

Programme PDAR 2022, AE3

S'adapter au changement climatique, contribuer à son atténuation

Tâche 3-2-1 : évaluation des leviers techniques d'amélioration du bilan carbone.

Sources d'émissions et contributions au stockage de carbone de la culture de betterave, pistes d'amélioration du bilan

18 juillet 2022



Objet de la note : inventaire des étapes de l'itinéraire cultural qui déterminent les émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) et la contribution de la betterave au stockage de carbone. Quantification des postes, identification et quantification d'effets de leviers pressentis à l'échelle de la culture.

Auteur : Rémy Duval, ITB

Table des matières

1	Introduction	3
2	Emissions et stockage : quelles sont les étapes concernées dans l'itinéraire cultural ?	4
2.1	Emissions de GES.....	4
2.2	Le stockage de Carbone dans le sol	4
2.3	Chiffrages moyens des différents postes	5
2.4	Pourquoi la fertilisation minérale azotée pèse t'elle autant dans les émissions ?.....	5
2.5	Les autres postes d'émissions	6
3	Comment améliorer le bilan carbone à l'échelle de la culture ?	8
3.1	Des leviers disponibles : choix de la forme d'engrais minéral azoté	8
3.2	Des leviers disponibles : substituer un apport organique à l'azote minéral	8
3.3	Des leviers disponibles : valoriser l'interculture pour réduite la dose d'azote minéral apporté à la culture principale.....	10
3.4	Des leviers disponibles : diminuer le nombre d'interventions culturales	11
4	Additionner des leviers multiples à l'échelle du système de culture	12
5	En conclusion	13

Introduction

Le réchauffement climatique déjà constaté et attendu questionne les pratiques agricoles. L'adaptation de pratiques pour des bilans carbone améliorés s'ajoute aux autres demandes sociétales et environnementales. La première étape est d'identifier les leviers d'amélioration disponibles et de quantifier les gains potentiels.

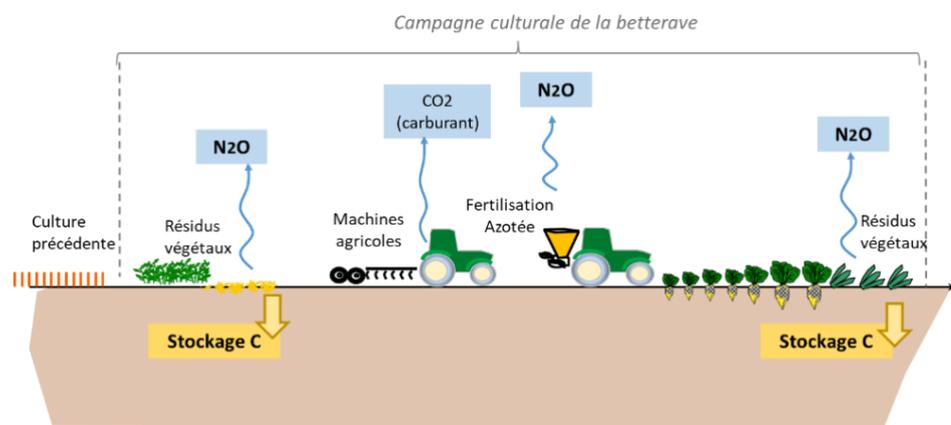
L'impact carbone des systèmes de grande culture résulte de différents processus, d'émissions de gaz à effet de serre d'une part, et de stabilisation de carbone sous forme d'humus stocké dans le sol d'autre part. L'évaluation de la contribution au réchauffement climatique, ou à son atténuation, d'une culture individualisée dans la succession culturale présente des limites :

- Elle oblige à attribuer (ou pas) à la culture, des processus qui se déroulent pendant les périodes d'interculture, qui la précèdent ou qui la suivent, ou du moins qui sont liés à des pratiques culturales qui s'opèrent en interculture : émissions ou stockages liés à la restitution de biomasse des couverts végétaux, aux apports de matières fertilisantes organiques, lixiviation d'azote minéral etc. Ici, le périmètre choisi est la « campagne culturale », il intègre toute intervention culturale entre la récolte du précédent et la récolte de betterave, et toutes les contributions aux émissions ou stockage associées à ces interventions.
- Elle restreint l'accès à des leviers à cette même échelle, et ne permet d'aborder tous les leviers actionnables et efficaces à une échelle systémique.

Émissions et stockage : quelles sont les étapes concernées dans l'itinéraire cultural ?

L'établissement d'un bilan carbone à l'échelle d'un cycle cultural ou d'une succession culturale, distingue deux flux distincts (**figure 1**) : (i) des Gaz à Effet de Serre (GES) émis vers l'atmosphère, et qui sont à l'origine du réchauffement climatique, (ii) une captation de carbone de l'atmosphère, sous forme de gaz carbonique CO₂, stocké durablement dans le sol sous forme d'humus. Le stockage vient compenser les émissions, la différence constituant un bilan net. Bien que les phénomènes ne soient pas concomitants, certains processus se déroulant au-delà de la durée de la culture et hors parcelle, le bilan peut s'établir sur un cycle cultural par une comptabilisation modélisée des flux.

Figure 1: Les étapes concernées par les émissions de GES et le stockage de Carbone dans l'itinéraire cultural



Emissions de GES

Un premier ensemble de processus est source d'émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) : on identifie facilement les émissions de CO₂ par la combustion des carburants, mais ce sont principalement des émissions sous forme de protoxyde d'azote, N₂O, qu'il faut considérer. Les quantités d'azote émises dans l'atmosphère ne représentent jamais de grosses quantités (quelques kg N pour une campagne culturale), elles sont quasiment sans conséquence sur l'alimentation et la productivité de la culture. Mais son pouvoir d'effet de serre est très élevé, une molécule de N₂O a le même effet que 298 molécules de CO₂. Comme on exprime conventionnellement l'ensemble des émissions et stockages en unité "kg d'équivalent CO₂" (kg eq CO₂), un kg de N₂O sera traduit dans le bilan en 298 kg de CO₂. Au champ, le protoxyde d'azote est essentiellement produit et volatilisé lors des phases de minéralisation d'azote organique ou ammoniacal en azote nitrique. Mais il est aussi émis hors parcelle et en amont lors de la fabrication de l'engrais azoté. Ces points sont détaillés plus loin.

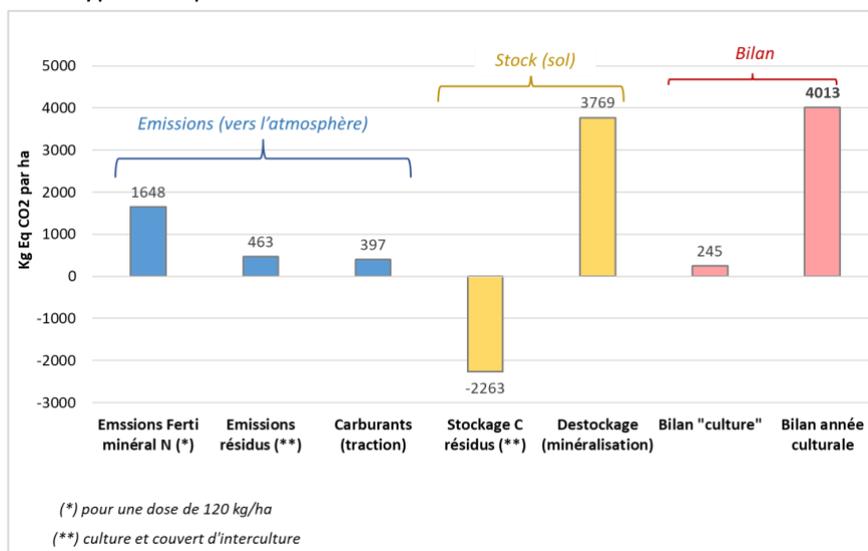
Le stockage de Carbone dans le sol

L'autre compartiment à considérer est le stock de C contenu dans le sol : Il s'agit d'une partie du carbone capté dans l'air par la photosynthèse qui se trouve intégré dans des molécules végétales stables qui seront progressivement transformées en humus après enfouissement. Toute augmentation de stock de carbone du sol viendra en compensation des émissions décrites plus haut.

Chiffrages moyens des différents postes

On peut illustrer ces deux contributions distinctes par des ordres de grandeur dans le cas d'un itinéraire simple, conforme à des pratiques standard (**figure 2**). En exprimant chaque poste en kg d'équivalent CO₂, on fait le constat que la fertilisation minérale azotée est une source d'émissions majeure, loin devant les émissions dues à la consommation de carburants lors des opérations culturales. La contribution de la culture au stockage de Carbone est loin d'être négligeable, si on additionne le stockage lié aux feuilles à l'arrachage, et les résidus de couverts végétaux de l'interculture. Dans un bilan rapide, on pourrait conclure à une quasi-neutralité de la culture, avec une contribution au stockage de Carbone dans le sol qui tend à équilibrer les émissions de GES. Mais le bilan réel complet doit tenir compte d'un déstockage continu de carbone par minéralisation de l'humus. Ce déstockage est important, et le bilan final annuel d'une culture de betterave n'est pas neutre, mais bien globalement émetteur. L'enjeu des évolutions de pratiques culturales ou de systèmes sera d'améliorer le bilan, l'atteinte de la neutralité est très hypothétique.

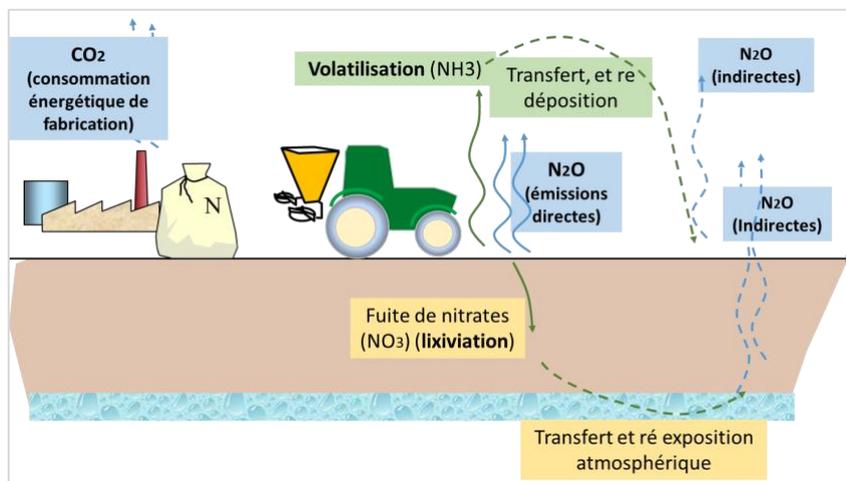
Figure 2 : Les principaux postes d'émissions et stockage (en kg eq CO₂ / ha)



Pourquoi la fertilisation minérale azotée pèse t'elle autant dans les émissions

La contribution des apports minéraux azotés est une somme de plusieurs catégories d'émissions, toujours sous forme N₂O à forte capacité d'effet de serre (**Figure 3**). Rapidement après l'apport de l'engrais au sol, se produisent des émissions dites « directes », peu ou pas évitables. S'y ajoutent des contributions dites « indirectes », consécutives à la perte d'azote par volatilisation ammoniacale ou par lixiviation de nitrate, et dont on considère qu'une partie sera émise, à terme, sous forme de protoxyde d'azote (N₂O), loin de la parcelle et dans un délai plus ou moins long. Ces émissions sont plus contrôlables que les premières, car on sait comment éviter partiellement la volatilisation ammoniacale ou le lessivage d'azote. Elles ouvrent donc des voies d'amélioration du bilan.

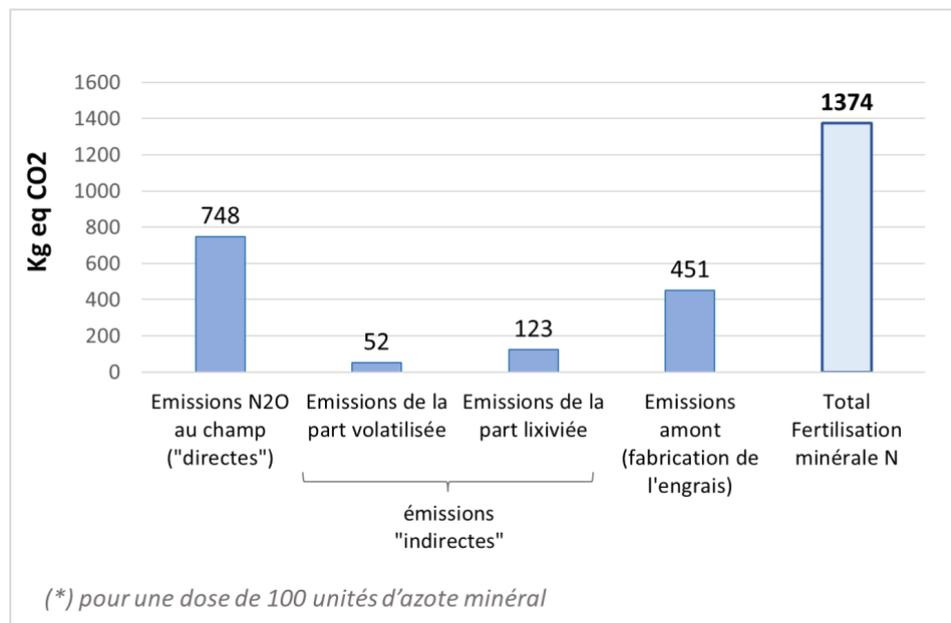
Figure 3: schéma des différentes contributions des apports d'engrais azotés minéraux



On doit y ajouter des émissions dites « amont », qui sont dues au process de fabrication de l’engrais azoté, et qui représentent une contribution non négligeable. Les émissions amont correspondent à l’émission de CO2 par consommation énergétique des process. Elles peuvent aussi être un levier d’atténuation, car le taux d’émission est très dépendant de la forme de l’engrais minéral azoté (nitrate, ammoniac, urée...).

L’important est de remarquer que ces différentes composantes qui s’additionnent pour constituer un poste d’émission fertilisation azotée, toutes sont “dose-dépendantes”. En conséquence, le meilleur levier, celui qui pourra diminuer globalement l’ensemble de ces émissions, sera la réduction de la dose d’engrais minéral azoté apporté à la culture. Elle sera à considérer en priorité dans le panel des options disponibles. La **figure 4** indique les valeurs correspondant aux différentes contributions détaillées de la fertilisation minérale azotée.

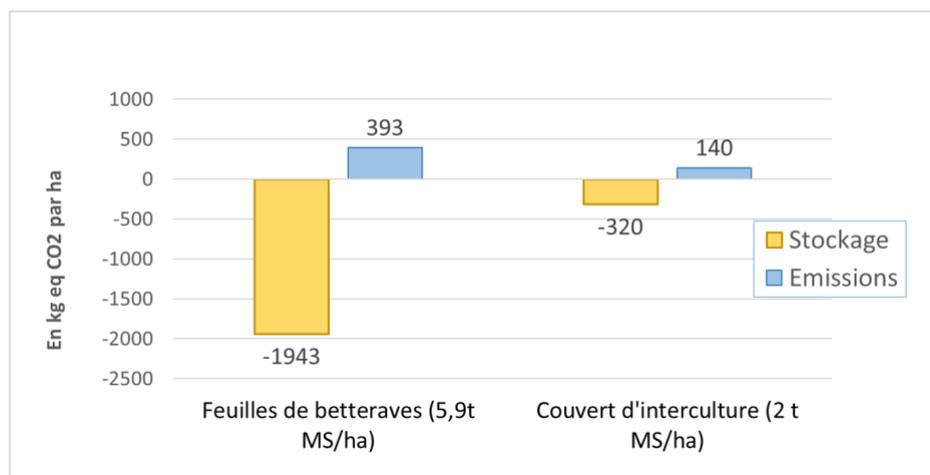
Figure 4: Emissions détaillées, liées à la fertilisation minérale azotée ()*



Les autres postes d’émissions

Les différents postes de l’itinéraire cultural intervenant dans le bilan carbone peuvent être chiffrés, toujours en se basant sur des pratiques conventionnelles et en décrivant un itinéraire simplifié. Plusieurs compartiments pris en compte vont à la fois représenter des émissions de N2O tout en contribuant à la production d’humus, donc au stockage de carbone. C’est le solde qu’il sera important de regarder.

Figure 5: Contributions des résidus de culture (feuilles de betteraves et couvert d'interculture)

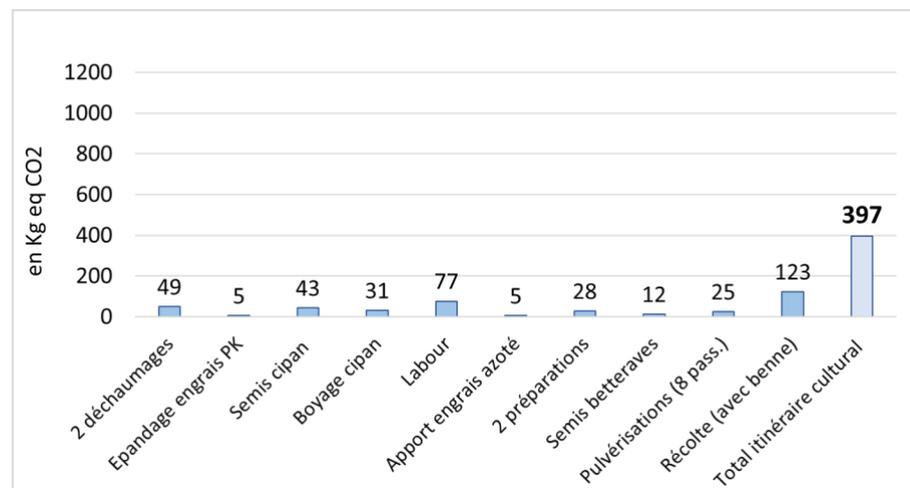


Comme mentionné plus haut, tous les résidus végétaux sont émetteurs, parce qu'ils contiennent de l'azote, qui produira du protoxyde d'azote lors de la décomposition de la matière végétale.

Même en se basant sur une biomasse foliaire relativement élevée, de 5,9 t/ha de matière sèche dans l'exemple présenté en **figure 5** (environ 40t/ha en matière fraîche), les émissions quantifiées selon les normes du Giec sont modérées. Les résidus de couverts végétaux implantés comme pièges à nitrates en interculture précédant la betterave doivent aussi être pris en compte. Ils représentent des quantités d'azote restituées relativement faibles, donc pèsent peu dans les contributions aux émissions de protoxyde d'azote, toujours en appliquant les modèles d'évaluation du Giec.

Cependant, les feuilles contiennent des composés organiques carbonés stables, et présentent un bon taux d'humification. Ce sont donc de bonnes contributrices au stockage de carbone dans le sol. Aussi le solde (stockage – émissions) de l'enfouissement des feuilles de betteraves est nettement favorable.

Figure 6: Emissions (CO₂) liées à la consommation de carburants (traction)



Les consommations de carburants entraînent des émissions de GES, sous forme de CO₂, lors des opérations culturales (**figure 6**). Elles pèsent assez peu dans le total des émissions. Elles représentent une somme de petites contributions de chaque intervention, la valeur la plus élevée étant représentée par la récolte. On peut mentionner au passage que la récolte est susceptible d'entraîner un tassement du sol, qui lui-même peut réduire l'infiltration de l'eau et générer des flaques en surface du sol. La saturation en eau de l'horizon de surface favorise la dénitrification et l'émission de N₂O. Eviter les tassements, c'est aussi éviter des émissions de GES.

Comment améliorer le bilan carbone à l'échelle de la culture ?

Des leviers disponibles : choix de la forme d'engrais minéral azoté

Comme décrit plus haut, l'azote minéral est un contributeur majeur aux émissions de protoxyde d'azote (N₂O). Ce sera la cible à privilégier dans l'adoption de nouvelles pratiques susceptibles d'améliorer le bilan carbone. Le choix de la forme d'engrais minéral apporte déjà un gain substantiel : 10% de réduction d'émissions entre une solution azotée et une forme d'engrais ammonitrate, et 18 % si l'ammonitrate est associé à un retardateur de nitrification (**figure 7**). L'avantage est issu de différences d'émissions "amont" entre formes d'engrais, ainsi que de différences de sensibilité à la volatilisation ammoniacale. La volatilisation peut être limitée par un enfouissement rapide de l'engrais, dans les 12 heures qui suivent l'épandage, le choix le plus judicieux sera d'incorporer l'engrais au semis (enfouissement localisé) d'une forme ammonitrate. Ce mode d'apport s'accompagne d'une réduction de dose, également bénéfique au bilan.

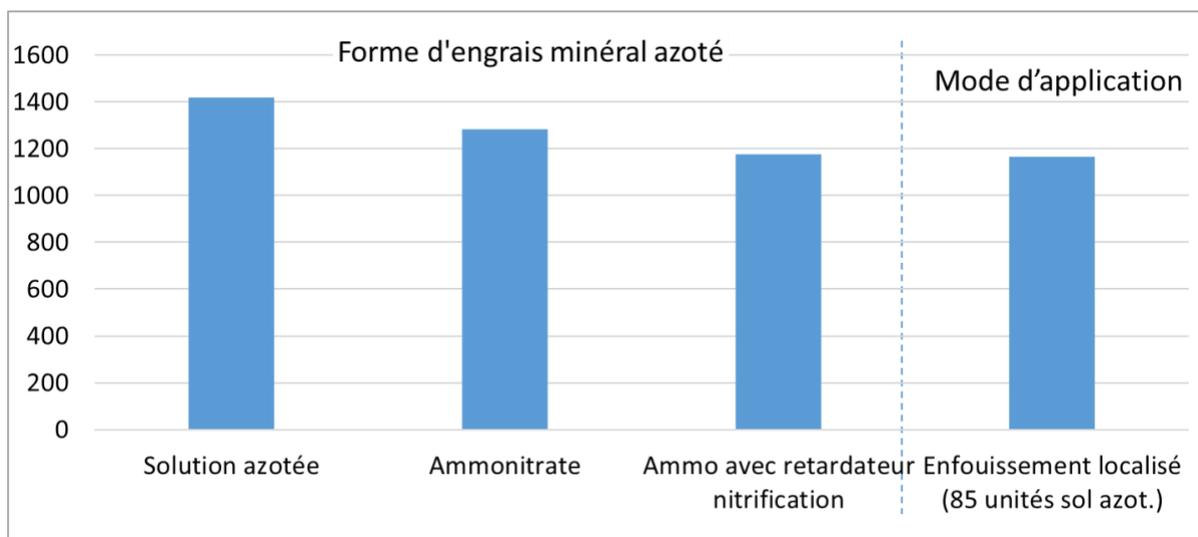
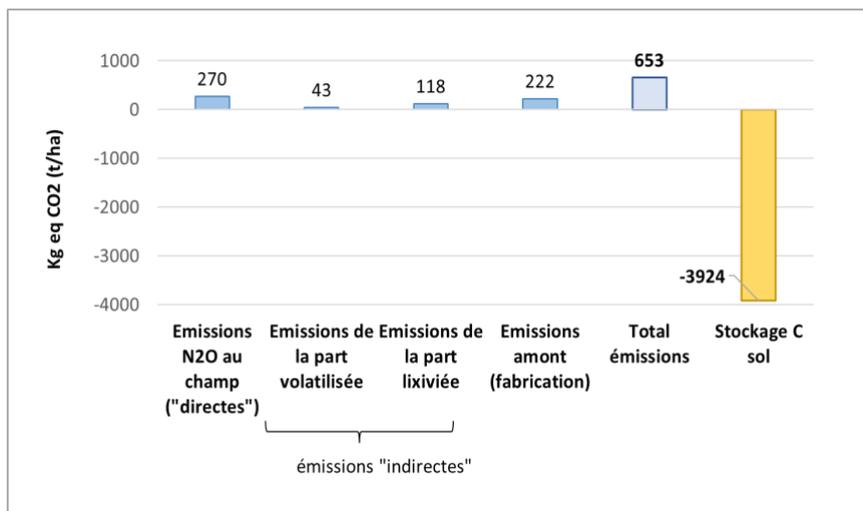


Figure 7: les engrais minéraux azotés se différencient par leur contribution aux émissions de GES

Des leviers disponibles : substituer un apport organique à l'azote minéral

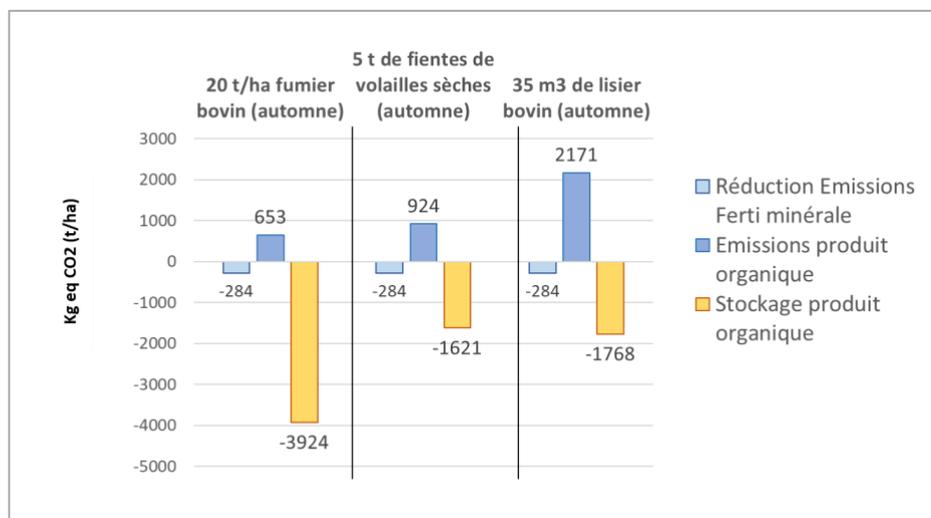
Toujours en restant sur des pratiques conventionnelles, d'ailleurs déjà pratiquées dans les parcelles de betteraves, la substitution de la fertilisation minérale par des matières fertilisantes organiques (MAFOR) est un autre levier. Le chiffrage des émissions suit le même schéma que celui des fertilisants azotés minéraux, et correspond toujours à des émissions sous forme N₂O de la fraction organique de l'azote contenu (**figure 8**) : on retrouve la même distinction entre émissions directes et indirectes, on comptabilise aussi des émissions amont qui ont pu se produire en cours d'élaboration du produit épandu, lors de stockage, transport, etc. Même s'ils contribuent aux émissions de GES, c'est à un degré globalement moindre que celui des fertilisants azotés minéraux, environ 2,5 fois moins contributeurs à quantités d'azote total égales.

Figure 8: Différents types d'émissions de GES et contribution au stockage de carbone d'un apport de 20 tonnes de fumier bovin



Surtout, l'intérêt des fertilisants organiques est leur potentiel de stockage de Carbone dans le sol pour contrebalancer ces émissions de GES. Cet intérêt doit cependant être nuancé, car les produits organiques sont de natures très diverses, et leurs caractéristiques physiques et chimiques amènent des contributions très variées pour chacun des postes à considérer, émissions de GES directes et indirectes, émissions amont, et stockage de C dans le sol. Les émissions indirectes après épandage dépendent de la prédisposition plus ou moins marquée du produit à la volatilisation ammoniacale. Les MAFOR se distinguent aussi fortement par leurs contributions "amont", selon leur mode d'élaboration et le processus éventuel utilisé. Enfin, ils se distinguent par leurs aptitudes spécifiques au stockage de carbone dans le sol. Le potentiel de stockage est lié à la forme des matières carbonées, les formes les plus stables étant les plus contributrices à la formation d'humus. Ainsi, pour une même contribution en azote à la culture principale, contribution qui sera soustraite à la dose d'engrais minéral, les bilans (stockage - émissions) diffèrent et le choix du produit organique épandu est crucial (Figure 9). A titre d'exemple, pour une même substitution de 20 kg/ha d'azote minéral, le fumier bovin est sensiblement plus intéressant qu'un apport de fientes de volailles. En position extrême, et donc choix à proscrire dans l'objectif poursuivi, les produits compostés ont des valeurs de contributions aux émissions "amont" très élevées. Leur potentiel de stockage de C dans le sol n'est pas suffisant pour compenser ces émissions (figure 10). De tels produits auront donc un grand intérêt pour augmenter la teneur en matière organique des parcelles, donc bénéficier d'une amélioration agronomique des propriétés physiques et chimiques des sols, mais vont à l'encontre d'une amélioration des bilans carbone des systèmes de culture. Parmi les effluents organiques industriels d'intérêt, les vinasses sont de bons candidats pour l'amélioration de bilans carbone, en combinant une bonne capacité de stockage de C à de faibles émissions.

Figure 9 : Substitution de 20 kg/ha N minéral par des apports organiques



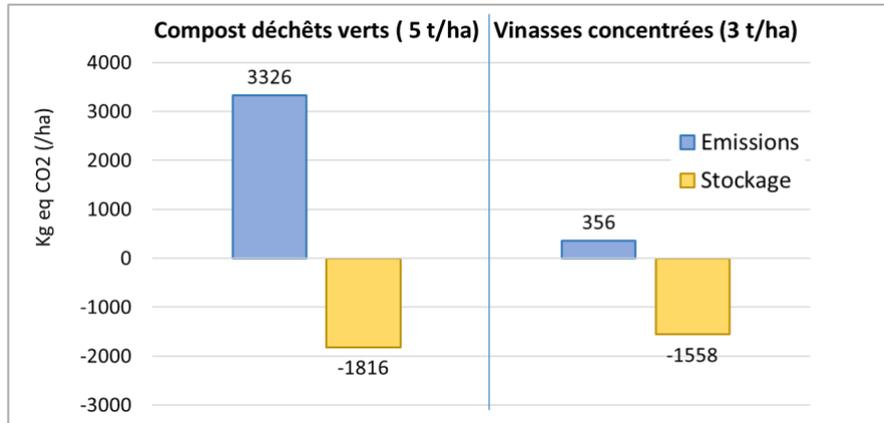


Figure 10 : Les émissions amont peuvent peser fortement sur l'impact des produits organiques épandus, certains pouvant être lourdement chargés, comme les produits compostés. Les vinasses ont un profit nettement plus favorable.

Des leviers disponibles : valoriser l'interculture pour réduire la dose d'azote minéral apporté à la culture principale

On peut rechercher une économie de dose d'azote minéral pour la culture principale en valorisant la période d'interculture qui précède la betterave par la conduite de couverts végétaux fournisseurs d'azote, grâce à l'insertion de légumineuses (**figure 11**). Celles-ci ont l'avantage de capter l'azote de l'air, N₂, sans besoin d'engrais, et en capacité de restituer l'azote capté au sol sous forme assimilable par les cultures suivantes. Les implantations de légumineuses "solo" ne sont pas autorisées dans les programmes d'action nitrate, en application de la Directive Nitrate en zones vulnérables. Si l'on se réfère aux chiffres indiqués plus haut, correspondant aux émissions de résidus de couverts végétaux classiques, un couvert bien développé de légumineuse peut doubler ces émissions. Cependant, il viendra réduire les apports de fertilisation azotée avec un bilan global nettement favorable à ce type de couvert, dont le statut vis-à-vis de la directive nitrate mériterait d'être reconsidéré. Cela étant, les couverts constitués par l'association d'espèces non légumineuses et légumineuses ont des atouts : même s'ils ne permettent pas des niveaux de restitution d'azote élevés, ils présentent un potentiel de stockage de carbone plus important et moins d'émissions de N₂O par les résidus enfouis, lesquels sont relativement plus pauvres en azote. Ils peuvent être moins exigeants vis-à-vis de la qualité et de la période d'implantation, et plus robustes dans des conditions stressantes au semis ou en végétation (conditions chaudes et séchantes au semis, ou épisodes de temps froid précoces, sont défavorables à des espèces comme les vesces ou les trèfles, on peut choisir des espèces associées plus résistantes).

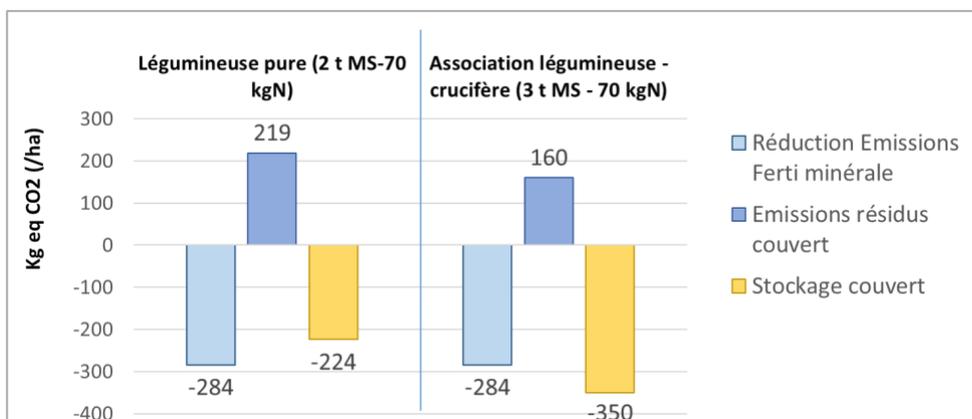


Figure 11: apporter de l'azote à la culture principale par un couvert de légumineuses associées

Des leviers disponibles : diminuer le nombre d'interventions culturales

Enfin, on identifie intuitivement l'usage des engins agricoles comme source d'émissions et leur limitation comme levier d'atténuation. Les chiffrages se font directement en quantités de CO₂ émis. La contribution reste très relative en regard des autres postes de l'itinéraire cultural. Toutes les interventions ne sont pas évitables, c'est pour l'essentiel la réduction des nombres d'intervention de travail du sol qui peut être recherchée, sans aller jusqu'à des conduites extrêmes très simplifiées délicates à mettre en œuvre et à réussir pour la culture de betterave. Le gain en émissions de CO₂ peut être d'environ 100 à 150 kg CO₂/ha sur un total de 450 à 500 kg CO₂/ha pour un ensemble d'interventions conventionnelles.

Additionner des leviers multiples à l'échelle du système de culture

L'approche la plus pertinente, mais plus complexe, est d'inscrire la conduite de la betterave dans un système de culture repensé entièrement dans un objectif d'amélioration du bilan carbone. L'agencement des cultures dans la succession, l'introduction de légumineuses en cultures principales pour réduire globalement la fertilisation minérale azotée, l'insertion de cultures à faibles besoins en azote, le recours systématique à des couverts végétaux enfouis source de carbone pour le sol, un travail du sol simplifié, s'ajoutent aux choix propices qui peuvent être faits dans la conduite de chacune des cultures. Un exemple en est donné dans l'action inter instituts Syppre (Arvalis, Terres Inovia, ITB), avec un modèle de système qui combine les différents leviers cités précédemment, en plus de conduites culturales concourant à diminuer l'impact carbone individuel.

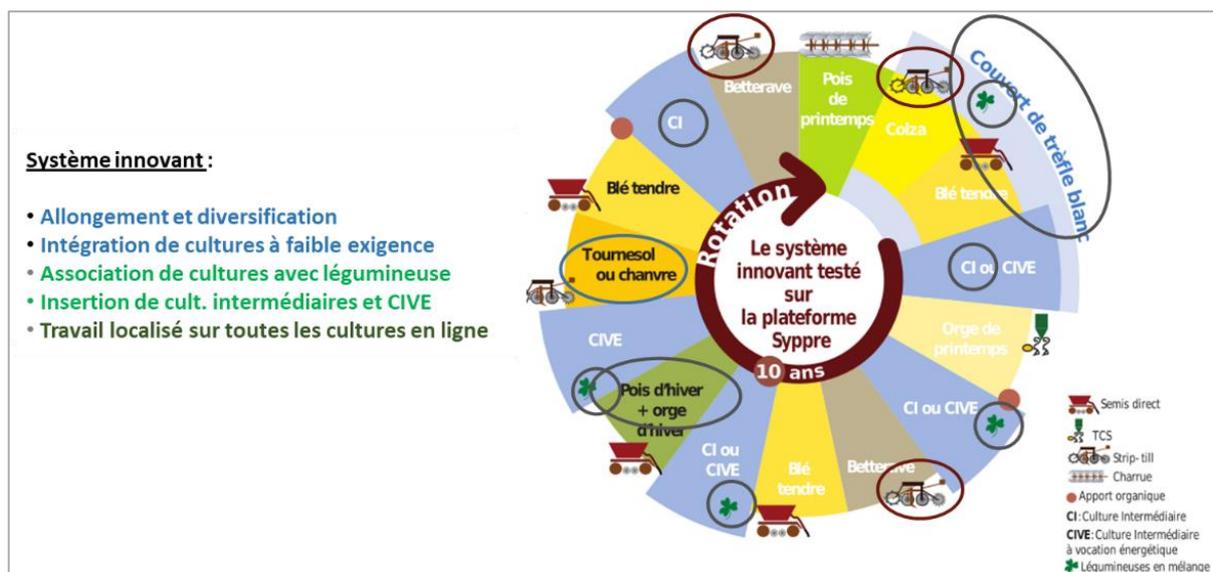


Figure 12: combinaison de solutions pour améliorer le bilan carbone à l'échelle du système. Exemple du système innovant conçu pour la plateforme Syppre Champagne

En conclusion

De l'ensemble des contributions aux émissions de Gaz à Effet de Serre (GES), la fertilisation minérale azotée est le poste le plus conséquent.

De ce fait, un objectif à prioriser pour améliorer le bilan sera de réduire la quantité d'azote minérale apportée, tout en choisissant les formes les moins émettrices.

La betterave sucrière ne manque pas d'atouts pour présenter un bilan carbone relativement favorable : capacité de stockage d'azote via l'enfouissement des feuilles, besoins en fertilisation minérale azotée modérée, possibilité de lui substituer des fertilisants organiques ou d'implanter des couverts végétaux sources d'azote.

Pour aller au-delà de la conduite culturale, l'amélioration des bilans carbone devra être considérée à l'échelle de la rotation, en misant sur les atouts de chacune des cultures et en additionnant les leviers bénéfiques.