

NOV.
2020

ABC'TERRE-2A :

APPLICATION PARTICIPATIVE ET APPROPRIATION PAR LES ACTEURS LOCAUX DE LA DEMARCHE ABC'TERRE*

(2017-2020)

*ABC'Terre : Atténuation du Bilan gaz à effet de serre incluant le stockage Carbone dans les sols agricoles à l'échelle du Territoire.

Annexes

ADEME



Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Energie

Un projet coordonné par



avec comme partenaires :



Annexe 5 : Guide méthodologique de calcul du bilan GES des systèmes de culture, intégrant le calcul de la dose d'azote minéral apportée, propre à la méthode ABC'Terre

Document réalisé par Marion Delesalle, Agro-Transfert Ressources et Territoires (2020)

Mise à jour réalisée par Justine Lamerre, juin 2022 – Mise à jour des teneurs N et TAN des PRO, et des FE des engrais minéraux, amendements et PRO, en cohérence avec les annexes du Label Bas Carbone Grandes Cultures

Guide méthodologique de calcul du bilan GES des systèmes de culture, intégrant le calcul de la dose d'azote minéral apportée, propre à la méthode ABC'Terre

ABC'Terre-2A

Application participative et Appropriation de la démarche ABC'Terre
à l'échelle des territoires régionaux

Projet coordonné par :



En partenariat avec



Avec le soutien financier de



Décembre 2020

Document réalisé par :

Marion Delesalle, Agro-Transfert Ressources et Territoires

Avec la participation de :

Fiona Obriot et Caroline Leroux, LDAR,
et Joachim Boissy, Carine Czeryba et Justine Lamerre, Agro-Transfert Ressources et Territoire

Table des matières

Annexe 5 : Guide méthodologique de calcul du bilan GES des systèmes de culture, intégrant le calcul de la dose d'azote minéral apportée, propre à la méthode ABC'Terre.....	2
Guide méthodologique de calcul du bilan GES des systèmes de culture, intégrant le calcul de la dose d'azote minéral apportée, propre à la méthode ABC'Terre	3
Table des matières	4
Sigles et abréviations.....	6
Introduction.....	8
1. Rappels sur les étapes structurant la méthode ABC'Terre	8
2. Échelles de calcul.....	8
3. Reconstitution des pratiques culturales.....	9
1) Calcul de la dose d'azote minérale apportée (N min) alimentant le bilan GES	12
1. Les différents modes de paramétrage de Nmin selon la culture et le territoire	12
2. Calcul de la dose d'azote minéral « Nmin calculées ».....	15
KeqN : coefficient d'équivalence en engrais N minéral. Ce coefficient correspond au rapport entre la quantité d'azote apportée par un engrais de synthèse et celle apportée par le PRO permettant d'obtenir la même absorption d'azote par la culture. Il est déterminé à partir de la période d'apport conseillé, identifiée pour les principaux PRO à l'aide de la brochure « Fertiliser avec les engrais de ferme » (IDELE et al., 2001), le type de PRO et la culture qui bénéficie de cet apport de PRO (COMIFER, 2013). Les détails de la méthode utilisée pour déterminer ces KeqN se trouvent en.....	20
4. Synthèse de la méthode permettant de calculer la dose d'azote minéral	23
2) Calcul du bilan de Gaz à Effet de Serre	24
1..... Émissions directes de N ₂ O dues à la gestion par les sols des entrées d'azote	25
2..... Émissions directes de CO ₂ dues aux apports de chaux et d'urée	27
3..... Émissions indirectes de N ₂ O dues à la gestion par les sols des entrées d'azote	28
4..... Émissions directes et indirectes de CO ₂ dues à l'usage des machines agricoles	31
5. Émissions indirectes de CO ₂ en amont dues aux intrants	32
6. Émissions dues ou évitées par les variations de stock de carbone dans les sols	36
7. Calcul final des émissions de GES à l'échelle du territoire	39
Conclusion	42
Échelle de résultats	42
Bibliographie.....	43
Annexes	45
Annexe 1 : Dose par défaut d'azote minéral apporté sur les cultures dont le mode de paramétrage est « Nmin_1 »	46

Annexe 2 : Choix de la méthode de calcul de la dose d'azote minéral apportée	47
Annexe 3 : Rendements par défaut.....	53
Annexe 4 : Besoins des cultures	55
Annexe 5 : Coefficients de présence des cultures.....	56
Annexe 6 : Minéralisation des résidus de culture	57
Annexe 7 : Minéralisation des cultures intermédiaires	59
Annexe 8 : Teneurs en azote des PRO paramétrés dans l'outil	61
Annexe 9 : Méthodologie suivie pour déterminer les coefficients d'équivalence des PRO en engrais minéral	63
Annexe 10 : Méthodologie suivie pour associer un KeqN aux catégories fictives de PRO de Simeos-AMG	65
Annexe 11 : Méthodes de détermination de l'azote absorbé avant ouverture du bilan.....	67
Annexe 12 : Facteurs d'émissions retenus dans le bilan GES ABC'Terre	68
Annexe 13 : Méthodologie suivie pour associer un facteur d'émissions à toutes les cultures paramétrées dans l'outil	77
Annexe 14 : Méthodologie suivie pour associer les facteurs d'émissions liées aux traitements des PRO	80
Liste des tableaux	82
Liste des figures	82

Sigles et abréviations

C : Carbone

CaCO₃ : Carbonate de calcium

CI : Culture Intermédiaire

CO₂ : Dioxyde de carbone

CO₃²⁻ : Carbonates

CO(NH₂)₂ : Urée

Coeff tps : Coefficient de temps de présence de la culture

COMIFER : Comité français d'étude et de développement de la fertilisation raisonnée

C org : Carbone organique

CST : Comité Scientifique et Technique

Eq CO₂ : équivalent CO₂

GES : Gaz à Effet de Serre

GIEC : Groupement International Experts Climats

GREN : Groupement Régional Experts Nitrates

H₂O : Eau

ha : Hectare

HCO₃²⁻ : Bicarbonates

K : Potasse

k₁ : Coefficient isohumique

K₂O : Oxyde de potassium

LDAR : Laboratoire Départemental d'Analyses et de Recherches

Min h : Minéralisation de l'humus

Min RdC : Minéralisation des Résidus de Culture

Min CI : Minéralisation des Cultures Intermédiaires

MS : Matière sèche

N : Azote

N₂ : Diazote

N₂O : Protoxyde d'azote

NH₃ : Ammoniac

NH₄⁺ : Ammonium

Nmin : Azote minéral

NO_3^- : Nitrate

NO_x : Oxydes d'azote

NPdC : Nord Pas de Calais

OH^- : Ion hydroxyle

P : Phosphore

P_2O_5 : Pentoxyde de phosphore

PMG : Poids Mille Grains

PRG : Pouvoir de Réchauffement Global

PRO : Produits Résiduaire Organiques

q : Quintal

RdC : Résidus de Culture

Rdmt : Rendement

Rf : Reliquat post-récolte

RPG : Registre Parcellaire Graphique

RSH : Reliquat Sortie Hiver

t ou T : Tonne

TAN : Total Ammonia Nitrogen

UCS : Unité Cartographique de Sol

UTS : Unité Typologique de Sol

X PRO : Fraction minérale contenue dans le Produit Résiduaire Organique

Introduction

1. Rappels sur les étapes structurant la méthode ABC'Terre

La méthode de diagnostic territorial ABC'Terre résulte de l'articulation de 5 étapes, comme l'illustre la Figure 1 ci-dessous.

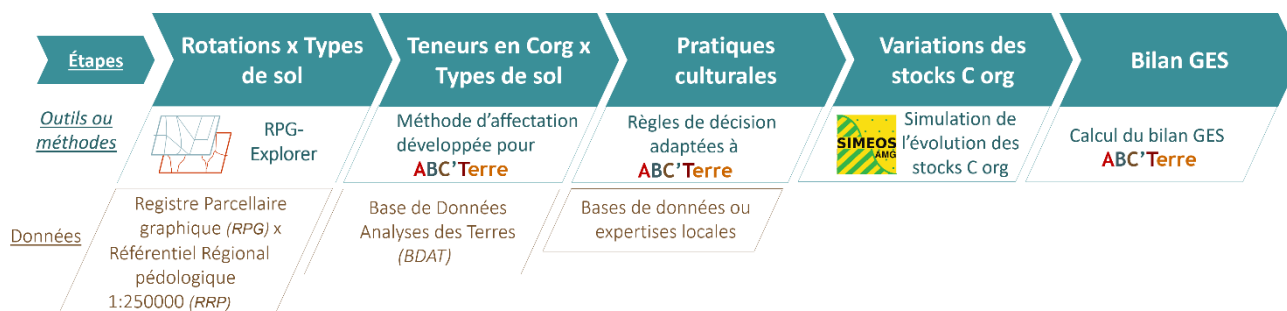


Figure 1: Schéma illustrant les 5 étapes structurant ABC'Terre

Les trois premières étapes de la méthode permettent : (i) d'identifier et de reconstituer l'ensemble des rotations existant sur le territoire, (ii) de les rattacher à leur type de sols et à une teneur en carbone organique (C org), (iii) d'associer ces rotations à des pratiques culturales pour obtenir des systèmes de culture reconstitués, et surtout, (iv) d'alimenter le diagnostic d'évolution de l'état organique des sols, d'estimer la dose d'azote minéral (Nmin) apporté et d'effectuer le bilan de GES (Gaz à Effet de Serre) des systèmes de culture du territoire.

Le calcul de bilan GES, développé à l'échelle du système de culture, reprend les différents postes de calcul préconisés par le Groupement International des Experts Climat (GIEC) et intègre en plus les variations du stock de C org des sols cultivés à l'échelle d'un territoire agricole. Ce bilan est établi de manière à prendre en compte au maximum les effets des types de sols et des pratiques agricoles et à faire le lien, dans la mesure du possible, entre les cycles du carbone et de l'azote.

2. Échelles de calcul

Échelle spatiale

Le bilan de GES est réalisé à une échelle spatiale définie par l'assolement de rotations, par type de sol et par type d'exploitation, obtenu en sortie de RPG-Explorer.

Le calcul est effectué pour chaque système de culture (une rotation définie par des pratiques culturales), associé à un type de sol précis (une Unité Typologique de Sol, appelée UTS), localisé sur une Unité Cartographique de Sol (UCS) précise, caractérisé par une teneur en C org et produit dans un type d'exploitation donné.

En fonction des objectifs du déploiement de la démarche, une agrégation de ces unités pourra être réalisée. Par exemple, pour illustrer les résultats à travers une représentation cartographique, une agrégation des systèmes de cultures par UCS sera nécessaire (car seules les UCS sont localisables).

Échelle temporelle

L'unité de référence pour réaliser le bilan de GES est le système de culture annualisé. Le calcul est réalisé en tout premier lieu pour chaque culture n de chaque système de culture reconstitué. Les émissions de GES pour l'ensemble des cultures d'un même système de culture sont ensuite agrégées (pour reconstituer ce système). Les émissions GES sont donc calculées à l'échelle du système de culture dans sa globalité, soit, sur autant d'années que dure la rotation. Toutes les rotations n'ayant pas la même durée, les résultats sont donc ensuite divisés par le nombre de cultures dans la rotation pour obtenir des résultats annualisés, et ainsi, pouvoir comparer les systèmes de culture entre eux.

L'itinéraire technique d'une culture est fortement dépendant de l'itinéraire technique de l'interculture et de la culture précédente. Par exemple, les émissions directes de N_2O sont corrélées aux quantités d'azote (minéral ou organique) apportées aux cultures. Or, les besoins en azote de la culture n seront dépendants de la présence ou non d'un couvert d'interculture entre l'année $n-1$ et l'année n , de la culture qui précède $n-1$, de la gestion de la fertilisation azotée sur cette culture précédente, etc... De ce fait, le calcul des émissions GES de chaque culture, qui a lieu dans un premier temps, prend en compte l'itinéraire de l'interculture qui la précède et de l'impact à long terme de l'itinéraire de la culture implantée en année $n-1$. Les émissions GES liées à la gestion de l'interculture qui précède la culture n seront ainsi attribuées aux émissions GES de la culture n .

Par ailleurs, les résultats de Simeos-AMG, estimant l'évolution du stock de C org des sols à long terme, sont fournis à l'échelle du système de culture (le modèle AMG évalue l'impact des pratiques culturales sur l'état organique des sols à long terme en simulant la même rotation plusieurs fois de suite, c'est donc cette échelle « rotation » qui est élémentaire dans Simeos-AMG). L'intégration du stock de C org dans le bilan GES du territoire ne peut donc se faire qu'à l'échelle du système de culture (et non pas à l'échelle culture ou du couple « précédent-suivant »).

Pour évaluer les variations des stocks de C org des sols avec Simeos-AMG, l'unité temporelle est différente. L'évolution des stocks de C org des sols ne se calculent pas annuellement mais sur des pas de temps longs. Les variations de stocks de C org seront calculées dans ABC'Terre sur 30 années, pour une question d'uniformité avec les projets de recherche nationaux sur le stockage de C org (Pellerin *et al.*, 2019). Ensuite, ces variations de stocks de C org (différence entre le stock de C org simulés dans 30 ans et les stocks initiaux de C org), sont divisées par 30 de sorte à obtenir des résultats annualisés. Cela permettra, entre autres choses, d'intégrer cette variation de stocks aux émissions de GES, à la même échelle du système de culture par hectare et par an.

Bien que l'échelle du système de culture soit prédominante dans le calcul du bilan GES d'ABC'Terre, l'échelle de calcul intermédiaire, à savoir le couple précédent-suivant, sera tout de même conservée pour étudier plus facilement les scénarios de modifications de pratiques culturales. En effet, pour faire émerger les pratiques culturales susceptibles d'influencer le stockage de C dans les sols ou les émissions de GES vers l'atmosphère, il est nécessaire de remonter à l'itinéraire technique pratiqué, paramétré à l'échelle de la culture (en fonction de la culture précédente, mais aussi de son type de sol, de son type d'exploitation...).

3. Reconstitution des pratiques culturales

Pour effectuer le bilan de GES, il est nécessaire d'associer aux rotations, obtenues en sortie de RPG-Explorer, des pratiques culturales. Or, les sources de données recensant ces pratiques sont très différentes entre les territoires. Par ailleurs, l'un des objectifs du projet ABC'Terre-2A consiste à généraliser la méthode ABC'Terre partout en France métropolitaine. Il était donc nécessaire de développer une méthode transposable à tous les

territoires français qui permette de reconstituer les pratiques culturales en les associant aux rotations par type de sol et par type d'exploitation, à partir d'une structure commune de sorte à alimenter les outils Simeos-AMG et bilan GES.

Un fichier de collecte des données d'entrées a donc été créé. Il permet de : (i) reconstituer les pratiques culturales, (ii) les associer aux rotations, (iii) aider les utilisateurs dans cette étape de reconstitution des systèmes de culture, (iv) répertorier les informations obtenues par les premières étapes d'ABC'Terre (assolements de rotations par type de sols via RPG-Explorer, affectation des teneurs en C org aux types de sols...), et (v) alimenter à partir d'un même fichier à la fois le bilan humique (avec Simeos-AMG), la méthode de calcul de la dose d'azote minéral et le bilan de GES.

Les méthodes développées dans ce guide pour calculer la dose d'azote minéral et le bilan de GES se basent donc en partie sur les informations collectées par l'utilisateur et synthétisées dans ce fichier de collecte. L'outil, développé par Agro-Transfert Ressources et Territoires pour coupler les étapes ABC'Terre et permettre de calculer le bilan GES incluant les flux de C org, sera basé sur l'import de ce fichier de collecte qui rassemble l'ensemble des données dont il a besoin pour effectuer les calculs du diagnostic.

Le schéma ci-dessous (

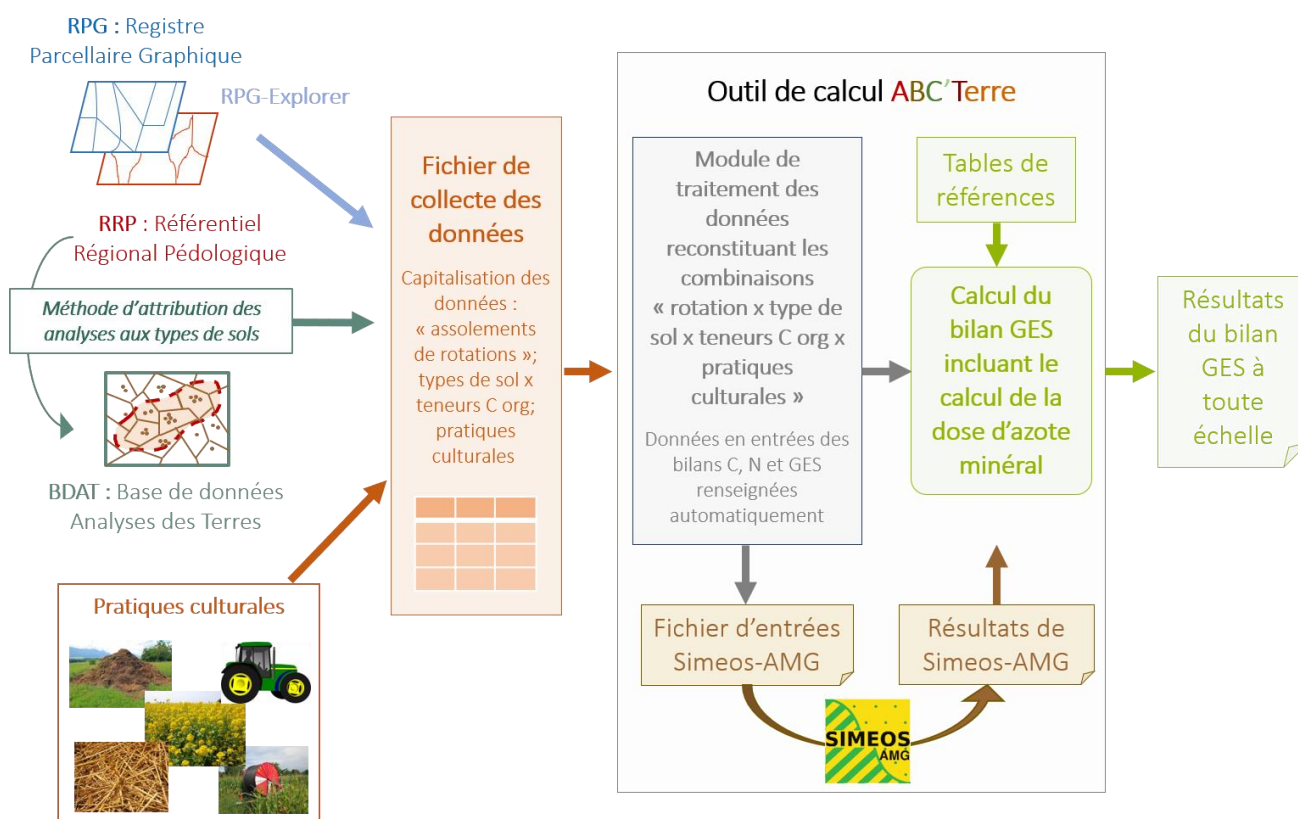


Figure 2) illustre la place du fichier de collecte dans l'outil développé pour effectuer le bilan de GES incluant les variations de stocks de C org à long terme (avec Simeos-AMG). En plus des données collectées par l'utilisateur, un ensemble de références est nécessaire pour effectuer les calculs. Ces références ont été construites à partir d'extractions de bases de données, de bibliographie et d'adaptation à dire d'experts de certains abaques pour répondre à l'ensemble des besoins d'ABC'Terre (exemple : liste très complète des cultures principales, intermédiaires ou dérobées paramétrables dans l'outil).

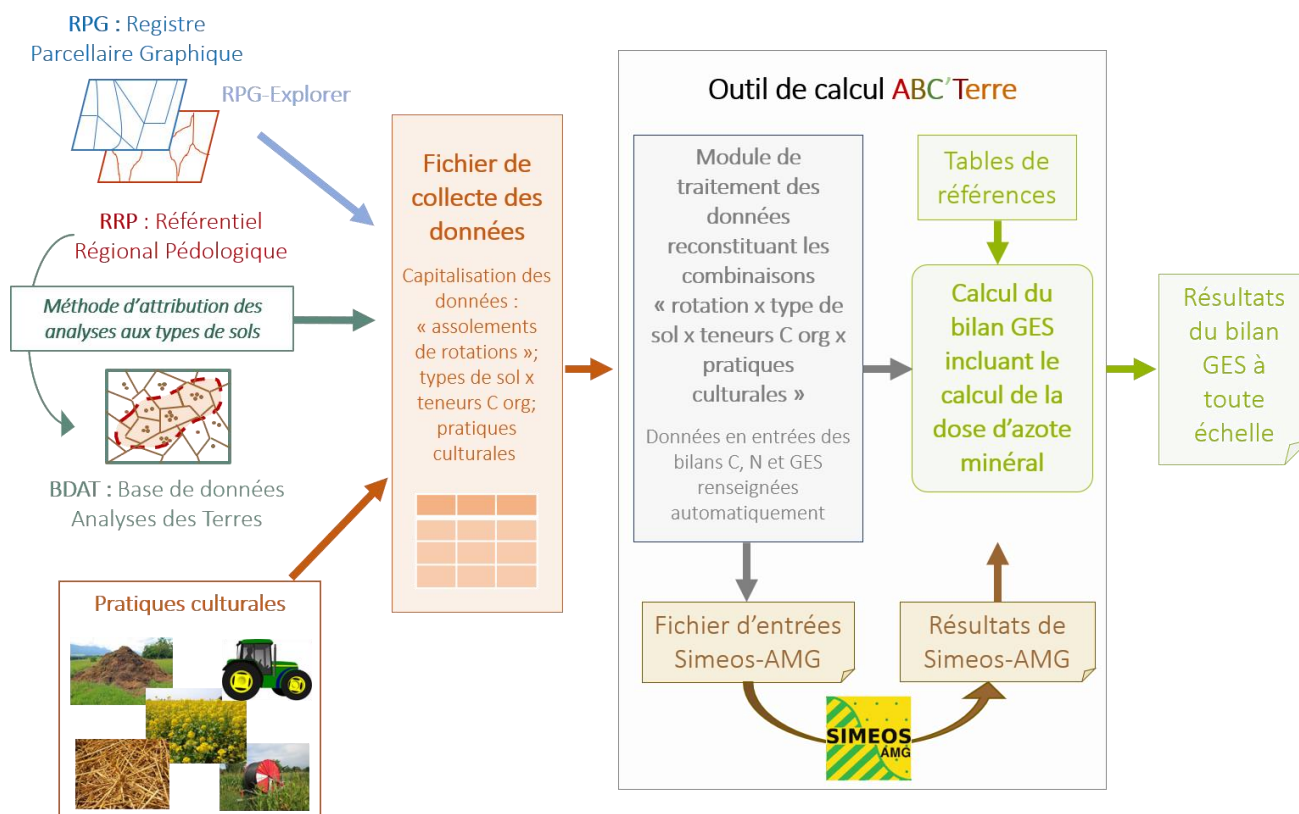


Figure 2 : Schéma illustrant le fonctionnement interne de l'outil ABC'Terre, développé par Agro-Transfert RT

1) Calcul de la dose d'azote minérale apportée (N min) alimentant le bilan GES

Dans le calcul du bilan de GES d'un système de culture, la fertilisation minérale est l'un des facteurs à l'origine des plus fortes émissions. Les doses Nmin paramétrées pour le calcul du bilan de GES auront donc une grande influence sur les résultats finaux d'émissions de GES du territoire. Il est donc nécessaire de déterminer finement ces doses Nmin.

Ces doses Nmin peuvent être déterminées de différentes façons. Elles peuvent être saisies manuellement par l'utilisateur, dans le fichier de collecte des données d'entrée, en fonction : (i) de la culture simplement, c'est le cas des cultures pluriannuelles et de quelques cultures assez atypiques, ou (ii) des données locales sur la gestion de la fertilisation par culture en fonction du type de sol (à partir d'enquêtes par exemple). Si ces données n'existent pas ou ne sont pas suffisamment précises, le calcul de la dose Nmin apportée est réalisé. Il se base sur la méthode du bilan prévisionnel azoté, simplifié, adapté à ABC'Terre (lien avec le sol et Simeos-AMG) et étudié pour être généralisable partout en France. Pour chaque culture étudiée, la différence entre les besoins de la culture et ce qui lui est fourni pour combler la totalité de ses besoins, sera calculée.

1. Les différents modes de paramétrage de Nmin selon la culture et le territoire

L'outil intégrera deux voies de détermination de la dose Nmin apportée : (1) saisie par l'utilisateur, en distinguant les cultures fourragères ou atypiques, « Nmin_1 », des cultures principales (céréales, oléagineuses, cultures industrielles...) dont les informations sont suffisamment précises pour permettre la saisie en fonction du type de sol (UTS), « Nmin_2 » ; (2) calculée par l'outil : « Nmin calculée ».

1.a. « Nmin_1 »

Pour certaines cultures, cultures fourragères ou plus atypiques sur le territoire français (ex : chicorée, ail, tabac...), il n'existe pas assez de références pour pouvoir appliquer la méthode de calcul de la dose Nmin ou pour pouvoir déterminer finement leurs pratiques de fertilisation. Il sera donc demandé à l'utilisateur de renseigner directement la dose d'azote le plus souvent apportée sur la culture (si jamais elle est cultivée sur le territoire) à partir de références ou d'expertises locales.

Des valeurs par défaut sont déjà paramétrées, les utilisateurs sont libres de les laisser ou de les modifier. Les cultures concernées par ce paramétrage et les doses d'azote généralement appliquées sur ces cultures issues de la bibliographie (valeurs donc par défaut) sont synthétisées en Annexe 1 : Dose par défaut d'azote minéral apporté sur les cultures dont le mode de paramétrage est « Nmin_1 ».

1.b. « Nmin_2 »

Cette voie de paramétrage de la dose d'azote minéral est facultative mais privilégiée par certains utilisateurs dans le cas où ils disposent de valeurs précises de doses Nmin sur certaines cultures très présentes sur le territoire, fonction du type de sol dans lesquelles elles sont implantées. Elle permet donc à l'utilisateur de saisir directement des doses d'azote minéral moyennes rendant compte des pratiques réelles d'apports réalisés sur le territoire, en s'appuyant sur des bases de données locales construites à partir d'enquêtes sur les pratiques culturales principalement. Le paramétrage de ces doses se fait pour les cultures souhaitées par UTS.

Avantage : intérêt pour sa représentation de la réalité

Inconvénient : la majorité des utilisateurs de l'outil n'auront pas accès à des données précises. Par ailleurs, ce paramétrage ne peut pas prendre en considération les pratiques de fertilisation organique ou de gestion des couverts par exemple distinguant les différents systèmes de culture.

Si l'utilisateur peut utiliser cette voie de détermination, alors le bilan GES se basera sur les « Nmin_2 », pour les calculs qui incluent le facteur Nmin.

1.c. « N min calculée »

Pour rappel, la voie de détermination « Nmin_2 » est facultative et ne concerne que les territoires qui disposent de références précises. Pour les autres territoires, il est alors nécessaire de passer par la méthode de détermination des doses d'azote appliquées, calculées en fonction de paramètres plus simples à collecter pour l'utilisateur.

Avantage : doses plus simples à obtenir pour l'utilisateur, en fonction du type de sol, du type d'exploitation et/ou des pratiques culturales du territoire

Inconvénient : moins précis car basé sur une méthode du bilan azoté généralisée

Si la culture pour laquelle on cherche à déterminer la dose Nmin ne figure pas dans la table « Nmin_1 » (cf 1.a) et que l'utilisateur ne dispose pas de données issues de références locales précises ou directement des agriculteurs de son territoire (cf 1.b), alors le bilan GES se basera sur les **Nmin calculées** pour les calculs qui incluent le facteur Nmin.

1.d. Synthèse

Différences entre « Nmin_1 » et « Nmin_2 »

Les doses « Nmin_2 » ont pour objectif d'être les plus proches de la réalité possible. Elles seront déterminées en fonction du type de sol (UTS).

Les doses « Nmin_1 » ont pour objectif de fournir une dose par défaut, pour des cultures qui ne représentent pas une surface importante sur le territoire ou pour lesquelles il est difficile d'automatiser une méthode de détermination de la fertilisation minérale (ex : cultures fourragères).

Comparaison des méthodes de détermination pour l'interprétation des résultats

La méthode de calcul pour obtenir les **Nmin calculées**, se base sur une méthode « optimisée », prenant en compte les fournitures du sol, des résidus de cultures, des PRO (...) pour satisfaire les besoins de la culture. La méthode est inspirée du bilan prévisionnel azoté utilisée par les conseillers en grandes cultures. On peut donc

supposer qu'elle se rapproche de la réalité terrain, en partant de l'hypothèse que les agriculteurs appliquent la dose qui leur est conseillée.

Dans le cas où le territoire dispose de références locales précises et où l'utilisateur a pu saisir les doses Nmin (bilan GES basé sur les « Nmin_2 »), il sera intéressant pour imaginer les scénarios alternatifs de comparer les doses réellement appliquées sur le terrain (« Nmin_2 ») aux doses qui devraient être appliquées (**Nmin calculées**) et étudier les marges de manœuvre (diminution envisageable ou non des doses Nmin à appliquer). Ainsi, les doses **Nmin calculées** apparaitront dans les résultats du bilan GES, même si ce bilan est basé sur les valeurs « Nmin_2 ».

Priorité aux doses « Nmin_2 » pour le calcul de bilan GES

« Nmin_1 » concerne un ensemble de cultures dont la dose Nmin ne pourra être déterminée que par la voie de détermination « Nmin_1 » (cf 1.a). En revanche, pour le reste et la majorité des cultures principales, deux modes de détermination sont envisageables : « Nmin_2 » et « Nmin calculées ».

1) Si « Nmin_2 » est renseignée par l'utilisateur, alors le bilan GES sera basé sur la dose « Nmin_2 » renseignée. Cependant, les résultats intermédiaires des doses Nmin calculées seront tout de même présents dans les sorties, en plus des « Nmin_2 », pour guider l'interprétation des résultats.

2) Si les doses Nmin sont calculées, alors le bilan GES sera basé uniquement sur ces « Nmin calculées » et l'interprétation des résultats d'émissions pour les cultures principales se fera à partir de ces Nmin calculées.

Le schéma ci-dessous synthétise le mode de détermination de la dose Nmin (Figure 3).

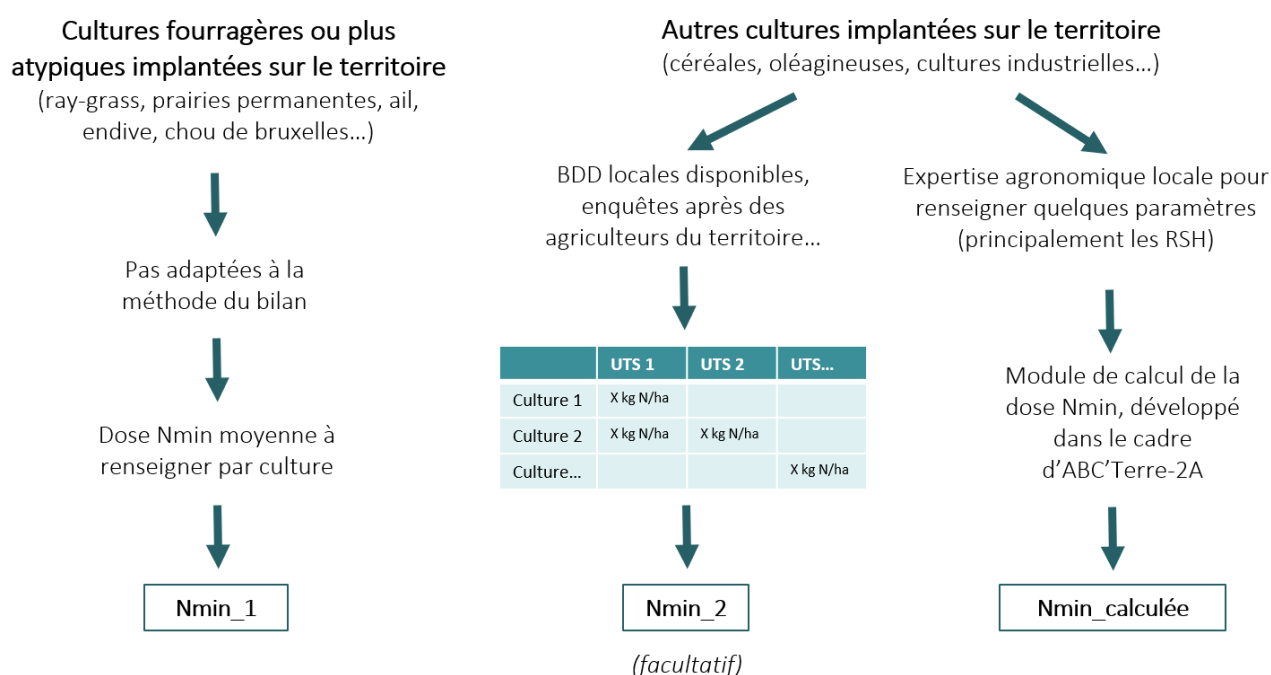


Figure 3 · Schéma illustrant les différents modes de détermination de la dose Nmin

2. Calcul de la dose d'azote minéral « Nmin calculées »

Les différentes étapes de réflexion conduisant à l'élaboration de la méthode de calcul de la dose Nmin sont résumées en Annexe 2 : Choix de la méthode de calcul de la dose d'azote minéral apportée. L'équation synthétisant cette méthode de calcul est la suivante :

$$N_{min} = (Rdmt \times Besoins) + Rf - [Min h + Min RdC + Min CI + X PRO + N abs + RSH]$$

Avec :

Rdmt : rendement

Besoins : en N / unité de production

Rf : Reliquats post-récolte

Min h : minéralisation de l'humus

Min RdC : minéralisation des Résidus de Culture

Min CI : minéralisation des cultures intermédiaires

Nabs : N absorbé pendant l'hiver

RSH : Reliquats Sortie Hiver

X PRO : fraction minérale de N apportée par les Produits
Résiduaux Organiques

Légende des couleurs :

A renseigner par l'utilisateur dans le fichier de collecte

Références bibliographiques
(Comifer, Arvalis, Instituts techniques...)

Calculé à partir des sorties de Simeos-AMG

Calculé à partir de la quantité et du type de PRO renseignés par l'utilisateur

Chaque membre ou composante de l'équation fera l'objet d'une sous-partie.

1) Rendement

Le rendement des cultures présentes sur le territoire est à paramétrer par l'utilisateur en fonction du type de sol, plus exactement de la réserve utile (RU) du sol. Ainsi, pour chaque culture présente sur le territoire, il est demandé à l'utilisateur de moduler le rendement en fonction de la classe de RU. 3 classes de RU ont été paramétrées au préalable par l'utilisateur en fonction des spécificités de son territoire.

Pourquoi la RU ? La réserve utile est un bon indicateur du potentiel agronomique d'un sol. Elle est proportionnelle à la profondeur, la matière organique, et au pourcentage d'argile et de limons du sol. Plus un sol sera profond, riche en matière organique, en argile et en limons et faible en éléments grossiers, plus il contiendra d'eau (RU élevée) et plus son potentiel de rendement sera élevé.

Comment paramétrer le rendement par classe de RU ? Pour moduler le rendement en fonction des 3 classes de RU, il est possible d'utiliser la méthode proposée dans le fichier de collecte des données. Elle consiste dans un premier temps à renseigner le rendement potentiel de chacune des cultures, c'est-à-dire, le rendement que chaque culture pourrait atteindre sans facteur limitant (et non pas le meilleur rendement observé sur le territoire par culture). Puis, un coefficient de dégradation est associé à chaque classe de RU puis affecté à chaque culture (avec des coefficients différents pour les cultures d'hiver, de printemps et pluriannuelles). Plus la RU sera faible (traduisant un faible potentiel du sol), plus le coefficient va dégrader le rendement potentiel. *A contrario*, plus la RU sera élevée, moins le coefficient dégradera le rendement potentiel.

Par ailleurs, l'utilisateur paramètre deux autres coefficients : le premier améliore le rendement potentiel pour les cultures qui se trouvent dans une zone irriguée et le deuxième dégrade au contraire le rendement estimé après dégradation par classe de RU pour les cultures se trouvant en zone hydromorphe (saturée en eau). De cette manière, si la culture est irriguée, alors le coefficient améliorant le rendement sera affecté au rendement potentiel (sans facteur limitant) de cette culture. En revanche, si la culture se trouve dans une zone

hydromorphe, alors le coefficient de dégradation sera affecté au rendement estimé par classe de RU de la culture. Des coefficients de dégradation (RU et hydromorphie) issus des références du projet PERSYST mené en Picardie (Tavares, 2015) sont proposées par défaut mais modifiables par l'utilisateur en fonction des caractéristiques de son territoire.

Si la méthode proposée dans le fichier de collecter des données ne convient pas à l'utilisateur, il peut paramétrer directement les rendements par culture et par classe de RU (sans tenir compte du rendement potentiel et des coefficients de dégradation).

Rendements par défaut : S'il n'est pas possible de déterminer les rendements par classe de RU, ni de paramétrer les rendements potentiels et coefficients de dégradation, alors, des rendements par défaut seront utilisés (cf :

2) Besoins de la culture

On distingue les cultures qui expriment leurs besoins : (i) en fonction de l'objectif de rendement à atteindre (besoins exprimés par unité de production) ; (ii) indépendamment du rendement et donc fonction de la surface de culture (besoins exprimés par hectare).

Les cultures dont les besoins sont évalués par unité de production

Certaines cultures comme le blé ou le colza ont des besoins en azote (N) qui sont fonction des objectifs de rendements à atteindre. Pour exprimer les besoins de ces cultures, les besoins en kg N par unité de production (kg N par quintal ou par tonne) sont à multiplier par les rendements, en quintal ou tonne par ha, (cf 1.2.1). Les besoins par unité de production pour les cultures concernées sont synthétisés dans le Tableau 11 de l'Annexe 4 : Besoins des cultures, et sont principalement issus des abaques construits par les instituts techniques.

Les cultures dont les besoins sont évalués par unité de surface

D'autres cultures, comme la betterave ou la pomme de terre, ont des besoins en azote indépendants de leur objectif de rendement. Les besoins de ce type de culture, exprimés en unité N par unité de surface (en kgN par ha), sont synthétisés dans le Tableau 12 de l'Annexe 4 : Besoins des cultures, et sont principalement issus des abaques construits par les instituts techniques.

3) Reliquats post-récolte

Le COMIFER préconise dans sa brochure de 2013 de se référer aux références d'AZOBIL© INRA, 2012, présentées en Tableau 1 : Rf : quantité d'azote minéral présente dans le sol à la fermeture du bilan

Tableau 1 : Rf : quantité d'azote minéral présente dans le sol à la fermeture du bilan

Épaisseur du sol	Sol léger	Sol limoneux	Sol argileux	Sol de craie
	Arg < 15 %	15 % < Arg < 30 %	Arg > 30 %	
	L < 45 %	L > 45 %		
	CaCO ₃ < 10 %	CaCO ₃ < 10 %		CaCO ₃ > 40 %
Sol superficiel (0 à 30 cm)	5	10	15	15
Peu profond (0 à 60 cm)	10	15	20	20
Profond (0 à 90 cm)	15	20	30	30
Très profond (0 à 120 cm)	20	30	40	40

Source : AZOBIL © INRA, 2012

Figure 4 : Délimitation du système de calcul étudié dans le cadre d'ABC'Terre Tableau 2, pour déterminer la quantité d'azote minéral présente dans le sol à la fermeture du bilan (en kg N/ha) :

La quantité d'azote présente dans le sol à la fermeture du bilan serait indépendante de la dose apportée, mais fonction du type de sol et de la profondeur d'enracinement de la culture. Par ailleurs, ces valeurs correspondent aux plantes dont l'enracinement est suffisamment profond. C'est le cas de la majorité des grandes cultures pour lesquelles ce calcul est réalisé (céréales, colza, maïs...).

4) Minéralisation de l'humus

La minéralisation de l'humus se calcule à partir de Simeos-AMG GN. L'outil de calcul ABC'Terre a été construit de sorte à récupérer les informations « stock de carbone organique initial » et « coefficient de minéralisation » Km (commun au carbone et à l'azote), directement dans les sorties de Simeos-AMG. L'équation pour calculer la minéralisation de l'humus est la suivante :

$$\text{Min h} = \frac{(\text{Stock C org initial} \times 0,35)}{\frac{C}{N}} \times \text{Km} \times 1000 \times \text{Coefficient d'adéquation période minéralisation / période bilan} \times \text{Coefficient de temps de présence}$$

Avec

Stock C org initial : Stock de carbone organique initial, en T/ha (issu du fichier de sortie de Simeos-AMG)

0,35 : le stock de carbone organique initial est multiplié par 0,35 car le coefficient de minéralisation ne s'applique que sur le carbone organique actif. Or, celui-ci correspond à 35 % en moyenne du carbone organique total (facteur paramétré dans Simeos-AMG)

C/N : rapport carbone sur azote de l'UTS étudiée (paramétré par l'utilisateur dans le fichier de collecte)

Km : Coefficient de minéralisation (issu du fichier de sortie de Simeos-AMG)

1000 : on multiplie la quantité d'azote issue de la minéralisation de l'humus (en T N/ha) par 1000 pour obtenir des kg N/ha

Coefficient d'adéquation période minéralisation /période bilan

La minéralisation de l'humus a lieu tout au long de l'année et non pas uniquement pendant la période du bilan azoté s'écoulant de la sortie de l'hiver à la récolte de la culture. Il est donc nécessaire de prendre en considération dans ce calcul, un coefficient permettant de considérer la proportion de minéralisation qui a lieu pendant cette période par rapport à la minéralisation totale annuelle.

Cette minéralisation est notamment corrélée à la température et à l'humidité, correspondant aux jours normalisés. De ce fait, les jours normalisés moyens en France ont été calculés, d'une part, pour la période du bilan et, d'autre part, pour l'ensemble de l'année pour estimer le rapport entre les deux. Pour ce faire, les données météo (température et humidité) de la base de données libre d'accès AgriForCast ont été utilisées et l'équation de calculs des jours normalisés issue de la publication de Clivot et al., (2017) a été appliquée. On estime ainsi qu'environ 80 % de la minéralisation a lieu entre la sortie de l'hiver et la récolte des cultures. Ce calcul a également été réalisé pour chaque région des territoires pilotes du projet ABC'Terre-2A. Le tableau ci-joint rassemble les coefficients d'adéquation entre la période de minéralisation et celle du bilan pour les trois régions pilotes.

Tableau 3 : Coefficients d'adéquation entre la période de minéralisation et la période du bilan pour les régions pilotes du projet ABC'Terre-2A

Hauts-de-France	0.7928
Alsace	0.83
Poitou	0.7949

Coefficient de temps de présence de la culture

Chaque culture se caractérise par un coefficient de temps de présence, correspondant à la période d'assimilation par la culture de l'azote issue des différentes formes de minéralisation. Le coefficient de minéralisation (Km) fourni par Simeos-AMG est établi sur une année entière. Or, les cultures ne sont pas présentes tout au long de l'année. Il est alors nécessaire de prendre en considération dans le calcul le temps

de présence de chaque culture par rapport à la période de minéralisation. Les coefficients de temps de présence de chaque culture sont basés sur les coefficients multiplicateurs de minéralisation du sol issus du GREN Hauts-de-France (2018) et sont synthétisés en Annexe 5 : Coefficients de présence des cultures.

6) Minéralisation des Résidus de Culture

Pour déterminer la valeur de minéralisation des résidus de culture, l'outil se base sur les références ARVALIS-INRA (2012), reprises dans la brochure du COMIFER (COMIFER, 2013) et par la majorité des GREN. Ces valeurs sont synthétisées dans l'Annexe 6 : Minéralisation des résidus de culture.

Si le précédent cultural n'est pas une céréale à paille, alors la valeur de minéralisation des résidus de culture sera égale à la valeur de la table de références. Les résidus des cultures autres que céréales à paille sont majoritairement restitués ou n'ont qu'un faible impact sur le bilan humique final.

En revanche, si le précédent cultural est une céréale à paille, la valeur de la table de références sera à multiplier par la part de ces résidus qui est restituée au sol. En effet, les références ARVALIS-INRA (2012) distinguent les résidus de céréales à paille restitués au sol de ceux qui sont exportés. Lorsque les pailles sont exportées, la valeur de la minéralisation est nulle. Le calcul de la minéralisation des résidus de céréales à paille ne porte donc que sur les résidus qui sont restitués. Étant donné qu'il est demandé à l'utilisateur de paramétrer le pourcentage de restitution des résidus de culture (en mettant l'accent sur les céréales à paille aux vues de leur importance pour le bilan humique), il est possible de déterminer la valeur de minéralisation des résidus de céréales à paille en effectuant le calcul suivant :

$\text{Min RdC [céréale à paille]} = \text{Min RdC} \times \% \text{ de restitution}$

Avec

Céréales à paille = « Avoine hiver », « Avoine printemps », « Blé dur », « Blé hiver », « Blé printemps », « Escourgeon », « Orge printemps », « Seigle » ou « Triticale »

Min RdC : valeur issue de la table de références (Annexe 6 : Minéralisation des résidus de culture) et égale à -20kgN/ha pour les céréales à paille

% de restitution : paramétré par l'utilisateur en fonction du type d'exploitation

Exemple :

Minéralisation des résidus de Blé hiver = - 20 kg N/ha (table de références)

Restitution des résidus de culture de Blé hiver (= paille de blé) dans une exploitation de type polyculture élevage = 30 % (fichier collecte des données)

Min RdC [Blé hiver] = - 20 x 30 % = - 6 kg N/ha

Les valeurs négatives de minéralisation des résidus de culture s'expliquent par le rapport C/N élevé des résidus de céréales à paille (riches en carbone) entraînant l'immobilisation (ou organisation) de l'azote du sol.

7) Minéralisation des cultures intermédiaires

Pour déterminer la valeur de minéralisation des cultures intermédiaires, l'outil se base sur les références ARVALIS-CETIOM-ITB-ITL (2011), reprises dans la brochure du COMIFER (2013) et par la majorité des GREN. Ces valeurs sont synthétisées dans l'Annexe 7 : Minéralisation des cultures intermédiaires.

Ces valeurs sont fonction de la culture intermédiaire implantée, de la quantité de biomasse produite (en T MS/ha) et de la période de destruction de cette culture intermédiaire. L'ensemble de ces informations sont paramétrées par l'utilisateur dans le fichier de collecte des données.

Pour les cultures intermédiaires n'apparaissant pas dans les abaques de références, le chef de projet « Multifonctionnalités des intercultures » à Agro-Transfert a été sollicité pour valider les hypothèses associant les valeurs des cultures intermédiaires présentes dans les abaques et celles qui ne l'étaient pas, en fonction de la similitude entre espèces (familles de cultures intermédiaires, potentiel de biomasse...).

8) Fraction minérale de N apportée par les PRO

Cette fraction minérale correspond à l'effet direct des PRO, autrement dit, à l'azote directement disponible pour la culture suite à l'apport de PRO. Cette fraction minérale se calcule comme ceci :

$$N_{PRO} = Q_{PRO} \times \% N_{PRO} \times KeqN$$

Avec

Q PRO : quantité de PRO épandu en m³ ou T/ha (paramétrée par l'utilisateur dans le fichier de collecte)

% N PRO : teneur en azote total du produit, par unité de volume ou de masse, déterminé à partir du type de PRO. Les valeurs des teneurs en azote des PRO paramétrés dans l'outil sont issues de la brochure du COMIFER (2013) et se trouvent en Annexe 8 : Teneurs en azote des PRO paramétrés dans l'outil.

KeqN: coefficient d'équivalence en engrais N minéral. Ce coefficient correspond au rapport entre la quantité d'azote apportée par un engrais de synthèse et celle apportée par le PRO permettant d'obtenir la même absorption d'azote par la culture. Il est déterminé à partir de la période d'apport conseillé, identifiée pour les principaux PRO à l'aide de la brochure « Fertiliser avec les engrais de ferme » (IDELE et al., 2001), le type de PRO et la culture qui bénéficie de cet apport de PRO (COMIFER, 2013). Les détails de la méthode utilisée pour déterminer ces KeqN se trouvent en

Annexe 9 : Méthodologie suivie pour déterminer les coefficients d'équivalence des PRO en engrais minéral.

Certains types de PRO n'apparaissent pas dans les abaques du COMIFER, notamment les catégories de PRO fictives paramétrées dans Simeos-AMG permettent à l'utilisateur d'associer un PRO non présent dans la liste initiale mais connu sur le territoire (et dont les analyses sont disponibles), à un PRO réel, à partir d'une teneur plus ou moins forte en carbone, d'un coefficient isohumique plus ou moins élevé et de sa forme solide ou liquide. La méthodologie suivie pour associer un KeqN à ces catégories est synthétisée en Annexe 10 : Méthodologie suivie pour associer un KeqN aux catégories fictives de PRO de Simeos-AMG.

9) Azote absorbé pendant l'hiver

La quantité d'azote absorbé par la culture avant l'ouverture du bilan, pendant l'hiver, est liée au développement de la biomasse à cette période. Les méthodes visuelles sont les plus simples à mettre en place pour déterminer l'état de croissance du peuplement et donc estimer l'azote absorbé pendant l'hiver. Il est donc demandé à l'utilisateur d'estimer l'état de développement couramment observé sur le territoire d'étude pour le colza et les céréales d'hiver, cultures absorbant le plus d'azote pendant cette période. Puis, à partir de la méthode de Terres Inovia (COMIFER, 2014a), anciennement CETIOM, pour le colza (estimation du poids frais, en kg/m², à partir de photos et d'un repère dans la biomasse), et d'Arvalis (COMIFER, 2014b) pour les céréales d'hiver (estimation du nombre de talles), il est possible d'associer des valeurs d'azote absorbé. Pour plus de détails sur ces méthodes, se référer à l'Annexe 11 : Méthodes de détermination de l'azote absorbé avant ouverture du bilan.

Par défaut, on estime à 78 kgN/ha d'azote absorbé pendant l'hiver par le colza (correspondant à un développement moyen à fort du colza, expertise du LDAR, confirmé par Terres Inovia) et à 25 kgN/ha pour les céréales d'hiver (correspondant à un développement de 3 talles).

10) Reliquats Sortie Hiver

Déterminer les reliquats sortie hiver à une échelle autre que parcellaire constitue une difficulté majeure dans la réalisation de ce calcul de la dose d'azote minéral. Il est demandé à l'utilisateur de renseigner ces reliquats en essayant d'être représentatif du territoire et en se basant sur des valeurs moyennes (s'abstraire donc de l'effet annuel et climatique).

Plusieurs options de paramétrage du RSH sont disponibles en fonction des données disponibles sur les territoires. La première option consiste à paramétrer les valeurs de RSH en fonction de la classe de RU (représentant un potentiel de sol), le type de précédent cultural et le type de culture en place. La deuxième, simplifiée, permet à l'utilisateur de paramétrer le RSH en fonction de la classe de RU et du type de précédent.

Les facteurs de détermination des RSH ont été établis à la lumière des nombreuses synthèses départementales et données recueillies localement.

Une attention particulière est demandée aux utilisateurs dans le renseignement de ces RSH territoriaux car les valeurs paramétrées par défaut ne doivent être utilisées qu'en dernier recours du fait de leur manque de pertinence. Le but de ces valeurs par défaut est avant tout que l'absence de valeur ne génère pas d'erreur critique bloquant l'outil. Néanmoins, plusieurs hypothèses ont été étudiées, notamment avec le LDAR, dans le but de paramétrer des valeurs de RSH par défaut qui soient cohérentes et généralisables partout en France. Il n'existe pas de synthèse nationale ou d'abaques permettant de répondre à cet objectif. Ainsi, la méthode retenue (et illustrée dans le Tableau 4) consiste à augmenter d'un delta de 20 UN /ha les valeurs de reliquats post récolte (cf 1. 2.3), partant de l'hypothèse que la minéralisation entre la fermeture et l'ouverture du bilan oscille autour de 20 UN/ha.

Tableau 4 : Valeurs de RSH par défaut paramétrées dans l'outil

Epaisseur du sol		Sableux	Limoneux	Argileux	De craie
Sol superficiel	[0; 30] en cm	25	30	35	35
Peu profond	]30; 60] en cm	30	35	40	40
Profond	]60; 90] en cm	35	40	50	50
Très profond	]90; 120] en cm	40	50	60	60

4. Synthèse de la méthode permettant de calculer la dose d'azote minéral

Tableau 5 : Synthèse de la méthode de calcul de la dose d'azote minéral apportée, développée dans le cadre d'ABC'Terre-2A

4. Synthèse de la méthode permettant de calculer la dose d'azote minéral

Tableau 5 : Synthèse de la méthode de calcul de la dose d'azote minéral apportée, développée dans le cadre d'ABC'Terre-2A

Sources

Références

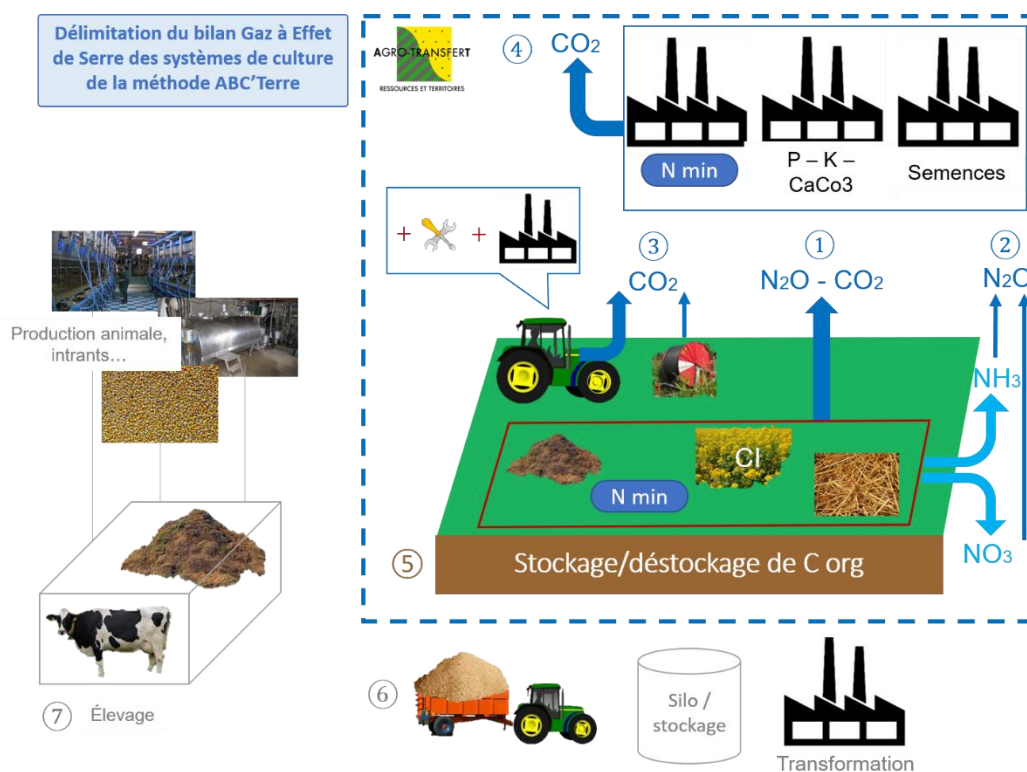
Fichier de collecte

Données acquises via Simeos-AMG

Besoins totaux		
Besoins	Soit : Besoins par ha	
	Soit : Rendements x Besoins par q ou par T	
Reliquat post récolte	Rf : abaques en f(texture simplifiée et profondeur du sol)	
Fournitures		
Minéralisation de l'humus	Stock initial de C	
	Part du C actif dans le C total = 35 %	
	Rapport C/N	
	Km : Coefficient de minéralisation	
	Coefficient de temps de présence // période du bilan	
	Coefficient "période de minéralisation" // période du bilan	
	TOTAL	Min h = ((Stock initial C / 3) / (C/N)) x Km x Coef Tps présence x Coef période min x1000
Minéralisation des Résidus de Culture (RdC)	Min RdC : abaques en f(la culture)	% restitution pour les céréales à paille
Minéralisation des cultures intermédiaires si CI	Min CI : abaques en f(la CI, sa biomasse et sa période de destruction)	
N minéral apporté par les apports organiques si apport de PRO	Type	
	Quantité apportée	
	KeqN	
	%N PRO	
	TOTAL	N PRO = Q PRO x KeqN x % N PRO
Reliquat sortie hiver	RSH : en f(RU, précédent et/ou culture en place)	
Azote absorbé pendant l'hiver si culture = colza ou céréales à paille	Nabs : en f(l'estimation du développement de la biomasse pendant l'hiver)	
N apporté par les engrais minéraux	Besoins totaux - fournitures =	N min = [(Rdmt x Besoins) + Rf] – [(Min h + N PRO + Min RdC + Min CI) + RSH + Nabs]

2) Calcul du bilan de Gaz à Effet de Serre

Pour comprendre les calculs qui composent le bilan de GES des systèmes de culture, dans le cadre d'ABC'Terre, il est important de bien définir les limites de ce bilan. La Figure 5 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** illustre ces-dernières.



Limites du système étudié dans ABC'Terre : systèmes de culture

① Emissions directes au champ dues à la gestion par les sols des entrées d'azote :

Engrais minéral, PRO, Cultures intermédiaires, Résidus de Culture

+ dégagement de CO₂ lors de la transformation de la chaux et l'urée

② Emissions indirectes au champ dues à la gestion par les sols des entrées d'azote :

Liées au lessivage et la volatilisation

③ Emissions dues à l'usage du matériel agricole

Combustion de carburant, transport, maintenance, fabrication

④ Emissions indirectes en amont dues aux intrants à destination des cultures

Fabrication, traitement, transport (hors produits phytosanitaires)

⑤ Stockage ou déstockage de carbone des sols cultivés

Hors système étudié :

⑥ Emissions liées à l'élevage : production animale, bâtiment, intrants (alimentation, antibiotique...)

Affectées également à l'élevage, les émissions liées à la production et au stockage des effluents d'élevage

⑦ Emissions liées à la récolte : transport jusqu'au silo, stockage, transformation de la production...

Figure 5 : Délimitation du système de calcul étudié dans le cadre d'ABC'Terre

Le bilan GES effectué dans le cadre d'ABC'Terre se concentre sur les émissions liées au système de culture. Les émissions au champ, liées à la gestion par le sol des apports d'azote et aux passages des machines nécessaires à l'application des itinéraires culturaux ; les émissions en amont, liées à la fabrication et au transport des intrants ; ainsi que la variation du stock de C org, sont inclus dans les limites de calcul du bilan GES d'ABC'Terre. L'opération de récolte est également incluse dans les limites du bilan, mais ce dernier s'arrête « en bout de champs » (le transport, le stockage et la transformation de la récolte ne sont pas pris en compte). De même, les émissions induites par les autres ateliers pouvant se trouver dans une exploitation agricole (élevage, transformation, etc...) ne sont pas intégrés au bilan GES d'ABC'Terre qui se concentre, une fois de plus, sur les systèmes de culture.

1. Émissions directes de N₂O dues à la gestion par les sols des entrées d'azote

Le protoxyde d'azote (N₂O) est produit naturellement dans le sol à travers les procédés de nitrification et de dénitrification. La nitrification correspond à l'oxydation microbienne aérobie de l'ammonium (NH₄⁺) en nitrate (NO₃⁻). La dénitrification correspond quant à elle à la réduction microbienne anaérobie du nitrate (NO₃⁻) en dinitrogène (N₂). Le N₂O, puissant gaz à effet de serre, est un co-produit de la nitrification et un gaz intermédiaire dans la chaîne de réaction de dénitrification. L'un des principaux facteurs favorisant l'émission de ce gaz est la disponibilité d'azote inorganique dans le sol, induite par l'apport d'azote sous différentes formes (GIEC, 2006).

Ces différentes formes d'apports d'azote sont liées à :

- la fertilisation minérale (Nmin),
- la fertilisation organique (N tot PRO),
- la restitution des résidus de culture (N tot RdC),
- la restitution de la culture intermédiaire (N tot CI).

Pour calculer les émissions directes de N₂O, il est nécessaire de calculer dans un premier temps les quantités d'azote apportées sous ces différentes formes.

a) Azote apporté par fertilisation minérale

L'azote apporté par fertilisation minérale a été soit paramétré par l'utilisateur (« Nmin_1 » et « Nmin_2 ») soit calculé (« Nmin calculée ») selon la méthode développée en partie 1 de ce guide.

b) Azote total apporté par fertilisation organique (N tot PRO)

L'azote total apporté par fertilisation organique se calcule comme suit :

$$N \text{ tot PRO} = Q \text{ PRO} \times \text{teneur N PRO}$$

Avec

N tot PRO : quantité d'azote total apportée par le PRO, en kgN/ha

Q PRO : quantité de PRO épandu en m³ ou T/ha (paramétrée par l'utilisateur dans le fichier de collecte).

teneur N PRO : teneur en azote total du produit en kgN par unité de volume ou de masse (t ou m³), déterminée à partir du type de PRO (Annexe 8 : Teneurs en azote des PRO paramétrés dans l'outil).

NB : L'azote total apporté par la fertilisation organique et qui entre dans le calcul du bilan de GES « N tot PRO » est à ne pas confondre avec le « N PRO » calculé précédemment pour estimer la fraction minérale d'azote apportée par les PRO. Ce « N PRO » intègre un facteur de calcul « KeqN » qui exprime l'efficacité d'un engrais organique par rapport à un engrais minéral de référence. Ce coefficient « KeqN » est adapté au calcul de la dose Nmin. Cependant, il n'est pas adapté au calcul du bilan GES qui évalue les émissions de GES dues à l'azote total compris dans le PRO.

c) Azote apporté par les résidus de culture (N tot RdC)

L'azote total apporté par les résidus de culture **apportés par le précédent** se calcule comme suit :

$$N \text{ tot RdC} = \frac{\text{Biomasse restituée} \times \text{Teneur en C RdC} \times \text{conv_T_kg}}{\frac{C}{N} \text{ RdC}}$$

Avec

N tot RdC : azote total issus des résidus de culture, en kg N/ha

Biomasse restituée : quantité de biomasse aérienne et racinaire restituée par la culture **précédente**, calculée par Simeos-AMG (variable transitoire récupérée via le couplage automatisé entre Simeos-AMG GN et l'outil de calcul du bilan GES). C'est justifié par l'unité d'étude qui est la campagne culturale. Les émissions de l'ITK sont affectées à une culture si elles ont lieu au sein de la campagne culturale, soit entre le premier travail du sol et jusque la récolte. Les résidus de la culture en cours seront restitués après cette dernière, et donc les émissions qui en découlent sont affectées à la culture suivante.

Teneur en C RdC : la teneur en carbone des résidus de culture est égale à 44 % (AMG)

Conv_T_kg : facteur de conversion permettant d'obtenir le N en kg N/ha et non pas des T N/ha

C/N RdC : rapport carbone sur azote des résidus aériens de culture (AMG à partir de Tribouillois *et al.*, 2015).

À défaut de disposer de références fiables ou suffisantes pour le rapport C/N de la partie racinaire des cultures, on part de l'hypothèse que le rapport C/N de la partie aérienne de la plante représente de manière satisfaisante (et suffisante pour le calcul de ces émissions) le rapport C/N global de la plante.

d) Azote apporté par les cultures intermédiaires

L'azote total apporté par les cultures intermédiaires se calcule comme suit :

$$N \text{ tot CI} = \frac{\text{Biomasse CI restituée} \times \text{Teneur en C du CI} \times \text{conv_T_kg}}{\frac{C}{N} \text{ CI}}$$

Avec

N tot CI : azote total issus de la culture intermédiaire, en kg N/ha

Biomasse CI restituée : quantité de biomasse aérienne et racinaire restituée par la culture intermédiaire, implantée avant la culture en cours, calculée par Simeos-AMG (variable transitoire récupérée via le couplage automatisé entre Simeos-AMG GN et l'outil de calcul du bilan GES)

Teneur en C CI : la teneur en carbone des cultures intermédiaires est égale à 44 % (AMG)

Conv_T_kg : facteur de conversion permettant d'obtenir le N en kg N/ha et non pas des T N/ha

C/N CI : rapport carbone sur azote des résidus aériens des cultures intermédiaires (AMG à partir de Tribouillois *et al.*, 2015).

De la même manière, à défaut de disposer de références fiables ou suffisantes pour le rapport C/N de la partie racinaire des cultures intermédiaires, on part de l'hypothèse que le rapport C/N de la partie aérienne de la plante représente de manière satisfaisante (et suffisante pour le calcul de ces émissions) le rapport C/N global de la plante.

Ce calcul s'applique pour les couverts d'interculture (détruits) comme pour les cultures dérobées (récoltées). Les deux types de cultures intermédiaires sont paramétrables dans l'outil.

e) Calcul final des émissions directes dues aux apports d'azote

Ces émissions directes dues aux apports d'azote se calculent comme suit :

$$\text{Emissions directes dues aux apports d'azote (en kg eq CO}_2\text{/ha)} = [\text{N min} + \text{N tot PRO} + \text{N tot RdC} + \text{N tot CI}] \times \text{FEdirectes} \times \frac{44}{28} \times \text{PRG N}_2\text{O}$$

Avec :

N min : dose d'azote minéral apportée, en kg N/ha, « Nmin_2 » si renseignées, sinon « Nmin calculées » : résultat du [calcul précédent N min calculée \(Partie 1\)](#),

N tot PRO : azote total apporté par les PRO, en kg N/ha, [résultat d'un des calculs précédents \(Partie 2-1-b\)](#)

N tot RdC = azote total contenu dans les résidus de culture, en kg N/ha, [résultat d'un des calculs précédents \(Partie 2-1-c\)](#)

N tot CI = azote total contenu dans la culture intermédiaire (détruite) ou dérobée (récoltée), en kg N/ha, [résultat d'un des calculs précédents \(Partie 2-1-d\)](#)

FE_{directes} = facteur d'émission issu du GIEC, 2006 (Annexe 12 : Facteurs d'émissions retenus dans le bilan GES ABC'Terre)

$\frac{44}{28}$ = rapport entre le poids molaire de N et celui de N₂O pour convertir les émissions de N/ha en émissions de N₂O/ha

PRG N₂O = Pouvoir de Réchauffement Global du protoxyde d'azote issu du GIEC (2013)

2. Émissions directes de CO₂ dues aux apports de chaux et d'urée

a) Apports de chaux

Le chaulage, permettant de réduire l'acidité des sols, induit des émissions de CO₂. En effet, les carbonates (CO₃²⁻), contenus dans la chaux, se dissolvent et libèrent des bicarbonates (HCO₃⁻) qui eux-mêmes se transforment en CO₂ et en H₂O.

La méthode utilisée pour déterminer la quantité de CO₂ émise par quantité de chaux apportée (facteur d'émissions de CO₂ dû au chaulage) est issue du GIEC (2006).

$$\text{Em CO}_2 \text{ chaulage} = \text{Quantité de Chaux} \times \text{FE CO}_2 \text{ chaulage} \times \frac{44}{12}$$

Avec

Em CO₂ chaulage = quantité de CO₂ émise par ha par les apports de chaux

Quantité de chaux = en kg CaCO₃/ha (paramétré par l'utilisateur dans le fichier de collecte)

FE CO₂ chaulage = facteur d'émissions en T de C par T de CaCO₃ (Annexe 12 : Facteurs d'émissions retenus dans le bilan GES ABC'Terre)

$\frac{44}{12}$ = rapport entre le poids molaire de C et celui de CO₂ pour convertir les émissions de C/ha en émissions de CO₂/ha

b) Apports d'urée

Les apports d'urée entraînent une perte de CO₂. Ce gaz a été fixé préalablement au NH₂ lors du procédé industriel de fabrication d'urée. Ces pertes de CO₂ lors de fertilisation sont alors à considérer car le CO₂ qui a au contraire été absorbé dans l'atmosphère pour fabriquer l'urée a été initialement retranché au bilan. L'urée (CO(NH₂)₂) est convertie en ammonium (NH₄⁺), ion hydroxyle (OH⁻) et bicarbonate (HCO₃⁻), en présence d'eau et d'uréase. Comme pour le chaulage, les bicarbonates libèrent du CO₂ et du H₂O.

La méthode utilisée pour déterminer la quantité de CO₂ émise par quantité d'urée apportée (facteur d'émissions de CO₂ dû à l'usage d'urée) est issue du GIEC (2006).

$$\text{Em CO}_2 \text{ urée} = \text{Quantité d'urée} \times \text{Part d'urée dans la fertilisation N} \times \text{FE CO}_2 \text{ urée} \times \frac{44}{12}$$

Avec

Em CO₂ urée = quantité de CO₂ émise par ha par les apports d'urée,

Part d'urée dans la fertilisation N = Nb d'apport urée/Nb d'apports totaux (ratio),

Quantité d'urée = en kg N urée/ha (paramétré par l'utilisateur dans le fichier de collecte)

FE CO₂ urée = facteur d'émissions en T de C par T d'urée (Annexe 12 : Facteurs d'émissions retenus dans le bilan GES ABC'Terre)

$\frac{44}{12}$ = rapport entre le poids molaire de C et celui de CO₂ pour convertir les émissions de C/ha en émissions de CO₂/ha

3. Émissions indirectes de N₂O dues à la gestion par les sols des entrées d'azote

Les apports d'azote décrits ci-dessus génèrent deux types de pertes : par lixiviation, correspondant aux pertes d'azote sous forme de NO₃⁻ vers les nappes phréatiques ; par volatilisation, correspondant aux pertes sous forme de NH₃ et de NO_x vers l'atmosphère.

Dans le cas de la lixiviation, les pertes de NO₃⁻ vers les eaux souterraines sont liées à l'excès de NO₃⁻ dans le sol et donc aux émissions de N₂O à travers les procédés de nitrification et dénitrification, décrits dans le chapitre précédent.

Dans le cas de la volatilisation, les émissions de NH₃ et de NO_x vers l'atmosphère engendrent une re-déposition de ces gaz à la surface des sols, générant alors des émissions de N₂O de manière analogue à celles générées directement par les apports d'azote.

a) Emissions indirectes dues à la lixiviation de l'azote

On évoque ici la lixiviation induite par les différents apports d'azote cités précédemment.

Emissions indirectes dues à la lixiviation de l'azote (en kg eq CO₂/ha) =

$$[N_{\min} + N_{\text{tot PRO}} + N_{\text{tot RdC}} + N_{\text{tot CI}}] \times \text{Fraction lixiviée} \times \text{FE lixiviation} \times \frac{44}{28} \times \text{PRG N}_2\text{O}$$

Avec :

N min : dose d'azote minéral apportée, en kg N/ha, « Nmin_2 » si renseignées, sinon « Nmin calculées » : résultat du [calcul précédent N min calculée \(Partie 1\)](#),

N tot PRO : azote total apporté par les PRO, en kg N/ha, [résultat d'un des calculs précédents \(Partie 2-1-b\)](#)

N tot RdC = azote total contenu dans les résidus de culture, en kg N/ha, [résultat d'un des calculs précédents \(Partie 2-1-c\)](#)

N tot CI = azote total contenu dans la culture intermédiaire, en kg N/ha, [résultat d'un des calculs précédents \(Partie 2-1-d\)](#)

Fraction lixiviée = fraction issue du GIEC, 2006 (Annexe 12 : Facteurs d'émissions retenus dans le bilan GES ABC'Terre)

FE lixiviation = facteur d'émissions issu du GIEC, 2006 (Annexe 12 : Facteurs d'émissions retenus dans le bilan GES ABC'Terre)

$\frac{44}{28}$ = rapport entre le poids molaire de N et celui de N₂O pour convertir les émissions de N/ha en émissions de N₂O/ha

PRG N₂O = Pouvoir de Réchauffement Global du N₂O (GIEC, 2013).

b) Emissions indirectes dues à la volatilisation des apports minéraux d'azote

Les émissions indirectes au champ induite par les dépôts atmosphériques lors de la volatilisation de l'apport d'azote minéral se calculent comme suit :

Emissions indirectes dues à la volatilisation de l'azote minéral (en kg eq CO₂/ha) =

$$((\text{FE}_{\text{volat_N-NH}_3\text{_min}} \text{ « Type de fertilisant minéral épandu » } + \text{FE}_{\text{volat_N-NOx_Min}}) \times \% \text{ de ce fertilisant épandu } \times N_{\min}) + ((\text{FE}_{\text{volat_N-NH}_3\text{_min}} \text{ « Autre type de fertilisant minéral épandu » } + \text{FE}_{\text{volat_N-NOx_Min}}) \times \% \text{ de cet autre fertilisant épandu } \times N_{\min}) \times \text{FE volatilisation} \times \frac{44}{28} \times \text{PRG N}_2\text{O}$$

Avec :

FE_{volat_N-NH₃_min} « Type de fertilisant minéral épandu » = facteur d'émissions de NH₃ dû à l'apport du 1^{er} type d'engrais minéral paramétrable par l'utilisateur (en kg N-NH₃ par kg N appliqué).

Ce facteur est fonction du pH du sol et est issu du Tier 2 de l'EMEP/EEA, 2016 (Annexe 12 : Facteurs d'émissions retenus dans le bilan GES ABC'Terre)

% de ce fertilisant épandu = Nombre d'apport(s) réalisé(s) avec le 1^{er} type de fertilisant divisé par le nombre total d'apport(s) réalisé(s) avec les deux types de fertilisants

FE_volat_N-NH₃_min « **Autre type de fertilisant minéral épandu** » = facteur d'émissions de NH₃ dû à l'apport du 2^{ème} type d'engrais (en kg N-NH₃ par kg N appliqué), si deux sortes d'engrais minéral sont apportées sur la même culture, l'utilisateur a alors la possibilité de paramétrer un 2^{ème} type d'engrais.

Ce facteur est fonction du pH du sol et est issu du Tier 2 de l'EMEP EEA, 2016 (Annexe 12 : Facteurs d'émissions retenus dans le bilan GES ABC'Terre)

% de cet autre fertilisant épandu = Nombre d'apport(s) réalisé(s) avec le 2^{ème} type de fertilisant divisé par le nombre total d'apport(s) réalisé(s) avec les deux types de fertilisants

FE_volat_N-NOx_Min = facteur d'émissions de NOx induites par l'apport d'azote minérale (en kg N-NOx par kg N appliqué).

Il s'agit d'une référence unique pour tous les types d'engrais minéral, quel que soit le pH. Il est issu du Tier 1 de l'EMEP EEA, 2016 (Annexe 10). Annexe 12 : Facteurs d'émissions retenus dans le bilan GES ABC'Terre)

N min : dose d'azote minéral apportée, en kg N/ha, « Nmin_2 » si renseignées, sinon « Nmin calculées » : résultat du calcul précédent N min calculée

FE volatilisation : facteur d'émissions de N₂O dues au dépôt atmosphérique sur le sol (en kg N- N₂O par kg N- NH₃ + kg N-NOx), issu du tier 1 du GIEC, 2006 (Annexe 12 : Facteurs d'émissions retenus dans le bilan GES ABC'Terre)

$\frac{44}{28}$ = rapport entre le poids molaire de N et celui de N₂O pour convertir les émissions de N/ha en émissions de N₂O/ha

PRG N₂O = Pouvoir de Réchauffement Global du N₂O (GIEC, 2013)

c) Emissions indirectes dues à la volatilisation des apports organiques d'azote

Les émissions indirectes au champ induites par les dépôts atmosphériques lors de la volatilisation de l'apport d'azote organique se calculent comme suit :

Emissions indirectes dues à la volatilisation de l'azote organique (en kg eq CO₂/ha) =

$$N_{\text{tot PRO}} \times ((FE_{\text{volat_N-NH}_3_org} \times \text{Teneur TAN}) + FE_{\text{volat_N-NOx_org}}) \times FE_{\text{volatilisation}} \times \frac{44}{28} \times PRG_{N_2O}$$

Avec :

N_{tot PRO} = azote total apporté par les PRO, en kg N/ha, *résultat d'un des calculs précédents (Partie 2-1-b)*

FE volat_N-NH₃_org = Facteur d'émission de NH₃ dû à l'apport d'azote organique (en kg N-NH₃ par kg TAN apporté), en fonction du type de fertilisation organique apporté, issu de l'EMEP/EEA, 2016 (Annexe 12 : Facteurs d'émissions retenus dans le bilan GES ABC'Terre)

Teneur TAN = teneur en azote ammoniacal, en kgTAN/kgN, fonction du type de fertilisant organique apporté, issu de l'EMEP EEA, 2016 (Annexe 12 : Facteurs d'émissions retenus dans le bilan GES ABC'Terre)

FE volatil_N-NOx_org = facteur d'émissions de NOx induite par l'apport d'azote organique (en kg N-NOx par kg N appliqué). Il s'agit d'une référence unique pour tous les types d'engrais organique, quelque soit le pH. Il est issu du Tier 1 de l'EMEP EEA, 2016 (Annexe 12 : Facteurs d'émissions retenus dans le bilan GES ABC'Terre)

FE volatilisation : facteur d'émissions de N₂O dues au dépôt atmosphérique sur le sol (en kg N- N₂O/an), issu du tier 1 du GIEC, 2006 (Annexe 12 : Facteurs d'émissions retenus dans le bilan GES ABC'Terre)

$\frac{44}{28}$ = rapport entre le poids molaire de N et celui de N₂O pour convertir les émissions de N/ha en émissions de N₂O/ha

PRG N₂O = Pouvoir de Réchauffement Global du N₂O (GIEC, 2013)

4. Émissions directes et indirectes de CO₂ dues à l'usage des machines agricoles

L'équation suivante est utilisée pour calculer les émissions induites par la combustion du carburant ainsi que la fabrication, la maintenance, le stockage et le transport des machines agricoles, permettant la réalisation de l'itinéraire technique de chaque culture présente sur le territoire.

Emissions dues aux passages des machines (en kg eq CO₂/ha) =

Em Travail du sol + **Em** semis + **Em** Fertilisation minérale + **Em** Fertilisation organique + **Em** Traitement + **Em** Récolte + **Em** CI + **Em** CD + **Em** paille + **Em** labour + **Em** irrig

Avec :

Em Travail du sol = $\sum (Em \ll WSol_n \gg \times Nb \ WSol_n)$

Em semis = $Em \ll Matériel \ semis \gg \times 1$

Em Fertilisation minérale = $\sum (Em \ll Matériel \ ferti \ min_n \gg \times Nb \ de \ passage(s) \ Matériel \ ferti \ min_n)$

Em Fertilisation organique = $\sum (Em \ll Matériel \ ferti \ org_n \gg \times Nb \ de \ passage(s) \ Matériel \ org_n)$

Em Traitement = $Em \ll Pulvérisateur \gg \times Nb \ de \ passage(s) \ du \ pulvérisateur$

Em Récolte = $\sum (Em \ll WRécolte_n \gg \times Nb \ WRécolte_n)$

Em CI = $Em \ll Matériel \ pour \ le \ semis \ de \ CI \gg \times 1 + Em \ll WSol_n \gg \times Nb \ WSol_n + Em \ll Matériel \ de \ destruction \ du \ CI \gg \times 1$

Em CD = $Em \ll Matériel \ pour \ le \ semis \ de \ CD \gg \times 1 + Em \ll WSol_n \gg \times Nb \ WSol_n + Em \ll Matériel \ de \ récolte \ de \ la \ CD \gg \times Nb \ Matériel \ de \ récolte \ de \ la \ CD_n$

Em paille = $Em \ll Presse \gg \times Nb \ de \ passage(s)$

Em labour = $Em \ll Charrue \gg \times Nb \ de \ passage(s)$

Em irrig = $Em \ll Irrigation \gg \times volume \ total \ annuel \ (mm) \times conversion \ mm \ en \ m^3$

A chaque matériel (sélectionné entre guillemets : « *Matériel sélectionné* ») correspond une valeur d'émissions de GES (*Em*) pour une utilisation de ce matériel (*Em* « *Matériel sélectionné* »). Les valeurs d'émissions de GES, correspondant à une utilisation (ou un passage de machine), sont issues de la base de données AGRIBALYSE©V3.0 majoritairement (ou ECOINVENT© quand le procédé n'existait pas dans AGRIBALYSE©V3.0). L'ensemble des facteurs d'émissions liés aux passages de matériel se trouve en Annexe 12 : Facteurs d'émissions retenus dans le bilan GES ABC'Terre.

Ces *Em* « *Matériel sélectionné* » sont à multiplier par le nombre de passages de ce matériel pour connaître la totalité des émissions qu'il a généré au cours d'un même itinéraire cultural. Si *Em* « *Matériel sélectionné* » est multiplié par 1, c'est parce qu'il ne passe qu'une fois (ex : un passage pour le semis).

Le choix du matériel et du nombre de passages par matériel est défini pour chaque culture par l'utilisateur et renseigné dans le fichier de collecte des données :

Em semis, Em Travail du sol, Em Fertilisation minérale, Em Traitement et Em Récolte : types de matériel sélectionnés entre « » et nombre de passage par matériel paramétrés par l'utilisateur en fonction de la culture étudiée.

Em Fertilisation organique : types de matériel sélectionnés entre « » paramétrés par l'utilisateur en fonction du type de PRO (par simplification, on ne considère qu'un passage de PRO par culture)

Em CI : type de matériel utilisé pour le semis, le travail du sol et la destruction des Cultures Intermédiaires (CI) paramétrés par l'utilisateur en fonction du type de CI implanté (si implanté)

Em CD : type de matériel utilisé pour le semis, le travail du sol et la récolte des Cultures Dérobées (CD) paramétrés par l'utilisateur en fonction du type de CD implanté (si implanté)

Em paille : type de matériel utilisé : presse

Avec nombre de passage : proportion d'exportation des pailles (si restitution, pas de presse)

% exportation = (1 - % de restitution)

Avec % restitution paramétré par l'utilisateur en fonction de la culture étudiée et du type d'exploitation.

Em labour : type de matériel utilisé : charrue

Avec nombre de passages : 1 si labour ; 0 si non labour

L'utilisateur paramètre un pourcentage de surface labourée, en fonction de la catégorie de la culture étudiée et de la catégorie du précédent cultural, qui est réparti aléatoirement parmi l'ensemble des combinaisons catégorie de culture étudiée – catégorie de précédent culturale, par l'outil

Em irrig : moyennes des émissions en France à partir de tous les matériels utilisés pour l'irrigation confondus

Avec volume total d'eau apporté annuellement (en mm) paramétré par l'utilisateur en fonction de la culture étudiée et de la classe de RU

Avec facteur de conversion des mm en m³ égal à 10.

5. Émissions indirectes de CO₂ en amont dues aux intrants

L'itinéraire cultural se caractérise également par les éléments entrants utilisés lors de la production de la culture, autrement dit, les intrants. Les équations permettant de calculer les émissions liées aux principaux intrants apportés lors de ces itinéraires sont exposées dans les sous parties suivantes.

Les émissions liées à la fabrication et le transport des produits phytosanitaires ne sont pas prises en comptes dans le calcul. L'impact en matière de gaz à effet de serre est considéré comme négligeable (Deytieux et al., 2012). De plus, le choix de ne pas considérer les émissions en amont des produits phytosanitaires est conforté par l'accès difficile des données sur l'usage des produits phytosanitaires à l'échelle d'un territoire. En revanche, les passages du pulvérisateur pour appliquer ces produits phytosanitaires sont pris en considération (même si un passage de pulvérisateur sur un hectare impacte peu le bilan GES).

a) Émissions dues aux semences des cultures

Ces émissions comprennent la production, le transport et le stockage des semences des cultures principales. Les facteurs d'émissions, exprimé par kg de semences, sont à multiplier par la densité de semis, comme l'illustre le calcul suivant :

$$\text{Em}_{\text{semences culture étudiée}} = \text{« Quantité de semences »} \times \text{Em}_{\text{semences « Culture »}}$$

Avec

« **Quantité de semences** » : en kg/ha, pour la culture principale, renseignée par l'utilisateur

Em semences « culture » : valeurs d'émissions, en kg eq CO₂/kg de semences, issues de la base de données AGRIBALYSE©V3.0 majoritairement (Annexe 12 : Facteurs d'émissions retenus dans le bilan GES ABC'Terre)

Les bases de données AGRIBALYSE©V3.0 et ECOINVENT© ne fournissent les facteurs d'émissions GES que pour un nombre limité de cultures. Des hypothèses ont été prises pour associer les cultures répertoriées dans les bases de données environnementales aux cultures paramétrées par l'utilisateur dans le fichier de collecte mais non répertoriées dans les bases de données. Cette association a été réalisée à partir du PMG (Poids de Mille Grains) et de la densité de semis des cultures. La méthodologie utilisée se trouve en Annexe 13 : Méthodologie suivie pour associer un facteur d'émissions à toutes les cultures paramétrées dans l'outil.

b) Émissions dues aux semences des cultures intermédiaires

De la même manière, ces émissions comprennent la production, le transport et le stockage des semences de cultures intermédiaires. Le calcul de ces émissions s'effectue comme-suit :

$$\text{Em}_{\text{semences culture intermédiaire}} = \text{« Quantité de semences CI »} \times \text{Em}_{\text{semences « CI »}}$$

Avec

« **Quantité de semences CI** » : en kg/ha, pour la culture intermédiaire, renseignée par l'utilisateur

Em semences « CI » : valeurs d'émissions, en kg eq CO₂/kg de semences, en fonction du type de CI préalablement défini, issues de la base de données AGRIBALYSE©V3.0 majoritairement (Annexe 12 : Facteurs d'émissions retenus dans le bilan GES ABC'Terre), et de leur adaptation pour couvrir un large choix de CI (se référer à l'Annexe 13 : Méthodologie suivie pour associer un facteur d'émissions à toutes les cultures paramétrées dans l'outil).

c) Émissions dues à l'amendement des cultures principales

Les émissions induites par les principaux amendements, à savoir, le phosphore, la potasse et la chaux, sont également pris en compte dans le bilan de GES des systèmes de culture. Ces émissions se calculent en suivant l'équation suivante :

Em_{amendement} = (« Quantité de phosphore (P) épandu » x Em P) + (« Quantité de potasse (K) épandu » x Em K) + « Quantité de Chaux (CaCO₃) épandu » x Em CaCO₃)

Avec

« **Quantité de phosphore (P) épandu** » sous forme de P₂O₅, « **Quantité de potasse (K) épandu** » sous forme de K₂O et « **Quantité de chaux (CaCO₃) épandu** » en kg/ha » (paramétrées par l'utilisateur dans le fichier de collecte)

« **Em P** » en kg eq CO₂ / kg P₂O₅, « **Em K** » en kg eq CO₂ / kg K₂O et « **Em Chaux** » en kg eq CO₂ / kg CaCO₃, valeurs d'émissions issues de la base de données AGRIBALYSE©v3.0 principalement (Annexe 12 : Facteurs d'émissions retenus dans le bilan GES ABC'Terre).

d) Émissions dues à l'apport d'engrais minéral

La production, le transport et le stockage des engrais azoté de synthèse sont pris en compte en plus des émissions directes et indirectes au champ qu'ils génèrent. Ainsi, en fonction du type d'engrais azoté minéral apporté, les émissions différeront et seront calculées comme suit :

Em_{ferti N min} = (Em « Type de fertilisant minéral épandu » x « % de ce fertilisant épandu » x N min) + (Em « Autre type de fertilisant minéral épandu » x « % de cet autre type de fertilisant épandu » x N min)

Avec

Em « Type de fertilisant minéral épandu » et **Em « Autre type de fertilisant minéral épandu »**, valeurs d'émissions, en kg eq CO₂/kg N du type de fertilisant minéral apporté, issues de la base de données AGRIBALYSE©v3.0 majoritairement (Annexe 12 : Facteurs d'émissions retenus dans le bilan GES ABC'Terre).

% de ce fertilisant épandu = *Nombre d'apport(s) réalisé(s) avec le 1^{er} type de fertilisant divisé par le nombre total d'apport(s) réalisé(s) avec les deux types de fertilisants*

% de cet autre fertilisant épandu = *Nombre d'apport(s) réalisé(s) avec le 2^{ème} type de fertilisant divisé par le nombre total d'apport(s) réalisé(s) avec les deux types de fertilisants*

N min : dose d'azote minéral apportée, en kg N/ha, « Nmin_2 » si renseignées, sinon « Nmin calculées » : résultat du calcul précédent N min calculée

e) Émissions dues à l'apport d'engrais organique

Le bilan GES, dans le cadre d'un diagnostic ABC'Terre, s'effectue à l'échelle du système de culture. Les émissions liées à l'élevage ne sont pas considérées puisqu'elles dépassent les limites établies (cf introduction à la partie 2). Les émissions liées à la production des effluents d'élevage ne sont donc pas considérées dans le calcul. En revanche, les effluents d'élevage qui subissent un traitement (compostage, digestion...) en vue d'être épandu dans les champs, génèrent des émissions « intermédiaires » qui peuvent être affectées à l'atelier végétal. Tout comme les déchets d'origine urbaine ou industrielle (boues de stations d'épuration, compost de déchet verts ou encore vinasse).

Dans le cadre de la complémentarité entre les projets PROTerr et ABC'Terre-2A, et pour une question d'uniformité dans les résultats de bilan GES qui émaneront des deux projets pour un territoire d'étude commun, les émissions liées au traitement des PRO seront considérées dans les limites du bilan d'ABC'Terre.

Par ailleurs, les émissions induites par le transport de ces PRO, du lieu de production, jusqu'au siège d'exploitation, seront pris en compte puisqu'elles sont comprises dans les limites du système d'étude pour ABC'Terre.

Les émissions dues à l'apport de PRO sont donc composées des émissions liées au traitement des PRO, fonction du type de PRO, et des émissions liées au transport, fonction de la distance entre le lieu de production et le siège d'exploitation :

$$\text{Em}_{\text{ferti N PRO}} = \text{Em}_{\text{distance PRO}} \times \text{Em}_{\text{traitement PRO}}$$

Où

$$\text{Em}_{\text{distance PRO}} = \text{« Dose PRO »} \times \text{distance} \times \text{Em}_{\text{transport}} \times 2$$

Avec

« **Dose PRO** » : en T ou m³ de PRO épandu par hectare en fonction du type de PRO (paramétrée par l'utilisateur dans le fichier de collecte)

Distance : intervalle de distance qu'a parcourue le PRO depuis sa source de production jusqu'au siège d'exploitation qui l'épandra sur ses cultures (paramétrée par l'utilisateur dans le fichier de collecte)

Em transport : valeurs d'émissions, issues de la base de données AGRIBALYSE©V3.0, en fonction du matériel utilisé, lui-même fonction de la distance. Un tracteur et une benne seront utilisées pour les petits intervalles de distance, tandis qu'un camion sera nécessaire pour les grands intervalles de distance.

X2 : pour considérer l'aller-retour

Quatre intervalles de distance ont été créés. En fonction de la distance à parcourir, le matériel utilisé pour transporter les PRO diffère. Ainsi, pour les courtes distances (<15km), le tracteur attelé à une benne (8t) sera privilégié. En revanche, pour les distances plus longues (>15km), un camion (16t) sera utilisé. Ci-joint, le Tableau 6 précisant les classes de distances retenues et les facteurs d'émissions correspondants.

Tableau 6 : intervalles de distance matérialisant le transport des PRO de son lieu de production jusqu'au siège de l'exploitation

Intervalles de distance	Origine du PRO	Moyen de transport utilisé	FE (en kg eq CO ₂ /tkm)
<15 km	Voisin	Tracteur + benne	0.41
] 15 ; 50 km]	Local	Camion	0.17
] 50 ; 100 km]	Régional	Camion	0.17
> 100 km	Au-delà	Camion	0.17

$$\text{Em}_{\text{traitement PRO}} = \text{« Dose PRO »} \times \text{Em}_{\text{traitement PRO}} \times 1000$$

Avec :

« **Dose PRO** » : en T ou m³ de PRO épandu par hectare en fonction du type de PRO (paramétrée par l'utilisateur dans le fichier de collecte)

Em traitement PRO : émissions dues au traitement des PRO en vue de leur valorisation sur les cultures (compostage, digestion, déshydratation...), issues des bases de données AGRIBALYSE©V3.0, à partir du projet ACV MAFOR (Avadí, 2020). Les facteurs d'émissions retenus se trouvent en Annexe 12 : Facteurs d'émissions

retenus dans le bilan GES ABC'Terre. Certaines correspondances ont du être réalisées entre les PRO référencés et ceux utilisés dans la méthode ABC'Terre. Ces hypothèses sont disponibles en Annexe 14 : Méthodologie suivie pour associer les facteurs d'émissions liées aux traitements des PRO.

f) Total des émissions indirectes en amont dues aux intrants

Les émissions indirectes en amont dues aux intrants totalisent les émissions induites par chaque intrant comme exposé ci-dessus. Le total se calcule donc de la manière suivante :

Emissions dues aux intrants (en kg eq CO₂ /ha) =

Em_{semences culture étudiée} + Em_{semences culture intermédiaire} + Em_{amendement} + Em_{ferti N min} + Em_{ferti N PRO}

6. Émissions dues ou évitées par les variations de stock de carbone dans les sols

Le stockage de carbone est un poste important du bilan GES. Le projet ABC'Terre (2013 – 2016) a démontré que ce poste pouvait augmenter ou diminuer les émissions de GES totales de près de 70 % (Godard *et al.*, 2016). Ce poste est souvent négligé ou ne prend en compte qu'une estimation forfaitaire de la variation du stock de C org due à un changement d'affectation des sols. ABC'Terre, via le couplage avec l'outil Simeos-AMG, permet de calculer les variations de stocks de carbone à long terme dues aux systèmes de culture implantés sur le territoire d'étude (en lien donc avec les pratiques culturales), et d'intégrer les résultats de ce calcul au bilan de GES, comme décrit dans les sous-parties suivantes.

a. Variation du stockage de carbone

Pour calculer la variation du stock de carbone dans les sols à partir des résultats de Simeos-AMG GN, le calcul suivant est effectué :

Variation du stock de carbone (en kg eq CO₂ /ha) =

$$((\text{Stock à 30 ans} - \text{Stock initial}) / 30) \times \text{facteur de conversion} \times \frac{44}{12}$$

Avec

Stock à 30 ans : Stock de carbone organique à échéance 30 ans (sur 0-30cm), en T C org/ha, issu du fichier de sortie de Simeos-AMG Grand Nombre

Stock initial : Stock de carbone organique initial, en T C org/ha, issu du fichier de sortie de Simeos-AMG Grand Nombre

30 : divisé par 30 pour annualiser les résultats (calculés sur 30 ans)

Facteur de conversion : facteur permettant d'obtenir la variation en kg C org/ha (et non en T C org/ha)

$\frac{44}{12}$ = rapport entre le poids molaire du C et celui de CO₂ pour convertir les émissions de C/ha en émissions de CO₂/ha (GIEC, 2006).

NB : Simeos-AMG n'est pas encore paramétré pour les prairies. Dans le cas des prairies temporaires (inférieures à 3 ans), il est demandé à l'utilisateur d'associer à la prairie temporaire une culture pluriannuelle, paramétrée elle dans le modèle. En ce qui concerne les prairies permanentes, une valeur forfaitaire est appliquée. La valeur par défaut retenue pour le stockage de carbone par les prairies permanentes est de 50

kg C/ha/an (Pellerin et al., 2019), elle correspond à une prairie permanente installée de longue date (situation la plus courante). Dans les territoires où les prairies seraient majoritairement installées depuis peu (par exemple), il est donné la possibilité à l'utilisateur de modifier cette valeur par défaut.

b. Pertes d'azote en cas de déstockage du carbone

Lorsque la variation du stock de carbone est négative, le déstockage du carbone entraîne un déstockage de l'azote. Ce déstockage de l'azote induit des émissions directes et indirectes par lixiviation.

b.1. Emissions directes de N₂O dues au déstockage de carbone

Emissions directes dues à l'azote destocké (en kg eq CO₂ /ha) =

$$\frac{\text{Variation du stock de carbone}}{\frac{C}{N}} \times FE_{\text{directes}} \times \frac{44}{28} \times PRG_{N_2O}$$

Avec

Variation du stock de carbone = résultat du calcul précédent (partie 2.6.a)

$\frac{C}{N}$ = rapport entre le carbone et l'azote du sol (renseigné par l'utilisateur dans le fichier de collecte)

FE_{directes} = facteur d'émission issu du GIEC, 2006 (Annexe 12 : Facteurs d'émissions retenus dans le bilan GES ABC'Terre)

$\frac{44}{28}$ = rapport entre le poids molaire de N et celui de N₂O pour convertir les émissions de N/ha en émissions de N₂O/ha

PRG N₂O = Pouvoir de Réchauffement Global du N₂O (GIEC, 2006)

b.2. Emissions indirectes de N₂O dues au déstockage de carbone

Emissions indirectes par lixiviation dues à l'azote destocké (en kg eq CO₂ /ha) =

$$\frac{\text{Variation du stock de carbone}}{\frac{C}{N}} \times \text{Fraction lixiviée} \times FE_{\text{lixiviation}} \times \frac{44}{28} \times PRG_{N_2O}$$

Avec

$\frac{C}{N}$ = rapport entre le carbone et l'azote, renseigné par l'utilisateur

Fraction lixiviée = fraction issue du GIEC, 2006 (Annexe 12 : Facteurs d'émissions retenus dans le bilan GES ABC'Terre)

FE lixiviation = facteur d'émissions issu du GIEC, 2006 (Annexe 12 : Facteurs d'émissions retenus dans le bilan GES ABC'Terre)

$\frac{44}{28}$ = rapport entre le poids molaire de N et celui de N₂O pour convertir les émissions de N/ha en émissions de N₂O/ha

PRG N₂O = Pouvoir de Réchauffement Global du N₂O (GIEC, 2006).

7. Calcul final des émissions de GES à l'échelle du territoire

L'ensemble des émissions à calculer est résumé dans le tableau suivant :

Tableau 7: Synthèse du calcul du bilan GES dans le cadre d'ABC'Terre

Émissions directes de N ₂ O dues à la gestion par les sols des entrées d'azote (en kg N-N ₂ O/ha)		Facteurs d'émissions	N en N ₂ O (en kg N ₂ O/ha) <i>Rapport de poids molaire</i>	N ₂ O en CO ₂ (en kg eq CO ₂ /ha) <i>PRG</i>
Émissions générées par l'apport d'azote minéral (N min)	N min	x 1 %	x 44/28	x 298
Émissions générées par l'apport d'azote organique (N PRO)	N tot PRO = quantité de PRO épandu x % N PRO	x 1 %	x 44/28	x 298
Émissions générées par la restitution des résidus de culture (N RdC)	N tot RdC = $\frac{(\text{Biomasse} \times \text{Teneur en C org} \times \text{facteur de conversion des unités})}{\text{rapport C/N des RdC}}$	x 1 %	x 44/28	x 298
Émissions générées par la restitution des cultures intermédiaires ou dérobées (N CI)	N tot CI = $\frac{(\text{Biomasse CI} \times \text{Teneur en C org} \times \text{facteur de conversion des unités})}{\text{rapport C/N des CI}}$	x 1 %	x 44/28	x 298
Émissions directes de CO ₂ dues aux apports de chaux et d'urée (en kg eq CO ₂ /ha)		Émissions par kg de chaux ou d'urée apporté (en kg eq CO ₂ /kg)		C en CO ₂ (en kg eq CO ₂ /ha) <i>PRG</i>
Émissions de CO ₂ générées par la chaux	Quantité de chaux épandue/ha	x 0.125		x 44/12
Émissions de CO ₂ générées par l'urée	Quantité d'urée épandue/ha	x 0.20		x 44/12
Emissions indirectes dues aux apports d'azote (en kg N- N ₂ O/ha)		Facteurs d'émissions	N en N ₂ O (en kg N ₂ O /ha) <i>Rapport de poids molaire</i>	N ₂ O en CO ₂ (en kg eq CO ₂ /ha) <i>PRG</i>
Emissions indirectes par lessivage	[N min + N tot PRO + N tot RdC + N tot CI] x Fraction lixiviée (30 %)	x 0.75 %	x 44/28	x 298

Emissions indirectes par volatilisation des apports d'azote minéral	N min x (Fraction volatilisée NH3 + Fraction volatilisée NOx)		x 1 %	x 44/28	x 298
Emissions indirectes par volatilisation des apports organiques	N tot PRO x ((Fraction volatilisée x Teneur TAN) + Fraction volatilisée NOx)		x 1 %	x 44/28	x 298
Emissions directes et indirectes de CO2 dues à l’usage des machines agricoles (en kg eq CO2/ha)			Émissions par passage (en kg eq CO2/ha)		
Émissions dues aux passages des machines et outils agricoles	Nombre de passages et type d'outils nécessaires pour	Labour (si labour il y a)	x kg CO2 eq/passage		
		Travail du sol ou désherbage			
		Semis			
		Traitements phytosanitaires			
		Apports d'engrais minéral			
		Apports de PRO (distance + traitement)			
		Récolte			
		Production de cultures intermédiaire ou dérobées			
		Pressage de la paille (si exportation de paille il y a)			
		Irrigation (si irrigation il y a)			
Emissions indirectes de CO2 en amont dues aux intrants (en kg eq CO2/ha)			Émissions par kg d’intrants apporté (en kg eq CO2/kg)		
Émissions dues aux semences des cultures (principales et intermédiaires)	Quantité de semences (en kg de semences/ha)		x kg CO2eq/ kg de semence		
Émissions dues aux amendements	Quantité de nutriment (P, K, CaCO3) apporté (en kg de nutriments /ha)		x kg CO2eq/ kg de nutriments apporté		
Émissions dues aux engrais minéraux	Quantité d’engrais azotés minéraux apportés (en kg d’engrais N min/ha)		x kg CO2eq/ kg d’engrais N min apporté		
Émissions dues au transport des engrais organiques	Quantité de PRO épandu (t) x distance (km) x2		x kg CO2eq/ tkm		

Émissions dues au traitement des engrais organiques (compostage, digestion anaérobie, déshydratation...)	Quantité de PRO épandu (t)	x kg CO ₂ eq/ t		
Variation du stock de carbone (en kg C/ha)		C en CO ₂ (en kg eq CO ₂ /ha) PRG		
Variation du stock de C	$((\text{Stock à 30 ans} - \text{Stock initial}) / 30) \times \text{facteur de conversion des unités}$	x 44/12		
Emissions dues à l'azote déstocké lorsque la variation du stock de carbone est négative (en kg N- N ₂ O/ha)		Facteurs d'émissions	N en N ₂ O (en kg N ₂ O/ha) <i>Rapport de poids molaire</i>	N ₂ O en CO ₂ (en kg eq CO ₂ /ha) <i>PRG</i>
Emissions directes dues au déstockage de N	Variation du stock de C / rapport C/N du sol	x 1 %	x 44/28	x 298
Emissions indirectes par lessivage dues au déstockage de N	Variation du stock de C / rapport C/N du sol x Fraction lixiviée (30%)	x 0.75 %	x 44/28	x 298

Légende :

Méthode de calcul Nmin développée dans ABC'Terre-2A

Fichier de collecte des données reconstituant les pratiques culturales

Tables de références (sources diverses)

GIEC (2006)

EMEP EEA (2013)

Procédés AGRIBALYSE® (1.3) ou ECOINVENT®

Sorties de Simeos-AMG

(ou variables transitoires en ce qui concerne la biomasse restituée)

N : Azote

C : Carbone

P : Phosphore

K : Potasse

N₂O : Protoxyde d'Azote

Eq CO₂ : équivalent dioxyde de carbone

PRG : Pouvoir de Réchauffement Global

PRO : Produit Résiduaire Organique

TAN : Total Ammoniacal Nitrogen (teneur en azote ammoniacale)

Conclusion

Échelle de résultats

Le calcul final du bilan GES se fait à 3 échelles suivantes, illustrées par la figure suivante :

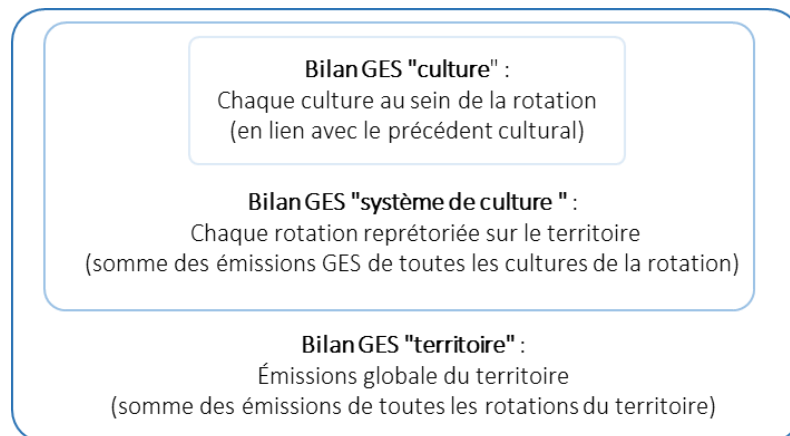


Figure 6 : Illustration des différentes échelles de calcul du bilan de GES du territoire

La première échelle de résultats fournit, pour chaque culture implantée (à l'échelle de la campagne culture, du premier travail du sol à la récolte, en incluant la culture intermédiaire) au sein de tous les systèmes de culture répertoriés sur le territoire, le détail des émissions GES par catégories et sous catégories d'émissions (émissions directes au champ dues à la gestion par les sols dues aux apports totaux d'azote, puis distinction pour ce même type d'émissions des différentes formes d'apports d'azote : minéral, organique, etc...). Ces résultats font apparaître la dose d'azote minéral calculée automatiquement par l'outil (« Nmin calculées »). Cette échelle permet de remonter aux pratiques culturales (paramétrées à l'échelle de la culture) et de faire émerger les modifications de pratiques à envisager pour émettre moins de GES.

La deuxième échelle de résultats, par système de culture (rotations x pratiques culturales), fait la somme des émissions de GES de l'ensemble des cultures au sein d'une même rotation, et ce, pour toutes les rotations du territoire. La somme des émissions par système de culture est divisée par le nombre de cultures au sein de cette rotation pour annualiser les résultats et pouvoir comparer les différents systèmes de culture entre eux. Le détail des émissions GES est également fourni par catégories et sous catégories d'émissions. Cette échelle permet d'intégrer les variations de stock de C org (dont les résultats ne se font pas à une échelle temporelle inférieure à celle de la rotation). Il existe deux fichiers de sortie à cette échelle. Chaque ligne de ces deux fichiers de sortie représente un système de culture. Dans le premier, les émissions de chaque système de culture sont ramenées à l'hectare de production et sont exprimées en kg eq CO₂/ha/an ; dans le deuxième, les émissions sont pondérées à la surface représentée par chaque système de culture et sont exprimées en kg eq CO₂/an.

Enfin, la dernière échelle de résultats fait l'agrégation des émissions de GES, pour chaque grande catégorie d'émissions, de l'ensemble des systèmes de culture du territoire, pondérées à leur surface. Elle permet d'obtenir une valeur d'émissions GES à l'échelle globale du territoire (exprimée en T eq CO₂/an).

Bibliographie

- Arvalis, IDELE, CTIFL, IFV, ITAVI, & Terres inovia. (2020). *Guide GEST'TIM+ - la référence méthodologique pour l'évaluation de l'impact des activités agricoles sur l'effet de serre, la préservation des ressources énergétiques et la qualité de l'air*. <https://www.arvalisinstitutduvegetal.fr/guide-gest-tim--@/view-3081-arvstatiques.html>
- Avadí, A. (2020). Screening LCA of French organic amendments and fertilisers. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 25(4), 698–718. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01732-w>
- Clivot, H., Mary, B., Valé, M., Cohan, J., Champolivier, L., Piraux, F., Laurent, F., & Justes, E. (2017). Quantifying in situ and modeling net nitrogen mineralization from soil organic matter in arable cropping systems. *Soil Biology and Biochemistry*, 111, 44–59. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.03.010>
- COMIFER. (2013). *Calcul de la fertilisation azotée : Guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales*.
- COMIFER. (2014a). *Postes du bilan prévisionnel d'azote - Pi : Quantité d'azote absorbé par le colza à l'ouverture du bilan*.
- COMIFER. (2014b). *Postes du bilan prévisionnel d'azote - Pi : Quantité d'azote absorbé par les céréales d'hiver à l'ouverture du bilan*.
- COMIFER. (2018). *Besoins proportionnels au rendement (cas général) : Besoins d'azote par unité de production*.
- Deytieux, V., Nemecek, T., Freiermuth Knuchel, R., Gaillard, G., & Munier-Jolain, N. (2012). Is Integrated Weed Management efficient for reducing environmental impacts of cropping systems? A case study based on life cycle assessment. *European Journal of Agronomy*, 36(1), 55–65. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2011.08.004>
- EMEP/EEA. (2016a). *EMEP/EEA air pollutant emission inventory Guidebook - 3.B Manure management*.
- EMEP/EEA. (2016b). *EMEP/EEA air pollutant emission inventory Guidebook - 3.D Crop production and agricultural soils*.
- GIEC. (2006). *Lignes directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre - Chapitre 11 : Émissions de N₂O des sols gérés, et émissions de CO₂ dues au chaulage et à l'application d'urée*.
- Godard, C., Duparque, A., Vandewalle, F., & Boissy, J. (2016). Soil organic carbon contribution to GHG balance at cropping system scale. 4(12), 80200.
- GREN Champagne Ardenne. (2013). *Référentiel régional de mise en oeuvre de l'équilibre de la fertilisation azotée pour la région Champagne-Ardenne*.
- GREN Pays de la Loire. (2015). *Référentiel régional de mise en oeuvre de l'équilibre de la fertilisation azotée pour la région Pays de la Loire*.
- GREN Picardie. (2015). *Référentiel régional de mise en oeuvre de l'équilibre de la fertilisation azotée pour la région Picardie*.
- GREN Poitou-Charentes. (2013). *Référentiel régional de mise en oeuvre de l'équilibre de la fertilisation azotée pour la région Poitou-Charentes*.
- GREN Rhône Alpes. (2014). *Référentiel régional de mise en oeuvre de l'équilibre de la fertilisation azotée pour la région Rhône-Alpes*.
- Houot, S., Pons, M.-N., Pradel, M., & Tibi, A. (2016). *Recyclage de déchets organiques en agriculture :*

Effets agronomiques en environnementaux de leur épandage.

IDELE, ITAVI, ITCF, & ITP. (2001). *Fertiliser avec les engrais de ferme.*

IPCC. (2019). N₂O Emissions From Managed Soils, and CO₂ Emissions From Lime and Urea Application. *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, 1–48.

Nicolardot, B., Mary, B., Houot, S., & Recous, S. (1997). La dynamique de l'azote dans les sols cultivés. In *Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes* (Lemaire G., Nicolardot B., dir.) (pp. 87–104).

Pellerin et al. (2019). *Stocker du carbone dans les sols français : quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel cout ? résumé d'étude* (Issue August 2019).

Tavares, O. (2015). *PERSYST : Un outil d'évaluation des PERformances agronomiques, environnementales et économiques des SYSTèmes de culture.*

Annexes

Annexe 1 : Dose par défaut d'azote minéral apporté sur les cultures dont le mode de paramétrage est « Nmin_1 »	46
Annexe 2 : Choix de la méthode de calcul de la dose d'azote minéral apportée	47
Annexe 3 : Rendements par défaut	53
Annexe 4 : Besoins des cultures	55
Annexe 5 : Coefficients de présence des cultures	56
Annexe 6 : Minéralisation des résidus de culture	57
Annexe 7 : Minéralisation des cultures intermédiaires	59
Annexe 8 : Teneurs en azote des PRO paramétrés dans l'outil	61
Annexe 9 : Méthodologie suivie pour déterminer les coefficients d'équivalence des PRO en engrais minéral	63
Annexe 10 : Méthodologie suivie pour associer un KeqN aux catégories fictives de PRO de Simeos-AMG	65
Annexe 11 : Méthodes de détermination de l'azote absorbé avant ouverture du bilan	67
Annexe 12 : Facteurs d'émissions retenus dans le bilan GES ABC'Terre	68
Annexe 13 : Méthodologie suivie pour associer un facteur d'émissions à toutes les cultures paramétrées dans l'outil	77
Annexe 14 : Méthodologie suivie pour associer les facteurs d'émissions liées aux traitements des PRO	80

Annexe 1 : Dose par défaut d'azote minéral apporté sur les cultures dont le mode de paramétrage est « Nmin_1 »

Tableau 8 : Dose plafond ou conseillée d'azote minéral pour l'ensemble des cultures dont le paramétrage de cette dose d'azote minéral ne peut se faire par calcul

Cultures qui ne peuvent faire l'objet d'un calcul Nmin	Dose plafond ou conseillée	Sources
Ail	150	Synthèses GREN ⁽¹⁾
Asperge	170	Synthèses GREN ⁽¹⁾
Blé plante entière	120	Crémer S.; Bernes A.; Knoden D., 2017
Cameline	80	Expertise AGT, projet RdS ⁽³⁾
Chanvre Fibres	100	Terres Inovia, 2017
Chanvre chènevis	100	Terres Inovia, 2017
Chicorée	170	Synthèses GREN ⁽¹⁾
Chou Bruxelles	200	Synthèses GREN ⁽¹⁾
Chou fleur	230	Synthèses GREN ⁽¹⁾
Chou fourrager	180	Ouellet A.-M., 2008
Chou pommé	200	Synthèses GREN ⁽¹⁾
Colza Associé	100	Terres Inovia, 2016
Colza Associé Légumineuse	100	Terres Inovia, 2016
Dactyle ensilé 20%MS	120	Expertise AGT, projet CCE ⁽²⁾
Dactyle foin	120	Expertise AGT, projet CCE ⁽²⁾
Endive	140	Chambre d'Agriculture Nord Pas de Calais, 2017
Haricot flageolet	90	Expertise LDAR
Haricot grain	90	Expertise LDAR
Haricot vert	65	Expertise LDAR
Laitue	120	Synthèses GREN ⁽¹⁾
Mélange Gram&Lég (> 2 ans) foin	120	Expertise AGT, projet CCE ⁽²⁾
Méteil (T de MS/ha)	120	Expertise AGT, projet CCE ⁽²⁾
Moutarde	130	Chambre d'Agriculture Côte d'Or, 2018
Moutarde Brune graine	130	Chambre d'Agriculture Côte d'Or, 2018
Oignon	160	Synthèses GREN ⁽¹⁾
Poireau	220	Synthèses GREN ⁽¹⁾
Prairie permanente	60	AGRESTE, 2010
Ray grass anglais	120	Expertise AGT, projet CCE ⁽²⁾
Ray grass d'Italie	120	Expertise AGT, projet CCE ⁽²⁾
Soja	Pas conseillé	Terres Inovia, 2018
Tabac	120	Références picardes pour le tabac blond de Virginie

Synthèses GREN (Groupement Régional Experts Nitrate) ⁽¹⁾: GREN Champagne Ardenne, 2013; GREN Poitou-Charentes, 2013; GREN Rhône Alpes, 2014; GREN Pays de la Loire, 2015; GREN Picardie, 2015

Projet CCE⁽²⁾ : Complémentarités Cultures-Élevage

Projet RdS⁽³⁾ : Réseau de Sites Démonstrateurs IAR

Annexe 2 : Choix de la méthode de calcul de la dose d'azote minéral apportée

Les objectifs liés à l'amélioration de la méthode de calcul de l'azote apporté aux cultures, étaient les suivants :

- Mettre au point une approche à la fois simple et générique, c'est-à-dire transposable à l'échelle de tout le territoire français, qui ne nécessite pas l'acquisition de nombreuses nouvelles données,
- Automatisable, pour être intégrée à l'outil de calcul du bilan GES ABC'Terre,
- Prendre en compte les effets des pratiques agronomiques qui visent à réduire les émissions de GES et/ou favoriser le stockage de C du sol (en particulier gestion de l'interculture, des résidus de culture, des apports organiques...),
- Prendre en compte conjointement l'évolution de C et de N sur la durée d'un système de culture.

1) Réflexion sur l'adaptation de la méthode du bilan prévisionnel azoté en fonction des Groupements Régionaux Experts Nitrates (GREN) de chaque région

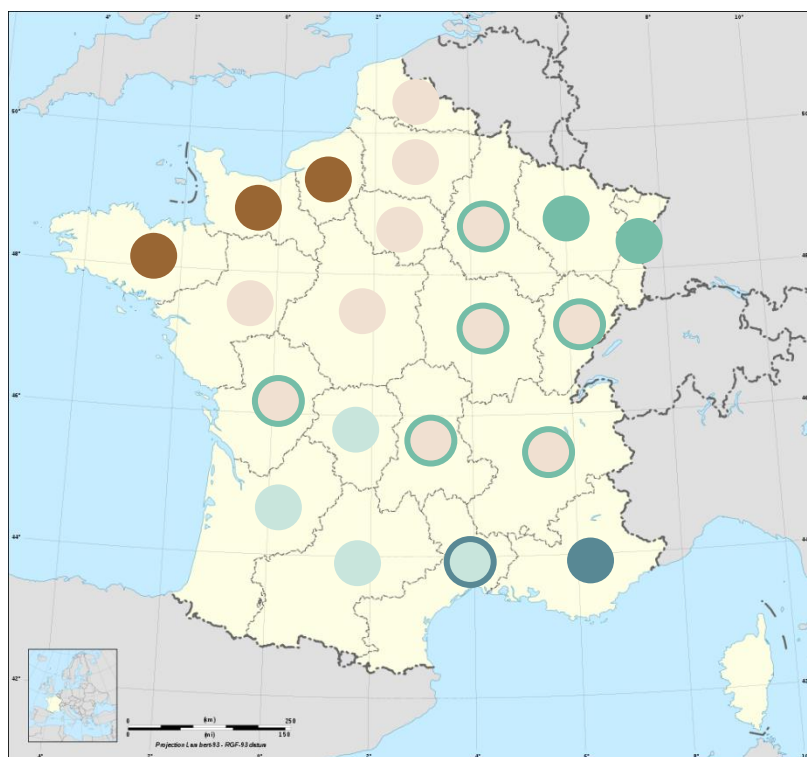
Les équations, permettant de calculer la dose d'azote minéral à apporter aux cultures, préconisées par les GREN de chaque région, ont été comparées pour voir s'il était possible d'adapter l'outil aux spécificités régionales. La comparaison de ces équations met en évidence une certaine spécialisation par grande région, autrement dit, une cohérence dans le choix de l'équation retenue par les GREN par rapport au secteur géographique. Par exemple, en Bretagne, Basse-Normandie et Haute-Normandie, la méthode du bilan est utilisée avec la spécificité d'intégrer l'arrière-effet des effluents, afin de prendre en compte l'azote apporté par les PRO à long terme, en cohérence avec la forte présence de production animale, et donc de PRO, sur ce secteur.

Une comparaison des équations préconisées pour calculer la dose N_{min} dans chaque Groupe Régional Experts Nitrates a été menée pour étudier la possibilité d'en retenir une qui recouvrirait l'ensemble des spécificités régionales. Le tableau et la figure ci-dessous synthétisent cette comparaison.

Tableau 9 : Comparaison des méthodes de calculs préconisées par les différents GREN

Régions	Calcul bilan N retenu	Notes
Alsace	$X = [(Pf - PO)/CAU] - Xa$	Équation d'efficience privilégiée mais références différentes pour chaque culture...
Aquitaine	$X = [((Pf + Rf) - (Ri + Pi + Mh + Mhp + Mr + MrCi + Nirr)) / CAU] - Xa$	
Auvergne	$X = (Pf + Rf + L) - (Ri + Pi + Mh + Mhp + Mr + MrCi + Nirr + Xa)$	Equation CAU pour colza ($X = [(Pf - Pi - PO)/CAU] - Mha + Mpro + Fleg + Fass$) et grille de conseil pour prairies
Basse-Normandie	$X = (Pf + Rf) - (Ri + Pi + Mh + Mha + Mhp + Mr + MrCi + Xa + Xa')$	Avec Mha : arrière-effet effluent et Xa' = effet direct des produits organiques apportés après ouverture du bilan
Bourgogne*	$X = (Pf + Rf + L) - (Ri + Pi + Mh + Mhp + Mr + MrCi + Nirr + Xa)$	Equation CAU pour le maïs et le sorgho $X = [(Pf - Po - Mhp - MrCi - Nirr) / CAU] - XA$
Bretagne	$X = (Pf + Rf) - (Ri + Pi + Mha + Mhs + Mhp + (Mr \text{ ou } MrCi) + Xa)$	Calcul différent pour la minéralisation : distinction de la contribution des PRO avant le semis (arrière-effet effluents) et de l'humus et SdC
Centre*	$X = (Pf + Rf + L) - (Ri + Pi + Mh + Mhp + Mr + MrCi + Nirr + Xa)$	
Champagne-Ardenne*	$X = (Pf + Rf) - (Ri + Pi + Mh + Mhp + Mr + MrCi + Nirr + Xa)$	Equation CAU pour sols caillouteux : $X = (Pf - PO) / CAU - Xa$
Franche-Comté	$X = (Pf + Rf) - (Ri + Pi + Mh + Mhp + Mr + MrCi + Nirr + Xa)$	Equation CAU pour maïs et sorgho $X = [(Pf - Po - Mhp - MrCi - Nirr) / CAU] - XA$
Haute-Normandie	$X = (Pf + Rf + L) - (Ri + Pi + Mh + Mha + Mhp + Mr + MrCi + Xa + Xa')$	
Ile de France	$X = (Pf + Rf) - (Ri + Pi + Mh + Mhp + Mr + MrCi + Nirr + Xa)$	
Languedoc-Roussillon	$X = ((Pf + Rf + L) - (Ri + Mh + (Mhp \text{ ou } Mr \text{ ou } MrCi) + Xa)) / CAU$	Méthodes différentes si bilan réalisé dans le sud-ouest ou le sud-est ($X = Pf + 80 - Ri$), si colza ou prairies
Limousin	$X = [((Pf + Rf) - (Ri + Pi + Mh + Mhp + Mr + MrCi + Nirr)) / CAU] - Xa$	
Lorraine	$X = ((Pf - PO - MrCi) / CAU) - Xa$	Avec tableau de références pour PO pour chaque culture
Midi-Pyrénées	$X = [((Pf + Rf) - (Ri + Pi + Mh + Mhp + Mr + MrCi)) / CAU] - Xa$	Calcul simplifié pour colza : $X = (Pf + Rf) - (Pi + Ri + Mh + Xa)$
NPdC	$X = (Pf + Rf) - (Ri + Pi + Mh + Mhp + Mr + MrCi + Xa)$	
PACA	$X = Pf + 80 - Ri - Xa - Nirr$	Pour les autres cultures (colza, maïs, sorgho, tournesol...) : $X = Pf - Xa - Nirr - Ri$
PdL	$X = (Pf + Rf + L) - (Ri + Pi + Mh + Mhp + Mr + MrCi + Nirr + Xa)$	
Picardie	$X = (Pf + Rf) - (Ri + Pi + Mh + Mhp + Mr + MrCi + Nirr + Xa)$	

Poitou-Charentes*	$X = (Pf + Rf) - (Ri + Pi + Mh + Mhp + Mr + MrCi + Nirr + Xa)$	Equation CAU pour sols argilo-calcaires et terres rouges à châtaigniers : $X = [(Pf - PO - Mr - MrCi - Nirr)/CAU] - Xa$
Rhône-Alpes	$X = (Pf + Rf) - (Ri + Mh + Mr + Mpro + Mhp + MrCi + Nirr + Xa)$	Avec Mh intégrant Pi et équation CAU pour maïs et sorgho : $X = [Pf - (Mh + Mr + Mhp + MrCi + Mpro + Nirr)]/CAU - Xa$, pour colza : $X = (Pf - (Mh + Mr + Mhp + MrCi + PO + Pi + Nirr)/CAU - Xa$



	équation CAU
	équation bilan intégrant CAU
	simplification équation bilan
	équation bilan
	équation bilan avec précisions sur PRO
	équation bilan majoritairement, équation CAU pour exceptions
	équation bilan majoritairement, équation CAU pour exceptions, avec pour les 2 cas, précisions sur PRO

Figure 7 : Carte illustrant les différences de méthodes de calcul du bilan N selon les régions

Cette comparaison d'équations illustre de grandes disparités entre régions, rendant complexe une éventuelle adaptation de l'outil prévu à chaque spécificité régionale (facteurs de calculs différents et donc données d'entrées bien distinctes). Il est impossible de définir des règles d'utilisation générales et homogènes au niveau national à partir de 21 méthodes différentes issues des GREN.

2) Proposition d'une équation simplifiée du bilan azoté

Suite à cette réflexion sur les différents GREN, Sylvie Recous (directrice de recherche de l'unité Fractionnement des AgroRessources et Environnement à l'INRA, qui a piloté de nombreux travaux sur la fertilisation azotée) a été contactée. Suite à l'exposé des besoins et objectifs de l'outil, Sylvie Recous nous a préconisé de mettre au point une méthode simplifiée à partir des données déjà acquises, notamment par Simeos-AMG, pour optimiser les interactions carbone-azote. La méthode était sous la forme suivante :

Besoins totaux de la culture en N = minéralisation de l'humus* + minéralisation des résidus de culture/cultures intermédiaires* + N minéral apporté par les apports organiques (PRO) + N apporté par les engrais minéraux

**Avec minéralisation de l'humus, des résidus de culture et des cultures intermédiaires à partir des données acquises via Simeos-AMG*

Cette méthode simplifiée permet d'obtenir une dose d'azote minéral, répondant aux besoins de la plante dans un système de culture donné (type de sol, pratiques culturales reconstituées). Ce calcul répond à l'objectif de genericité, recherché dans ABC'Terre-2A, en s'affranchissant notamment des spécificités régionales en matière de bilan prévisionnel. Cette méthode simplifiée de calcul de l'apport d'azote minéral utilise les données (entrées, sorties, paramètres) recensées lors des étapes précédant le bilan GES dans la méthode ABC'Terre, notamment Simeos-AMG. Ce gain de cohérence globale permet de prendre en compte les interactions entre carbone et azote. Le bilan azoté est établi en visant l'automatisation du calcul, à partir des besoins de la plante (rendement x besoins par unité de production), satisfaits par les principales fournitures du sol, à savoir : la minéralisation de l'humus, des résidus de cultures et des cultures intermédiaires ainsi que la fraction minéralisable des PRO.

Cependant, les premiers tests ont mis en évidence une disparité entre les doses calculées à partir de l'équation simplifiée et les doses moyennes appliquées en France, notamment sur le colza. L'une des hypothèses justifiant cette différence est la non prise en compte de l'azote absorbé pendant l'hiver.

3) Discussion de la méthode lors du premier Comité Scientifique et Technique du projet

La méthode simplifiée de calcul d'apport d'azote minéral a été présentée le 11/01/2018 aux membres du CST. Ces derniers ont soulevé une incohérence temporelle entre la méthode du bilan, utilisée largement sur le territoire français, et l'équation simplifiée. Le calcul via cette méthode simplifiée s'effectue sur l'année culturale (échelle récolte du précédent - récolte du suivant), puisqu'elle se base sur le modèle AMG dont les coefficients sont calculés à l'échelle annuelle. Or, dans la méthode du bilan prévisionnel, utilisée largement par les conseillers pour guider les agriculteurs, l'échelle de temps se situe entre la sortie de l'hiver et la récolte de la culture étudiée. Les valeurs Nmin calculées de part et d'autre ne sont donc pas comparables puisqu'on ne considère pas la même période d'assimilation de l'azote. Il a alors été proposé d'intégrer les coefficients de temps de présence des cultures pour considérer la fraction de l'azote minéralisée assimilable par les cultures et obtenir ainsi une dose Nmin comparable aux valeurs du terrain.

Par ailleurs, les échanges ont mis en évidence la nécessité d'intégrer à l'équation, dans cette configuration de calcul, le RSH, l'azote absorbé pendant l'hiver ainsi que les reliquats post-récolte.

4) Tests des différentes méthodes proposées et validation avec le LDAR (Laboratoire Départemental d'Analyses et de Recherches)

Des tests ont été réalisés pour évaluer les différentes méthodes pour une dizaine de systèmes de culture issus des premières reconstitutions de rotations x type de sol x pratiques culturales.

La méthode simplifiée : $N_{min} = (Rdmt \times Besoins) - [((Min\ h + Min\ RdC + Min\ CI + N\ PRO) \times Coeff\ Tps)]$, privilégiée initialement pour simplifier l'automatisation et correspondre à la période considérée dans le calcul des postes de minéralisation (basés sur les coefficients calculés grâce au modèle AMG) ne permet pas d'obtenir des doses d'azote apportées cohérentes et proches des doses réellement apportées (en moyenne : 250 UN sur blé, 247 UN sur colza, ...). Ces résultats sont indépendants des coefficients de temps de présence, estimés au plus près de l'assimilation réelle de l'azote issue de la minéralisation par les cultures sur l'ensemble de leur cycle.

Cette forte surestimation par rapport aux doses moyennes réellement appliquées s'explique par deux raisons principales :

- 1) Les agriculteurs (ou leur conseiller) se basent sur la méthode du bilan pour estimer les doses d'azote minéral qu'ils vont apporter sur leur culture. Cela induit mathématiquement que si certains postes ne sont pas considérés, ici les reliquats sortie d'hiver, les reliquats post-récolte et l'azote absorbé pendant l'hiver, les doses finales obtenues avec la méthode du bilan simplifiée ne seront pas comparables à une méthode du bilan « complète » (avec tous les principaux postes).
- 2) La méthode d'estimation de la minéralisation des résidus de cultures (et des cultures intermédiaires) se basait sur l'humification du carbone total des résidus pour obtenir à l'aide des rapports C/N des résidus d'une part et de la matière organique du sol d'autre part, l'azote total et l'azote organique des résidus de culture et par différence l'azote minéralisé de ces résidus (Nicolardot et al., 1997). Or, les calculs montrent que c'est davantage une forte immobilisation de l'azote qui est obtenue avec cette méthode (autour de -40 UN) qu'une minéralisation. Cette méthode n'est pas adaptée pour calculer un poste de fourniture dans un bilan azoté.

Pour permettre de se rapprocher de l'équation utilisée sur le terrain, et ainsi, des valeurs de doses N min réellement apportées, il est nécessaire d'intégrer les propositions suggérées par les membres du comité et de se baser sur les abaques utilisés largement en France pour déterminer l'azote fourni par la minéralisation des résidus de culture et des cultures intermédiaires. On obtient ainsi l'équation suivante : $N_{min} = (Rdmt \times Besoins) + Rf - [(Min\ h \times Coeff\ Tps) + Min\ RdC + Min\ CI + N\ PRO + N\ abs + RSH]$.

Les premiers tests, réalisés à la main en attendant l'automatisation de l'outil ABC'Terre, illustrent que les doses obtenues avec l'équation ci-dessus se rapprochent des doses moyennes apportées en France selon le RGA de 2011 (même dose pour les betteraves, +7 % sur colza mais -9 % sur maïs, +2 % sur pomme de terre...). La méthode proposée surestime de 29 % la dose d'azote apporté sur blé (208 N) par rapport au RGA de 2011 (162UN), mais se rapproche plus des doses d'azote apportées sur le territoire d'étude (200UN) sur lequel les tests se sont basés (l'Aisne).

5) Dernière phase de test à l'échelle du territoire

L'automatisation de la première version de l'outil ABC'Terre s'est achevée en mai 2019. Une nouvelle série de tests a ainsi pu être réalisée en se basant sur les doses moyennes calculées pour l'ensemble des systèmes de culture reconstitués à l'échelle d'un territoire via l'outil de calcul ABC'Terre.

Les doses Nmin calculées par la méthode ABC'Terre pour chaque culture implantée sur le territoire sur Saint-Quentinois – Vermandois, ont été comparées aux doses conseillées entre 2015 et 2019 par le LDAR aux agriculteurs de ce secteur réalisant leur reliquat sortie hiver au LDAR.

Cette comparaison révèle que les doses calculées par l'outil ont tendance à être sous-estimées par rapport aux doses préconisées par une méthode du bilan normal, à hauteur de 11 %. Cette sous-estimation est particulièrement vraie pour les betteraves (-22 %), le blé (-15 %) et l'orge d'hiver (-14 %). Pour les betteraves, cette sous-estimation s'explique par le poste « Minéralisation de l'humus » qui est calculé dans ABC'Terre en prenant compte le temps de présence de la culture par rapport à la période de minéralisation. Or ce temps de présence est particulièrement élevé pour cette culture. Les fournitures d'azote par minéralisation de l'humus sont donc plus élevées pour les betteraves que pour les autres cultures. Néanmoins, on peut penser que le calcul de ce poste se rapproche plus de la réalité que les abaques simplifiés utilisés dans les méthodes de bilans azotés classiques, puisqu'il se base sur le coefficient de minéralisation calculé par AMG, fonction de la température, de l'humidité, de la texture du sol, et d'autres paramètres comme le pH ou le C/N du sol. En ce qui concerne les céréales, les nombreuses méthodes de pilotage de la fertilisation existantes induisent une forte variabilité des doses d'azote apportées observées au sein d'un même territoire. Il est donc difficile d'estimer si la sous-estimation est réelle ou non.

La méthode de calcul N_{min} a également été appliquée sur les autres territoires pilotes du projet ABC'Terre-2A, tous ont préféré retenir les doses calculées par l'outil plutôt que les doses saisies par culture et type de sol, s'ils en disposaient, même si une sur ou sous-estimation était observée pour certaines cultures. Elle pouvait soit se justifier par une variabilité dans la gestion de la fertilisation intrinsèque à la culture, soit être mise en évidence lors de l'interprétation du bilan GES pour ne pas fausser l'analyse. Ce choix de retenir la méthode de calcul plutôt que les doses saisies par type de sol, dans le cas où elles sont disponibles, réside surtout dans la cohérence de la méthode de calcul avec le type de sol et la gestion des pratiques culturales. Le but de la démarche est avant tout d'évaluer l'impact d'une modification de pratiques sur le bilan de GES. Avec la méthode de calcul N_{min} développée pour ABC'Terre, la modification de la gestion des cultures intermédiaires, des PRO et des résidus de culture par exemple, se répercutera directement sur la dose N_{min} .

Annexe 3 : Rendements par défaut

Tableau 10 : Rendements retenus dans l'outil de calcul ABC'Terre en cas d'erreur de paramétrage du fichier de collecte par l'utilisateur

Cultures paramétrées dans Simeos	Rendements	Unités	Sources
Ail	6.7	t	Comm. De comm. De Lomagne
Asperge	9	t	CTIFL
Avoine hiver	70	q	Valeurs par défaut paramétrées dans Simeos-AMG
Avoine printemps	60	q	Valeurs par défaut paramétrées dans Simeos-AMG
Betterave fourragère	80	t	Valeurs par défaut paramétrées dans Simeos-AMG
Betterave sucrière	70	t	Valeurs par défaut paramétrées dans Simeos-AMG
Blé dur	50	q	Valeurs par défaut paramétrées dans Simeos-AMG
Blé hiver	85	q	Valeurs par défaut paramétrées dans Simeos-AMG
Blé plante entière	10	t	Cremer et al, 2016
Blé printemps	60	q	Valeurs par défaut paramétrées dans Simeos-AMG
Cameline	12	q	Valeurs par défaut paramétrées dans Simeos-AMG
Carotte industrielle petite	40	t	Unilet
Carotte légumière	67	t	Unilet
Chanvre Chênevis	13.4	q	Valeurs par défaut paramétrées dans Simeos-AMG
Chanvre Fibres	13.3	t	Valeurs par défaut paramétrées dans Simeos-AMG
Chicorée	47	t	<i>Philippe Cadet et Christian Defebvre, 2010</i>
Chou brocoli	11	t	GREN NPdC 2015
Chou Bruxelles	17.5	t	Larousse agricole, 2002
Chou fleur	27	t	GREN NPdC 2015
Chou fourrager	45	t	Agreste
Chou pommé	25	t	van der Vossen & Seif, 2004
Colza Associe	35	q	Terres inovia
Colza Associe Légumineuse	35	q	Terres inovia
Colza hiver	38	q	Valeurs par défaut paramétrées dans Simeos-AMG
Colza printemps	25	q	Valeurs par défaut paramétrées dans Simeos-AMG
Dactyle ensilé 20%MS	14	t	GREN NPdC 2015
Dactyle foin	14	t	GREN NPdC 2015
Endive	37	t	CTIFL
Epinard	20	t	Unilet
Escourgeon	83	q	Valeurs par défaut paramétrées dans Simeos-AMG
Féverole	40	q	Terres inovia
Haricot flageolet	12	t	Unilet
Haricot grain	12	t	Unilet
Haricot vert	12	t	Unilet
Laitue	30	t	GREN Bretagne 2015
Lentille	0.5	t	Valeurs par défaut paramétrées dans Simeos-AMG
Lin fibre	7	t	Valeurs par défaut paramétrées dans Simeos-AMG
Lin oléagineux	27	q	Valeurs par défaut paramétrées dans Simeos-AMG
Lupin	45	q	Terres inovia
Luzerne	13	t MS	Valeurs par défaut paramétrées dans Simeos-AMG

Maïs fourrage 30%MS	11	t	Valeurs par défaut paramétrées dans Simeos-AMG
Maïs grain	90	q	Valeurs par défaut paramétrées dans Simeos-AMG
Mélange Gram&Lég (> 2 ans) foin	13	t	GREN NPdC 2015
Méteil (T de MSha)	10	t	GREN NPdC 2015
Moutarde	2	t	CA Cote d'Or
Moutarde Brune graine	10	q	Valeurs par défaut paramétrées dans Simeos-AMG
Moutarde Noire	10	q	Valeurs par défaut paramétrées dans Simeos-AMG
Oignon	80	t	CTIFL
Orge printemps	68	q	Valeurs par défaut paramétrées dans Simeos-AMG
Poireau	65	t	CTIFL
Pois chiche	25	q	bio-provence.org
Pois de conserve	7	q	Unilet
Pois protéagineux	48	q	Valeurs par défaut paramétrées dans Simeos-AMG
Pomme de terre conso	40	t	Valeurs par défaut paramétrées dans Simeos-AMG
Pomme de terre fécule	48	t	Valeurs par défaut paramétrées dans Simeos-AMG
Pomme de terre plant	20	t	Valeurs par défaut paramétrées dans Simeos-AMG
Prairies permanentes	5.3	t	AGRESTE
Ray grass anglais	14	t MS	GREN NPdC 2015
Ray grass d'Italie	14	t MS	GREN NPdC 2015
Salsifis	28	t	CENALDI, moyenne 2006-2010 (COMIFER)
Sarrasin	15	q	Valeurs par défaut paramétrées dans Simeos-AMG
Seigle	67	q	GREN Hauts-de-France 2018
Soja	30	q	Terres inovia
Sorgho	90	q	Valeurs par défaut paramétrées dans Simeos-AMG
Tabac	2.45	t	GREN Hauts-de-France 2018
Tournesol	25	q	Valeurs par défaut paramétrées dans Simeos-AMG
Trèfle violet foin	5.5	t	Valeurs par défaut paramétrées dans Simeos-AMG
Triticale	67	q	GREN Hauts-de-France 2018
Vesce foin	3	t	CA Meuse

Annexe 4 : Besoins des cultures

Tableau 11 : Besoins par unité de production (kgN/unité de production)

Cultures	Besoins /unité de production	Unité de production	Sources
Avoine hiver	2.2	q	ARVALIS, 2012 ⁽¹⁾
Avoine printemps	2.2	q	ARVALIS, 2012 ⁽¹⁾
Blé dur	3.5	q	ARVALIS (moyenne)
Blé hiver	3	q	ARVALIS (moyenne)
Blé printemps	3	q	ARVALIS (moyenne)
Escourgeon	2.5	q	ARVALIS, 2013 ⁽¹⁾
Orge printemps	2.5	q	ARVALIS, 2013 ⁽¹⁾
Seigle	2.3	q	ARVALIS, 2012 ⁽¹⁾
Triticale	2.6	q	ARVALIS, 2012 ⁽¹⁾
Maïs grain	2.2	q	ARVALIS (moyenne)
Maïs fourrage 30%MS	13	T	
Colza hiver	7	q	Terres Inovia, 2014 ⁽¹⁾
Colza printemps	5.2	q	Terres Inovia, 2014 ⁽¹⁾
Tournesol	4.5	q	Terre Inovia, 2012 ⁽¹⁾
Lin oléagineux	4,5	q	Terre Inovia, 2012 ⁽¹⁾
Lin fibre	10	T	COMIFER, 2013
Sarrasin	2.2	q	Besoins similaires à l'avoine (http://www.omafr.gov.on.ca/)
Sorgho	13	T	Terre Inovia, 2013 ⁽¹⁾

(1) Sources référencées sur le site du COMIFER (COMIFER, 2018)

Tableau 12 : Besoins par unité de surface (kgN/ha)

Cultures	Besoins/unité de surface	Unité de surface	Sources
Betterave fourragère	250	ha	ITB, 2012 ⁽¹⁾
Betterave sucrière	220	ha	COMIFER, 2013
Pomme de terre féculé	241	ha	ARVALIS 2012 ⁽¹⁾ (moyenne sur le bassin 1)
Pomme de terre conso	193	ha	
Pomme de terre plant	178	ha	GREN Picardie, 2015 (groupe de travail « pomme de terre »)
Epinard	185	ha	UNILET, 2012 ⁽¹⁾
Carotte industrielle petite	110	ha	UNILET, 2012 ⁽¹⁾
Carotte légumière	200	ha	UNILET, 2012 ⁽¹⁾
Salsifis	260	ha	UNILET, 2012 ⁽¹⁾
Chou brocoli	230	ha	UNILET, 2012 ⁽¹⁾

(1) Sources référencées sur le site du COMIFER (COMIFER, 2018)

Annexe 5 : Coefficients de présence des cultures

Tableau 13 : Coefficients de temps de présence par culture (source : GREN Hauts-de-France, 2018)

Coefficients de temps de présence issus du GREN Hauts-de-France (2018), en cultures non irriguées									
Culture	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Coefficient
	0.05	0.1	0.15	0.15	0.1	0.15	0.15	0.15	
Avoine hiver	1	1	1	1	1	0	0	0	0.55
Avoine printemps	1	1	1	1	1	0	0	0	0.55
Blé dur	1	1	1	1	1	0	0	0	0.55
Blé hiver	1	1	1	1	1	0	0	0	0.55
Blé printemps	1	1	1	1	1	0	0	0	0.55
Escourgeon	1	1	1	1	1	0	0	0	0.55
Orge printemps	1	1	1	1	1	0	0	0	0.55
Seigle	1	1	1	1	1	0	0	0	0.55
Triticale	1	1	1	1	1	0	0	0	0.55
Maïs grain	0	0	1	1	1	1	1	1	0.85
Maïs fourrage 30%MS	0	0	1	1	1	1	1	1	0.85
Haricot flageolet	1	1	1	0	0	0	0	0	0.3
Haricot grain	1	1	1	0	0	0	0	0	0.3
Haricot vert	1	1	1	0	0	0	0	0	0.3
Colza hiver	1	1	1	1	0.25	0	0	0	0.475
Colza printemps	1	1	1	1	1	0	0	0	0.55
Tournesol	1	1	1	1	1	1	1	0	0.85
Lin oléagineux	1	1	1	1	1	0	0	1	0.7
Lin fibre	1	1	1	1	1	0	0	0	0.55
Chou brocoli	0	0	0	1	1	1	1	1	0.7
Epinard	0	0	0	0	0	0	0.5	1	0.225
Betterave fourragère	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Betterave sucrière	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Carotte industrielle petite	0	0	0	0	1	1	1	1	0.55
Carotte légumière	0	0	0	0	1	1	1	1	0.55
Salsifis	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Pomme de terre conso	0	1	1	1	1	0.5	0	0	0.575
Pomme de terre fécule	0	1	1	1	1	1	0	0	0.65
Pomme de terre plant	0	1	1	1	1	0	0	0	0.5
Sorgho	0	0	0	1	1	1	1	0	0.55

Annexe 6 : Minéralisation des résidus de culture

Issue de l'adaptation des travaux ARVALIS – INRA, 2012 (COMIFER, 2013) sur le poste Mr du bilan en fonction de la nature des résidus de la culture précédente.

Tableau 14 : Quantités d'azote minéralisé par les résidus de cultures (en kg N/ha)

Nature du précédent	Min RdC en kgN/ha
Avoine hiver	-20
Avoine printemps	-20
Blé dur	-20
Blé hiver	-20
Blé printemps	-20
Escourgeon	-20
Orge printemps	-20
Seigle	-20
Triticale	-20
Maïs grain	-10
Féverole	30
Haricot flageolet	20
Haricot grain	20
Haricot vert	20
Pois de conserve	20
Pois protéagineux	20
Soja	20
Colza hiver	20
Colza printemps	20
Tournesol	-10
Lin oléagineux	0
Lin fibre	0
Chou brocoli	40
Epinard	20
Betterave fourragère	20
Betterave sucrière	20
Carotte industrielle petite	10
Carotte légumière	10
Salsifis	0

Pomme de terre conso	20
Pomme de terre fécule	20
Pomme de terre plant	20
Luzerne	40
Luzerne 2 ans foin	20
Luzerne ensilée 35%MS	20
Maïs fourrage 30%MS	0
Trèfle violet foin	30
Vesce foin	20
Orge hiver	-20
Sarrasin	0
Sorgho	-10
Lentille	20
Lupin	30

Annexe 7 : Minéralisation des cultures intermédiaires

Ces valeurs de minéralisation sont issues de l'adaptation des travaux de ARVALIS-CETIOM-ITB-ITL, 2011, dans la brochure « Cultures Intermédiaires – Impact et Conduite » chapitre 17)

Tableau 15 : Quantités d'azote minéralisé par les cultures intermédiaires (en kg N/ha)

	Noc/déc						Janv/fév					
Culture intermédiaire	Intervalles de biomasse en t MS/ha											
	[0;1]	]1;3[	[3;4[	[4;5[	]5;6[	>= 6	[0;1]	]1;3[	[3;4[	[4;5[	]5;6[	>= 6
Nyger	0	5	10	15	20	25	5	10	15	20	25	30
Tournesol	0	5	10	15	20	25	5	10	15	20	25	30
Phacélie	0	5	10	15	20	25	5	10	15	20	25	30
Avoine	0	5	10	15	20	25	5	10	15	20	25	30
Raygrass hybride	0	5	10	15	20	25	5	10	15	20	25	30
Seigle	0	5	10	15	20	25	5	10	15	20	25	30
Sorgho	0	5	10	15	20	25	5	10	15	20	25	30
Sarrasin	0	5	10	15	20	25	5	10	15	20	25	30
Sorgho fourrager	0	5	10	15	20	25	5	10	15	20	25	30
Avoine printemps	0	5	10	15	20	25	5	10	15	20	25	30
Avoine rude	0	5	10	15	20	25	5	10	15	20	25	30
Moha	0	5	10	15	20	25	5	10	15	20	25	30
RGI	0	5	10	15	20	25	5	10	15	20	25	30
Seigle classique	0	5	10	15	20	25	5	10	15	20	25	30
Seigle forestier	0	5	10	15	20	25	5	10	15	20	25	30
Repousse céréales	0	5	10	15	20	25	5	10	15	20	25	30
Graminées	0	5	10	15	20	25	5	10	15	20	25	30
Avoine + navette	2.5	7.5	12.5	17.5	22.5	27.5	7.5	12.5	17.5	22.5	27.5	32.5
Mélange graminées-crucifères	2.5	7.5	12.5	17.5	22.5	27.5	7.5	12.5	17.5	22.5	27.5	32.5
Moutarde d’Ethiopie	5	10	15	20	25	30	10	15	20	25	30	35
Moutarde brune	5	10	15	20	25	30	10	15	20	25	30	35

Moutarde blanche	5	10	15	20	25	30	10	15	20	25	30	35
Moutarde	5	10	15	20	25	30	10	15	20	25	30	35
Colza	5	10	15	20	25	30	10	15	20	25	30	35
Navette	5	10	15	20	25	30	10	15	20	25	30	35
Roquette	5	10	15	20	25	30	10	15	20	25	30	35
Radis	5	10	15	20	25	30	10	15	20	25	30	35
Radis chinois (structurator)	5	10	15	20	25	30	10	15	20	25	30	35
Radis fourrager	5	10	15	20	25	30	10	15	20	25	30	35
Navet	5	10	15	20	25	30	10	15	20	25	30	35
Crucifères	5	10	15	20	25	30	10	15	20	25	30	35
Mélange graminées-légumineuses	5	10	15	20	25	30	10	15	20	25	30	35
Mélange multi-espèces	7.5	15	22.5	30	37.5	45	15	22.5	30	37.5	45	52.5
Lupin	10	20	30	40	50	60	20	30	40	50	60	70
Luzerne	10	20	30	40	50	60	20	30	40	50	60	70
Sainfoin	10	20	30	40	50	60	20	30	40	50	60	70
Féverole	10	20	30	40	50	60	20	30	40	50	60	70
Vesce commune	10	20	30	40	50	60	20	30	40	50	60	70
Trèfle d'Alexandrie	10	20	30	40	50	60	20	30	40	50	60	70
Pois de printemps	10	20	30	40	50	60	20	30	40	50	60	70
Soja	10	20	30	40	50	60	20	30	40	50	60	70
Trèfle hybride	10	20	30	40	50	60	20	30	40	50	60	70
Trèfle incarnat	10	20	30	40	50	60	20	30	40	50	60	70
Trèfle violet	10	20	30	40	50	60	20	30	40	50	60	70
Vesce pourpre	10	20	30	40	50	60	20	30	40	50	60	70
Vesce velue	10	20	30	40	50	60	20	30	40	50	60	70
Légumineuses	10	20	30	40	50	60	20	30	40	50	60	70
Mélilot	10	20	30	40	50	60	20	30	40	50	60	70
Pois protéagineux	10	20	30	40	50	60	20	30	40	50	60	70
Trèfle de Perse	10	20	30	40	50	60	20	30	40	50	60	70
Mélange riche en légumineuses	10	20	30	40	50	60	20	30	40	50	60	70

Annexe 8 : Teneurs en azote des PRO paramétrés dans l'outil

Tableau 16 : Teneurs en azote par PRO (en kgN/t)

Type de PRO	kgN/t PRO	Sources
Boue déshydratée chaulée	5.20	Annexe 3 du Label Bas Carbone Grandes Culture (https://www.ecologie.gouv.fr/label-bas-carbone#scroll-nav__6)
Boue déshydratée non chaulée	9.00	
Boue papeterie	4.20	
Boue urbaine liquide	2.97	
Co-compost de déchets verts et biodéchets	8.23	
Co-compost de déchets verts et boue	8.47	
Compost de déchets verts	7.79	
Compost de fumier (sauf volaille)	8.75	
Compost de fumier de volailles	21.60	
Compost d'ordures ménagères résiduelles	8.66	
Digestat brut	5.63	
Digestat liquide	4.69	
Digestat solide	24.70	
Digestat voie sèche	24.70	
Fiente de Canard	6.10	
Fiente de Dinde	25.50	
Fiente de Poule brute	37.00	
Fiente de Poule sèche	39.50	
Fumier bovin	4.79	ARVALIS (https://www.arvalis-infos.fr/integrer-les-valeurs-fertilisantes-des-produits-organiques-dans-le-plan-de-fumure-@/view-12357-arvarticle.html)
Fumier champignons	7.50	
Fumier de Cheval	4.84	Annexe 3 du Label Bas Carbone Grandes Culture (https://www.ecologie.gouv.fr/label-bas-carbone#scroll-nav__6)
Fumier ovin	6.70	
Fumier porc	3.50	
Fumier volailles	21.68	
Lisier de Bovin	3.40	
Lisier de Porc	3.50	
Vinasse concentrée (t/ha)*	25.00	
Vinasse diluée (t/ha)*	3.87	Moyenne des teneurs des PRO liquide rapidement biodégradables (lisier bovin, porc et digestat liquide)

wPRO K1- C-	9.00	Annexe 3 du Label Bas Carbone Grandes Culture (https://www.ecologie.gouv.fr/label-bas-carbone#scroll-nav__6)
wPRO K1- C+	8.75	
wPRO K1- C=	4.79	
wPRO K1+ C-	9.00	
wPRO K1+ C+	8.75	
wPRO K1+ C=	4.79	
wPRO K1= C-	9.00	
wPRO K1= C+	8.75	
wPRO K1= C=	4.79	

Annexe 9 : Méthodologie suivie pour déterminer les coefficients d'équivalence des PRO en engrais minéral

Étape 1 : Détermination des périodes d'épandage conseillé selon les PRO et les principales catégories de culture. Source : « Fertiliser avec les engrais de ferme » (Institut de l'élevage, ITAVI, ITCF et ITP, 2001).

Tableau 17 : Périodes d'épandage retenues selon les types de PRO

Période d'épandage conseillée : fin d'été (fe), automne (a), hiver (h) ou printemps (p)					
*épandage possible mais pas conseillé	Céréales d'hiver	Céréales de printemps dont maïs	Lin, chanvre, PdT, sorgho, tournesol	Colza	Betterave
Fumiers frais de bovins, caprins, chevaux, ovins et porcs	a*	a	a	fe	
Fumiers mûrs de bovins, caprins, chevaux, ovins et porcs	a	a	h	fe - a	a
Composts de fumiers de bovins, caprins, chevaux, ovins et porcs	a	a-h	p	fe	
Composts fumiers de volailles	a	a	h	fe - a	a
Lisiers et fientes de volailles	p	h-p	p	fe-h	
Lisier de porcs	p	h-p	p	fe-h	
Lisier de bovins	p	h-p	p	fe-h	

Étape 2 : Détermination de toutes les catégories de cultures qui seront utilisées par l'outil, pour pouvoir traiter toutes les combinaisons qui seront analysées par l'outil, même si peu cohérent agronomiquement (objectif : éviter les bugs).

Étape 3 : Détermination, pour toutes les catégories de cultures, des KeqN des PRO paramétrés dans l'outil, en fonction de la période d'épandage conseillée pour chacun d'eux. Source : COMIFER (2013).

Pour la catégorie « Légumes plein champs » : estimation des KeqN en suivant l'hypothèse de cultures de printemps dont les périodes d'apport sont proches de la pomme de terre.

Pour les catégories « Légumineuses » et « Cultures fourragères » : estimation à partir de la brochure "Fertiliser avec un engrais de ferme" (ITCF, IE, ITAVI, ITP, 2001) mise à jour par le groupe "PRO" du COMIFER puis pour les valeurs manquantes, hypothèses suivies de cultures de printemps avec apport au printemps.

Au vue des faibles différences entre KeqN des divers types de fumiers, on appliquera les KeqN correspondant aux catégories de cultures paramétrées pour le fumier de bovin pailleux à celles correspondant au fumier de champignons.

Tableau 18 : Coefficients d'équivalence en azote minéral par PRO et par catégorie de culture

<i>*quand période d'apport conseillée = hiver, valeur prise = printemps (car aucune valeur hiver dans les tables du COMIFER)</i>	KeqN												
	Blé hiver	Céréales d'hiver	Céréales de prin-temps	Maïs grain	Maïs ensilage	Colza	Bet-terave	Lin fibre, chanvre fibre	Pdt	Soja/Tournesol	Légumes plein champs	Légumineuses	Cultures fourragères
Fumier de Cheval	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2	0,20*	0,20*	0,20*	0,20*	0.1	0.1
Fumier de bovin décomposé	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.05	0.05
Fumier de bovin pailleux	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.25	0.25	0.25	0.25	0.1	0.1
Fumier bovin	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.18	0.18	0.18	0.18	0.08	0.08
Fumier de champignons	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Fumier ovin	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2	0,20*	0,20*	0,20*	0,20*	0.2	0.2
Fumier porc	0.1	0.1	0.15	0.15	0.15	0.1	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.4	0.4
Fumier volailles	0.45	0.45	0.6	0.6	0.6	0.2	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Compost de fumier de volailles	0.05	0.05	0.25	0.25	0.25	0.12	0.5	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Compost de fumier (sauf volaille)	0.05	0.05	0.15	0.15	0.15	0.1	0.15	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2
Fiente de Canard	0.45	0.45	0.65	0.65	0.65	0.45	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65
Fiente de Dinde	0.45	0.45	0.65	0.65	0.65	0.45	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65
Fiente de Poule brute	0.45	0.45	0.65	0.65	0.65	0.45	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65
Fiente de Poule sèche	0.45	0.45	0.65	0.65	0.65	0.45	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65
Lisiers et fientes de volailles	0.45	0.45	0.65	0.65	0.65	0.2	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65
Lisier de Porc	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.05	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
Lisier de Bovin	0.5	0.5	0.65	0.65	0.65	0.15	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.6	0.6
Vinasse concentrée (t/ha)*	0.45	0.45	0.5	0.5	0.5	0.15	0.65	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Vinasse diluée (t/ha)*	0.45	0.45	0.50	0.50	0.50	0.25	0.53	0.50	0.50	0.50	0.50	0.49	0.49
Boue urbaine liquide	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
Boue deshyd non chaulée	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Boue deshydratée chaulée	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Boue papeterie	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Digestat brut	0.65	0.65	0.5	0.5	0.5	0.8	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Digestat liquide	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
Digestat solide	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Digestat voie sèche	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Compost de déchets verts	0.05	0.05	0.1	0.1	0.1	0.05	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Co-compost de déchets verts et biodéchets	0.05	0.05	0.10	0.10	0.10	0.05	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Co-compost de déchets verts et boue	0.10	0.10	0.13	0.13	0.13	0.10	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
Compost d'ordures ménagères résiduelles	0.05	0.05	0.1	0.1	0.1	0.05	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.05	0.05

Annexe 10 : Méthodologie suivie pour associer un KeqN aux catégories fictives de PRO de Simeos-AMG

Simeos-AMG comprend une liste de PRO qui se caractérise par une forme (liquide/solide), un coefficient isohumique et une teneur en C plus ou moins élevés, permettant à l'utilisateur d'associer un PRO qui n'apparaîtrait pas la liste initiale à l'un de ces PRO « fictifs » en fonction de ces caractéristiques. La liste de ces PRO se trouve dans le tableau ci-dessous.

Tableau 19 : Liste des catégories de PRO fictives paramétrées dans Simeos-AMG

wPRO Solide K1+ C+
wPRO Solide K1= C+
wPRO Solide K1- C+
wPRO Sol/Liq K1+ C=
wPRO Sol/Liq K1= C=
wPRO Sol/Liq K1- C=
wPRO Liquide K1+ C-
wPRO Liquide K1= C-
wPRO Liquide K1- C-

Pour associer à ces catégories fictives de PRO une valeur de % N PRO et de KeqN, les PRO pour lesquelles une valeur existe ont été catégorisés en grandes familles de PRO, de sorte à associer les PRO fictifs aux PRO existants en fonction de caractéristiques communes. Ces familles ont été réalisées en étudiant la stabilité des PRO (plus ou moins biodégradable, traduit par le coefficient isohumique k1), leur forme (solide/liquide) et surtout en comparant leur valeur fertilisante et amendante. Pour réaliser ces catégories de PRO, le livre « Recyclage de déchets organiques en agriculture : effets agronomiques et environnementaux de leur épandage » (Houot et al., 2016) a été utilisé ainsi que les références de C org et de K1 de Simeos-AMG. Ainsi, trois grandes familles de PRO ont été mises en évidence :

- les PRO stabilisés, souvent solides, dont la teneur en C est élevée : composts et fumiers,
- les PRO plus facilement biodégradables et riches en N : fientes et fumiers de volailles,
- les PRO moins stables, souvent liquides, aux valeurs amendantes et fertilisantes variables mais souvent faibles : lisiers, boues, vinasses.

Les KeqN et % N PRO de ces trois familles sont du même ordre de grandeur, comme l'illustre le Tableau 20 ci-dessous :

Tableau 20 : % N PRO moyen de chaque catégorie de PRO, avec les valeurs mini, maxi et médianes par catégorie

	% N PRO moyen	mini	maxi	médiane
Composts et fumiers	8	4	22	8
Fientes et fumiers de volailles	26	6	40	26
Boues, lisiers, vinasse...	7	3	25	4

Les valeurs moyennes de % N PRO et KeqN de ces familles de PRO ont ensuite été affectées aux catégories fictives de PRO en fonction de leur stabilité et leur valeur amendante, traduites respectivement par le K1 et la teneur en C org, établies dans Simeos-AMG, ainsi que leur forme.

NB : Ces trois familles de PRO permettent d'associer plus facilement les % N PRO et KeqN à des PRO fictifs, pour lesquels des valeurs sont inexistantes. L'usage de ces PRO fictifs concerne les territoires dont les PRO majoritairement épanchés sont « atypiques » (ne se trouvant pas dans la liste des PRO paramétrée dans Simeos-AMG, basée sur les PRO les plus courants en France). Cette catégorisation des PRO est donc valable uniquement pour l'usage exceptionnel de ces PRO fictifs.

Annexe 11 : Méthodes de détermination de l'azote absorbé avant ouverture du bilan

Méthode visuelle	Correspondance méthode par pesée (poids frais en kg/m²)
	0,2
	0,4
	1,0
	1,4
	2,0

Figure 8 : Méthode visuelle du CETIOM (2012)

Nombre de talles	N abs (en kg N/ha)
0	10
1	15
2	20
3	25
4	30
5	35
6	40
7	45
8 et +	50

Figure 9 : Méthode visuelle d'ARVALIS (2012)

Annexe 12 : Facteurs d'émissions retenus dans le bilan GES ABC'Terre

Le PRG du N₂O utilisé est de 265 (GIEC, 2013).

Facteurs d'émissions (FE)

FE directes de N ₂ O	0.01	Tier 1 du GIEC, 2006
FE directes de C ₂ O par la chaux	0.13	Tier 1 du GIEC, 2006
FE directes de C ₂ O par l'urée	0.20	Tier 1 du GIEC, 2006
FE lessivage	0.011	Tier 1 du GIEC, 2019
Fractions lixiviées	0.24	Tier 1 du GIEC, 2019
FE volatilisation	0.01	Tier 1 du GIEC, 2006

Facteurs d'émissions NO_x issus de l'EMEP/EEA, 2016a, 2016b

FE NO _x min	0.02
FE NO _x PRO	0.01

Facteurs d'émissions NH₃ azote minéral issus de l'EMEP EEA (2016b)

	FE NH ₃ azote minéral	
	pH < 7	pH > 7
Ammonitrate	0.013	0.027
Ammoniaque anhydre	0.013	0.027
Phosphate d'ammonium	0.042	0.077
Sulphate d'ammonium	0.076	0.140
Nitrate d'ammonium calcique	0.007	0.014
Solution azotée	0.082	0.080
Mélange NK	0.018	0.027
Mélange NPK	0.055	0.077
Mélange NP	0.055	0.077
Urée	0.131	0.138
Autre NPK	0.012	0.016

Facteurs d'émissions NH₃ et teneurs TAN azote organique issus de l'annexe 3 du Label Bas Carbone, méthode Grandes Cultures (https://www.ecologie.gouv.fr/label-bas-carbone#scroll-nav__6)

PRO	FE N-NH ₃ PRO (kg N-NH ₃ /kg TAN)	TAN (kg TAN/kgN)
-----	---	------------------

Boue déshydratée chaulée	0.40	0.014
Boue déshydratée non chaulée	0.40	0.050
Boue papeterie	0.51	0.400
Boue urbaine liquide	0.40	0.092
Co-compost de déchets verts et biodéchets	0.71	0.030
Co-compost de déchets verts et boue	0.81	0.122
Compost d'ordures ménagères résiduelles	0.71	0.007
Compost de déchets verts	0.71	0.056
Compost de fumier (sauf volaille)	0.71	0.080
Compost de fumier de volailles	0.81	0.093
Digestat brut	0.40	0.531
Digestat liquide	0.40	0.600
Digestat solide	0.81	0.377
Digestat voie sèche	0.81	0.377
Fiente de Canard	0.54	0.459
Fiente de Dinde	0.54	0.290
Fiente de Poule brute	0.69	0.103
Fiente de Poule sèche	0.69	0.081
Fumier bovin	0.79	0.192
Fumier champignons	0.79	0.100
Fumier de Cheval	0.90	0.289
Fumier ovin	0.90	0.418
Fumier porc	0.81	0.714
Fumier volailles	0.79	0.137
Lisier de Bovin	0.55	0.382
Lisier de Porc	0.40	0.714
Vinasse concentrée (t/ha)*	0.81	0.024
Vinasse diluée (t/ha)*	0.81	0.020

wPRO K1- C-	0.40	0.050
wPRO K1- C+	0.71	0.080
wPRO K1- C=	0.79	0.192
wPRO K1+ C-	0.40	0.050
wPRO K1+ C+	0.71	0.080
wPRO K1+ C=	0.79	0.192
wPRO K1= C-	0.40	0.050
wPRO K1= C+	0.71	0.080
wPRO K1= C=	0.79	0.192

Facteurs d'émission dues aux passages des machines et outils agricoles (Source ADEME, données AGRIBALYSE v3.0 – 2020, via SimaPro)

Matériel	FE	unité
Andaineur	9.81	kg éq. CO2/ha
Arrachage pdt	145.2	kg éq. CO2/ha
Bineuse	18.81	kg éq. CO2/ha
Broyeur (fanes pdt)	53.9	kg éq. CO2/ha
Broyeur pailles	36.113	kg éq. CO2/ha
Butteuse HV	46.38	kg éq. CO2/ha
Charrue	93.366	kg éq. CO2/ha
Cover crop	38.65	kg éq. CO2/ha
Cueilleuse HV	156	kg éq. CO2/ha
Cueilleuse PC	164	kg éq. CO2/ha
Cultivateur rotatif / Chisel	75.281	kg éq. CO2/ha
Déchaumeur (disques)	26.832	kg éq. CO2/ha
Déchaumeur (porté)	19.344	kg éq. CO2/ha
Décompacteur	50.82	kg éq. CO2/ha
Distributeur à engrais	5.688	kg éq. CO2/ha
Distributeur à engrais	5.688	kg éq. CO2/ha
Enrubanneur	51.6	kg éq. CO2/ha
Ensileuse herbe	89.32	kg éq. CO2/ha

Épandeur à fumier	31.35	kg éq. CO2/ha
Faneuse + Andaineur	6.25	kg éq. CO2/ha
Faucheuse	11.85	kg éq. CO2/ha
Gyrobroyeur	9.45	kg éq. CO2/ha
Herse étrille	4.741	kg éq. CO2/ha
Herse rotative	39.2	kg éq. CO2/ha
Intégrale BS	168	kg éq. CO2/ha
Irrigation	0.216	kg éq. CO2/m3 eau
Moissonneuse	70.35	kg éq. CO2/ha
Pas mécanique	0	kg éq. CO2/ha
Planteuse-Butteuse pdt	71.37	kg éq. CO2/ha
Presse	47.9	kg éq. CO2/ha
Pulvérisateur	4.112	kg éq. CO2/ha
Pulvérisateur	4.112	kg éq. CO2/ha
Rouleau	12.62	kg éq. CO2/ha
Semi direct	28.014	kg éq. CO2/ha
Semoir céréales	87.62	kg éq. CO2/ha
Semoir céréales + herse	55.942	kg éq. CO2/ha
Semoir monogr. + herse	55.942	kg éq. CO2/ha
Semoir monograine	35.711	kg éq. CO2/ha
Sous-soleuse	100.6	kg éq. CO2/ha
Tonne à lisier	45.8	kg éq. CO2/ha
Transport (Benne)	37.721	kg éq. CO2/ha
Transport (plateau)	16.8	kg éq. CO2/ha
Vibroculteur	19.754	kg éq. CO2/ha

Facteurs d'émission dues aux apports d'engrais minéraux (Source ADEME, données AGRIBALYSE v3.0 – 2020, via SimaPro) et GES'TIM+ (Arvalis et al., 2020)

Engrais	FE	unité
Ammonitrate	3.97	kg éq. CO2/kg N
Chaux	1.18	kg éq. CO2/kg
Chlorure de pot.	0.71	kg éq. CO2/kg K2O

Oxyde de Bore	2.52	kg éq. CO2/kg
Oxyde de Mg	1.17	kg éq. CO2/kg
Solution azotée	4.99	kg éq. CO2/kg N
Sulfammo	2.06	kg éq. CO2/kg
Triple superph.	1.45	kg éq. CO2/kg P2O5
Urée	4.54	kg éq. CO2/kg N

Facteurs d'émission dues aux semences (Source ADEME, données AGRIBALYSE v3.0 – 2020, via SimaPro)

Cultures	FE	unité
Ail	22.3	kg éq. CO2/kg
Asperge	0.194	kg éq. CO2/kg
Asteracées	1.97	kg éq. CO2/kg
Avoine	0.368	kg éq. CO2/kg
Avoine + navette	0.4346	kg éq. CO2/kg
Avoine hiver	0.368	kg éq. CO2/kg
Avoine pl entière (T MS/ha)	0.368	kg éq. CO2/kg
Avoine printemps	0.368	kg éq. CO2/kg
Avoine rude	0.368	kg éq. CO2/kg
Betterave fourragère	12.95	kg éq. CO2/kg
Betterave sucrière	12.95	kg éq. CO2/kg
Blé dur	0.706	kg éq. CO2/kg
Blé hiver	0.62	kg éq. CO2/kg
Blé pl entière (T MS/ha)	0.62	kg éq. CO2/kg
Blé printemps	0.62	kg éq. CO2/kg
Cameline	1.7	kg éq. CO2/kg
Carotte industrielle petite	15.5	kg éq. CO2/kg
Carotte légumière	15.5	kg éq. CO2/kg
Chanvre Fibres (tMS/ha)	0.554	kg éq. CO2/kg
Chenevis (Chanvre)(qx/ha)	0.554	kg éq. CO2/kg
Chicorée	24.34	kg éq. CO2/kg
Chou brocoli	0.444	kg éq. CO2/kg
Chou Bruxelles	50.79	kg éq. CO2/kg
Chou fleur	50.79	kg éq. CO2/kg
Chou fourrager	50.79	kg éq. CO2/kg
Chou pommé	50.79	kg éq. CO2/kg
Colza	1.7	kg éq. CO2/kg
Colza (T de MS/ha)	1.7	kg éq. CO2/kg
Colza Associe	1.7	kg éq. CO2/kg
Colza Associe Legumineuse	1.7	kg éq. CO2/kg
Colza hiver	1.7	kg éq. CO2/kg

Colza printemps	1.7	kg éq. CO2/kg
Crucifères	1.7	kg éq. CO2/kg
Dactyle ensilé 20%MS	1.97	kg éq. CO2/kg
Dactyle foin	1.97	kg éq. CO2/kg
Endive	24.34	kg éq. CO2/kg
Epinard	0.194	kg éq. CO2/kg
Epinard (T/ha)	0.194	kg éq. CO2/kg
Escourgeon	0.554	kg éq. CO2/kg
Féverole	0.64	kg éq. CO2/kg
Féverole pl entière (T MS/ha)	0.64	kg éq. CO2/kg
Graminées	0.463	kg éq. CO2/kg
Graminées C4	0.463	kg éq. CO2/kg
Haricot flageolet	0.64	kg éq. CO2/kg
Haricot grain	0.64	kg éq. CO2/kg
Haricot vert	0.582	kg éq. CO2/kg
Haricot vert (T/ha)	0.582	kg éq. CO2/kg
Hydrophyllacée	1.7	kg éq. CO2/kg
Laitue	221	kg éq. CO2/kg
Légumineuses	1.59	kg éq. CO2/kg
Lentille	0.325	kg éq. CO2/kg
Lin fibre	1.67	kg éq. CO2/kg
Lin oléagineux	1.67	kg éq. CO2/kg
Lupin	0.64	kg éq. CO2/kg
Luzerne	0.64	kg éq. CO2/kg
Luzerne 2 ans foin	0.64	kg éq. CO2/kg
Luzerne ensilée 35%MS	0.64	kg éq. CO2/kg
Mais ensilage (T MS/ha)	1.18	kg éq. CO2/kg
Maïs fourrage 30%MS	1.18	kg éq. CO2/kg
Maïs grain	1.18	kg éq. CO2/kg
Maïs grain (t/ha)	1.18	kg éq. CO2/kg
Mélange	0.7346	kg éq. CO2/kg
Mélange d'espèces (T MS/ha)	0.4902	kg éq. CO2/kg
Mélange Gram&Lég (> 2 ans) foin	0.4902	kg éq. CO2/kg
Mélange graminées-crucifères	0.6344	kg éq. CO2/ha
Mélange graminées-légumineuses	0.7346	kg éq. CO2/ha
Mélange multi-espèces	0.5282	kg éq. CO2/ha
Mélange riche en légumineuses	0.979	kg éq. CO2/ha
Mélange seigle-vesce	0.6884	kg éq. CO2/kg
Métilot	1.97	kg éq. CO2/kg
Méteil (T de MS/ha)	0.5636	kg éq. CO2/kg
Moha	1.97	kg éq. CO2/kg
Moutarde	1.7	kg éq. CO2/kg
Moutarde (T de MS/ha)	1.7	kg éq. CO2/kg
Moutarde blanche	1.7	kg éq. CO2/kg

Moutarde brune	1.7	kg éq. CO2/kg
Moutarde Brune graine	1.7	kg éq. CO2/kg
Moutarde d Ethiopie	1.7	kg éq. CO2/kg
Navet	1.7	kg éq. CO2/kg
Navette	1.7	kg éq. CO2/kg
Navette (T de MS/ha)	1.7	kg éq. CO2/kg
Nyger	1.97	kg éq. CO2/kg
Oignon	22.3	kg éq. CO2/kg
Orge grain (T/ha)	0.55	kg éq. CO2/kg
Orge hiver	0.55	kg éq. CO2/kg
Orge pl entière (T MS/ha)	0.55	kg éq. CO2/kg
Orge printemps	0.54	kg éq. CO2/kg
Phacélie	1.97	kg éq. CO2/kg
Phacélie (T de MS/ha)	1.97	kg éq. CO2/kg
Poireau	16.98	kg éq. CO2/kg
Pois Chiche	0.324	kg éq. CO2/kg
Pois de conserve	0.324	kg éq. CO2/kg
Pois de printemps	0.361	kg éq. CO2/kg
Pois protéagineux	0.324	kg éq. CO2/kg
Polygonacée	0.6	kg éq. CO2/kg
Pomme de terre conso	0.165	kg éq. CO2/kg
Pomme de terre féculé	0.167	kg éq. CO2/kg
Pomme de terre plant	0.166	kg éq. CO2/kg
Prairie permanente	0	kg éq. CO2/kg
Radis	1.7	kg éq. CO2/kg
Radis chinois (structurator)	1.7	kg éq. CO2/kg
Radis fourrager	1.7	kg éq. CO2/kg
Ray grass anglais	1.97	kg éq. CO2/kg
Ray grass d'Italie	1.97	kg éq. CO2/kg
Raygrass hybride	1.97	kg éq. CO2/kg
Repousse céréales	0.463	kg éq. CO2/kg
RGI	1.97	kg éq. CO2/kg
RGI (T de MS/ha)	1.97	kg éq. CO2/kg
Roquette	221	kg éq. CO2/kg
Sainfoin	1.97	kg éq. CO2/kg
Salsifis	15.5	kg éq. CO2/kg
Sarrasin	0.6	kg éq. CO2/kg
Seigle	0.463	kg éq. CO2/kg
Seigle classique	0.463	kg éq. CO2/kg
Seigle forestier	0.463	kg éq. CO2/kg
Seigle pl entière (T MS/ha)	0.463	kg éq. CO2/kg
Soja	1.11	kg éq. CO2/kg
Soja grain (t/ha)	1.11	kg éq. CO2/kg
Sorgho	0.6	kg éq. CO2/kg

Sorgho fourrager	0.6	kg éq. CO2/kg
Tabac	0.194	kg éq. CO2/kg
Tournesol	1.16	kg éq. CO2/kg
Tournesol grain (T/ha)	1.16	kg éq. CO2/kg
Trèfle (T de MS/ha)	1.59	kg éq. CO2/kg
Trèfle d Alexandrie	1.59	kg éq. CO2/kg
Trèfle de Perse	1.59	kg éq. CO2/kg
Trèfle hybride	1.59	kg éq. CO2/kg
Trèfle incarnat	1.59	kg éq. CO2/kg
Trèfle violet	1.59	kg éq. CO2/kg
Trèfle violet foin	1.59	kg éq. CO2/kg
Triticale	0.77	kg éq. CO2/kg
Triticale pl entière (T MS/ha)	0.77	kg éq. CO2/kg
Vesce (T de MS/ha)	1.59	kg éq. CO2/kg
Vesce commune	1.59	kg éq. CO2/kg
Vesce foin	1.59	kg éq. CO2/kg
Vesce pourpre	1.59	kg éq. CO2/kg
Vesce velue	1.59	kg éq. CO2/kg

Facteurs d'émissions dues à la transformation des PRO bruts (Source ADEME, données AGRIBALYSE v3.0 – 2020, via SimaPro, sur la base du projet AVC MAFOR, Avadí, 2020)

PRO	FE	unité
Boue déshydratée chaulée	1.4392	kg éq. CO2/kg
Boue déshydratée non chaulée	0.8500	kg éq. CO2/kg
Boue papeterie	0.0700	kg éq. CO2/kg
Boue urbaine liquide	0.2080	kg éq. CO2/kg
Co-compost de déchets verts et biodéchets	0.4919	kg éq. CO2/kg
Co-compost de déchets verts et boue	0.6172	kg éq. CO2/kg
Compost de déchets verts	0.6323	kg éq. CO2/kg
Compost de fumier (sauf volaille)	0.6677	kg éq. CO2/kg
Compost de fumier de volailles	0.6677	kg éq. CO2/kg
Compost d'ordures ménagères résiduelles	0.6201	kg éq. CO2/kg
Digestat brut	0.0338	kg éq. CO2/kg
Digestat liquide	0.0211	kg éq. CO2/kg
Digestat solide	0.1714	kg éq. CO2/kg
Digestat voie sèche	0.1714	kg éq. CO2/kg
Fiente de Canard	0.0202	kg éq. CO2/kg
Fiente de Dinde	0.0202	kg éq. CO2/kg
Fiente de Poule brute	0.0202	kg éq. CO2/kg

Fiente de Poule sèche	0.0202	kg éq. CO2/kg
Fumier bovin	0.0111	kg éq. CO2/kg
Fumier champignons	0.0400	kg éq. CO2/kg
Fumier de Cheval	0.0111	kg éq. CO2/kg
Fumier ovin	0.0111	kg éq. CO2/kg
Fumier porc	0.0738	kg éq. CO2/kg
Fumier volailles	0.0202	kg éq. CO2/kg
Lisier de Bovin	0.0339	kg éq. CO2/kg
Lisier de Porc	0.0185	kg éq. CO2/kg
Vinasse concentrée (t/ha)*	0.0376	kg éq. CO2/kg
Vinasse diluée (t/ha)*	0.0376	kg éq. CO2/kg
wPRO K1- C-	0.8500	kg éq. CO2/kg
wPRO K1- C+	0.6677	kg éq. CO2/kg
wPRO K1- C=	0.0111	kg éq. CO2/kg
wPRO K1+ C-	0.8500	kg éq. CO2/kg
wPRO K1+ C+	0.6677	kg éq. CO2/kg
wPRO K1+ C=	0.0111	kg éq. CO2/kg
wPRO K1= C-	0.8500	kg éq. CO2/kg
wPRO K1= C+	0.6677	kg éq. CO2/kg
wPRO K1= C=	0.0111	kg éq. CO2/kg

Annexe 13 : Méthodologie suivie pour associer un facteur d'émissions à toutes les cultures paramétrées dans l'outil

Tableau 21 : Procédé retenu pour déterminer le facteur d'émissions, liées à la production de semence, de chaque culture

Cultures paramétrées dans l'outil	Cultures répertoriées dans les BDD environnementales	Procédé retenu pour les cultures paramétrées non répertoriées
Ail		Oignon
Asperge		Epinard
Asteracées		Ray-grass
Avoine	x	
Avoine + navette		85% avoine et 15% navette (95/5 en quantité)
Avoine hiver	x	
Avoine pl entière (T MS/ha)	x	
Avoine printemps		Avoine hiver
Avoine rude		Avoine hiver
Betterave fourragère		Betterave sucrière
Betterave sucrière	x	
Blé dur	x	
Blé hiver	x	
Blé pl entière (T MS/ha)		Blé hiver
Blé printemps		Blé hiver
Cameline		Colza hiver
Carotte industrielle petite	x	
Carotte légumière	x	
Chanvre Fibres (tMS/ha)	x	
Chenevis (Chanvre)(qx/ha)	x	
Chicorée	x	
Chou brocoli	x	
Chou Bruxelles		Chou fleur
Chou fleur	x	
Chou fourrager		Chou fleur
Chou pommé		Chou fleur
Colza	x	
Colza (T de MS/ha)	x	
Colza Associe		Colza hiver
Colza Associe Legumineuse		Colza hiver
Colza hiver	x	
Colza printemps		Colza hiver
Crucifères		Colza hiver
Dactyle ensilé 20%MS		Ray-grass
Dactyle foin		Ray-grass
Endive		Chicorée
Epinard	x	
Epinard (T/ha)	x	

Escourgeon	x	
Féverole	x	
Féverole pl entière (T MS/ha)	x	
Graminées		Seigle
Graminées C4		Seigle
Haricot flageolet		Féverole
Haricot grain		Féverole
Haricot vert	x	
Haricot vert (T/ha)	x	
Hydrophyllacée		Ray-grass
Laitue	x	
Légumineuses		Trèfle (T de MS/ha)
Lentille		Pois protéagineux
Lin fibre	x	
Lin oléagineux	x	
Lupin		Féverole
Luzerne		Féverole
Luzerne 2 ans foin		Féverole
Luzerne ensilée 35%MS		Féverole
Mais ensilage (T MS/ha)	x	
Maïs fourrage 30%MS	x	
Maïs grain	x	
Maïs grain (t/ha)	x	
Mélange		50% avoine + 50% trèfle (70/30 en quantité)
Mélange d'espèces (T MS/ha)		75% avoine + 25% trèfle (90/10 en quantité)
Mélange Gram&Lég (> 2 ans) foin		75% avoine + 25% trèfle (90/10 en quantité)
Mélange graminées-crucifères		50% avoine + 50% moutarde (80/20 en quantité)
Mélange graminées-légumineuses		50% avoine + 50% trèfle (70/30 en quantité)
Mélange multi-espèces		70% avoine + 30% phacélie (90/10 en quantité)
Mélange riche en légumineuses		70% trèfle + 30% avoine (50/50 en quantité)
Mélange seigle-vesce		70% seigle + 30% vesce (80/20 en quantité)
Méililot		Trèfle (T de MS/ha)
Méteil (T de MS/ha)		50% orge hiver + 30% pois + 20% vesce (50/40/10 en quantité)
Moha		Ray-grass
Moutarde		Colza hiver
Moutarde (T de MS/ha)		Colza hiver
Moutarde blanche		Colza hiver
Moutarde brune		Colza hiver
Moutarde Brune graine		Colza hiver
Moutarde d Ethiopie		Colza hiver
Navet		Colza hiver
Navette		Colza hiver
Navette (T de MS/ha)		Colza hiver

Nyger		Ray-grass
Oignon	x	
Orge grain (T/ha)	x	
Orge hiver	x	
Orge pl entière (T MS/ha)	x	
Orge printemps	x	
Phacélie		Ray-grass
Phacélie (T de MS/ha)		Ray-grass
Poireau	x	
Pois Chiche		Pois protéagineux
Pois de conserve		Pois protéagineux
Pois de printemps	x	
Pois protéagineux	x	
Polygonacée		Sorgho
Pomme de terre conso	x	
Pomme de terre fécule	x	
Pomme de terre plant	x	
Radis		Colza hiver
Radis chinois (structurator)		Colza hiver
Radis fourrager		Colza hiver
Ray grass anglais	x	
Ray grass d'Italie	x	
Raygrass hybride	x	
Repousse céréales		Seigle
RGI	x	
RGI (T de MS/ha)	x	
Roquette		Laitue
Sainfoin		Ray-grass
Salsifis		Carotte
Sarrasin		Sorgho
Seigle	x	
Seigle classique	x	
Seigle forestier	x	
Seigle pl entière (T MS/ha)	x	
Soja	x	
Soja grain (t/ha)	x	
Sorgho	x	
Sorgho fourrager	x	
Tabac		Epinard
Tournesol	x	
Tournesol grain (T/ha)	x	
Trèfle (T de MS/ha)	x	
Trèfle d Alexandrie	x	
Trèfle de Perse	x	

Trèfle hybride	x	
Trèfle incarnat	x	
Trèfle violet	x	
Trèfle violet foin	x	
Triticale	x	
Triticale pl entière (T MS/ha)	x	
Vesce (T de MS/ha)		Trèfle (T de MS/ha)
Vesce commune		Trèfle (T de MS/ha)
Vesce foin		Trèfle (T de MS/ha)
Vesce pourpre		Trèfle (T de MS/ha)
Vesce velue		Trèfle (T de MS/ha)

Annexe 14 : Méthodologie suivie pour associer les facteurs d'émissions liées aux traitements des PRO

Tableau 22 : Procédé retenu pour déterminer le facteur d'émissions liés au traitement des PRO bruts, pour l'ensemble des PRO paramétrés dans Simeos-AMG

Liste des PRO paramétrés dans Simeos-AMG	PRO référencé dans Agribalyse v3.0	Sinon, procédé retenu pour le FE
Boue déshydratée chaulée	x	
Boue déshydratée non chaulée	x	
Boue papeterie		Boue urbaine liquide (même taux de matière sèche)
Boue urbaine liquide	x	
Co-compost de déchets verts et biodéchets	x	
Co-compost de déchets verts et boue	x	
Compost de déchets verts	x	
Compost de fumier (sauf volaille)	x	
Compost de fumier de volailles		Compost de fumier (sauf volaille)
Compost d'ordures ménagères résiduelles	x	
Digestat brut	x	
Digestat liquide	x	
Digestat solide	x	
Digestat voie sèche		Boue déshydratée non chaulée
Fiente de Canard		Fientes de volaille
Fiente de Dinde		Fientes de volaille
Fiente de Poule brute		Fientes de volaille
Fiente de Poule sèche	x	
Fumier bovin	x	
Fumier champignons		Résidus de procédés industriels
Fumier de Cheval		Fumier moyen
Fumier ovine		Fumier moyen

Fumier porc	x	
Fumier volailles	x	
Lisier de Bovin	x	
Lisier de Porc	x	
Vinasse concentrée (t/ha)*	x	
Vinasse diluée (t/ha)*	x	
wPRO K1- C-		Boue déshydratée non chaulée
wPRO K1- C+		Compost de fumier (sauf volaille)
wPRO K1- C=		Fumier bovin
wPRO K1+ C-		Boue déshydratée non chaulée
wPRO K1+ C+		Compost de fumier (sauf volaille)
wPRO K1+ C=		Fumier bovin
wPRO K1= C-		Boue déshydratée non chaulée
wPRO K1= C+		Compost de fumier (sauf volaille)
wPRO K1= C=		Fumier bovin

Liste des tableaux

Tableau 1 : Rf : quantité d'azote minéral présente dans le sol à la fermeture du bilan	17
Figure 4 : Délimitation du système de calcul étudié dans le cadre d'ABC'Terre	
Tableau 1 : Rf : quantité d'azote minéral présente dans le sol à la fermeture du bilan	17
Tableau 2 : Coefficients d'adéquation entre la période de minéralisation et la période du bilan pour les régions pilotes du projet ABC'Terre-2A	18
Tableau 3 : Valeurs de RSH par défaut paramétrées dans l'outil	22
Tableau 4 : Synthèse de la méthode de calcul de la dose d'azote minéral apportée, développée dans le cadre d'ABC'Terre-2A.....	23
Tableau 5 : intervalles de distance matérialisant le transport des PRO de son lieu de production jusqu'au siège de l'exploitation	35
Tableau 6: Synthèse du calcul du bilan GES dans le cadre d'ABC'Terre	39
Tableau 7 : Dose plafond ou conseillée d'azote minéral pour l'ensemble des cultures dont le paramétrage de cette dose d'azote minéral ne peut se faire par calcul	46
Tableau 8 : Comparaison des méthodes de calculs préconisées par les différents GREN	48
Tableau 9 : Rendements retenus dans l'outil de calcul ABC'Terre en cas d'erreur de paramétrage du fichier de collecte par l'utilisateur.....	53
Tableau 10 : Besoins par unité de production (kgN/unité de production).....	55
Tableau 11 : Besoins par unité de surface (kgN/ha)	55
Tableau 12 : Coefficients de temps de présence par culture (source : GREN Hauts-de-France, 2018)	56
Tableau 13 : Quantités d'azote minéralisé par les résidus de cultures (en kg N/ha)	57
Tableau 14 : Quantités d'azote minéralisé par les cultures intermédiaires (en kg N/ha)	59
Tableau 15 : Teneurs en azote par PRO (en kgN/t).....	61
Tableau 16 : Périodes d'épandage retenues selon les types de PRO	63
Tableau 17 : Coefficients d'équivalence en azote minéral par PRO et par catégorie de culture	64
Tableau 18 : Liste des catégories de PRO fictives paramétrées dans Simeos-AMG	65
Tableau 19 : % N PRO moyen de chaque catégorie de PRO, avec les valeurs mini, maxi et médianes par catégorie	65
Tableau 20 : Procédé retenu pour déterminer le facteur d'émissions, liées à la production de semence, de chaque culture	77
Tableau 21 : Procédé retenu pour déterminer le facteur d'émissions liés au traitement des PRO bruts, pour l'ensemble des PRO paramétrés dans Simeos-AMG.....	80

Liste des figures

Figure 1: Schéma illustrant les 5 étapes structurant ABC'Terre	8
Figure 2 : Schéma illustrant le fonctionnement interne de l'outil ABC'Terre, développé par Agro-Transfert RT	11
Figure 3 : Schéma illustrant les différents modes de détermination de la dose Nmin.....	14
Figure 4 : Délimitation du système de calcul étudié dans le cadre d'ABC'Terre	
Tableau 1 : Rf : quantité d'azote minéral présente dans le sol à la fermeture du bilan	17
Figure 4 : Délimitation du système de calcul étudié dans le cadre d'ABC'Terre	24
Figure 5 : Illustration des différentes échelles de calcul du bilan de GES du territoire	42

Figure 6 : Carte illustrant les différences de méthodes de calcul du bilan N selon les régions.....	49
Figure 7 : Méthode visuelle du CETIOM (2012)	67
Figure 8 : Méthode visuelle d'ARVALIS (2012).....	67