

Synthèse d'essais fertilisation azotée du blé avec évaluation des émissions de gaz à effet de serre

Isabelle Diomard
Mars 2026

Objectifs

L'objectif de cette synthèse est de chiffrer l'effet de la fertilisation azotée des cultures vis-à-vis des émissions de Gaz à Effet de Serre (GES), avec l'exemple de la culture du blé, et d'explorer si une gestion optimisée des engrais peut atténuer ces émissions. Le projet vise à sensibiliser les conseillers et les agriculteurs sur les émissions de gaz à effet de serre dues à l'utilisation des engrais azotés. Ces émissions sont mal connues alors même que le protoxyde d'azote provenant de l'utilisation des engrais représente en France 42 % des émissions du secteur agricole (source CITEPA 2022).

Méthode

La synthèse s'appuie sur les expérimentations « courbe de réponse du blé à l'engrais azoté » menées tous les ans par les Chambres d'agriculture de Normandie dans des champs mis à disposition par des agriculteurs. Ces essais comparent différentes quantités d'engrais azoté de synthèse (dose par hectare) et différents fractionnements (nombre d'apports et période d'apport selon le stade du blé). Ils visent en premier lieu à vérifier la gestion de l'engrais permettant d'optimiser le rendement et le taux de protéine du blé. Il s'agit ici d'y ajouter une approche pour estimer les émissions de GES liées à l'azote.

Dans le cadre du projet, chaque modalité de chaque essai fait l'objet d'une évaluation des émissions de gaz à effet de serre liée à l'utilisation des engrais azotés. Les références de la [méthode Grandes Cultures du Label Bas Carbone de 2021](#) sont utilisées, elles tiennent compte des émissions en amont de l'engrais (CO₂ émis par la fabrication et le transport), des émissions directes (N₂O émis par transformation de l'azote dans le sol) et des émissions indirectes (N₂O émis par volatilisation et lixiviation). Une estimation des émissions dues aux passages d'engrais et aux trajets (CO₂ émis par consommation de carburant) y est ajoutée afin de tenir compte des effets du fractionnement de l'engrais et des aller-retours à la parcelle pour les épandages, en supposant une distance moyenne de 8 km entre le siège d'exploitation et le champ.

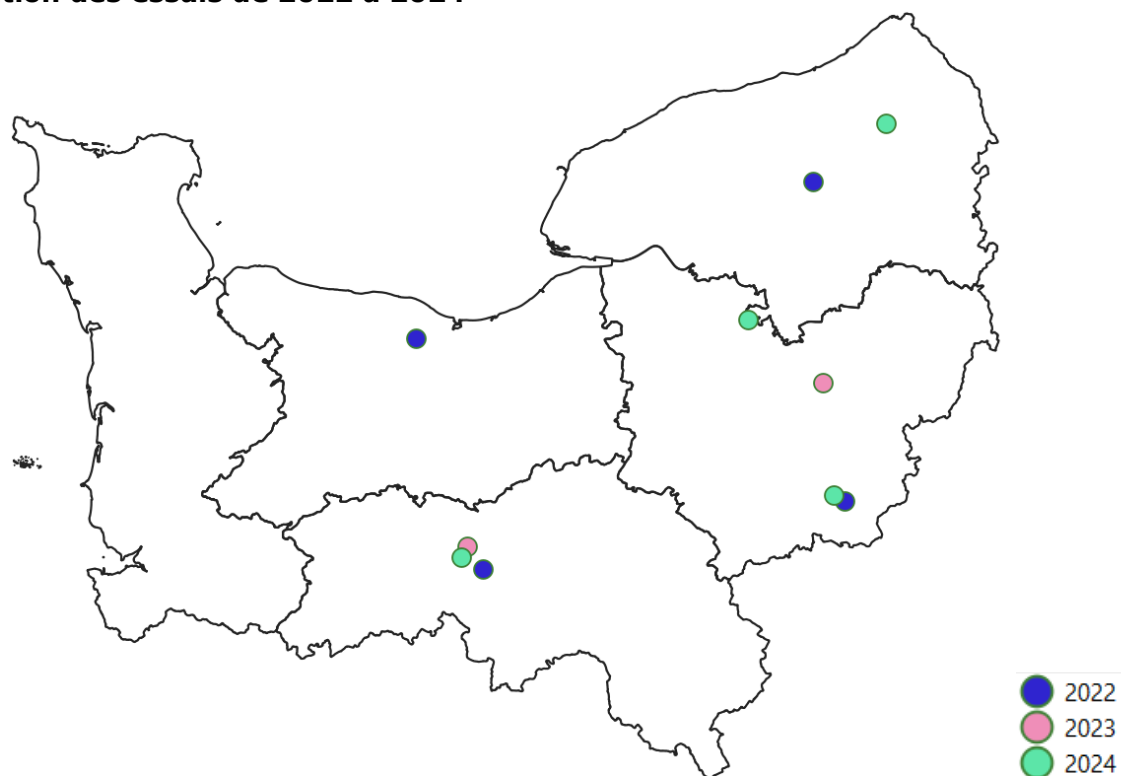
Expérimentations

La synthèse rassemble 10 essais « courbe de réponse du blé à l'engrais azoté » menés dans des parcelles mises à disposition par des agriculteurs pour l'expérimentation. Les essais concernent 4 départements normands – Manche non représentée – pour les récoltes 2022, 2023 et 2024. Parmi les essais réalisés sur ce thème par les Chambres d'agriculture sur ces trois années, seuls ceux montrant des résultats suffisamment précis sur le plan statistique (analyse de variance) ont été pris en compte.

Description et localisation des essais

Année de récolte	Département	Commune	Type de sol	Doses d'azote testées	Type d'engrais azoté	Dose raisonnée (méthode du bilan)	Rendement à la dose raisonnée
2022	14	Cambes en Plaine	Limon-argileux profond >90 cm	0 à 240 kgN/ha	Ammonitrate 33,5	190 kgN/ha	117 q/ha
2022	27	Coudres	Limon moyen 60 cm	0 à 240 kgN/ha	Ammonitrate 33,5	160 kgN/ha	67 q/ha
2022	61	Avoine	Argilo-calcaire (60-90 cm)	0 à 276 kgN/ha	Ammonitrate 33,5	196 kgN/ha	96 q/ha
2022	76	Fresnay le Long	Limon profond >120 cm	0 à 260 kgN/ha	Ammonitrate 27	180 kgN/ha	141 q/ha
2023	27	Amfreville sur Iton	Limon profond >90 cm	0 à 260 kgN/ha	Ammonitrate 33,5 et urée 46	180 kgN/ha	109 q/ha
2023	61	Ecouché les Vallées	Limon profond >90 cm	0 à 240 kgN/ha	Ammonitrate 33,5 et urée 46	200 kgN/ha	108 q/ha
2024	27	Grand Bourgtheroulde	Limon profond >90 cm	0 à 270 kgN/ha	Ammonitrate 27 et urée 46	190 kgN/ha	89 q/ha
2024	27	Chavigny Bailleul	Limon moyen 90 cm	0 à 250 kgN/ha	Ammonitrate 27 et urée 46	170 kgN/ha	109 q/ha
2024	61	Ecouché les Vallées	Limon sur calcaire 60 cm	0 à 240 kgN/ha	Ammonitrate 33,5	160 kgN/ha	89 q/ha
2024	76	Croixdalle	Argilo-calcaire superficiel 60 cm	0 à 260 kgN/ha	Ammonitrate 27	180 kgN/ha	104 q/ha

Localisation des essais de 2022 à 2024

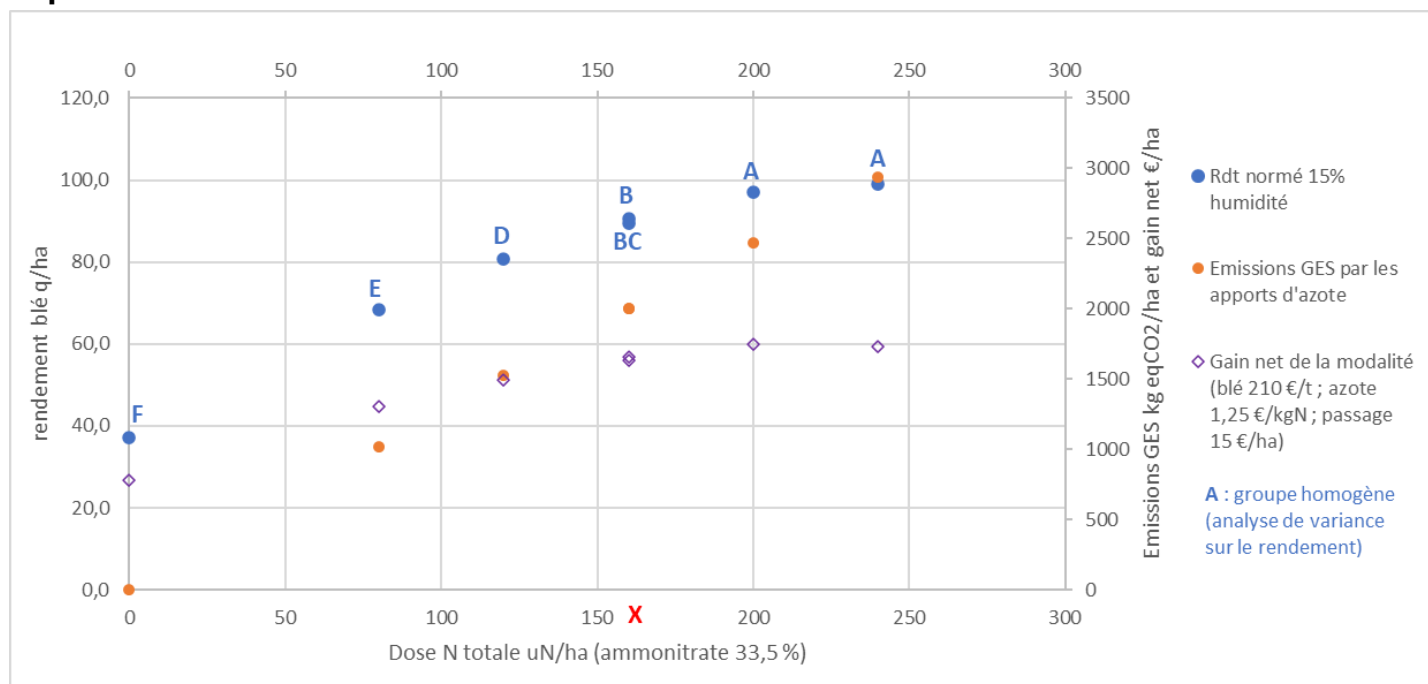


Exemple de résultats pour un des essais : Ecouchés les Vallées en 2024

Dans cet essai 7 modalités différentes sont testées avec 0 à 240 kg d'azote (N) par hectare. Certaines modalités cumulent la même dose totale d'azote mais apportée à des fractionnements différents : 2 ou 3 passages, à des périodes différentes, pour évaluer l'efficacité de l'engrais. Un seul type d'engrais est testé, l'ammonitrate 33,5 %. La dose d'azote raisonnée calculée par la méthode du bilan (directive nitrates) est de 160 kg N/ha, notée X sur le graphique.

Le gain net de chaque modalité est calculé selon le prix de vente du blé, de l'achat d'engrais azoté et du coût d'un passage d'engrais dans le champ (carburant et matériel). Pour cet exemple on s'appuie sur un niveau de prix moyen de l'année 2024 : grains de blé vendus à 210 €/tonne, ammonitrate acheté à 1,25 €/kgN, coût de passage d'engrais 15 €/ha.

Rendement, émissions de gaz à effet de serre et gain net selon la dose d'azote pour l'essai d'Ecouchés les Vallées en 2024



On observe que l'apport d'azote N augmente le niveau de rendement jusqu'à un plafond de 97 quintaux/ha pour 200 kg N/ha dans les conditions de l'essai. Avec 240 kg N/ha le rendement paraît légèrement supérieur mais l'analyse de variance nous indique qu'il n'est pas significativement différent puisque la modalité est dans le même groupe homogène A. Sur le plan économique dans le contexte de 2024, la dose de 200 kg N/ha est aussi celle qui correspond au meilleur gain net avec 1 745 €/ha (vente du blé moins le coût de l'engrais et le coût des passages d'engrais). Dans les conditions de la parcelle et de l'année, on constate à posteriori que la dose d'azote optimale était supérieure à la dose raisonnée par la méthode du bilan. Cela peut s'expliquer par un rendement obtenu en 2024 plus élevé que le rendement objectif de 86 q/ha utilisé pour le calcul de la dose raisonnée.

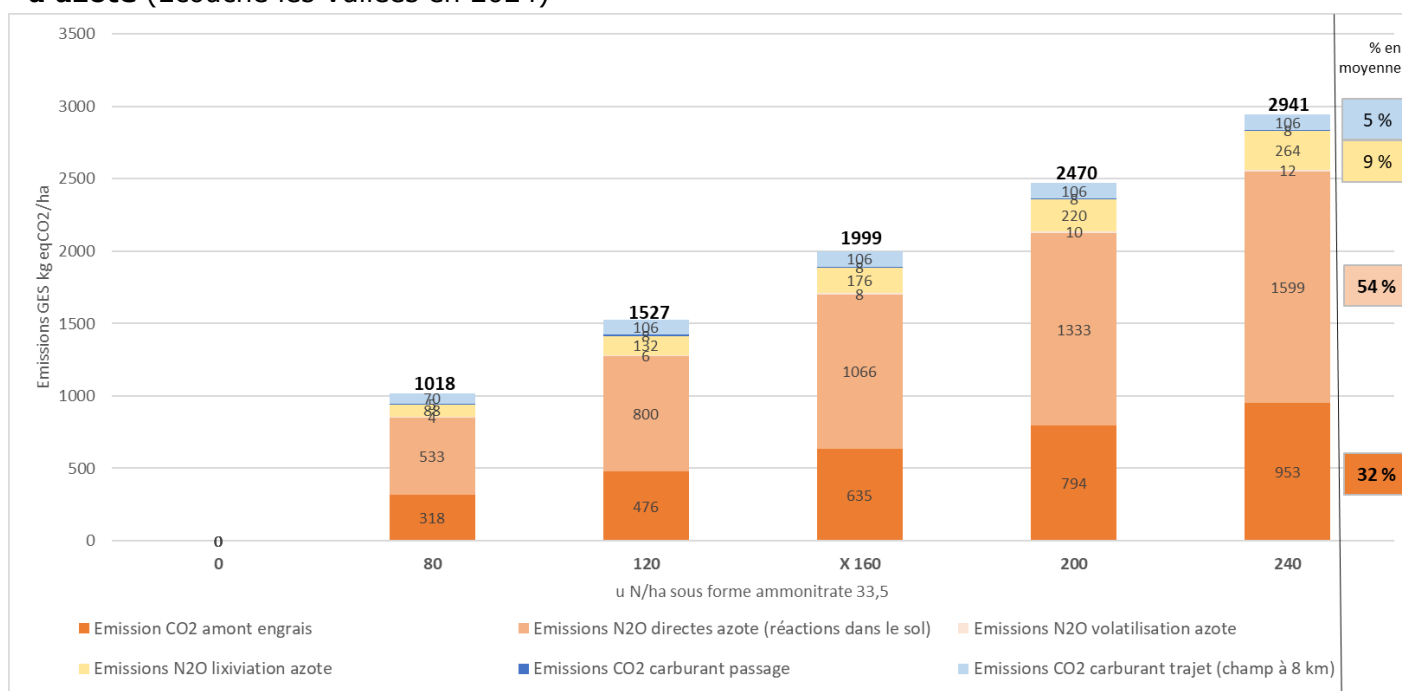
Le chiffrage des gaz à effet de serre (GES) indique, pour un même type d'engrais, une hausse des émissions directement liée à la quantité d'azote épandue. L'engrais apporté à dose optimale économique (200 kg N/ha dans cet essai) provoque l'émission de 2 470 kg eqCO₂ par hectare, soit l'équivalent de 11 351 km en voiture à moteur thermique, selon le Comparateur carbone (<https://impactco2.fr/outils/comparateur>).

Pour la rentabilité de l'exploitation agricole, le rendement optimum est celui qui permet d'obtenir la meilleure marge à l'hectare. Dans le cadre de l'expérimentation, la meilleure marge est approchée par le gain net le plus élevé. Il faut noter la forte variabilité des prix du blé et des engrais selon le contexte mondial, la modalité jugée optimale peut donc varier suivant cette conjoncture.

Sous l'angle des gaz à effet de serre et des enjeux du changement climatique, l'objectif est de générer les émissions les plus faibles possibles.

Pour concilier économie de l'exploitation agricole et changement climatique, il s'agit donc d'obtenir une marge élevée avec les émissions de gaz à effet de serre les plus basses possibles. Comme le niveau d'émission est principalement lié à la dose d'azote (voir ci-dessous), remplir cet objectif revient à maximiser l'efficacité de l'azote sur le blé, donc à produire du blé avec le niveau le plus bas possible d'azote par quintal.

Détail des émissions de gaz à effet de serre liées à la fertilisation azotée, selon la dose d'azote (Ecouché les Vallées en 2024)



Le détail des émissions montre que plus de 50 % proviendrait des émissions directes de N₂O qui sont produites lors des réactions de nitrification-dénitrification de l'azote des fertilisants par les bactéries présentes dans le sol. Environ 30 % des émissions proviendrait de la fabrication et du transport de l'engrais. La part due à la consommation de carburant à la ferme (trajet vers le champ et passage d'engrais) représenterait seulement 5 %. La dose serait donc le principal facteur des émissions de gaz à effet de serre par l'engrais azoté.

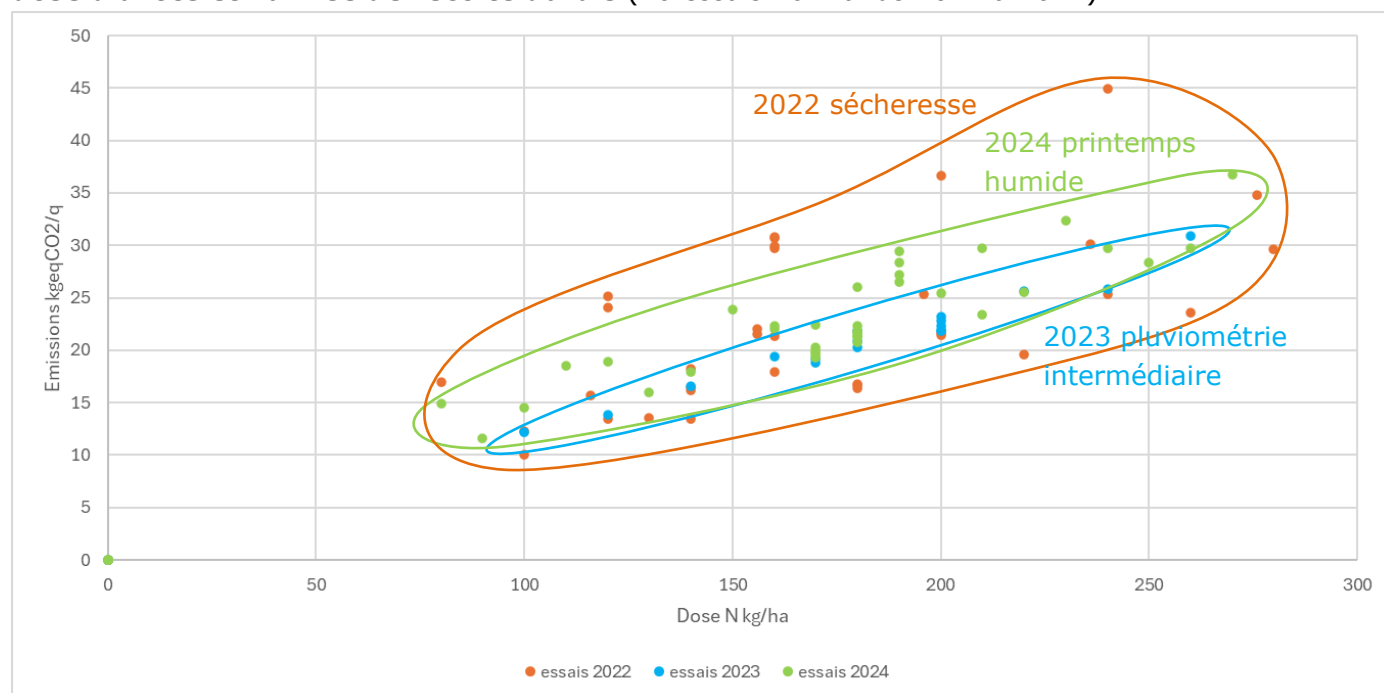
Les réactions de nitrification-dénitrification responsables des émissions directes de N₂O par les sols se caractérisent par une variabilité spatiale et temporelle très importante. Les émissions de N₂O les plus importantes sont généralement observées soit après les apports d'azote par fertilisation minérale ou organique, soit lors de la décomposition des résidus végétaux qui libère de l'azote minéral, en conditions d'humidité importante du sol créant des conditions d'anaérobiose partielle (Sylvain Pellerin et al. Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ? 2013). Au-delà de la dose d'azote, le chaulage des sols acides pour les amener à un pH proche de 7 est un des leviers listé par la [méthode Grandes Cultures du Label Bas Carbone de 2021](#) pour agir sur la nitrification/dénitrification et réduire les émissions.

Synthèse des résultats des 10 essais de 2022 à 2024

Afin de faciliter la comparaison entre les essais, les émissions dans cette synthèse sont exprimées en kg équivalent CO₂ par quintal de blé produit au lieu des kg équivalent CO₂ par hectare. Exemple pour la modalité 200 kgN/ha de l'essai 2024 à Ecouché les Vallées (graphique page 2) : émission de 2 470 kg eqCO₂/ha et rendement en grains de 97,2 q/ha soit émission de $2\,470/97,2 = 25,4$ kg eqCO₂/quintal de blé produit.

Les graphiques qui suivent sont une première approche pour identifier les facteurs intervenant sur les émissions de gaz à effet de serre liés à la fertilisation azotée par quintal de blé produit. A ce stade, le nombre d'essais et d'années différentes est insuffisant pour obtenir des résultats statistiquement fiables, il doit être complété par d'autres résultats.

Emissions de gaz à effet de serre liées à la fertilisation azotée, par quintal de blé selon la dose d'azote et l'année de récolte du blé (10 essais normands 2022 à 2024)



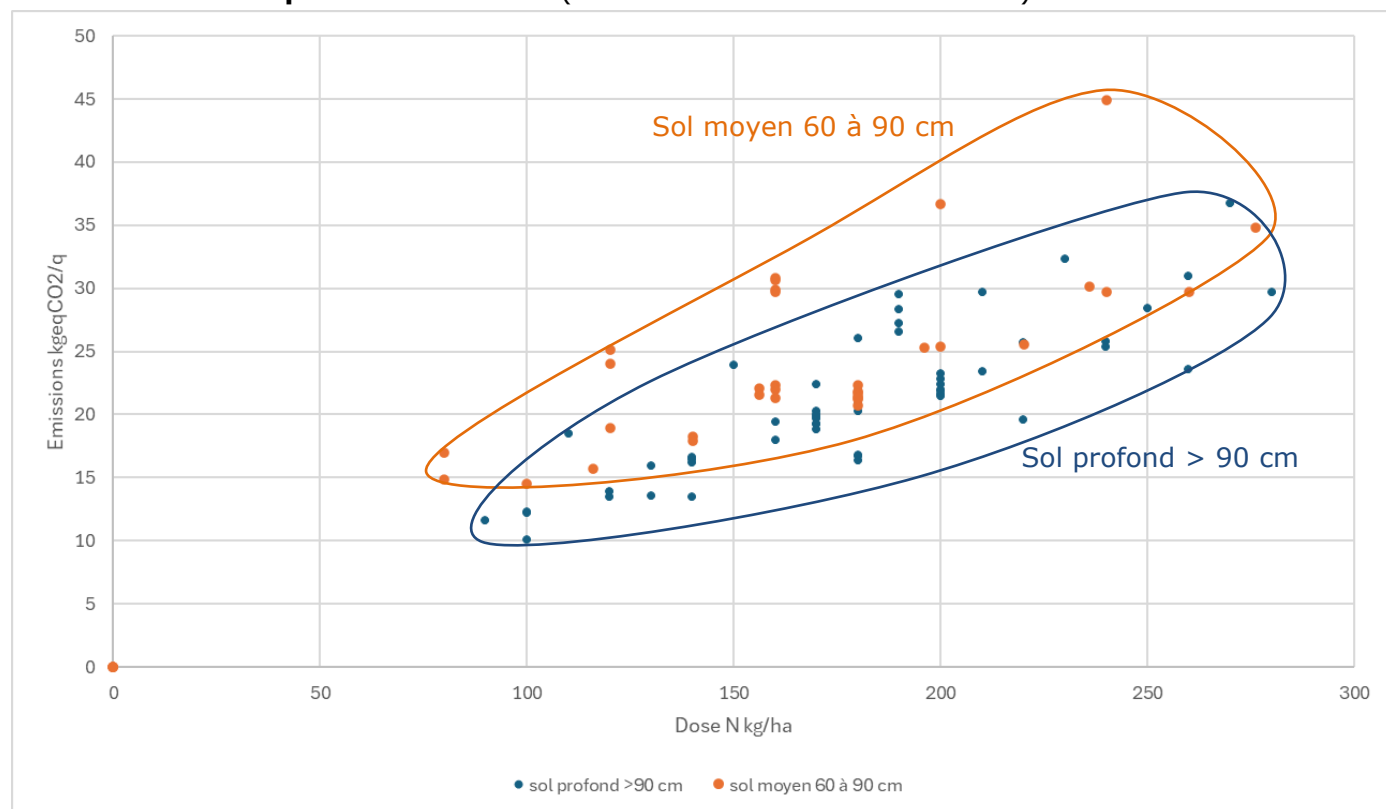
Les émissions de gaz à effet de serre liés à la fertilisation azotée montrent différents niveaux selon les années de récolte du blé :

Pour la récolte 2022 (4 essais) on observe des extrêmes avec à la fois les valeurs les plus fortes jusqu'à 45 kg eqCO₂/q et les plus faibles (10 kg eqCO₂/q hors modalité sans azote). La campagne céréalière 2021-2022 en Normandie a vécu une sécheresse marquée de novembre 2021 jusqu'en août 2022.

En 2023 (2 essais) les émissions sont dans la frange basse des 3 années, entre 12 et 31 kg eqCO₂/q selon la dose d'azote. La campagne 2022-2023 se caractérise par des phases plus sèches que la normale (automne puis fin d'hiver) et des phases de pluies proches de la normale (printemps et été). La pluviométrie est intermédiaire entre 2022 et 2024.

Pour 2024 (4 essais) les émissions se situent dans la médiane des 3 années, entre 12 et 37 kg eqCO₂/q hors modalité sans azote. Cette campagne se distingue par un printemps humide : les pluies sont faibles de l'automne jusqu'au mois de mars, ensuite elles sont nettement au-dessus des normales jusqu'en août.

Emissions de gaz à effet de serre liées à la fertilisation azotée, par quintal de blé selon la dose d'azote et la profondeur du sol (10 essais normands 2022 à 2024)



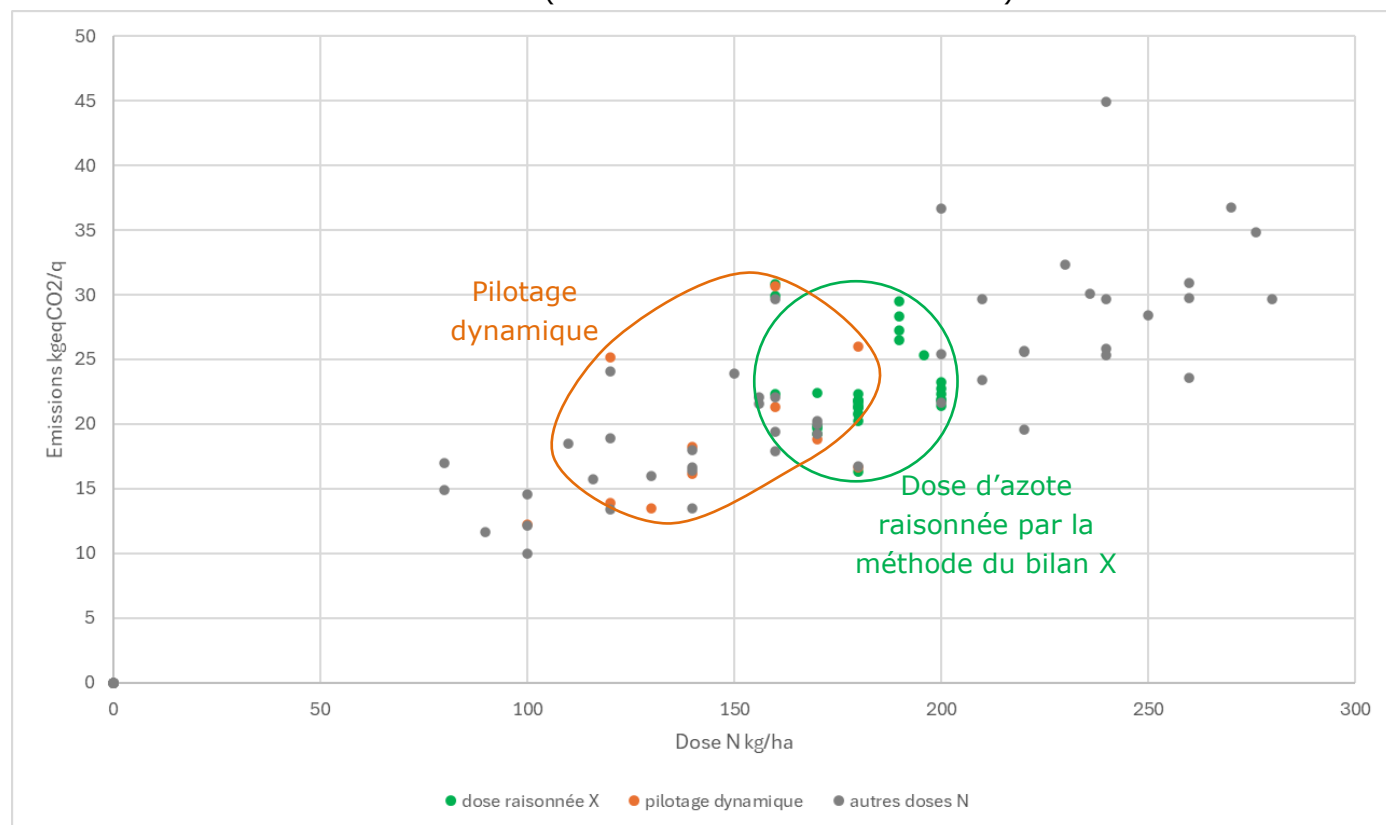
D'après ce graphique, la profondeur de sol semblerait influencer les niveaux d'émissions de gaz à effet de serre liés à la fertilisation azotée. Il s'agit sans doute d'un rôle indirect lié aux effets plus prononcés des sécheresses pour les parcelles sur sol moyen par rapport au sol profond. En situation de sécheresse, le blé produit en effet un rendement plus faible pour la même quantité d'azote apportée. De fait, le rendement moyen (toutes modalités confondues) est plus élevé pour les essais en sol profond : 106 q/ha, contre 83 q/ha en sol moyen.

Les niveaux d'émissions paraissent plus élevés en sol d'épaisseur moyenne (60 à 90 cm). Hors modalité sans azote, ils sont compris entre 15 et 45 kg eqCO₂/q et la moyenne est de 24,4 kg eqCO₂/q pour 34 modalités dans 4 essais.

En sol profond (plus de 90 cm), les émissions semblent souvent plus basses. Hors modalité sans azote, elles sont comprises entre 10 et 37 kg eqCO₂/q, avec une moyenne de 21,1 kg eqCO₂/q pour 55 modalités dans 6 essais.

Le niveau d'émissions plus bas en sol profond pourrait s'expliquer par une meilleure efficacité de l'engrais azoté dans ces sols. En effet la réserve en eau du sol y est plus importante, ce qui assure une meilleure croissance du blé et une meilleure absorption de l'azote.

Emissions de gaz à effet de serre liées à la fertilisation azotée, par quintal de blé selon la dose d'azote et la modalité d'azote (10 essais normands 2022 à 2024)



Pour caractériser le rôle des différentes modalités d'azote, l'accent est mis d'une part sur la dose raisonnée par la méthode du bilan (X) en fin d'hiver et d'autre part sur la ou les doses résultant d'un pilotage dynamique (méthode Appi N), avec mesures de l'indice de nutrition azotée du blé à différents stades durant sa croissance au printemps.

La dose raisonnée X est comprise entre 160 et 200 kgN/ha selon les essais. Tous les essais présentent au moins une modalité à dose X, certains ont plusieurs modalités à cette dose selon le type d'engrais (ammonitrate ou urée par exemple) ou selon le fractionnement des apports visant à apporter l'azote aux stades pertinents pour les besoins de la culture. Les émissions à dose X sont comprises entre 16 et 31 kg eqCO₂/q, avec une moyenne de 22,9 kg eqCO₂/q pour 30 modalités dans 10 essais.

Le pilotage dynamique de l'azote est testé dans 7 essais sur les 10, il aboutit selon le cas à une dose d'azote inférieure ou égale à X, l'écart moyen est de -40 kgN/ha avec pilotage dynamique par rapport à la dose X calculée par la méthode du bilan. Les émissions avec pilotage dynamique sont souvent plus faibles qu'avec dose X, elles sont comprises entre 12 et 31 kg eqCO₂/q, avec une moyenne de 19,3 kg eqCO₂/q pour 11 modalités dans 7 essais.

Ces résultats sont à comparer à la moyenne des émissions pour l'ensemble des essais et des modalités (hors modalités sans engrais) : 22,4 kg eqCO₂/q.

Conclusion à ce stade

Cette synthèse élaborée avec 10 sites d'essais sur trois ans comporte trop de peu de données pour être conclusive, elle sera étoffée avec les résultats d'autres expérimentations récoltées en 2025 et celles prévues en 2026. L'évaluation des émissions de gaz à effet de serre liés à la fertilisation azotée montre un lien direct avec la dose d'engrais azoté pour chaque expérimentation mais avec des valeurs très différentes d'une situation à l'autre, avec une forte influence du niveau de rendement.

A ce stade, parmi les facteurs intervenant sur les émissions de gaz à effet de serre liés à la fertilisation azotée sont identifiés les précipitations et la profondeur de sol, facteurs qui s'imposent à l'agriculteur. L'étude des modalités indique que le pilotage dynamique de l'azote permet généralement d'amener les émissions en dessous de celles correspondant à la dose d'azote calculée par la méthode du bilan, néanmoins cet effet n'est pas systématique.

Merci aux agriculteurs ayant mis leurs parcelles de blé à disposition pour ces essais, aux expérimentateurs pour les suivis et les résultats, au groupe Sol-Fertilisation des Chambres d'agriculture de Normandie pour son aide à la réalisation de cette synthèse.