

Économies d'engrais azotés grâce à la méthode des normes corrigées: expériences tirées du projet AgroCO₂ncept

Elisabeth Tanner, Frank Liebisch et Daniel Bretscher
Agroscope, 8046 Zurich, Suisse

Renseignements: Frank Liebisch, e-mail: frank.liebisch@agroscope.admin.ch

DOI: <https://doi.org/10.34776/afs15-304f> Date de publication: 16. Décembre 2024



Les exploitations dans lesquelles les économies d'azote sont possibles pourraient réduire leurs émissions de gaz à effet de serre en renonçant à l'utilisation des engrais minéraux. (Photo: Gabriela Brändle, Agroscope)

Résumé

L'objectif de zéro net d'ici à 2050 nécessite une réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) dans tous les secteurs, y compris dans l'agriculture suisse. L'une des approches pour y parvenir consiste à optimiser la fertilisation azotée (N) au moyen de la méthode des normes corrigées. En tenant compte des conditions pédologiques, climatiques et culturales, des facteurs de correction permettent d'adapter la norme de fertilisation azotée aux besoins réels des plantes, afin d'éviter les excès d'azote et les émissions de GES qui en découlent. Dans le cadre du projet AgroCO₂ncept, axé sur l'utilisation durable des ressources, les normes corrigées ont été appliquées durant quatre ans (2018-2021) dans onze exploitations de la vallée de la Flaach (ZH) dans le cadre d'une analyse ex post. Les résultats ont été comparés à la norme de fertilisation azotée et

aux pratiques de fertilisation habituelles de chaque exploitation. Selon les pratiques actuelles de fertilisation, l'application des normes corrigées permettrait des économies d'azote allant de $-7,6 \text{ kg N ha}^{-1}$ à $-75,1 \text{ kg N ha}^{-1}$, mais pourrait aussi augmenter les besoins en engrais de $+1,4 \text{ kg N ha}^{-1}$ à $+56,7 \text{ kg N ha}^{-1}$. Ainsi, l'utilisation des normes corrigées ne permettrait donc pas toujours de réduire les émissions de GES. Néanmoins, cette méthode fournit des informations précieuses pour planifier la fertilisation à l'échelle de l'exploitation et de la parcelle et souligne l'importance des mesures spécifiques à l'exploitation pour la protection du climat.

Key words: location adapted, N-fertilization, GHG emissions.

Introduction

L'objectif zéro net d'ici à 2050, adopté par le Conseil fédéral en 2019, impose une réduction globale des émissions de gaz à effet de serre (GES) dans tous les secteurs (Conseil fédéral, 2021). Cet objectif concerne donc aussi l'agriculture suisse, qui contribue à hauteur d'environ 14 % aux émissions de GES de l'ensemble du pays (FOEN, 2024). Dès 2012, 24 agriculteurs et agricultrices de la vallée de la Flaach (ZH) se sont regroupés au sein de l'association AgroCO₂ncept, avec pour ambition de développer et d'appliquer des pratiques agricoles respectueuses du climat et efficaces en termes de ressources (Thiébaud *et al.*, 2023). Depuis 2016, le projet d'utilisation durable des ressources s'est fixé l'objectif «20/20/20», ce qui veut dire:

- une réduction de 20 % des émissions de GES grâce à des économies de ressources, au stockage de CO₂ et à la production d'énergies renouvelables;
- une réduction de 20 % des coûts grâce à une meilleure efficacité et à l'exploitation des synergies dans la production et
- une augmentation de 20 % de la valeur ajoutée grâce à l'acquisition et au transfert de connaissances ainsi qu'à l'amélioration de l'image des acteurs et de la région, notamment par la vente de produits respectueux du climat (Thiébaud *et al.*, 2023; association AgroCO₂ncept, 2023).

Pour atteindre ces objectifs, un catalogue individuel de 39 mesures a été établi pour chaque exploitation participante.

L'une des mesures phares consiste à optimiser la fertilisation en l'adaptant en termes de forme et de quantité afin de mieux tenir compte des besoins des plantes tout en réduisant l'utilisation d'engrais et de machines (Thiébaud *et al.*, 2023). La fertilisation azotée (N), res-

ponsable d'environ 18 % des émissions agricoles de GES, constitue la deuxième source agricole de GES après la fermentation entérique des animaux de rente (OFAG, 2023). Dans les Principes de fertilisation des cultures agricoles en Suisse (PRIF, Sinaj et Richner (2017), la méthode des normes corrigées est décrite comme l'une des deux approches recommandées pour une fertilisation azotée adaptée aux caractéristiques du site.

Les normes corrigées visent à ajuster la quantité d'engrais azoté nécessaire selon les spécificités de la parcelle, en tenant compte des caractéristiques locales du sol, du climat et des cultures, afin de mieux répondre aux besoins des plantes. Différents essais scientifiques menés sur de petites parcelles en Suisse ont déjà démontré que l'application de ces normes permet de réduire la fertilisation azotée tout en maintenant les rendements (Grossrieder *et al.*, 2022; Maltas *et al.*, 2015). Il est donc possible d'éviter les excédents d'azote et d'en augmenter l'efficacité, ce qui contribue à atténuer le conflit d'objectifs entre la protection de l'environnement et la productivité (Grossrieder *et al.*, 2022). Au niveau international, cette méthode correspond aux standards professionnels et s'appuie sur des principes similaires à ceux utilisés dans d'autres pays d'Europe centrale (Jordan-Meille *et al.*, 2023). De plus, les normes corrigées nécessitent relativement peu de temps et de ressources financières par rapport à d'autres méthodes de fertilisation azotée adaptée au site, comme la méthode Nmin (Grossrieder *et al.*, 2022). Cette différence s'explique par le fait que le calcul des normes corrigées se base sur des données du calendrier des champs et des résultats d'analyses de sol qui sont déjà documentés dans une grande partie des exploitations agricoles suisses pour les prestations écologiques requises (PER). Cependant, malgré leurs avantages, les normes corrigées ne sont pas appliquées

Tableau 1 | Vue d'ensemble des exploitations.

Numéro de l'exploitation	Exploitation	Branches de production			Surface fertilisable				Cheptel	
		Principale	Annexe	Annexe	2018	2019	2020	2021	UGB	UGB ha ⁻¹ (d)
1	PER	Vaches mères	Herbages	Forêt	27,7 ^(c)	27,6	30,8	– ^(a)	29,9	1,0
2	PER	Vaches laitières	Herbages	Arbres fruitiers sauvages	– ^(a)	43,6 ^(c)	43,5	– ^(a)	60,9	1,4
3	Bio	Grandes cultures	Herbages	Arbres fruitiers sauvages	31,4 ^(c)	31,4	30,6	30,6 ^(b)	0,0	0,0
8	PER	Grandes cultures	Cultures fruitières	–	9,8 ^(c)	9,8	12,2	8,6 ^(b)	0,1	0,0
9	PER	Engraissement bovin	Grandes cultures	Forêt	– ^(a)	41,5 ^(c)	41,5	– ^(a)	30,1	0,7
11	PER	Engraissement bovin	Grandes cultures	Herbages	– ^(a)	– ^(a)	65,8	– ^(a)	121,2	1,8
13	PER	Vaches laitières	Grandes cultures	–	39,1 ^(c)	39,1	45,4	45,4 ^(b)	70,1	1,6
14	Bio	Grandes cultures	Herbages	Vaches-mères	– ^(a)	26,1 ^(c)	26,5	28 ^(b)	11,4	0,4
15	PER	Vaches laitières	Grandes cultures	Cultures fruitières	– ^(a)	27,2	27,0	– ^(a)	52,9	1,9
17	PER	Vaches laitières	Grandes cultures	–	– ^(a)	32,2 ^(c)	63,8	68,6 ^(b)	87,5	1,5
18	PER	Vaches laitières	Grandes cultures	–	61,7 ^(c)	66,8	55,9	– ^(a)	86,7	1,4
Total	–	–	–	–	169,7	345,4	443,1	181,2	550,8	–

^(a) Aucune donnée disponible, ^(b) Aucune information disponible sur la quantité d'engrais épandue, ^(c) Aucun effet résiduel des engrais organiques épandus l'année précédente n'est disponible, ^(d) Calculé à l'aide de la moyenne de la surface fertilisable sur les années prises en compte ici.

de manière systématique dans la pratique, notamment en raison d'un manque de connaissances sur leur applicabilité et leur efficacité à l'échelle des exploitations. Le projet AgroCO₂ncept, qui est axé sur une utilisation durable des ressources et bénéficie d'un accompagnement scientifique, offrait donc un cadre idéal pour tester et évaluer l'application des normes corrigées dans la pratique en déterminant les économies potentielles d'azote et de GES pour les exploitations participantes.

Matériel et méthode

Exploitations

Sur les 24 exploitations participant au projet AgroCO₂ncept, les données de onze d'entre elles ont été évaluées sur une période de quatre ans (2018–2021). Des données complètes n'étaient pas disponibles pour toutes les exploitations chaque année. Par conséquent, 31 années d'exploitation ont été analysées au total (tab. 1). Les exploitations sont représentatives des exploitations typiques de la région: cinq ont pour branche de production principale l'élevage de vaches laitières, trois les grandes cultures, deux l'engraissement bovin et une l'élevage de vaches mères. Toutes les exploitations respectent les PER et deux d'entre elles suivent également les directives de *Bio Suisse*. Parmi ces exploitations, deux n'ont pas de bétail (0 ou 0,1 UGB), tandis que les neuf autres ont un cheptel compris entre 11,4 et 121,0 UGB. La surface fertilisable variait entre 8,6 ha et 68,6 ha selon l'exploitation. Les cultures les plus représentées en surface étaient les herbages, le maïs (ensilage) (*Zea mays*), le blé (d'automne) (*Triticum aestivum*) et la betterave sucrière (*Beta vulgaris*).

Sur les quelque 1139 ha de surfaces analysées (cumul des données sur toutes les années), les analyses de sol (prélèvements PER) contenant des informations sur la teneur en matière organique (MO) et en argile étaient disponibles pour environ 982 ha (86 %). La teneur en matière organique du sol était en moyenne de 3,1 +/- 0,7 % et la teneur en argile de 22,5 +/- 5,2 %.

Méthode des normes corrigées

La méthode de calcul de la quantité d'engrais azoté selon les normes corrigées est basée sur le modèle décrit par Sinaj et Richner (2017). Ce modèle adapte la norme de fertilisation azotée spécifique à la culture, calibrée pour un rendement moyen (appelé rendement de référence) dans des conditions typiques en Suisse, aux conditions spécifiques du site et de l'exploitation. L'adaptation se fait au moyen de facteurs de correction qui tiennent compte des conditions caractéristiques du

sol, du climat et du mode de culture (formule 1). Les normes corrigées supposent que les différents facteurs de correction s'ajoutent sans interactions entre eux. La correction de N s'obtient en faisant la somme des facteurs de correction.

Formule 1 | Calcul de la fertilisation azotée recommandée selon les normes corrigées.

$$N_{\text{norme}} = N_{\text{Norme}} + f_{\text{Rdt}} + f_{\text{MOS}} + f_{\text{PC}} + f_{\text{Ma}} + f_{\text{Pluie}} + f_{\text{TS}} + f_{\text{Pr}}$$

f_{Rdt}	adapte la quantité d'engrais azoté en cas d'écart entre le rendement attendu et le rendement de référence.
f_{MOS}	tient compte de la libération progressive d'azote par la minéralisation de la matière organique (MO) du sol en fonction de la teneur en MO et en argile du sol.
f_{PC}	désigne l'influence du précédent cultural (précédent cultural et culture intermédiaire) et de la date d'incorporation sur la minéralisation de l'azote des résidus de récolte.
f_{Ma}	quantifie la part de N contenue dans les engrais organiques de l'année précédente, disponible pour les plantes l'année suivant l'épandage.
f_{Pluie}	tient compte des pertes d'azote par lessivage en hiver et au printemps. Pour répartir les précipitations hivernales et printanières (pour f_{Pluie}) en précipitations peu importantes (< 60 mm), normales (60–90 mm) et importantes (> 90 mm), on a utilisé la moyenne des stations de mesures de Winterthur-Wülflingen et d'Uhwiesen, en se basant sur les données d'agrometeo.ch.
f_{TS}	reflète les effets du sarclage (répété) sur la minéralisation de la MO.
f_{Pr}	fait référence aux répercussions des conditions météorologiques au printemps (humidité et température) sur la minéralisation de la MO et la disponibilité de l'azote. Pour la présente analyse, le facteur $f_{\text{printemps}}$ n'a pas été pris en compte, faute de critère validé disponible à l'époque pour décrire les conditions météorologiques.

L'ajustement de l'azote au moyen des normes corrigées permet d'identifier deux potentiels d'économie d'azote: le potentiel théorique d'économie d'azote et le potentiel d'économie d'azote réalisable. Le potentiel théorique d'économie d'azote est déterminé en comparant la quantité d'azote calculée selon les normes corrigées avec la norme de fertilisation azotée. Il reflète ainsi l'effet de l'adaptation au site et au mode de gestion (formule 2).

Formule 2 | Potentiel théorique d'économie d'azote

$$\Delta N_{\text{théorique}} = N_{\text{Normes corrigées}} - N_{\text{Norme}}$$

En revanche, le potentiel d'économie d'azote réalisable est déterminé en comparant la quantité d'engrais azoté calculée selon les normes corrigées et la quantité d'engrais azoté effectivement épandue (formule 3). Le potentiel d'économie d'azote réalisable permet ainsi une analyse ex post de la pratique de fertilisation d'une exploitation ou une estimation de l'effet d'un passage aux normes corrigées.

Formule 3 | Potentiel d'économie d'azote réalisable

$$\Delta N_{\text{réalisable}} = N_{\text{Normes corrigées}} - N_{\text{épandu}}$$

Potentiels de réduction des GES

Une économie potentielle d'azote peut contribuer à la réduction des émissions de GES. D'une part, les besoins en engrais azotés diminuent, ce qui permet d'éviter les émissions de GES lors de la production, notamment d'engrais minéraux. D'autre part, la réduction des quantités d'engrais épandues diminue les émissions directes

et indirectes de N₂O pendant et après l'épandage, car moins d'azote excédentaire est disponible pour les transformations microbiennes (nitrification, dénitrification) qui génèrent du N₂O (Graham *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2021). Cela s'applique aussi bien aux engrais minéraux qu'aux engrais organiques.

Afin d'estimer approximativement le potentiel de réduction des émissions de GES grâce à l'application des normes corrigées pour les onze exploitations analysées, les chercheuses et chercheurs ont supposé de manière simplifiée que l'azote serait économisé sous forme d'engrais de synthèse. Les émissions de GES liées à la production de ces engrais ont été estimées à environ 3 tonnes d'équivalent CO₂ par tonne d'azote (Hoxha & Christensen, 2019; Yara, 2023). Pour évaluer les émissions de GES pendant et après l'épandage d'engrais, les chercheuses et chercheurs ont appliqué l'approche méthodologique du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2019), actuellement utilisée pour l'inventaire suisse des gaz à effet de serre (OFEV, 2024). Dans ce cadre, les émissions de N₂O sont calculées sur la base de facteurs d'émission qui déterminent la quantité de N₂O émise par rapport à la quantité d'azote épandue (formule 4) ce qui inclut à la fois les émissions directes de N₂O issues des apports d'azote et les émissions indirectes de N₂O. Ces dernières se produisent lorsque l'azote contenu dans les engrais se volatilise sous forme d'ammoniac (NH₃ ou d'oxydes d'azote (NO_x), puis retombe dans l'environnement. En outre, des émissions indirectes de N₂O peuvent également se produire lorsque l'azote pénètre dans les sols par lessivage ou ruissellement de surface et qu'il est ensuite transformé en N₂O.

Formule 4 | Facteur de calcul des émissions directes et indirectes de N₂O en équivalents CO₂ après l'épandage d'engrais de synthèse.

$$F_{\text{épandage.Syn}} = (EF_1 + (\text{Frac}_{\text{GASF}} * EF_4) + (\text{Frac}_{\text{LEACH}} * EF_5)) * \frac{44}{28} * \text{GWP}_{\text{N}_2\text{O}}$$

$$= 5,6833 \text{ kg éq. CO}_2 \text{ par kg N}$$

Sachant que:

- EF_1 = Facteur d'émission pour les émissions de N₂O provenant des intrants azotés (émissions directes)
= 0,01 kg N₂O (kg intrant azoté)¹, valeur standard selon IPCC (2019)
- $\text{Frac}_{\text{GASF}}$ = Pourcentage d'engrais de synthèse, se volatilisant sous forme de NH₃ et/ou de NO_x (émissions indirectes)
= 0,064 (kg NH₃-N + NO_x-N) (kg N épandu)⁻¹, valeur spécifique à la Suisse selon l'inventaire national des gaz à effet de serre (OFEV, 2024)
- EF_4 = Facteur d'émission pour les émissions de N₂O dues aux retombées atmosphériques de N sur les sols et les surfaces
= 0,0264 kg N₂O-N (kg NH₃-N + NO_x-N volatilisé)⁻¹, valeur spécifique à la Suisse selon l'inventaire national des gaz à effet de serre (OFEV, 2024)
- $\text{Frac}_{\text{LEACH}}$ = Pourcentage des pertes azotées par lessivage et ruissellement de surface (émissions indirectes)
= 0,178 kg N (kg intrant azoté)¹, valeur spécifique à la Suisse selon l'inventaire national des gaz à effet de serre (OFEV, 2024)
- EF_5 = Facteur d'émission pour les émissions de N₂O par lessivage et ruissellement de surface = 0,011 kg N₂O-N (kg N lessivé)¹, valeur standard selon IPCC (2019)
- $\text{GWP}_{\text{N}_2\text{O}}$ = Global Warming Potential
= 265 selon le Fifth Assessment Report IPCC (AR5) (IPCC, 2014)

Afin d'évaluer les variations des émissions de GES dues aux recommandations de fertilisation basées sur les normes corrigées, celles-ci ont été comparées aux émissions de GES de l'ensemble de l'exploitation en 2018 (Thiébaud *et al.*, 2023). Ces émissions globales comprennent les émissions de la production agricole et de ses prestations en amont.

Résultats

L'adaptation de la fertilisation aux conditions du site grâce aux normes corrigées permet des économies d'azote

Le potentiel théorique d'économie d'azote correspondait à une réduction comprise entre -1 kg N ha⁻¹ et -35 kg N ha⁻¹ par exploitation et par an par rapport à la norme de fertilisation azotée (fig. 1). Dans deux cas seulement, l'application des normes corrigées aurait conduit à une légère augmentation de la quantité d'engrais recommandée de +0,5 kg N ha⁻¹, respectivement de +6 kg N ha⁻¹. Le potentiel théorique moyen d'économie d'azote était donc d'environ -14 % par rapport à la norme de fertilisation azotée (-14 kg ha⁻¹).

Les facteurs des normes corrigées varient selon les exploitations

La composition des facteurs de correction des normes corrigées variait selon les exploitations et les années (fig. 2). Cependant, c'est f_{Ma} (effet ultérieur des engrais organiques de l'année précédente) qui a eu l'influence la plus forte sur la correction de l'azote, suivi de f_{PC} (culture précédente, c'est-à-dire culture précédente et culture intermédiaire) et de f_{Mos} (libération progressive d'azote par minéralisation de la matière organique dans le sol). Il faut toutefois noter que pour la première année d'analyse d'une exploitation, f_{Ma} n'était pas disponible (pas de données). De même, f_{Mos} n'a pu être quantifiée que pour les parcelles dont les analyses d'échantillons de sol étaient disponibles.

Selon les pratiques de fertilisation, les normes corrigées indiquent également des besoins en fertilisation plus élevés

Si l'on compare la recommandation de fertilisation azotée selon les normes corrigées non pas à la norme de fertilisation azotée, mais à la quantité d'engrais azoté réellement épandue, on obtient le potentiel d'économie d'azote réalisable, révélant le potentiel réel d'un ajustement des pratiques de fertilisation. Les valeurs négatives indiquent une possibilité de réduction des apports d'engrais. Sur 12 des 26 années étudiées, les potentiels

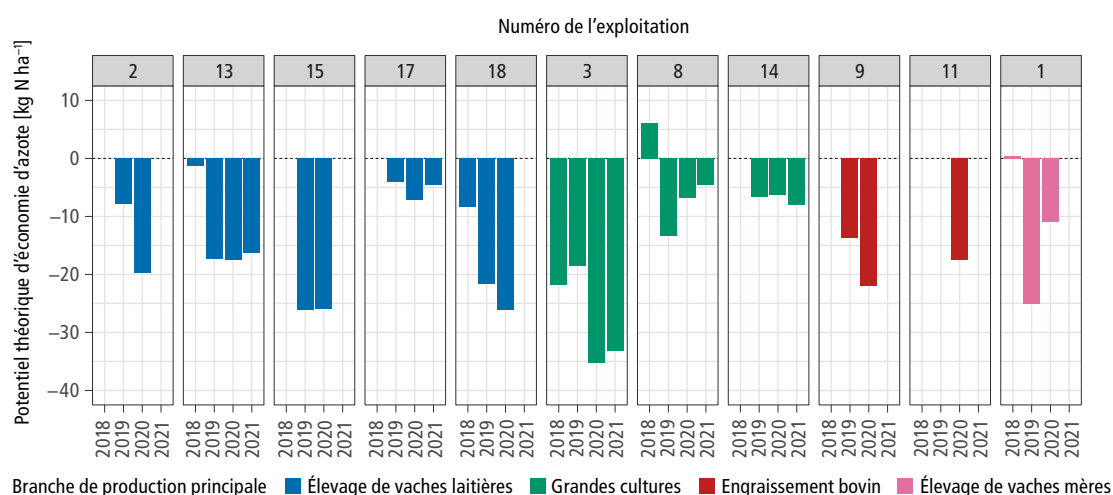


Fig. 1 | Potentiel théorique d'économie d'azote (fertilisation selon les normes corrigées – norme de fertilisation) par exploitation et par an. Les valeurs négatives indiquent une économie, les valeurs positives une augmentation de la quantité d'engrais azoté recommandée selon les normes corrigées par rapport à la norme de fertilisation.

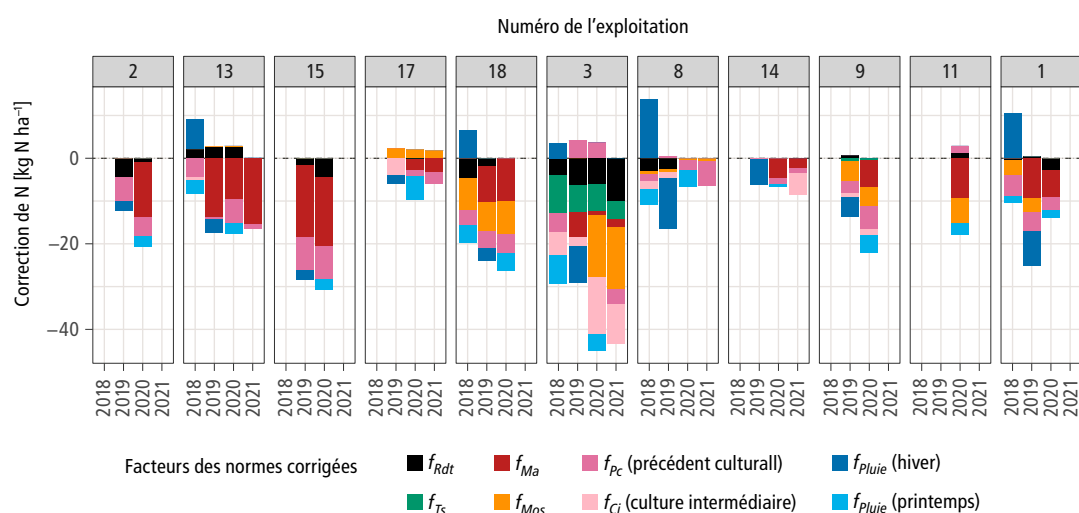


Figure 2 | Répartition des différents facteurs de correction des normes corrigées. Les valeurs négatives indiquent une réduction de la quantité d'engrais lors de l'application des normes corrigées par rapport à la norme de fertilisation.

d'économie d'azote se situent entre $-7,6 \text{ kg N ha}^{-1}$ et $-75,1 \text{ kg N ha}^{-1}$ (fig. 3, les données sur les quantités épanchées n'étaient pas disponibles pour l'année 2021). Les exploitations laitières se distinguent particulièrement, puisqu'elles représentent neuf des douze cas présentant un potentiel d'économie d'azote négatif. Pour quatorze années d'exploitation, le potentiel d'économie d'azote réalisable était en revanche positif, c'est-à-dire que les normes corrigées indiquaient un besoin de fertilisation plus élevé, allant de $+1,4 \text{ kg N ha}^{-1}$ à $+56,7 \text{ kg N ha}^{-1}$. Dans ce cas, ce sont les exploitations de grandes cultures qui se distinguaient particulièrement. En moyenne, pour l'ensemble des exploitations, l'application des normes corrigées entraînerait une augmentation de la fertilisation de $+1 \text{ kg N ha}^{-1}$, soit environ $+1\%$ par rapport aux quantités d'engrais azoté effectivement épanchées.

En passant de l'échelle de l'exploitation à celle de la parcelle, on observe qu'au sein de chaque exploitation, certaines parcelles ont reçu une quantité d'azote supérieure à celle recommandée par les normes corrigées (<0), tandis que d'autres en ont reçu moins (>0 , fig. 4). Pour certaines exploitations, des tendances se dégagent en fonction de la culture (principale) pratiquée. L'exploitation numéro 17 en est un exemple: les prairies ou pâturages intensifs y ont toujours été fertilisés en dessous des préconisations des normes corrigées, ce qui représente un potentiel d'économie d'azote positif.

Le potentiel d'économie de GES n'est pas disponible pour toutes les exploitations

A partir des potentiels d'économie d'azote réalisables, l'étape suivante a consisté à estimer le potentiel d'éco-

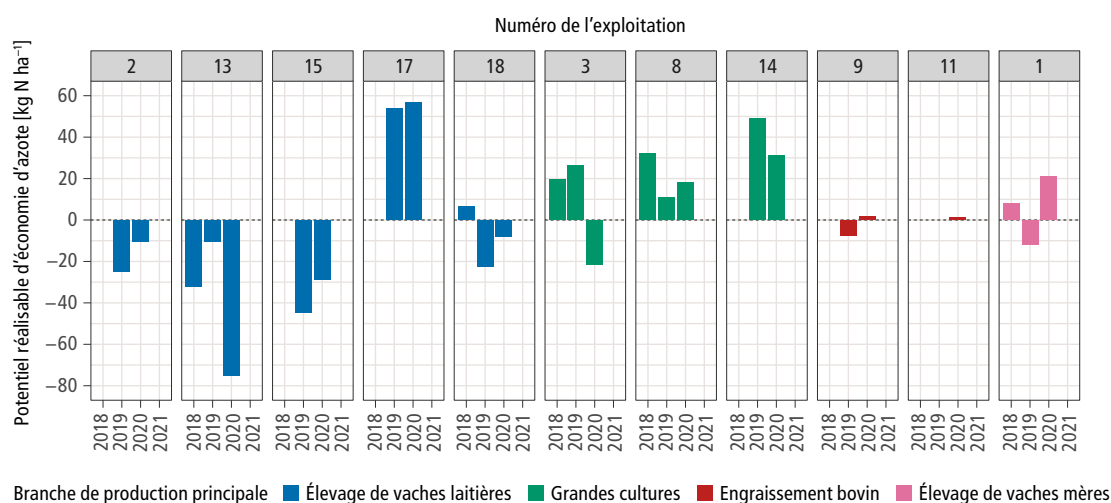


Figure 3 | Potentiel d'économie d'azote réalisable (fertilisation selon les normes corrigées – quantités d'engrais effectivement épanchues) par exploitation et par an. Les valeurs négatives indiquent une économie, les valeurs positives une augmentation de la quantité d'azote apportée en raison de la recommandation des normes corrigées par rapport à la pratique habituelle de l'exploitation.

nomie de GES (en t éq. CO₂) pour illustrer les effets d'un changement de pratiques de fertilisation (fig. 5). Dans les exploitations et pour les années où des économies d'azote seraient possibles grâce à l'application des normes corrigées (c'est-à-dire un potentiel d'économie d'azote réalisable négatif), les économies de GES correspondantes par exploitation et par an se situaient entre -2,5 t éq. CO₂ (exploitation 9 en 2019; -0,8 % des émissions totales de GES de l'exploitation en 2018) et -28,1 t éq. CO₂ (exploitation 13 en 2020; -5,0 % des émissions totales de GES de l'exploitation en 2018).

Pour certaines exploitations, il y aurait cependant aussi une augmentation des émissions de GES entre +0,8 t éq. CO₂ (exploitation 11 en 2020; +0,1 % par rapport aux émissions totales de GES de l'exploitation en 2018) et +33,2 t éq. CO₂ (exploitation 17 en 2020; +5,4 % par rapport aux émissions totales de GES de l'exploitation en 2018) si l'on utilisait davantage d'engrais. Pour l'ensemble des exploitations, une fertilisation selon les normes corrigées permettrait d'économiser au total environ -7,2 t éq. CO₂.

Discussion

Potentiel agronomique et écologique

Le potentiel théorique d'économie d'azote était négatif pour la plupart des exploitations et des années, ce qui indique que les normes corrigées ont généralement entraîné une réduction de la quantité d'engrais recommandée par rapport à la norme de fertilisation azotée. Toutefois, l'ampleur de cette réduction variait selon les exploitations et les années en raison des différents facteurs de correction (fig. 2). Certains de ces facteurs

reflètent l'effet des conditions du site et ne peuvent pas être influencés par l'exploitant ou très peu, par exemple f_{Mos} ou f_{Pluie} . D'autres facteurs, en revanche, reflètent des choix de gestion, comme f_{Pcr} , f_{Ma} ou f_{Ts} et dépendent des décisions de gestion ou des structures d'exploitation. Cela illustre la capacité des normes corrigées à s'adapter aux conditions spécifiques de chaque exploitation et de chaque site, comme en témoigne également la variation des potentiels d'économie d'azote à l'échelle de la parcelle (fig. 4).

Contrairement aux potentiels d'économie d'azote théoriques, majoritairement négatifs, les potentiels d'économie d'azote réalisables à l'échelle de l'exploitation ont présenté des valeurs aussi bien positives que négatives. Sur l'ensemble des exploitations, cela a donc conduit en moyenne à une légère fertilisation supplémentaire de +1 kg N ha⁻¹ lorsque les recommandations de fertilisation suivaient les normes corrigées, par rapport aux quantités d'engrais effectivement épanchées. Autrement dit, un grand nombre d'exploitations, notamment les exploitations de grandes cultures, ont apparemment appliqué moins d'azote que ce qui est indiqué dans la norme de fumure ou les norme corrigées (fig. 3; potentiel d'économie d'azote > 0). À l'inverse, les exploitations laitières, en particulier, affichent parfois les plus grands potentiels d'économie d'azote de toutes les exploitations, avec jusqu'à -75 kg N ha⁻¹. Une adaptation des pratiques de fertilisation aux normes corrigées pourrait donc améliorer l'efficacité de l'azote, en particulier dans les exploitations laitières et permettrait en plus de réduire les émissions de GES dues à la production et à l'utilisation d'engrais de synthèse (fig. 5), sous réserve d'une baisse des achats, avec à la clé des avantages financiers.

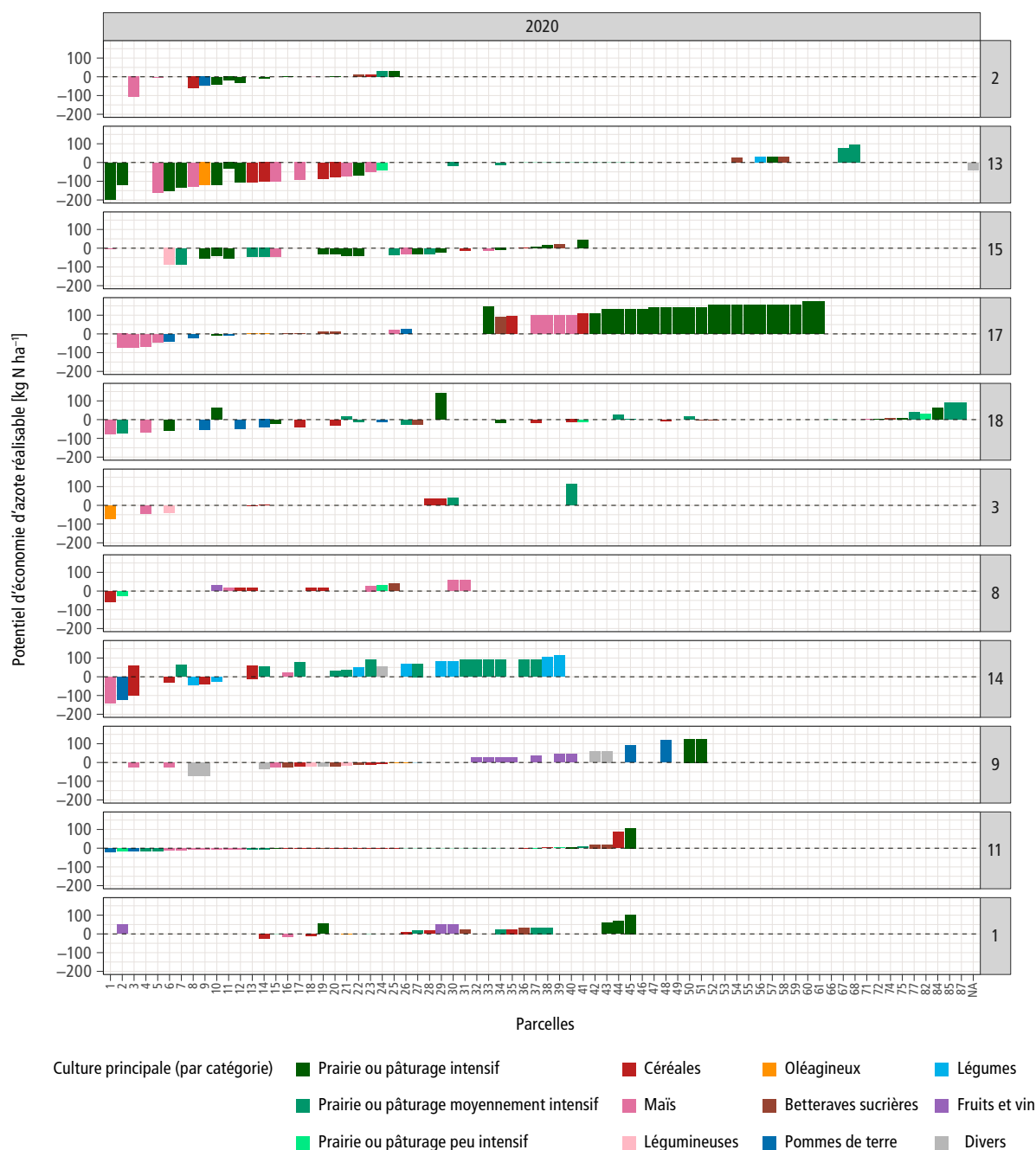


Figure 4 | Potentiel d'économie d'azote réalisable à l'échelle de la parcelle, représenté par un code couleur selon la culture principale cultivée pour l'année 2020. Les valeurs négatives indiquent une économie, les valeurs positives une augmentation de la quantité d'azote apportée.

Pour les exploitations et les années où aucune économie d'azote n'était réalisable, il convient de noter que cette situation est en partie dû à l'impossibilité de prendre en compte tous les facteurs de correction pour certaines années d'exploitation, ce qui conduit souvent à une sous-estimation de la correction de l'azote. Cela concerne en particulier f_{Ma} pour la première année d'analyse, car aucune information sur la quantité d'engrais organique épandue l'année précédente n'était dis-

ponible. C'est également le cas de f_{MOSr} car pour certaines parcelles analysées, aucune donnée n'était disponible sur les teneurs en MO et en argile du sol. En raison de l'influence relativement forte de ces deux facteurs par rapport aux autres (fig. 2), on peut supposer que pour ces années ou ces parcelles, la correction azotée, et donc le potentiel d'économie d'azote, a été sous-estimé. Pour une application ultérieure des normes corrigées dans les années ou projets à venir, il est donc essentiel de garan-

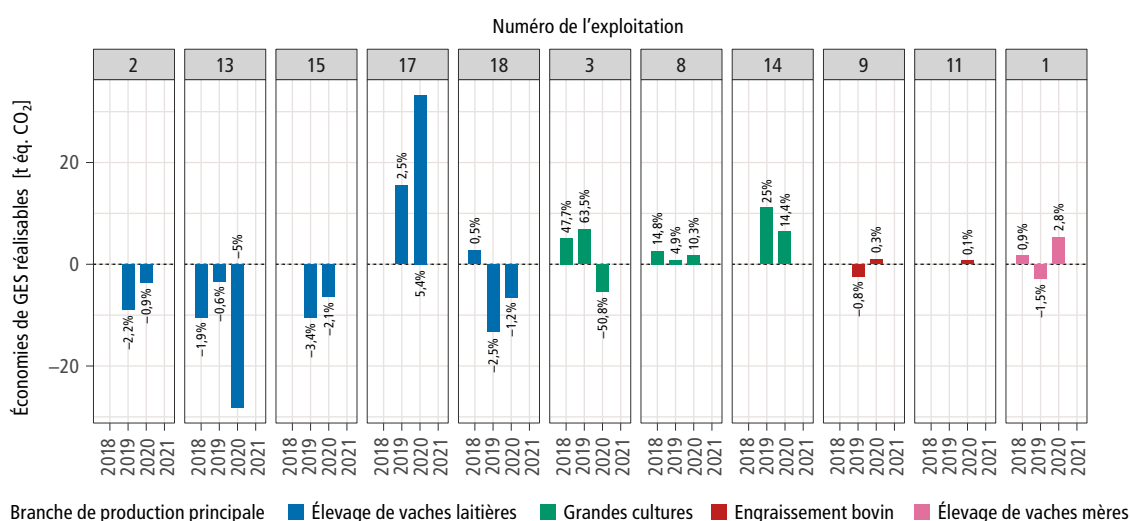


Figure 5 | Économies de GES possibles sur la base des potentiels d'économie d'azote réalisables en cas de changement de pratiques de fertilisation selon la recommandation des normes corrigées. Les pourcentages indiqués mettent en relation les économies de GES réalisables avec le bilan GES des exploitations en 2018 (Thiébaud *et al.*, 2023).

tir une base de données aussi complète et précise que possible. Ce n'est qu'en prenant en compte tous les facteurs pertinents que l'on pourra pleinement évaluer le potentiel des normes corrigées en matière d'économies d'azote et de réduction des émissions de GES. En outre, une adaptation en fonction du potentiel de rendement réel ou attendu peut également influencer de manière significative les besoins en engrais calculés. Une prise en compte correcte du rendement normal n'a toutefois pas pu être vérifiée dans le cadre du projet, faute de données disponibles.

Comparaison avec le Suisse-Bilanz

Pour situer les normes corrigées dans le contexte actuel, il faut les comparer au Suisse-Bilanz. En Suisse, le Suisse-Bilanz est l'instrument central pour établir le bilan de fumure conformément à la législation et il constitue l'une des conditions préalables à l'obtention des PER. Ce système de calcul repose principalement sur les rendements attendus et ne tient pas compte des facteurs de correction spécifiques des normes corrigées, à l'exception de f_{Rdt} . Cette approche peut donc conduire à une surestimation des besoins en éléments nutritifs et, par conséquent, augmenter le risque d'excédents et de pertes d'azote. Pour l'année 2020 par exemple, les besoins en azote des plantes calculés selon le Suisse-Bilanz ont été surestimés de plus de 8 t N, soit environ 18 kg N ha⁻¹, pour les onze exploitations étudiées, ce qui correspond à la somme de tous les facteurs de correction, à l'exception de f_{Rdt} . Il ne s'agit toutefois ici que d'un relevé ponctuel et une période d'observation plus longue serait nécessaire pour valider ces résultats.

Limites de l'étude

Certaines limites rendent difficile l'évaluation définitive des normes corrigées dans le contexte de l'exploitation. L'une des principales limites réside dans le fait que la présente analyse repose sur une observation ex post, sans que les exploitations aient effectivement adapté leurs pratiques de fertilisation en fonction des normes corrigées. Il serait toutefois important d'évaluer l'impact de l'adoption de ces normes tant sur le produit récolté (rendement et qualité) que sur la fertilité du sol. En effet, bien que les normes corrigées visent à optimiser l'approvisionnement des cultures en azote, elles ne prennent pas en compte la préservation de la fertilité du sol. Il pourrait en résulter des effets indésirables, en raison de la baisse de la MO due à la réduction des quantités d'engrais organiques épandues. De plus, dans le cadre du projet, la détermination des besoins en fertilisation selon les normes corrigées se limitait à l'azote, sans considérer d'autres éléments nutritifs essentiels pour les plantes, tels que le phosphore, le potassium ou le magnésium, ce qui peut poser problème, notamment lors de l'utilisation d'engrais organiques, dont le rapport nutritif ne correspond souvent pas aux besoins des plantes. Il convient également de souligner que les normes corrigées aident uniquement à déterminer les besoins totaux en azote. La répartition temporelle et spatiale des apports d'engrais, le choix des engrais ainsi que les mesures techniques sont autant d'aspects déterminants pour une fertilisation efficace (Johnston & Bruulsema, 2014; Snyder, 2017). Ces points montrent clairement que, malgré les résultats prometteurs des normes corrigées en termes d'économies d'azote et de réductions de GES, il reste des pistes d'amélioration pour leur utilisation dans la pratique.

Conclusions

Dans le cadre du projet d'utilisation durable des ressources AgroCO₂ncept, l'évaluation des besoins en engrais selon les normes corrigées a été appliquée pour la première fois à l'échelle des exploitations. Il en ressort que, selon les pratiques actuelles de fertilisation, ces normes indiquent des besoins en engrais plus élevés pour certaines exploitations. Cependant, il s'est également avéré que des économies d'azote et, par conséquent, des réductions d'émissions de GES étaient possibles. Autrement dit, il est important de prendre en compte les mesures de manière spécifique à l'exploitation. Dans l'ensemble, l'analyse a montré une réduction des émissions de GES sur l'ensemble des exploitations, mettant en avant la contribution des normes corrigées à la protection du climat dans l'agriculture.

Alors que la présente évaluation permet de tirer des conclusions précieuses pour les exploitations participantes et la région, il serait pertinent d'étendre l'utilisation des normes corrigées à l'avenir, en les testant dans

des régions aux caractéristiques agricoles différentes, comme dans des systèmes à forte densité animale ou axés sur les herbages. Cette mise en perspective dans différents contextes agroécologiques permettrait de valider l'applicabilité et l'efficacité générale et, par conséquent, de mettre en évidence les besoins d'adaptation si nécessaire. La conséquence peut être une application plus large des normes corrigées, en montrant des potentiels d'amélioration spécifiques à l'exploitation et en contribuant ainsi à la réduction des excédents d'éléments nutritifs agricoles et des émissions de GES. ■

Remerciements

- Martin Stüssi et Hansruedi Oberholzer pour le développement et l'optimisation continue de l'outil de fertilisation destiné au calcul des normes corrigées.
- Hansruedi Oberholzer, Daniel Widmer et Andreas Rüegg pour la préparation et la plausibilisation des plans de fumure.
- Esther Thiebaud pour la mise à disposition des bilans GES des exploitations.
- Maria Bystricky pour son soutien dans les calculs de GES.

Bibliographie

- Conseil fédéral suisse. (2021). Stratégie climatique à long terme de la Suisse <https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/fr/dokumente/klima/fachinfo-daten/langfristige-klimastrategie-der-schweiz.pdf.download.pdf/Langfristige%20Klimastrategie%20der%20Schweiz.pdf>
- FOEN. (2024). Switzerland's Greenhouse Gas Inventory 1990–2022: National Inventory Document and reporting tables. Submission of 2024 under the United Nations Framework Convention on Climate Change.
- Graham, R. F., Wortman, S. E., & Pittelkow, C. M. (2017). Comparison of Organic and Integrated Nutrient Management Strategies for Reducing Soil N₂O Emissions. *Sustainability*, 9(4), 510. <https://doi.org/10.3390/su9040510>
- Grossrieder, J., Ringger, C., Argento, F., Grandgirard, R., Anken, T., & Liebisch, F. (2022). Fertilisation azotée spécifique au site: méthodes actuelles et expériences. *Recherche Agronomique Suisse*, 13, 103–113. <https://doi.org/10.34776/AFS13-103G>
- Hoxha, A., & Christensen, B. (2019). The Carbon Footprint of Fertiliser Production: Regional Reference Values (Proceedings 805, Issue).
- IPCC. (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>
- IPCC. (2019). 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. <https://www.ipcc.ch/languages-2/francais/>
- Johnston, A. M., & Bruulsema, T. W. (2014). 4R Nutrient Stewardship for Improved Nutrient Use Efficiency. *Procedia Engineering*, 83, 365–370. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.09.029>
- Jordan-Meille, L., Denoroy, P., Dittert, K., Cugnon, T., Quemada, M., Wall, D., Bechini, L., Marx, S., Oenema, O., Reijneveld, A., Liebisch, F., Diedhiou, K., Degan, F., & Higgins, S. (2023). Comparison of nitrogen fertilisation recommendations of West European Countries. *European Journal of Soil Science*, 74(6), e13436. <https://doi.org/10.1111/ejss.13436>
- Maltas, A., Charles, R., Pellet, D., Dupuis, B., Levy, L., Baux, A., Jeangros, B., & Sinaj, S. (2015). Évaluation de deux méthodes pour optimiser la fertilisation azotée des grandes cultures. *Recherche Agronomique Suisse*, 6(3), 84–93. <https://www.agrarforschungschweiz.ch/fr/2015/03/evaluation-de-deux-methodes-pour-optimiser-la-fertilisation-azotee-des-grandes-cultures/>
- OFAG. (2023). Rapport agricole 2023.
- OFEV (2024). Switzerland's Greenhouse Gas Inventory 1990–2022: National Inventory Document and reporting tables. Submission of 2024 under the United Nations Framework Convention on Climate Change.
- Sinaj, S., & Richner, W. (2017). Principes de la fertilisation des cultures agricoles en Suisse (PRIF) (Publication spéciale éd., vol. 6). Agroscope.
- Snyder, C. S. (2017). Enhanced nitrogen fertiliser technologies support the '4R' concept to optimise crop production and minimise environmental losses. *Soil Research*, 55(6), 463–472. <https://doi.org/10.1071/SR16335>
- Thiebaud, E., Hafner, D., Huber, S., Giuliani, G., Meier, T., Ringger, C., Stüssi, M., Liebisch, F., Leifeld, J., Oberholzer, H. R., Kreft, C., Huber, R., Finger, R., Bertschi, M., Meili, J., Koller, C., Kromrey, V., & Reich, A. (2023). CO₂-Endbericht Ressourcenprojekt «AgroCO₂ncept Flaachtal». <https://www.agroco2ncept.ch/post/co2-endbericht-ressourcenprojekt>
- Verein AgroCO₂ncept. (2023). AgroCO₂ncept. <https://www.agroco2ncept.ch/>
- Wang, C., Amon, B., Schulz, K., & Mehdi, B. (2021). Factors That Influence Nitrous Oxide Emissions from Agricultural Soils as Well as Their Representation in Simulation Models: A Review. *Agronomy*, 11(4).
- Yara. (2023). Integrated Report 2023: Building resilience and a nature-positive food future. https://www.yara.com/siteassets/investors/057-reports-and-presentations/annual-reports/2023/yara-integrated-report-2023.pdf?_gl=1*11eeeo*_up*MQ..*_ga*MjA4Mjc1MjYwLjE3MjQ3NDk2NTQ.*_ga_W5MJZ2GTWV*MTcyNDc0OTY1NC4xLjAuMTcyNDc0OTY1NC4wLjAuMA.*_ga_FJB1LTWP77*MTcyNDc0OTY1NC4xLjAuMTcyNDc0OTY1NC4wLjAuNTYwMzZmZTU5
- Zosso, C., Thiebaud, E., Huber, S., & Bretscher, D. (2024). Les calculateurs de gaz à effet de serre agricoles à l'épreuve de la pratique: possibilités et limites. *Recherche Agronomique Suisse*, 15, 145–155. <https://www.agrarforschungschweiz.ch/fr/2024/04/les-calculateurs-de-gaz-a-effet-de-serre-agricoles-a-lepreuve-de-la-pratique-possibilites-et-limites/>