelles Simplifiées)
    - i. Présentation
    - ii. Leviers principaux
      1. Semis de betteraves au Striptill
      2. Semis de colza associé.
  - c. SDC 3, Système semis sous couvert permanent
    - i. Présentation
    - ii. Leviers principaux
      1. Le semis direct sous couvert de trèfle
      2. Le semis direct sous couvert de luzerne
  - d. SDC 4, Système biomasse maximum
    - i. Présentation
    - ii. Leviers principaux
      1. Rotation de betterave courte
      2. Couverts d'interculture à forte biomasse
  - e. SDC 5, Système autonomie azotée
    - i. Présentation
    - ii. Leviers principaux
      1. Orge de printemps avec précédent de luzerne
      2. Introduction du chanvre
3. Résultats
  - a. Gain en rendement
  - b. Mage semi-nette
  - c. Biomasse vers de terre
  - d. Biomasse des couverts d'interculture
  - e. Consommation énergétique et émissions de GES
  - f. Variation du stock de carbone
  - g. Indice de Fréquence de Traitement (IFT)
  - h. Bilan et perspectives



# Bilan des premiers essais systèmes

## Les objectifs généraux des essais système

Répartis sur une surface de 220 ha, les essais systèmes, au nombre de 5, sont à taille réelle et liés à une rotation de cultures de 7 à 9 ans. Ils doivent permettre de répondre à 3 enjeux : réduire la dépendance aux énergies fossiles, être durable et garantir une productivité ainsi qu'une qualité similaire ou supérieure aux valeurs actuelles.

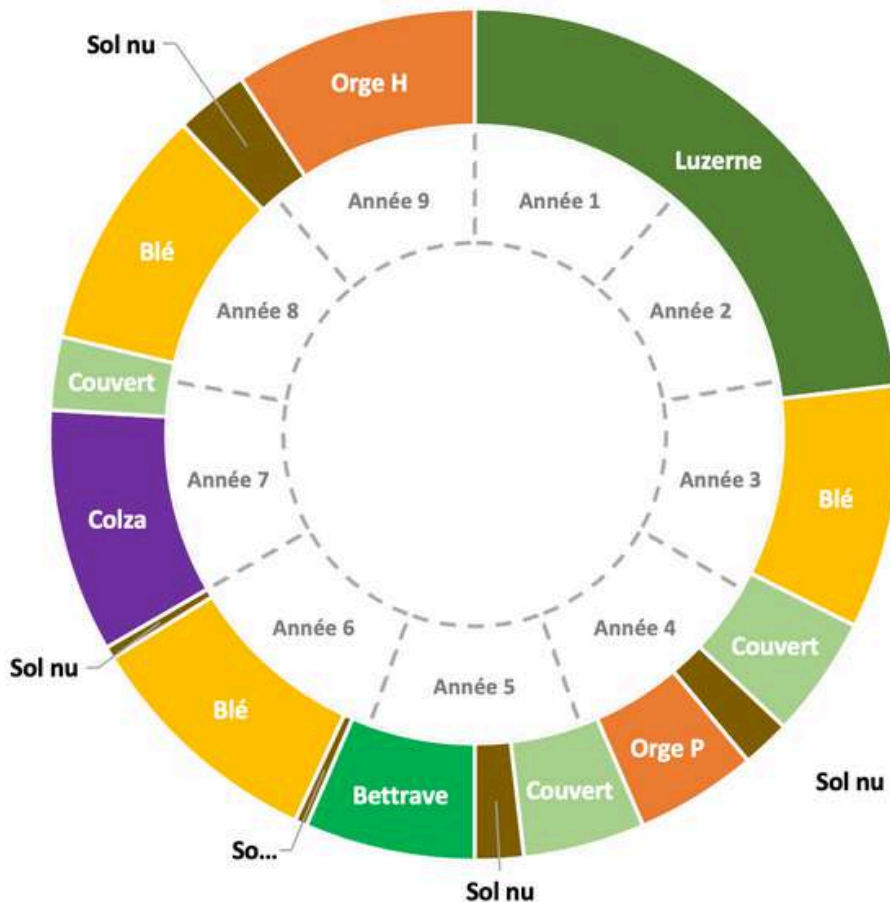
## Présentation des systèmes

### SDC 1. Système de référence optimisé

#### Présentation

L'objectif du système de référence, SDC1, est de reproduire les pratiques les plus représentatives du secteur champenois. Il suit donc les évolutions réglementaires et les optimisations techniques. La rotation s'effectue sur 9 ans et intègre les cultures principales du territoire que sont la luzerne, le blé, l'orge, la betterave et le colza.

Rotation du système de référence (2017-2020)



---

# Bilan des premiers essais systèmes

---

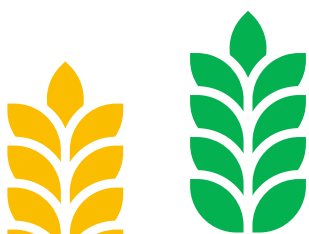
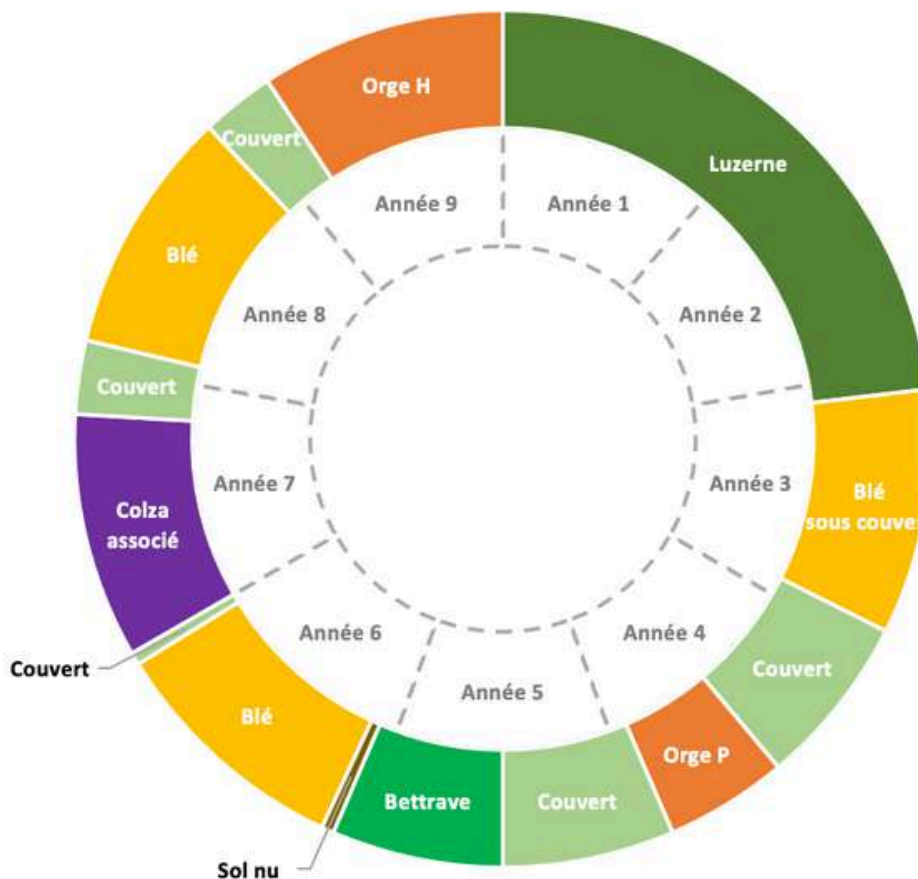
## Présentation des systèmes

### SDC 2, Système TCS avec couvert

#### Présentation

Le système TCS, SDC2, a pour objectif d'améliorer la fertilité des sols en introduisant des couverts d'intercultures plus longs et plus diversifiés ainsi qu'en réduisant le travail du sol. La rotation sur 9 ans est similaire à celle du système de référence et intègre les cultures principales du territoire que sont la luzerne, le blé, l'orge, la betterave et le colza.

Rotation du système TCS avec couvert (2017-2020)





# Bilan des premiers essais systèmes

## Leviers principaux

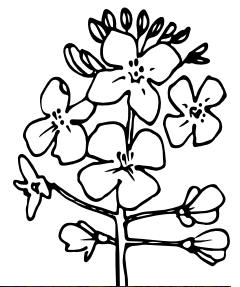
### Semis de betteraves au Striptill

Cette technique permet l'implantation d'une culture en minimisant le travail du sol à la zone de semis. Nous utilisons cette technique pour le semis de betterave. Les chantiers de préparation du sol au strip-till et de semis sont, dans notre cas, réalisés en même temps. Cette technique peut présenter un inconvénient concernant l'implantation si le sol est trop humide (Il n'y a pas d'assèchement du sol du au travail du sol) mais donne de meilleur rendement sur 3 années consécutives.

Rendement betterave	2016	2017	2018
ITK classique	108t	110t	75t
ITK strip-till	115t	120t	78t



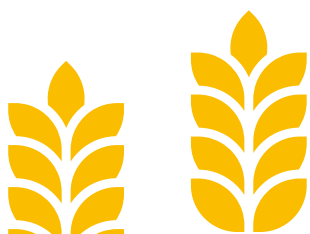
Semis de betterave au strip-till



### Semis de colza associé

Le semis de colza associé avec de la lentille a été réalisé avec l'objectif d'insérer une légumineuse dans la rotation et de sécuriser son implantation face aux dégâts de pigeons. Ce levier a été étudié de 2016 à 2019 et a donné de bons résultats sur les dégâts de pigeons cependant, la biomasse de la lentille restait inférieure à 0.5 tMS/ha.

Colza associé avec de la lentille



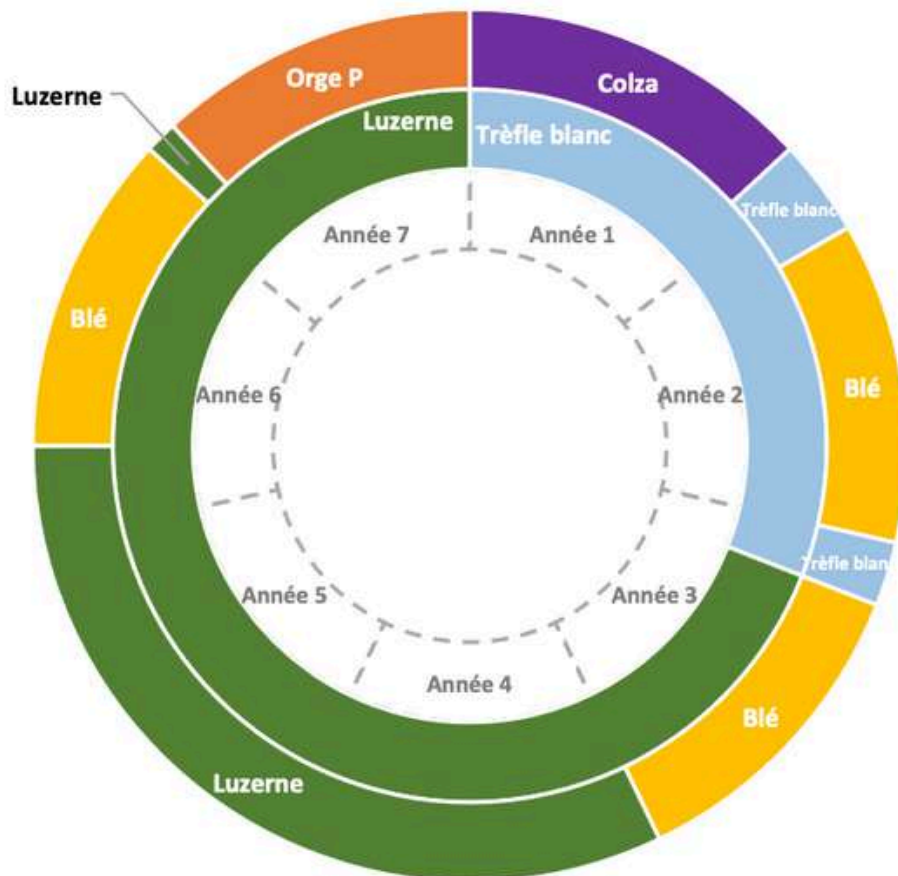
# Bilan des premiers essais systèmes

## SDC 3, Système semis sous couvert permanent

### Présentation

Le système semis sous couvert permanent, SDC3, a pour objectif d'améliorer la fertilité et la vie des sols avec comme principaux leviers le non travail du sol et la culture sous couvert permanent. La rotation s'effectue sur 7 ans sans cultures sarclées. Elle intègre du colza du blé et de l'orge implantés en semis direct dans un couvert de luzerne ou de trèfle. La luzerne, en plus de servir de couvert, est récoltée sur une période de 2 ans.

Rotation du système semis sous couvert permanent (2017-2020)



---

# Bilan des premiers essais systèmes

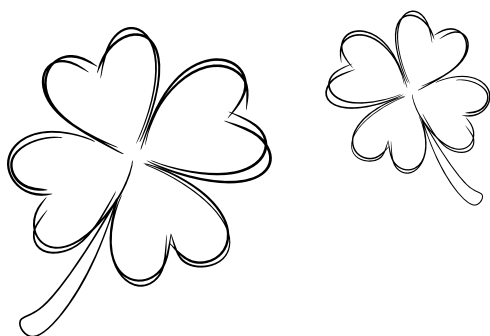
---

## Leviers principaux

### Semis sous couvert de trèfles

Ce levier concerne les 2 premières années de la rotation. Le trèfle est semé à la même période que le colza pour une durée de 2 ans. Le blé est ensuite semé dans le couvert de trèfle déjà en place. Ce levier présente des résultats annuels aléatoires sur le développement du trèfle, pouvant être très présent après récolte ou totalement absent.

Semis-direct de blé dans le trèfle



### Le semis direct sous couvert de luzerne

Ce levier a été mis en œuvre pour la culture de blé et d'orge de printemps. Pour le blé, cette technique ne présente pas de problèmes particuliers. La présence de la luzerne est régulée par un herbicide afin ne pas concurrencer le blé. Ce levier a en revanche été plus compliqué à mettre en œuvre avec l'orge de printemps. Il a été observé que la luzerne a plus de chance de disparaître dû à la trop forte concurrence de l'orge et peut être gênée dans sa reprise de végétation après moisson dû aux pailles de céréale.



Semis-direct de blé dans la luzerne





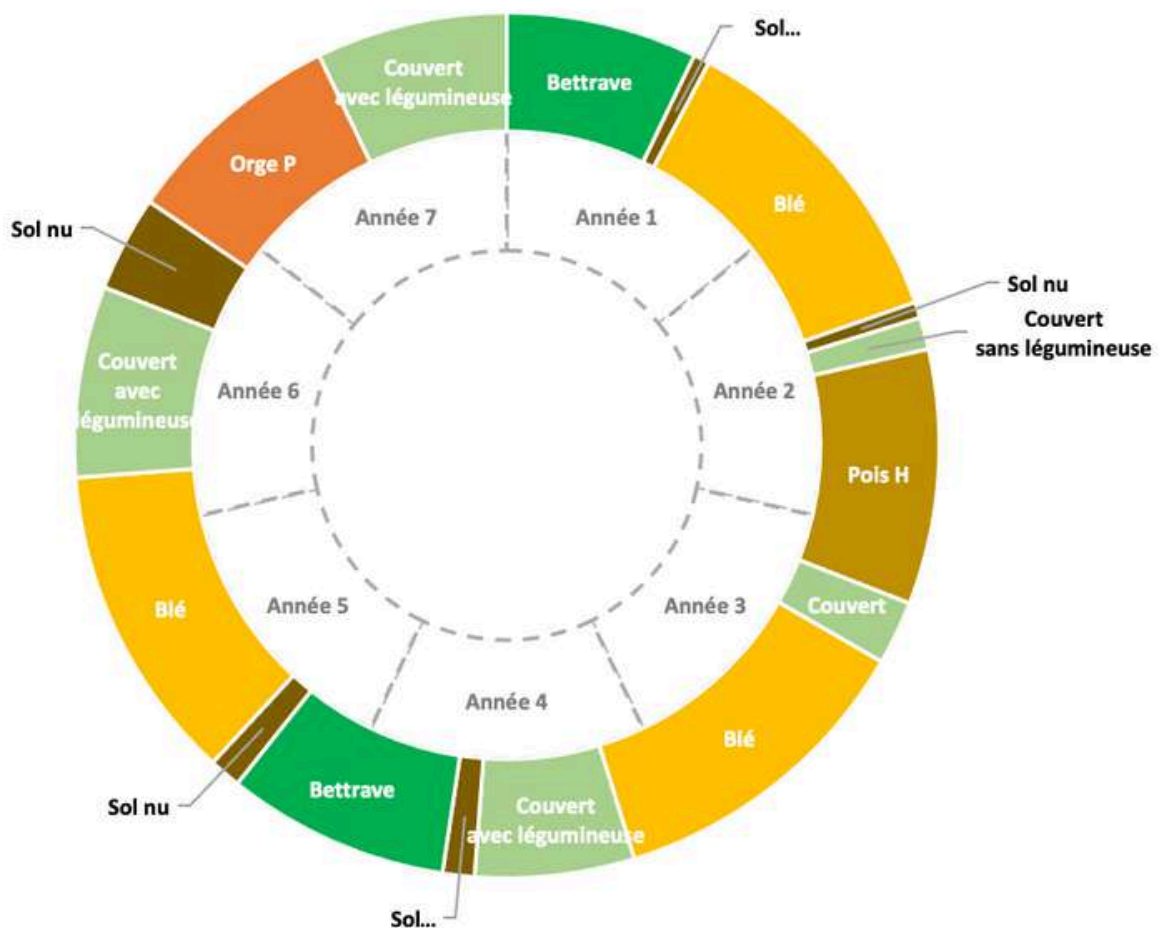
# Bilan des premiers essais systèmes

## SDC 4. Système biomasse maximum

### Présentation

Le système Biomasse maximum, SDC4 a pour objectif de fournir le plus de biomasse possible aux filières agroalimentaires et agroindustrielles. La rotation s'effectue sur 7 ans et intègre du blé, du pois d'hiver, de l'orge de printemps et de la betterave. La maximisation de l'exportation de biomasse se fait principalement par la culture de betteraves, présente 2 fois dans la rotation, et par l'export des pailles de céréales. Les couverts à base de légumineuses ont pour objectifs de limiter les impacts des exportations.

Rotation du système biomasse maximum (2017-2020)



# Bilan des premiers essais systèmes

## Leviers principaux

### Rotation de betterave courte

Ce levier a pour objectif d'augmenter la production de biomasse du système. La betterave a été retenue du fait de la situation géographique de la ferme expérimentale, pour permettre la production de sucres à usage alimentaire et non-alimentaire.

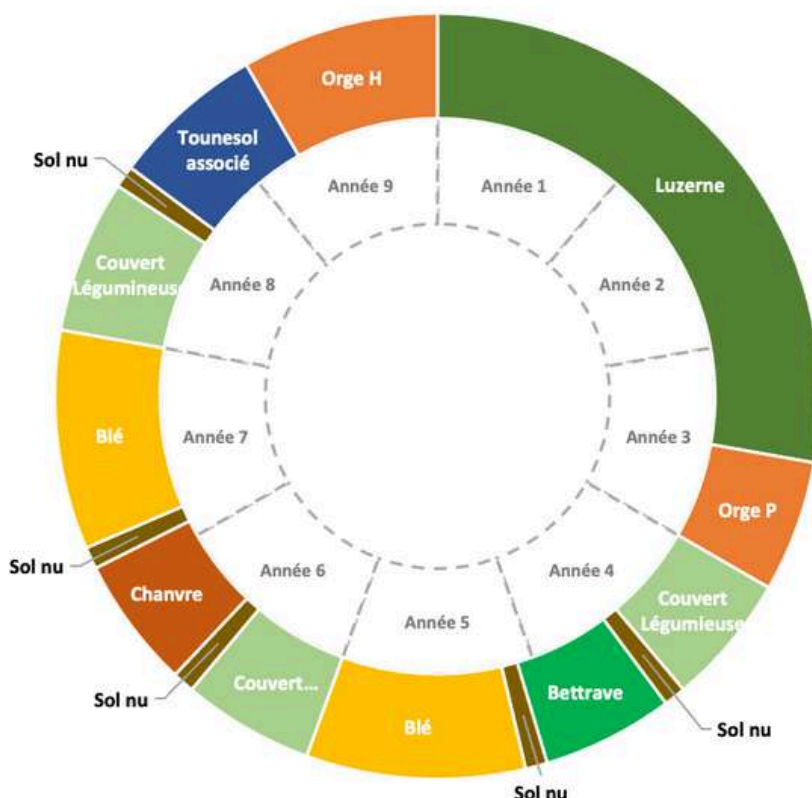
### Couverts d'interculture à forte biomasse

Afin de compenser les exportations du système, une simulation a été réalisée pour connaître la quantité de biomasse nécessaire à produire en interculture pour maintenir le taux de matière organique du sol. Cette simulation, réalisée avec l'outil SIMEOS-AMG, donne une valeur de 4tMS/ha à atteindre avec un couvert d'interculture pour compenser les exportations. De 2016 à 2022, les couverts d'interculture produisent en moyenne 2,8 tMS/ha avec des variations annuelles (principalement dues au climat) allant de 2 tMS/ha à 5 tMS/ha.

## SDC 5, Système autonomie azotée

### Présentation

Rotation du système autonomie azotée (2017-2020)



Le système autonomie azotée, SDC 5, a pour objectif de réduire la consommation en azote minérale de 50% par rapport aux pratiques actuelles. Cette réduction de consommation d'azote minérale permet une réduction directe et indirecte des gaz à effet de serre et améliore l'autonomie en fertilité. La rotation s'effectue sur 9 ans et intègre des cultures productrices d'azote comme la luzerne et les couverts avec légumineuses ainsi que des cultures consommant peu d'azote comme le chanvre et le tournesol.



---

# Bilan des premiers essais systèmes

---

## Leviers principaux

### Orge de printemps avec précédent de luzerne

Ce levier intervient dans la 3<sup>ème</sup> année de la rotation. Il consiste, après 2 années de luzerne, à laisser cette luzerne en place après la dernière coupe et de la détruire avant le semis de l'orge de printemps. Cette destruction plus tardive de la luzerne amène une minéralisation d'azote à une période où le sol et la plante le consomment. Cela permet d'éviter des pertes par lixiviation durant l'automne. En 2020, l'orge de printemps a été fertilisée avec 120 uN/Ha (contre 180 UN en moyenne). Le rendement était de 86 q/Ha avec un taux protéine de 10.3% et un calibrage de 93%.



Récolte de l'orge semé dans la luzerne



### Introduction du chanvre

Le chanvre a été introduit pour sa faible consommation en azote. Dans notre système, cette culture nécessite 60 uN/Ha pour produire une moyenne de 1.15 t/Ha de chènevis et 8 t/Ha de paille. Cette culture nécessite du matériel et un savoir-faire spécifique mais reste rentable par rapport à d'autres cultures. Le chanvre permet entre autres de diversifier la rotation et de réduire l'IFT du fait qu'aucun produit phytosanitaire n'est utilisé.

## Résultats

### Gain en rendement

Le gain en rendement est calculé par rapport au rendement moyen annuel de chaque culture dans la zone proche de la ferme expérimentale. Les écarts de gains de rendement peuvent s'expliquer de la façon suivante, une luzerne semée en semis direct dans le SDC2, une mauvaise maîtrise des techniques de semis sous couvert dans le SDC3, les cultures de pois et de tournesol impactées par de forts dégâts de pigeons.





# Bilan des premiers essais systèmes

	Système référence SDC 1 9 ans	Système TCS SDC 2 9 ans	Système couvert permanent SDC 3 7 ans	Système biomasse maximum SDC 4 7 ans	Système autonomie azotée SDC 5 9 ans
Rotation (2017-2020)					
<b>Gains moyens par système</b>	4%	8%	-12%	-7%	-1%
<b>Gains moyens par culture</b>					
<i>Luzerne 1</i>	18%	37%	-29%		20%
<i>Luzerne 2</i>	7%	8%	-1%		-12%
<i>Blé 1</i>	8%	5%	-11%	5%	-7%
<i>Blé 2</i>	0%	3%	-1%	6%	15%
<i>Blé 3</i>	-25%	1%	-14%	-5%	
<i>Orge de printemps</i>	9%	-2%	-26%	-5%	10%
<i>Orge d'hiver</i>	15%	7%			8%
<i>Colza</i>	-3%	1%	-1%		
<i>Betterave 1</i>	6%	15%	1%	1%	-11%
<i>Betterave 2</i>			-16%	-16%	
<i>Pois</i>				-37%	
<i>Tournesol</i>					-43%
<i>Chanvre</i>					9%

## Marge semi-nette

Les marges semis-nettes sont calculées avec les prix réels de chaque année. Elles correspondent au produit des ventes de culture moins les charges de mécanisation et les charges opérationnelles.

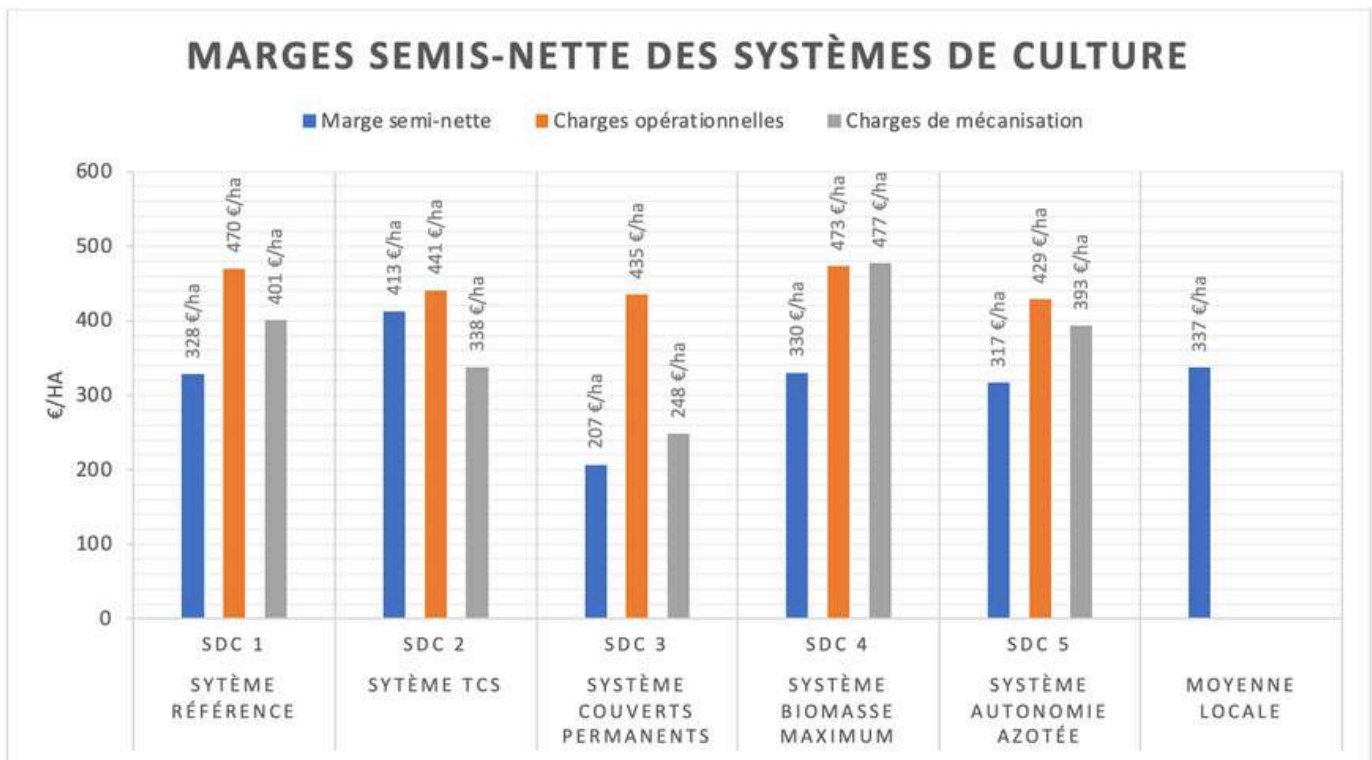
Pour les systèmes de culture SDC1, SDC4 et SDC5, la marge semi-nette est similaire à la marge semi-nette du secteur. Le système couvert permanent, SDC3, a une marge inférieure à la moyenne locale de -130€/ha contrairement au système TCS, SDC2, qui a une marge supérieure de +75€/ha

En ce qui concerne les charges opérationnelles, le système couvert permanent et le système autonomie azotée présentent les charges les plus faibles respectivement dû à l'absence de la betterave pour le SDC3 et l'utilisation réduite des produits phytosanitaires et azotés pour le SDC5.

Le système biomasse maximum, SDC4, a la plus forte charge de mécanisation, principalement dû à la betterave contrairement au système couvert permanent qui a la plus faible charge de mécanisation dû à la suppression du travail du sol.

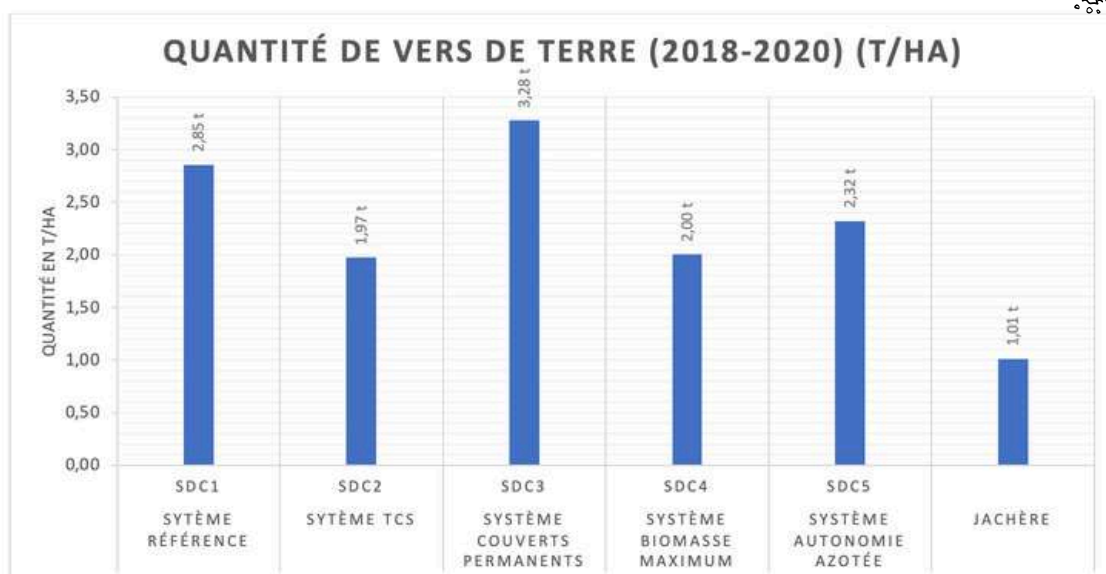


# Bilan des premiers essais systèmes



## Biomasse vers de terre

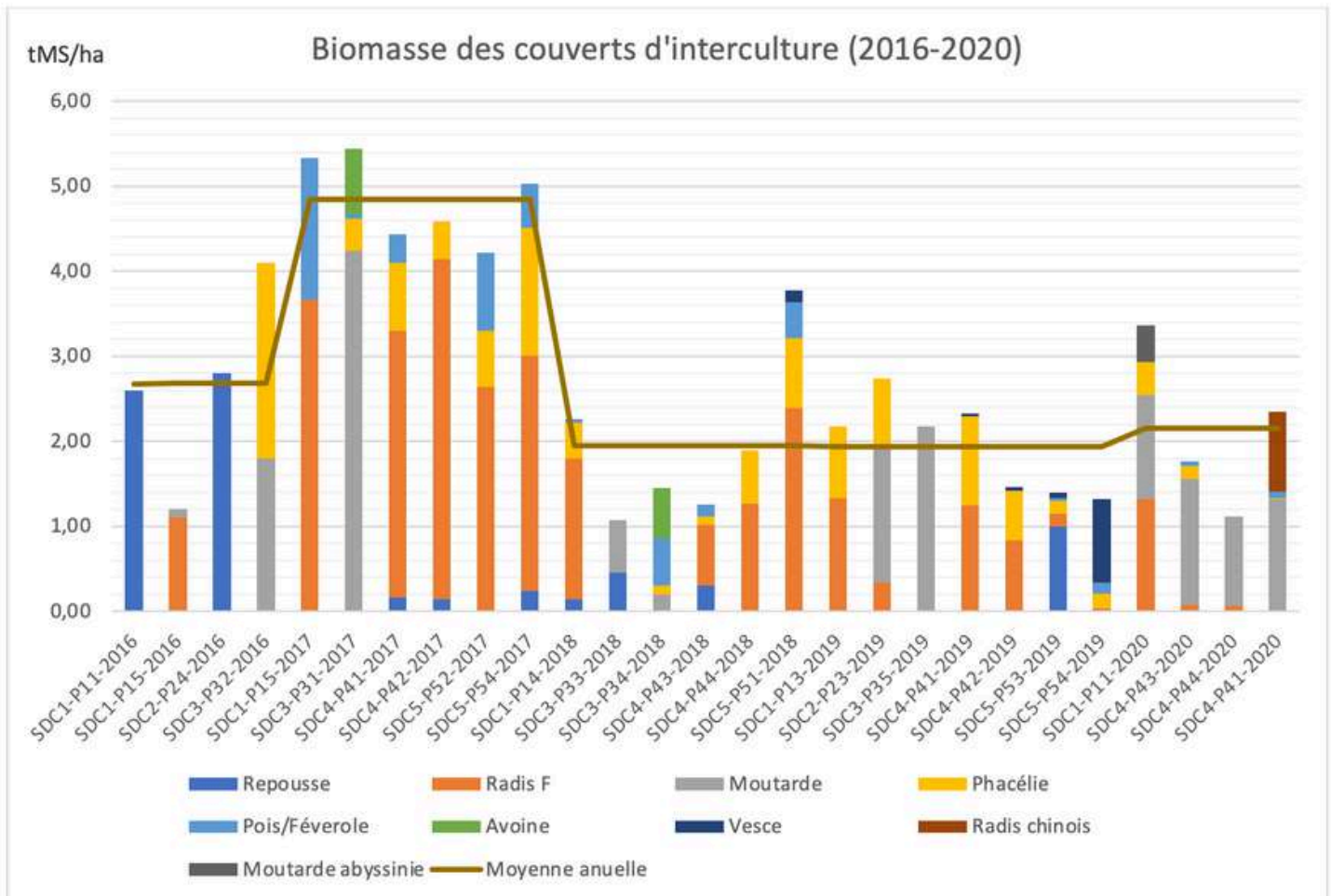
La mesure de la quantité de vers de terre est réalisée en prélevant un volume de terre de 40 cm<sup>3</sup> (40 x 40 x 40) sur différentes parcelles des systèmes pendant le mois de mars. Le système sous couvert permanent présente une quantité de vers de terre à l'hectare supérieure aux autres systèmes. La quantité de vers de terre est souvent plus importante dans les cultures de luzerne. On notera la faible présence de vers de terre (sur les 40 premiers centimètres) dans les parcelles en jachères.



# Bilan des premiers essais systèmes

## Biomasse vers de terre

Le graphique ci-dessous correspond aux mesures de biomasse (tMS/ha) sur les parcelles des différents systèmes de 2016 à 2020. L'année 2017 se distingue du fait d'un climat favorable lors de l'implantation.



Les systèmes, de 2016 à 2021, montrent les mêmes résultats en termes de quantité de biomasse produite. On peut cependant noter une biomasse légèrement supérieure pour les systèmes couvert permanent et autonomie azotée.



	Système référence	Système TCS	Système couvert permanent	Système biomasse maximum	Système autonomie azotée
	SDC1	SDC2	SDC3	SDC4	SDC5
Moyenne biomasse des couverts (2017-2020) (tMS/ha)	2,82	2,77	2,85	2,35	3,15

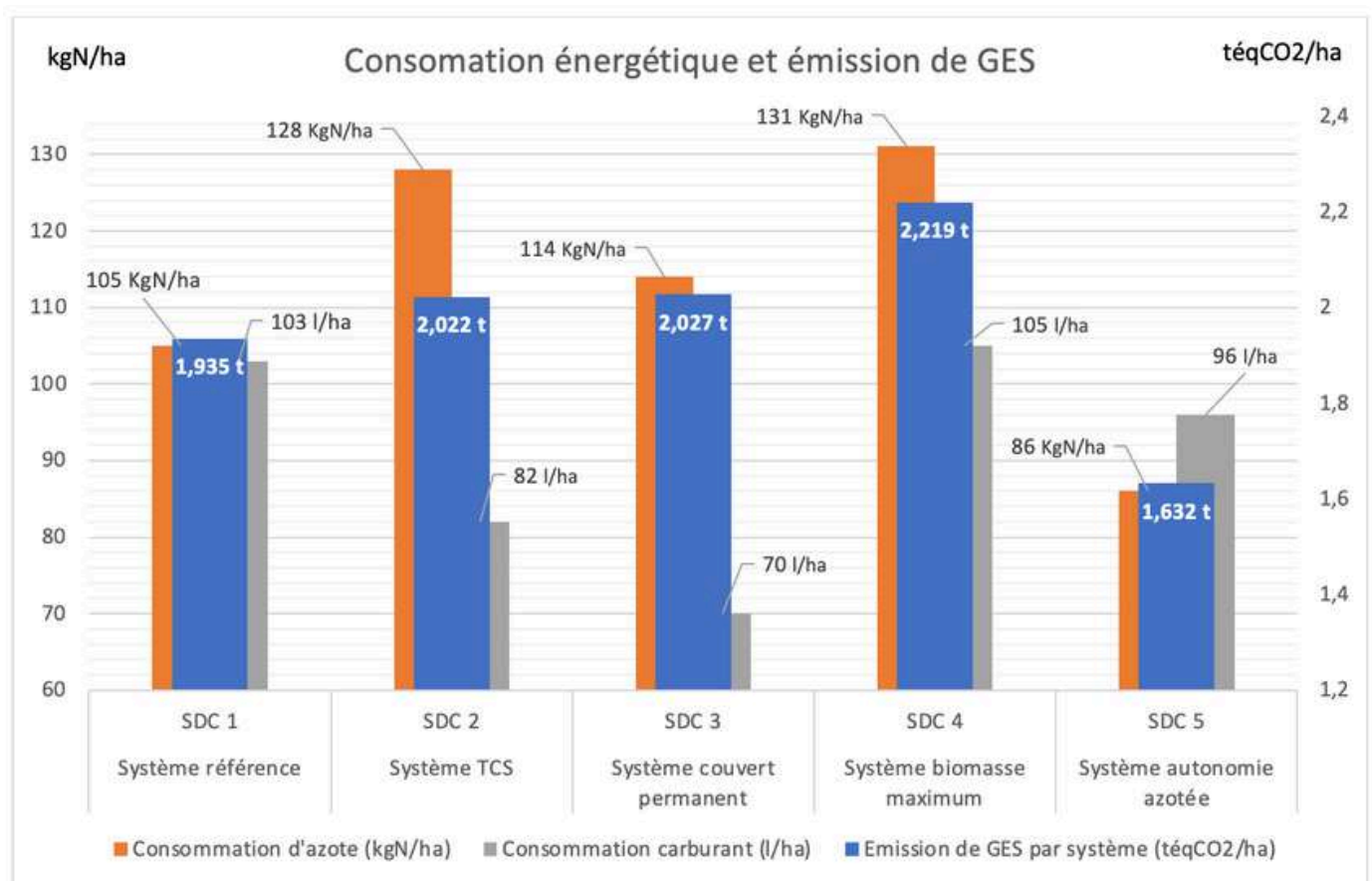


# Bilan des premiers essais systèmes

## Consommation énergétique et émissions de GES

Les émissions de gaz à effet de serre de la ferme expérimentale sont calculées grâce à l'outil d'Arvalis, Systemre®. Le graphique ci-dessous présente la répartition des émissions de GES, la fertilisation et le carburant représente respectivement 75% et 12% des émissions directes (produites au champs) et indirectes (produites lors de la fabrication).

En ce qui concerne les systèmes de culture, le système biomasse maximum est le système le plus émetteur de GES du a une consommation plus élevée d'azote minérale. Contrairement au système autonomie azotée qui a les plus faibles émissions de GES du a la fertilisation azotée réduite.

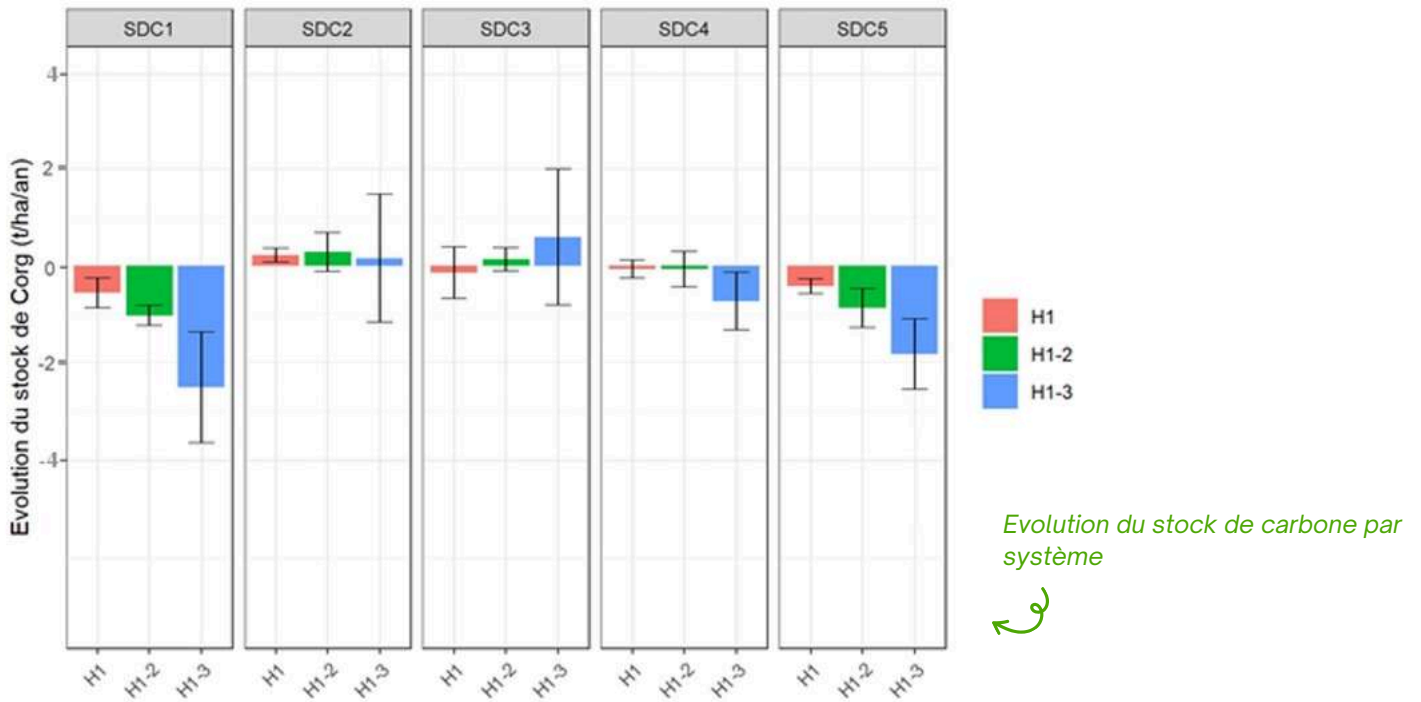


## Variation du stock de carbone

Le graphique ci-dessous montre l'évolution du stock de carbone présent dans le sol entre 2016 et 2020. Cette évolution est mesurée sur 3 profondeurs de prélèvement : H1 (0 à 10cm), H1-2 (0 à 20cm) et H1-3 (0 à 20 cm). On remarque une forte variabilité d'évolution sur les horizons H1-2 et H1-3. On peut observer une diminution de stock de carbone dans le système de référence, SDC1 et dans le système autonomie azotée, SDC2. On observe en revanche une augmentation du stock pour les systèmes TCS, SDC2 et Couvert permanent, SDC3.



# Bilan des premiers essais systèmes



## Indice de Fréquence de Traitement (IFT)

L'IFT est directement repris de notre outil de traçabilité MesP@rcelles. L'indicateur utilisé est le pourcentage de réduction (ou d'augmentation) par rapport à l'IFT moyen de la champagne crayeuse (références champardennaises issues des données du ministère).

IFT de référence par culture

Culture	IFT référence
Colza	6.7
Blé tendre d'hiver	5.6
Betterave	5.1
Pois	4.6
Orge d'hiver	4.1
Orge de printemps	4.1
Luzerne 1 <sup>ère</sup> année	3.3
Luzerne 2 <sup>ème</sup> année	1.2
Tournesol	2.6
Chanvre	0



---

# Bilan des premiers essais systèmes

---

 IFT par système de culture

Système de culture	IFT moyen	Ecart avec l'IFT de référence (%)
SDC 1, Système de référence optimisé	2.8	-39%
SDC 2, Système TCS	3.1	-34%
SDC 3, Système semis sous couvert permanent	3.6	-19%
SDC 4, Système biomasse maximum	3.7	-23%
SDC 5, Système autonomie azotée	2.7	-40%

L'IFT de chaque SDC dépend beaucoup des cultures présentes ; de plus la représentativité de chaque culture n'est pas encore homogène.

Globalement, notre conduite sur la ferme est peu consommatrice de produits phytosanitaires. Le SDC3 est celui qui a le moins réduit l'IFT à cause de la présence plus forte d'adventices et la nécessité de réguler le couvert/les repousses/les adventices lors du semis des cultures en semis direct. Il est toutefois amélioré par la forte proportion de luzerne dans le système. Le SDC5 est le plus performant car il est notamment composé de cultures peu consommatrices.

## Bilan et perspectives

**Système de référence (SDC1) :** Ce système est adapté au contexte champenois mais émetteur de gaz à effet de serre et dépendant de l'azote minérale.

**Système TCS (SDC2) :** Ce système est adapté aux terres de craie et améliore le système de référence par la réduction du travail du sol et des couverts d'interculture. Cependant, il reste lui aussi émetteur de gaz à effet de serre et dépendant de l'azote minérale.

**Système couvert permanent (SDC3) :** Ce système minimise la mécanisation et maximise la biodiversité (vers de terre). Il stocke du carbone via les micro-organismes du sol. Il demande une certaine technique et un temps de transition pour potentiellement atteindre des niveaux de rendement similaires à ceux du système de référence.

**Système biomasse maximum (SDC4) :** Ce système est très consommateur d'énergie et émetteur de gaz à effet de serre. La compensation des émissions n'est viable qu'avec une biomasse de couvert de 4 tonnes (objectif non atteint). Le couvert d'interculture reste un levier important et continuera d'être étudié.

**Système autonomie azotée (SDC5) :** Ce système présente les meilleurs résultats en termes d'émissions de gaz à effet de serre et de rentabilité.

Les résultats de cette 1ère série de systèmes de culture vont permettre de construire de nouveaux systèmes visant à réduire leur impact environnemental tout en conservant leur rentabilité. L'objectif est de tendre vers une agriculture décarbonée et performante.



# Nouvelle méthodologie expérimentale et nouveaux systèmes

Rédaction : Mathieu SIMONNET

## 1. La nouvelle méthodologie expérimentale

### a. Présentation

### b. Une expérimentation en « Scale Up »

### c. Les groupes de travail et la gouvernance

#### i. Groupe de travail comité de pilotage

#### ii. Groupes de travail thématique

#### iii. Ferme élargie

#### iv. Intervenants extérieurs (membres et non membres pour conseil)

## 2. Les nouveaux essais

### a. Les plateformes d'essais.

#### i. La plateforme d'essai couvert d'interculture

#### ii. La plateforme d'essai CIVE d'été

#### iii. La plateforme d'essai luzerne

#### iv. La plateforme d'essai analyse de sève

### b. Les systèmes pilotes

#### i. Système pilote 1 : Autonomie

#### ii. Système pilote 2 : Energie

### c. Système en amélioration continue : Bas-Carbone.



# Nouvelle méthodologie expérimentale et nouveaux systèmes

## La nouvelle méthodologie expérimentale

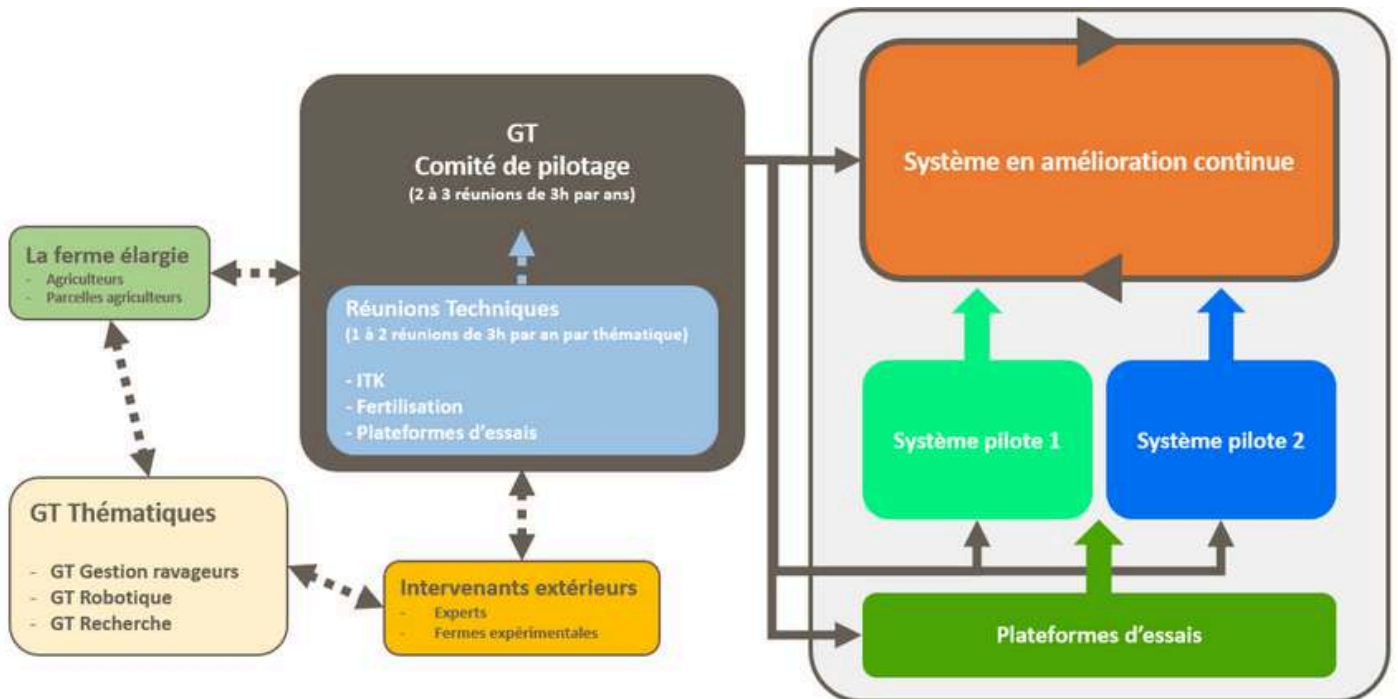
### Présentation

Cette méthodologie a pour objectif de permettre une meilleure implication de nos adhérents dans l'expérimentation agricole afin de produire des résultats en fonction de leurs problématiques. Elle a aussi pour objectif de faciliter l'implantation d'essais de recherche et de développement agronomique ainsi que d'avoir une flexibilité face aux projets pilotés par TERRASOLIS. La ferme expérimentale est un outil de R&D collaboratif.

Les objectifs actuels de la ferme expérimentale sont les suivants :

- Concevoir des systèmes durables maximisant la production de biomasse et minimisant les émissions de GES
- Étudier la diversification économique par la production d'énergie et de services environnementaux
- Transférer les méthodes et les connaissances acquises

Schéma de fonctionnement de la ferme expérimentale



---

# Nouvelle méthodologie expérimentale et nouveaux systèmes

---

## Une expérimentation en « Scale Up »

L'approche scale up (mise à l'échelle) a pour objectif de permettre des expérimentations risquées tout en ayant une bonne gestion du risque. Elle est divisée en 3 parties, la partie laboratoire, la partie pilote et la partie production.

La partie laboratoire, qui constitue la partie la plus risquée, est représentée par des plateformes d'essais. Il s'agit ici de tester des solutions connues ou prometteuses pour lesquelles nous manquons encore de données et de maîtrise.

La partie pilote, qui constitue la partie à risques intermédiaires qui nécessite encore des ajustements, est représentée par nos 2 systèmes pilote. Ces systèmes peuvent être considérés comme des prototypes dans lesquels on cherche à démontrer la faisabilité technique. Ici l'approche est systémique et elle met en interaction les leviers de la rotation, de la fertilisation et des itinéraires culturaux.

La partie production, qui constitue la partie sûre et non risquée, est représentée par notre système en amélioration continue. Ce système est économiquement rentable et transférable, c'est un démonstrateur. Il a pour objectif de montrer la transition d'un système courant de champagne crayeuse vers un système satisfaisant les objectifs de la ferme expérimentale.

L'implantation d'une nouvelle pratique agricole se fait donc par les validations respectives des étapes laboratoire et pilote.

## Les groupes de travail et la gouvernance

La ferme est pilotée par des groupes de travail constitués d'adhérents.

### Groupe de travail comité de pilotage



Ce groupe de travail est le groupe principal. Il a comme objectif le pilotage des essais systèmes et des plateformes. Ce groupe est assisté par des groupes techniques. Actuellement ces groupes techniques sont au nombre de 3 et sont répartis selon les sujets suivants, les itinéraires techniques, la fertilisation et les plateformes d'essais.

### Groupes de travail thématique



Ces groupes de travail sont indépendants et travaillent en parallèle sur des thématiques liées à l'agriculture. Ils sont actuellement au nombre de 3. Le groupe sur la gestion des dégâts de volatiles a pour objectif de trouver des solutions pour limiter les dégâts principalement liés aux volatiles. La robotique vise à utiliser la ferme comme support de développement et à promouvoir la robotique auprès du monde agricole. Enfin, le groupe recherche a pour but de permettre l'utilisation de la ferme comme support à la recherche agronomique et agricole.

---

# Nouvelle méthodologie expérimentale et nouveaux systèmes

---

## Ferme élargie (membres agriculteurs)



La ferme élargie est un groupe d'agriculteurs qui participent à l'expérimentation sur la ferme, en apportant leurs expériences, et qui accueillent des expérimentations chez eux. Ces dites expérimentations sont en lien avec les sujets travaillés par Terrasolis. Ce groupe a aussi pour objectif de faciliter le transfert de connaissance acquise par Terrasolis dans une exploitation réelle.

## Intervenants extérieurs (membres et non membres pour conseil)



Les intervenants extérieurs et experts constituent un groupe moins formel, sollicité de façon ponctuelle et agissant en tant qu'expert pour apporter leurs expertises aux travaux de la ferme expérimentale.

## *Les nouveaux essais*

### Les plateformes d'essais

Les plateformes d'essais proposés ci-dessous sont liées à des leviers identifiés comme permettant une agriculture bas-carbone et pour lesquels il manque encore de résultats d'essais agronomiques

#### La plateforme d'essai couverts d'interculture

Cette plateforme vise à poursuivre l'acquisition de savoirs en couverts d'intercultures sur les espèces à utiliser en sol de craie pour maximiser la biomasse (couvert court et long) et sur les itinéraires techniques tels que l'implantation pour maximiser la germination.

#### La plateforme d'essai CIVE d'été

Cette plateforme a les mêmes objectifs que la plateforme précédente mais sur le sujet des cultures intermédiaires à valorisation énergétique d'été.

#### La plateforme d'essai luzerne

La plateforme luzerne permettra une étude de cette culture sous l'angle plante de service. Les axes suivants pourront être travaillés dans cette plateforme : essai variétés avec des espèces pures et mélangées, essai variétés méthanogènes pour l'association avec CIVE d'hiver, essai variétés résistantes (pour un retour plus rapide), association de la luzerne avec des couverts d'automne (Photosynthèse pendant la dormance), association de la luzerne avec des céréales (luzerne en inter-rang gérée mécaniquement) ainsi que des expérimentations avec la luzerne en tant que fertilisant ou biostimulant (Jus)

#### La plateforme d'essai analyse de sève

Cette plateforme vise à utiliser l'analyse de sève des plantes comme outil de d'aide à la décision pour la nutrition des plantes. L'objectif est de pourvoir identifier par cette méthode des leviers de nutrition permettant de réduire l'usage d'azote minérale (à production égale) et d'améliorer la résistance des plantes aux agressions biotiques et abiotiques.



# Nouvelle méthodologie expérimentale et nouveaux systèmes

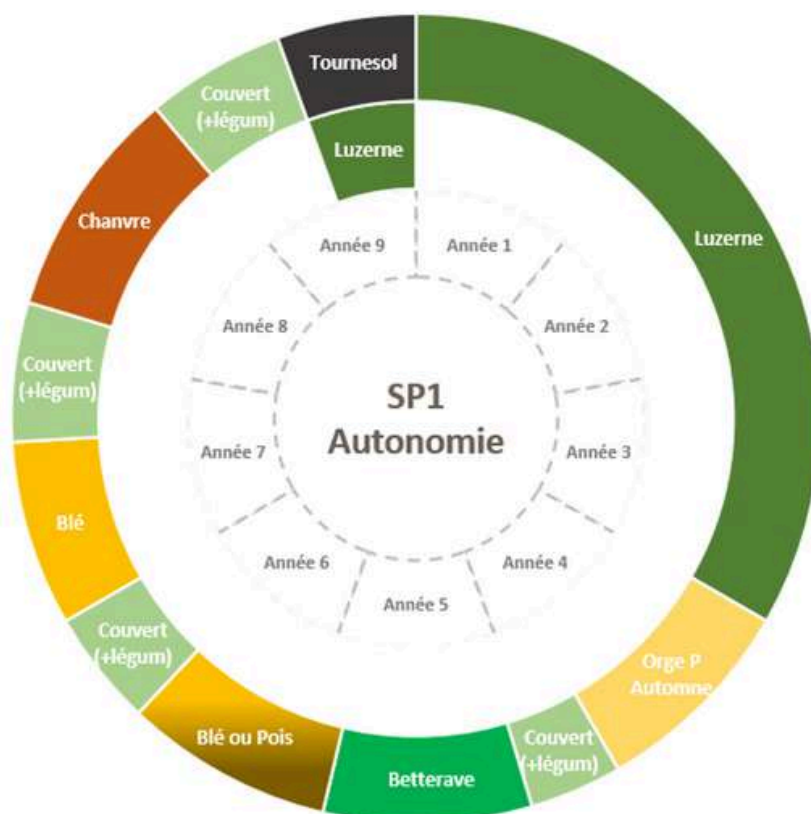
## Les systèmes pilotes

Les systèmes pilotes sont des systèmes avec une démarche de conception par prototypage. Les règles de décision sont formalisées, définies, immuables dans le temps. Il n'y a pas d'évolution possible de l'expérimentation, l'objectif peut ne pas être atteint au terme de l'expérimentation et le pilote ne peut pas utiliser son apprentissage pour faire progresser le système. Il sera possible dans ce type de système de tester des pratiques de fertilisation ou des itinéraires techniques spécifiques sur une durée de 3 ans. Les systèmes pilotes sont constitués de 9 parcelles pouvant accueillir une rotation de 9 ans.

### Système pilote 1 : Autonomie

Le 1er système pilote vise l'autonomie azotée pour répondre à l'objectif bas-carbone. Sa rotation a pour objectif de maximiser la présence de légumineuse et d'intercultures pour réduire les émissions de GES par la réduction de l'usage d'azote minéral avec un retour au sol direct. Elle a aussi, en conséquence de la forte présence de légumineuses, pour objectif de limiter la perte d'azote organique produite par la rotation. Cette rotation est de 9 ans et est constituée des cultures suivantes :

- 2 cultures de légumineuse que sont une luzerne de 3 ans et un pois opportuniste qui pourra être remplacé par un blé selon les conditions d'arrachage de la betterave précédente.
- 2 cultures à faible besoin en azote que sont le chanvre et le tournesol.
- L'orge de printemps semée en automne sélectionnée comme culture d'adaptation au changement climatique.
- Les cultures de blé et de betterave conservées comme cultures représentatives de l'agro-industrie locale.

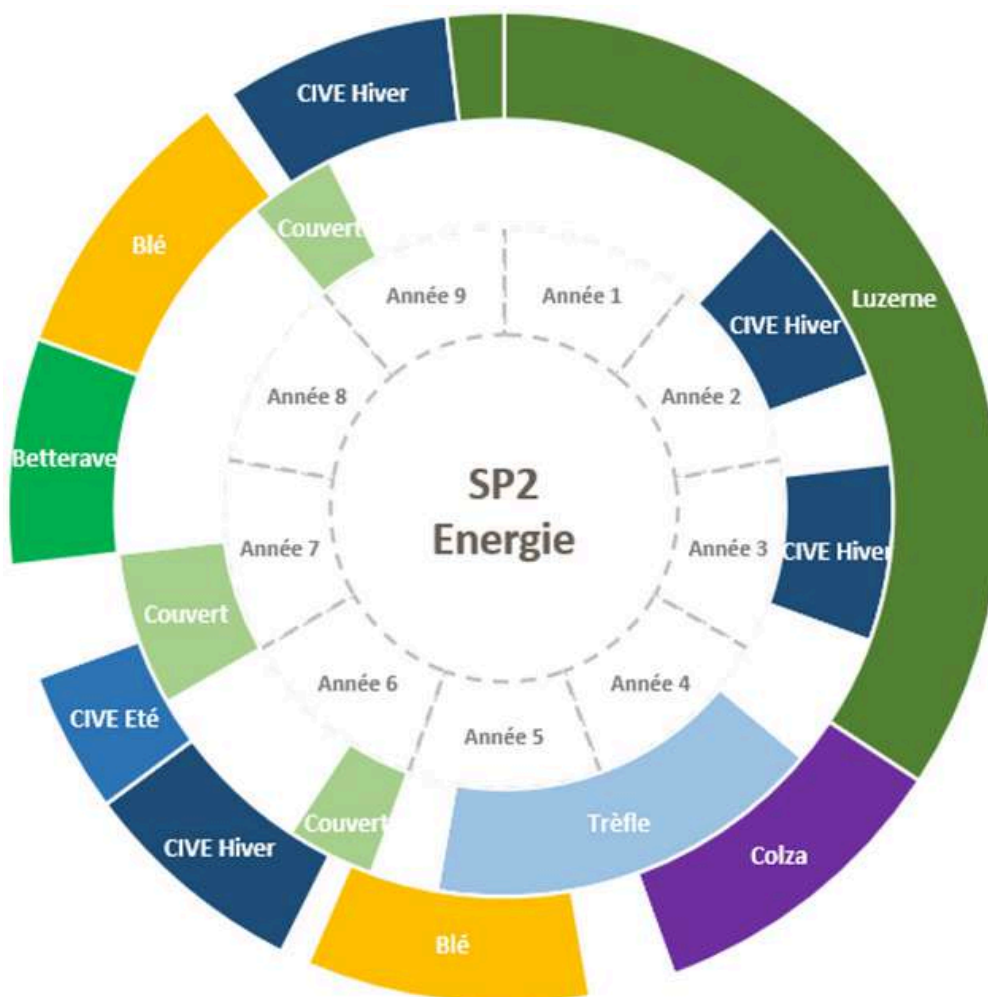


# Nouvelle méthodologie expérimentale et nouveaux systèmes

## Système pilote 2 : Energie

Le 2ème système pilote utilise le levier de la méthanisation pour répondre à l'objectif bas-carbone. Sa rotation a pour objectif de maximiser la production de biomasse pour la production d'énergie pour alimenter le levier de la méthanisation. Elle a pour conséquence la production de digestats permettant la réduction de l'usage d'azote minéral par un retour au sol de celui-ci. Cette rotation est de 9 ans et est constituée des cultures suivantes :

- 4 CIVE d'hiver dont 2 implantées dans la luzerne. Cela implique que les premières coupes de luzerne ne sont pas valorisées en déshydratation mais en méthanisation. Elle comprend aussi une CIVE d'été derrière une CIVE d'hiver.
- 1 luzerne de 3 ans pour limiter l'usage d'azote minéral.
- 1 colza associé avec du trèfle afin de capter l'azote libéré par la luzerne au moment de la destruction de celle-ci. Le trèfle semé en automne deviendra un couvert au moment de la moisson du colza.
- Les cultures de blé et de betterave conservées comme cultures représentatives de l'agro-industrie locale.



# Nouvelle méthodologie expérimentale et nouveaux systèmes

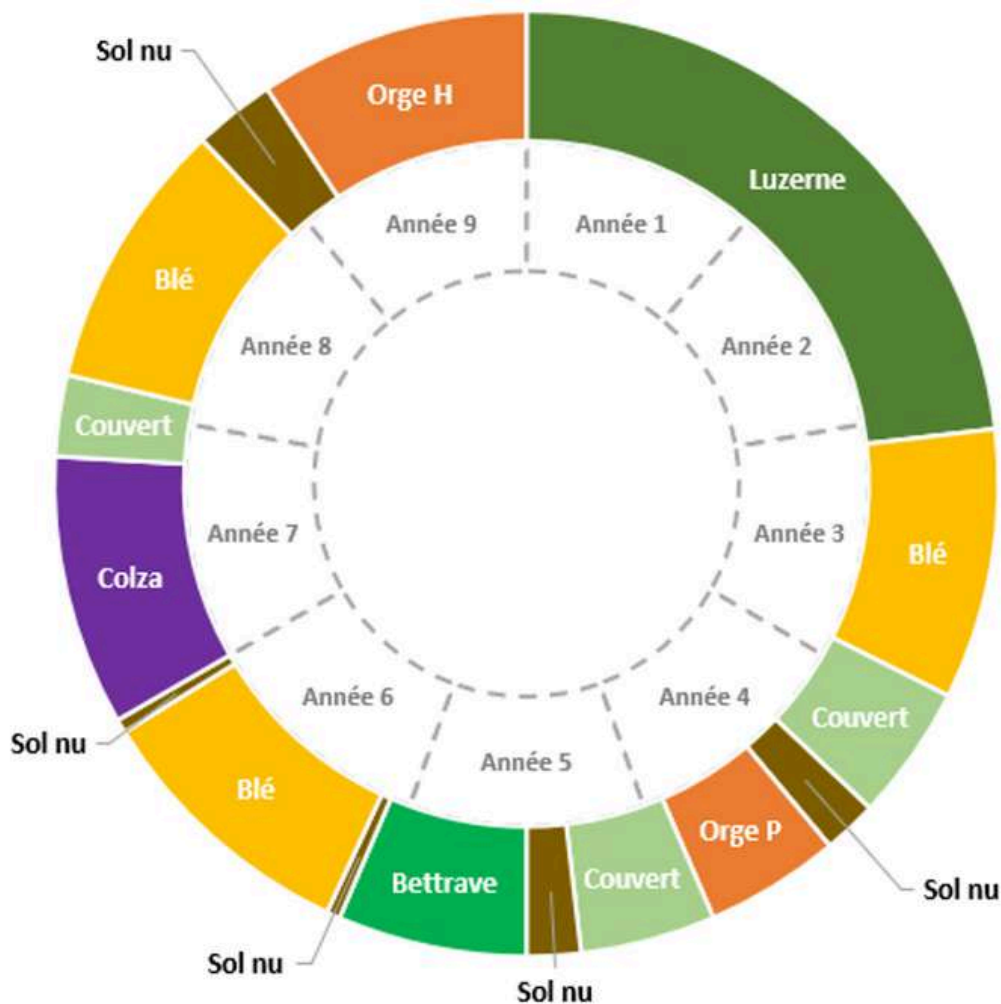
## Système en amélioration continue : Bas-Carbone

C'est un système avec une démarche pas à pas. Le système s'adapte en fonction des résultats observés dans les systèmes pilotes, dans d'autres systèmes extérieurs ou dans le système lui-même pour atteindre les objectifs. Cette approche vise à mettre au point le système le plus optimisé par rapport aux objectifs et à le transmettre.

Ce système a pour objectif de Montrer la transition d'un système courant de champagne crayeuse vers un système plus performant et plus durable en termes d'émissions de GES et de production de biomasse tout en conservant la rentabilité initiale.

Le système en amélioration continue est constitué de 18 parcelles

Schéma du système initial en amélioration continue : Bas-carbone



# Nouvelle méthodologie expérimentale et nouveaux systèmes

## Cartes des parcelles



- **Système pilote N°1 : Autonomie**  
Total 35,7ha – moy 3,96ha – max 5ha – mini 2,6ha  
9 parcelles
- **Système pilote N°2 : Energie**  
Total 36,1ha – moy 4,01ha – max 5,1ha – min 2,6ha  
9 parcelles
- **Système en amélioration continue : Bas-carbone**  
Total 77,2ha – moy 4,06ha – max 9,6ha – min 1,1ha  
18 parcelles
- **Zone événementielle**  
Total 21 ha  
3 parcelles
- **Zone Hors système**  
Total 15 ha
- **Unité de méthanisation**  
Total 6,5 ha

TERRALAB - Ex BA 112

*Terrasolis Farm*



# Nouvelle méthodologie expérimentale et nouveaux systèmes

## Indicateurs et analyses

Les indicateurs visent à évaluer la performance des systèmes par rapport aux objectifs agricoles, et environnementaux de la ferme expérimentale. Ces objectifs sont la maximisation de la production de biomasse, la réduction des émissions de GES et la durabilité.

### Indicateurs de performances systèmes

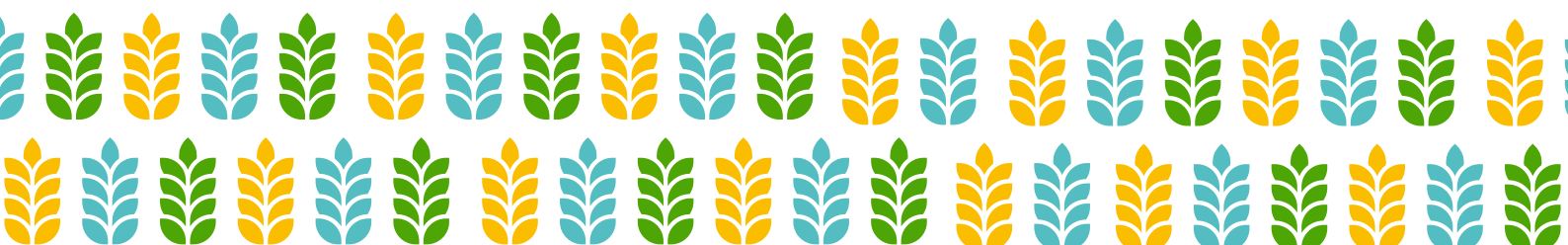
Les indicateurs présentés ci-dessous seront déployés en fonction du temps travail et des budgets disponibles à partir de 2024.

Tableau des indicateurs de performances des systèmes de culture

Définition des indicateurs		Moyens d'évaluation des indicateurs		
Indicateurs d'évaluation de performances agricoles (Production de biomasse, faibles émissions GES, durabilité)	<b>Performance Economique</b>	Analyse de la rentabilité	Comptabilité, Outil Systerre, Outil de traçabilité	
	<b>Performance Agronomique</b>	Evolution du sol de craie	<b>Evolutions Chimiques et MO :</b> - Analyse de sols : disponibilité des éléments, lixiviation - Analyse de la MO (stock et type de MO)	<b>Evolutions physiques du sol :</b> - Mesures de tassement du sol - Observation de la structure - Suivis du travail du sol
		Santé végétale	Observations terrain et tours de plaine	
		Qualité produit	Mesure des critères commerciaux de collecte	
	<b>Performance Energétique</b>	Consommation d'Énergie	Quantité de fertilisants utilisés, Carburant total consommé	
		Production d'Énergie	Mesures des rendements et des biomasses produites, Mesures de calories et protéines alimentaire	
	<b>Performance Environnementale</b>	Pollution	Emissions de GES, IFT, Pertes azotées, Balance globale azotée	
		Biodiversité	Analyse biologique de sol, Observation et comptage, Piégeage	
		Adaptation au changement climatique	Analyse météo, Mesures des rendements et des biomasses produites, Mesures de disponibilité en eau	
	<b>Indicateur de valorisation sociale</b>	Transfert des connaissances	- Nombre d'événements organisés - Nombre de personnes présentes	
Sensibilisation à l'agriculture Bas-carbone		- Sondage et retour d'expérience - Engagement de la ferme expérimentale dans démarches de valorisations Bas-Carbone		
Paievements pour services environnementaux		- ACV ferme expérimentale, ACV système		

### Analyses et données


Les analyses présentées seront réalisées en fonction des indicateurs choisis.



# Nouvelle méthodologie expérimentale et nouveaux systèmes

## Analyses et données

Les analyses présentées seront réalisées en fonction des indicateurs choisis

Tableau des analyses 

Analyses des sols	Mesures tous les 3 ans	Annuelles	Mesures selon ITK	Mesures initiales
	<b>Analyse chimique</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Azote (Dumas, Kjeldahl)</li> <li>Phosphore (Olsen, Joret-Hébert)</li> <li>K, Ca, Mg, Na échangeable</li> <li>Carbonates Totaux</li> <li>Cu, Fe, Mn, Zn (EDTA)</li> <li>Bore (eau bouillante)</li> <li>CEC (Cobalti, Metson)</li> <li>Carbone organique total</li> <li>pH</li> </ul>	<b>Analyse biologique</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Biomasse microbienne</li> <li>Biomasse fongique</li> <li>Fractionnement de la MO</li> <li>Vers de terre</li> </ul>	<b>Analyse azote</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Reliquat sortie hiver</li> <li>Reliquat après récolte</li> <li>Reliquat début drainage</li> </ul>	<b>Analyse de structure</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Test bêche (VESS)</li> <li>Profil fourches</li> <li>Pénétrömètre</li> <li>Densité</li> <li>Besoin en eau</li> </ul>
Analyses végétales	Mesures Annuelles	Analyse des productions		
	<b>Analyse chimique sur MS</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Azote</li> <li>Phosphore</li> <li>Potassium</li> <li>Magnésium</li> <li>Calcium</li> <li>Sodium</li> <li>Cuivre</li> <li>Zinc</li> <li>Manganèse</li> <li>Fer</li> <li>Bore</li> <li>Carbone</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Biomasse résidus et couvert (MS)</li> <li>Rendement grain/espèce</li> <li>Qualité (PS, %P, Calibrage, PMG)</li> <li>Rendement résidus/espèce</li> <li>Analyse nutritionnelle</li> </ul>		
Observations météo et ITK	Mesures hebdomadaires	Mesures continues		
	<b>Tour de plaine</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Levée des semis</li> <li>Stades des cultures</li> <li>Pressions maladies</li> <li>Pressions adventices</li> <li>Photographies</li> <li>Température de sol (parcelle)</li> <li>Pression ravageur &amp; piégeage</li> </ul>	<b>ITK</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Traçabilité phytosanitaire</li> <li>Traçabilité fertilisation</li> <li>Traçabilité amendements</li> <li>Traçabilité espèce et variété</li> <li>Matériels utilisés</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Profondeur de travail</li> <li>Vitesse de travail</li> <li>Consommation de carburant</li> <li>Opérateur</li> </ul>	<b>Climats</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Température de l'air</li> <li>Température du sol</li> <li>Rayonnement solaire</li> <li>Vitesse du vent</li> <li>Orientation du vent</li> <li>Humectation foliaire</li> <li>Humidité air</li> <li>Pluviométrie</li> </ul>

## Méthodologie d'acquisition de données

La méthodologie d'acquisition de données présenté ci-dessous permettra de recueillir les données terrain en une base de données afin de pouvoir alimenter les indicateurs. Cette acquisition de données terrain sera géolocalisée et se fera au point représentant la résistivité moyenne de la parcelle.

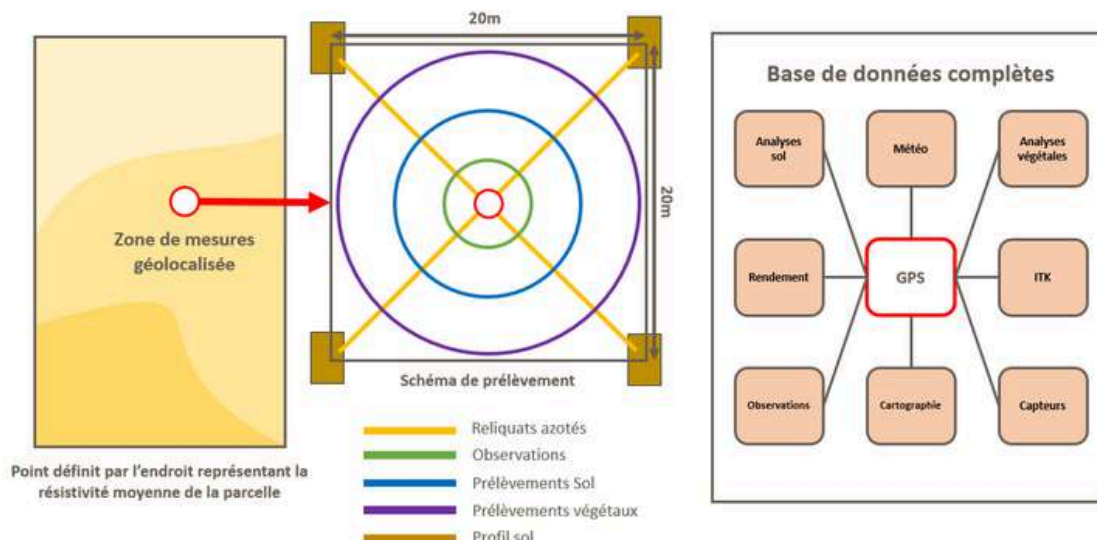



Schéma de la méthodologie d'acquisition de données 

# Synthèse de l'essai système AGRERE



Rédaction : Cassandre GAUDNICK

## Contexte

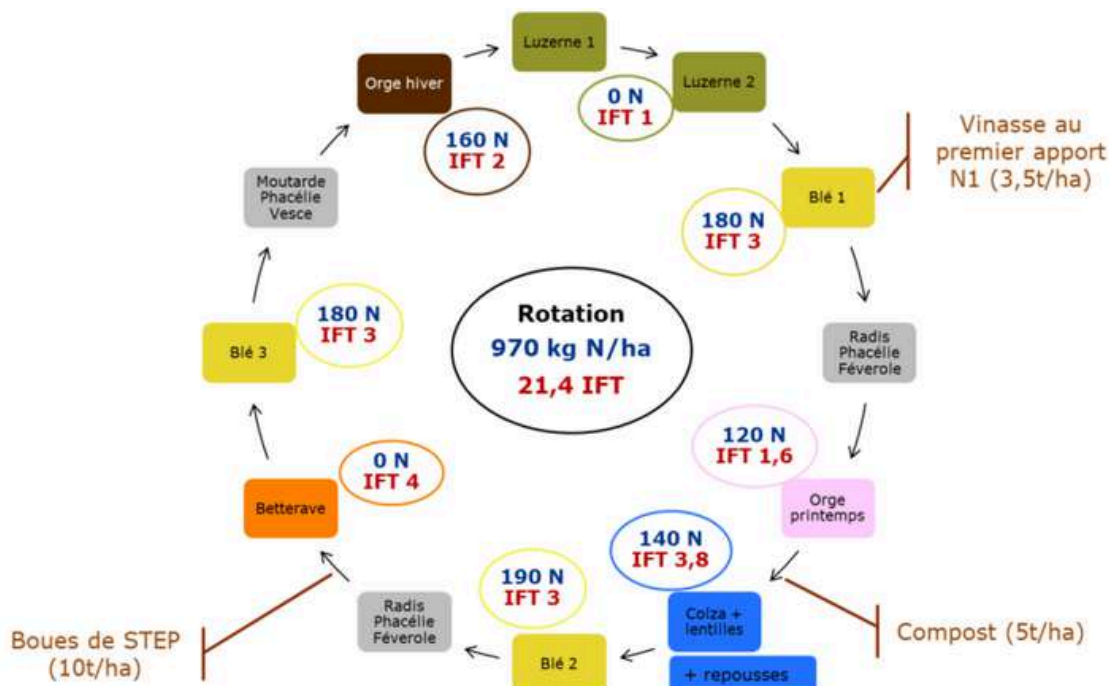
Les performances du modèle agricole conventionnel en grandes cultures sont notamment fondées sur l'utilisation croissante d'intrants de synthèse comme les engrais minéraux et les produits phytosanitaires. Toutefois, ce modèle montre des limites économiques (volatilité des prix, disponibilité des ressources...) et environnementales (émissions de gaz à effet de serre, pollution...). Il est donc essentiel d'intégrer dès aujourd'hui ces enjeux en concevant des systèmes de culture capables de boucler au maximum les cycles des éléments (carbone, azote, phosphore) et en utilisant des gisements renouvelables afin de garantir la pérennité des systèmes de culture. Cette démarche a pour but d'améliorer la résilience des exploitations agricoles, en cohérence avec la feuille de route de l'économie circulaire.

Dans ce contexte, l'essai AGRERE (AGriculture à stratégie d'Economie, de Recyclage et d'Entretien des ressources) a été mis en place avec les objectifs suivants par rapport au système agricole conventionnel de Champagne crayeuse : i) réduire de 25% la fertilisation en azote minéral à l'échelle de la rotation, ii) supprimer la fertilisation en phosphore minéral et iii) réduire de 50% l'IFT des produits phytosanitaires conventionnels à l'échelle de la rotation.

## Matériels et méthodes utilisés

Implanté sur une surface d'environ 16 ha sur la ferme expérimentale de TERRASOLIS de 2018 à 2022, l'essai système AGRERE est découpé en 4 parcelles (P81, P82, P83 et P84) d'environ 4 hectares chacune. Cette taille a été choisie pour que les agriculteurs puissent travailler avec leur propre matériel et ainsi tester la faisabilité des pratiques en conditions agricoles réelles.

L'essai a été mis en place en 2018 pour une durée de 9 ans correspondant au cycle de la rotation (figure 1)



# Synthèse de l'essai système AGRERE



Initialement, le sainfoin était présent à la place de la luzerne dans la rotation du fait de ses faibles besoins en phosphore et potassium qui répondaient aux objectifs de l'essai. Toutefois, le débouché du sainfoin n'a pas pu être pérennisé et la luzerne remplace le sainfoin depuis la récolte 2021. Ainsi, les cultures s'enchainent dans les parcelles comme décrit dans le tableau 1.

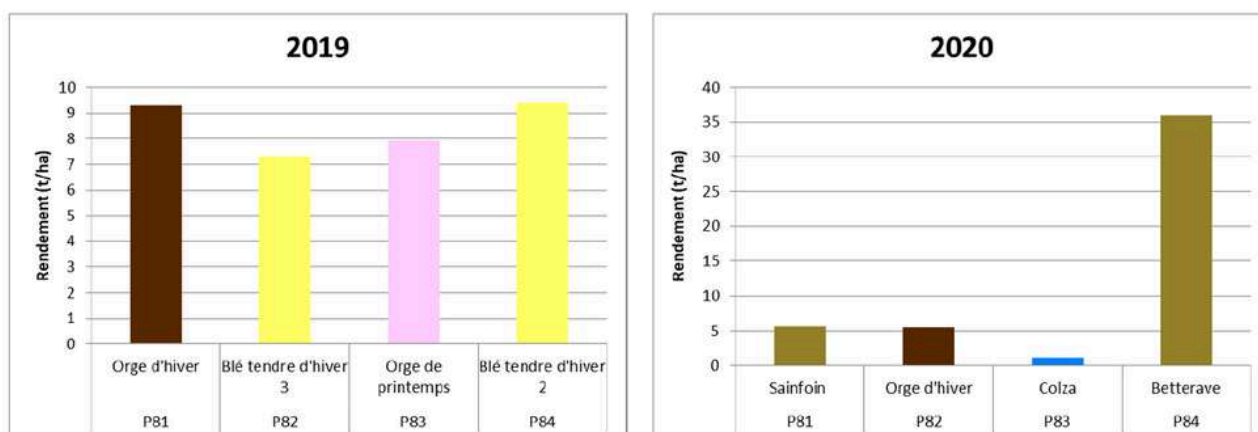
Année	Parcelle P81	P82	P83	P84
2019	Orge H	Blé 3	Orge P	Blé 2
2020	Sainfoin 1	Orge H	Colza	Betterave
2021	Blé 1	Luzerne 1	Blé 2	Blé 3
2022	Orge P	Luzerne 2	Betterave	Orge H
2023	Colza	Blé 1	Blé 3	Luzerne 1
2024	Blé 2	Orge P	Orge H	Luzerne2
2025	Betterave	Colza	Luzerne 1	Blé 1
2026	Blé 3	Blé 2	Luzerne 2	Orge P
2027	Orge H	Betterave	Blé 1	Colza

Tableau 1 : Présence des cultures sur chaque parcelle au cours de l'essai

Pour atteindre les objectifs fixés de réduction de fertilisation minérale, les leviers testés portent sur la forme d'engrais d'azote minéral (principalement ammonitrate en substitution à la solution azotée), le pilotage de la fertilisation avec un OAD, la mise en place des couverts végétaux en interculture et en cultures associées, l'insertion de légumineuses, la restitution et l'incorporation des résidus agricoles dans le sol et les apports de matières organiques exogènes (boues de STEP, vinasses et composts dans l'idée de remplacer ces derniers par des digestats dès que possible). En complément, les leviers mobilisés pour atteindre l'objectif de réduction de moitié de l'IFT sont l'utilisation d'un OAD pour les traitements phytosanitaires, le recours au désherbage mécanique et aux micro-doses, et le choix des variétés.

## Résultats

Les rendements obtenus lors des quatre premières années de l'essai de 2019 à 2022 (figure 2) sont proches mais restent quand même plus faibles que les rendements moyens obtenus dans les autres essais de Terrasolis farm. Cette baisse de rendement est surtout marquée en 2020 sur l'orge d'hiver (expliquée par le manque de pluie pour valoriser l'azote au moment de la fertilisation), le colza (due à la pression des pigeons) et la betterave (à cause de la jaunisse) et également en 2022 sur l'orge de printemps due à la sécheresse au printemps.

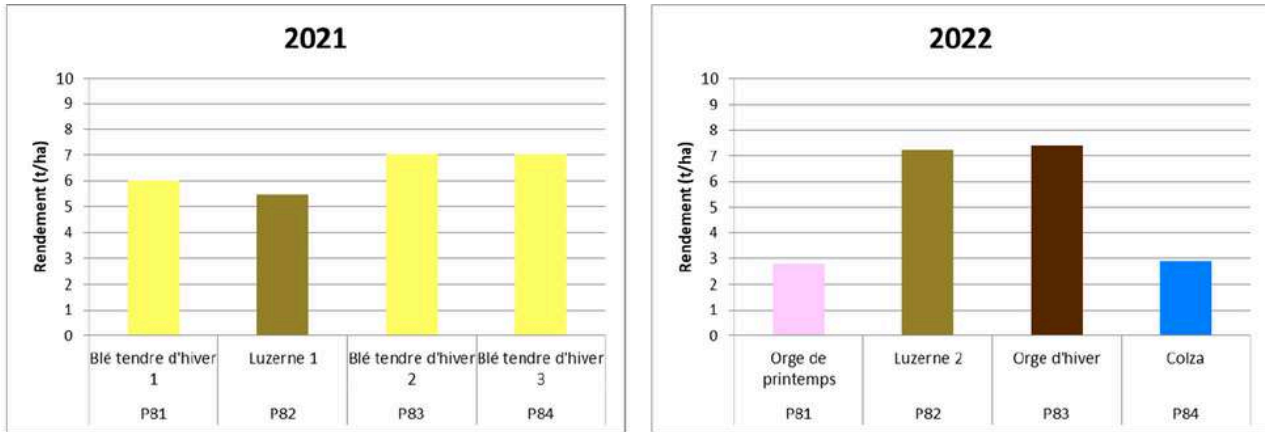




# Synthèse de l'essai système AGRERE

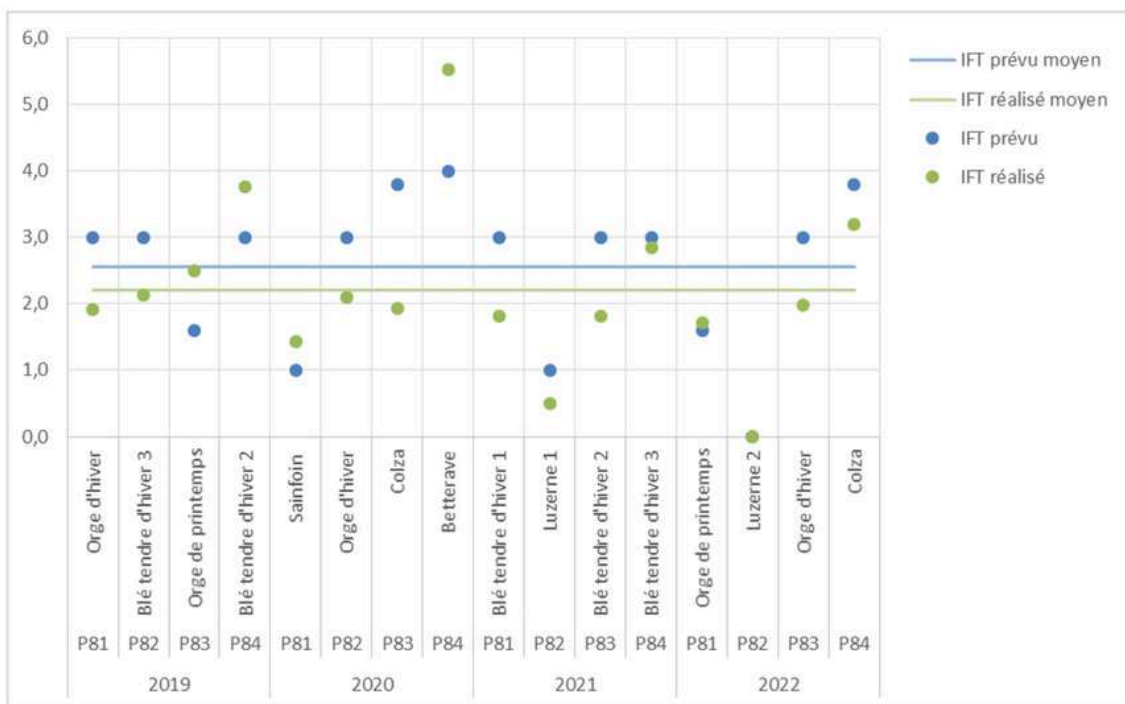


Rendement des différentes cultures de 2019 à 2021



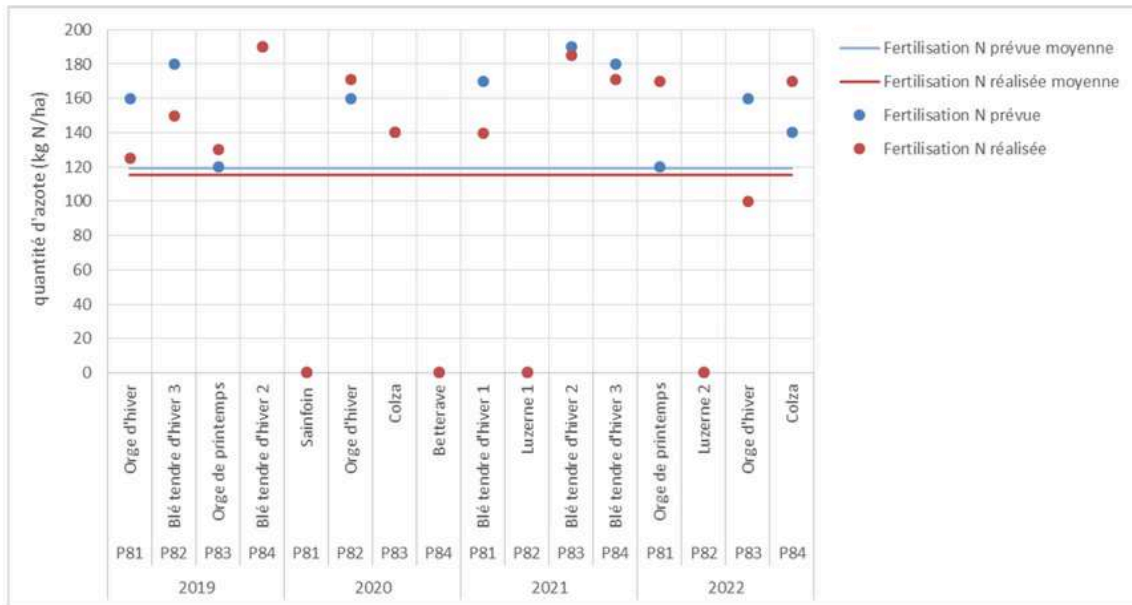
Les valeurs des IFT et des fertilisations azotées minérales prévus (c.-à-d. a priori) et réalisés (c.-à-d. a posteriori) sur chaque culture au cours des 4 années sont présentées respectivement dans la figure 3 et 4. En moyenne sur ces 3 années, l'IFT réalisé du système AGRERE est encore plus faible que l'IFT prévu pour correspondre à une réduction prévue de 50%. En détaillant par cultures, les objectifs d'IFT sur orge de printemps et betterave (jaunisse en 2020) sont les plus difficiles à atteindre mais sont compensés par des cultures comme l'orge d'hiver, le colza et parfois le blé, pour lesquelles l'IFT a été fortement réduit.

De même, les quantités d'azote minéral apporté dans le système AGRERE de 2019 à 2022 correspondent bien à une baisse de 25% (apport réalisé de 115 kg N/ha/an en moyenne contre apport prévu de 120 kgN/ha/an en moyenne pour atteindre l'objectif fixé).



IFT prévus et réalisés de chaque culture ainsi que les IFT moyens prévus et réalisés de 2019 à 2022

# Synthèse de l'essai système AGRERE



Fertilisation azotée minérale prévue et réalisée sur chaque culture ainsi que les fertilisations moyennes prévues et réalisées de 2019 à 2022



## Résultats

Globalement, de 2019 à 2022, nos objectifs de réduction de 25% de la fertilisation azotée minérale et de 50% de l'IFT ont été réalisés sur l'ensemble des cultures en place, avec toutefois des rendements plus faibles que ceux observés pour le secteur. Cependant, un bilan global du système ne pourrait être réalisé qu'à la fin des 9 ans de la rotation, en intégrant des indicateurs qui s'évaluent sur un pas de temps long.



# Résultat de l'étude de la méthode d'analyse ROCK EVAL

Rédaction : Nicolas BOUTON / Jean-Christophe MOUNY

En partenariat avec :



## Contexte

L'analyse thermique Rock-Eval® est un instrument de laboratoire automatisé qui permet de caractériser le carbone et la matière organique des sols, afin de mesurer la qualité et la santé des sols.

La méthode Rock-Eval/PartySoc est la seule méthode disponible pour analyser le carbone organique et minéral sans besoin d'attaque acide préalable pour éliminer les carbonates.

L'analyse Rock-Eval® est, en plus, la seule méthode analytique donnant accès en même temps à la quantité de COT dans le sol (Carbone Organique Total), et à la part biologiquement active de la matière organique, grâce au logiciel PartySoc.

Le Rock-Eval fournit également des indications sur la réactivité thermique des composés organiques et carbonatés des roches et des sols ainsi que des courbes d'émissions de CxHy, CO, CO2 et SO2 permettant une interprétation avancée de la nature de l'échantillon. Par ailleurs, l'analyse Rock-Eval est couplée avec un logiciel d'interprétation intégrant le modèle d'auto-apprentissage (Intelligence Artificielle) PartySoc développé par l'ENS/INRAE et permettant d'extraire la fraction active et la fraction stable du carbone des sols. Les résultats issus du modèle PartySoc peuvent ensuite être entrés en paramètres d'entrée pour les logiciels AMG ou STICS (INRAE) pour prédire l'évolution des sols à moyen et long terme.

## Etude sur Terrasolis Farm

La ferme expérimentale Terrasolis effectue un suivi annuel de ses parcelles et de leurs différents horizons (typiquement 0-10, 10-20, 20-40 et 40-60cm de profondeur). Les 45 échantillons de suivi prélevés sur 12 parcelles différentes en 2016 ont été envoyés chez Vinci Technologies pour analyse de la matière organique au Rock-Eval, pour déterminer :

- La teneur de carbone organique total
- La teneur de carbone inorganique (CaCO3)
- La fraction stable à 100 ans du carbone organique, calculé par le modèle PartySoc v2, Cecillon et al 2021 ([Geosci](#))
- La fraction labile de carbone, c'est-à-dire la part de matière organique utile à la vie du sol.



## Méthode

Le procédé analytique Rock-Eval consiste en une pyrolyse puis une oxydation de chaque échantillon (typiquement 60mg) dans deux fours contrôlés en température, et équipés de détecteurs, qui permettent de réaliser une analyse thermique et une analyse élémentaire de carbone.

PartySoc est un modèle entraîné sur des échantillons de jachères nues, modélisant la respiration naturelle des sols, qui permet de calculer la fraction de carbone qui est piégée à plus de 100 ans dans des sols. Cette valeur peut ensuite être renseignée comme variable d'entrée dans les logiciels Simeos-AMG, et STICS, pour rendre plus robustes les prédictions de teneur en carbone à 100 ans, en fonction du pédoclimat et des pratiques agricoles ([Kanari et al., 2022](#)).

# Résultat de l'étude de la méthode d'analyse ROCK EVAL

En partenariat avec :



## Résultats

Les échantillons comprennent tous entre 0.4 et 2.5% de carbone organique total (COT).

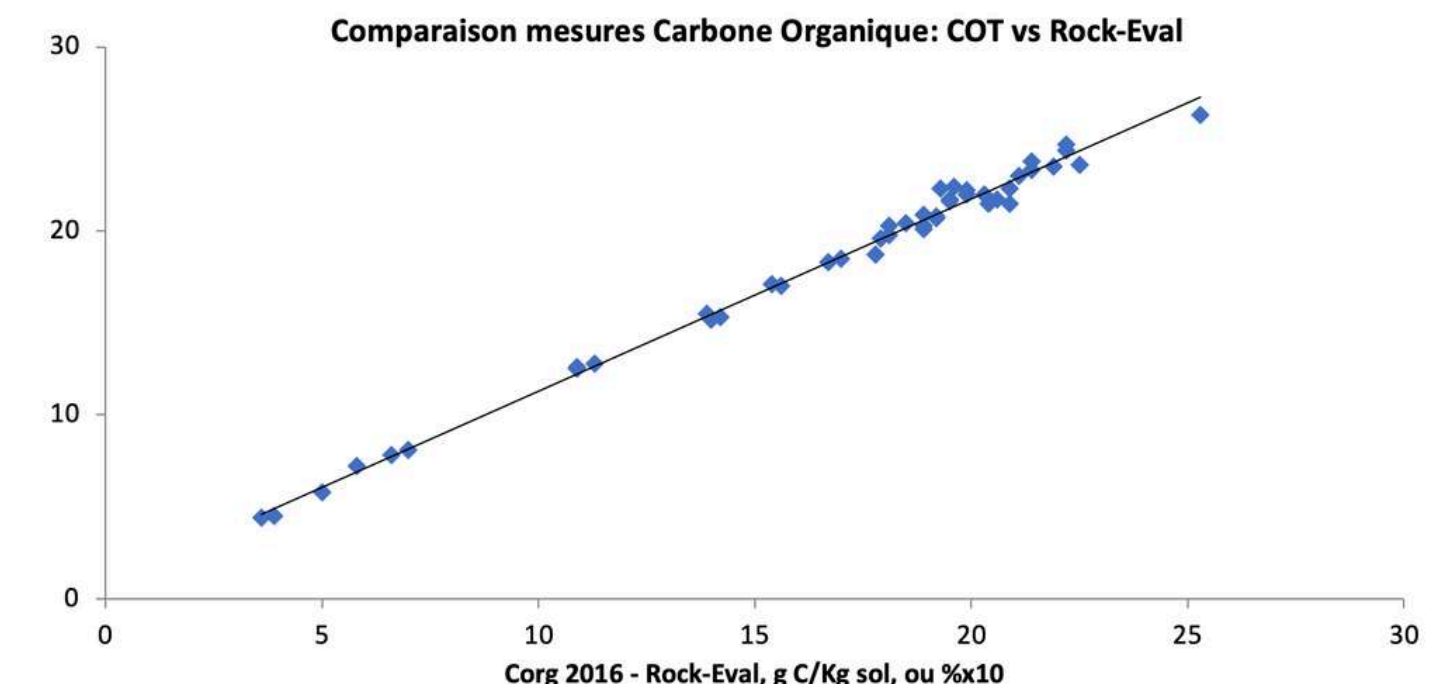
Les mesures Rock-Eval mettent en évidence que les sols contiennent aussi entre 7 et 11% de carbone inorganique, qui est identifié au Rock-Eval comme étant intégré à du calcaire ( $\text{CaCO}_3$ ), c'est-à-dire que les sols sont constitués de 60 à 90% de calcite.

Parmi le carbone organique, les échantillons de cette ferme ont un taux de carbone stable de 50% pour la plupart des échantillons, ce pourcentage pouvant monter jusqu'à 60-70-80% pour certains échantillons.

La comparaison des mesures de COT réalisées avec le Rock-Eval (sur les échantillons de sols bruts, sans attaque acide préalable) avec les mesures de COT réalisées préalablement avec la méthode de référence, l'analyse élémentaire, aussi appelée CHNS, ou combustion sèche (Dumas), décrite dans la norme NF ISO 10694, montrent une très bonne corrélation (cf. fig 1).

FIGURE 1 : Comparaison des mesures de Carbone Organique sur les 45 échantillons de Terrasolis Farm par analyse élémentaire versus Corg Rock-Eval ↻

### Corg 2016 terrasolis



Sur la figure 2, la tendance naturelle des sols à avoir des valeurs de COT plus basses avec la profondeur est globalement observée sur la ferme Terrasolis, toutes parcelles confondues. De même, le MINC (teneur en Carbone minéral, contenu dans les carbonates, cf. code couleur des points) augmente avec la profondeur, en se rapprochant de la roche mère (la ferme est sur un plateau calcaire) : les points rouges ayant la plus forte teneur en carbonates sont tous situés dans les horizons les plus profonds (40-60cm), cf. aussi annexe A.

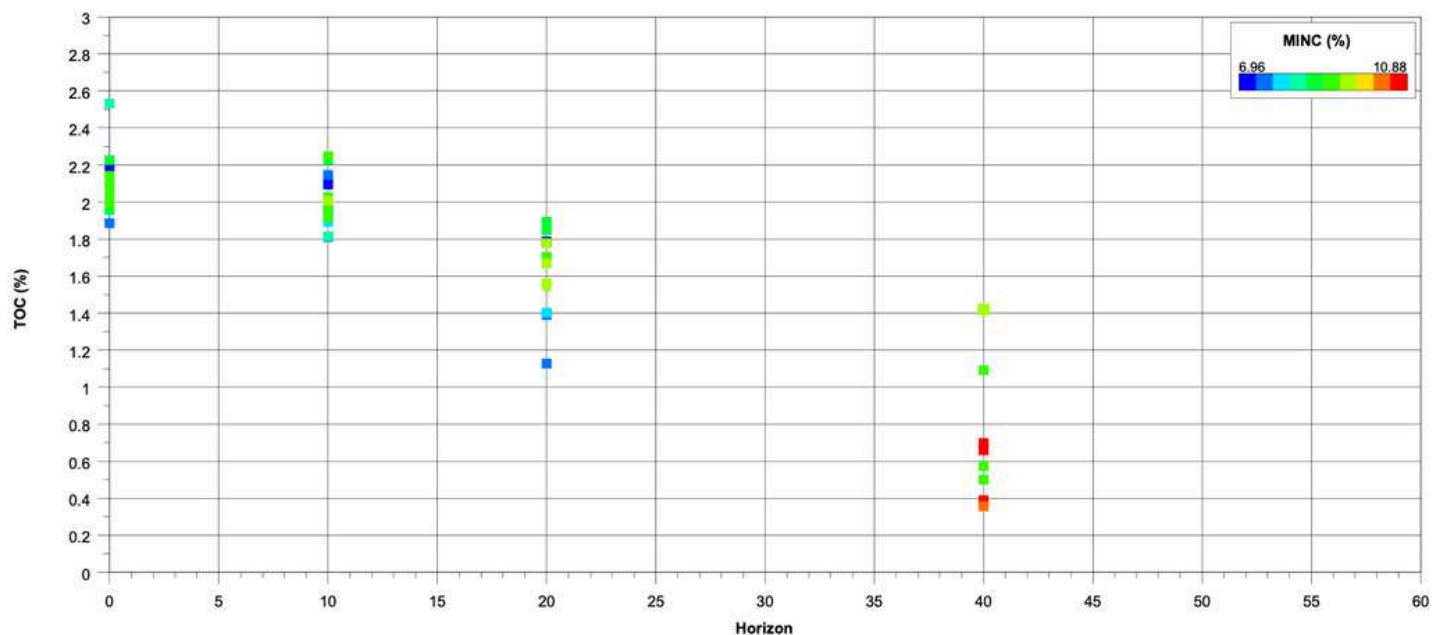


# Résultat de l'étude de la méthode d'analyse ROCK EVAL

En partenariat avec :



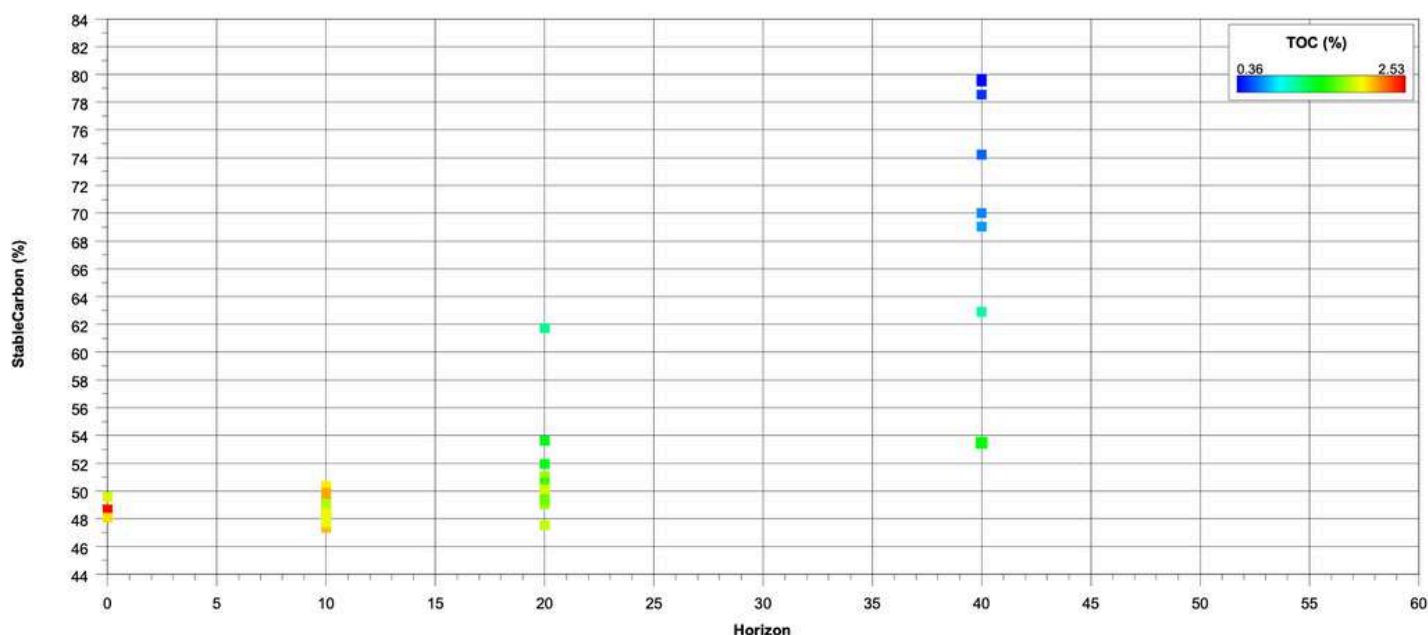
FIGURE 2 : Variations du COT% (ordonnées) et de la teneur en carbone minéral (MINC en code couleur, bleu pour faible, et rouge pour fort), en fonction de la profondeur des horizons mesurés, toutes parcelles confondues.



Si la teneur en carbone organique est l'un des paramètres principaux de la mesure d'un sol, l'instrument permet également d'avoir accès à d'autres informations quantitatives et qualitatives sur les sols.

Par exemple, de la même manière qu'il est habituel que les teneurs en carbone organique baissent avec la profondeur, la part de carbone biogéochimiquement stable, à durée de vie plus longue, ici calculée à plus de 100 ans avec le modèle IA PartySoc, basée sur les analyses Rock-Eval, augmente avec la profondeur, cf. figure 3.

FIGURE 3 : Graphique représentant la quantité (TOC) et la stabilité du carbone en fonction de la profondeur de sol (Horizon)



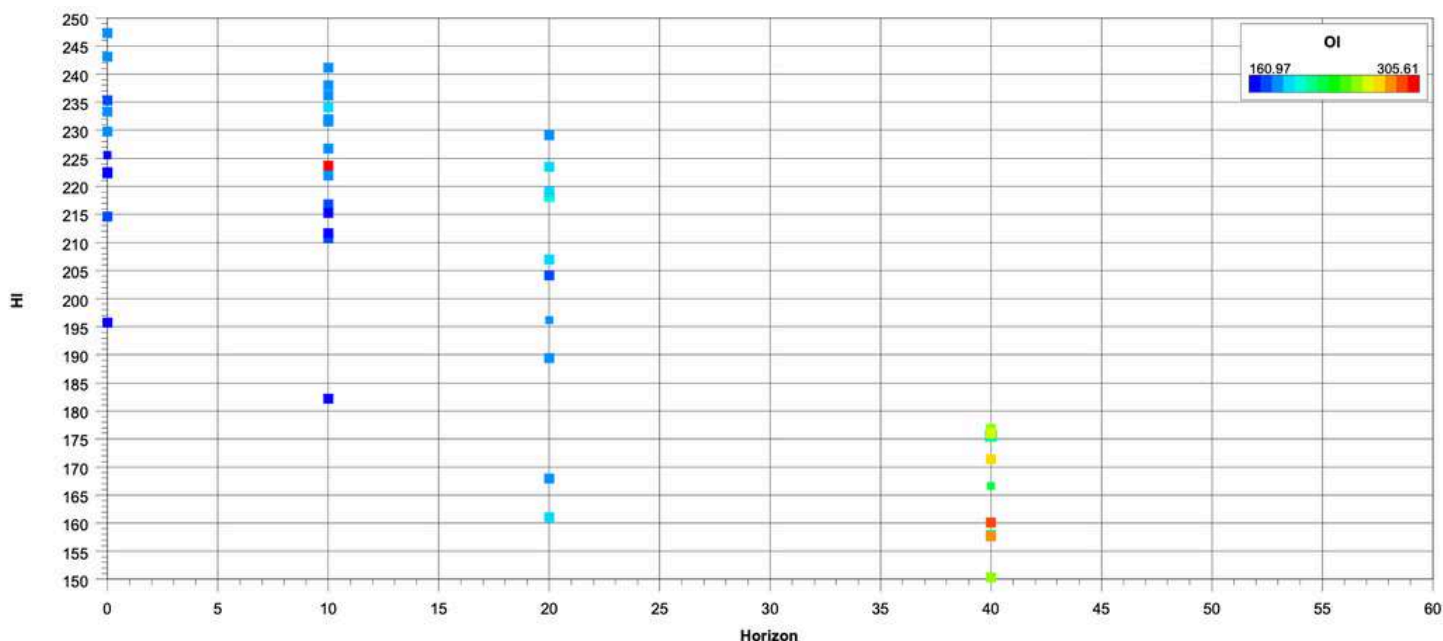
# Résultat de l'étude de la méthode d'analyse ROCK EVAL

En partenariat avec :



On remarque que plus l'horizon est profond (en abscisse), moins il y a de carbone (cf. TOC en code couleur), et plus il est stable (axe des ordonnées), moins il est biologiquement accessible.

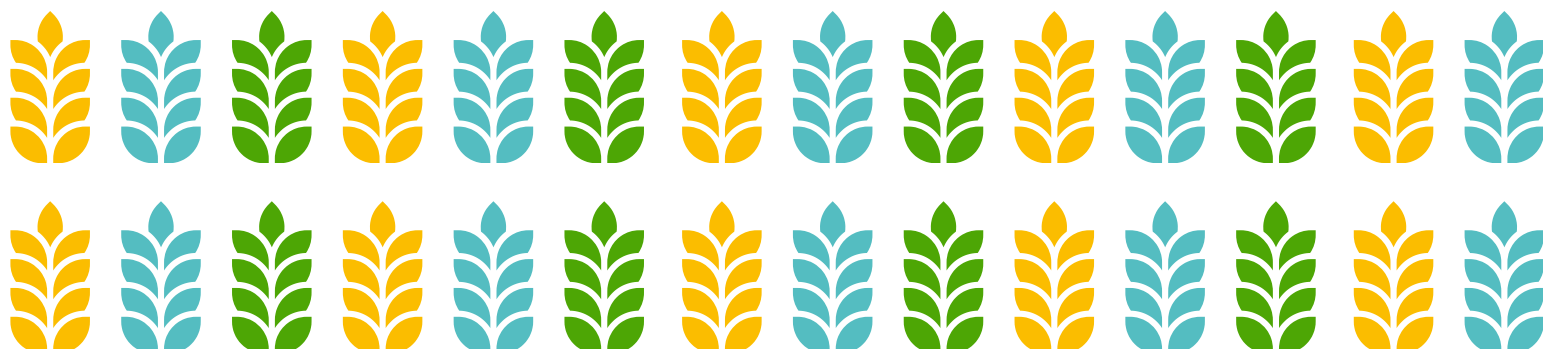
FIGURE 4 : Graphique représentant la quantité d'hydrogène (HI) et d'oxygène (OI) en fonction de la profondeur de sol (Horizon) ↻



On peut constater sur ce graphique que plus l'horizon est profond, plus la matière organique est pauvre en hydrogène (HI, un proxy du rapport élémentaire H/C), et plus la matière organique est oxygénée/oxydée (OI, un proxy du rapport élémentaire O/C), cf. code couleur.

Très utilisé en géochimie, le diagramme de van Krevelen (cf. fig 5), aussi appelé HIxOI, montre autrement que la teneur en carbone attaché à de l'oxygène (OI, Oxygen Index) augmente avec la profondeur (carbone oxydé, déjà remanié par la vie du sol), et que la teneur en hydrogène de la matière organique du sol (HI, Hydrogen Index) baisse avec la profondeur (observation déjà largement partagée par ailleurs).

En outre, il est bien visible que la matière organique des parcelles de la ferme est d'origine terrestre (type III : plantes), peu matures.



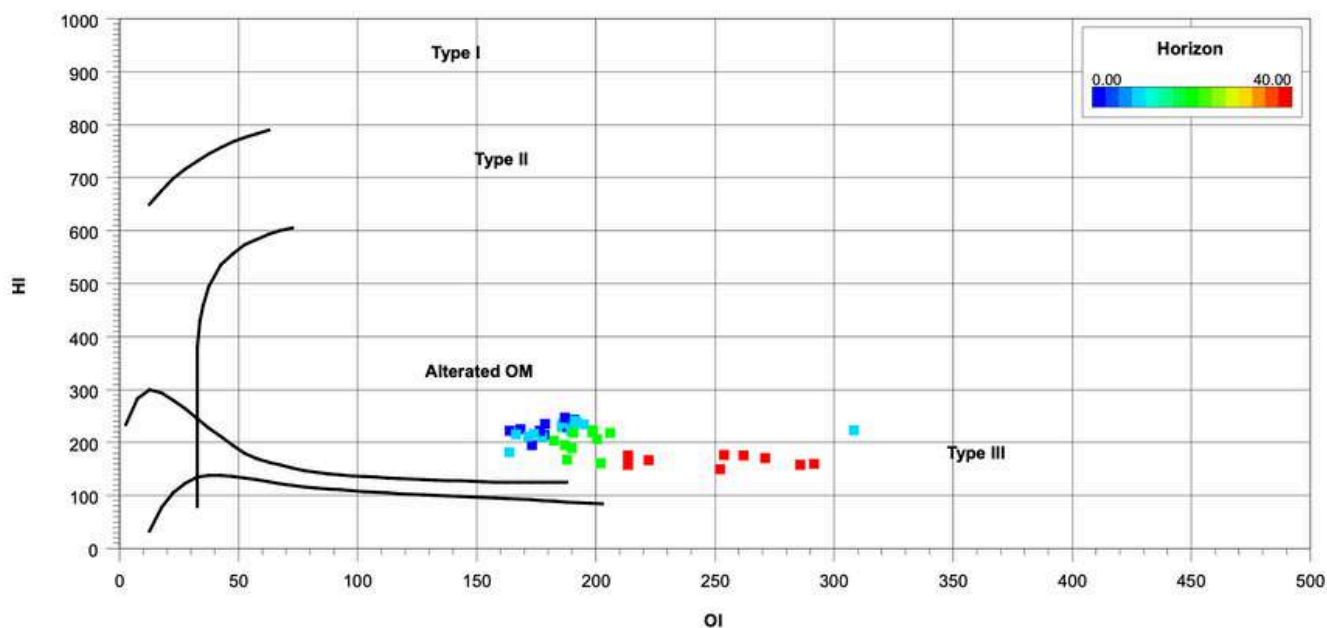
# Résultat de l'étude de la méthode d'analyse ROCK EVAL

En partenariat avec :



On remarque que plus l'horizon est profond (en abscisse), moins il y a de carbone (cf. TOC en code couleur), et plus il est stable (axe des ordonnées), moins il est biologiquement accessible.

FIGURE 5 : Diagramme de van-Krevelen (horizons en code couleur), type I : MO d'origine lacustre, type II : MO d'origine marine, type III : MO d'origine terrestre. ↻



Une autre représentation possible est le diagramme R-I (Sebag et al : R comme Réfractaire, ie stable, et I comme Immature, ie labile, matière organique fraîche) sur lequel on peut observer l'apport de matière organique exogène : si les points du diagramme R-I de la matière organique sont alignés, et corrélés avec la profondeur (cf. fig 6), il s'agit d'une indication que la matière organique en surface est de même nature que celle en profondeur, qui a évolué naturellement avec le temps et avec la biologie du sol (aucun apport extérieur de matière organique n'est détecté sur la ferme Terrasolis).

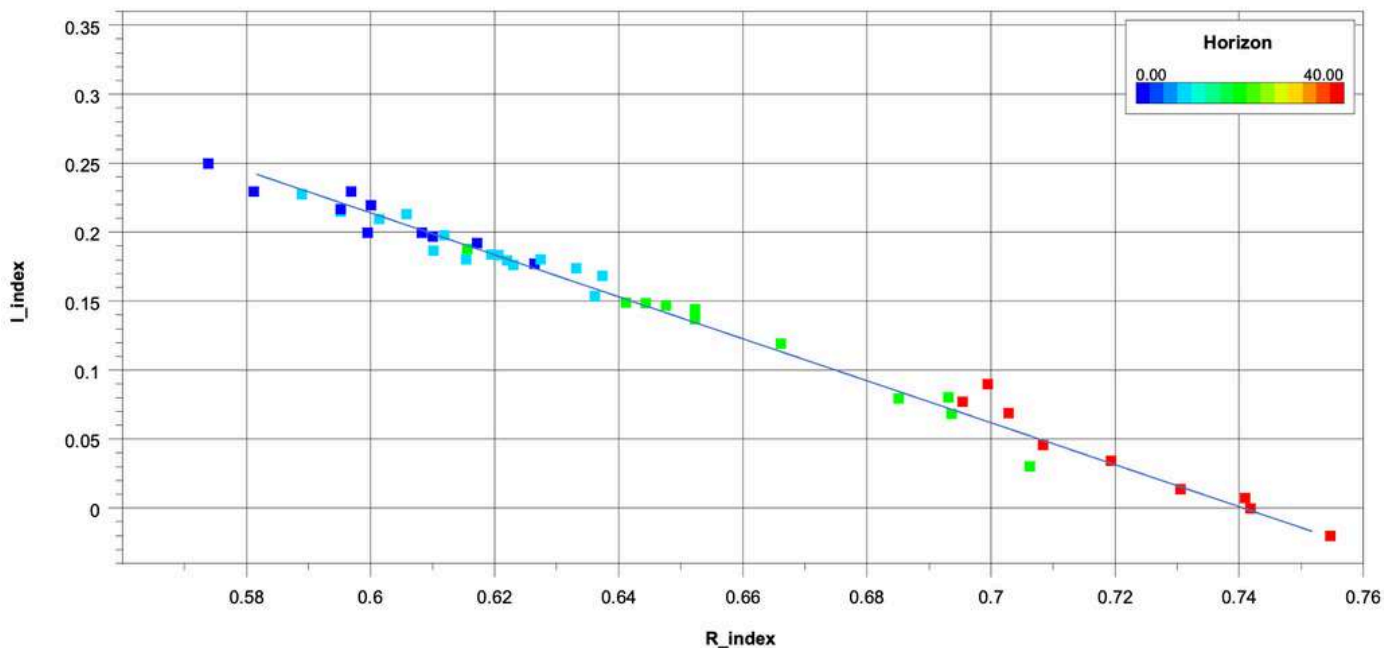


# Résultat de l'étude de la méthode d'analyse ROCK EVAL

En partenariat avec :



FIGURE 6 : Diagramme R-I (matière organique Réfractaire-Immature), avec, en code couleur la profondeur (en rouge les horizons plus profonds), où l'on retrouve la corrélation stabilité avec profondeur. ↻





# Résultat de l'étude de la méthode d'analyse ROCK EVAL

En partenariat avec :



## Complément de résultats

La ferme Terrasolis est installée sur un haut plateau calcaire au Nord de Reims, une ancienne lande, historiquement occupée par des bergers, et probablement mise en culture au cours de la 2ème moitié du XXème siècle en culture.



FIGURE 7a : Vue aérienne de la base aérienne  
Aucune parcelle n'est visible



1950

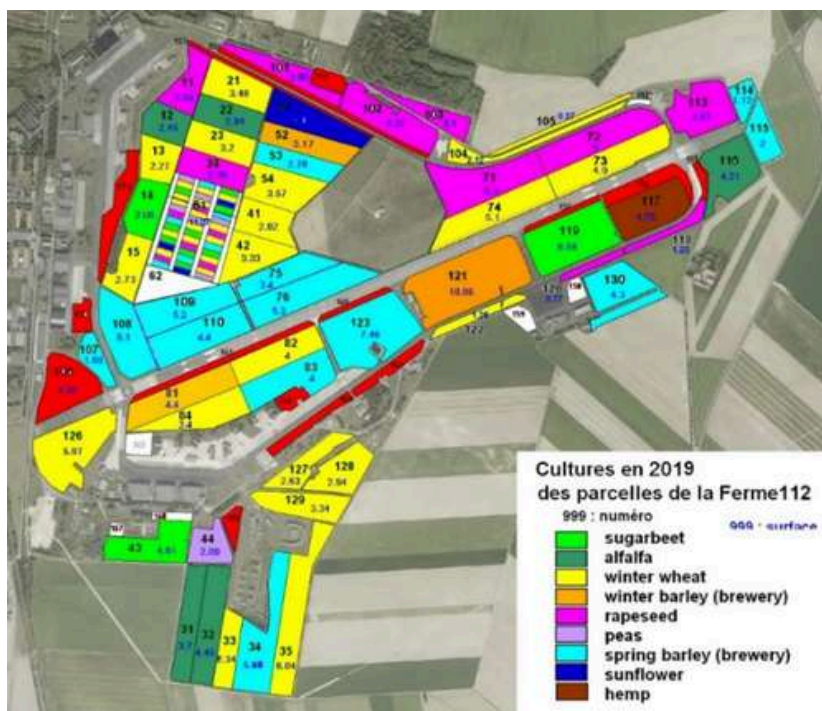


FIGURE 7b : Plan de la ferme expérimentale  
avec les numéros de parcelle



2019

# Résultat de l'étude de la méthode d'analyse ROCK EVAL

En partenariat avec :



La ferme est aussi une ancienne base aérienne, avec une piste d'atterrissage qui la coupe dans un axe NE-SO, les parcelles au nord de cet axe sont historiquement plus productives que les parcelles au sud.

Des mesures de résistivité des sols (cf. fig 8 et 9) préalablement réalisées montrent que ces parcelles sont aussi les moins compactées et les plus riches en eau, notamment en profondeur.

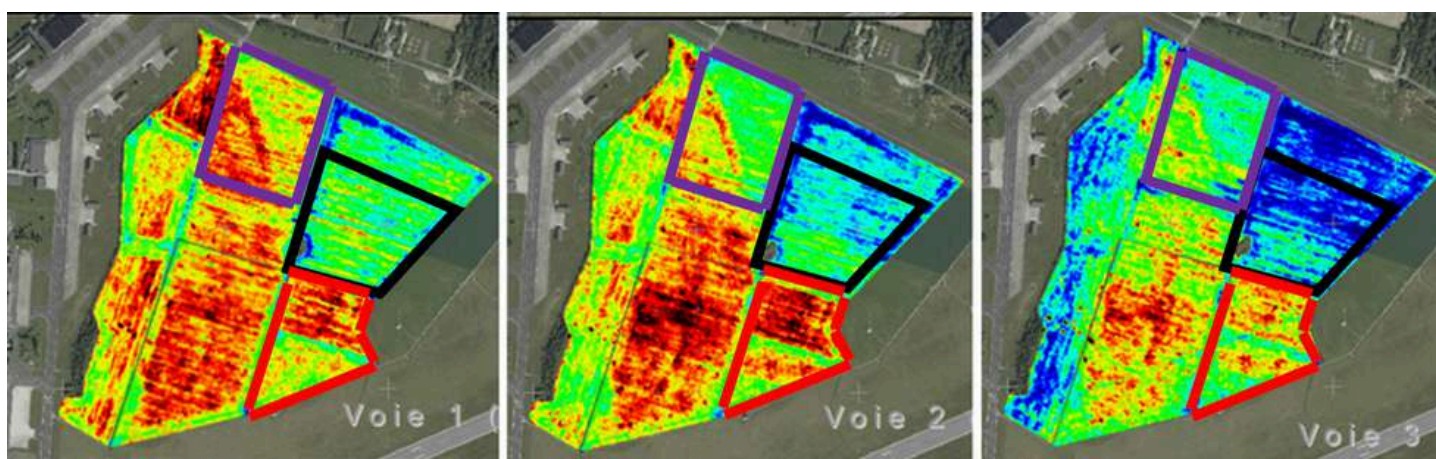
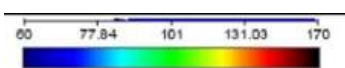
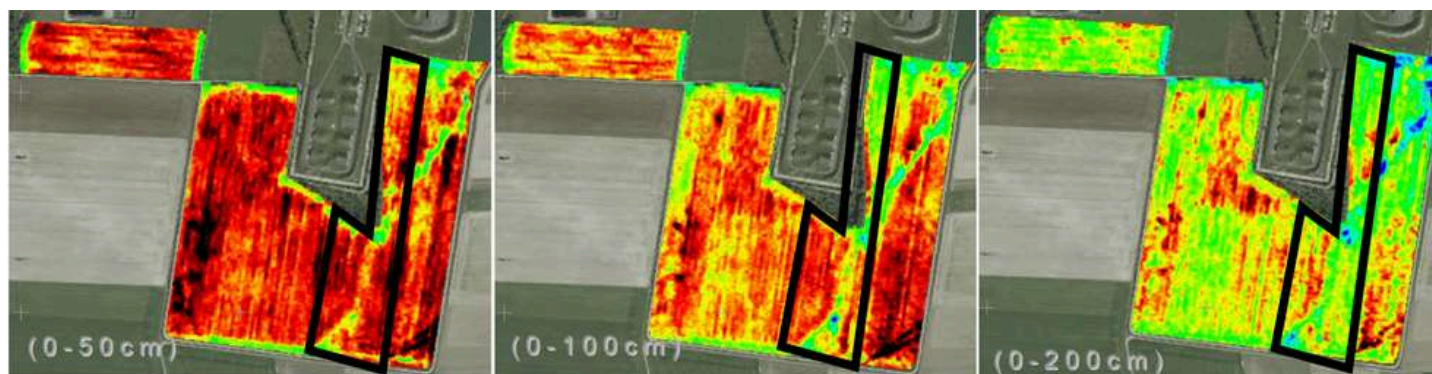


FIGURE 9 : Mesures de résistivité à 0.5, 1 et 1.7m de profondeur sur les parcelles nord, les parcelles 52-53-54 sont entourées en noir, les parcelles 41-42 en rouge, et les parcelles 21-22-23 en violet



Ohm.m

FIGURE 8 : Mesures de résistivité à 0.5, 1 et 1.7m de profondeur sur les parcelles sud, dont seule la parcelle 34, entourée en noire a été analysée au Rock-Eval.

# Résultat de l'étude de la méthode d'analyse ROCK EVAL

En partenariat avec :



Les diagrammes ci-dessous (cf. fig 10 et 11) permettent de visualiser, par numéro de parcelle la valeur de COT ainsi que la part de carbone stable, en fonction de la profondeur.

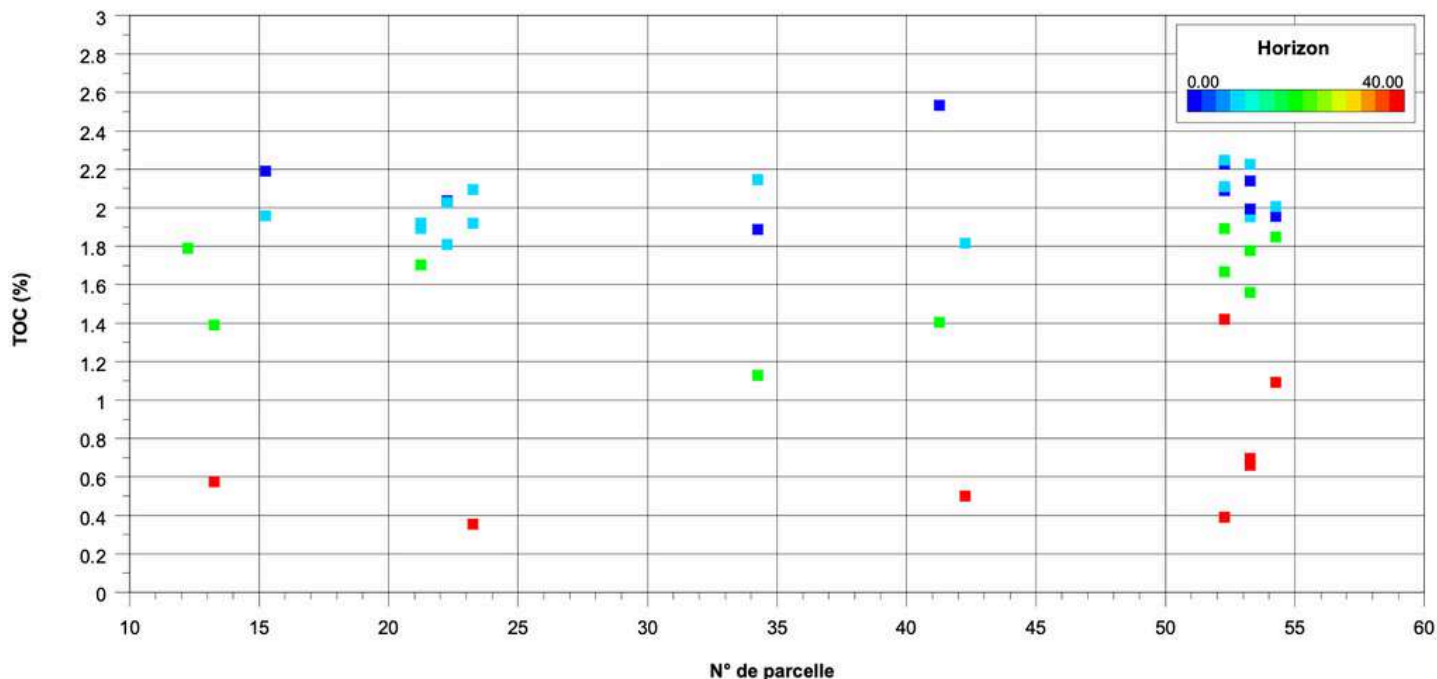


FIGURE 10 : COT% en ordonnée, en fonction du numéro de parcelle (en abscisse), et de la profondeur pour chaque parcelle (code couleur : bleu pour horizon de surface, rouge pour horizons les plus profonds 40-60 cm).

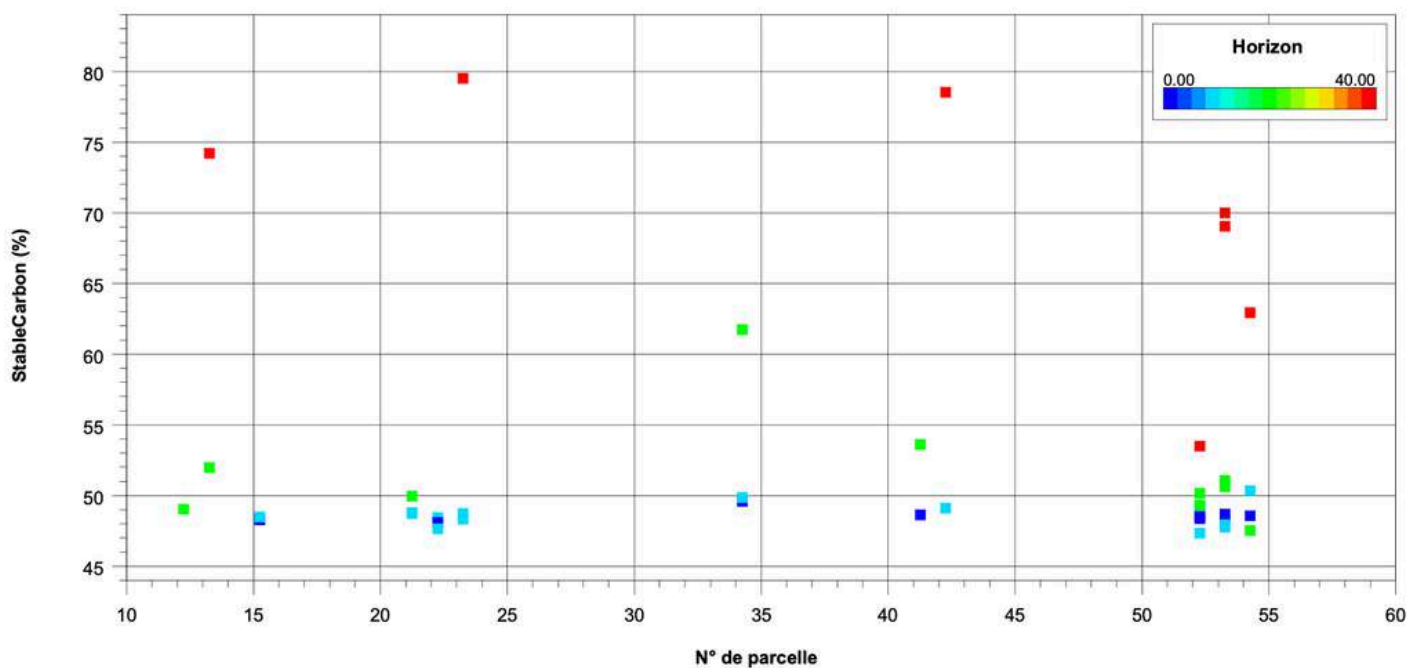


FIGURE 11 : Carbone stable en ordonnée, en fonction du numéro de parcelle (en abscisse), et de la profondeur pour chaque parcelle (code couleur : bleu pour horizon de surface, rouge pour horizons les plus profonds 40-60 cm)



# Résultat de l'étude de la méthode d'analyse ROCK EVAL

En partenariat avec :



La parcelle 34 a non seulement la teneur en carbone globalement la plus faible (cf. fig 10), mais aussi la fraction de carbone stable la plus forte (cf. fig 11). Dès 20 cm de profondeur la part de carbone stable monte à 60%. En combinant ces informations, il est possible d'essayer d'inférer que cette parcelle a perdu plus que les autres son carbone labile, initialement présent lors du retournement de la prairie (probablement à cause de l'historique des méthodes de management de ce sol). C'est la parcelle avec le moins de carbone biogéochimiquement accessible à la vie du sol.

De fait, la parcelle 34 est située sur la partie sud de la ferme dont la part de fraction stable de carbone en surface et en horizon 20-40cm est la plus forte des parcelles analysées. Cette interprétation est aussi bien corrélée avec les mesures en résistivité.

Les trois parcelles 52, 53 et 54 sont les parcelles les globalement les plus riches en matière organique, en surface et en profondeur.

Les TOC des horizons profonds (points rouges) des parcelles 52, 53 et 54 sont aussi significativement supérieurs aux TOC des parcelles voisines.

La parcelle 41 a un TOC de 2.43% en surface, qui est légèrement supérieur à la moyenne des autres parcelles de la ferme, qui sont autour de 2%, mais a son TOC chuter très vite avec la profondeur. Et sa part de carbone actif à 20 cm est la 2eme plus forte des parcelles analysées, après la parcelle 34. Les mesures de résistivité de cette parcelle sont de fait similaires à celles de la parcelle 34. Sa valeur de TOC en surface est donc difficilement explicable, sauf si un apport de MO exogène. Le point situé en haut à gauche du diagramme RI correspond en effet à la parcelle 41, ce qui semblerait confirmer un amendement récent en matière organique.

Une autre façon de confirmer ces observations est de mettre sur un graphique le HI ou la fraction de carbone stable en fonction de la profondeur, par parcelle.

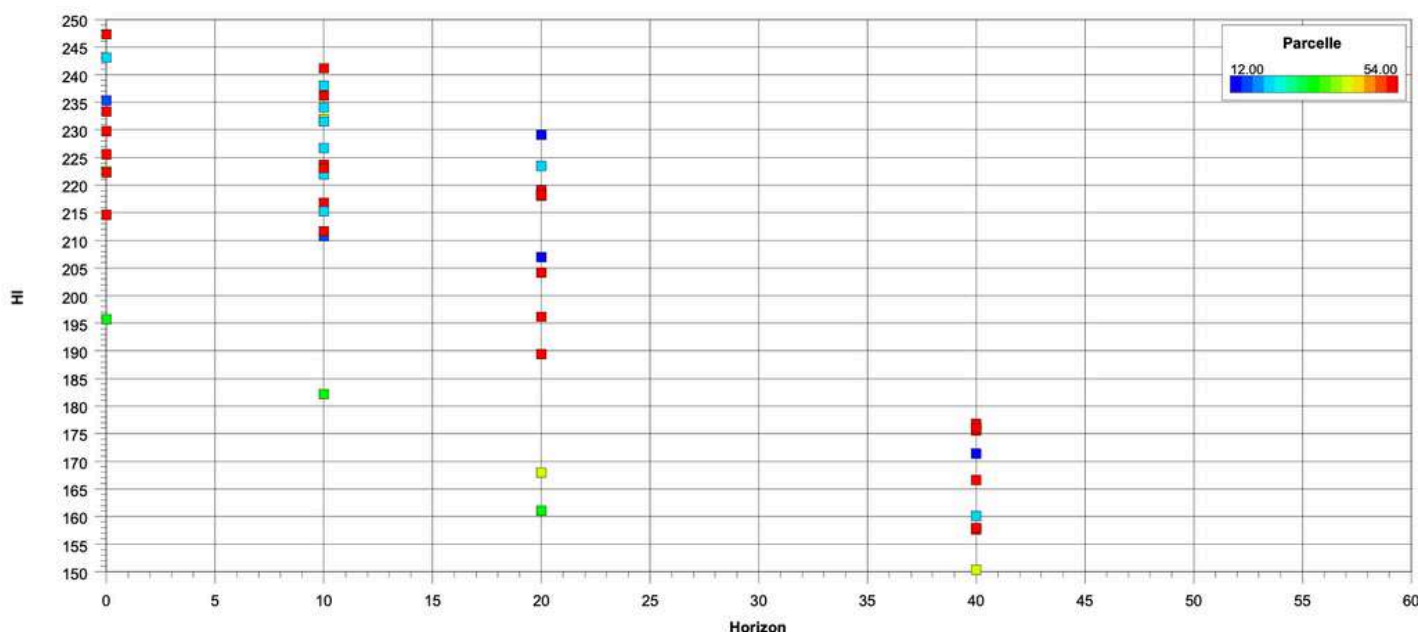


FIGURE 12 : HI en fonction de la profondeur (parcelles en code couleur).



# Résultat de l'étude de la méthode d'analyse ROCK EVAL

En partenariat avec :

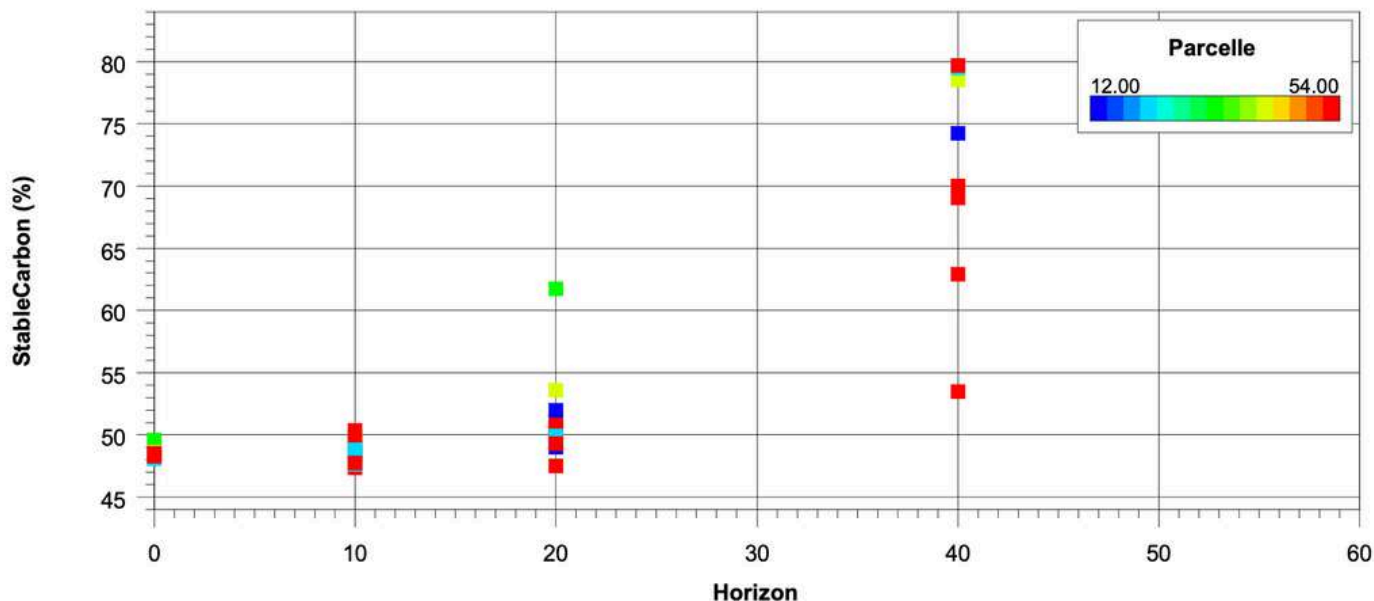


FIGURE 13 : Carbone stable en fonction de la profondeur (parcelles en code couleur)..

Sur les figures 12 et 13, les points verts correspondent à la parcelle 34, et les points jaunes à la parcelle 41... les points rouges correspondent aux parcelles 52-53-54 (meilleure qualité de matière organique).

L'hétérogénéité des mesures en profondeur s'explique aussi en regardant le profil des fosses (cf. fig 14).

Si la teneur en carbonate augmente avec la profondeur, certaines parcelles semblent avoir des pédologies différentes, les parcelles 52-53-54 semblent plus riches en calcaire (cf. fig 14).

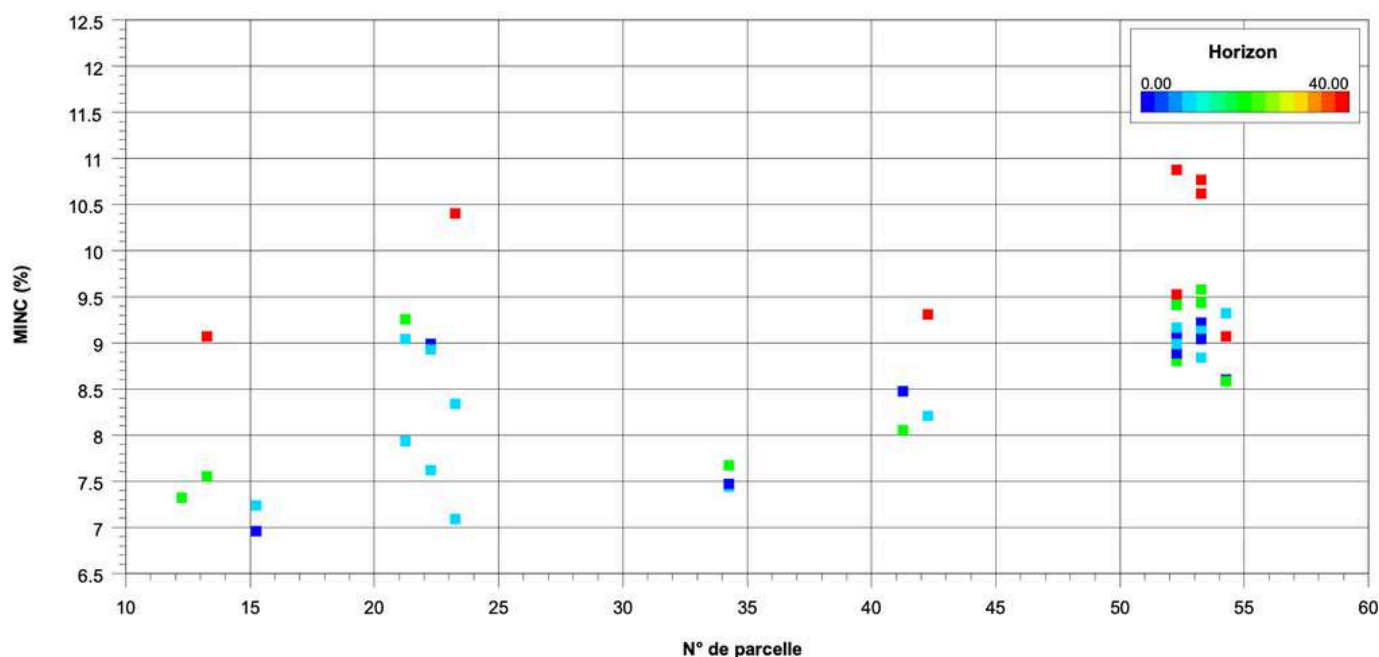


FIGURE 14 : Teneur en carbone inorganique des parcelles, en fonction de leur profondeur (horizons en code couleur).

# Résultat de l'étude de la méthode d'analyse ROCK EVAL

En partenariat avec :



Ceci semble corréluer un rapport analyse pédologique de la ferme, incluant des fosses.

Une fosse située au sud de la parcelle 54 (fig 13) confirme que cette parcelle est parmi les plus riches en carbonates. Les profils expliquent aussi les choix des prélèvements à 0-10, 10-20, 20-40 et 40-60cm.

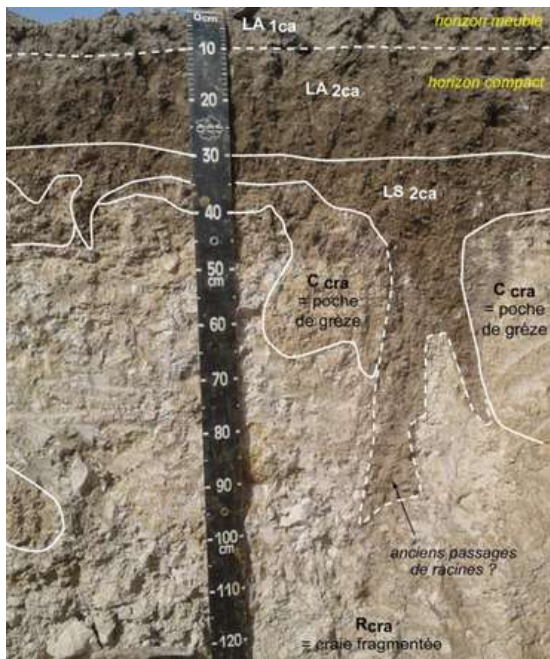


FIGURE 15 : Profil de fosse au sud de la parcelle 54



## Conclusion sur l'analyse Rock-Eval

L'analyse Rock-Eval renseigne donc non seulement sur la quantité de carbone organique, mais aussi sur la qualité de la matière organique présente dans les sols.

Les valeurs de carbone stable peuvent être comparées aux valeurs par défaut du modèle AMG : 65% de carbone stable pour les sols de grandes cultures. Les analyses réalisées montrent que cette valeur par défaut n'est pas une valeur pertinente pour la ferme Terrasolis, et que la moyenne est de 48-50% de carbone stable seulement sur les horizons de surface, et 50-52% jusqu'à 20-40cm de profondeur (sauf pour la parcelle 41, avec 55% de carbone stable, et la parcelle 34).

Les parcelles 52-53-54 sont les plus riches en carbone, et aussi en part de de carbone actif.

La parcelle 34 a en revanche le niveau de carbone le plus faible, et le niveau de carbone stable le plus fort (62% sur l'horizon 20-40cm, soit 10% de plus que les autres parcelles analysées sur le même horizon).

Le paramètre « carbone stable » issu de l'outil PartySoc (Cécillon, et al., 2021) peut être directement exporté dans le modèle AMG afin de rendre les calculs d'évolution des stocks de carbone organique des sols (COS) plus robustes (Kanari et al., 2022) et d'améliorer grandement la capacité de prédiction du modèle (Clivot et al., 2021 – Poster COMIFER).

# Résultat de l'étude de la méthode d'analyse ROCK EVAL

En partenariat avec :



Simeos-AMG est un outil d'aide à la décision web développé par Agro-transfert, de simulation de l'évolution de l'état organique des sols basé sur le modèle de bilan humique AMG (Andriulo et al., 1999, Saffy Hdadi & Mary, 2008, Clivot et al., 2019). L'outil fournit des courbes d'évolution des stock et teneur en carbone organique du sol d'une parcelle gérée de façon identique sur toute la période de simulation : il permet ainsi de visualiser l'effet à moyen ou long terme d'un système de culture, dans un sol et sous un climat donné, en fonction de l'état organique initial de ce sol (Duparque, et al., 2007).

Afin de mettre à jour les technologies utilisées et intégrer les évolutions récentes autour du modèle AMG comme l'initialisation avec les sorties de PartySOC, un moteur API [1] commun à tous les outils utilisant Simeos-AMG, directement ou indirectement, a été développé, mis en ligne en 2021, et déjà intégré dans plusieurs outils bas-carbone. Il sera également le moteur de la future version web de Simeos-AMG actuellement en développement.

Dans ce paragraphe sont présentées les simulations Simeos-AMG réalisées par Agro-Transfert sur un jeu de données Terrrasolis Farm comprenant 3 systèmes de cultures :

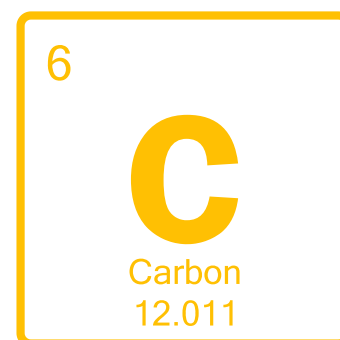
- SDC Réf = Rotation et pratiques typiques de Champagne crayeuse
- SDC Biomasse = Rotation avec plus de betterave et de pailles exportées et plus d'intercultures restituées
- SDC Bas-Carbone = Rotation avec moins d'engrais azoté minéral et plus de biomasse produite (dont intercultures à vocation énergétique, à visée méthanisation)

Le tout est décliné selon deux niveaux de carbone organique actif initiaux :

- Paramétrage de base dans Simeos-AMG = 65% de carbone stable
- Paramétrage initialisé par les valeurs Rock-Eval/PartySoc = 50% de carbone stable

Le premier graphique (fig.7) obtenu met en avant l'évolution des stocks et teneurs en carbone organique des différents horizons de sols (le profil global de 30cm, la couche travaillée de 25cm et la couche jamais travaillée entre 25 et 30cm). La simulation présente l'évolution avec la valeur de carbone stable par défaut d'AMG (0.65) et avec la valeur réelle obtenue au Rock-Eval (0.50).

Le stock de carbone stable diminue plus rapidement lorsque l'on utilise la valeur de carbone stable obtenue au Rock-Eval : un taux de carbone stable plus petit implique une proportion de carbone actif plus importante. Le flux de sortie de carbone organique (produit de la vitesse de minéralisation et du stock de carbone actif) augmente par rapport aux entrées de carbone, et les scénarios déstockent beaucoup plus : 10tCOS/ha à 30 ans en moins avec 15% de carbone stable en moins.



[1] Une API (Application Programming Interface) est une calculatrice qui permet à un outil tiers d'interroger l'outil API au travers d'une structure universelle et documentée, ici en JSON, et de code informatique (Python, R, javascript, ...), pour intégrer ces résultats dans sa propre interface.

# Résultat de l'étude de la méthode d'analyse ROCK EVAL

En partenariat avec :

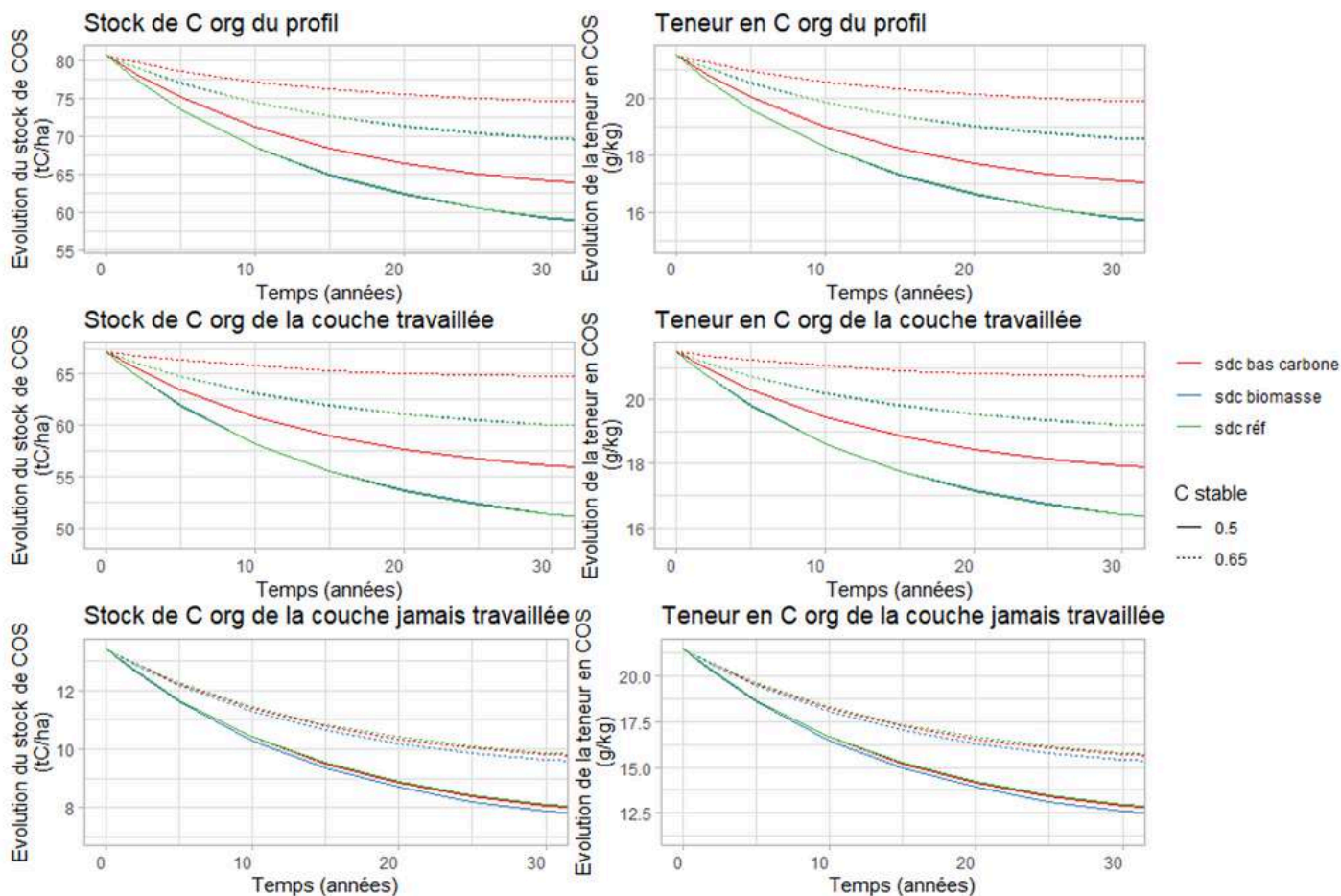


FIGURE 16 : Stocks et teneurs de carbone organique du sol (COS) de différents horizons en fonction des systèmes de culture et du carbone stable initial AMG par défaut et obtenu avec le Rock-Eval.

Néanmoins dans le cadre du calcul de crédits « carbone », selon le Label Bas Carbone notamment, c'est le stockage différentiel (fig.8) qui est pris en compte et la différence entre systèmes. Celui-ci est liée aux entrées de carbone dans l'humus du sol et à leur vitesse de minéralisation les années suivantes, mais pas au stock initial ni sa partition en fractions stables et actives, qui sont identiques entre le projet « bas carbone » et la référence.

Pour le calcul des stocks réels de carbone et pour la trajectoire de stockage, la méthode Rock-Eval/PartySoc apporte une information importante sur la proportion de carbone stable à l'instant considéré sur l'historique d'une parcelle.

Avec un historique de fortes entrées de carbone humifié comme un historique prairial pas si lointain ou un historique d'apports importants de produits organiques en fréquences et/ou quantités, ce taux de COS stable sera nettement inférieur à 65% (Clivot, et al., 2019).

A contrario, dans des situations à faibles entrées de carbone humifié, comme souvent en vigne non-enherbée, ce taux de COS stable sera nettement plus élevé (Mouny, et al., 2021)

Fig. 8 : Evolution de l'écart de stock de carbone organique (tC/ha) entre les projets Terrasolis (biomasse, bas carbone) et le scénario de référence (grandes cultures)



# Résultat de l'étude de la méthode d'analyse ROCK EVAL

En partenariat avec :

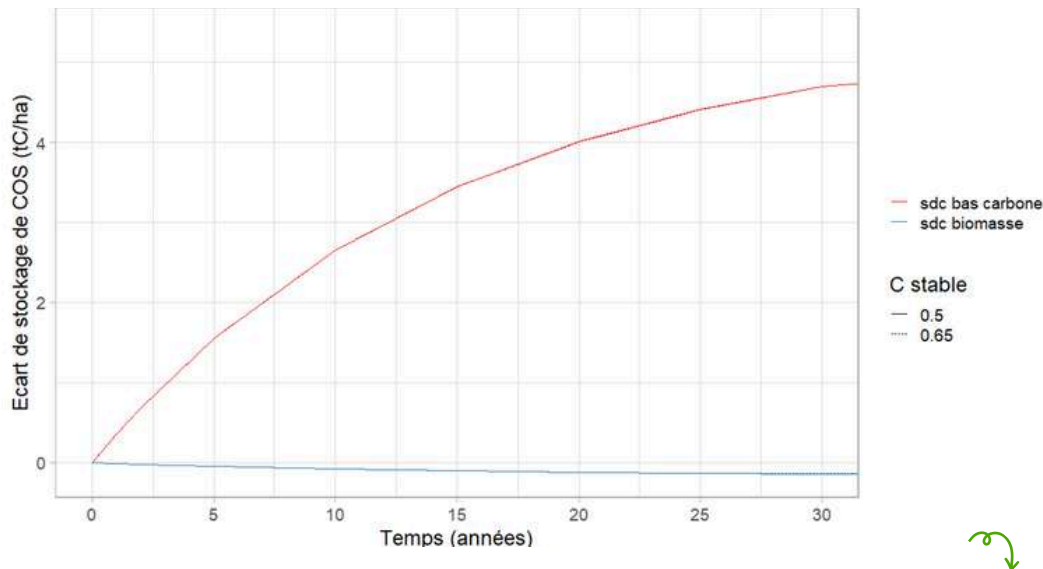


FIGURE 17 : Évolution de l'écart de stock de carbone organique (tC/ha) entre les projets Terrasolis (biomasse, bas carbone) et le scenario de référence (grandes cultures)

Dans ce cas, le stockage différentiel dans le graphique 8 n'est donc pas différent selon que l'on choisisse une proportion de 65% de carbone stable (valeur AMG par défaut) ou de 50% (mesure Rock-Eval). De ce fait, la prise en compte de la proportion de C stable et C actif réelle apporte peu d'information pour les notions de crédit carbone mais trouve une importance majeure dans les décisions agronomiques.

## Annexe. Profil de la parcelle 54

L'observation des thermogrammes de pyrolyse et d'oxydation apporte une indication visuelle à cette idée que la quantité de carbone diminue avec la profondeur, que la part de carbone labile diminue aussi avec la profondeur, et que, en parallèle, la teneur en carbonate augmente au fur et à mesure que l'horizon se rapproche de la roche mère.

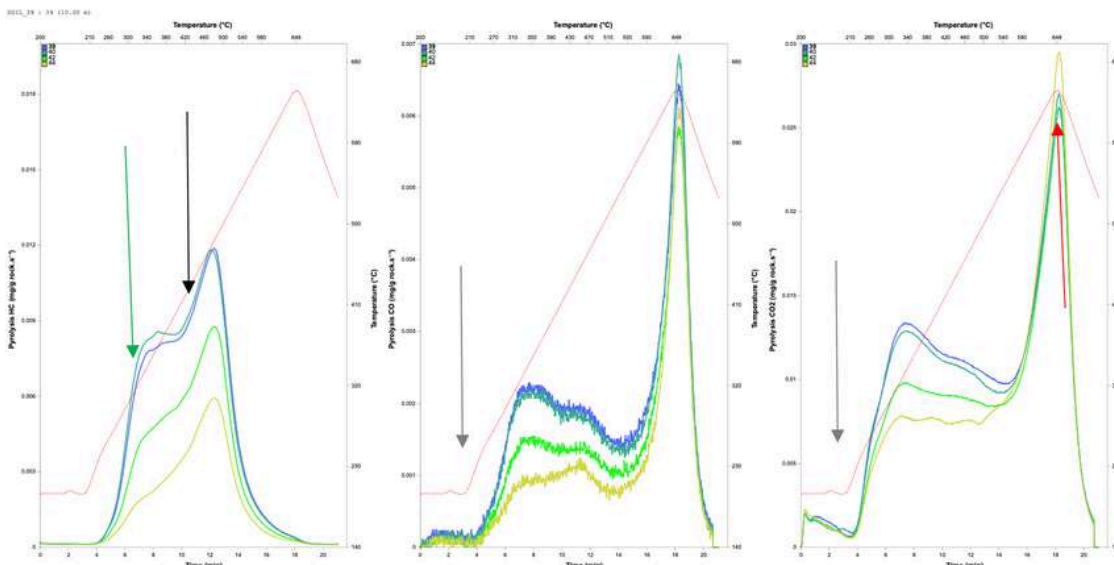


FIGURE 18 : les 3 thermogrammes de pyrolyse des 4 horizons 0-10, 10-20, 20-40 et 40-60cm de la parcelle 54, à gauche le signal FID, au milieu le signal CO et à droite le signal CO2.

# Résultat de l'étude de la méthode d'analyse ROCK EVAL

En partenariat avec :

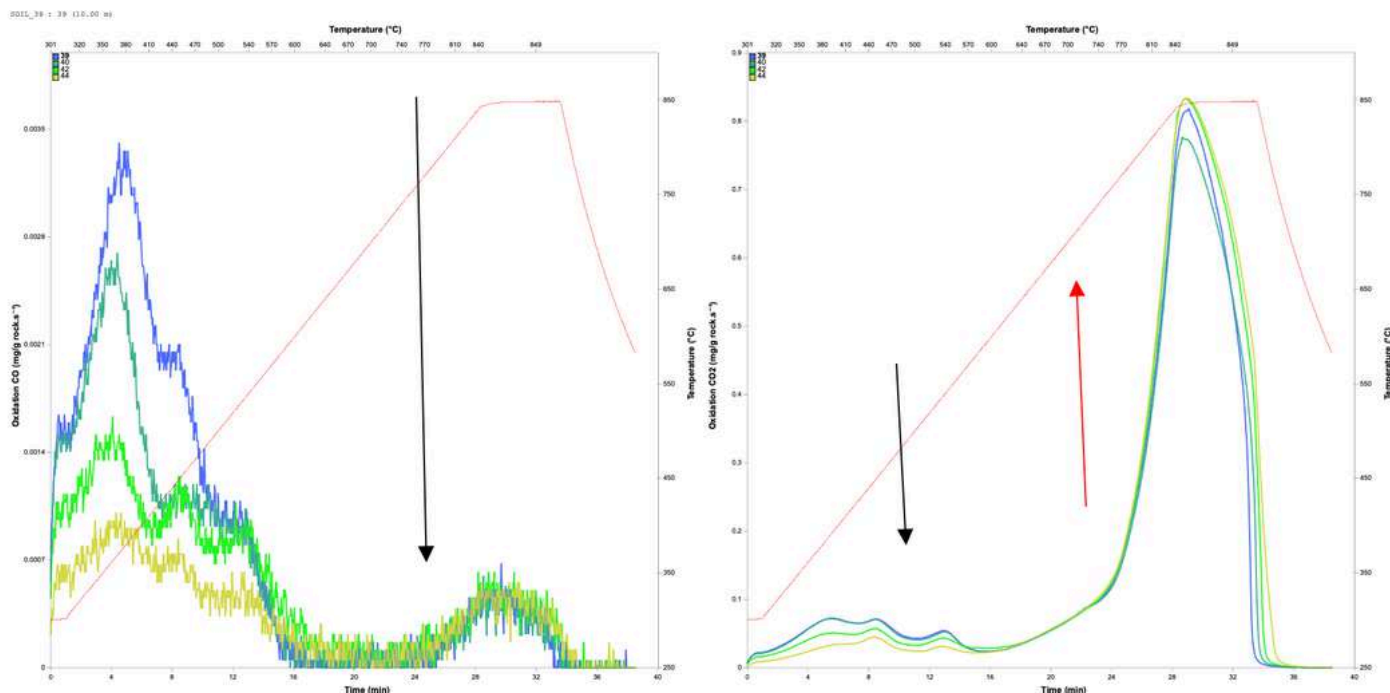


FIGURE 19 : les 2 thermogrammes d'oxydation des 4 horizons 0-10, 10-20, 20-40 et 40-60cm de la parcelle 54, à gauche le signal CO, et à droite le signal CO<sub>2</sub>.

La flèche verte indique la tendance du carbone thermiquement labile, ie du carbone biologiquement accessible, à baisser avec la profondeur.

Les flèches grises montrent la tendance de la baisse de la teneur de la matière organique oxygénée avec la profondeur. En revanche, il faut les calculs pour montrer que le OI augmente avec la profondeur : c'est-à-dire que la baisse de la fraction oxygénée de la matière organique est plus faible que la baisse de la matière organique totale : la matière organique est de plus en plus oxygénée avec la profondeur (plus elle est profonde, plus elle a été remaniée, respirée par le vivant, et donc enrichie en oxygène).

Les flèches noires montrent la baisse de la concentration de matière organique globale avec la profondeur. Les flèches rouges indiquent la tendance à la hausse du carbone inorganique (du calcaire) avec la profondeur.

## Référence

- Andriulo, A., Guérif, J., & Mary, B. (1999). Evolution of soil carbon with various cropping sequences on the rolling pampas. Determination of carbon origin using variations in natural <sup>13</sup>C abundance. *Agronomie*, 19(5), 349-364.
- Cecillon, L., Baudin, F., Chenu, C., Christensen, B. T., Franko, U., Houot, S., ... & Barré, P. (2021). Partitioning soil organic carbon into its centennially stable and active fractions with machine-learning models based on Rock-Eval® thermal analysis (PARTY SOC v2. 0 and PARTY SOC v2. 0 EU). *Geoscientific Model Development*, 14(6), 3879-3898.
- Clivot, H., Mouny, J. C., Duparque, A., Dinh, J. L., Denoroy, P., Houot, S., ... & Mary, B. (2019). Modeling soil organic carbon evolution in long-term arable experiments with AMG model. *Environmental modelling & software*, 118, 99-113.
- Clivot, H., Ferchaud, F., Barré, P., ... & Mary, B. (2021). Évaluation du modèle STICS pour prédire les évolutions du carbone organique des sols : comparaison avec AMG et initialisation du carbone stable par analyse thermique Rock-Eval®. 15èmes rencontres du COMIFER-GEMAS, Clermont-Ferrand 24-25 novembre 2021.
- Duparque, et al. (2007). Evolution de l'état organique du sol à l'échelle de la parcelle : de nouveaux outils pour une démarche de conseil fondée sur le bilan humique AMG. 8èmes rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse de terre GEMAS-COMIFER - Blois 20-21 novembre 2007, p. 16.
- Kanari, E., Cecillon, L., Baudin, F., Clivot, H., Ferchaud, F., Houot, S., ... & Barré, P. (2022). A robust initialization method for accurate soil organic carbon simulations. *Biogeosciences*, 19(2), 375-387.
- Mouny, J.C., Duparque, A., Cahurel, J.Y. (2021). Vers un outil de simulation pour améliorer le conseil sur la gestion du patrimoine organique des sols viticoles : Adaptation du modèle AMG à la vigne. 15èmes rencontres du COMIFER-GEMAS, Clermont-Ferrand 24-25 novembre 2021.
- Saffih-Hdadi, K., & Mary, B. (2008). Modeling consequences of straw residues export on soil organic carbon. *Soil Biology and Biochemistry*, 40(3), 594-607.

## Flux de carbone et d'azote dans les sols cultivés : Oublions-nous de prendre en compte des entrées de carbone et d'azote dans les sols agricoles ?

Rédaction : Guillaume HIMBERT ; Gonzague ALA VOINE

En partenariat avec :



### Contexte

Le stockage de carbone dans les matières organiques des sols agricoles reçoit de plus en plus d'attention. La considération de son rôle joué dans l'atténuation des changements climatiques s'est ajoutée aux considérations historiques des matières organiques pour leurs rôles joués dans le maintien de la structure et de la fertilité des sols. Dans les sols cultivés, les entrées de carbone habituellement prises en compte sont le carbone présent dans les résidus végétaux et les amendements organiques. Les apports de carbone par les exsudats racinaires (ou rhizodéposition), bien que difficilement estimables, sont aussi considérés. Mais les apports de carbone par les pluviolixiviats ne sont pas du tout étudiés.

Les pluviolixiviats sont les eaux de pluies qui arrivent au sol après traversé d'un couvert végétal ; soit directement, soit par ruissellement ou percolation sur ou à travers le couvert. Ces eaux s'enrichissent en éléments présents sur les surfaces végétales (feuilles, tiges) et pouvant provenir des dépositions atmosphériques, des organismes vivants sur ces surfaces, ou de sécrétions produites par ces organismes ou les végétaux. Les apports d'azote associés à ces apports de carbone par les pluviolixiviats demandent également à être précisés pour estimer leur contribution éventuelle à la fertilisation des cultures ou au stockage de carbone dans les sols cultivés.



FIGURE 1: (a) Photo du dispositif de prélèvement après installation, en mai 2023. Les pluviomètres utilisés pour échantillonner les pluviolixiviats sont posés à la surface du sol sous le couvert de colza.

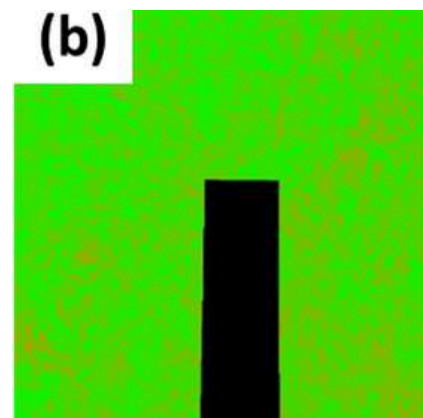


FIGURE 1: (b) Exemple de traitement d'image utilisé pour estimer la surface de sol recouverte par le couvert de colza (logiciel CAN-EYE). Les pixels verts représentent le couvert végétal et les pixels marrons représentent le sol.

---

# Flux de carbone et d'azote dans les sols cultivés : Oubliions-nous de prendre en compte des entrées de carbone et d'azote dans les sols agricoles ?

---

En partenariat avec :



## Méthode

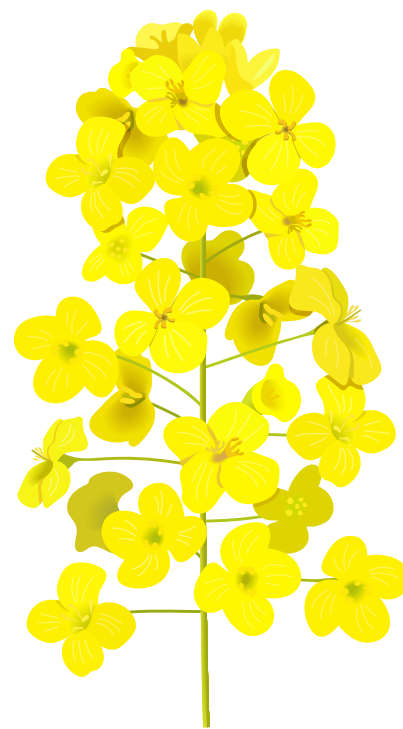
Nous avons étudié ce flux de carbone en analysant les eaux de pluies échantillonnées avec des pluviomètres au-dessus et en-dessous un couvert de colza au stade de développement du fruit. Trois évènements pluvieux de 5, 7 et 60 mm ont été prélevés sur une parcelle de la ferme 112 entre le 19 et le 23 juin 2023. La surface de sol couverte par le couvert a été estimée à partir de l'analyse de photographies. Les formes organiques et minérales du carbone et de l'azote présentes en solution dans ces eaux ont été analysées et les flux générés ont été comparés aux quantités de carbone et d'azote présentes dans la biomasse à la surface du sol (partie aérienne et feuilles sénescentes).



FIGURE 2 : Eaux prélevées au-dessus (bécher de gauche) et en dessous (béchers de droite) du couvert de colza après une pluie de 60 mm.

## Résultats

Au moment de l'étude, 80 % de la surface du sol était recouverte par le couvert de colza (tiges, feuilles, ramifications, siliques). Selon la pluie, entre 50 et 90 % de l'eau de pluie traversait le couvert et atteignait donc le sol. Les pluviolixiviats analysés étaient 5 à 30 fois plus concentrés en carbone organique dissous que l'eau de pluie prélevée au-dessus du colza. Sur la période étudiée et en fonction de l'évènement échantillonné, les pluviolixiviats ont apportés au sol sous la culture de colza entre 0,06 et 15 kg C ha<sup>-1</sup>. Cela représente entre 1 % et plus du double de la quantité de carbone immobilisé dans les parties aériennes du couvert.





# Flux de carbone et d'azote dans les sols cultivés : Oublions-nous de prendre en compte des entrées de carbone et d'azote dans les sols agricoles ?

En partenariat avec :

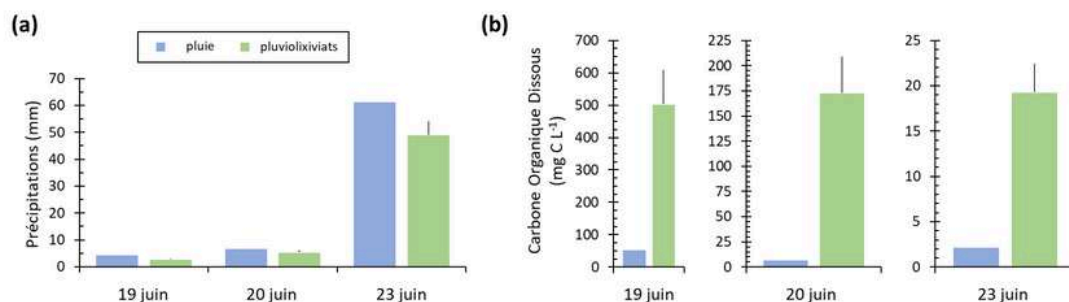


FIGURE 3 : Quantités d'eau (a) et concentration en carbone organique dissous dans les eaux (b) prélevées au-dessus (barres bleues) et en dessous (barres vertes) du couvert de colza.

Les pluviolixiviats analysés étaient 1,3 à 4 fois plus concentrés en azote que l'eau de pluie prélevée au-dessus du colza. En moyenne, 85 % ( $\pm 10$  %) de l'azote contenu dans les pluviolixiviats était sous forme organique. Les concentrations en nitrate et ammonium ne dépassant jamais 3 ( $0,53 \pm 0,84$ ) ou 15 ( $3,2 \pm 3,82$ ) mg N L<sup>-1</sup>, respectivement. Sur la période étudiée et en fonction de l'évènement échantillonné, les pluviolixiviats ont apportés au sol sous la culture de colza entre 4,5 et 385 g N ha<sup>-1</sup>.

## Perspectives

Si les flux d'azote sont faibles, les flux de carbone semblent considérables et demandent à être précisés en explorant leur généricité par l'analyse de pluviolixiviats sous un colza à différents stades de développement, mais aussi sous d'autres cultures. Les effets du régime des pluies et plus généralement du climat sur la dynamique d'accumulation des matières transférables dans les pluviolixiviats devront également être évalués. Les origines, les formes et la réactivité du carbone contenu dans ces pluviolixiviats posent également questions. Quelle proportion de ce carbone a été effectivement produit par le couvert végétal ? Ce carbone est-il rapidement décomposé, assimilé ou minéralisé par les microorganismes du sol ou contribue-t-il directement à la fraction du carbone stabilisé dans les sols par interaction avec les phases minérales ?



# PÔLE D'AGRICULTURE BAS-CARBONE



# TERRASOLIS

**REJOIGNEZ-NOUS !**

[terrasolis.fr](http://terrasolis.fr)

[contact@terrasolis.fr](mailto:contact@terrasolis.fr)

Avec le soutien de



Et de l'Etat Français,



Opération soutenue par l'État, dans le cadre du CRSD de Reims, Fond pour les restructurations de la Défense, et Fond national d'aménagement et de développement du territoire