



# ASSISTER LES AGRICULTEURS DANS LA REDUCTION DE LEUR EMPREINTE CARBONE AU MOYEN D'UN CALCULATEUR DE BILAN HUMIQUE



Michel ETIENNE  
Stage de 3<sup>ème</sup> année  
Institut Polytechnique Lasalle Beauvais

Encadré par Konrad SCHREIBER  
et Eric SCHMIDT  
Institut de l'Agriculture Durable

## Table des matières

Introduction.....	3
1 Contexte.....	3
2 Mission.....	5
3 Problématique .....	5
5 Méthode.....	7
5.1 La recherche de modèles préexistants .....	7
5.2 La qualification de ces modèles .....	7
Le modèle Roth C .....	7
Le modèle Simeos-AMG .....	8
Le modèle Dupuis-Hénin .....	9
5.3 Le tri et la validation de l'opérationnalité des modèles .....	9
5.4 Similitude entre les modèles .....	9
5.5 Proposition de paramétrage de la minéralisation de la matière organique.....	10
5.6 Réaliser une synthèse objective pour réaliser un calculateur carbone .....	10
6 Résultat.....	11
6.1 Paramètres retenus .....	11
6.2 Raisonnement .....	11
6.3 Proposition .....	11
6.4 Test du calculateur bilan humique de l'IAD.....	12
Test sur des rotations types .....	12
Commentaires .....	19
Discussions .....	20
Conclusion .....	22
Annexe 1 – Annexe 2 – Bilan Carbone dans une ferme en polyculture-élevage .....	24
Annexe 2 – Bilan Carbone dans une ferme en polyculture-élevage .....	25
Annexe 3 - Calcul du Bilan humique dans indicIADes .....	33

## Introduction

A l'heure où les directives pour la protection de l'environnement sont réglementaires et entraînent parfois des contraintes, l'Institut de l'Agriculture Durable (IAD) a fait le choix de proposer aux agriculteurs des indicateurs permettant la mesure de résultats afin d'initier des démarches de progrès pour diminuer leurs impacts sur l'environnement. Une attention particulière est portée à l'empreinte Carbone qu'il s'agit de minimiser tout en produisant plus pour subvenir aux besoins futurs.

Pour réaliser cet objectif, l'IAD étudie la possibilité de transformer nos systèmes agricoles émetteurs de gaz à effet de serre en puits de Carbone. L'un des moyens pour arriver à cet objectif est de maximiser la production de matière organique du système agricole afin que la production d'humus soit supérieure à la minéralisation annuelle. Il s'agit dès lors de mesurer la séquestration du Carbone dans les sols ce qui permettrait de discriminer les pratiques selon leurs impacts sur l'environnement. L'investigation autour d'un outil capable de mesurer la séquestration de carbone dans les sols se réalise autour des modèles et calculateurs de Bilan humique.

Depuis sa création en 2007, l'IAD a fait le choix de créer des indicateurs de performance pour guider les agriculteurs vers des pratiques d'agriculture durable. Les objectifs des indicateurs sont d'être applicables à la ferme, fiables, simples à utiliser, rapides à renseigner et de pouvoir être mis à jour régulièrement.

Cette étude a pour but de présenter les bases bibliographiques et techniques introduisant la création d'un « calculateur Carbone » répondant aux différentes attentes agricoles :

- Mesurer la séquestration du Carbone
- Déterminer l'impact des pratiques agricoles sur l'environnement : qualité des sols, qualité de l'eau, bilan GES global de la ferme
- Permettre de repérer les meilleures pratiques agricoles selon un contexte pédoclimatique donné

## 1 Contexte

Les deux derniers rapports du Groupe Intergouvernemental d'experts sur l'Evolution du Climat (GIEC) sont sans équivoque quant à la gravité des impacts du réchauffement climatique (Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire, 2008). Le rapport de synthèse du GIEC en 2014 remis à jour en 2015 et le rapport spécial sur les scénario d'émissions de CO<sub>2</sub> remis le 8 octobre 2018 aux décideurs politiques confirme une situation climatique jugée grave ([https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR\\_AR5\\_FINAL\\_full\\_fr.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_fr.pdf)). Ces impacts vont de la montée du niveau des océans à l'accélération de la désertification avec « *une cohorte de drames humains et l'explosion des coûts* » liés à ceux-ci.

Face aux enjeux liés au réchauffement climatique, de nombreuses politiques environnementales sont nées dont celle du « Facteur 4 » validée en 2007 par le Grenelle de l'Environnement et les propositions sur la taxe Carbone (Tannenbergh, 2013).

La politique du « facteur 4 » a pour objectif de diviser par 4 les émissions de gaz à effet de serre d'ici 2050 sur la base des émissions de 1990 (engagements pris lors du Protocole de Kyoto en 1997 et validés en 2005). Cette politique vise tous les secteurs d'activité du pays. L'agriculture française émet 21 % des GES totaux du pays qui

représentent 109,5 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> en 2008 (CITEPA, émissions de GES directes au format «Plan climat» en France - Kyoto, Édition 2009).

L'une des conséquences des réflexions ouvertes par le Protocole de Kyoto et le Plan Climat, « le Facteur 4 », se traduit au niveau agricole par la création du projet CLIMAGRI par l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie). CLIMAGRI est un outil «de diagnostic énergie-gaz à effet de serre pour l'agriculture et la forêt, à l'échelle des territoires» (ADEME). Les propositions faites autour du projet CLIMAGRI visent à instaurer une gestion administrative de la baisse des GES par les politiques régionales ce qui conduit l'ADEME à initier les contours d'une taxe carbone appliquée à l'agriculture. L'instauration d'une taxe carbone vise quant à elle à monétariser l'impact des projets de différentes natures sur le climat afin de pouvoir apprécier un coût environnemental et, éventuellement, de pouvoir refuser leurs naissances si le coût environnemental est trop élevé.

Dans son projet de développement, l'ADEME privilégie une approche régionale afin de se conformer à la future réforme administrative (2013, Acte III de la décentralisation). Dans les tests réalisés avec l'aide des OPA, les résultats de CLIMAGRI formulent des recommandations généralistes et identifient des pistes d'amélioration dans la baisse des émissions de GES agricoles (Collet, 2011). Sans surprise, c'est la réduction de l'utilisation de l'azote qui est la meilleure piste identifiée. En 2019, les territoires locaux réfléchissent et élaborent des PCAET (Plan Climat Air Énergie Territoriaux)

Cependant, CLIMAGRI n'aborde jamais l'axe majeur de la durabilité de l'agriculture. Diminuer les GES en réduisant l'utilisation de l'azote conduira-t-elle l'agriculture à être rentable ? Et à mieux préserver l'environnement ? Le travail de l'ADEME présente quelques lacunes, notamment celle d'aborder la réduction des GES agricoles par le biais d'une moyenne régionale sans tenir compte de l'état réel des émissions individuelles des agriculteurs.

Par cette analyse territoriale aux résultats moyennés, l'ADEME supprime aux agriculteurs la possibilité de s'adapter aux demandes politiques. En effet, moyenniser les résultats supprime l'information sur les performances individuelles, souvent très différentes d'une ferme à l'autre. C'est dans la comparaison des « performances Carbones » et dans la mise en valeur des meilleures combinaisons en faveur du développement durable que pourrait s'initier une véritable démarche de progrès vers une agriculture en conformité avec « Le Facteur 4 ».

Le gouvernement a sollicité l'aide de l'Inra (INRA, 2013), pour déterminer et analyser des actions favorisant le stockage de carbone par l'agriculture ou la réduction des émissions de GES.

Ces indications sont décrites dans le tableau ci-dessous :

	Actions et sous-actions	Effet(s)
<b>Diminuer les apports de fertilisants minéraux azotés pour réduire les émissions de N<sub>2</sub>O associées</b>		
①	Réduire le recours aux engrais minéraux de synthèse, en les utilisant mieux et en valorisant plus les ressources organiques : 1A. Ajuster la dose d'engrais à des objectifs de rendement plus réalistes - 1B. Améliorer la valorisation des apports organiques - 1C. Ajuster les dates d'apport aux besoins des cultures - 1D. Ajouter un inhibiteur de nitrification - 1E. Enfouir l'engrais	↘ N <sub>2</sub> O
②	Augmenter la part des légumineuses pour réduire le recours aux engrais azotés de synthèse : 2A. Introduire plus de légumineuses à graines dans les grandes cultures - 2B. Augmenter les légumineuses dans les prairies temporaires	↘ N <sub>2</sub> O
<b>Stocker du carbone dans le sol et la biomasse</b>		
③	Développer les techniques culturales sans labour pour stocker du C dans les sols : 3 options techniques : semis direct continu, labour occasionnel 1 an sur 5, travail superficiel	↘ CO <sub>2</sub>
④	Introduire davantage de cultures intermédiaires, de cultures intercalaires et de bandes enherbées dans les systèmes de culture : 4A. Développer les cultures intermédiaires dans les systèmes de grande culture - 4B. Développer des cultures intercalaires en vignes et en vergers - 4C. Introduire des bandes enherbées en bordure des cours d'eau	↘ CO <sub>2</sub> ↘ N <sub>2</sub> O
⑤	Développer l'agroforesterie pour favoriser le stockage de carbone dans le sol et la biomasse végétale : 5A. Développer l'agroforesterie à faible densité d'arbres - 5B. Développer les haies en périphérie des parcelles agricoles	↘ CO <sub>2</sub>
⑥	Optimiser la gestion des prairies pour favoriser le stockage de carbone : 6A. Allonger la durée de pâturage - 6B. Accroître la durée des prairies temporaires - 6C. Désintensifier les prairies permanentes et temporaires les plus intensives en ajustant mieux la fertilisation azotée - 6D. Intensifier modérément les prairies permanentes peu productives par augmentation du chargement	↘ CO <sub>2</sub> ↘ N <sub>2</sub> O

Modifier la ration des animaux pour réduire les émissions de CH <sub>4</sub> entérique et les émissions de N <sub>2</sub> O liées aux effluents		
7	Substituer des glucides par des lipides insaturés et utiliser un additif dans les rations des ruminants pour réduire les émissions de CH <sub>4</sub> entérique : 7A. Substituer des glucides par des lipides insaturés dans les rations - 7B. Ajouter un additif (nitrate) dans les rations	↘ CH <sub>4</sub>
8	Réduire les apports protéiques dans les rations animales pour limiter les teneurs en azote des effluents et les émissions de N <sub>2</sub> O associées: 8A. Réduire la teneur en azote des rations des vaches laitières - 8B. Réduire la teneur en azote des rations des porcs	↘ N <sub>2</sub> O
Valoriser les effluents pour produire de l'énergie et réduire la consommation d'énergie fossile pour réduire les émissions de CH <sub>4</sub> et de CO <sub>2</sub>		
9	Développer la méthanisation et installer des torchères, pour réduire les émissions de CH <sub>4</sub> liées au stockage des effluents d'élevage : 9A. Développer la méthanisation - 9B. Couvrir les fosses de stockage et installer des torchères	↘ CH <sub>4</sub>
10	Réduire, sur l'exploitation, la consommation d'énergie fossile des bâtiments et équipements agricoles pour limiter les émissions directes de CO <sub>2</sub> : 10A. Pour le chauffage des bâtiments d'élevage - 10B. Pour le chauffage des serres - 10C. Pour les engins agricoles	↘ CO <sub>2</sub>

C'est dans ce contexte autour de la baisse des émissions de GES et de l'adaptation de l'agriculture au changement climatique que l'Institut de l'Agriculture Durable (IAD) travaille à l'identification d'un modèle issu de la recherche permettant d'identifier une méthode pour mesurer la séquestration du Carbone dans le sol via la matière organique. Séquestrer du carbone dans le sol permettrait de fortement atténuer les émissions de GES de l'agriculture. Ce travail est en accord avec les actions explicitées par l'INRA puisqu'il s'agit de pouvoir mesurer les gains liés à l'action n°3. De plus, validé lors de la COP 21 en 2015, le projet « 4 pour mille » du Ministère de l'Agriculture français offre désormais la possibilité aux agriculteurs de stocker du carbone dans les sols. (<https://www.4p1000.org/fr/recherche-et-enseignement>)

## 2 Mission

Le travail consiste à :

- identifier un modèle permettant de mesurer la séquestration du carbone dans le sol et identifier les techniques agricoles ayant une bonne performance Carbone ;
- maximiser le stockage du Carbone tout en étant rentable (ce qui est mesuré par les Indicateurs de l'IAD) et de proposer un indicateur de séquestration de carbone aux agriculteurs ;
- informer sur le potentiel de l'Agriculture à devenir un puits de Carbone alors qu'elle en est encore une source aujourd'hui.

## 3 Problématique

Le contexte autour du changement climatique, du « facteur 4 », du développement de CLIMAGRI, de la taxe carbone et du 4 pour mille, conduit l'IAD à réfléchir au développement d'une agriculture durable capable de se transformer en puits de carbone. Cette démarche contraste avec les Programmes de Maîtrise des Pollutions d'Origine Agricole (PMPOA) qui représentent un archétype de réponse administrative à un problème environnemental, ici, la pollution de l'eau par les nitrates.

L'approche PMPOA s'est réalisée à partir d'une problématique complexe : comment réduire la concentration en nitrates dans les eaux superficielles et souterraines. Une fois l'origine agricole des nitrates validée, la recherche a proposé toute une série d'actions techniques permettant de réduire, théoriquement, les quantités de nitrates présentes dans l'eau. Les actions se sont inscrites dans un large faisceau de règles qui se sont trouvées administrées en cogestion par la profession agricole et l'état. La méthode a consisté à réaliser une approche régionale permettant de diffuser vers les agriculteurs des bonnes pratiques à base de modèles théoriques. Ainsi, un des axes forts de ce programme concerne la mise aux normes des bâtiments d'élevages

prétextant qu'un meilleur stockage de l'azote organique contribuerait à moins de pollution. De fil en aiguille, face à des résultats décevants, les programmes réglementaires se sont attachés à réduire les quantités totales d'azote épandues ne retenant qu'un seul axe de raisonnement : « moins on apporte d'azote, moins on pollue ». De plus, la réglementation s'est attachée à normer les quantités d'azote épandables à l'hectare, travaillant ainsi sur une base moyennée régionalisée des apports.

L'inconvénient majeur de cette méthode du PMPOA est la perte de données liée au calcul des moyennes. En effet les moyennes rassemblent, sans distinction, des bons et des mauvais résultats. Ceci entraîne une perte des données essentielles à savoir l'identification des bons résultats agro-environnementaux qu'il s'agit, in fine, de développer.

La démarche CLIMAGRI de l'ADEME actuellement développée possède en germe les mêmes travers. Pour réduire les émissions de GES, l'Agence réalise entre 2009 et 2014 des diagnostics territoriaux des émissions et moyenne les GES agricoles sur le territoire.

Si une telle démarche peut se concevoir pour mesurer des émissions totales de la ferme agricole régionale, elle s'avèrera particulièrement incapable, comme le PMPOA, de proposer une démarche de progrès permettant d'identifier les meilleures pratiques en terme d'émission de GES (Collet, 2011).

Il est particulièrement difficile de progresser à partir des moyennes. Les moyennes sont sensibles aux valeurs extrêmes et peuvent donc varier fortement en fonction de celles-ci. Il paraît donc difficile de pouvoir identifier les meilleures pratiques lorsqu'on se base sur une échelle régionale ou nationale.

La démarche entreprise par l'IAD se différencie de celles communément développées sur ce point. Elle commence par des mesures spécifiques des résultats des pratiques agricoles qui permettent d'identifier les « bons » résultats. Ces bons résultats permettent de développer des solutions qui serviront ensuite à une démarche de progrès. Pour l'IAD, il s'agit d'identifier les agriculteurs performants et de s'appuyer sur leur savoir-faire pour développer des solutions permettant de faire progresser les autres agriculteurs.

Pour séquestrer du carbone dans les sols, la création d'un indicateur de mesure adapté à chaque ferme et situation pédoclimatique particulière est un objectif important pour sortir de l'erreur commune des approches conventionnelles. L'indicateur doit permettre d'identifier les « bons » résultats et les bonnes pratiques pour déterminer :

 «Comment passer d'une agriculture émettrice de gaz à effet de serre à une agriculture puits de carbone ?»

#### 4 Hypothèse

Pour pouvoir répondre à cette question, nous partirons de l'hypothèse selon laquelle « le bilan humique pourrait convenir à mesurer le stockage du Carbone dans les sols à travers la quantité de matière organique humifiée. L'indicateur du bilan humique présent dans le tableau de bord de l'IAD pourrait informer les agriculteurs sur leurs capacités à séquestrer du carbone dans les sols et ainsi à fortement diminuer les émissions de GES ».

Pour l'IAD, l'objectif principal est, au travers d'un indicateur « bilan humique » de mesurer la séquestration du carbone dans le sol.

## 5 Méthode

La méthode consiste à identifier les modèles de bilan humique existant et à réaliser une analyse comparative sur leur potentiel à mesurer la séquestration de carbone dans les sols. Il s'agit de qualifier la démarche la plus intéressante pour l'indicateur de l'IAD.

Le bilan humique est intéressant à investiguer à plus d'un titre, puisqu'il permet d'estimer rapidement et facilement la quantité d'humus générée chaque année par un système de production. Au travers de ce gain on peut, grâce aux travaux de l'INRA, estimer la quantité de carbone que l'on va stocker sous forme d'humus en divisant celle-ci par 1,72 (Chambre d'Agriculture du Languedoc-Roussillon, 2011). Grâce au rapport C/N on peut aussi estimer la quantité d'azote minéralisé et chiffrer un risque potentiel pour l'environnement. A partir de l'indicateur de l'IAD sur les émissions de gaz à effet de serre, pouvant être converties en équivalent carbone, on peut estimer la part « absorbée » par l'humus. On peut donc rechercher les pratiques permettant d'atténuer l'empreinte Carbone des agriculteurs.

Pour calculer ce gain d'humus et de carbone, il faut tout d'abord connaître la quantité de matière organique minéralisée. Cette perte se traduit par un coefficient de minéralisation qui est fonction de trois éléments : la texture du sol, le climat et le travail du sol. Pour estimer l'humus produit nous allons nous baser sur les coefficients d'humification des résidus de culture (Bolinder et al. 2007 ; et travaux de Marc F. Clément, 2009, MAPAQ, Canada). Ces coefficients permettent d'estimer à partir du rendement des plantes la quantité d'humus pouvant être produite à partir des résidus qui peuvent être soit exportés soit restitués.

Si on obtient un bilan positif, l'humification est supérieure à la minéralisation. On stocke donc du carbone et on minimise le risque de lessivage des nitrates. En outre on favorise le retour de la biodiversité et on améliore la structure du sol en lui conférant une meilleure résistance à la battance.

### 5.1 La recherche de modèles préexistants

Trois modèles de bilan humique préexistent et correspondraient aux objectifs de mesure de la séquestration de carbone dans le sol. Tout d'abord il y a le modèle Simeos-AMG qui est un outil de simulation sur l'évolution à long terme des teneurs et stocks en carbone organique du sol (Agro Transfert). Il y a aussi le modèle Roth C qui est un modèle mesurant le turnover du carbone en prenant en compte le type de sol, la température, l'humidité et la couverture végétale (K Coleman, 1999). Le troisième modèle est celui de Dupuy Hénin qui est le plus ancien mais aussi celui ayant bénéficié de nombreux réajustements au niveau des équations de minéralisation.

### 5.2 La qualification de ces modèles

#### Le modèle Roth C

Le modèle Roth C est l'un des plus précis vis-à-vis de la séquestration de carbone. Mais la démarche reste assez compliquée à développer. Les données doivent être renseignées mensuellement et la structure du modèle se résume sur le schéma ci-après

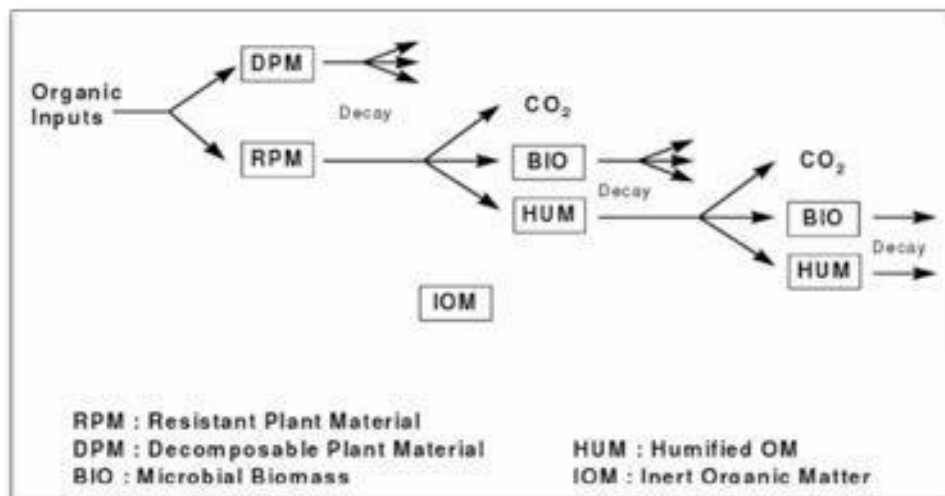


Figure 2 - Structure of the Rothamsted Carbon Model (K Coleman, 1999)

La structure du modèle est complexe car elle calcule mensuellement la quantité de matière organique humifiée et minéralisée sous différents facteurs. Le principal écueil de ce modèle est sa faible transposabilité à la problématique de l'AD, à savoir bénéficier d'un indicateur robuste, compréhensible par tous et simple de développement. Il faut, en effet, pouvoir facilement réactualiser ces données ce qui implique, pour les agriculteurs, une part importante de temps à consacrer à faire des mesures et au paramétrage du modèle Roth C.

### Le modèle Simeos-AMG

Peu d'informations sont disponibles au sujet du modèle Simeos-AMG car les méthodes de calcul et les raisonnements ne sont pas accessibles au grand public. Ce modèle est exclusivement au service de la science agronomique. Les données demeurent toutefois accessibles à des scientifiques. Dans cette équation on affecte un coefficient (10200) qui est divisé par :

- A = la teneur en argile (%O) + 100
  - multiplié par la teneur en calcaire CaCO<sub>3</sub> (%O) + 600 (coefficient)
- L'équation de minéralisation du modèle AMG est :

$$\text{Modèle AMG : } k_2 = 10200 / [(A + 100) * (CaCO_3 + 600)]$$

Figure 3 - Equation de minéralisation AMG (Source: Wylleman, 1999)

L'équation de minéralisation de la matière organique décrite ci-dessus ne prend que la texture en compte. Cependant le logiciel d'Agro Transfert prend en compte l'effet du système de culture et les conditions pédoclimatiques. Compte tenu de la restriction d'accès à ce modèle, il est impossible de savoir comment ces paramètres ont été intégrés pour calculer une quantité de matière organique minéralisée. Cette particularité du modèle Simeos-AMG, et notamment son inaccessibilité, constitue sa plus grande faiblesse. Même si l'équation de minéralisation de la matière organique est intéressante, qu'elle se calcule en fonction du taux d'argile et de calcaire du sol, mieux cerner les autres paramètres du milieu semble indispensable. Vis-à-vis de la minéralisation, les paramètres climatiques interviennent de même que l'intensité du travail du sol. Avec une investigation plus poussée en 2019, ces facteurs sont identifiés dans l'équation du modèle AMG mais s'appliquent sur 2 fractions de matière organique. La première est considérée stable et ne minéralise pas, la seconde est considérée « labile » à dégradation facile et rapide et minéralise beaucoup (coefficient de 35% identifié dans le modèle Siméos-AMG). De plus, la grande faiblesse de



cet outil réside dans l'absence d'abaques autour du semis direct et de la prairie. Ainsi, seulement le travail du sol se retrouve paramétré dans Simeos-AMG, ce qui exclu du développement agricole toutes les techniques sur sol vivant !

### Le modèle Dupuis-Hénin

Le modèle Dupuis-Hénin est : « le plus simple des modèles [...] et aussi l'un des plus ancien. Il ne considère qu'un seul compartiment de matière organique (MO) dans le sol, aussi bien pour la MO présente que pour chacun des flux d'entrée de MO dans le sol (Brochier, 2011). A son grand avantage, il ne nécessite que peu de paramètres mais ne prend pas en compte les différentes techniques de gestion des sols qui existent aujourd'hui. Seulement une équation, celle de Machet, (1990) prend en compte un des facteurs liés au climat : la température.

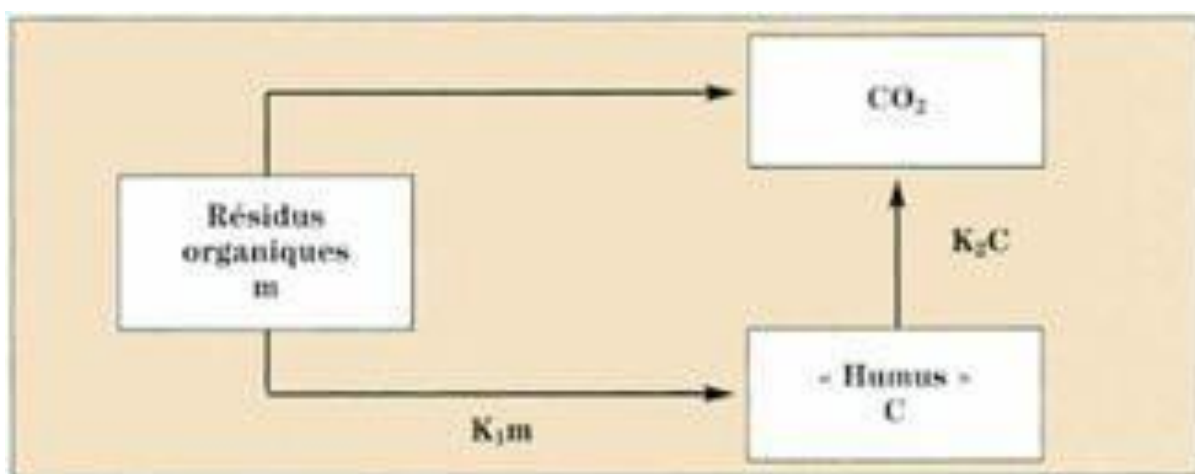


Figure 4 - Schéma du modèle à un compartiment de Hénin Dupuis 1945 (Christian Schvatz, 2005)

Dans ce modèle,  $K_1$  est le coefficient d'humification souvent exprimé sous forme de pourcentage. Il correspond à la quantité d'humus que l'on peut former à partir des résidus organiques. Il diffère du modèle AMG par sa simplicité puisqu'il n'y a pas de distinction du type d'humus (stable). Ce modèle estime que la totalité de l'humus du sol est en mouvement, aussi bien à la hausse qu'à la baisse.

Le coefficient  $K_2$  est aussi exprimé sous forme de pourcentage et traduit la perte par minéralisation du carbone stocké dans l'humus. Il s'agit donc du coefficient de minéralisation de l'humus.

### 5.3 Le tri et la validation de l'opérationnalité des modèles

Etant donné que le modèle à retenir doit être à destination des agriculteurs, le modèle Roth-C ne peut être conservé. Il demande des mesures mensuelles et l'utilisation s'avère très compliquée. Le seul paramétrage du modèle Simeos-AMG sur le travail du sol ne permet pas non plus de le retenir. Le manque de souplesse est important notamment autour des coefficients de minéralisation ( $K_2$ ) prenant en compte les textures de sol dont les écarts avec le modèles Dupuis-Hénin vont du simple au triple, voire plus. AMG comporte de plus 2 sortes d'humus, une fraction stable et une fraction labile qui complique le maniement du modèle. Quant à lui, le modèle Dupuis-Hénin est simple d'utilisation mais ne prend pas en compte l'intensité de travail du sol comme facteur de variation de la minéralisation de la MO. Il reste cependant un bon candidat au développement si ce paramètre est identifiable dans la bibliographie.

## 5.4 Similitude entre les modèles

L'analyse de ces 3 modèles montre toutefois que la démarche reste la même au sujet du calcul de la quantité de matière organique, de la quantité d'humus formée à partir des résidus de culture et de la quantité minéralisée. Ces 3 modèles ont des valeurs similaires ou très proches quand il s'agit de qualifier l'humification des résidus (K1) ; tous intègrent la texture du sol et plus ou moins bien les paramètres du climat. Malgré la complexité du modèle Roth-C, le manque d'accessibilité du modèle Simeos AMG ainsi que son paramétrage trop limité pour relever les défis du changement de pratiques agricoles, et l'ancienneté du modèle Dupuis Hénin, les modèles du bilan humique étudiés montrent tous qu'il serait possible de calculer la séquestration de carbone dans le sol en réalisant le solde entre les MO humifiées calculées par le K1 et les MO minéralisées calculées par le K2. Un solde positif lors du calcul du bilan humique donnerait une quantité de MO humifiée supérieure à la minéralisation de la MO, soit un gain de MO qui peut se traduire en gain de carbone et d'azote pour le sol, soit un stockage de carbone et d'azote.

Compte tenu des éléments accessibles, retenir le modèle Dupuis Hénin pour sa simplicité, est l'option la plus réaliste pour la réalisation d'un indicateur à destination de l'agriculteur. De plus, il est connu des agriculteurs car il faisait parti de l'enseignement initial. Pour l'adapter aux conditions modernes des pratiques agricoles, il faudrait pouvoir le paramétrer sur l'intensité du travail du sol qui est nulle dans le cas du semis direct sous couvert végétal, à très forte dans le cas d'un système de culture avec 2 labours et préparation des lits de semences par an.

Pour l'IAD, l'option la plus simple consiste à proposer des améliorations au modèle du bilan humique de Dupuis Hénin. Ces améliorations doivent intégrer l'intensité de la perturbation du sol, la texture des sols et le climat (température moyenne annuelle).

## 5.5 Proposition de paramétrage de la minéralisation de la matière organique

L'indentification des coefficients de minéralisation liés au travail du sol reposent sur l'expérience de Boigneville menée par l'INRA de Laon avec ARVALIS. Les valeurs mesurées sont différentes entre le modèle AMG et les publications d'ARVALIS. Par exemple le K2 pour le labour est de 4.6% chez AMG contre 1.9% d'après ARVALIS et l'INRA (Jérôme Labreuche, 2010). Il faudra donc prendre une décision sur le choix des valeurs entre ces deux résultats.

## 5.6 Réaliser une synthèse objective pour réaliser un calculateur carbone

Pour atteindre les objectifs de création d'un indicateur « bilan humique » intéressant pour le travail de l'IAD, une synthèse est réalisée sous forme d'un calculateur de bilan humique informatisé. Ce calculateur doit être simple et rapide d'utilisation pour les agriculteurs. Ce calculateur doit être objectif afin de permettre de comparer les systèmes de culture et d'identifier ceux qui permettent de maximiser le stockage de carbone à travers les 2 critères classiques du bilan humique et les 3 facteurs influençant la minéralisation :

- La quantité et la qualité de la MO humifiée, soit le K1
- La quantité de MO minéralisée en fonction :
  - o De la texture du sol
  - o Du climat qui sera représenté par la température
  - o De l'intensité de travail du sol

## 6 Résultat

Pour pouvoir répondre à nos missions, nous avons dû créer un calculateur de bilan humique en retenant différents paramètres. En effet il nous a fallu choisir un modèle de référence (Dupuis-Hénin) puis choisir l'équation nous permettant de calculer la minéralisation selon les facteurs que nous avons choisis (climat, texture) et l'adapter afin de pouvoir prendre en compte l'intensité de perturbation du sol.

### 6.1 Paramètres retenus

Pour pouvoir calculer le carbone minéralisé à partir du bilan humique nous avons retenus 5 paramètres :

1. Utilisation du modèle Dupuis-Hénin (1947)
2. Reprise des équations de Machet (1990)
3. Adaptation des équations de Machet : nécessité de prendre en compte le système de culture (intensité de travail du sol) (Wylleman, 1999)
4. Identification des paramètres dans l'essai de Boigneville par l'INRA et ARVALIS (E. Attard, 2011)
5. Proposition d'un facteur de correction pour le K2 en proportion de l'intensité de travail du sol

### 6.2 Raisonnement

Dans le modèle Dupuis-Hénin datant de (1947), l'actualisation survenue en (1990) par l'équation de Machet présente les améliorations suivantes :

$$k_2 = 1200 (0.2 * T - 1) / [(A + 200) * (0.3 CaCO_3 + 200)]$$

Figure 5 - Equation de Machet (Source: Wylleman, 1999)

Dans cette équation Machet affecte un coefficient (1200) qui est multiplié par un facteur de correction lié au climat ( $0,2 \times T - 1$ ). Ce résultat est divisé par :

- A = la teneur en argile (%O) + 200
- multiplié par la teneur en calcaire  $CaCO_3$  (%O) x 0.3 (coefficient) + 200 (coefficient)

L'équation de Machet présente finalement une très bonne amélioration du modèle de bilan humique de Dupuis Hénin qui calcule la minéralisation de la MO, le K2 en fonction de la texture du sol et de la température locale.

### 6.3 Proposition

Il s'agit d'adapter le modèle Dupuis-Hénin au travail du sol.

D'après l'essai d'ARVALIS à Boigneville (E. Attard, 2011), le K2 est mesuré en différentes situations de travail du sol sur un sol ayant la même texture et sous le même climat. Ceci implique que le travail du sol est le seul facteur de variation du K2, la texture et le climat étant identiques.

Le travail consiste à isoler le coefficient qui influe sur la variation du résultat de minéralisation, le K2 car, dans cette étude, cette variation est uniquement corrélée au travail du sol. Cette relation sera représentée par un coefficient baptisé W (sans unité,

mais le sigle W signifie travail en physique).

En reprenant l'équation de Machet et en la décomposant, il est possible d'identifier le coefficient W relatif à l'intensité du travail du sol à partir des résultats d'ARVALIS. Par exemple pour le Semis Direct, les résultats d'ARVALIS signalent :

$$K2 \text{ mesuré} = 0.008 = 0.8\%$$

En reportant ce résultat dans l'équation de Machet, cela permet d'identifier le coefficient W pour le semis direct

$$K2 = [1200 (0.2 \times 10.8 - 1) / ((242+200) \times (0.3 \times 6 + 200))] \times W$$

En résolvant cette équation à une inconnu on obtient un coefficient W= 0.51 pour le semis direct puis 0.96 pour les techniques culturales simplifiées et 1.22 pour le labour. Sachant qu'ARVALIS avait mesuré une valeur de 0.8% pour le semis direct, 1.9% pour le labour et 1.5% pour les TCS.

L'indicateur « Intensité de perturbation du sol » de l'IAD varie entre 0 et 2. Par défaut on attribue au semis direct la valeur proche de zéro (entre 0 et 0.1), soit pas de perturbation du sol ou très peu. Les techniques culturales simplifiées se retrouvent entre 0.2 et 0.6 dans l'indicateur IAD. Le labour se retrouve affecté des résultats entre 0.7 et 2 mesurés par l'IAD. Ainsi, il devient possible de paramétrer la minéralisation de la matière organique (K2) en fonction de l'intensité de la perturbation du sol. Le coefficient W affecté à l'équation de Machet sera de :

- 0,51 pour un indice de perturbation des sols de l'IAD compris entre 0 et 0,1
- 0,96 pour un indice de perturbation des sols de l'IAD compris entre 0,2 et 0,6
- 1,22 pour un indice de perturbation des sols de l'IAD compris entre 0,7 et 1,2
- 1,5 pour tout indice de perturbation des sols supérieur à 1,3 calculé par l'IAD.

## 6.4 Test du calculateur bilan humique de l'IAD

Le test présenté ci-après reprend la démarche identifiée lors de l'analyse des différents modèles de Bilan Humique. Pour mesurer la séquestration de carbone dans les sols, le bilan humique de l'IAD reprend les différents paramètres de Dupuis Hénin et de l'équation de Machet améliorée avec le coefficient W identifié par les recherches d'ARVALIS.

### Test sur des rotations types

#### 6.4.1.1 Rotation Colza/Blé/Orge avec possibilité de Couvert végétal

Dans le cadre de cette première rotation, nous étudierons la variation du gain de matière organique en fonction du choix exportation/restitution des résidus, du système de culture et de la texture. Pour cela nous allons tout d'abord fixer les deux autres facteurs de variations en choisissant une texture argileuse puis sablo- limoneuse et une température de 10°C (valeur qui neutralise l'impact du climat sur notre étude). Nous choisirons un taux de matière organique de 3%.

Pour simuler une agriculture biologique nous nous appuyerons sur l'étude scientifique qui tend à démontrer que les rendements en agriculture biologique sont inférieurs de 25% au conventionnel (AGRAPRESSE hebdo, 2012).

Voici le détail de la méthode pour le cas où la texture est argileuse. Les résultats sont présentés dans des tableaux qui serviront à la création de graphiques. Les graphiques permettront de pouvoir comparer les résultats avec une texture sablo- limoneuse.

Voici la table des rendements pour notre rotation type:

	Rendement (t/ha)	
	Agriculture Bio	Agriculture
Colza	2,85	3,8
Blé	5,25	7
Orge	5,25	7
CV	2,25	3

Le paramétrage du calculateur va donner les valeurs d'humification et de minéralisation en fonction des facteurs étudiés.

	Quantité humus (t/ha)			
	Agriculture Bio		Agriculture Conventiennelle	
	Restitués	exportés	Restitués	exportés
Colza	0,96	0,25	1,27	0,33
Blé	1,41	0,41	1,88	0,54
Orge	1,64	1,04	2,18	1,39
CV	0,61	0,61	0,81	0,81

Quantité minéralisé (t/ha)					
labour		TCS		SD	
Argileux	Limon	Argileux	Limon	Argileux	Limon
1,7	3,13	1,34	2,46	0,71	1,31

Le calcul du bilan se fait en retranchant la quantité minéralisée à la quantité humifiée pour chaque culture. On pourra ainsi en déduire le gain ou la perte moyenne pour la rotation selon le système de culture.

Dans le cas où la texture est **argileuse** et les pailles sont **restituées**, le bilan (t/ha) est de :

	Agriculture Bio			Agriculture		
	Labour	TCS	SD	Labour	TCS	SD
Colza	-0,43	0,0	0,56	0,74	0,38	0,25
Blé	0,18	0,54	1,17	0,29	0,07	0,7
Orge	0,48	0,84	1,47	0,06	0,3	0,93
Moyenne	0,08	0,44	1,07	0,36	0,00	0,63

Dans le cas où la texture est **argileuse** et les pailles sont **exportées**, le bilan (t/ha) est de :

	Agriculture Bio			Agriculture		
	Labour	TCS	SD	Labour	TCS	SD
Colza	-1,37	-1,01	-0,38	-1,45	-1,09	-0,46
Blé	-1,16	-0,8	-0,17	-1,29	-0,93	-0,3
Orge	-0,31	0,05	0,68	-0,66	-0,3	0,33
Moyenne	-0,95	-0,59	0,04	-1,13	-0,77	-0,14

Les tableaux ci-après sont calculés après l'ajout de la quantité d'humus apportée par la dégradation d'un couvert végétal.

Bilan texture	Agriculture Bio			Agriculture Conventiionnelle		
	Labour	TCS	SD	Labour	TCS	SD
Pailles						
Colza	-0,56	-0,20	0,43	-0,84	-0,48	0,15
Blé	-0,35	0,01	0,64	-0,68	-0,32	0,31
Orge	0,50	0,86	1,49	-0,05	0,31	0,94
Moyenne	-0,14	0,22	0,85	-0,52	-0,16	0,47

Bilan texture	Agriculture Bio			Agriculture Conventiionnelle		
	Labour	TCS	SD	Labour	TCS	SD
Pailles						
Colza	0,38	0,74	1,37	-0,13	0,23	0,86
Blé	0,99	1,35	1,98	0,32	0,68	1,31
Orge	1,29	1,65	2,28	0,55	0,91	1,54
Moyenne	0,89	1,25	1,88	0,25	0,61	1,24

Ces quatre derniers tableaux vont être résumés en un seul afin de pouvoir réaliser un graphique.

		Gain de MO (t/ha)			
		Pailles	Pailles	Pailles exportées +	Pailles restituées +
Labour	c	0,08	-0,95	-0,14	0,89
	bio	-0,36	-1,13	-0,52	0,25
TCS	c	0,44	-0,59	0,22	1,25
	bio	0	-0,77	-0,16	0,61
SD	c	1,07	0,04	0,85	1,88
	bio	0,63	-0,14	0,47	1,24

Selon l'INRA la quantité de carbone présente dans l'humus se calcule grâce à la formule suivante:

Quantité C = Quantité de matière organique x 1,72 (Chambre d'Agriculture du Languedoc-Roussillon, 2011)

On peut donc en déduire la quantité de carbone (kg/ha) stockée par le gain de matière organique, on obtient alors :

Dans le cas où la texture est **argileuse** et les pailles sont restituées :

Bilan carbone (kg/ha)

Pailles Restituées	Agriculture Conventiionnelle			Agriculture Biologique		
	Labour	TCS	SD	Labour	TCS	SD
Colza	-250	241	326	-43	-221	145
Blé	105	314	680	-16	41	407
Orge	279	488	855	-35	174	541
Somme	45	254	620	-211	-2	364

Dans le cas où la texture est **argileuse** et les pailles sont **exportées**,

Pailles exportées	Agriculture conventionnelle			Agriculture Biologique		
	Labour	TCS	SD	Labour	TCS	SD

Colza	-797	-587	-21	-843	-634	-267
Blé	-674	-465	-99	-750	-541	-174
Orge	-180	29	395	-384	-174	192
Somme	-550	-341	25	-659	-450	-83

Dans le cas où la texture est **argileuse** et les pailles sont **restituées avec couvert végétal**

	Agriculture Conventiennelle			Agriculture Biologique		
	Labour	TCS	SD	Labour	TCS	SD
Colza	221	430	797	-76	134	500
Blé	576	785	1151	186	395	762
Orge	750	959	1326	320	529	895
Moyenne	516	725	1091	143	353	719

Dans le cas où la texture est **argileuse** et les pailles sont **exportées avec couvert végétal**

	Agriculture Conventiennelle			Agriculture Biologique		
	Labour	TCS	SD	Labour	TCS	SD
Colza	-326	-116	250	-488	-279	87
Blé	-203	6	372	-395	-186	180
Orge	291	500	866	-29	180	547
Moyenne	-79	130	496	-304	-95	271

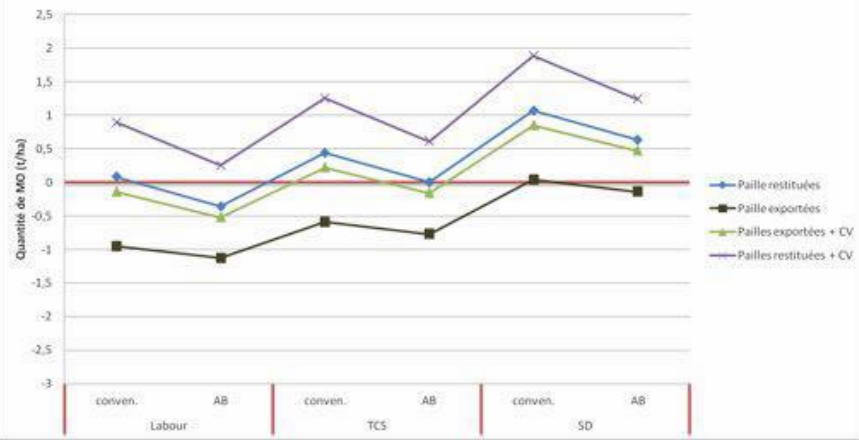
Tous ces tableaux sur le bilan carbone peuvent se résumer en un seul à partir duquel nous pourrions synthétiser un graphique.

		Gain de carbone (kg/ha)			
		Pailles	Pailles	Pailles exportées +	Pailles restituées +
Labour	c	45	-550	-79	516
	bio	-211	-659	-304	143
TCS	c	254	-341	130	725
	bio	-2	-450	-95	353
SD	c	620	25	496	1091
	bio	364	-83	271	719

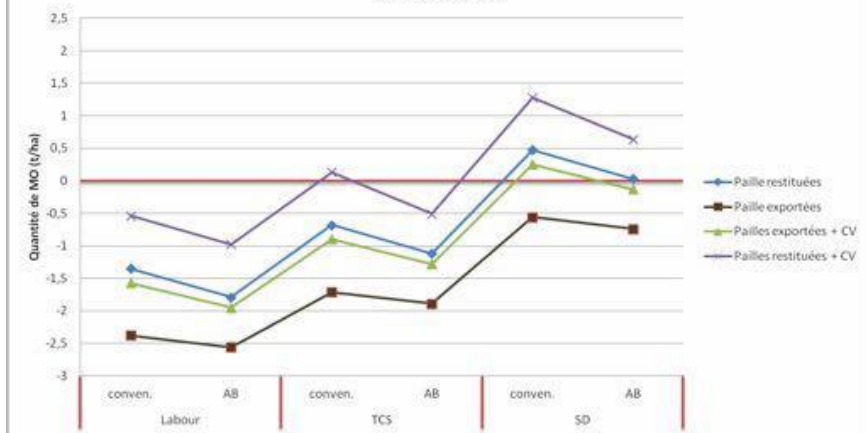
On réalise la même méthode que précédemment pour une texture sablo-limoneuse. Pour les autres rotations de culture seuls les graphiques seront présentés sans le détail des calculs.

Voici les graphiques qui sont obtenus pour la rotation Colza/Blé/Orge en fonction des différentes variables. Les graphiques des autres rotations sont situés en annexes.

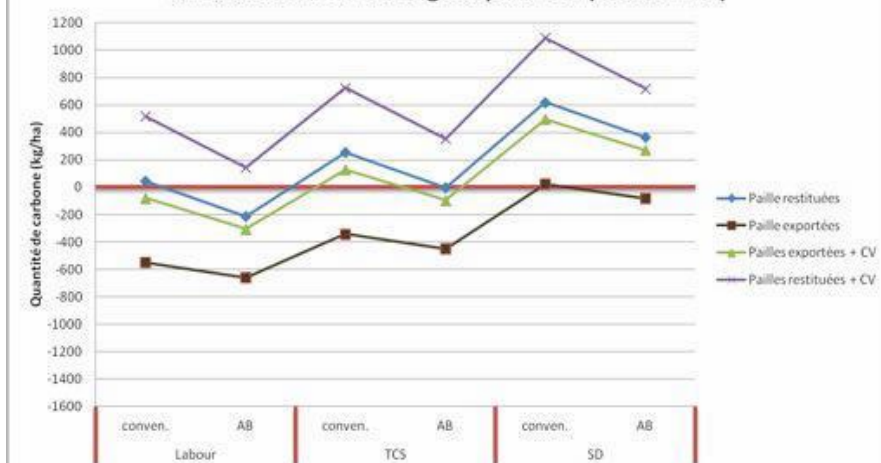
**Gain moyen de matière organique dans un sol argileux (3%MO) pour une rotation Colza-Blé-Orge avec restitution/exportation des résidus et un couvert végétal possible. (Source: IAD)**



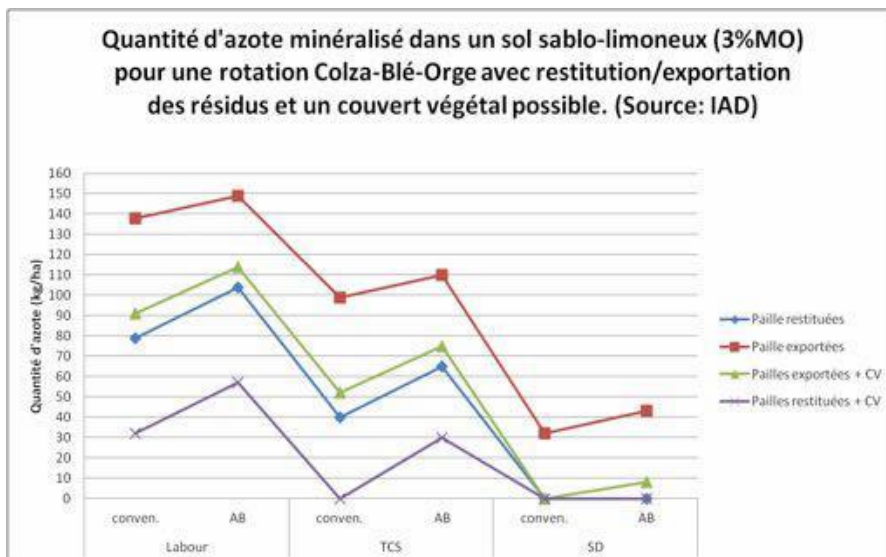
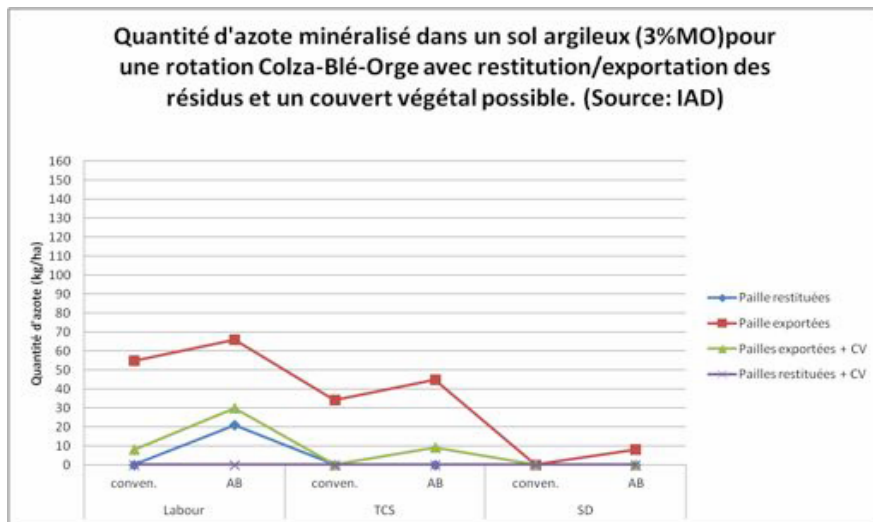
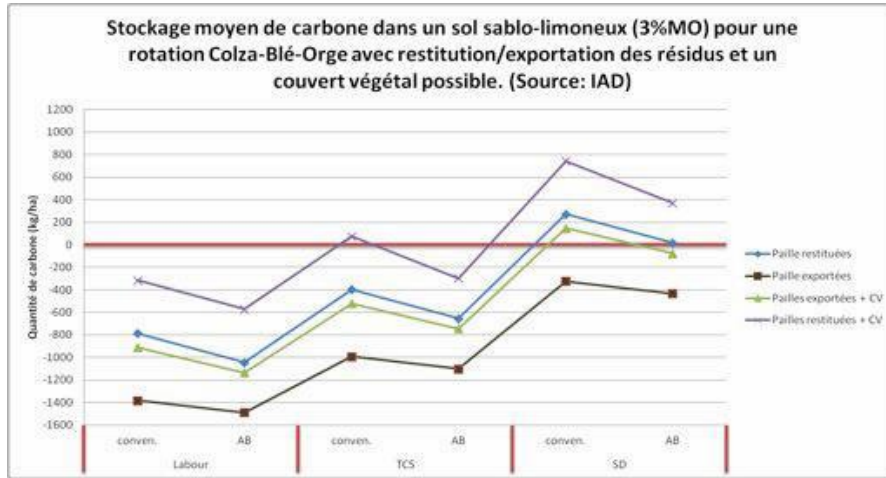
**Gain moyen de matière organique dans un sol sablo-limoneux (3%MO) pour une rotation Colza-Blé-Orge avec restitution/exportation des résidus et un couvert végétal possible. (Source: IAD)**

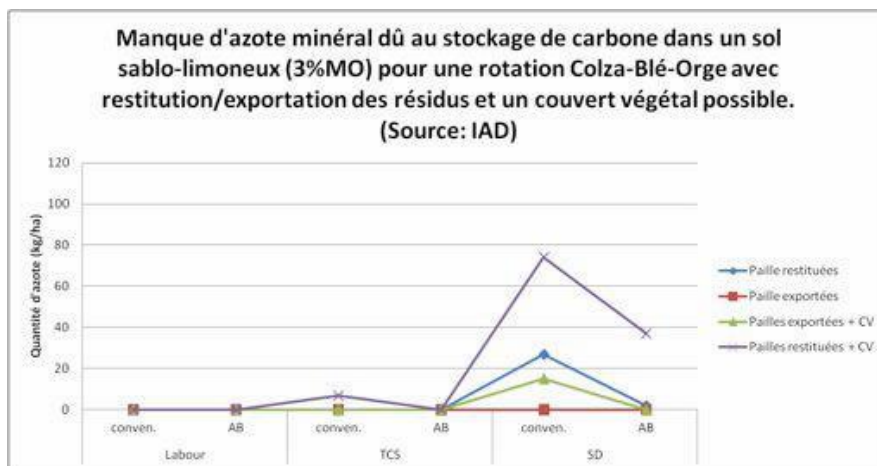
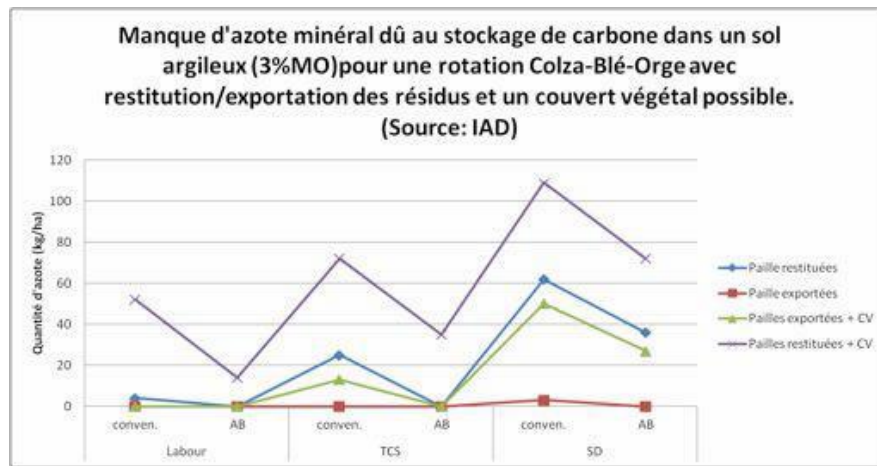


**Stockage moyen de carbone dans un sol argileux (3%MO) pour une rotation Colza-Blé-Orge avec restitution/exportation des résidus et un couvert végétal possible. (Source: IAD)**









### Commentaires

L'utilisation du bilan humique corrigé du coefficient « W » de travail du sol montre qu'il est possible de mesurer l'impact des pratiques agricoles sur l'environnement.

L'objet de cette étude consistait à identifier une méthode capable de mesurer simplement et régulièrement la séquestration ou la perte de carbone des sols.

Pour en simplifier la présentation et l'analyse des résultats, c'est une moyenne des gains ou des pertes de MO qui est retenue pour un hectare et une rotation donnée avec son itinéraire technique. Le bilan humique tient compte des rendements des cultures et des intercultures mais ne tient pas compte du plan de fertilisation. Les graphiques reprennent une comparaison entre différentes techniques : labour, TCS, SD en AB et en conventionnel. Ils retracent la moyenne par ha de l'assolement identifié.

La comparaison est réalisée pour les sols représentant des extrêmes agricoles par rapport au bilan humique. Ainsi, les sols argileux minéralisent moins de MO que les sols légers sablo limoneux. Les gains et/ou pertes de MO sont corrélés à la quantité d'argile présente dans le sol. Les sols à teneur en argile élevée ont un avantage vis-à-vis de la minéralisation de la MO : ils se dégradent moins vite que les sols sablo-limoneux.

Dans les exemples analysés, pour une rotation Colza/Blé/Orge sur sol argileux, le semis direct permet de gagner 1 tonne d'humus supplémentaire par rapport à la même gestion agronomique que le labour (tableau 1). Par contre, si l'on compare les techniques ayant les plus grands extrêmes, la différence entre un labour avec pailles

exportées sans couvert et un semis direct avec restitution des pailles et couvert végétal, représente 1,6 t C/ha.

La même simulation dans un sol sablo limoneux donne une différence de +1 t C en faveur du semis direct vis-à-vis du labour avec des restitutions de résidus identiques (tableau 2).

Dans ce même type de sols, si les pratiques sont extrémisées, par exemple en absence de couvert végétal et exportation des pailles en labour et inversement en semis direct, c'est une différence de 2 t C/ha qui apparaît entre les 2 techniques. Ainsi, il est possible d'affirmer que le bilan humique permet de mesurer assez précisément, même à partir d'une moyenne à l'hectare sur une rotation complète, d'importantes différences de stockage ou de déstockage du Carbone du sol en fonction du paramètre « travail du sol ».

Il est remarquable de constater que seul le SD avec couvert végétal et restitution de l'ensemble des résidus des cultures est capable de générer un bilan humique positif ou proche de zéro en AB, et ce, quelle que soit la situation pédologique testée. Pour rappel, c'est une hypothèse de rendement de -25 % qui est retenue pour l'agriculture biologique (AGRAPRESSE hebdo, 2012). Ce résultat est important. Il montre que l'AB est loin d'avoir toutes les vertus environnementales qu'on lui prête. Sans retour important de fumier ou de compost, cette agriculture est condamnée à appauvrir les sols en humus, donc en carbone et en azote. Ainsi, à la lumière des tests effectués, l'AB actuellement pratiquée, avec travail du sol et peu d'intrants, s'avère incapable de générer un bilan humique positif.

Faire évoluer cette agriculture vers un puits de carbone est impossible, à moins qu'elle n'adopte le semis direct sous couvert végétal avec une forte augmentation des rendements (+25 % au moins). Il restera d'immenses défis à relever notamment de nombreux problèmes techniques à résoudre autour du désherbage et de la fertilisation.

Il est aussi intéressant de noter que la prairie permet d'accroître le taux de matière organique dans des systèmes conventionnels. D'après le rapport de l'INRA sur le carbone (D. ARROUAYS, 2002) il s'agirait même du seul moyen. Et cela semble logique avec les résultats de la simulation : seules les techniques abandonnant le travail du sol seront capables d'introduire une bonne performance de séquestration de carbone. Cependant, l'une des limites identifiées est que le bilan humique n'évalue pas la destruction par les outils de la matière organique labile (l'activité biologique du sol) qui conduira à une minéralisation intense de la MO à la destruction de la prairie ou au passage du SCV vers du labour conventionnel.

## Discussions

Cette incapacité des techniques conventionnelles à stocker du carbone dans les sols est connue. De nombreuses études (ROBERT, 2002) montrent cette incapacité des techniques conventionnelles à résoudre un problème environnemental majeur pour les années à venir. Sans séquestration de carbone, pas de sols fertiles pour l'agriculteur et, impossibilité de maîtriser les problèmes environnementaux, notamment le lessivage des nitrates et la lutte contre le réchauffement climatique.

Sachant que la production d'azote du sol est étroitement liée à la minéralisation de la matière organique, il est possible, à partir du bilan humique, de mesurer un risque environnemental affecté aux pratiques agronomiques de l'agriculteur. En prenant comme base de raisonnement qu'il faut 10 unités de carbone pour organiser 1 unité d'azote (C/N de la MO = 10), une courbe de production d'azote peut être établie à partir de la courbe d'humification. Dans les graphiques calculant la minéralisation de l'azote, le labour libère une grande quantité d'azote en excès, parfois 150 kg/ha/an (tableau 6). Et systématiquement, en semis direct, il manque de l'azote. Ceci s'explique aisément. Un bilan humique positif signifie que le sol stocke du carbone. Il stocke automatiquement aussi de l'azote, dix fois moins. Ainsi, créer un puits de carbone favorisera une très forte réduction des lessivages d'azote, cet élément étant réorganisé dans l'humus en présence de l'activité

biologique. Le risque environnemental est nul en SCV (Semis direct sur Couverture Végétales, d'après Lucien Séguy du CIRAD) dans les rotations testées.

Les courbes sur la minéralisation et le manque d'azote donnent d'importantes informations. Non seulement, il est possible de mesurer un niveau de risque environnemental, mais il est aussi possible d'évaluer le risque total de lessivage d'azote du système de culture en couplant le résultat mesuré avec l'excédent du bilan de fumure mesuré par le bilan CORPEN. A titre d'exemple, un agriculteur pratiquant une rotation colza/blé/orge/ sur un sol argilo calcaire avec exportation des pailles, sans couvert et en labour à une perte d'humus de 1 t MO/ha/an (tableau 1), ce qui génère une perte de carbone de 0,6 t C/ha/an (tableau 3) et un excédent de minéralisation de 60 kg N/ha/an (tableau 5).

Si cet agriculteur a un bilan N excédentaire de 25 kg N/ha/an, ce qui est décrit comme un bon résultat par le CORPEN, alors l'excédent de fumure se cumule avec l'excédent d'azote minéralisé du sol. Ainsi, dans une telle ferme, le risque environnemental est très fort. Elle produit une émission de 2202 kg de CO<sub>2</sub> par an et un risque de lessivage de 85 kg N/ha/an. Cette réflexion ne prend pas en compte les autres émissions de GES du système de culture qui se rajoutent aux émissions du sol.

A l'inverse, les meilleures techniques agronomiques identifiées, à savoir le semis direct avec restitution des pailles et couvert végétal en agriculture conventionnelle, dans cette même situation argilo calcaire, est capable de stocker 1,8 t MO/ha/an, soit 1 t C/ha/an ce qui entraîne un manque de 100 kg N/ha/an pour les besoins des cultures. Un agriculteur ayant ces pratiques est en difficulté sur sa ferme. Même si l'excédent du bilan azote serait de 40 kg N/ha/an, le risque environnemental de lessivage de l'azote reste nul. Il manque 100 kg d'azote au sol pour fabriquer la matière organique. Ainsi, l'activité biologique réorganisera l'azote excédentaire du bilan de fumure (tableau 7).

Il y aura une « faim d'azote ». L'agriculteur devra veiller à équilibrer tous les bilans : ceux en carbone au niveau du sol et ceux en azote en regardant justement comment se comportera son sol via le bilan humique.

Idéalement, ce manque d'azote calculé par le bilan humique peut être compensé par un couvert végétal de légumineuses. Pour rappel, 1t MS de légumineuse restitue environ 40 kg N/ha. En semis direct, il sera primordial d'obtenir de bons rendements avec les couverts végétaux.

Cette analyse des courbes réalisées avec le bilan humique revisité montre qu'il est possible de prédire et de mesurer le stockage de carbone des sols agricoles. Chaque situation peut être analysée spécifiquement au niveau du risque ou du gain environnemental encouru. Il suffit de disposer du rendement des cultures, des informations sur l'exportation des pailles, sur la présence ou l'absence des couverts végétaux et leurs rendements, sur le niveau de perturbation des sols, sur la nature du sol, sur le climat local, sur la quantité et la nature des fumures organiques apportées et de croiser ces informations avec le bilan azote de la ferme.

Le bilan humique donne accès aux informations suivantes :

- Stockage ou le déstockage du carbone du sol selon les pratiques agricoles,
- Quantité de carbone (ou de CO<sub>2</sub>) stockée ou déstockée
- Risque environnemental de lessivage de l'azote
- Quantité d'azote perdue annuellement par un système de culture donné

Le bilan humique permet aussi une approche prédictive des systèmes de culture que développent les agriculteurs. Il permettra d'identifier les meilleures combinaisons agro-environnementales. Cette donnée est importante. Il sera possible de tester des systèmes

de culture innovants et de savoir s'ils sont capables de séquestrer ou non du carbone. La production de biogaz s'inscrit dans ce travail à faire. Il serait catastrophique que la production de biogaz se fasse avec des techniques conventionnelles incapables de restaurer les statuts organiques des sols. De plus, même si les fumiers corrigent actuellement les défauts de certaines techniques, le fumier produisant de l'humus, passer celui-ci dans un processus de méthanisation revient à perdre 50 % de son contenu en carbone. Les digestats pourraient se comporter comme de vulgaires lisiers vis-à-vis du statut humique des sols : ils auront une contribution faible. Ils pourront être utilisés sans soucis en SCV<sup>1</sup> mais avec beaucoup de problèmes en agriculture conventionnelle où ils risquent d'augmenter la pollution.

---

<sup>1</sup> Semis direct sur Couvert Végétal

## Conclusion

L'analyse effectuée a permis d'identifier tous les paramètres scientifiques influençant le bilan humique au niveau de la ferme. La reprise de l'équation de Machet (1990) réalisée à partir du travail de Dupuis et Hénin (1947) a été améliorée avec les travaux récents de l'INRA et d'ARVALIS (1991) à Boigneville. Ce travail d'investigation a permis d'intégrer l'influence du travail ou du non travail du sol. En effet, pour l'IAD qui travaille sur la conservation des sols, il est important que les agriculteurs puissent bénéficier d'informations fiables et facilement mesurables vis-à-vis de l'impact environnemental de leurs pratiques agronomiques.

La recherche bibliographique ainsi que l'utilisation des différents modèles de bilan humique disponibles autorisent la création d'un calculateur automatique du bilan humique.

En réalisant la différence entre humification des résidus des cultures et minéralisation de la matière organique présente dans le sol, le calculateur, paramétré avec les éléments issus de la recherche, permet de mesurer non seulement la quantité de MO que le système de culture génère, mais aussi le risque environnemental. Ce risque comprend les émissions de gaz à effet de serre mais aussi, en associant cet indicateur au bilan CORPEN, le risque de lessivage des nitrates et autres pollutions liées à l'azote minéral. Par exemple les résultats pour la rotation Colza/Blé/Orge en labour conventionnel sans restitution des pailles et sans couverts, on observe un excès de 60kg d'azote minéralisé auquel il faudrait rajouter le surplus existant dans le plan de fumure (Bilan CORPEN). Le risque environnemental est donc très élevé pour ce type de pratique. En moyenne les résultats se dégradent toujours pour l'agriculture biologique à cause des faibles rendements.

Le potentiel du calculateur de bilan humique ne se limite pas simplement à faire état de la balance carbone de pratiques agricoles, mais d'être un réel outil d'aide à la décision pour les agriculteurs car il permet de donner les bonnes informations pour le choix des bonnes pratiques et de faire des simulations.

La création d'un indicateur basé sur le calcul du bilan humique permettrait de pouvoir choisir le système agricole le plus adapté pour maximiser le potentiel de production de matière organique des sols. La relation de cause à effet entre le gain de carbone et d'azote du sol, permet en outre à cet outil de prendre en compte le risque environnemental. Sa combinaison avec les indicateurs de l'Institut de l'Agriculture Durable, notamment l'indicateur des émissions de gaz à effet de serre, pourrait être un réel tremplin pour trouver les combinaisons les plus pertinentes pour passer d'une agriculture source de carbone à une agriculture puits de carbone. Dans les rotations simulées, la plus grande différence mesurée dans le stockage de carbone avoisine 2 tonnes de carbone par hectare et par an.

Ces résultats doivent s'affiner. En effet, dans cette étude, les apports exogènes (fumier, compost, lisier, BRF, ...) ne sont pas pris en compte ni le potentiel lié au stockage du carbone dans les arbres (haies, agroforesterie). A l'analyse, il apparaît que certaines combinaisons agricoles innovantes, soit l'agroforesterie avec une présence 50 arbres à l'hectare en SCV pourrait stocker durablement de très grandes quantités de carbone.

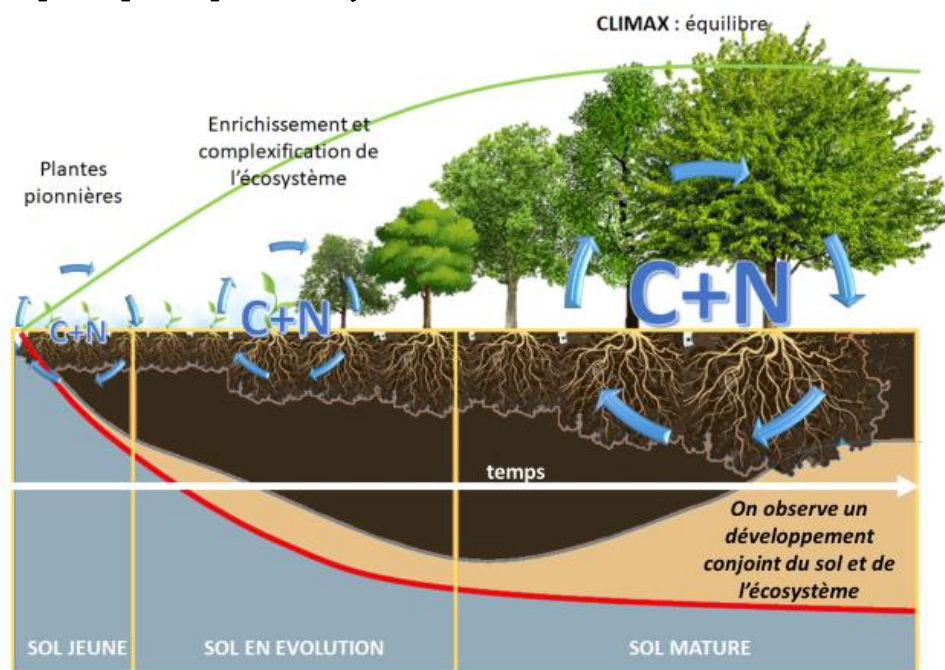
Un dernier point important mérite d'être soulevé. Qu'en est-il des émissions de GES sous forme de protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) qui ont pourtant un impact important sur l'environnement (1kg de N<sub>2</sub>O ≈ 310 kg de CO<sub>2</sub>). Une piste de recherche s'ouvre pour les acteurs du puits de carbone agricole.

Dès lors qu'un sol a un bilan humique positif, qu'il stocke du carbone, émet-il encore des N<sub>2</sub>O ? A ce stade de la démarche, tout agronome sait que l'humification des matières organiques est sous la dépendance de l'activité biologique et que, en présence de 10 unités de carbone, 1 kg d'azote sera prélevé dans le sol pour être stocké dans l'humus. Les mêmes bactéries qui minéralisent l'azote sont aussi celles qui déminéralisent l'azote du sol. Ainsi, en utilisant les nitrates en solution dans l'eau du sol, l'activité biologique élabore l'humus qui durablement augmente la fertilité des sols. En ayant un bilan humique positif, la totalité de l'azote du sol est réutilisée pour l'humification et le sol manquera même d'azote en semis direct sous couvert végétal (SCV).

La question mérite d'être posée : un sol possédant une forte activité biologique et se transformant en puits de carbone grâce à une gestion en SCV est-il encore une source d'azote nitreux ?

## Annexe 1 – Carbone : les clefs pour l’agriculture durable

### Le principe : copier l’écosystème

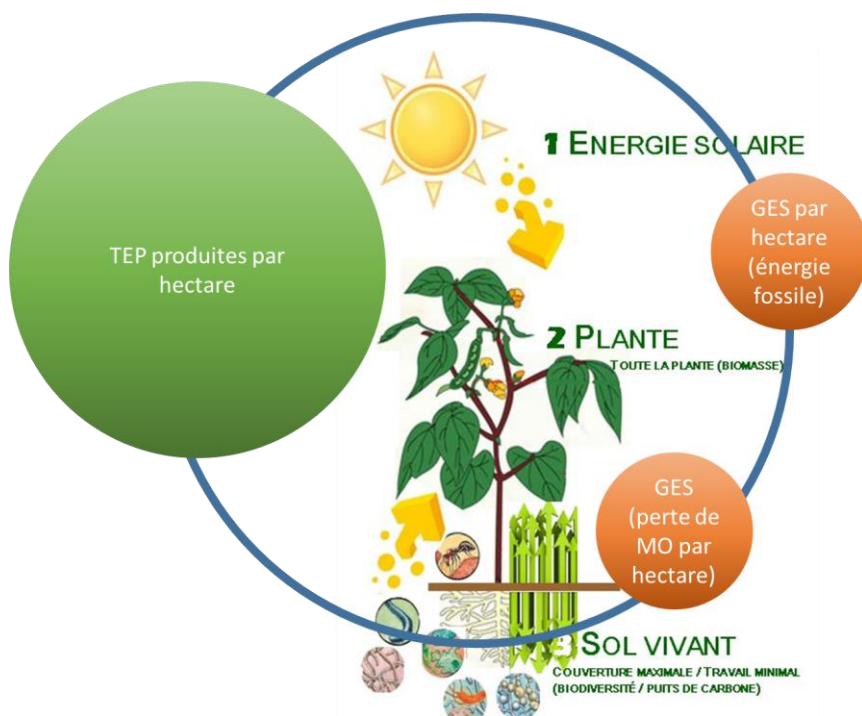


### Conservation des sols-puits de Carbone

- Couverture permanente
- Intervention minimum

### Rendement carboné

- Forte production de biomasse
- Biodiversité
- Recyclage maximum





## Annexe 2 – Une ferme en polyculture-élevage qui séquestre du Carbone

### La ferme : EARL de Fontaine Rachisy

Piney, Aube, Champagne-Ardenne

177 ha de SAU

60 UGB (brebis allaitantes et agneaux viandes)

1 UTH

Parc matériel :

1. Compil
2. Strip-till
3. Semoir direct
4. Pulvérisateur



### Contexte Pédoclimatique

Situé à proximité de Troyes, Piney présente un climat tempéré océanique humide, avec une pluviométrie annuelle de 620 mm, et 50 jours de sécheresse estivale.

Les sols sont en majorité de la craie (60 %), et des argiles drainées (40 %).

### Ressource en eau

La ferme se trouve dans le bassin versant Seine-Normandie, en plein cœur d'une zone vulnérable selon la Directive Nitrates.

Une source coule au sein de la ferme, la Rachisy, qui alimente l'Auzon, lui-même affluent de l'Aube.

### L'histoire

- 1992 : Début du non-labour (TCS) sur certaines parcelles
- 1997 : Passage en semis direct pour diminuer les coûts de mécanisation, sur certaines parcelles
- 1998 : Séparation du GAEC et création de l'EARL
- 2007 : Création d'un troupeau de 450 brebis

---

### Objectifs des changements de pratiques

- Réduction des charges de mécanisation ;
- Gain de temps ;
- Amélioration de la valeur ajoutée ;
- Relance de l'élevage (Ovins) et autoconsommation : valorisation des productions végétales sur place.

### Itinéraire technique :

- Rotation longue, 9 à 12 cultures (blé, betteraves sucrières, orge d'hiver et de printemps, maïs grain, pois d'hiver, colza d'hiver, soja, féverole, luzerne, dactyle, fétuque, chanvre, prairies temporaires, raygrass,...) ;
- Couvert végétal pâturé dès que possible
- Apport d'azote minéral : ~105 UN/ha/an (peu/pas de phosphore et de potassium) ;
- Apport d'azote organique : ~20 UN/ha/an (fumier d'ovins) selon les cultures.

### Les couverts végétaux :

- Dès que possible ;
- Composition : graminées (avoine : 27 %), légumineuses (féverole, pois, vesce : 58%), crucifères (radis : 3 %) et autre (tournesol, phacélie : 12 %) ;
- Rendement : 4 à 5 t/ha de matière sèche ;
- Destruction : chimique avec 1 l/ha de glyphosate ou pâturé.

## Bilan 4 pour 1 000

- Rotation mise en place en 2012-2013 : Betteraves / Blé / Colza / Orge / Betteraves / Blé / Orge / Chanvre / Blé

OU

- Blé / Tournesol / Blé / Maïs grain / Soja / Blé / Maïs grain x2.

Cette rotation permet de stocker 9,3 t de carbone par ha en 30 ans, soit 0,3 t de carbone par ha et par an.

En 30 ans, le taux de MO passe de 3,1 % à 3,5 %, soit une augmentation annuelle de 4,3 %.

Cela s'explique par une restitution partielle des pailles et totale des couverts, un apport d'azote organique via du fumier d'ovins, et par la suppression partielle du travail du sol.

## Séquestration du carbone et de l'azote :

La séquestration de 310 kg/ha/an de carbone permet d'incorporer 31 kg/ha/an d'azote sous forme d'humus, dont le C/N=10.

Cela supprime le risque de lessivage de l'azote. L'excédent de 20 unités est récupéré par l'humification (ammonification des nitrates).

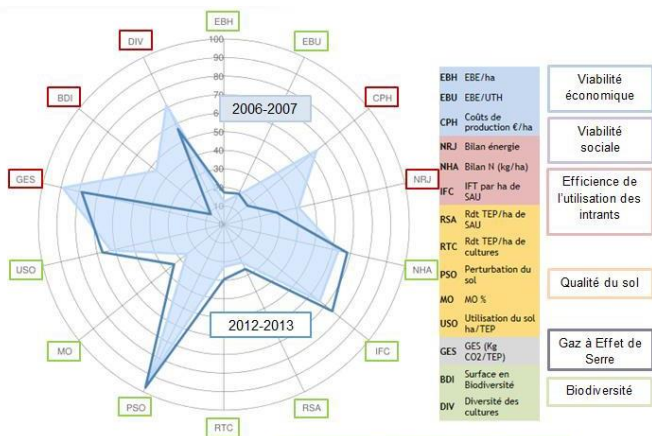
## Bilan azote

- Apport moyen de ~105 unités d'azote minéral par ha et par an.
- Apport moyen de ~20 unités d'azote organique par ha et par an.
- Fixation de l'azote atmosphérique par les légumineuses :
- ~10 unités d'azote par ha et par an.
- Export par les cultures de ~115 UN/ha/an.

## Méthode des bilans

- Apports totaux : 135 UN/ha/an
- Exports totaux : 115 UN/ha/an  
=>Azote résiduel : 20 UN/ha/an

## Comparaison des indicateurs IndiciaDes pour les années comptables 2006-2007 et 2012-2013



Pour 2/3 des indices (en vert), on observe une amélioration entre 2006 et 2012, pour la même SAU :

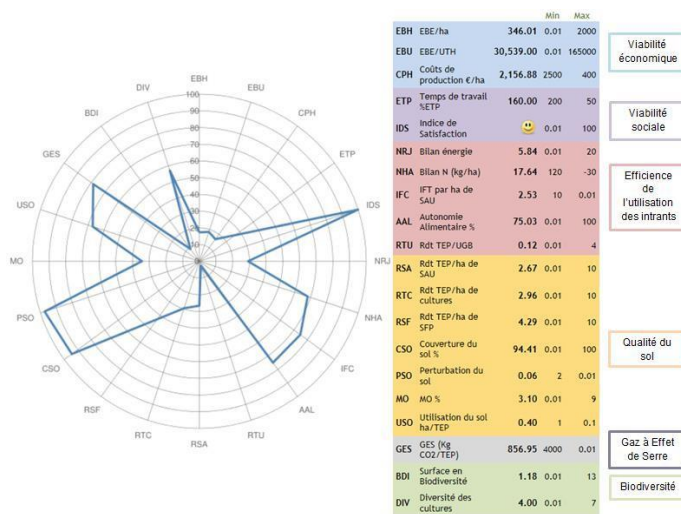
- l'EBE (Excédent Brut d'Exploitation) a augmenté (EBH, EBU) ;
- la quantité d'azote minéral et organique restant après exportation des récoltes (NHA) a diminué, et ne présente plus de risque environnemental car la rotation stocke 270 kg de carbone/ha, ce qui permet la séquestration de 27 unités d'azote

- les traitements en produits phytosanitaires sont moins importants (IFC) ;
- le rendement a augmenté (RSA, RTC) ;
- l'indice de travail du sol reste stable (PSO) ;
- le taux de matière organique (MO) a augmenté (2,3% en 2004 / 3,1% en 2013) ;
- le nombre d'hectares nécessaires pour produire une TEP a diminué (USO).

Pour le dernier tiers (en rouge), on observe une dégradation :

- les coûts de production ont augmenté (CPH) : cela est dû à l'ajout de l'activité élevage (investissements, coût d'élevage des animaux, ...) ;
- la productivité du système, illustrée par le ratio TEP (Tonne équivalent Pétrole) produites sur TEP consommées (NRJ) a un peu diminué : l'activité élevage engendre effectivement une consommation plus importante en énergie que les cultures seules ;
- la quantité de CO2 émis pour la production d'une ETP (GES) a augmenté de ~440 à ~860 kg de CO2/TEP, ce qui est dû aux ovins, qui émettent des GES ;
- la surface en biodiversité (BDI) a diminué (certaines surfaces ont été reconverties pour produire des céréales par exemple), ainsi que la diversité des cultures (DIV).

## Focus sur les indicateurs IndiciADEs 2012-2013



### Indicateurs sociaux

L'agriculteur est globalement satisfait de son exploitation (IDS), mais il y consacre beaucoup de temps (ETP). Cela est notamment dû à l'atelier élevage et à des responsabilités extérieures (agricoles ou non).

### Indicateurs agro-environnementaux :

Avertissement : Toutes les productions alimentaires de la ferme sont recalculées en TEP (1 Tonne Equivalent Pétrole = 41 800 MJ, source : ADEME). Cette unité permet la comparaison sous la forme énergétique de tous les systèmes d'agriculture indépendamment des pratiques.

- Les rendements (RSA, RTC) sont de l'ordre de 3 TEP/ha, ce qui représente par exemple 7,0 t de blé/ha de SAU en moyenne (1 TEP  $\approx$  2,64 t de blé, source : ADEME) ;
- Le bilan énergétique de la ferme est bon : il faut mobiliser 1 TEP pour produire 6 TEP sous forme alimentaire (NRJ). Ce bilan énergétique donne un regard sur l'efficacité de l'énergie utilisée ;
- La pression phytosanitaire, évaluée par l'indice de fréquence de traitement (IFT), est plus faible que l'IFT de référence de Champagne-Ardenne (2,5 contre 5,7, source : <http://agriculture.gouv.fr>) ;
- Le bilan azote (NHA) est excédentaire de  $\sim$ 20 unités/ha. Ceci est inférieur à la norme retenue dans IndiciADEs (25 UN/ha). De plus, le bilan 4 pour 1 000 (bilan humique), faisant apparaître une séquestration de 0,3 t/ha de C avec les pratiques actuelles (SD, restitution des couverts, restitution partielle des pailles, et de fumier), permet d'estimer que le risque environnemental est nul. En effet, la séquestration de 310 kg/ha de C permet la séquestration de 31 UN/ha pour un C/N=10, ce qui supprime tout risque de lessivage ;
- L'indicateur d'autonomie alimentaire (AAL) montre que les cultures végétales sont principalement destinées à de l'autoconsommation (la production végétale sert à nourrir les brebis) ;
- Le sol est couvert la plupart du temps (CSO) : plus de 11 mois dans l'année. La perturbation du sol (PSO) est très faible, car l'agriculteur pratique le semis direct dès que possible, et les TCS (Techniques Culturelles Simplifiées) ;
- L'émission de gaz à effet de serre (GES) est calculée en kg de CO2 équivalent/TEP. 1 TEP correspondant à une production alimentaire. La pollution est assez faible ( $\sim$ 860 kg CO2/TEP  $\approx$  325 kg CO2/t de blé) ;
- La ferme abrite une faible surface en biodiversité (BDI :  $\sim$ 1 % de la SAT).

### Ressentis de l'agriculteur

- Autoproduction pour l'élevage (export de certaines pailles, pâturage des couverts) ;
- Réduction des coûts de mécanisation et des charges de travail ;
- Réduction de la consommation de carburants ;
- Gain de temps ;
- Augmentation du taux de matière organique (2,3% en 2004 / 3,1% en 2013).

## Performance du bilan Carbone

La performance alimentaire de cette ferme est bonne : pour 1 TEP consommée, elle produit 5,84 TEP sous forme alimentaire, soit 5,84 tonnes équivalent carbone produites avec 1 tonne équivalent carbone (1 TEP  $\approx$  1 t équivalent carbone, source : ADEME). Ramené à la production à l'hectare, on obtient 2,50 t/ha de carbone produit pour la société, ce qui consomme 0,43 t/ha de carbone sous forme énergétique (TEP). Cette consommation de carbone (énergie) génère des GES à hauteur de  $\sim$ 585 kg/ha de carbone ( $\sim$ 860 kg CO<sub>2</sub>/TEP équivalent à  $\sim$ 235 kg C/TEP (1 kg CO<sub>2</sub> = 3,67 kg C, source : ADEME), soit  $\sim$ 585 kg/ha de carbone pour 2,50 t/ha de carbone produit).

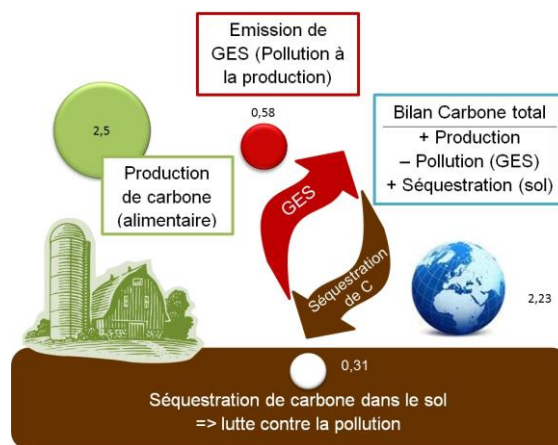
Le bilan 4 pour 1 000, réalisé à partir du bilan humique, permet d'estimer la séquestration à 310 kg C/ha, ce qui permet de soustraire la totalité du bilan azote au lessivage (31 kg N/ha) par la séquestration de l'azote dans l'humus.

On remarquera que la séquestration de 310 kg/ha supprime la moitié de la pollution ( $\sim$ 585 kg C/ha) du système de production. Cette ferme compense la moitié des émissions de carbone.

La dégradation du bilan GES s'explique par l'introduction d'un élevage de ruminants (ovins). Un des buts principaux de cet élevage est la valorisation sur place des productions végétales, et la présence de moutons n'est pas remise en question ici.

L'amélioration des résultats passe par la diminution d'émissions de GES, en diminuant le travail du sol (réduction des surfaces en TCS, par exemple, ce qui réduirait la consommation du fuel à l'hectare), mais également par l'augmentation et l'amélioration des couverts végétaux, qui doivent être restitués au maximum.

Pour 1 ha, quantité exprimée en t/ha



## Evolution du stock de carbone à long terme

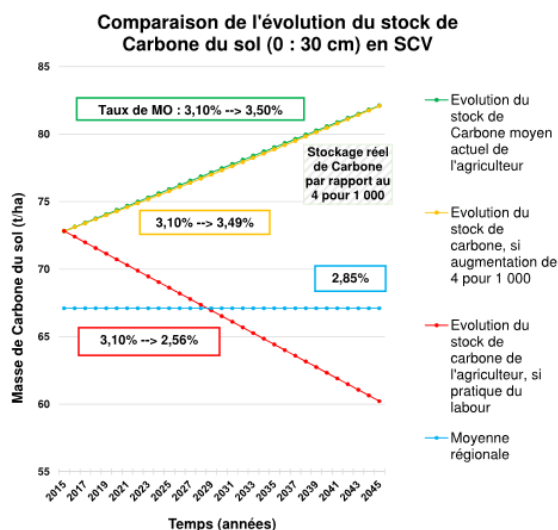
- Changements de pratiques en 1992 : passage du travail du sol aux TCS (Techniques Culturelles Simplifiées), puis en 1997 au semis direct (SD).
- Taux de matière organique en 1997 : 2,38%, soit 96 tonnes de MO/ha ou encore 56 tonnes de C/ha ( $\sim$ 58% de carbone dans l'humus du sol) et 5,6 tonnes de N/ha (C/N de l'humus=10).
- Taux de MO actuel en 2015 : 3,1%, soit 126 tonnes de MO/ha ou encore 73 tonnes de C/ha ( $\sim$ 58% de carbone dans l'humus du sol) et 7,3 tonnes de N/ha (C/N de l'humus=10).  
L'augmentation du taux de MO des sols se caractérise par le stockage de 17 tonnes de C/ha en 18 ans, soit 0,9 tonnes de carbone par ha et par an et 90 UN/ha/an.

L'évolution du stock de carbone dans les sols de la ferme est désormais lente. Le stockage représente 310 kg de carbone par ha et par an, ce qui équivaut à environ 530 kg d'humus/ha/an. A ce rythme, il faudra encore 80 ans de bonnes pratiques pour gagner 1% de MO à l'hectare.

## Moyenne régionale

Sur les trente premiers centimètres de sol, l'hypothèse d'une masse volumique de 1,35 t/m<sup>3</sup> permet d'estimer une masse de terre arable à 4 050 t/ha.

Entre 2000 et 2004, la moyenne régionale (Champagne-Ardenne) de stock de carbone organique dans les trente premiers centimètres de sol était de 16,6 g/kg, soit 67,1 t/ha. Aucune variation significative du stock de carbone n'a été observée entre les périodes 1990-1995 et 2000-2004 sur cette même région (source : <http://geoidd.developpement-durable.gouv.fr>).



### Evolution du stock de carbone du sol sur 30 ans

Le stock de carbone contenu dans les 30 premiers centimètres du sol évolue différemment selon les pratiques.

Dans le cas de M. Bertrand Patenôtre, les pratiques actuelles (semis direct et TCS, restitution partielle des pailles, apport de fumier), permettent une augmentation du stockage de carbone de 4,3 %, ce qui correspond au projet politique du GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) de 4 pour 1 000.

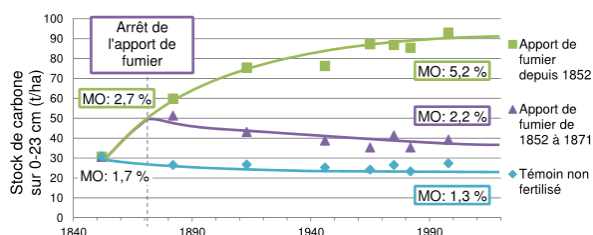
S'il avait continué à labourer son sol ou s'il reprenait le labour aujourd'hui, on observerait une diminution annuelle de 5,3 %.

### Hoosfield Spring Barley Experiment

- Essai longue durée (depuis 1852) ;
- Etude de l'évolution du stock de carbone dans le sol (0-23 cm) ;
- Sol cultivé : monoculture orge.

3 cas :

- Parcelle témoin cultivée sans apport de fumier ;
- Parcelle cultivée avec apport de fumier de 1852 à 1871 (35 t/ha/an) ;
- Parcelle cultivée avec apport de fumier depuis 1852 (35 t/ha/an).



- Le stockage de Carbone est un processus long ;
- Le stockage de Carbone est un processus temporaire et réversible ;
- Le stockage de Carbone est limité (existence d'un plafond).

## Annexe 3 – Calcul du Bilan humique dans indiCAdes



N°	Description	Quantité	Espèce
1	Ble de Colza	50 Ha	Ble
2	Ble de Charrue	10 Ha	Ble
3	Ble de Blé	35 Ha	Ble
4	Colza d'Orge d'hiver	68 Ha	Colza
5	Colza de Blé	35 Ha	Colza
6	Orge d'hiver de Blé	68 Ha	Orge d'hiver
7	Charrue d'Orge d'hiver	15,5 Ha	Charrue
8	Sarrasin de Blé	5 Ha	Sarrasin

En premier lieu, l'agriculteur intègre quelques données simples relatives à la ferme :

- Région
- Climat
- Pluviométrie
- Nombre de jours de sécheresse

Puis il définit l'espèce cultivée ainsi que la superficie de culture.

### Type de sol et Matière organique

Type de sol

Taux de matière organique de la parcelle ou de l'ilot (en %)

### Interculture précédente

Date de récolte de la culture précédent l'interculture

Un couvert végétal permanent, semé ou spontané (repousse colza,...) était-il présent avant l'implantation de la culture ?

Superficie de ce couvert végétal précédent (en ha)

Date de semis de l'interculture

Technique d'implantation du couvert précédant la culture

Profondeur de travail du sol (en cm)

Nombre d'espèces dans le couvert végétal

Pourcentage de graminées dans le couvert végétal précédant la culture (en %)

Pourcentage de légumineuses dans le couvert végétal précédant la culture (en %)

Pourcentage de crucifères dans le couvert végétal précédant la culture (en %)

Le questionnaire permettant le calcul comporte un maximum de 30 questions très simples, connues par tous les agriculteurs.

Elles se répartissent en :

- Type de sol et matière organique
- Interculture précédente (si il y en a une)
- Culture principale
- Apports organiques
- Récolte

---

Pourcentage d'autres variétés dans le couvert végétal précédant la culture (en %)

Pourcentage du couvert végétal exporté (en %)

Rendement du couvert restitué (en tMS/ha)

Date de destruction du couvert

Surface du couvert détruite chimiquement

en ha

Surface du couvert détruite par travail du sol

en ha

Surface du couvert détruite par roulage, fauche, broyage (en ha)

### **Culture principale**

---

Date de semis de la culture

Techniques de gestion des sols

Depuis combien d'années ?

Profondeur de travail du sol (en cm)

Dose de semis (en kg/ha)

Part des semences achetées (en %)

Part des semences traitées (en %)

### **Fertilisation organique**

---

Type d'amendement organique

Quantité

### **Récolte**

---

Date de récolte de la culture

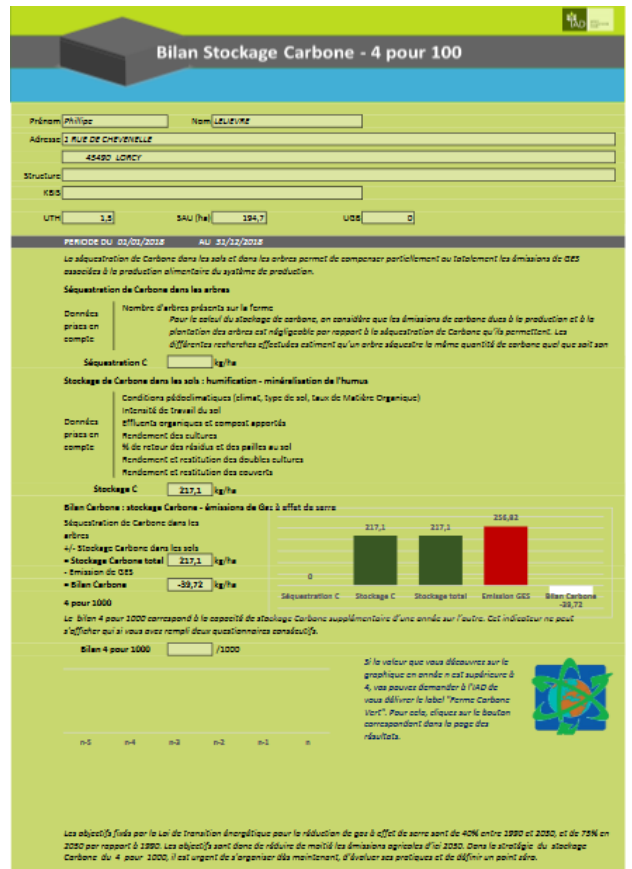
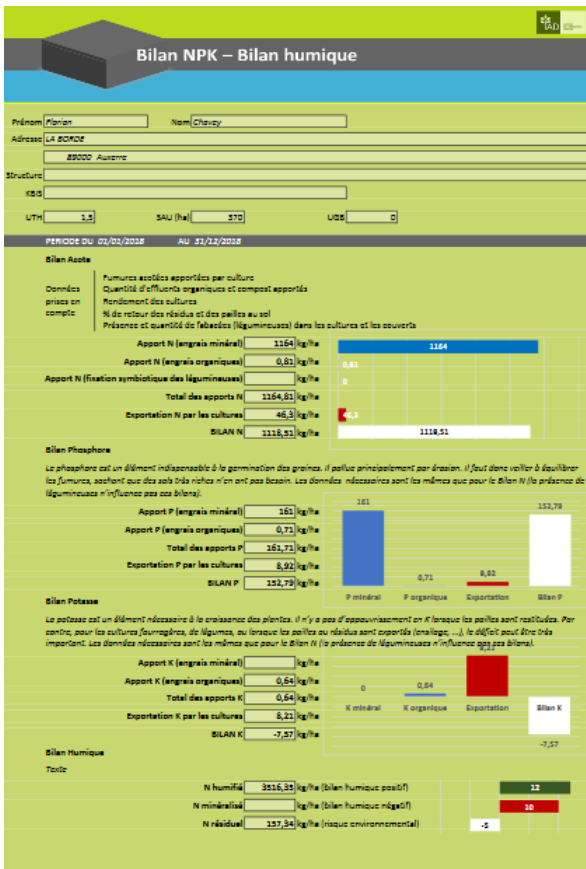
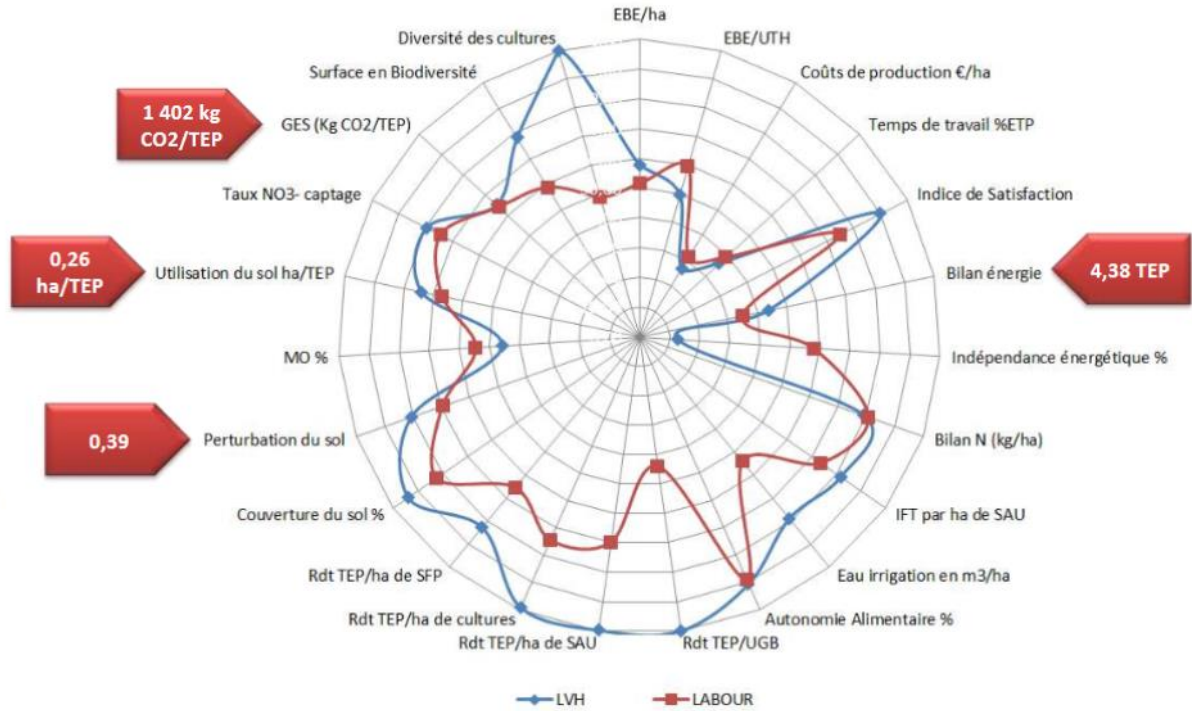
Rendement de la culture (en t/ha)

Rendement paille (en tMS/ha)

Pourcentage de paille restituée au sol

Les résultats sont présentés sous forme de :

- Radar
- Données brutes et résultat des indicateurs calculés
- Fiche thématique





## Liste des références bibliographiques

**ADEME.** (s.d.). *Agriculture et forêt Climagri*

<http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=-1&cid=96&m=3&catid=24979>

**AGRAPRESSE hebdo.** *Les rendements du bio inférieurs de 25% au conventionnel*

<http://www.agrapresse.fr/agriculture-societe/les-rendements-du-bio-inf-rieurs-de-25-au-conventionnel-art334045-14.html>

**Agro Transfert.** *Gestion et Conservation de l'Etat Organique des Sols.* <http://www.agro-transfert?rt.org/index.php/fr/nos-projets/preservation-des-ressources-naturelles/-gestion-et-conservation-de-letat-organique-des-sols->

**Brochier, V.** *Modélisation de la dynamique de la matière organique*  
[http://www7.inra.fr/qualiagro/efficacite\\_agronomique/matieres\\_organiques\\_du\\_sol/modelisation\\_de\\_la\\_dynamique\\_de\\_la\\_matiere\\_organique](http://www7.inra.fr/qualiagro/efficacite_agronomique/matieres_organiques_du_sol/modelisation_de_la_dynamique_de_la_matiere_organique)

**Bolinder M.A., Angers D.A., Dubuc J.P., 1997.** Estimating shoot to root ratios and annual carbon inputs in soils for cereal crops. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 63, 61-66

**Bolinder, M. A., Janzen, H. H., Gregorich, E. G., Angers, D. A., & Van-denBygaart, A. J. (2007).** An approach for estimating net primary productivity and annual carbon input into the soil for common agricultural crops in Canada. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 118, 29–42.

**Caroline Chambenoit,** *Fertilisation azotée de la pomme de terre*  
INRA; ITCF; Agro-transfert.

**Chambre d'Agriculture du Languedoc-Roussillon.** (2011). *Les produits organiques utilisables en agriculture en Languedoc-Roussillon\_ Tome 1.*

**Chambre d'Agriculture Manche.** *Ray-grass et Trèfle blanc .*  
[http://www.manche.chambagri.fr/prairie\\_rga\\_tb.asp](http://www.manche.chambagri.fr/prairie_rga_tb.asp)

**Christian Schvatz.** *Guide de la fertilisation raisonnée: grandes cultures et prairies.* France Agricole Editions.

**Clément Marc F., 2009 ;** Rotations dans la culture de la pomme de terre : bilans humiques et logiciel de calcul - agronome, conseiller en grandes cultures, MAPAQ, Centre de services agricoles de gatineau  
[https://www.agrireseau.net/pdt/documents/Clement\\_collpdt09\\_AR.pdf](https://www.agrireseau.net/pdt/documents/Clement_collpdt09_AR.pdf)

**Collet, P.** *ClimAgri: un vaste chantier de mesure de l'impact de l'agriculture sur le climat.*  
<http://www.actu-environnement.com/ae/news/pcet-emissions-ges-agricole-13670.php4#xtor=EPR-1>

**Arrouyas, D. (2002).** *Contribution à la lutte contre l'effet de serre: Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ?* Expertise INRA.

**E. Attard, X. L. (2011).** *Impacts de changements d'occupation et de gestion des sols sur la dynamique des matières organiques, les communautés microbiennes et les flux de carbone et d'azote.*

**INRA.** (2013). *Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ? Potentiel d'atténuation et coût de dix actions techniques.* Paris: Inra.

**Jérôme Labreuche, Y. M. (2010, Mai 7).** Diversité des pratiques, raisonnement impacts sur les cultures. Saint Hilaire en W.(55).

**KColeman, D.J. (1999).** *ROTHC626.3A model for the turnover of carbon in soil.* Harpenden: IACR- Rothamsted.

**Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire (2008).**  
*Facteur 4, la réponse au défi climatique.*

**Robert, M. (2002)** *La séquestration du carbone dans le sol pour une meilleure gestion de terres.*  
Paris - Institut National de Recherche Agronomique.

**Tannenberg, V.** *Taxe Carbone: La France fait un deuxième essai.*  
<http://www.journaldelenvironnement.net/article/taxe-carbone-la-france-fait-un-deuxieme-essai>