MINISTÈRE
DE L'AGRICULTURE
ET DE LA SOUVERAINETÉ
ALIMENTAIRE

Liberté
Égalité
Fraternité

MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE
ET DE LA COHÉSION
DES TERRITOIRES

Liberté
Égalité
Fraternité

Évaluation de l'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver par les fertilisants organiques

Rapport final

Août 2023

Mise à jour novembre 2024

comifer
Comité Français d'Étude et de Développement
de la Fertilisation Raisonnée

BOUCLAGE
Réseau Mixte Technologique
Recyclage, Fertilisation,
Impacts Environnementaux

Le présent document constitue le rapport final d'une étude sollicitée conjointement par les ministères chargés de l'agriculture et de l'environnement et financée par le Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire.

Liste des contributeurs :

Groupe Conjoint COMIFER/RMT Bouclage

Sous-groupe de travail :

DIEDHIOU Khady– COMIFER

DEGAN Francesca– ARVALIS – Institut du végétal

LEDUC David– Chambre d'Agriculture Pays-de-la-Loire

LE ROUX Caroline– LDAR

LAMBERT Marc– YARA

MICHAUD Aurélia– INRAE UMR SAS

MOREL Chloé– MASA/DGPE

Table des matières

Table des illustrations 6

Liste des tableaux 7

Liste des abréviations 8

1 Introduction 9

2 Contexte et définitions 10

2.1 Principe de raisonnement des apports d'azote issu de fertilisants organiques 10

2.2 Définition de l'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver 13

3 Épandage des fertilisants azotés en zone vulnérable : ce que dit la réglementation « nitrates » 14

3.1 Mesures encadrant l'épandage de fertilisants azotés 14

3.2 Typologie des fertilisants azotés dans la réglementation nitrates 15

3.3 Focus sur les « plafonds-périodes » d'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver dans le projet de 7ème PAN 16

4 Scénarisation et simulations 19

4.1 Méthode 19

4.1.1 Modèle de culture et fonctions de minéralisation des produits organiques 19

4.1.2 Plan de simulation 21

4.1.3 Analyse des résultats de la simulation 25

4.2 Résultats et discussions 27

4.2.1 Variables impactant l'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver 27

4.2.2 Estimation de la dose maximale d'azote à épandre 31

4.2.3 Cas d'un mélange de produits de types différents 31

5 Limites et recommandations d'usage des références 32

6 Conclusion 32

7 Références bibliographiques 33

8 ANNEXES 34

8.1 Coordonnées géographiques des stations météorologiques et types de sols associés 34

8.2 Distribution de l'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie 36

8.3 Résultats graphiques d'un échantillon des tests Kruskal-Wallis par variable 37

8.4 Types de produits : Propriétés physico-chimiques des produits organiques utilisés dans le plan de simulation. 39

8.5 Analyses des produits : pourcentages moyens d'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver, selon la date d'épandage (pourcentages par rapport à l'azote total apporté) 40

8.6 Types de produits : Pourcentage moyen d'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver, selon la date d'épandage (pourcentages par rapport à l'azote total apporté) 45

Table des illustrations

Figure 1 : Représentation schématique de la variation de l'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver en comparaison de l'azote efficace. La courbe en vert simule la croissance d'un couvert et la courbe en rouge simule l'azote minéral libéré par un produit organique entre sa date d'apport (01/09) et la sortie d'hiver (15/01). Source : APCA/MASA, Novembre 2021. 12

Figure 2 : Représentation schématique de la notion d'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver suite à un apport de produit organique après la récolte du précédent cultural et jusqu'en sortie d'hiver. L'azote ainsi libéré par les produits organiques peut être absorbé par la culture en place si le sol est couvert, ou bien potentiellement « perdu » dans l'air, l'eau, ou le sol. La sortie d'hiver est fixée au 15 janvier. 14

Figure 3 : Représentation schématique du fonctionnement du modèle CHN. Source : Arvalis. 20

Figure 4 : Typologie en 6 classes sur la base de cinétiques mesurées au champ (Bouthier et al. 2009) 22

Figure 5 : Variations des teneurs en azote des fertilisants et pourcentage de la fraction minérale. Cf annexe 9.4 pour le détail des caractéristiques des fertilisants..... 24

Figure 6 : Répartition géographique des 21 stations météorologiques utilisées pour l'étude et représentation des variations climatiques à l'échelle de la France. "1" = "montagne","2" = "semi-continental", "3" = "océanique dégradé des plaines", "4" = "océanique altéré", ''5'' = '' océanique franc'', ''6'' = ''méditerranéen altéré'', «7" = "bassin du Sud-Ouest", "8" = "bassin méditerranéen". 25

Figure 7: Importance des variables en fonction du risque d'erreur. Plus le pourcentage « %IncMSE » est important, plus la variable a un impact important sur les résultats..... 28

Figure 8 : Azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver en fonction des types climatiques et des classes de profondeur du sol. Test de significativité montrant que pour chacune des 5 zones climatiques, les différences entre les 3 profondeurs de sol ne sont pas significatives. Les pointillés représentent la moyenne générale de l'échantillon (33 kg d'APLSH par ha). .. 30

Figure 9 : Distribution de l'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver (moyennes pluriannuelles et écart-type autour de ces moyennes). Les graphiques montrent que la distribution des résultats ne suit pas loi normale, ce qui justifie l'utilisation d'un tests non paramétrique (Test de Kruskal-Wallis) pour l'analyse des résultats. 36

Figure 10 : Azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver (APLSH) en fonction des types climatiques et de la typologie des produits organiques. Ces graphiques montrent que les différences entre les produits de type 0, Ia, Ib et II sont significatives pour les 5 zones climatiques retenues (p-value < 0,05). Pour chaque type de produit, l'amplitude de la distribution des valeurs d'APLSH ainsi que la médiane sont représentées. Les pointillées représentent la moyenne globale d'APLSH pour l'ensemble des produits 37

Figure 11 : Azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver en fonction des types climatiques et des dates d'apport 38

Liste des tableaux

Tableau 1 : Principaux plafonds d'apport d'azote exprimés en azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver introduit dans le 7ème PAN 17

Tableau 2 : Autres plafonds d'apport d'azote exprimés en azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver introduit dans le 7ème PAN 18

Tableau 3 : Récapitulatif du plan de simulation 22

Tableau 4 : Plages de valeur des variables d'intérêt pour la classification des produits organiques 28

Tableau 5 : Types climatiques utilisés pour le regroupement des résultats..... 29

Tableau 6 : Listes des régions, coordonnées géographiques des stations météorologiques et types de sols associés. Couples « site-sol ». Département où se situe la station météorologique. 34

Tableau 12 : Dénominations, types, et propriétés physico-chimiques des produits organiques utilisés dans le plan de simulation..... 39

Tableau 7 : Zone climatique « Montagne ». Selon les caractéristiques du produit (C/N et N_minéral/N_total) et par date d'apport, pourcentages moyens de l'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver, par rapport à l'azote total apporté..... 40

Tableau 8 : Zone climatique « semi-continental ». Selon les caractéristiques du produit (C/N et N_minéral/N_total) et par date d'apport, pourcentages moyens de l'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver, par rapport à l'azote total apporté..... 41

Tableau 9 : Zone climatique « océanique dégradé des plaines ». Selon les caractéristiques du produit (C/N et N_minéral/N_total) et par date d'apport, pourcentages moyens de l'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver, par rapport à l'azote total apporté. 42

Tableau 10 : Zone climatique « océanique altéré ». Selon les caractéristiques du produit (C/N et N_minéral/N_total) et par date d'apport, pourcentages moyens de l'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver, par rapport à l'azote total apporté. 43

Tableau 11 : Zone climatique « bassin du Sud-Ouest ». Selon les caractéristiques du produit (C/N et N_minéral/N_total) et par date d'apport, pourcentages moyens de l'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver, par rapport à l'azote total apporté. 44

Tableau 13 : Zone climatique « Montagne ». Selon la dénomination du produit et par date d'apport, pourcentage moyen de l'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver. Chaque pourcentage est associé à un écart type (ET en %). 45

Tableau 14 : Zone climatique « semi-continental ». Selon la dénomination du produit et par date d'apport, pourcentage moyen de l'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver. Chaque pourcentage est associé à un écart type (ET en %). 46

Tableau 15 : Zone climatique « océanique dégradé des plaines ». Selon la dénomination du produit et par date d'apport, pourcentage moyen de l'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver. Chaque pourcentage est associé à un écart type (ET en %). 47

Tableau 16 : : Zone climatique « océanique altéré ». Selon la dénomination du produit et par date d'apport, pourcentage moyen de l'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver. Chaque pourcentage est associé à un écart type (ET en %). 48

Tableau 17 : Zone climatique « bassin du Sud-Ouest ». Selon la dénomination du produit et par date d'apport, pourcentage moyen de l'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver. Chaque pourcentage est associé à un écart type (ET en %). 49

Liste des abréviations

APLSH : Azote Potentiellement Libéré jusqu'en Sortie d'Hiver

CI : Couvert Intermédiaire

CIE : Couvert Intermédiaire Exporté

CINE : Couvert Intermédiaire Non Exporté

MO : Matière Organique

N : Azote

NPLSH : Azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver

PAN : Programme d'actions national nitrates

PRO : Produit Résiduaire Organique

PAR : Programmes d'actions régionaux

1 Introduction

Dans le cadre de l'application de la directive 91/676/CEE dite « Directive Nitrates », dont l'objectif est la lutte contre la pollution diffuse par les nitrates d'origine agricole et l'eutrophisation, la France a identifié des zones vulnérables aux nitrates, faisant l'objet de programmes d'actions « nitrates » depuis 1996. Les programmes d'actions nitrates définissent les actions à mettre en place par tout exploitant agricole dont une partie au moins des terres ou un bâtiment d'élevage est situé en zone vulnérable. Ils sont articulés en deux niveaux : un programme d'actions national (dit PAN), et des programmes d'actions régionaux (dits PAR).

Les programmes d'actions définissent plusieurs mesures permettant de limiter les fuites de nitrates à l'échelle de l'exploitation agricole. On peut notamment citer la mesure « 1 » concernant l'interdiction d'épandage des fertilisants pendant les périodes à risque pour la qualité de l'eau, et la mesure « 3 », sur la limitation de l'épandage des fertilisants azotés fondée sur un équilibre, pour chaque parcelle, entre les besoins prévisibles en azote des cultures et les apports en azote de toute nature.

Le PAN est réexaminé et, le cas échéant, révisé tous les quatre ans au moins. En 2020, le réexamen du 6ème PAN a été initié. Sur la base de divers travaux et phases de concertations, un projet de 7ème PAN a été élaboré, introduisant un certain nombre d'évolutions réglementaires. L'encadrement des apports de fertilisants sur les couverts d'interculture et sur les prairies a notamment évolué. Ces évolutions interviennent à la suite de la réalisation d'une étude en 2020 par l'ACTA sur l'actualisation des connaissances permettant d'objectiver les variabilités des périodes recommandées pour l'épandage des fertilisants azotés en France.

Parallèlement à ces évolutions, l'introduction dans le 7ème PAN de la notion d'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver nécessite le développement d'une méthode de calcul et la production de références nationales. Ceci, afin de permettre aux agriculteurs et prescripteurs de raisonner leurs apports dans le respect des nouvelles obligations réglementaires.

Les principaux objectifs de ce travail consistent donc à i) préciser la notion d'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver par rapport à d'autres notions existantes, ii) produire des références nationales d'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver (en pourcentage par rapport à la teneur en azote total), iii) fournir aux régions les éléments nécessaires à la mise en œuvre de la règlementation, et à terme iv) proposer aux prescripteurs et aux professionnels l'appui nécessaire pour une utilisation optimale des ressources produites.

Ce rapport détaillera les objectifs de l'étude ainsi que la méthode mise en œuvre. Il présentera ensuite les résultats en précisant leurs domaines de validité, ainsi que les recommandations d'usage des références produites.

2 Contexte et définitions

2.1 Principe de raisonnement des apports d'azote issu de fertilisants organiques

Paramètres influençant la valeur fertilisante des PRO

La valeur fertilisante azotée potentielle des PRO[1] dépend de la proportion des formes minérales et organiques de l'azote, de la stabilité des formes organiques par rapport au processus de minéralisation. Les formes minérales peuvent être assimilées directement par la plante, alors que l'azote sous forme organique doit d'abord être minéralisé par l'action des microorganismes présents dans le sol. La part de la forme organique de l'azote est très variable selon le produit : environ 25 % pour des lisiers de porcs ou des digestats liquide ; plus de 80 % pour les fumiers et composts de fumiers de bovins, les composts urbains, etc. (COMIFER - brochure azote, 2013). La quantité et la vitesse de minéralisation de l'azote issu de la décomposition des molécules organiques dépendent de plusieurs facteurs, dont les caractéristiques des produits organiques (rapport C/N, pH, etc.), les conditions d'humidité et de température du sol, ainsi que les propriétés de ce dernier. Les propriétés du sol impliquées dans la vitesse de minéralisation sont essentiellement le pH, les taux de carbonate, la quantité totale d'azote organique, le rapport entre le carbone et l'azote total, ainsi que la teneur en argile

Afin de quantifier le processus de minéralisation en fonction des conditions météorologiques locales, l'utilisation d'un modèle permet de combiner l'état journalier d'humidité du sol et la température de l'air pour estimer les Jours Normalisés (JN), une variable quantifiant l'échelle de temps où les conditions sont optimales pour le développement des microorganismes décomposant les molécules organiques.

Par conséquent, en fonction des caractéristiques du produit organique, du type de sol, du climat et des conditions météorologiques, l'azote organique des fertilisants sera mis à disposition des plantes selon des dynamiques différentes, spécifiques à la combinaison des facteurs et conditions du milieu. La prise en compte de ces facteurs dans le raisonnement de la fertilisation azotée passe par l'utilisation d'équations décrivant les cinétiques de minéralisation de l'azote contenu dans la matière organique en fonction des Jours Normalisés estimés.

Définition et utilisation du "Coefficient d'équivalence engrais minéral"

L'estimation des Jours Normalisés, combinée avec les caractéristiques du sol, est une équation complexe à résoudre, nécessitant des informations précises sur la météorologie et les propriétés du sol. Ainsi, pour des raisons opérationnelles, la méthode du bilan prévisionnel pour le raisonnement des apports d'azote comptabilise l'effet direct des engrais organiques en équivalence avec les engrais minéraux, en additionnant la quantité d'azote minéral contenue dans le produit organique, et la quantité d'azote organique qui sera minéralisée au cours de la période concernée par le bilan. Pour exprimer la contribution des PRO aux fournitures d'**azote minéral absorbé pendant la période de croissance de la culture**, on multiplie la quantité d'azote total apporté par le PRO par un « coefficient d'équivalence engrais

[1] Produit Résiduaires Organiques

minéral azoté », le KeqN. Celui-ci est quantifié grâce à de nombreux essais au champ, comparant les engrais minéraux de référence (généralement de l'ammonitrate), avec les produits organiques. En moyenne, le KeqN varie de 0 à 20 % pour les composts, les fumiers et certaines boues ; environ 50 % pour les lisiers de porcs et digestats solides ; 60 à 80 % pour les effluents de volailles (COMIFER, brochure azote, édition 2013). On distingue deux types de KeqN : les KeqN « cycle », sur la totalité de la période entre l'apport du PRO et la fin d'absorption de la culture, et le KeqN « bilan », estimé sur la période du bilan (entre l'ouverture du bilan, en sortie d'hiver, et la récolte).

Définitions réglementaire et opérationnelle de l'azote efficace et lien avec le KeqN

Selon la définition réglementaire, l'azote efficace[2] est la fraction minérale et organique minéralisable pendant la présence d'un couvert, ou pendant la durée d'ouverture du bilan.

Selon les opérateurs de terrain, l'azote efficace est l'azote minéral absorbé par la culture en place (au sens de l'azote valorisé dans le cadre d'un bilan COMIFER). Pour un fertilisant organique, l'azote efficace est donc égal à la quantité d'azote total apportée, multipliée par son coefficient d'équivalence d'engrais minéral (KeqN).

La différence repose entre la notion « d'azote absorbé » pour les KeqN et la notion « d'azote minéralisé » dans la définition réglementaire de l'azote efficace.

Dans la notion réglementaire, l'azote efficace dépend des interactions PRO/Sol/climat (c'est une notion d' "offre"), alors que les usages courants la définissent par rapport aux prélèvements des cultures (une notion de "demande").

Néanmoins, l'estimation des fournitures d'azote par les PRO selon l'équation du bilan prévisionnel du COMIFER ne prête pas à ces confusions. En effet, la méthode du bilan préconise d'utiliser soit les termes Mpro1, Mpro2 et Xpro, soit le terme d'effet direct Xa. En pratique, l'utilisation du terme Xa est la plus répandue. L'utilisation des termes Mpro1, Mpro2 et Xpro est plus courantes dans les logiciels de calculs qui permettent de réaliser un bilan dynamique. (COMIFER - brochure azote, 2013). L'approche par les KeqN pour estimer l'azote efficace semble donc inadaptée d'un point de vue règlementaire.

[2]La somme de l'azote présent dans un fertilisant azoté sous forme minérale et sous forme organique minéralisable pendant le temps de présence de la culture en place ou de la culture implantée à la suite de l'apport, ou le cas échéant pendant la durée d'ouverture du bilan.

Nécessité de faire évoluer l'estimation des fournitures d'azote des produits organiques

Afin d'estimer l'azote efficace, les opérateurs se sont basés sur les KeqN pour pallier le manque de références. Cependant, il n'existe pas de KeqN pour les apports de PRO réalisés sur les couverts végétaux d'interculture. Des valeurs ont néanmoins été approchées pour combler le manque de références qui aurait sinon bloqué la mise en œuvre de la Directive Nitrates. Ces approches se sont appuyées sur la différence entre KeqN cycle et KeqN bilan (ou KeqN d'apport d'automne ou de printemps). Ces éléments ont ensuite été extrapolés aux autres situations.

Néanmoins, les références de KeqN disponibles actuellement ne permettent de prendre en compte ni l'absorption par un couvert d'interculture, ni la minéralisation des PRO apportés l'été, après la récolte de la culture précédente. **Ainsi, afin de prendre en compte de manière exhaustive l'effet des apports organiques tout au long de l'année, en particulier l'azote minéralisé durant la période été-automne-hiver, la notion d'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver a été introduite dans la réglementation.** Cette notion permet de quantifier l'azote libéré par les fertilisants, à la suite d'un apport réalisé entre la récolte du précédent (en juillet) et la sortie d'hiver (c'est-à-dire la période règlementaire de reprise des épandages). L'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver ne se substitue pas à la notion règlementaire d'azote efficace mais permet de prévenir les risques de surfertilisation et de lixiviation en limitant les épandages de PRO entre l'été et l'automne.

Alors que sur un sol nu, l'eau entraîne sans difficulté les nitrates par lixiviation, un couvert végétal est susceptible d'absorber les nitrates. En période automne-hiver et en présence d'un couvert, l'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver peut donc s'assimiler à de l'azote efficace selon les conditions du milieu (Figure 1).

L'élaboration du 7ème PAN a permis de mieux expliciter les différents indicateurs réglementaires utilisés par les opérateurs de terrain pour raisonner les apports d'azote à la parcelle, et lever certaines contradictions.

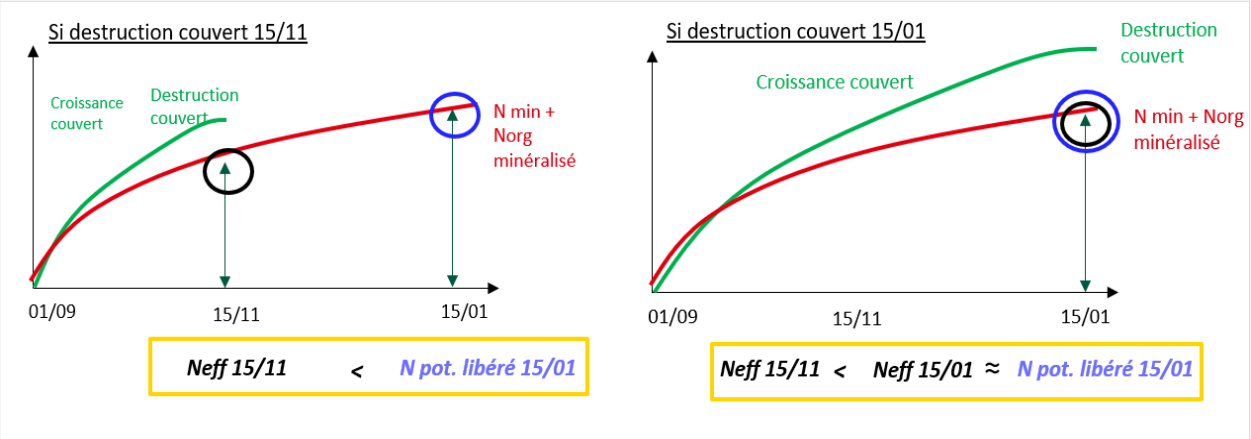


Figure 1 : Représentation schématique de la variation de l'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver en comparaison de l'azote efficace. La courbe en vert simule la croissance d'un couvert et la courbe en rouge simule l'azote minéral libéré par un produit organique entre sa date d'apport (01/09) et la sortie d'hiver (15/01). Source : APCA/MASA, Novembre 2021.

Dans l'exemple ci-dessus (Figure 1), un fertilisant organique a été apporté à l'implantation d'un couvert (01/09). Si le couvert est détruit le 15/11, la quantité d'azote libérée par le produit organique et absorbé par le couvert (azote efficace) au moment de sa destruction est inférieure à la quantité d'azote libérée par le produit organique jusqu'au 15/01. Si le couvert reste en place jusqu'au 15/01, du fait de sa croissance, il absorbe plus d'azote. La quantité d'azote libérée par le produit organique jusqu'au 15/01 et la quantité d'azote absorbée par le couvert (azote efficace) au 15/01 sont donc sensiblement égales s'il n'y a pas de lixiviation.

2.2 Définition de l'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver

Les épandages d'azote postérieurs au 1er juillet peuvent être justifiés par la nécessité de fertiliser les cultures d'été (maïs, tournesol, CIVE, etc.), les prairies, ou encore les cultures d'hiver. Néanmoins, selon les fertilisants organiques, dans certains cas, le volume d'azote rapidement disponible est élevé et dépasse les besoins de fertilisation entre l'été et l'hiver.

L'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver permet d'évaluer le supplément d'azote minéral dans le sol, à la suite d'un épandage de produit organique réalisé entre l'été et l'automne. Il s'agit, pour un produit organique, de l'azote minéral contenu dans le produit au moment de l'apport et de l'azote minéral rendu disponible grâce à la minéralisation à partir de la date d'apport (après le 1er juillet) et jusqu'en sortie d'hiver (Figure 2). Contrairement à l'azote efficace qui, dans le cas des KeqN, est estimé en prenant en compte l'azote issu du produit organique et absorbé par la culture, l'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver estime l'azote minéral présent dans le sol, dont la teneur varie en fonction de la nature du fertilisant organique et sa date d'apport. Comme tous les autres postes de minéralisation décrits dans la méthode du bilan (Mh, Mr, MrCi, ect.), cette notion permet d'estimer à la fois l'azote minéral qui est susceptible d'être absorbé par la culture, mais également l'azote minéralisé susceptible d'être lixivié jusqu'en sortie d'hiver s'il n'est pas valorisé par un couvert végétal. Dans sa définition, la quantité de l'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver par un PRO est indépendante de la couverture du sol et varie *a priori* en fonction de :

- la nature du fertilisant organique (composition, cinétique de minéralisation),
- les conditions pédoclimatiques, qui impactent le nombre de Jours Normalisés,
- la dose et la date d'apport du fertilisant.

Le raisonnement des apports de PRO avec la notion d'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver devrait permettre de mieux maitriser les pertes pendant la saison automnale et hivernale.

La présente étude permet d'estimer l'azote potentiellement libéré en sortie d'hiver par les produits organiques apportés entre le 1er juillet et le 15 novembre (Figure 2). La sortie d'hiver est fixée au 15 janvier, date à laquelle entrent en vigueur une majorité des reprises d'épandage pour les cultures principales, les couverts d'interculture et les prairies (cf. PAN 7).

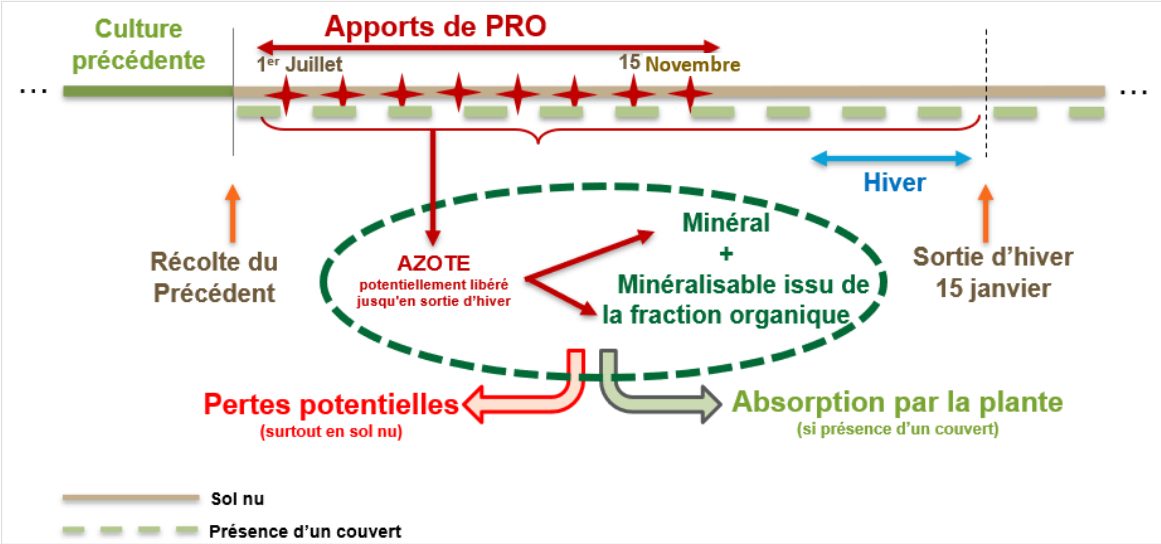


Figure 2 : Représentation schématique de la notion d'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver suite à un apport de produit organique après la récolte du précédent cultural et jusqu'en sortie d'hiver. L'azote ainsi libéré par les produits organiques peut être absorbé par la culture en place si le sol est couvert, ou bien potentiellement « perdu » dans l'air, l'eau, ou le sol. La sortie d'hiver est fixée au 15 janvier.

3 Épandage des fertilisants azotés en zone vulnérable : ce que dit la réglementation « nitrates »

3.1 Mesures encadrant l'épandage de fertilisants azotés

En synthèse : en zone vulnérable « nitrates », l'usage des fertilisants azotés est encadré par différentes mesures, dont des plafonnements d'apports dans certaines situations à risque.

Le programme d'actions national français, applicable en zone vulnérable, contient huit mesures et cinq d'entre elles encadrent l'utilisation des fertilisants azotés dans les programmes d'actions « nitrates ». Ces cinq mesures sont :

- La mesure 1 : Périodes d'interdiction d'épandage des fertilisants azotés
- La mesure 3 : Limitation de l'épandage des fertilisants azotés afin de garantir l'équilibre de la fertilisation azotée
- La mesure 4 : Modalités d'établissement du plan de fumure et du cahier d'enregistrement des pratiques
- La mesure 5 : Limitation de la quantité d'azote contenue dans les effluents d'élevage pouvant être épandue annuellement par chaque exploitation
- La mesure 6 : Conditions d'épandage

Le présent travail s'inscrit dans la mise en œuvre de la notion d'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver, **abordé dans la mesure 1° du projet de 7ème PAN.**

Rappel : architecture des textes réglementaires « nitrates »

Les programmes d'actions de la réglementation « nitrates », se déclinent aux niveaux national et régional, et prennent la forme de plusieurs textes réglementaires :

Niveau national	Niveau régional
Arrêté « PAN » : Arrêté du 19 décembre 2011 relatif au programme d'actions national à mettre en œuvre dans les zones vulnérables afin de réduire la pollution des eaux par les nitrates d'origine agricole	Arrêtés « PAR » : définissent les programmes d'actions régionaux pris par chaque Préfet de région
	Arrêtés référentiels régionaux de mise en œuvre de l'équilibre de la fertilisation azotée (dits « arrêtés GREN »)

Les dispositions prévues par le projet de 7ème PAN concernant les plafonds en azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver devront être reprises voire renforcées dans les programmes d'actions régionaux, et déclinées de façon opérationnelle dans les arrêtés référentiels régionaux (dits « arrêtés GREN »).

Extrait du projet de PAN 7 : le référentiel régional « fixe les modalités de calcul de l'azote efficace et de l'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver pour les principaux fertilisants azotés organiques, éventuellement adaptées en fonction des conditions pédoclimatiques locales. »

3.2 Typologie des fertilisants azotés dans la réglementation nitrates

En synthèse : La réglementation nitrates s'applique à une typologie de fertilisants permettant de distinguer le potentiel de libération d'azote minéral associé à un fertilisant. Cet azote libéré dépend à la fois de la quantité d'azote minéral présente initialement dans le PRO et de la dynamique de minéralisation du produit.

Les évolutions de la mesure 1 dans le projet de 7ème PAN entrainent la rénovation de la typologie des fertilisants azotés, avec une classe pour les fertilisants minéraux et quatre classes pour les fertilisants organiques.

Les fertilisants de **types III** sont les fertilisants azotés minéraux et uréiques de synthèse, les types 0, I.a et I.b et II sont les fertilisants organiques :

- Type 0 : produits organiques caractérisés par une organisation nette à moyen terme de l'azote
- Type I.a : produits organiques à minéralisation d'azote très lente et contenant une faible quantité d'azote minéral
- Type I.b : produits organiques à minéralisation d'azote lente et contenant une quantité limitée d'azote minéral
- Type II : produits organiques à minéralisation d'azote rapide ou contenant une quantité importante d'azote minéral

Les fertilisants organiques peuvent être directement attribués à un type *via* une liste positive, ou bien s'ils n'apparaissent pas dans cette liste, être classés selon leurs caractéristiques : rapports C/N, indice de stabilité de la matière organique (ISMO) et fraction d'azote minéral dans la quantité totale d'azote (Nmin/Ntot). Ces paramètres (C/N, de Nmin/Ntot et d'ISMO) utilisés pour le classement sont déterminés sur la base d'une analyse directe du fertilisant ou de l'analyse de fertilisants produits dans les mêmes conditions.

3.3 Focus sur les « plafonds-périodes » d'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver dans le projet de 7ème PAN

La définition de l'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver retenue dans le projet de 7ème PAN est la suivante : « somme de l'azote présent dans un fertilisant azoté sous forme minérale et sous forme organique minéralisable jusqu'à la sortie de l'hiver »

En synthèse :

Les plafonds retenus exprimés en azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver

- concernent certains apports sur couverts d'interculture et prairies,
- concernent certains types de fertilisants,
- sont établis aux valeurs suivantes, dans le projet de 7ème PAN : 70 kg N/ha, 100 kg N/ha ou 20 kg N/ha, en fonction de la culture ou du type de fertilisants concernés.

Les plafonds introduits dans le projet de 7ème PAN, mentionnés dans la mesure 1, concernent les apports sur couverts d'interculture et sur prairies. Les tableaux ci-dessous présentent les différents plafonds.

Tableau 1 : Principaux plafonds d'apport d'azote exprimés en azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver introduit dans le 7ème PAN

Occupation du sol		Plafonnement des apports (sans préjudice du respect des périodes d'interdiction et du respect de la mesure III de la présente annexe)
CI d'interculture longue	CINE détruit ou CIE exportée l'année suivante (dont des cultures énergétiques)	Apports réalisés durant l'année de l'implantation du CI, et à compter de la récolte du précédent, plafonnés à 70 kg N potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver, en cumulant les apports de type 0, I.a, I.b, et II. Si le couvert est récolté suffisamment tard l'année suivante, permettant un apport de fertilisant de type III en sortie d'hiver, ce plafond d'apport inclut les apports de type III.
	CINE détruit avant la fin de l'année non suivi d'une culture implantée dans la même année	Apports réalisés à compter de la récolte du précédent, plafonnés à 70 kg N potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver, en cumulant les apports de type 0, I.a, et I.b, et II.
	CIE exportée avant la fin de l'année (notamment des cultures énergétiques d'été) non suivie d'une culture implantée dans la même année	Apports réalisés à compter de la récolte du précédent, plafonnés à 70 kg N potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver, en cumulant les apports de type 0, I.a, et I.b, II et III.
CI d'interculture courte	CINE détruit avant la fin de l'année suivi d'une culture implantée dans la même année	Apports à compter de la récolte du précédent, plafonnés à 70 kg N potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver, en cumulant les apports de type 0, I.a, I.b, et II.
	CIE exportée avant la fin de l'année (notamment des cultures énergétiques d'été) suivie d'une culture implantée dans la même année	Apports à compter de la récolte du précédent, plafonnés à 70 kg N potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver, en cumulant les apports de type 0, I.a, et I.b.
Prairies implantées depuis plus de six mois dont prairies permanentes, luzerne		Pour les prairies permanentes, apports à compter du 1er septembre limité à 70 kg N potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver par hectare en cumulant les apports de type 0, I, II et III.

Tableau 2 : Autres plafonds d'apport d'azote exprimés en azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver introduit dans le 7ème PAN

Occupation du sol	Fertilisants concernés	Plafond
Certains cas particuliers sur couverts en période d'interdiction d'épandage hivernale	Type 0, type I.a et effluents peu chargés	100 kg d'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver par hectare
Certains cas particuliers sur couverts en période d'interdiction d'épandage hivernale	Fertilisants issus d'agro-industries, qui n'entrent pas dans la définition des types 0, I.a ou effluents peu chargés,	70 kg d'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver par hectare
Sur prairie en période d'interdiction hivernale	Effluents peu chargés	20 kg d'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver par hectare
Sur couverts, après le 15 octobre et jusqu'au 15 novembre, dans certains cas	Effluents peu chargés issus d'élevages	20 kg d'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver par hectare
Sur couverts, après le 15 octobre et jusqu'à 20 jours avant la récolte ou la destruction de la CI.	Effluents peu chargés issus d'élevages	20 kg d'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver par hectare.

4 Scénarisation et simulations

La production de références sur l'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver s'est appuyée sur la modélisation. Un plan de simulation et un modèle de culture intégrant les cinétiques de minéralisation des produits organiques ont permis d'estimer les quantités d'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver par les PRO à défaut de pouvoir mettre en place un réseau d'essais. Cela, dans l'objectif de produire des références selon des critères relativement simples et opérationnels, afin de faciliter la mise en œuvre de la directive « nitrates ». Le modèle choisi est le modèle de culture CHN, développé par Arvalis. Le plan de simulation (plan d'expérimentation virtuel) est principalement basé sur le choix des fertilisants, les contextes pédoclimatiques et les dates d'apports. La priorisation des scénarios a pris en considération les limites du modèle CHN et de son paramétrage actuel, mais également les contraintes de temps imparti pour l'étude. Par ailleurs les scénarios ont été choisis d'après les études précédentes (ACTA-ARTELIA, 2012 et ACTA 2020) et d'après l'expertise d'Arvalis sur les pédoclimats représentatifs des zones de production en grande culture. **Les résultats se veulent donc représentatifs des principales classes de fertilisant organiques et des principaux pédoclimats.**

4.1 Méthode

4.1.1 Modèle de culture et fonctions de minéralisation des produits organiques

Le modèle CHN est un modèle de culture dynamique, à pas de temps journalier, dont l'objectif est de simuler la croissance et le développement de la plante, sur une parcelle et pendant un cycle de culture, du semis à la récolte (Soenen et al., 2019). Il s'agit d'un modèle de culture mécaniste, qui simule les flux de carbone, d'eau et d'azote (d'où le nomn CHN : C pour carbone ; H pour H_2O, et N pour azote) au sein du système de culture (figure 3). Ce modèle intègre le cycle de l'azote en fonction de l'origine des apports et prend en compte de manière relativement exhaustive les flux et les stocks d'azote. Les formalismes du modèle se basent sur les références du COMIFER, STICS, la bibliographie scientifique, ainsi que des travaux propres à Arvalis.

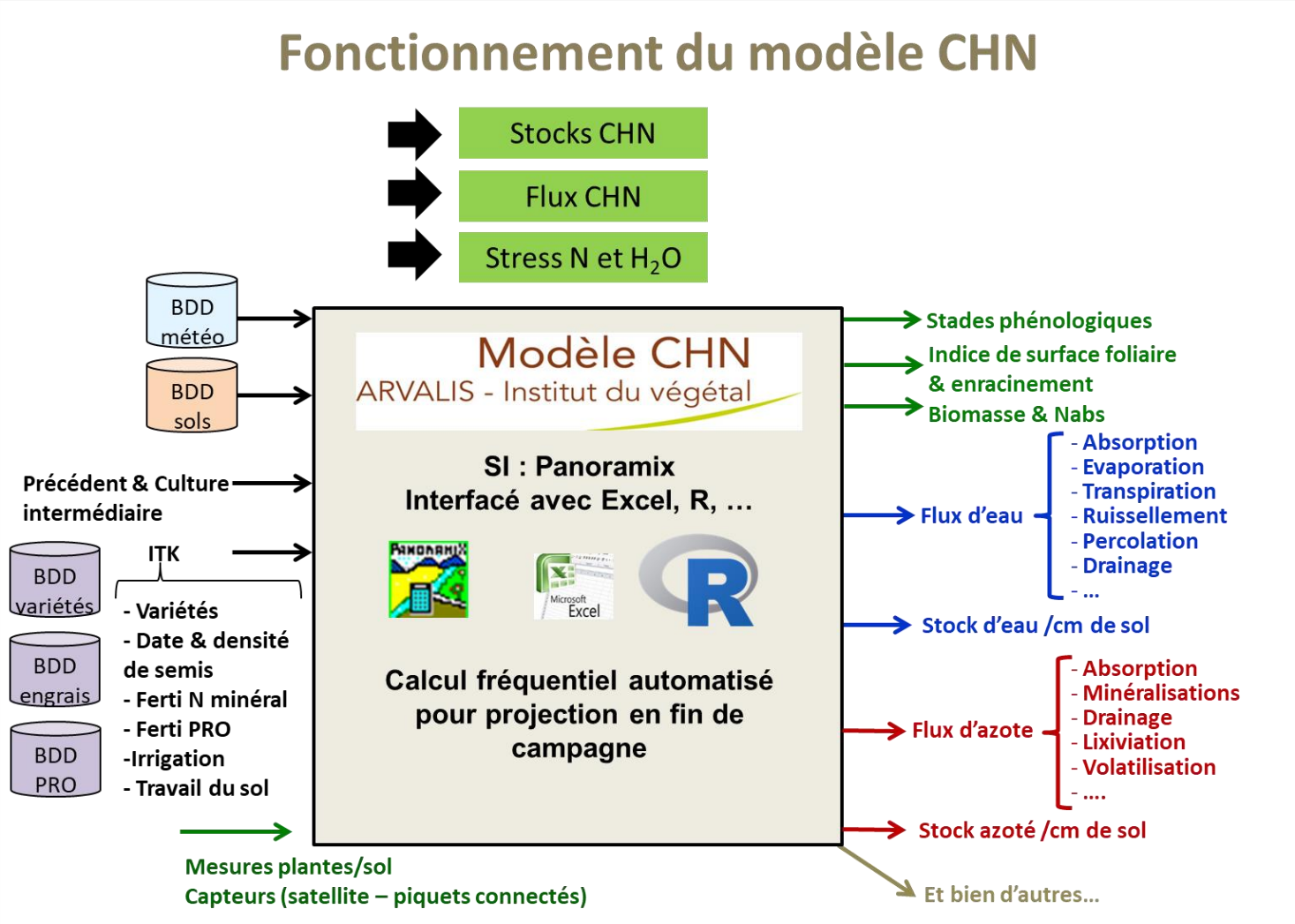


Figure 3 : Représentation schématique du fonctionnement du modèle CHN. Source : Arvalis.

4.1.2 Plan de simulation

Le plan de simulation a permis d'étudier différents scénarios construits à partir des combinaisons entre les variables suivantes : la fertilisation (type de produits et dates d'apport), les sols et les climats. Les bases de données utilisées pour établir le plan de simulation sont :

- Données des stations météorologiques en France métropolitaine (base de données Météo France et Arvalis) ;
- Types de sols métropolitains (base de données Arvalis) ;
- Caractéristiques des produits organiques (base de données et expertise de Arvalis, INRAe, expertises - LDAR, CA Pays-de-Loire, Yara).

Chaque **stratégie de fertilisation** a été identifiée par la combinaison entre le type de fertilisant et la date d'apport. Chaque **site** (lieu) de simulation a été défini grâce à la combinaison des variables « sols x stations météorologiques ». Le plan de simulation est donc constitué des combinaisons entre les stratégies et les sites, sur une période de 20 ans (2001-2021).

Les simulations ont été réalisées selon l'hypothèse d'un sol nu entre la récolte du précédent (après le 1er juillet) et la sortie d'hiver fixée au 15 janvier de l'année suivante. La sortie d'hiver est fixée au 15 janvier, date qui correspond à la majorité des reprises d'épandage pour les cultures principales, les couverts d'interculture et les prairies.
Les résultats de cette simulation sont extrapolables à tous types de couverts car, dans sa définition, la quantité de l'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver par un PRO est indépendante de la couverture du sol (cf. Chap. 3.2).

Le modèle CHN ne simule pas d'impacts directs de la culture sur le processus de minéralisation des produits organiques, et donc sur la quantité d'azote minéralisé. Le principal impact serait lié au cumul de Jours Normalisés (JN), dépendant de la quantité d'eau dans le profil, potentiellement modifiée par l'absorption de la culture. Cependant, sur la période considérée, des tests de modélisation préalables ont permis de vérifier que ce changement d'humidité du sol peut être considéré comme négligeable.

Les variables du plan de simulation sont récapitulées dans le Tableau 3. La mise en œuvre a nécessité l'usage du logiciel R[3] et du modèle CHN d'Arvalis[4].

[3] R version 4.1.2 (2021-11-01) Bird Hippie

[4] Branche version : 42 -gdf39c8e4 ; Date version Agrobox : 03/06/2022 ; Version DLL : 02.65.04

Tableau 3 : Récapitulatif du plan de simulation

Catégorie	Nombre	Commentaire
Type de fertilisants organiques	18	
Dates d'apport	10	Tous les 15 jours entre le 1er juillet et le 15 novembre
Dose d'apport	1	100 kg N total/ha
Stratégies de fertilisation (produit * date)	180	
Nombre de stations météorologiques	21	
Nombre de types de sols simulés	3	Sols de profondeur superficielle, moyenne, profonde
Nombre de combinaisons « site-sol »	63	
Occupation du sol	1	Sol nu
Total des cas types	11 340	

4.1.2.1 Les fertilisants organiques

La base de données mise en place recense les fertilisants organiques les plus courants, décrits par leurs caractéristiques physico-chimiques, avec des informations telles que :

- Type de produit (solide ou liquide),
- Teneur en azote total et en azote ammoniacal (N- NH4 représentant la quasi-totalité de l'azote minéral),
- Teneur en carbone total,
- Classe de minéralisation.

Les classes de minéralisation des PRO sont définies grâce à des mesures de minéralisation issues d'incubations en laboratoire ou de suivis au champ de plusieurs produits organiques, ensuite analysées avec des approches statistiques multifactorielles pour établir des équations entre la minéralisation de l'azote et du carbone, ainsi que les caractéristiques biochimiques des PRO.

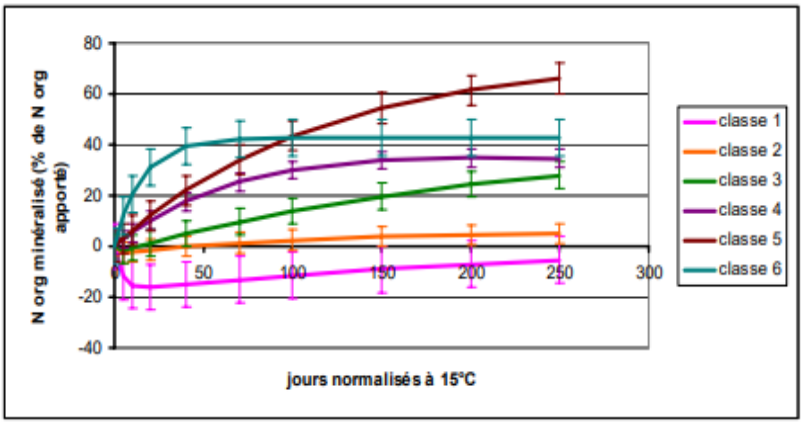


Figure 4 : Typologie en 6 classes sur la base de cinétiques mesurées au champ (Bouthier et al. 2009)

À la suite de cette approche, différentes publications (Lashermes et al. 2007 ; Bouthier et al. 2009 ; Lashermes et al. 2010) ont proposé une typologie en 6 classes (Figure 4). Chaque classe de minéralisation correspond à une fonction de minéralisation. L'équation de minéralisation (Équation 1) permet de distinguer la classe de minéralisation de chaque produit en fonction de ses caractéristiques.

Équation 1 : Formalisme de l'équation de minéralisation des produits organiques, permettant de les répartir en 6 classes de minéralisation, représentées dans le modèle CHN

Variables :

N_Tot : quantité d'azote total du PRO kgN/ha

N_NH_4 : quantité d'azote minéral sous forme ammoniacale (NH_4) du PRO

N_Org : N_Tot - N_NH_4 = quantité d'azote organique du PRO

JNNH_4 : Jours Normalisés pour la fraction minérale

JNOrg : Jours Normalisés pour la fraction organique

Taux de minéralisation du N-NH_4 d'un PRO :

TNH_4 = JNNH_4 / JNNH_4_max (maximum=3)

Taux de minéralisation de l'azote organique d'un PRO :

Avec un paramétrage de K1, Fmin et K2, Forg spécifique à chacune des classes de minéralisation des PRO
Fmin : fraction minéralisée et Forg : fraction organique

TOrg = (FMin * (1 - exp(K1 * JNOrg)) + FOrg * (1 - exp(K2 * JNOrg))) / 100

Quantité d'azote minérale disponible :

Résultat = (TNH_4 * N_NH4 + TOrg * N_Org) * Quantité du PRO apporté (tonne de produit brut / ha) * 1000

Les fertilisants choisis représentent les différents types de produits organiques mentionnés dans le 7ème PAN et listés ci-dessous :

- Type 0 : produits organiques caractérisés par une organisation nette à moyen terme de l'azote
- Type I.a : produits organiques à minéralisation d'azote très lente et contenant une faible quantité d'azote minéral,
- Type I.b : produits organiques à minéralisation d'azote lente et contenant une quantité limitée d'azote minéral,
- Type II : Produits organiques à minéralisation d'azote rapide ou contenant une quantité importante d'azote minéral.

Dix-huit fertilisants organiques ont été choisis selon deux groupes de critères de représentativité : i) la typologie du 7ème PAN et ii) la classification des cinétiques de minéralisation. Plusieurs étapes ont permis de vérifier et valider cette liste de 18 PRO. La sélection a d'abord été effectuée selon la liste positive proposée dans le 7ème PAN lorsque la dénomination des produits de la base de données correspondait à celle du PAN. Ensuite, du fait de l'ambigüité liée aux variations de noms et de critères physico-chimiques, une grande partie des produits a été sélectionnée selon la « règle de classification des autres fertilisants » (7ème PAN, page 5), c'est-à-dire en se basant sur les rapports C/N et le rapport entre l'azote minéral et l'azote total (Figure 5). L'Indice de Stabilité de la Matière Organique (ISMO) n'a pas été pris en compte dans le choix des fertilisants, car cette information n'est pas disponible pour tous les fertilisants. De plus, ce critère n'est pas nécessaire dans la mise en œuvre du modèle CHN et il s'agit d'un indicateur principalement utilisé pour des amendements organiques (ACTA, 2020). La principale difficulté était liée au choix des produits du type 0, pour lequel les fertilisants ont été choisis uniquement en fonction du rapport C/N (C/N>20).

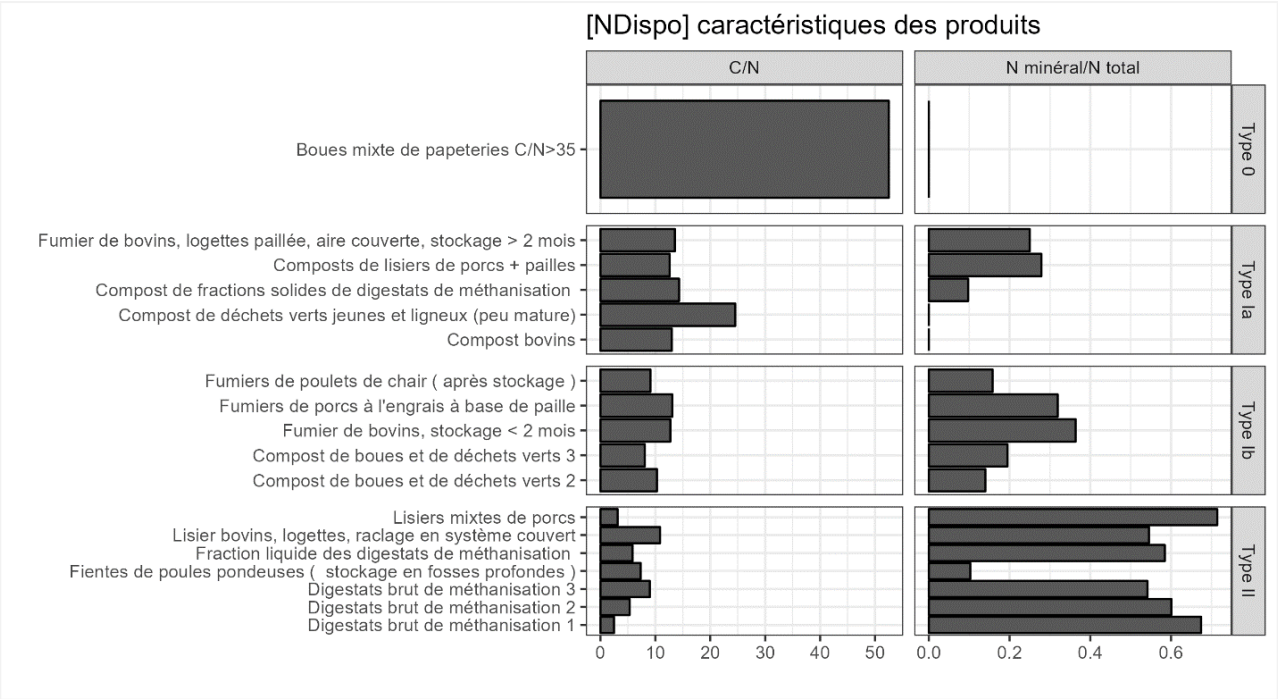
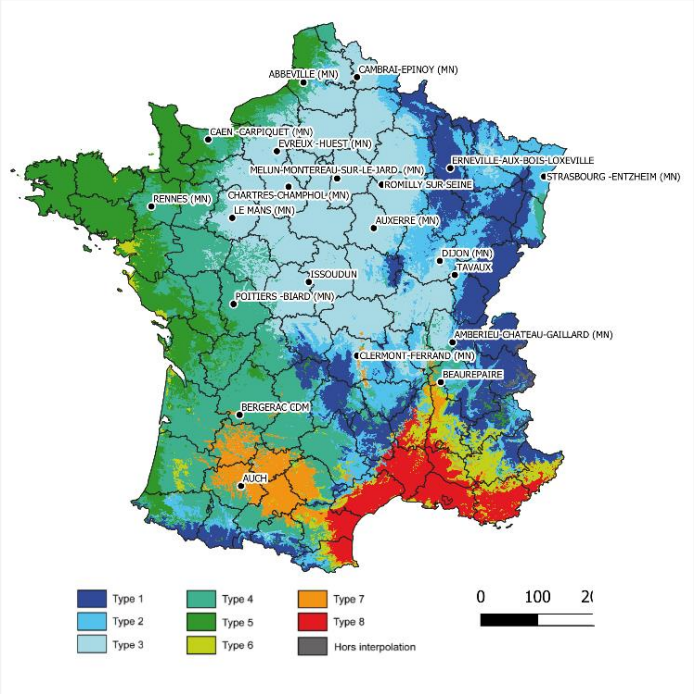


Figure 5 : Variations des teneurs en azote des fertilisants et pourcentage de la fraction minérale. Cf annexe 9.4 pour le détail des caractéristiques des fertilisants.

Afin de calculer la dose maximale d'azote totale à apporter pour ne pas dépasser le seuil règlementaire d'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver, la proportion entre la dose d'azote totale apportée et la quantité minérale et potentiellement minéralisable a été estimée. En effet, la quantité minéralisable est directement proportionnelle à la quantité totale apportée, à nombre égal de Jours Normalisés et pour une même date. Cette proportionnalité a été vérifiée avec des relations linéaires sur des résultats préliminaires aux résultats finaux de cette étude. Cela a permis de limiter les simulations à une seule dose d'azote total apporté (100 kg N total/ha) pour tous les fertilisants testés.

4.1.2.2 Les pédoclimats : les sols et les stations météorologiques

L'état journalier de l'humidité du sol et la température de l'air sont les variables nécessaires pour estimer les Jours Normalisés et quantifier l'échelle de temps où les conditions sont optimales pour le développement des microorganismes minéralisant les matières organiques. Les Jours Normalisés dépendent des conditions météorologiques (pluie, température, humidité), ainsi que des caractéristiques du sol impactant l'humidité de l'horizon minéralisant et les mouvements d'eau au sein du profil (texture, teneur en cailloux, densité, profondeur, etc.). Ces caractéristiques sont renseignées dans la base des données « sol » d'Arvalis qui associe à chaque sol une fiche décrivant ses caractéristiques.



Ainsi, le calcul des jours normalisés est possible si l'on dispose de données journalières de pluie et de température, de données sur les sols, et d'équations simulant la dynamique de l'eau dans le sol à l'échelle journalière. Les stations météorologiques ont été choisies de manière à représenter une bonne partie de la variabilité climatique des principaux bassins de production français sur une période de 20 ans (figure 6, Joly et *al.* 2010[5] ; les données sont disponibles gratuitement sur le site data.gouv.fr[6]).

Figure 6 : Répartition géographique des 21 stations météorologiques utilisées pour l'étude et représentation des variations climatiques à l'échelle de la France. "1" = "montagne","2" = "semi-continental", "3" = "océanique dégradé des plaines", "4" = "océanique altéré", ''5'' = '' océanique franc'', ''6'' = ''méditerranéen altéré'', «7" = "bassin du Sud-Ouest", "8" = "bassin méditerranéen".

Cette étude s'appuie sur un choix de trois sols dans chaque site (21 sites correspondant à la localisation des stations météorologiques). Dans chaque site ou localité, ces sols sont choisis en fonction de leur profondeur relative par rapport aux autres sols et leur positionnement géographique par rapport aux stations météorologiques. Ce choix s'est également basé sur d'autres études menées par Arvalis ainsi que sur la représentativité de ces sols en grandes cultures. Les combinaisons entre les sols et les stations donnent les couples nommés « lieu ».

4.1.3 Analyse des résultats de la simulation

L'analyse des résultats a permis d'identifier les variables influençant le plus la quantité d'azote potentiellement libéré à la sortie d'hiver et ainsi simplifier le rendu des résultats, en regroupant des situations n'ayant pas de différences significatives. Le traitement des données est structuré en deux étapes :

1. Construction d'une hiérarchie de toutes les variables, fondée sur leur importance vis-à-vis de la quantité d'azote potentiellement libéré à la sortie de l'hiver. Un tel indice d'importance fournit donc un classement

[5] https://journals.openedition.org/cybergeo/23155
[6] https://entrepot.recherche.data.gouv.fr/dataset.xhtml?persistentId=doi:10.15454/98BHVH

des variables, permettant de regrouper les simulations et de fournir des tableaux simples d'utilisation. L'algorithme d'analyse de données utilisé est celui d'apprentissage automatique avec les « forêts aléatoires [7] ».

2. Sur l'ensemble des variables sélectionnées à l'étape précédente, le test statistique non paramétrique de Kruskal-Wallis[8] permet d'identifier quels sont les regroupements ayant des différences significatives, et donc de pouvoir regrouper dans une classification plus simple les groupes n'ayant pas de différences significatives.

L'analyse des variables qui influencent le plus les résultats de la simulation ainsi que la comparaison des moyennes entre les différents groupements de variables ont permis d'obtenir les informations utiles à la synthèse de l'ensemble des résultats en « cas types » opérationnels.

[7] Fonction « randomForest » avec le package « randomForest » version 4.7-1.1. La variable « APLSH » a été transformée en logarithme. Le modèle comprend les variables suivantes : type de produit, date d'apport, type de climat, ancienne région administrative, type de sol, code de la base sol, classe de minéralisation, rapport C/N, rapport N minéral sur N total, teneur en N total, teneur en N ammoniacal. Le nombre d'arbres testés est 500.

[8] Fonction « kruskal_test » avec le package « rstatix » version 0.7.2.

4.2 Résultats et discussions

Les résultats des simulations ont principalement été analysés à partir des moyennes sur les 20 ans, du fait de la faible variabilité interannuelle. Cela s'explique par le faible nombre de jours normalisés sur la période considérée (du 01/07 au 15/11) et par conséquent la faible variation de la minéralisation autour de la moyenne.

4.2.1 Variables impactant l'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver

La première étape du traitement statistique des données a consisté à identifier les variables principales exerçant une influence sur les résultats. Cette identification a été possible en évaluant l'effet de chaque variable sur la précision du résultat final. Le pourcentage d'augmentation du risque d'erreur lié à l'exclusion de chaque variable du modèle de prédiction a été estimé (Figure 7). Ce pourcentage (%IncMSE) est calculé à partir de la différence entre l'Ecart-Type réel du modèle et un Ecart-Type aléatoire issu des calculs statistiques.

Le pourcentage négatif pour la variable « type de sol » montre que la variable aléatoire a mieux fonctionné, ce qui signifie que la variable « type de sol » (profondeur su sol) n'est probablement pas suffisamment prédictive, c'est-à-dire qu'elle n'a pas d'impact sur la précision des résultats finaux.

Les variables ayant le plus d'impact sur la teneur en azote potentiellement libérée jusqu'en sortie d'hiver sont : la date d'apport, le rapport entre l'azote minéral et l'azote total du fertilisant organique (Nmin.Ntot), la zone climatique (typclim) et la teneur en azote minéral du fertilisant (Ten_N_NH_4). La région (ancien découpage administratif) est directement liée à la station météorologique car les résultats sont moyennés par région et par type de sol, d'autant plus que dans l'étude, il peut y avoir une ou deux stations météorologiques dans une même région.

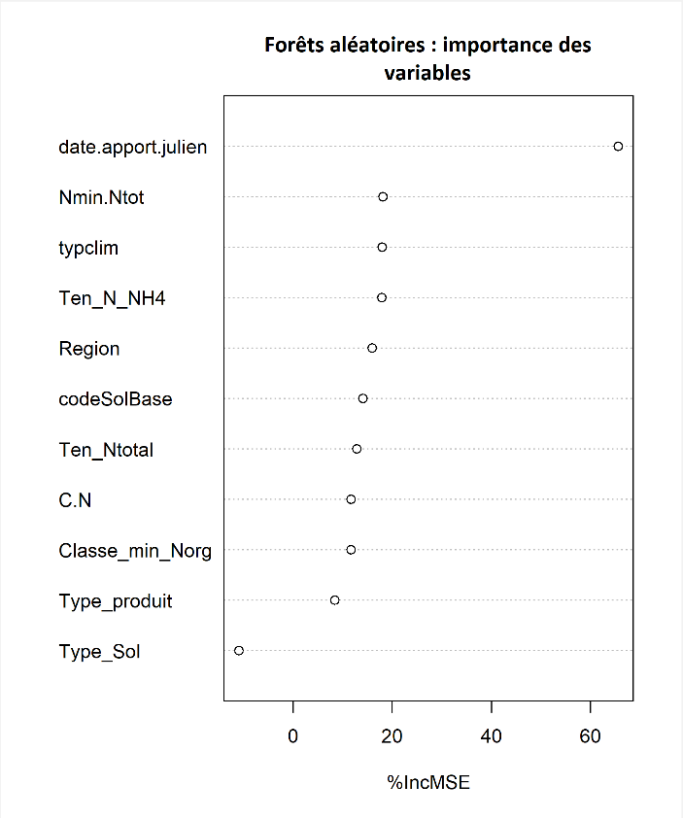


Figure 7: Importance des variables en fonction du risque d'erreur. Plus le pourcentage « %IncMSE » est important, plus la variable a un impact important sur les résultats.

Ce premier résultat permet de trouver un ensemble parcimonieux de variables importantes pour interpréter les résultats et éventuellement les utiliser comme variables de regroupement.

Dans un premier temps, les variables correspondant aux critères de classification des produits organiques dans le 7ème PAN (C/N et Nmin/Ntot) ont servi à créer des classes de regroupement (Tableau 4).
Ce regroupement a ensuite été utilisé dans un deuxième temps pour créer des classes d'appartenance des produits organiques en fonction de leur teneur en azote total et minéral.

Tableau 4 : Plages de valeur des variables d'intérêt pour la classification des produits organiques

Caractéristiques des PRO	**C/N**	**Nmin/Ntot**
Valeurs prises par chaque classe	**<=8**	**<=20**
	<=8	**>40**
	>8 ; <=10	**<=20**
	>8 ; <=10	**>40**
	>10 ; <=20	**<=20**
	>10 ; <=20	**>20 ; <=40**
	>10 ; <=20	**>40**
	>20	**<=20**

Dans un troisième temps, les résultats sont regroupés dans 5 types climatiques (Tableau 5). Ces types climatiques correspondent aux zones couvertes par les 21 stations météorologiques utilisées pour la simulation.

Tableau 5 : Types climatiques utilisés pour le regroupement des résultats

Type de climat	Nom
1	Montagne
2	Semi-continental
3	Océanique dégradé des plaines du centre et du nord
4	Océanique altéré
7	Bassin du Sud-Ouest

Ces analyses ont donc permis de proposer un regroupement des résultats en fonction de l'effet des variables (Figure 7) sur l'azote minéral libéré à la sortie d'hiver. Cette classification a permis de trouver un compromis entre complexité-précision et simplicité-opérationnalité.
En plus de ce premier regroupement, une seconde analyse statistique a permis de s'assurer que les différences entre les groupes identifiés (Tableau 4 et Tableau 5) sont significatives (voir ANNEXES 8.2 et 8.3).

Les regroupements finaux retenus permettent, pour chaque fertilisant ou classe de fertilisant, d'estimer la proportion d'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver par rapport à l'azote total apporté par le PRO, en fonction du type de climat, de la date d'apport et des trois critères de classification du produit organique (C/N, N total et N ammoniacal). Les résultats sont arrondis à 5% afin d'en faciliter l'usage opérationnel. Les références sont disponibles dans les tableaux en annexe.

La profondeur du sol (variable « Type Sol » sur la Figure 7) n'a pas d'impact significatif sur la précision des résultats de la simulation. De plus, les différences de résultats entre sols de profondeurs différentes ne sont pas significatives, quelle que soit la zone climatique (Figure 8). Cette variable n'a donc pas été prise en compte pour les regroupements.

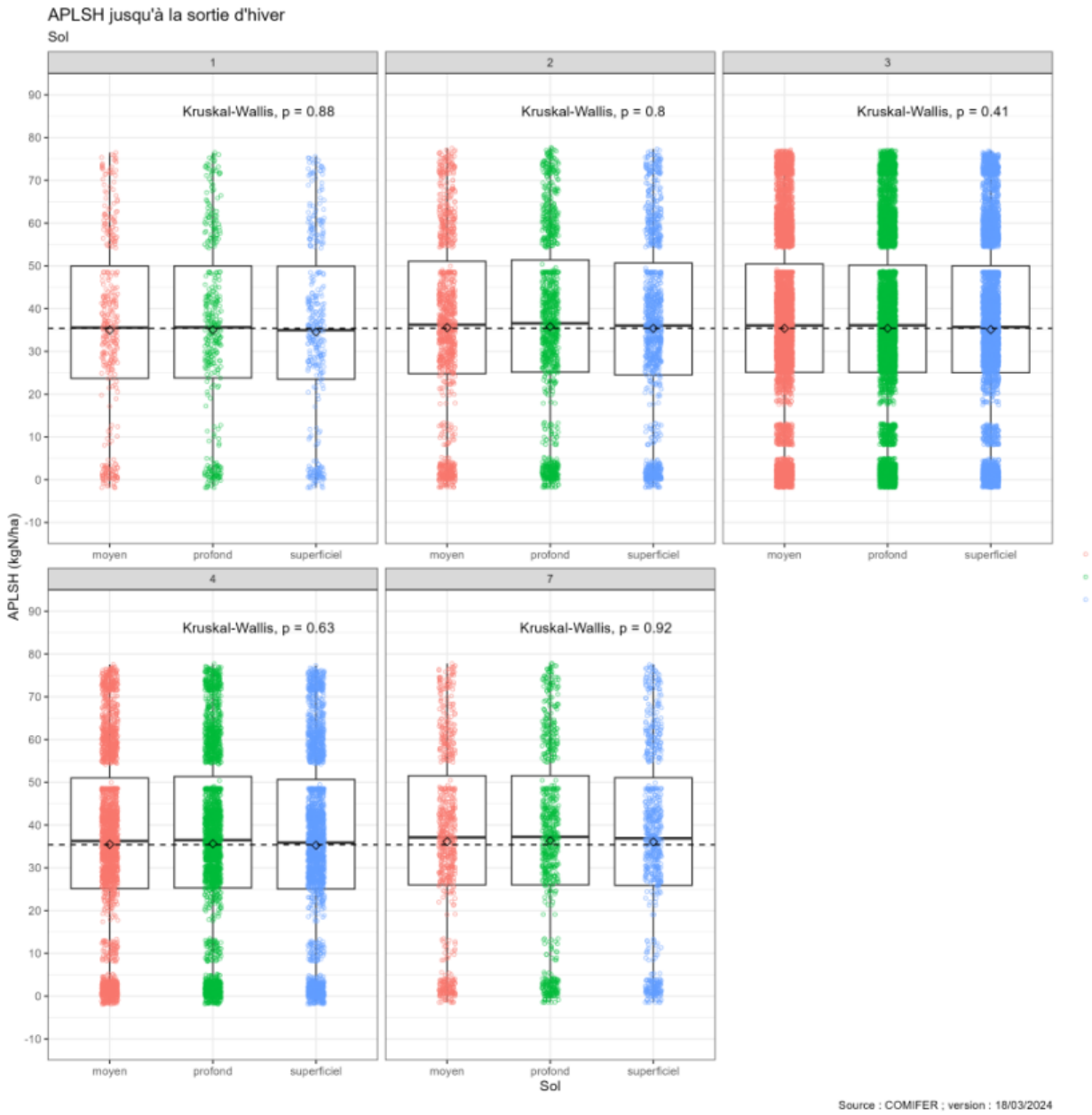


Figure 8 : Azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver en fonction des types climatiques et des classes de profondeur du sol. Test de significativité montrant que pour chacune des 5 zones climatiques, les différences entre les 3 profondeurs de sol ne sont pas significatives. Les pointillés représentent la moyenne générale de l'échantillon (33 kg d'APLSH par ha).

4.2.2 Estimation de la dose maximale d'azote à épandre

Chaque produit présente l'azote sous deux formes : l'azote minéral (% Nmin) et l'azote organique (%Norg), ces deux formes constituent l'azote total du produit. L'azote potentiellement libéré est la somme de l'azote minéral et de l'azote organique minéralisé. La quantité d'azote organique minéralisée varie en fonction des jours normalisés (JN) et de la cinétique de minéralisation du fertilisant organique.

Dans le modèle CHN, la fonction « minéralisation des produits organiques » ne fait pas la distinction entre l'azote minéral et l'azote organique. Par conséquent, la quantité d'azote minéralisé du produit organique est la somme de l'azote minéral et de l'azote organique minéralisé.

La quantité d'azote cumulé disponible (azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver) entre une date d'apport (t) et la sortie d'hiver correspond à la quantité d'azote totale apportée multiplié par la fraction minéralisée. Le seuil règlementaire est fixé à 70 kg N/ha qui correspond à la quantité maximale d'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver à ne pas dépasser. Par conséquent, pour une date (t), afin de ne pas franchir le seuil règlementaire de 70 kg N/ha, le calcul de la dose maximale d'azote « brut » à apporter se fait comme suit :

$$\textit{Dose maximale d'azote total à apporter } (kg\ N\ /ha) = \left(\frac{70\ x\ 100}{\%\ azote\ potentiellement\ libéré\ jusqu'ensortie\ d'hiver}\right)$$

Exemple :

- Fraction de l'azote totale qui va être potentiellement libéré sous forme minérale entre la date t et la sortie d'hiver = 50 % (la moitié de l'azote totale apporté est disponible sous forme minérale)
- Seuil à ne pas dépasser = 70 kgN/ha
- Résultat :
    - Quantité d'azote totale (minéral + organique) à ne pas dépasser à la date t
    - 70 * 100 / 50 = 140 kgN/ha

4.2.3 Cas d'un mélange de produits de types différents

Dans le cas où l'utilisateur épand des produits de types différents, il est recommandé de réaliser un cumul de la quantité d'azote potentiellement libérée par chaque produit en fonction de la période d'apport pour ne pas dépasser la limite règlementaire en sortie d'hiver.

Cela revient à évaluer pour chaque produit un pourcentage d'azote minéralisable avec l'aide des références produites dans cette étude, en tenant compte de la teneur en azote total du produit, sa date d'apport et le lieu où se situe la parcelle.

Autrement, s'il n'y a pas d'informations sur les proportions et les caractéristiques physico-chimiques du mélange de produits, alors il est recommandé de raisonner en fonction du produit dominant dans le mélange.

5 Limites et recommandations d'usage des références

Les références produites dans la présente étude sont indicatives et non exhaustives de la variabilité au sein d'une même typologie de produit, d'une même typologie de sol, de climat et au sein d'une région.

Ces références sont des moyennes sur 20 ans et elles ne permettent pas de prendre en compte des situations contextuelles liées à des conditions particulières ou à risque (minéralisation plus importante pendant une année particulière, produits fertilisants avec des teneurs en azote minéral élevé, sol particulièrement filtrant, etc.).

Pour des raisons opérationnelles, les résultats sont regroupés en grandes zones climatiques, puis en fonction de la date d'apport et des caractéristiques des PRO. Ainsi, il appartient à chaque région administrative d'identifier la zone climatique correspondant à son périmètre et d'utiliser les références adéquates.

Dans chaque zone climatique, les références dépendent des stations météorologiques utilisées et, par conséquent, des combinaisons « station x sol ». Selon le positionnement des sites choisis (Figure 6), certaines zones climatiques sont peu ou pas représentées. Pour les régions concernées par un découpage climatique peu représentatif, il est recommandé d'utiliser les références des zones climatiques voisines.

Certaines régions peuvent se situer à la limite entre deux (ou plusieurs) zones climatiques. Dans ces conditions, il est recommandé aux experts régionaux d'identifier le type climatique prédominant dans leur région, afin de proposer localement les références adaptées. Il est également possible de faire co-exister des références issues de plusieurs zones climatiques dans une même région administrative, si localement cela est jugé pertinent et facile à mettre en œuvre.

Les références s'échelonnent par quinzaines, entre le 01/07 et le 15/11. Dans le cas d'un apport réalisé à une date différente de celles mentionnées dans les tableaux de références, il est recommandé d'utiliser les références de la date précédent l'apport. Par exemple, pour un épandage réalisé le 28/07, il est recommandé d'utiliser les références du 15/07 ; pour un épandage réalisé le 11/08, il est recommandé d'utiliser les références du 01/08 ; etc.

6 Conclusion

La présente étude a permis de mettre en place une première approche pour estimer les quantités en azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver des produits organiques, conformément aux besoins règlementaires.

Les références produites permettent d'accompagner la mise en œuvre du 7ème PAN et la révision des PAR sur le moyen terme, et ainsi mieux prendre en compte les risques de fuites de nitrates dans l'eau.

Par ailleurs, après une première utilisation des références produites, les régions pourront évaluer si des références complémentaires et plus détaillées sont nécessaires. Des études complémentaires pourront alors être envisagées à plus long terme dans le cadre de l'accompagnement des travaux des Groupes Régionaux d'Expertise Nitrates (GREN).

7 Références bibliographiques

ACTA-ARTELIA. (2012). « Actualisation des connaissances permettant d'objectiver les variabilités des périodes recommandées pour l'épandage des fertilisants azotés en France. » Rapport 174 2277 / FBR. Ministères en charge de l'agriculture et de l'écologie MAAF et MEDDE.

ACTA (2020). « Actualisation des connaissances permettant d'objectiver les variabilités des périodes recommandées pour l'épandage des fertilisants azotés en France » Rapport final. Ministères en charge de l'Agriculture et de l'Ecologie MASA et MTE.

Arrêté du 11 octobre 2016 modifiant l'arrêté du 19 décembre 2011 relatif au programme d'actions national à mettre en œuvre dans les zones vulnérables afin de réduire la pollution des eaux par les nitrates d'origine agricole. s. d. Consulté le 7 septembre 2020.

Bouthier, A., Trochard, R., Parnaudeau, V. & Nicolardot, B. (2009). « Cinétique de minéralisation nette de l'azote organique des produits résiduaires organiques à court terme in situ et en conditions contrôlées ». *Comifer-Gemas, Blois, 6p*.

COMIFER (2013). Calcul de la fertilisation azotée. Guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales (cultures annuelles et prairies).

Joly, D., Brossard, T., Cardot, H., Cavailhes, J., Hilal, M., & Wavresky, P. (2010). Les types de climats en France, une construction spatiale. *Cybergeo: European Journal of Geography*.

Lashermes, G., Houot, S., Nicolardot, B., Parnaudeau, V., Mary, B., Morvan, T., ... & Guillotin, M. L. (2007). Apport de matières organiques exogènes en agriculture : indicateur de potentialité de stockage de carbone dans les sols et définition de classes de disponibilité d'azote. *Journée technique Retour au sol des produits résiduaires organiques*, *27*.

Lashermes, G., Nicolardot, B., Parnaudeau, V., Thuriès, L., Chaussod, R., Guillotin, M. L., ... & Houot, S. (2009). Indicator of potential residual carbon in soils after exogenous organic matter application. *European Journal of Soil Science*, *60*(2), 297-310.

Soenen, B., Bonnefoy, M., Delpech, C., Piquemal, B., Descazeaux, P., Degan, F., & Laurent, F. (2019). « Mise au point du pilotage intégral de l'azote avec le modèle de culture CHN : approche « CHN-conduite » ». Agronomie, Environnement & Société, juin 2019, volume 9, numéro 1.

8 ANNEXES

8.1 Coordonnées géographiques des stations météorologiques et types de sols associés

Tableau 6 : Listes des régions, coordonnées géographiques des stations météorologiques et types de sols associés. Couples « site-sol ». Département où se situe la station météorologique.

			Type climatique		Type de sol	
Région	**Dep**	**Nom Station météo**	**n**	**Nom**	**Type**	**Nom Arvalis**
Alsace	67	STRASBOURG -ENTZHEIM (MN)	4	Océanique altéré	Moyen	Sol argileux humifère calcaire profond hydromorphe sur cailloutis calcaire
Alsace	67	STRASBOURG -ENTZHEIM (MN)	4	Océanique altéré	Profond	Sol limono-argileux profond sur loess
Alsace	67	STRASBOURG -ENTZHEIM (MN)	4	Océanique altéré	Superficiel	Sol limono-argilo-sableux calcaire caillouteux superficiel sur alluvions
Aquitaine	24	BERGERAC CDM	7	Bassin du Sud-Ouest	Moyen	Sol limoneux hydromorphe sur argiles
Aquitaine	24	BERGERAC CDM	7	Bassin du Sud-Ouest	Profond	Sol argileux calcaire profond sur marne
Aquitaine	24	BERGERAC CDM	7	Bassin du Sud-Ouest	Superficiel	Sol limono-argileux à argileux calcaire peu caillouteux superficiel sur marne
Auvergne	3	CLERMONT-FERRAND (MN)	3	Océanique dégradé des plaines du Centre et du Nord	Moyen	Sol limono-argileux à argilo-limoneux calcaire sur calcaire marneux
Auvergne	3	CLERMONT-FERRAND (MN)	3	Océanique dégradé des plaines du Centre et du Nord	Profond	Sol argileux calcaire profond peu caillouteux sur marnes
Auvergne	3	CLERMONT-FERRAND (MN)	3	Océanique dégradé des plaines du Centre et du Nord	Superficiel	Sol limono-argileux à argilo-limoneux calcaire caillouteux superficiel sur calcaire marneux
Basse-Normandie	14	CAEN -CARPIQUET (MN)	4	Océanique altéré	Moyen	Sol limoneux profond sur limons
Basse-Normandie	14	CAEN -CARPIQUET (MN)	4	Océanique altéré	Profond	Sol limoneux profond hydromorphe
Basse-Normandie	14	CAEN -CARPIQUET (MN)	4	Océanique altéré	Superficiel	Sol limono-argileux peu caillouteux moyennement profond hydromorphe sur altérite de schiste
Bourgogne	21	DIJON (MN)	3	Océanique dégradé des plaines du Centre et du Nord	Moyen	Sol limono-argileux à argilo-limoneux calcaire caillouteux sur calcaire dur
Bourgogne	89	AUXERRE (MN)	3	Océanique dégradé des plaines du Centre et du Nord	Moyen	Sol limono-argileux à argilo-limoneux calcaire caillouteux sur calcaire dur
Bourgogne	21	DIJON (MN)	3	Océanique dégradé des plaines du Centre et du Nord	Profond	Sol limono-argileux profond sur calcaire dur
Bourgogne	89	AUXERRE (MN)	3	Océanique dégradé des plaines du Centre et du Nord	Profond	Sol limono-argileux profond sur calcaire dur
Bourgogne	21	DIJON (MN)	3	Océanique dégradé des plaines du Centre et du Nord	Superficiel	Sol limono-argileux à argilo-limoneux calcaire caillouteux superficiel sur calcaire dur non fissuré
Bourgogne	89	AUXERRE (MN)	3	Océanique dégradé des plaines du Centre et du Nord	Superficiel	Sol limono-argileux à argilo-limoneux calcaire caillouteux superficiel sur calcaire dur fissuré
Bretagne	35	RENNES (MN)	4	Océanique altéré	Moyen	Sol limoneux sur schiste tendre
Bretagne	35	RENNES (MN)	4	Océanique altéré	Profond	Sol limoneux profond sur limons
Bretagne	35	RENNES (MN)	4	Océanique altéré	Superficiel	Sol limono-sableux peu caillouteux sur micaschistes
Centre	28	CHARTRES-CHAMPHOL (MN)	3	Océanique dégradé des plaines du Centre et du Nord	Moyen	Sol limoneux profond hydromorphe sur argiles
Centre	36	ISSOUDUN	3	Océanique dégradé des plaines du Centre et du Nord	Moyen	Sol limono-argileux à argilo-limoneux calcaire caillouteux sur calcaire dur
Centre	28	CHARTRES-CHAMPHOL (MN)	3	Océanique dégradé des plaines du Centre et du Nord	Profond	Sol limono-argileux à argilo-limoneux calcaire profond sur calcaire dur
Centre	36	ISSOUDUN	3	Océanique dégradé des plaines du Centre et du Nord	Profond	Sol limoneux profond hydromorphe sur argiles
Centre	28	CHARTRES-CHAMPHOL (MN)	3	Océanique dégradé des plaines du Centre et du Nord	Superficiel	Sol limoneux à limono-argileux caillouteux hydromorphe sur argile à silex
Centre	36	ISSOUDUN	3	Océanique dégradé des plaines du Centre et du Nord	Superficiel	Sol limono-argileux à argilo-limoneux calcaire caillouteux superficiel sur calcaire dur
Champagne-Ardenne	10	ROMILLY SUR SEINE	3	Océanique dégradé des plaines du Centre et du Nord	Moyen	Sol limono-argileux calcaire caillouteux superficiel sur craie à poches
Champagne-Ardenne	10	ROMILLY SUR SEINE	3	Océanique dégradé des plaines du Centre et du Nord	Profond	Sol limono-argileux calcaire sur craie ou limons
Champagne-Ardenne	10	ROMILLY SUR SEINE	3	Océanique dégradé des plaines du Centre et du Nord	Superficiel	Sol limono-argileux à argilo-limoneux calcaire caillouteux superficiel sur calcaire dur fissuré
Franche-Comté	39	TAVAUX	2	Semi-continental	Moyen	Sol limoneux caillouteux profond hydromorphe sur argiles
Franche-Comté	39	TAVAUX	2	Semi-continental	Profond	Sol limono-argileux profond sur calcaire dur
Franche-Comte	39	TAVAUX	2	Semi-continental	Superficiel	Sol sablo-limono-argileux calcaire caillouteux sur graviers
Haute-Normandie	27	EVREUX -HUEST (MN)	3	Océanique dégradé des plaines du Centre et du Nord	Moyen	Sol limoneux profond hydromorphe sur argiles
Haute-Normandie	27	EVREUX -HUEST (MN)	3	Océanique dégradé des plaines du Centre et du Nord	Profond	Sol limoneux profond sur limons
Haute-Normandie	27	EVREUX -HUEST (MN)	3	Océanique dégradé des plaines du Centre et du Nord	Superficiel	Sol limoneux à limono-argileux profond
Ile-De-France	77	MELUN-MONTEREAU-SUR-LE-JARD (MN)	3	Océanique dégradé des plaines du Centre et du Nord	Moyen	Sol limoneux profond hydromorphe sur argiles
Ile-De-France	77	MELUN-MONTEREAU-SUR-LE-JARD (MN)	3	Océanique dégradé des plaines du Centre et du Nord	Profond	Sol limoneux profond sur limons
Ile-De-France	77	MELUN-MONTEREAU-SUR-LE-JARD (MN)	3	Océanique dégradé des plaines du Centre et du Nord	Superficiel	Sol limono-argileux à argilo-limoneux calcaire profond sur calcaire dur

Lorraine	55	ERNEVILLE-AUX-BOIS-LOXEVILLE	1	Montagne	Moyen	Sol argileux profond hydromorphe sur marnes
Lorraine	55	ERNEVILLE-AUX-BOIS-LOXEVILLE	1	Montagne	Profond	Sol argilo-limoneux profond hydromorphe sur marne
Lorraine	55	ERNEVILLE-AUX-BOIS-LOXEVILLE	1	Montagne	Superficiel	Sol limono-argileux à argilo-limoneux calcaire caillouteux superficiel sur calcaire dur non fissuré
Midi-Pyrénées	32	AUCH	7	Bassin du Sud-Ouest	Moyen	Sol argileux calcaire peu caillouteux sur marne
Midi-Pyrénées	32	AUCH	7	Bassin du Sud-Ouest	Profond	Sol argileux profond sur marne
Midi-Pyrénées	32	AUCH	7	Bassin du Sud-Ouest	Superficiel	Sol argileux calcaire peu caillouteux superficiel sur marne
Nord-Pas-De-Calais	62	CAMBRAI-EPINOY (MN)	3	Océanique dégradé des plaines du Centre et du Nord	Moyen	Sol limoneux profond sur limons
Nord-Pas-De-Calais	62	CAMBRAI-EPINOY (MN)	3	Océanique dégradé des plaines du Centre et du Nord	Profond	Sol limono-argileux profond sur calcaire dur
Nord-Pas-De-Calais	62	CAMBRAI-EPINOY (MN)	3	Océanique dégradé des plaines du Centre et du Nord	Superficiel	Sol limono-sableux profond sur sables
Pays-De-La-Loire	72	LE MANS (MN)	3	Océanique dégradé des plaines du Centre et du Nord	Moyen	Sol limoneux profond hydromorphe
Pays-De-La-Loire	72	LE MANS (MN)	3	Océanique dégradé des plaines du Centre et du Nord	Profond	Sol limoneux profond sur limons
Pays-De-La-Loire	72	LE MANS (MN)	3	Océanique dégradé des plaines du Centre et du Nord	Superficiel	Sol limono-argileux peu caillouteux moyennement profond hydromorphe sur altérite de schiste
Picardie	80	ABBEVILLE (MN)	4	Océanique altéré	Moyen	Sol limoneux profond sur limons
Picardie	80	ABBEVILLE (MN)	4	Océanique altéré	Profond	Sol limono-argileux profond sur calcaire dur
Picardie	80	ABBEVILLE (MN)	4	Océanique altéré	Superficiel	Sol sablo-argileux profond sur sables
Poitou-Charentes	86	POITIERS -BIARD (MN)	4	Océanique altéré	Moyen	Sol limono-argileux à argilo-limoneux calcaire peu caillouteux sur calcaire tendre ou dur
Poitou-Charentes	86	POITIERS -BIARD (MN)	4	Océanique altéré	Profond	Sol limoneux à limono-argileux peu caillouteux profond sur argile rouge à silex
Poitou-Charentes	86	POITIERS -BIARD (MN)	4	Océanique altéré	Superficiel	Sol limono-argileux à argilo-limoneux calcaire caillouteux superficiel sur calcaire dur
Rhône-Alpes	1	AMBERIEU-CHATEAU-GAILLARD (MN)	2	Semi-continental	Moyen	Sol limoneux profond hydromorphe sur argiles
Rhône-Alpes	38	BEAUREPAIRE	4	Océanique altéré	Moyen	Sol sablo-limono-argileux caillouteux profond sur graviers
Rhône-Alpes	1	AMBERIEU-CHATEAU-GAILLARD (MN)	2	Semi-continental	Profond	Sol limoneux profond sur limons
Rhône-Alpes	38	BEAUREPAIRE	4	Océanique altéré	Profond	Sol limoneux profond sur limons
Rhône-Alpes	1	AMBERIEU-CHATEAU-GAILLARD (MN)	2	Semi-continental	Superficiel	Sol sablo-limono-argileux calcaire caillouteux sur graviers
Rhône-Alpes	38	BEAUREPAIRE	4	Océanique altéré	Superficiel	Sol limono-argileux à argilo-limoneux calcaire caillouteux superficiel sur calcaire dur fissuré

8.2 Distribution de l'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie

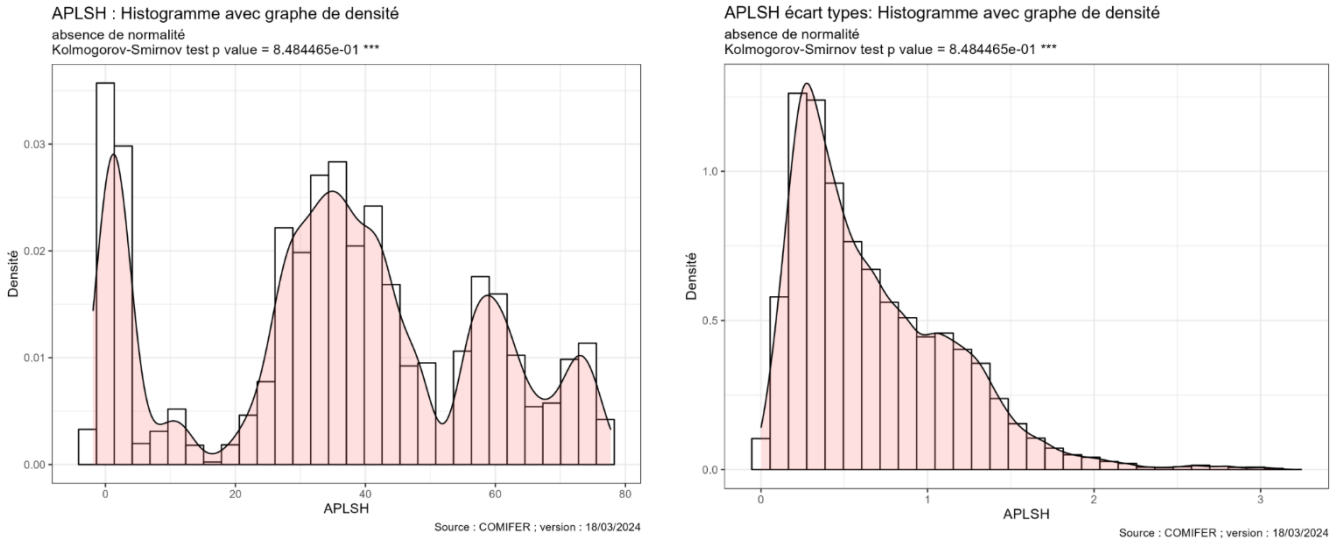


Figure 9 : Distribution de l'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver (moyennes pluriannuelles et écart-type autour de ces moyennes). Les graphiques montrent que la distribution des résultats ne suit pas loi normale, ce qui justifie l'utilisation d'un tests non paramétrique (Test de Kruskal-Wallis) pour l'analyse des résultats.

8.3 Résultats graphiques d'un échantillon des tests Kruskal-Wallis par variable

Regroupement par type climatique : "1" = "montagne","2" = "semi-continental", "3" = "océanique dégradé des plaines", "4" = "océanique altéré","7" = "bassin du Sud-Ouest".

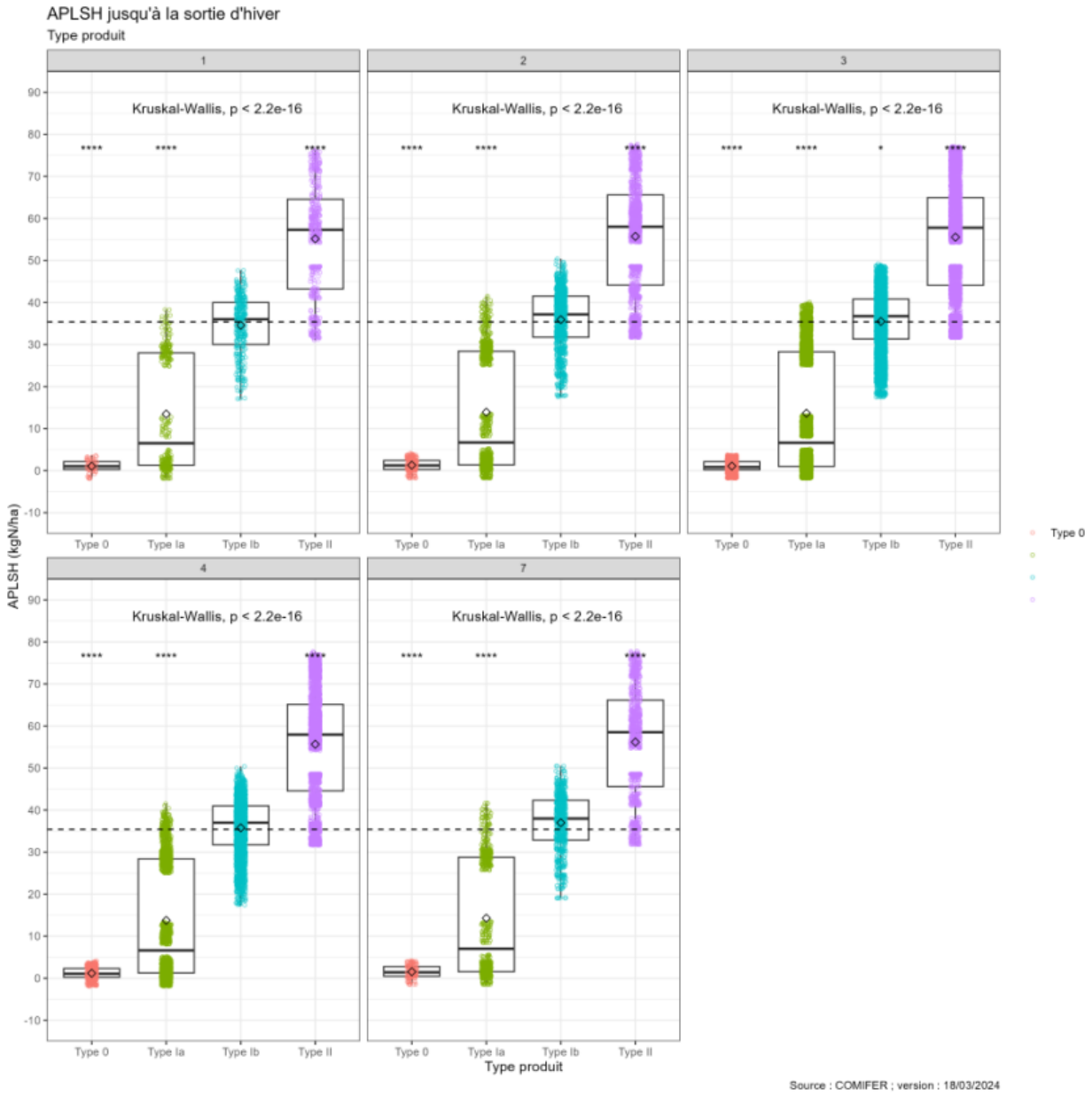


Figure 10 : Azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver (APLSH) en fonction des types climatiques et de la typologie des produits organiques. Ces graphiques montrent que les différences entre les produits de type 0, Ia, Ib et II sont significatives pour les 5 zones climatiques retenues (p-value < 0,05). Pour chaque type de produit, l'amplitude de la distribution des valeurs d'APLSH ainsi que la médiane sont représentées. Les pointillées représentent la moyenne globale d'APLSH pour l'ensemble des produits

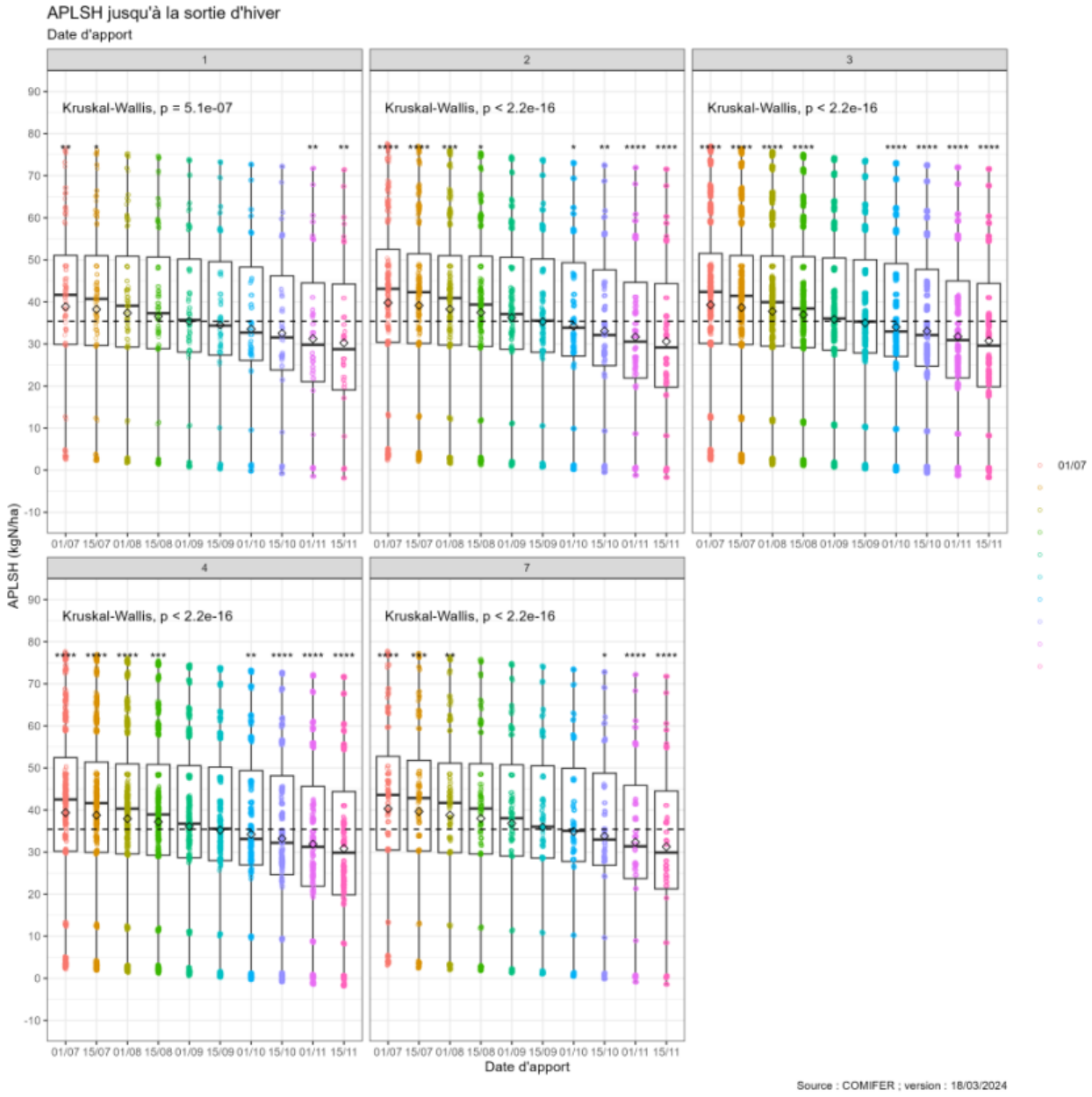


Figure 11 : Azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver en fonction des types climatiques et des dates d'apport

8.4 Types de produits : Propriétés physico-chimiques des produits organiques utilisés dans le plan de simulation.

Tableau 7 : Dénominations, types, et propriétés physico-chimiques des produits organiques utilisés dans le plan de simulation.

Nom du Produit	Type PAN 7	Produit	Unite	N total (kgN/tMB)	N minéral (kgN/tMB)	**Nmin/Ntot (%)**	C total (kgC/tMB)	**C/N**	Classe C/N	Classe Nmin/Ntot (%)
Boue mixte de papeteries C/N>35	**Type 0**	**Solide**	**t**	**2,00**	**0,00**	**0**	**105,00**	**53**	**> 20**	**<= 20**
Compost de déchets verts jeunes et ligneux (peu mature)	**Type 0**	**Solide**	**t**	**4,88**	**0,00**	**0**	**119,90**	**25**	**> 20**	**<= 20**
Compost de fractions solides de digestats de méthanisation	**Type Ia**	**Solide**	**t**	**7,32**	**0,71**	**10**	**114,62**	**14**	**> 10 ; <= 20**	**<= 20**
Compost de fumier de bovins	**Type Ia**	**Solide**	**t**	**5,00**	**0,00**	**0**	**65,00**	**13**	**> 10 ; <= 20**	**<= 20**
Compost de lisier de porcs + pailles	**Type Ia**	**Solide**	**t**	**6,10**	**1,70**	**28**	**77,00**	**13**	**> 10 ; <= 20**	**> 20 ; <= 40**
Fumier de bovins, logettes paillée, aire couverte, stockage > 2 mois	**Type Ia**	**Solide**	**t**	**4,80**	**1,20**	**25**	**65,00**	**14**	**> 10 ; <= 20**	**> 20 ; <= 40**
Compost de boues et de déchets verts 2	**Type Ib**	**Solide**	**t**	**16,51**	**2,31**	**14**	**170,00**	**11**	**> 10 ; <= 20**	**<= 20**
Compost de boues et de déchets verts 3	**Type Ib**	**Solide**	**t**	**19,03**	**3,71**	**19**	**153,98**	**8**	**> 8 ; <= 10**	**<= 20**
Fumier de bovins, stockage < 2 mois	**Type Ib**	**Solide**	**t**	**5,50**	**2,00**	**36**	**70,00**	**13**	**> 10 ; <= 20**	**> 20 ; <= 40**
Fumier de porcs à l'engrais à base de paille	**Type Ib**	**Solide**	**t**	**9,40**	**3,00**	**32**	**123,00**	**13**	**> 10 ; <= 20**	**> 20 ; <= 40**
Fumier de poulets de chair (après stockage)	**Type Ib**	**Solide**	**t**	**15,20**	**2,40**	**16**	**138,50**	**9**	**> 8 ; <= 10**	**<= 20**
Digestats brut de méthanisation 1	**Type II**	**Liquide**	**m3**	**7,90**	**5,32**	**67**	**19,60**	**2**	**<= 8**	**> 40**
Digestats brut de méthanisation 2	**Type II**	**Liquide**	**m3**	**4,50**	**2,70**	**60**	**24,00**	**5**	**<= 8**	**> 40**
Digestats brut de méthanisation 3	**Type II**	**Liquide**	**m3**	**6,11**	**3,31**	**54**	**54,87**	**9**	**> 8 ; <= 10**	**> 40**
Fientes de poules pondeuses (stockage en fosses profondes)	**Type II**	**Solide**	**t**	**37,00**	**3,80**	**10**	**271,00**	**7**	**<= 8**	**<= 20**
Fraction liquide des digestats de méthanisation	**Type II**	**Liquide**	**m3**	**7,22**	**4,22**	**58**	**42,29**	**6**	**<= 8**	**> 40**
Lisier bovins, logettes, raclage en système couvert	**Type II**	**Liquide**	**m3**	**2,20**	**1,20**	**55**	**23,91**	**11**	**> 10 ; <= 20**	**> 40**
Lisier mixte de porc	**Type II**	**Liquide**	**m3**	**3,50**	**2,50**	**71**	**11,00**	**3**	**<= 8**	**> 40**

8.5 Analyses des produits : pourcentages moyens d'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver, selon la date d'épandage (pourcentages par rapport à l'azote total apporté)

Cf. Fichier Excel fourni avec le rapport.

Tableau 8 : Zone climatique « Montagne ». Selon les caractéristiques du produit (C/N et N_minéral/N_total) et par date d'apport, pourcentages moyens de l'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver, par rapport à l'azote total apporté.

Caractéristiques du PRO		**Région climatique**	**Pourcentages moyens d'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver, par rapport à l'azote total apporté**									
C/N	**Nmin/Ntot (%)**		**01-juil**	**15-juil**	**01-août**	**15-août**	**01-sept**	**15-sept**	**01-oct**	**15-oct**	**01-nov**	**15-nov**
<=8	<=20	Montagne	50	50	50	50	50	50	50	50	45	40
<=8	>40	Montagne	75	75	75	75	70	70	70	70	70	70
>8 ; <=10	<=20	Montagne	50	50	45	45	45	40	40	35	35	30
>8 ; <=10	>40	Montagne	65	65	65	65	60	60	60	60	55	55
>10 ; <=20	<=20	Montagne	25	25	25	20	20	20	20	15	15	15
>10 ; <=20	>20 ; <=40	Montagne	45	45	45	45	40	40	40	35	35	35
>10 ; <=20	>40	Montagne	65	65	65	65	60	60	60	60	60	55
>20	<=20	Montagne	5	5	5	5	5	5	5	0	0	0

Tableau 9 : Zone climatique « semi-continental ». Selon les caractéristiques du produit (C/N et N_minéral/N_total) et par date d'apport, pourcentages moyens de l'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver, par rapport à l'azote total apporté.

Caractéristiques du PRO		**Région climatique**	**Pourcentages moyens d'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver, par rapport à l'azote total apporté**									
C/N	**Nmin/Ntot (%)**		**01-juil**	**15-juil**	**01-août**	**15-août**	**01-sept**	**15-sept**	**01-oct**	**15-oct**	**01-nov**	**15-nov**
<=8	<=20	Semi-continental	50	50	50	50	50	50	50	45	40	35
<=8	>40	Semi-continental	75	75	70	70	70	70	70	70	70	70
>8 ; <=10	<=20	Semi-continental	45	45	45	45	40	40	35	35	30	30
>8 ; <=10	>40	Semi-continental	65	65	60	60	60	60	60	60	55	55
>10 ; <=20	<=20	Semi-continental	25	25	20	20	20	15	15	15	15	15
>10 ; <=20	>20 ; <=40	Semi-continental	45	45	40	40	40	40	35	35	35	35
>10 ; <=20	>40	Semi-continental	65	65	65	60	60	60	60	60	55	55
>20	<=20	Semi-continental	5	5	5	5	5	0	0	0	0	0

Tableau 10 : Zone climatique « océanique dégradé des plaines ». Selon les caractéristiques du produit (C/N et N_minéral/N_total) et par date d'apport, pourcentages moyens de l'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver, par rapport à l'azote total apporté.

Caractéristiques du PRO		**Région climatique**	**Pourcentages moyens d'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver, par rapport à l'azote total apporté**									
C/N	**Nmin/Ntot (%)**		**01-juil**	**15-juil**	**01-août**	**15-août**	**01-sept**	**15-sept**	**01-oct**	**15-oct**	**01-nov**	**15-nov**
<=8	<=20	Océanique dégradé des plaines	50	50	50	50	50	50	50	50	45	40
<=8	>40	Océanique dégradé des plaines	75	75	75	75	70	70	70	70	70	70
>8 ; <=10	<=20	Océanique dégradé des plaines	50	50	45	45	45	40	40	35	30	30
>8 ; <=10	>40	Océanique dégradé des plaines	65	65	65	65	60	60	60	60	55	55
>10 ; <=20	<=20	Océanique dégradé des plaines	25	25	25	20	20	20	15	15	15	15
>10 ; <=20	>20 ; <=40	Océanique dégradé des plaines	45	45	40	40	40	40	40	35	35	35
>10 ; <=20	>40	Océanique dégradé des plaines	65	65	65	65	60	60	60	60	60	55
>20	<=20	Océanique dégradé des plaines	5	5	5	5	5	5	0	0	0	0

Tableau 11 : Zone climatique « océanique altéré ». Selon les caractéristiques du produit (C/N et N_minéral/N_total) et par date d'apport, pourcentages moyens de l'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver, par rapport à l'azote total apporté.

Caractéristiques du PRO		**Région climatique**	**Pourcentages moyens d'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver, par rapport à l'azote total apporté**									
C/N	**Nmin/Ntot (%)**		**01-juil**	**15-juil**	**01-août**	**15-août**	**01-sept**	**15-sept**	**01-oct**	**15-oct**	**01-nov**	**15-nov**
<=8	<=20	Océanique altéré	50	50	50	50	50	50	50	45	45	40
<=8	>40	Océanique altéré	75	75	75	70	70	70	70	70	70	70
>8 ; <=10	<=20	Océanique altéré	50	50	45	45	40	40	40	35	30	30
>8 ; <=10	>40	Océanique altéré	65	65	65	60	60	60	60	60	55	55
>10 ; <=20	<=20	Océanique altéré	25	25	20	20	20	20	15	15	15	15
>10 ; <=20	>20 ; <=40	Océanique altéré	45	45	40	40	40	40	35	35	35	35
>10 ; <=20	>40	Océanique altéré	65	65	65	65	60	60	60	60	60	55
>20	<=20	Océanique altéré	5	5	5	5	5	5	0	0	0	0

Tableau 12 : Zone climatique « bassin du Sud-Ouest ». Selon les caractéristiques du produit (C/N et N_minéral/N_total) et par date d'apport, pourcentages moyens de l'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver, par rapport à l'azote total apporté.

Caractéristiques du PRO		**Région climatique**	**Pourcentages moyens d'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver, par rapport à l'azote total apporté**									
C/N	**Nmin/Ntot (%)**		**01-juil**	**15-juil**	**01-août**	**15-août**	**01-sept**	**15-sept**	**01-oct**	**15-oct**	**01-nov**	**15-nov**
<=8	<=20	Bassin du Sud-Ouest	50	50	50	50	50	50	50	45	45	40
<=8	>40	Bassin du Sud-Ouest	75	75	75	75	70	70	70	70	70	70
>8 ; <=10	<=20	Bassin du Sud-Ouest	50	50	45	45	45	40	40	35	30	30
>8 ; <=10	>40	Bassin du Sud-Ouest	65	65	65	65	60	60	60	60	55	55
>10 ; <=20	<=20	Bassin du Sud-Ouest	25	25	25	20	20	20	15	15	15	15
>10 ; <=20	>20 ; <=40	Bassin du Sud-Ouest	45	45	45	40	40	40	35	35	35	35
>10 ; <=20	>40	Bassin du Sud-Ouest	65	65	65	65	60	60	60	60	60	55
>20	<=20	Bassin du Sud-Ouest	5	5	5	5	5	5	0	0	0	0

8.6 Types de produits : Pourcentage moyen d'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver, selon la date d'épandage (pourcentages par rapport à l'azote total apporté)

Cf. Fichier Excel fourni avec le rapport.

Les pourcentage d'APLSH des tableaux ci-dessous sont associés à des écarts-types afin de donner une idée de la variabilité.

Tableau 13 : Zone climatique « Montagne ». Selon la dénomination du produit et par date d'apport, pourcentage moyen de l'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver. Chaque pourcentage est associé à un écart type (ET en %).

Nom du Produit	Type Produit	Région climatique	Pourcentages moyens d'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver, par rapport à l'azote total apporté									
			01-juil	15-juil	01-août	15-août	01-sept	15-sept	01-oct	15-oct	01-nov	15-nov
Boues mixte de papeteries C/N>35	Type 0	montagne	5 (+/- 0,5)	5 (+/- 0,5)	5 (+/- 0)	5 (+/- 0,5)	5 (+/- 0)	5 (+/- 1)	5 (+/- 1)	5 (+/- 1)	0 (+/- 1)	0 (+/- 1,5)
Compost de déchets verts jeunes et ligneux (peu mature)	Type 0	montagne	5 (+/- 1)	5 (+/- 1)	5 (+/- 1)	5 (+/- 1)	5 (+/- 1)	5 (+/- 1)	5 (+/- 1)	5 (+/- 1,5)	5 (+/- 1)	5 (+/- 1,5)
Compost de fumier de bovins	Type Ia	montagne	10 (+/- 5)	10 (+/- 5,5)	10 (+/- 5)	10 (+/- 5)	10 (+/- 5)	10 (+/- 5)	10 (+/- 4,5)	10 (+/- 4,5)	5 (+/- 4,5)	5 (+/- 4,5)
Compost de fractions solides de digestats de méthanisation	Type Ia	montagne	5 (+/- 1)	5 (+/- 1)	5 (+/- 1)	5 (+/- 1)	5 (+/- 1)	5 (+/- 1)	5 (+/- 1)	5 (+/- 1,5)	5 (+/- 1)	5 (+/- 1,5)
Compost de lisiers de porcs + pailles	Type Ia	montagne	30 (+/- 0)	30 (+/- 0,5)	30 (+/- 0,5)	30 (+/- 0)	30 (+/- 0,5)	30 (+/- 0)	30 (+/- 0)	30 (+/- 0)	30 (+/- 0)	30 (+/- 0,5)
Fumier de bovins, logettes paillée, aire couverte, stockage > 2 mois	Type Ia	montagne	40 (+/- 1,5)	40 (+/- 1,5)	35 (+/- 1)	35 (+/- 1)	35 (+/- 1)	30 (+/- 1)	30 (+/- 0,5)	30 (+/- 0)	30 (+/- 0)	25 (+/- 0)
Compost de boues et de déchets verts 2	Type Ib	montagne	45 (+/- 2)	45 (+/- 2)	40 (+/- 2)	40 (+/- 2)	35 (+/- 1,5)	35 (+/- 1,5)	30 (+/- 1,5)	30 (+/- 1)	25 (+/- 1)	25 (+/- 0,5)
Compost de boues et de déchets verts 3	Type Ib	montagne	40 (+/- 6,5)	40 (+/- 6,5)	40 (+/- 6)	40 (+/- 6)	35 (+/- 5,5)	35 (+/- 5,5)	30 (+/- 5,5)	30 (+/- 5)	25 (+/- 5)	25 (+/- 5)
Fumier de bovins, stockage < 2 mois	Type Ib	montagne	50 (+/- 2)	50 (+/- 2)	45 (+/- 1,5)	45 (+/- 1,5)	45 (+/- 1)	45 (+/- 1)	40 (+/- 0,5)	40 (+/- 0)	40 (+/- 0)	40 (+/- 0)
Fumier de porcs à l'engrais à base de paille	Type Ib	montagne	45 (+/- 1,5)	45 (+/- 1,5)	45 (+/- 1)	40 (+/- 1)	40 (+/- 0,5)	40 (+/- 0)	35 (+/- 0)	35 (+/- 0)	35 (+/- 0,5)	35 (+/- 0)
Fumier de poulets de chair (après stockage)	Type Ib	montagne	45 (+/- 1,5)	45 (+/- 1,5)	40 (+/- 1)	40 (+/- 1,5)	40 (+/- 1)	35 (+/- 0,5)	35 (+/- 1)	30 (+/- 1)	25 (+/- 0,5)	25 (+/- 0,5)
Digestats brut de méthanisation 1	Type II	montagne	75 (+/- 1)	75 (+/- 1)	75 (+/- 1)	75 (+/- 1)	75 (+/- 0,5)	75 (+/- 0,5)	70 (+/- 0,5)	70 (+/- 0,5)	70 (+/- 0)	70 (+/- 0)
Digestats brut de méthanisation 2	Type II	montagne	70 (+/- 1)	70 (+/- 1)	70 (+/- 1)	70 (+/- 1)	65 (+/- 1)	65 (+/- 1)	65 (+/- 0,5)	65 (+/- 0,5)	65 (+/- 0)	65 (+/- 0)
Digestats brut de méthanisation 3	Type II	montagne	65 (+/- 1,5)	65 (+/- 1,5)	65 (+/- 1)	65 (+/- 1)	60 (+/- 1)	60 (+/- 1)	60 (+/- 0,5)	60 (+/- 0,5)	55 (+/- 0,5)	55 (+/- 0)
Fientes de poules pondeuses (stockage en fosses profondes)	Type II	montagne	50 (+/- 0,5)	50 (+/- 0,5)	50 (+/- 0)	50 (+/- 0)	50 (+/- 0,5)	50 (+/- 0,5)	50 (+/- 1)	45 (+/- 1)	40 (+/- 1)	35 (+/- 1,5)
Fraction liquide des digestats de méthanisation	Type II	montagne	70 (+/- 1)	70 (+/- 1)	70 (+/- 1)	65 (+/- 1)	65 (+/- 1)	65 (+/- 1)	65 (+/- 0,5)	65 (+/- 0,5)	60 (+/- 0)	60 (+/- 0)
Lisier bovin, logettes, raclage en système couvert	Type II	montagne	65 (+/- 1)	65 (+/- 1)	65 (+/- 1)	60 (+/- 0,5)	60 (+/- 0)	60 (+/- 0,5)	60 (+/- 1)	60 (+/- 0)	60 (+/- 0)	60 (+/- 1)
Lisier mixte de porc	Type II	montagne	80 (+/- 0,5)	80 (+/- 0,5)	75 (+/- 0,5)	75 (+/- 0,5)	75 (+/- 0,5)	75 (+/- 0)	75 (+/- 0)	75 (+/- 0)	75 (+/- 0)	75 (+/- 0)

Tableau 14 : Zone climatique « semi-continental ». Selon la dénomination du produit et par date d'apport, pourcentage moyen de l'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver. Chaque pourcentage est associé à un écart type (ET en %).

Nom du Produit	Type Produit	Région climatique	Pourcentages moyens d'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver, par rapport à l'azote total apporté									
			01-juil	15-juil	01-août	15-août	01-sept	15-sept	01-oct	15-oct	01-nov	15-nov
Boues mixte de papeteries C/N>35	Type 0	semi-continental	5 (+/- 0,5)	5 (+/- 1)	5 (+/- 0,5)	5 (+/- 0,5)	5 (+/- 0,5)	5 (+/- 0)	5 (+/- 1)	5 (+/- 1)	5 (+/- 1)	0 (+/- 1,5)
Compost de déchets verts jeunes et ligneux (peu mature)	Type 0	semi-continental	5 (+/- 1)	5 (+/- 0,5)	5 (+/- 0,5)	5 (+/- 0,5)	5 (+/- 0,5)	5 (+/- 0,5)	5 (+/- 1)	5 (+/- 1)	5 (+/- 1)	5 (+/- 1,5)
Compost de fumier de bovins	Type Ia	semi-continental	10 (+/- 5,5)	10 (+/- 5,5)	10 (+/- 5,5)	10 (+/- 5,5)	10 (+/- 5,5)	10 (+/- 5)	10 (+/- 5)	10 (+/- 4,5)	5 (+/- 5)	5 (+/- 4,5)
Compost de fractions solides de digestats de méthanisation	Type Ia	semi-continental	5 (+/- 1)	5 (+/- 0,5)	5 (+/- 0,5)	5 (+/- 0,5)	5 (+/- 0,5)	5 (+/- 0,5)	5 (+/- 1)	5 (+/- 1)	5 (+/- 1)	5 (+/- 1,5)
Compost de lisiers de porcs + pailles	Type Ia	semi-continental	35 (+/- 0,5)	35 (+/- 0,5)	30 (+/- 0,5)	30 (+/- 0,5)	30 (+/- 0,5)	30 (+/- 0,5)	30 (+/- 0)	30 (+/- 0,5)	30 (+/- 0)	30 (+/- 0,5)
Fumier de bovins, logettes paillée, aire couverte, stockage > 2 mois	Type Ia	semi-continental	45 (+/- 2)	40 (+/- 1,5)	40 (+/- 1,5)	40 (+/- 1)	35 (+/- 1)	35 (+/- 1)	30 (+/- 0,5)	30 (+/- 0,5)	30 (+/- 0,5)	30 (+/- 0,5)
Compost de boues et de déchets verts 2	Type Ib	semi-continental	45 (+/- 2,5)	45 (+/- 2)	45 (+/- 2)	40 (+/- 2)	40 (+/- 2)	35 (+/- 2)	35 (+/- 1,5)	30 (+/- 1,5)	25 (+/- 1)	25 (+/- 1)
Compost de boues et de déchets verts 3	Type Ib	semi-continental	45 (+/- 6,5)	45 (+/- 6,5)	40 (+/- 6,5)	40 (+/- 6,5)	40 (+/- 6)	35 (+/- 6)	35 (+/- 5,5)	30 (+/- 5)	25 (+/- 5)	25 (+/- 4,5)
Fumier de bovins, stockage < 2 mois	Type Ib	semi-continental	50 (+/- 2)	50 (+/- 2)	50 (+/- 1,5)	50 (+/- 1,5)	45 (+/- 1)	45 (+/- 1)	40 (+/- 1)	40 (+/- 1)	40 (+/- 0,5)	40 (+/- 0,5)
Fumier de porcs à l'engrais à base de paille	Type Ib	semi-continental	50 (+/- 1,5)	50 (+/- 1,5)	45 (+/- 1,5)	45 (+/- 1)	40 (+/- 1)	40 (+/- 1)	40 (+/- 0,5)	35 (+/- 0,5)	35 (+/- 0)	35 (+/- 0)
Fumier de poulets de chair (après stockage)	Type Ib	semi-continental	45 (+/- 1)	45 (+/- 1,5)	45 (+/- 1,5)	45 (+/- 1,5)	40 (+/- 1,5)	40 (+/- 1)	35 (+/- 1)	30 (+/- 1)	30 (+/- 1)	25 (+/- 0,5)
Digestats brut de méthanisation 1	Type II	semi-continental	75 (+/- 1)	75 (+/- 1)	75 (+/- 1)	75 (+/- 1)	70 (+/- 0,5)	70 (+/- 0,5)	70 (+/- 0,5)	70 (+/- 0,5)	70 (+/- 0)	70 (+/- 0)
Digestats brut de méthanisation 2	Type II	semi-continental	70 (+/- 1)	70 (+/- 1)	65 (+/- 1)	65 (+/- 1)	65 (+/- 0,5)	65 (+/- 0,5)	65 (+/- 0,5)	65 (+/- 0,5)	65 (+/- 0,5)	60 (+/- 0)
Digestats brut de méthanisation 3	Type II	semi-continental	65 (+/- 1)	65 (+/- 1)	60 (+/- 1)	60 (+/- 1)	60 (+/- 1)	60 (+/- 0,5)	60 (+/- 0,5)	60 (+/- 0,5)	55 (+/- 0,5)	55 (+/- 0,5)
Fientes de poules pondeuses (stockage en fosses profondes)	Type II	semi-continental	50 (+/- 0)	50 (+/- 0)	50 (+/- 0,5)	50 (+/- 0,5)	50 (+/- 0)	50 (+/- 0,5)	50 (+/- 1)	45 (+/- 1)	45 (+/- 1)	40 (+/- 1)
Fraction liquide des digestats de méthanisation	Type II	semi-continental	70 (+/- 1)	65 (+/- 1)	65 (+/- 1)	65 (+/- 1)	65 (+/- 1)	65 (+/- 0,5)	60 (+/- 0,5)	60 (+/- 0,5)	60 (+/- 0,5)	60 (+/- 0)
Lisier bovin, logettes, raclage en système couvert	Type II	semi-continental	65 (+/- 1)	65 (+/- 1)	65 (+/- 1)	65 (+/- 1)	60 (+/- 1)	60 (+/- 0,5)	60 (+/- 0)	60 (+/- 0)	60 (+/- 0,5)	60 (+/- 0)
Lisier mixte de porc	Type II	semi-continental	80 (+/- 1)	80 (+/- 1)	80 (+/- 0,5)	80 (+/- 0,5)	75 (+/- 0,5)	75 (+/- 0,5)	75 (+/- 0)	75 (+/- 0,5)	75 (+/- 0)	75 (+/- 0,5)

Tableau 15 : Zone climatique « océanique dégradé des plaines ». Selon la dénomination du produit et par date d'apport, pourcentage moyen de l'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver. Chaque pourcentage est associé à un écart type (ET en %).

Nom du Produit	**Type Produit**	**Région climatique**	**Pourcentages moyens d'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver, par rapport à l'azote total apporté**									
			01-juil	**15-juil**	**01-août**	**15-août**	**01-sept**	**15-sept**	**01-oct**	**15-oct**	**01-nov**	**15-nov**
Boues mixte de papeteries C/N>35	Type 0	océanique.dégradé.des.plaines	5 *(+/- 0,5)*	5 *(+/- 0,5)*	5 *(+/- 0,5)*	5 *(+/- 0,5)*	5 *(+/- 0,5)*	5 *(+/- 0,5)*	5 *(+/- 0,5)*	5 *(+/- 1)*	5 *(+/- 1)*	0 *(+/- 1)*
Compost de déchets verts jeunes et ligneux (peu mature)	Type 0	océanique.dégradé.des.plaines	5 *(+/- 1)*	5 *(+/- 1)*	5 *(+/- 0,5)*	5 *(+/- 0,5)*	5 *(+/- 0,5)*	5 *(+/- 0,5)*	5 *(+/- 0,5)*	5 *(+/- 1)*	5 *(+/- 1)*	5 *(+/- 1,5)*
Compost de fumier de bovins	Type Ia	océanique.dégradé.des.plaines	10 *(+/- 5,5)*	10 *(+/- 5,5)*	10 *(+/- 5,5)*	10 *(+/- 5,5)*	10 *(+/- 5)*	10 *(+/- 5)*	10 *(+/- 5)*	5 *(+/- 5)*	5 *(+/- 5)*	5 *(+/- 4,5)*
Compost de fractions solides de digestats de méthanisation	Type Ia	océanique.dégradé.des.plaines	5 *(+/- 1)*	5 *(+/- 0,5)*	5 *(+/- 0,5)*	5 *(+/- 0,5)*	5 *(+/- 0,5)*	5 *(+/- 0,5)*	5 *(+/- 0,5)*	5 *(+/- 1)*	5 *(+/- 1)*	5 *(+/- 1,5)*
Compost de lisiers de porcs + pailles	Type Ia	océanique.dégradé.des.plaines	35 *(+/- 0,5)*	30 *(+/- 0,5)*	30 *(+/- 0,5)*	30 *(+/- 0,5)*	30 *(+/- 0,5)*	30 *(+/- 0)*	30 *(+/- 0)*	30 *(+/- 0,5)*	30 *(+/- 0)*	30 *(+/- 0,5)*
Fumier de bovins, logettes paillée, aire couverte, stockage > 2 mois	Type Ia	océanique.dégradé.des.plaines	40 *(+/- 1,5)*	40 *(+/- 1,5)*	40 *(+/- 1)*	35 *(+/- 1)*	35 *(+/- 1)*	35 *(+/- 1)*	30 *(+/- 0,5)*	30 *(+/- 0,5)*	30 *(+/- 0,5)*	30 *(+/- 0,5)*
Compost de boues et de déchets verts 2	Type Ib	océanique.dégradé.des.plaines	45 *(+/- 2)*	45 *(+/- 2)*	40 *(+/- 2)*	40 *(+/- 1,5)*	40 *(+/- 1,5)*	35 *(+/- 1,5)*	35 *(+/- 1)*	30 *(+/- 1)*	25 *(+/- 1)*	25 *(+/- 1)*
Compost de boues et de déchets verts 3	Type Ib	océanique.dégradé.des.plaines	45 *(+/- 6,5)*	45 *(+/- 6)*	40 *(+/- 6)*	40 *(+/- 6)*	35 *(+/- 5,5)*	35 *(+/- 5,5)*	35 *(+/- 5)*	30 *(+/- 5)*	30 *(+/- 5)*	25 *(+/- 4,5)*
Fumier de bovins, stockage < 2 mois	Type Ib	océanique.dégradé.des.plaines	50 *(+/- 2)*	50 *(+/- 1,5)*	50 *(+/- 1,5)*	45 *(+/- 1)*	45 *(+/- 1)*	45 *(+/- 1)*	40 *(+/- 0,5)*	40 *(+/- 0,5)*	40 *(+/- 0,5)*	40 *(+/- 0,5)*
Fumier de porcs à l'engrais à base de paille	Type Ib	océanique.dégradé.des.plaines	50 *(+/- 1,5)*	45 *(+/- 1)*	45 *(+/- 1)*	45 *(+/- 1)*	40 *(+/- 1)*	40 *(+/- 0,5)*	40 *(+/- 0,5)*	35 *(+/- 0,5)*	35 *(+/- 0,5)*	35 *(+/- 0,5)*
Fumier de poulets de chair (après stockage)	Type Ib	océanique.dégradé.des.plaines	45 *(+/- 1)*	45 *(+/- 1)*	45 *(+/- 1)*	40 *(+/- 1)*	40 *(+/- 1)*	35 *(+/- 1)*	35 *(+/- 1)*	30 *(+/- 1)*	30 *(+/- 1)*	25 *(+/- 0,5)*
Digestats brut de méthanisation 1	Type II	océanique.dégradé.des.plaines	75 *(+/- 1)*	75 *(+/- 1)*	75 *(+/- 1)*	75 *(+/- 1)*	75 *(+/- 1)*	70 *(+/- 1)*	70 *(+/- 0,5)*	70 *(+/- 0,5)*	70 *(+/- 0,5)*	70 *(+/- 0)*
Digestats brut de méthanisation 2	Type II	océanique.dégradé.des.plaines	70 *(+/- 1)*	70 *(+/- 1)*	70 *(+/- 1)*	70 *(+/- 1)*	65 *(+/- 1)*	65 *(+/- 1)*	65 *(+/- 0,5)*	65 *(+/- 0,5)*	65 *(+/- 0,5)*	65 *(+/- 0,5)*
Digestats brut de méthanisation 3	Type II	océanique.dégradé.des.plaines	65 *(+/- 1)*	65 *(+/- 1)*	65 *(+/- 1)*	65 *(+/- 1)*	60 *(+/- 1)*	60 *(+/- 1)*	60 *(+/- 1)*	60 *(+/- 0,5)*	55 *(+/- 0,5)*	55 *(+/- 0,5)*
Fientes de poules pondeuses (stockage en fosses profondes)	Type II	océanique.dégradé.des.plaines	50 *(+/- 0)*	50 *(+/- 0,5)*	50 *(+/- 0,5)*	50 *(+/- 0)*	50 *(+/- 0,5)*	50 *(+/- 0,5)*	50 *(+/- 0,5)*	45 *(+/- 1)*	45 *(+/- 1)*	40 *(+/- 1,5)*
Fraction liquide des digestats de méthanisation	Type II	océanique.dégradé.des.plaines	70 *(+/- 1)*	70 *(+/- 1)*	70 *(+/- 1)*	65 *(+/- 1)*	65 *(+/- 1)*	65 *(+/- 1)*	65 *(+/- 1)*	65 *(+/- 0,5)*	60 *(+/- 0,5)*	60 *(+/- 0,5)*
Lisier bovin, logettes, raclage en système couvert	Type II	océanique.dégradé.des.plaines	65 *(+/- 1)*	65 *(+/- 1)*	65 *(+/- 1)*	65 *(+/- 1)*	60 *(+/- 0,5)*	60 *(+/- 0,5)*	60 *(+/- 0,5)*	60 *(+/- 0,5)*	60 *(+/- 0,5)*	60 *(+/- 0)*
Lisier mixte de porc	Type II	océanique.dégradé.des.plaines	80 *(+/- 0,5)*	80 *(+/- 0,5)*	80 *(+/- 0,5)*	75 *(+/- 0,5)*	75 *(+/- 0)*	75 *(+/- 0,5)*	75 *(+/- 0)*	75 *(+/- 0,5)*	75 *(+/- 0)*	75 *(+/- 0,5)*

Tableau 16 : : Zone climatique « océanique altéré ». Selon la dénomination du produit et par date d'apport, pourcentage moyen de l'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver. Chaque pourcentage est associé à un écart type (ET en %).

Nom du Produit	**Type Produit**	**Région climatique**	**Pourcentages moyens d'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver, par rapport à l'azote total apporté**									
			01-juil	**15-juil**	**01-août**	**15-août**	**01-sept**	**15-sept**	**01-oct**	**15-oct**	**01-nov**	**15-nov**
Boues mixte de papeteries C/N>35	Type 0	océanique.altéré	5 *(+/- 0,5)*	5 *(+/- 1)*	5 *(+/- 0,5)*	5 *(+/- 0,5)*	5 *(+/- 0,5)*	5 *(+/- 0,5)*	5 *(+/- 0,5)*	5 *(+/- 1)*	5 *(+/- 1)*	5 *(+/- 1)*
Compost de déchets verts jeunes et ligneux (peu mature)	Type 0	océanique.altéré	5 *(+/- 1)*	5 *(+/- 1)*	5 *(+/- 0,5)*	5 *(+/- 0,5)*	5 *(+/- 1)*	5 *(+/- 0,5)*	5 *(+/- 0,5)*	5 *(+/- 1)*	5 *(+/- 1)*	5 *(+/- 1,5)*
Compost de fumier de bovins	Type Ia	océanique.altéré	10 *(+/- 5,5)*	10 *(+/- 5,5)*	10 *(+/- 5,5)*	10 *(+/- 5,5)*	10 *(+/- 5)*	10 *(+/- 5)*	10 *(+/- 5)*	10 *(+/- 4,5)*	10 *(+/- 4,5)*	5 *(+/- 4,5)*
Compost de fractions solides de digestats de méthanisation	Type Ia	océanique.altéré	5 *(+/- 1)*	5 *(+/- 0,5)*	5 *(+/- 0,5)*	5 *(+/- 0,5)*	5 *(+/- 1)*	5 *(+/- 0,5)*	5 *(+/- 0,5)*	5 *(+/- 1)*	5 *(+/- 1)*	5 *(+/- 1,5)*
Compost de lisiers de porcs + pailles	Type Ia	océanique.altéré	35 *(+/- 0,5)*	35 *(+/- 0,5)*	30 *(+/- 0,5)*	30 *(+/- 0,5)*	30 *(+/- 0,5)*	30 *(+/- 0,5)*	30 *(+/- 0)*	30 *(+/- 0,5)*	30 *(+/- 0)*	30 *(+/- 0,5)*
Fumier de bovins, logettes paillée, aire couverte, stockage > 2 mois	Type Ia	océanique.altéré	45 *(+/- 1,5)*	40 *(+/- 1,5)*	40 *(+/- 1,5)*	40 *(+/- 1)*	35 *(+/- 1)*	35 *(+/- 1)*	30 *(+/- 1)*	30 *(+/- 1)*	30 *(+/- 1)*	30 *(+/- 1)*
Compost de boues et de déchets verts 2	Type Ib	océanique.altéré	45 *(+/- 2)*	45 *(+/- 2)*	45 *(+/- 2)*	40 *(+/- 2)*	40 *(+/- 1,5)*	35 *(+/- 1,5)*	35 *(+/- 1,5)*	30 *(+/- 1,5)*	30 *(+/- 1,5)*	25 *(+/- 1)*
Compost de boues et de déchets verts 3	Type Ib	océanique.altéré	45 *(+/- 6,5)*	45 *(+/- 6)*	40 *(+/- 6)*	40 *(+/- 6)*	40 *(+/- 6)*	35 *(+/- 5,5)*	35 *(+/- 5,5)*	30 *(+/- 5)*	30 *(+/- 5)*	25 *(+/- 4,5)*
Fumier de bovins, stockage < 2 mois	Type Ib	océanique.altéré	50 *(+/- 2)*	50 *(+/- 2)*	50 *(+/- 1,5)*	50 *(+/- 1,5)*	45 *(+/- 1)*	45 *(+/- 1)*	45 *(+/- 1)*	40 *(+/- 1)*	40 *(+/- 0,5)*	40 *(+/- 0,5)*
Fumier de porcs à l'engrais à base de paille	Type Ib	océanique.altéré	50 *(+/- 1,5)*	50 *(+/- 1,5)*	45 *(+/- 1)*	45 *(+/- 1,5)*	40 *(+/- 1)*	40 *(+/- 1)*	40 *(+/- 0,5)*	35 *(+/- 0,5)*	35 *(+/- 0,5)*	35 *(+/- 0,5)*
Fumier de poulets de chair (après stockage)	Type Ib	océanique.altéré	45 *(+/- 1)*	45 *(+/- 1,5)*	45 *(+/- 1,5)*	45 *(+/- 1,5)*	40 *(+/- 1,5)*	40 *(+/- 1,5)*	35 *(+/- 1,5)*	35 *(+/- 1,5)*	30 *(+/- 1)*	25 *(+/- 1)*
Digestats brut de méthanisation 1	Type II	océanique.altéré	75 *(+/- 1)*	75 *(+/- 1)*	75 *(+/- 1)*	75 *(+/- 1,5)*	75 *(+/- 1)*	70 *(+/- 0,5)*	70 *(+/- 0,5)*	70 *(+/- 0,5)*	70 *(+/- 0,5)*	70 *(+/- 0)*
Digestats brut de méthanisation 2	Type II	océanique.altéré	70 *(+/- 1)*	70 *(+/- 1)*	70 *(+/- 1)*	65 *(+/- 1,5)*	65 *(+/- 1)*	65 *(+/- 1)*	65 *(+/- 0,5)*	65 *(+/- 0,5)*	65 *(+/- 0,5)*	65 *(+/- 0,5)*
Digestats brut de méthanisation 3	Type II	océanique.altéré	65 *(+/- 1,5)*	65 *(+/- 1,5)*	65 *(+/- 1,5)*	60 *(+/- 1,5)*	60 *(+/- 1)*	60 *(+/- 1)*	60 *(+/- 0,5)*	60 *(+/- 0,5)*	55 *(+/- 0,5)*	55 *(+/- 0,5)*
Fientes de poules pondeuses (stockage en fosses profondes)	Type II	océanique.altéré	50 *(+/- 0)*	50 *(+/- 0,5)*	50 *(+/- 1)*	50 *(+/- 0,5)*	50 *(+/- 0,5)*	50 *(+/- 0,5)*	50 *(+/- 1)*	50 *(+/- 1,5)*	45 *(+/- 2)*	40 *(+/- 2)*
Fraction liquide des digestats de méthanisation	Type II	océanique.altéré	70 *(+/- 1)*	70 *(+/- 1)*	65 *(+/- 1)*	65 *(+/- 1,5)*	65 *(+/- 1)*	65 *(+/- 1)*	65 *(+/- 0,5)*	60 *(+/- 0,5)*	60 *(+/- 0,5)*	60 *(+/- 0,5)*
Lisier bovin, logettes, raclage en système couvert	Type II	océanique.altéré	65 *(+/- 1)*	65 *(+/- 1)*	65 *(+/- 1)*	65 *(+/- 1)*	60 *(+/- 1)*	60 *(+/- 0,5)*	60 *(+/- 0,5)*	60 *(+/- 0,5)*	60 *(+/- 0,5)*	60 *(+/- 0)*
Lisier mixte de porc	Type II	océanique.altéré	80 *(+/- 1)*	80 *(+/- 1)*	80 *(+/- 0,5)*	80 *(+/- 0,5)*	75 *(+/- 0,5)*	75 *(+/- 0,5)*	75 *(+/- 0)*	75 *(+/- 0,5)*	75 *(+/- 0)*	75 *(+/- 0,5)*

Tableau 17 : Zone climatique « bassin du Sud-Ouest ». Selon la dénomination du produit et par date d'apport, pourcentage moyen de l'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver. Chaque pourcentage est associé à un écart type (ET en %).

Nom du Produit	**Type Produit**	**Région climatique**	**Pourcentages moyens d'azote potentiellement libéré jusqu'en sortie d'hiver, par rapport à l'azote total apporté**									
			01-juil	**15-juil**	**01-août**	**15-août**	**01-sept**	**15-sept**	**01-oct**	**15-oct**	**01-nov**	**15-nov**
Boues mixte de papeteries C/N>35	Type 0	bassin.du.Sud-Ouest	5 *(+/- 0)*	5 *(+/- 0,5)*	5 *(+/- 0,5)*	5 *(+/- 0,5)*	5 *(+/- 0,5)*	5 *(+/- 0)*	5 *(+/- 0,5)*	5 *(+/- 0,5)*	5 *(+/- 1)*	0 *(+/- 1)*
Compost de déchets verts jeunes et ligneux (peu mature)	Type 0	bassin.du.Sud-Ouest	10 *(+/- 1)*	5 *(+/- 0,5)*	5 *(+/- 0,5)*	5 *(+/- 0,5)*	5 *(+/- 0)*	5 *(+/- 0,5)*	5 *(+/- 1)*	5 *(+/- 1)*	5 *(+/- 1)*	5 *(+/- 1)*
Compost de fumier de bovins	Type Ia	bassin.du.Sud-Ouest	10 *(+/- 5,5)*	10 *(+/- 5,5)*	10 *(+/- 5,5)*	10 *(+/- 5,5)*	10 *(+/- 5,5)*	10 *(+/- 5,5)*	10 *(+/- 5)*	10 *(+/- 5)*	5 *(+/- 5)*	5 *(+/- 4,5)*
Compost de fractions solides de digestats de méthanisation	Type Ia	bassin.du.Sud-Ouest	5 *(+/- 1)*	5 *(+/- 0,5)*	5 *(+/- 0)*	5 *(+/- 0,5)*	5 *(+/- 0)*	5 *(+/- 0,5)*	5 *(+/- 0,5)*	5 *(+/- 1)*	5 *(+/- 1)*	5 *(+/- 1)*
Compost de lisiers de porcs + pailles	Type Ia	bassin.du.Sud-Ouest	35 *(+/- 1)*	35 *(+/- 0,5)*	30 *(+/- 0)*	30 *(+/- 0,5)*	30 *(+/- 0)*	30 *(+/- 0)*	30 *(+/- 0)*	30 *(+/- 0)*	30 *(+/- 0)*	30 *(+/- 0)*
Fumier de bovins, logettes paillée, aire couverte, stockage > 2 mois	Type Ia	bassin.du.Sud-Ouest	45 *(+/- 1,5)*	40 *(+/- 1,5)*	40 *(+/- 1)*	40 *(+/- 1)*	35 *(+/- 0,5)*	35 *(+/- 1)*	35 *(+/- 0,5)*	30 *(+/- 0,5)*	30 *(+/- 0)*	30 *(+/- 0)*
Compost de boues et de déchets verts 2	Type Ib	bassin.du.Sud-Ouest	45 *(+/- 1,5)*	45 *(+/- 2)*	45 *(+/- 2)*	40 *(+/- 2)*	40 *(+/- 1,5)*	40 *(+/- 1,5)*	35 *(+/- 1,5)*	30 *(+/- 1)*	30 *(+/- 1)*	25 *(+/- 1)*
Compost de boues et de déchets verts 3	Type Ib	bassin.du.Sud-Ouest	45 *(+/- 6,5)*	45 *(+/- 6)*	40 *(+/- 6)*	40 *(+/- 6)*	40 *(+/- 6)*	35 *(+/- 5,5)*	35 *(+/- 5,5)*	30 *(+/- 5,5)*	30 *(+/- 5)*	25 *(+/- 5)*
Fumier de bovins, stockage < 2 mois	Type Ib	bassin.du.Sud-Ouest	50 *(+/- 2)*	50 *(+/- 2)*	50 *(+/- 1,5)*	50 *(+/- 1,5)*	45 *(+/- 1)*	45 *(+/- 1)*	45 *(+/- 1)*	40 *(+/- 0,5)*	40 *(+/- 0)*	40 *(+/- 0)*
Fumier de porcs à l'engrais à base de paille	Type Ib	bassin.du.Sud-Ouest	50 *(+/- 1,5)*	50 *(+/- 1,5)*	45 *(+/- 1)*	45 *(+/- 1)*	40 *(+/- 0,5)*	40 *(+/- 0,5)*	40 *(+/- 0,5)*	40 *(+/- 0,5)*	35 *(+/- 0)*	35 *(+/- 0)*
Fumier de poulets de chair (après stockage)	Type Ib	bassin.du.Sud-Ouest	45 *(+/- 1)*	45 *(+/- 1)*	45 *(+/- 1)*	45 *(+/- 1)*	40 *(+/- 1)*	40 *(+/- 1)*	35 *(+/- 1)*	35 *(+/- 1)*	30 *(+/- 0,5)*	25 *(+/- 0,5)*
Digestats brut de méthanisation 1	Type II	bassin.du.Sud-Ouest	75 *(+/- 1)*	75 *(+/- 1)*	75 *(+/- 1)*	75 *(+/- 1)*	75 *(+/- 1)*	70 *(+/- 0,5)*	70 *(+/- 0,5)*	70 *(+/- 0,5)*	70 *(+/- 0)*	70 *(+/- 0)*
Digestats brut de méthanisation 2	Type II	bassin.du.Sud-Ouest	70 *(+/- 1)*	70 *(+/- 1)*	70 *(+/- 1)*	70 *(+/- 1)*	65 *(+/- 1)*	65 *(+/- 0,5)*	65 *(+/- 0,5)*	65 *(+/- 0,5)*	65 *(+/- 0,5)*	60 *(+/- 0,5)*
Digestats brut de méthanisation 3	Type II	bassin.du.Sud-Ouest	65 *(+/- 1)*	65 *(+/- 1)*	65 *(+/- 1)*	65 *(+/- 1)*	60 *(+/- 1)*	60 *(+/- 1)*	60 *(+/- 0,5)*	60 *(+/- 0,5)*	55 *(+/- 0,5)*	55 *(+/- 0,5)*
Fientes de poules pondeuses (stockage en fosses profondes)	Type II	bassin.du.Sud-Ouest	50 *(+/- 0)*	50 *(+/- 0)*	50 *(+/- 0)*	50 *(+/- 0,5)*	50 *(+/- 0)*	50 *(+/- 0)*	50 *(+/- 0,5)*	50 *(+/- 0,5)*	45 *(+/- 1)*	40 *(+/- 1)*
Fraction liquide des digestats de méthanisation	Type II	bassin.du.Sud-Ouest	70 *(+/- 1)*	70 *(+/- 1)*	70 *(+/- 1)*	65 *(+/- 1)*	65 *(+/- 1)*	65 *(+/- 0,5)*	65 *(+/- 0,5)*	60 *(+/- 0,5)*	60 *(+/- 0,5)*	60 *(+/- 0,5)*
Lisier bovin, logettes, raclage en système couvert	Type II	bassin.du.Sud-Ouest	65 *(+/- 1)*	65 *(+/- 1)*	65 *(+/- 1)*	65 *(+/- 1)*	60 *(+/- 0,5)*	60 *(+/- 0,5)*	60 *(+/- 0,5)*	60 *(+/- 0)*	60 *(+/- 0)*	60 *(+/- 0)*
Lisier mixte de porc	Type II	bassin.du.Sud-Ouest	80 *(+/- 0,5)*	80 *(+/- 1)*	80 *(+/- 0)*	80 *(+/- 0,5)*	75 *(+/- 0,5)*	75 *(+/- 0)*	75 *(+/- 0,5)*	75 *(+/- 0)*	75 *(+/- 0)*	75 *(+/- 0)*