

Bilan de la première rotation

Évaluer à l'échelle pluriannuelle la durabilité de sept systèmes de culture typiques d'Île-de-France et optimisés techniquement.

2017/2022

TRAJECTOIRE
AgroParisTech



Systèmes de culture de Trajectoire :

ACS – Agriculture de conservation des sols

GES – Bas Carbone

PN – Performance nourricière

REF – Système de référence

BI – Bas Intrants

AB – Agriculture biologique

PE – Polyculture élevage

Auteurs :

Tristan BRANCAZ, Sophie CARTON,
Yves PYTHON, Dominique TRISTANT

Trajectoire dans son ensemble 4

A_ Chiffres clés	5
B_ Le projet Trajectoire	6
C_ Les sept systèmes de culture	7
D_ La plateforme expérimentale	8
a) Le plan de la plateforme	8
b) Une parcelle à haut potentiel	8
c) Une rotation culturale commune	9
E_ L'observatoire des performances	10
a) Le pool d'indicateurs mesurés	10
b) Le pool d'indicateurs calculés	11

Les performances pluriannuelles 12

A_ Les faits marquants annuels	13
B_ Focus sur les performances technico-économiques	14
a) Le rendement	14
b) La qualité technologique	14
c) Les coûts, les produits et la marge semi-nette	15
d) L'indice de Fréquence de Traitements	16
C_ Focus sur la qualité de l'eau	17
a) Les flux de nitrates	17
b) Les flux de matière active	18
D_ Focus sur les émissions de gaz à effet de serre et le stockage de carbone	20
a) Les émissions de protoxyde d'azote	20
b) Les stocks de carbone organique du sol	22
c) Le bilan global des émissions de gaz à effet de serre	23
E_ L'évaluation multicritère pluriannuelle	25
a) Le critère agronomie	26
b) Le critère environnement	26
c) Le critère économie	28
d) Le critère social	28

Les performances des systèmes de culture 29

A_ Agriculture de conservation des sols	30
B_ Bas Carbone	32
C_ Performance nourricière	34
D_ Système de référence	36
E_ Bas Intrants	38
F_ Agriculture biologique	40
G_ Polyculture élevage	42

Conclusion et perspectives 44



Trajectoire dans son ensemble



A_ Chiffres clés

10 ha

Surface de la plateforme expérimentale

5 ans

Durée de la première rotation culturale

7

Systèmes de culture

2000

Mesures par an – agronomie, qualité de l'eau, émissions de gaz à effet de serre...

Mesures de biodiversité
Échantillons d'eau
Échantillons de sol
Échantillons de biomasse
Échantillons d'air

3 %
9 %
19 %
22 %
46 %



800 Visiteurs

étudiants, professionnels, institutionnels...

10 Partenaires

financiers et experts techniques et scientifiques

Un projet porté par la ferme expérimentale d'AgroParisTech



Financement de l'AESN dans le cadre d'Ecophyto II



Co-financements privés



Partenaires techniques et scientifiques



B_ Le projet Trajectoire

La plateforme agronomique Trajectoire a été mise en place en 2017 à la ferme expérimentale d'AgroParisTech à Grignon. Sa première phase (2017-2022) a bénéficié du soutien de l'Agence de l'Eau Seine-Normandie dans le cadre du plan Ecophyto II et de partenaires privés.

La plateforme se déploie sur une parcelle homogène, à fort potentiel, découpée en sept grandes bandes supérieures à un hectare. Sur chaque bande, un système de culture est optimisé techniquement par rapport à des objectifs de durabilité spécifiques. La conduite des cultures est réalisée avec les méthodes et les outils communément employés par les agriculteurs dans leur exploitation.

Les systèmes de culture représentés sont typiques de l'agriculture francilienne et ont été retenus car ils apportent chacun une réponse spécifique aux enjeux de durabilité de la production agricole et de la transition agroécologique et aux défis techniques, exacerbés par le changement climatique.

Cette plateforme a pour objectif d'évaluer les performances des systèmes de culture. Un large dispositif de mesures directes au champ est déployé, afin de quantifier et mieux comprendre les performances des systèmes sur les plans agronomiques et environnementaux.

Trajectoire a été imaginé afin de produire et diffuser des enseignements à des professionnels et futurs professionnels du monde agricole.

« Nous avons voulu construire une expérimentation système proche du monde agricole en mobilisant les pratiques habituelles des agriculteurs, pour tendre vers plus de performances techniques, agronomiques et environnementales. La force d'une démarche collective est d'aller chercher toutes les bonnes solutions là où elles se trouvent et de les combiner. La mise en œuvre de tous ces savoir-faire, sur la durée, nous permet de déverrouiller les potentiels des systèmes de culture. »

Dominique Tristant,

Directeur de la ferme expérimentale d'AgroParisTech entre 2012 et 2024



C_ Les sept systèmes de culture



La plateforme compte sept systèmes de culture d'Île-de-France, qui sont en cohérence avec les filières et les pratiques culturelles locales. Ils sont mis en œuvre sur des surfaces suffisamment importantes pour utiliser des agroéquipements dimensionnés pour les exploitations agricoles.

Chacun d'eux possède des objectifs et des contraintes de mise en œuvre qui lui sont propres. Ils ont été définis à l'initiation du projet, en cohérence avec les systèmes de culture similaires observés chez les agriculteurs du territoire.

ACS (Agriculture de conservation des sols)	Il repose sur l'absence de travail du sol et sur une couverture permanente du sol, par des résidus ou des cultures de couverture.
GES (Bas carbone)	Il répond à des objectifs de diminution des émissions de gaz à effet de serre associées à la fertilisation azotée et à l'utilisation de combustibles fossiles, sur le stockage du carbone dans le sol et sur la diminution des émissions indirectes de la production agricole.
PN (Performance nourricière)	Il répond à des objectifs de productions alimentaires en quantités et en qualité élevées, tout en sécurisant le revenu de l'agriculteur.
REF (Système de référence)	Il s'inscrit dans la continuité des pratiques de la ferme expérimentale d'AgroParisTech, certifiée Haute Valeur Environnementale (HVE 3).
BI (Bas intrants)	Il mobilise un ensemble de leviers agronomiques combinant des moyens biologiques, chimiques et mécaniques permettant de réduire l'usage des intrants de fertilisation et de protection des cultures.
AB (Agriculture biologique)	Il respecte le cahier des charges de l'Agriculture Biologique. Il comprend l'introduction de légumineuses dans la rotation, l'utilisation de fertilisants organiques et le recours au désherbage mécanique.
PE (Polyculture élevage)	Il comprend des interactions avec les élevages de la ferme de Grignon, sous la forme d'exportation de biomasses fourragères (couverts végétaux, maïs ensilage, ...), d'exportation de paille pour la litière et d'apport d'amendements organiques type lisier ou fumier.

D_ La plateforme expérimentale

La plateforme est conduite sur les terres de la ferme expérimentale d'AgroParisTech au cœur de la Plaine de Versailles, à 30 km à l'Ouest de Paris, territoire à dominante céréalière où sillonne la Mauldre. Le contexte pédo-climatique est particulièrement favorable aux grandes cultures (limons profonds fertiles).

a) Le plan de la plateforme

Le dispositif est déployé sur une seule parcelle, où tous les systèmes de culture sont cultivés côte à côte en bandes de plus d'un hectare chacune. Elles sont larges de 27 mètres, pour correspondre à une largeur de pulvérisateur.

Chacune des bandes est organisée en plusieurs zones : une zone qui couvre la moitié de la surface est dédiée à la mesure du rendement par la moissonneuse, une zone est instrumentée et dédiée aux mesures, une petite zone est non fertilisée, et enfin une petite zone ne reçoit ni traitement fongicide ni régulateur (voir Figure 1 ci-dessous).

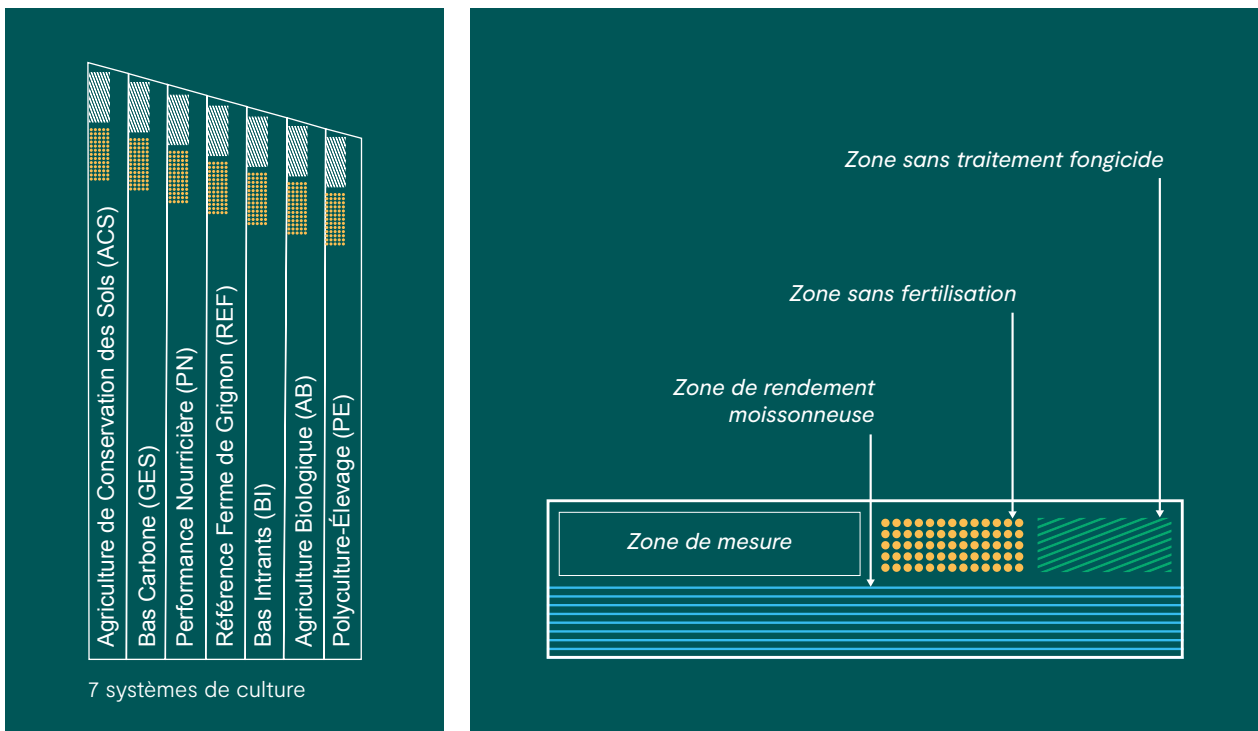


Figure 1 : Plateforme Trajectoire et ses sept bandes (à gauche) et schéma d'une bande avec ses différentes zones (à droite)

b) Une parcelle à haut potentiel

Historiquement, la parcelle était conduite en interaction avec l'élevage de la ferme et suivant une rotation incluant un blé tendre (avec exportation de paille), un couvert intermédiaire ensilé et un maïs ensilage, avec des amendements organiques fréquents, de type fumier ou lisier. Cette conduite s'inscrivait dans une démarche de Haute Valeur Environnementale de niveau 3 (HVE 3).

Cette parcelle a un potentiel de rendement très élevé, autour de 110 quintaux/ha en blé. Le détail des moyennes olympiques de rendements est exposé dans le [Tableau 1 ci-après](#).

Tableau 1 : Moyenne olympique des rendements de l'ilot parcellaire de Trajectoire sur 15 ans (2008-2022)

Culture	Blé tendre	Maïs ensilage	Colza	Orge d'hiver
Rendements moyens olympiques	91 q/ha	13,4 tMS/ha	38 q/ha	80 q/ha

En 2017, au lancement de la plateforme, des mesures ont été réalisées pour caractériser l'état initial du sol (Tableau 2) et valider l'homogénéité de la parcelle.

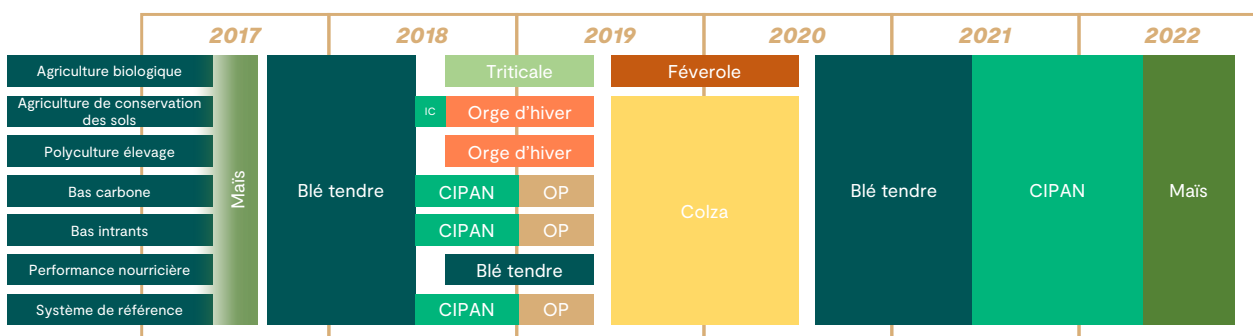
Tableau 2 : Caractéristiques de la parcelle avant la mise en place de Trajectoire en 2017

Type de sol	Profondeur	Réserve utile	pH eau	Matière organique	C/N	CEC
Limons profonds	90 cm	204 mm	7,66	31,1 g/kg de terre	10,4	13 cmol+/kg de terre

c) Une rotation culturale commune

Les systèmes suivent une rotation culturale de 5 années incluant des cultures typiques du territoire francilien. Cette rotation est quasiment identique pour les sept systèmes : *Blé - Seconde céréale (blé, orge ou triticale) - Colza (ou féverole en AB) - Blé - Maïs*. Tout comme les pratiques culturales évoluent d'un système de culture à l'autre, les rotations varient légèrement en fonction des stratégies, particulièrement pour la seconde céréale à paille. La rotation culturale du système Agriculture biologique est celle qui se distingue le plus. Elle comprend une légumineuse à la place du colza.

Différentes successions culturales des systèmes de culture sur Trajectoire



OP : orge de printemps ; CIPAN : culture intermédiaire piège à nitrates

NB : en Polyculture élevage le maïs est récolté en ensilage, et en Agriculture biologique après trois échec d'implantation le maïs a été remplacé par du sarrasin

E_ L'observatoire des performances

La caractérisation des performances des systèmes de culture repose principalement sur l'acquisition de données mesurées très régulièrement au champ, par l'équipe de Trajectoire, à l'aide de matériels spécifiques. Ces données permettent d'approcher les performances réelles des systèmes de culture.

De plus, un certain nombre de données sont acquises par le calcul d'indicateurs sur la base des itinéraires techniques. Ces indicateurs calculés viennent compléter le pool d'indicateurs mesurés, afin d'avoir un aperçu de la durabilité globale des systèmes de culture.



a) Le pool d'indicateurs mesurés

Trois grands types de mesures sont réalisés directement au champ : les mesures agronomiques, les mesures environnementales et les mesures de biodiversité.

Les mesures agronomiques

Mesure	Matériel utilisé	Fréquence
Stockage de carbone	Carottier Géonor® (5 carottes par bande)	1 fois à chaque début de rotation (tous les 5 ans)
Croissance des plantes	Prélèvements de biomasse (placettes de 1 m ² par bande)	3 fois par an aux stades-clés
État de nutrition des céréales	N-Tester®	Toutes les semaines pendant la croissance et le remplissage du grain
Reliquats azotés	Tarière (profondeur de 90cm)	2 fois par an, en entrée et en sortie d'hiver
Disponibilités des éléments nutritifs dans le sol	Plant Root Simulator® (4 sondes par bande)	Tous les 15 jours
Pression des bioagresseurs	Comptages et notations	Au besoin de caractériser la pression
Composantes de rendement	Comptages et prélèvements de biomasse	Aux différents stades de la culture
Rendements	Pont bascule de l'exploitation	1 fois par an, à la récolte
Qualité technologique	Matériel d'évaluation de la qualité du grain de la coopérative	1 fois par an, à la récolte

Les mesures environnementales

Mesure	Matériel utilisé	Fréquence
Flux de nitrates vers la nappe phréatique	Bougies poreuses à 90 cm (8 bougies par bande)	Durant la période hivernale et à chaque période de lame d'eau drainante
Flux de matières actives vers la nappe phréatique	Bougies poreuses à 90 cm (8 bougies par bande)	Durant la période hivernale et à chaque période de lame d'eau drainante
Émissions directes de protoxyde d'azote (N ₂ O)	Chambres statiques (5 chambres par bande)	20 fois par campagne culturale

Les mesures de biodiversité

Mesure	Matériel utilisé	Fréquence
Dégradabilité de la matière organique	Test du slip et Bait Lamina®	1 fois par campagne culturale (mai-juillet)
Dénombrement des lombrics	Protocole moutarde (3 x 1m ²)	1 fois par campagne culturale (mars)
Biomasses microbiennes et fongiques dans le sol	Tarière (profondeur 20 cm)	1 fois par campagne culturale (décembre)

b) Le pool d'indicateurs calculés

Trois grands types d'indicateurs de performances sont calculés pour compléter l'évaluation de durabilité : des indicateurs de performances environnementales, économiques et sociales.

Indicateur	Méthode / Source	Fréquence
Consommation d'énergie fossiles	GESTIM+	1 fois par campagne culturale
Émissions de gaz à effet de serre	GESTIM+	1 fois par campagne culturale
Indice de Fréquence de Traitements (IFT)	Ministère de l'agriculture et de la souveraineté alimentaire	1 fois par campagne culturale
Charges brutes (opérationnelles + mécanisation)	Chambre d'agriculture de région Île-de-France	1 fois par campagne culturale
Marges semi-nettes (hors main d'œuvre)	Chambre d'agriculture de région Île-de-France	1 fois par campagne culturale
Nombre d'heures de travail	Données ferme de Grignon	1 fois par campagne culturale
Nombre de personnes nourries	PerfAlim®	1 fois par campagne culturale

2.

Les performances pluriannuelles



A_ Les faits marquants annuels

Le **Tableau 3** ci-dessous regroupe les informations-clefs sur les conditions climatiques et les pressions des bioagresseurs qui ont prévalu les 5 premières années du dispositif et qui sont importantes pour l'interprétation des résultats de mesures.

Tableau 3 : Faits marquants annuels par campagne culturale sur Trajectoire

Campagne culturale	Culture(s) sur Trajectoire	Conditions climatiques	Pression(s) des bioagresseurs
2017-2018	Blé tendre sur toutes les bandes.	Un été sec. Un précédent maïs avec des rendements moyens. Des reliquats importants. Une forte pluviométrie en hiver (300 mm sur la période décembre-avril).	Pas de pression particulière. Peu d'adventice, la parcelle était très propre au lancement du dispositif.
2018-2019	Blé tendre sur PN. Orge de printemps sur GES, BI, REF. Orge d'hiver sur ACS, PE. Triticale sur AB.	De faibles précipitations en automne et hiver (pas de lame d'eau drainante). De fortes températures.	Peu de salissement. Une faible pression maladie. Un risque d'échaudage en fin de cycle.
2019-2020	Colza sur toutes les bandes sauf AB. Féverole sur AB.	Un mois de septembre sec. Un automne et un hiver pluvieux et doux. Des gelées tardives. Un printemps et un été sec et chaud.	Une forte pression des ravageurs au printemps, mais pas d'accident en colza. Un risque important de stress hydrique en fin de cycle.
2020-2021	Blé tendre sur toutes les bandes.	Une année globalement pluvieuse, en particulier à la fin du printemps et à l'été. Des températures élevées jusqu'à février, puis fraîches ensuite. Un épisode de gel tardif début avril.	Une pression importante de pucerons à l'automne et taupins à l'implantation. Une pression de maladies importante (septoriose et fusariose). Une forte augmentation du salissement.
2021-2022	Maïs grain sur ACS, GES, PN, BI et REF. Maïs ensilage sur PE. Sarrasin (après 3 échecs successifs de maïs grain) sur AB.	Une année globalement sèche (en particulier à l'implantation du maïs). Des températures fraîches jusqu'à janvier puis très élevées.	Une forte pression des corneilles, provoquant l'abandon du maïs sur la bande AB. Un risque important de stress hydrique.

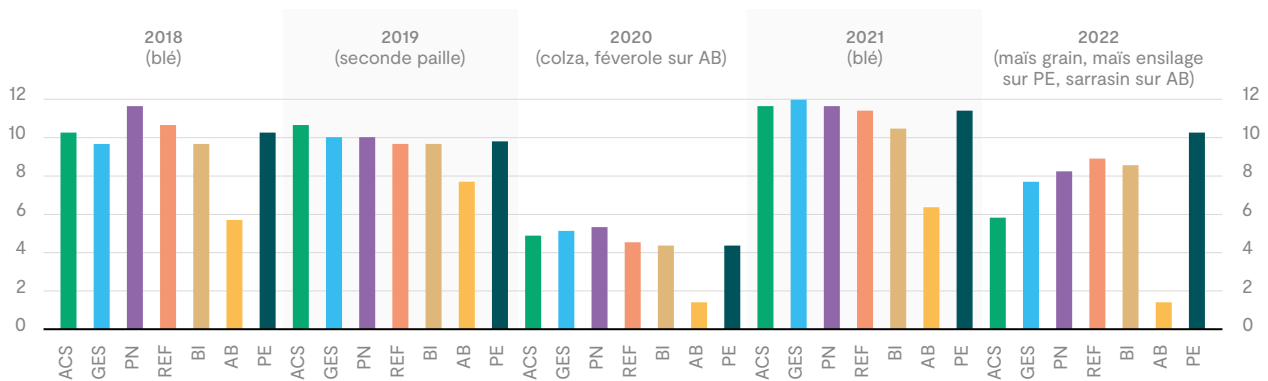
B_ Focus sur les performances technico-économiques

a) Le rendement

Protocole

L'évaluation du rendement se fait avec les matériels de l'exploitation : moissonneuse-batteuse ou pont-bascule.

Figure 2 : Rendements des produits principaux sur Trajectoire en t/ha (tMS/ha pour PE 2022)



Globalement, les rendements sont bons voire très bons sur les cinq années de la rotation, comme le montre la Figure 2 ci-dessus. Les rendements sur AB sont systématiquement beaucoup plus faibles que sur les autres bandes (-56 % en moyenne par rapport aux rendements sur PN), mais ils sont plutôt bons comparés aux rendements en agriculture biologique en Île-de-France.

La récolte 2022 est plus faible que ce qui était prévu. En effet, le printemps sec a causé d'importantes difficultés d'implantation du maïs sur la majorité des systèmes, d'où des rendements en retrait. Cette sécheresse additionnée à une pression importante des cornelles a en outre conduit à semer du sarrasin sur la bande AB, après 3 échecs de semis en maïs.

b) La qualité technologique

Protocole

Pour évaluer la qualité technologique, des échantillons sont directement prélevés dans la benne après récolte. Puis, ils sont analysés à la coopérative ou à la ferme en fonction des critères de qualité de la culture : taux de protéines pour les céréales, taux d'huile pour le colza, taux de matière sèche pour l'ensilage, etc.

La qualité technologique est très hétérogène en fonction des années de production. À noter qu'elle est prise en compte dans le prix de vente des produits (par exemple bonus/malus sur la teneur en protéines du blé).

Certains résultats annuels sont significatifs. Ainsi, les taux de protéines du blé de la récolte 2021 sont relativement peu élevés (de 9,8 à 11 % pour les systèmes conventionnels), en lien avec des rendements très élevés (de 10,5 à près de 12 t/ha pour les systèmes conventionnels). Cela illustre bien le phénomène de dilution de la protéine par le rendement.

Par ailleurs, cette année-là, on note aussi que le système BI est en retrait, à la fois en rendement (10,5 t/ha) et en taux de protéines (9,8 %), ce qui illustre bien l'effet d'une fertilisation réduite.

À l'échelle pluriannuelle, les différences de qualités entre bandes sont aplanies par la diversité des critères de qualité d'une culture à l'autre. Toutefois, le système PE est un peu en retrait par rapport aux autres, principalement du fait d'une teneur en matière sèche du maïs fourrage particulièrement basse lors de la récolte 2022.

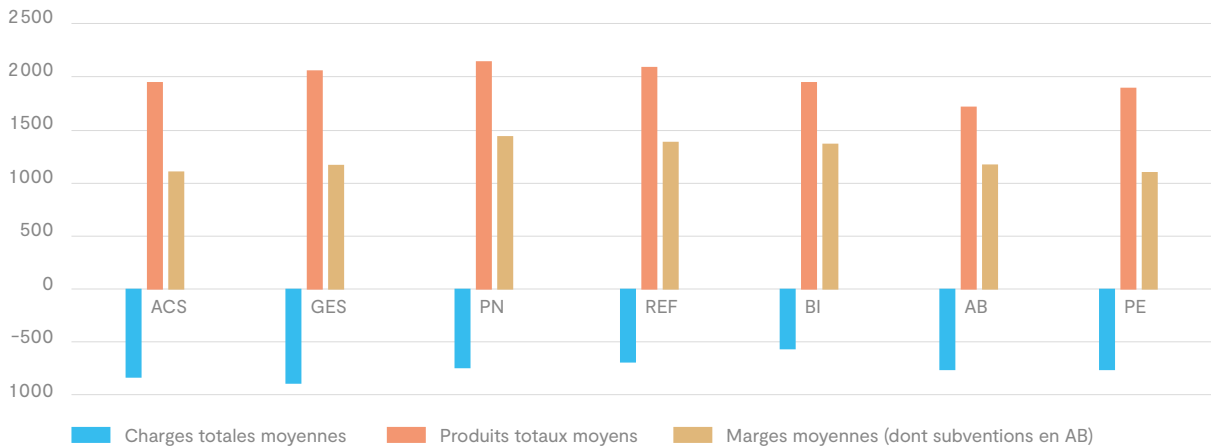
c) Les coûts, les produits et la marge semi-nette

MÉTHODE

Les coûts sont calculés sur la base des coûts réels des intrants, issus des factures des fournisseurs, et des charges de mécanisation, issues de tables de références ou de dires d'experts.

Les prix de vente sont ceux pratiqués par les coopératives le jour de la moisson et sont, si besoin, ajustés avec les primes ou pénalités relatives à la qualité. Concernant le fourrage cultivé en culture principale (maïs ensilage sur PE), un prix de vente théorique « à dire d'expert » est appliqué. En revanche, la paille et les fourrages en intercultures ont un prix de vente nul. Pour le système Agriculture biologique, des prix de vente de conversion et des subventions à la conversion sont appliqués aux deux premières années. À partir de la troisième année, le prix de l'agriculture biologique et les subventions au maintien sont appliqués.

Figure 3 : Résultats économiques moyens sur la rotation : charges, produits et marges moyens en €/ha



PN obtient les marges les plus élevées en moyenne sur cinq ans, il est suivi de près par le système REF puis BI. Pour PN et REF, le niveau élevé de marge s'explique par des produits plus élevés tandis qu'en BI c'est logiquement le niveau de charge plus bas qui explique la bonne marge, malgré une production réduite.

GES, ACS, PE et AB obtiennent des marges similaires et en retrait par rapport au trio de tête. Concernant GES et ACS, leurs niveaux de charges plutôt élevés (engrais ou semences) expliquent la performance économique moindre. PE génère des produits plus faibles que les autres systèmes

conventionnels, à cause de la valorisation faible ou nulle de certaines récoltes. AB est pénalisé économiquement par ses charges importantes et son niveau de production plus faible que les autres systèmes, même si ce dernier est globalement très correct pour de l'agriculture biologique.

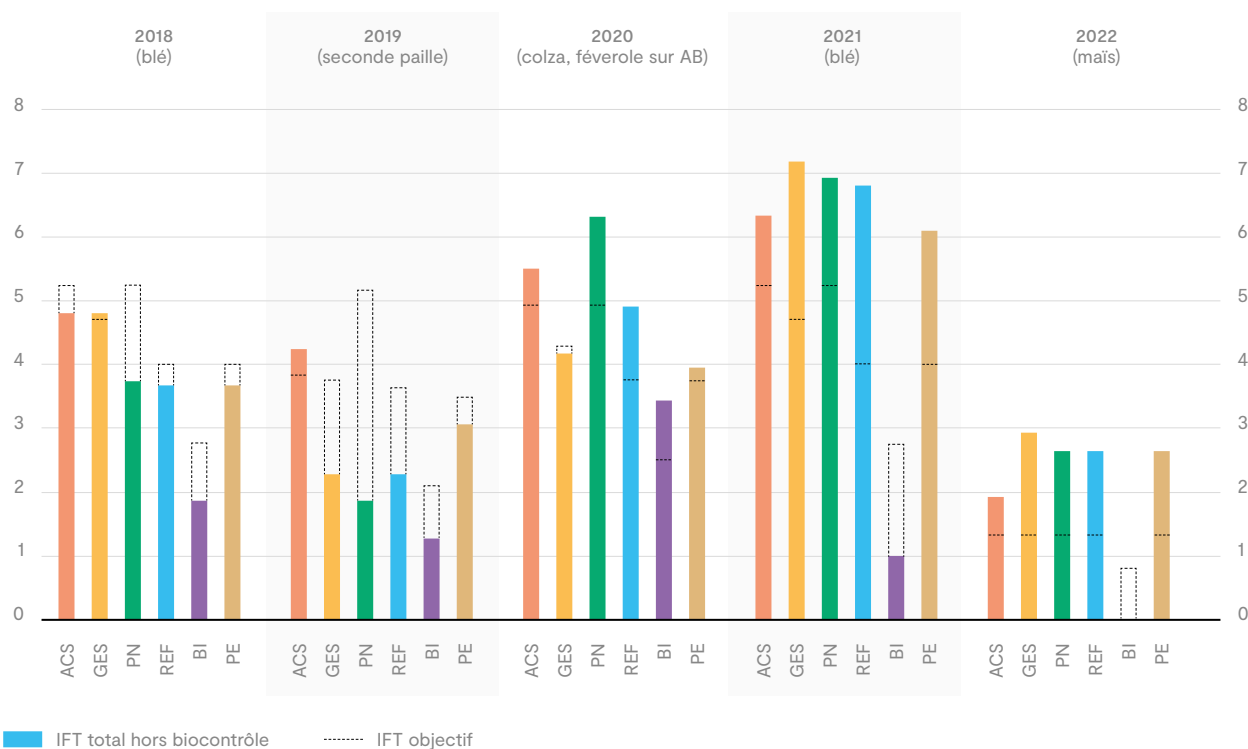
AB est aussi le seul système à générer une marge négative, lors de la 5^e campagne (voir les détails par système dans le Chapitre 3). En effet, en 2021-2022, AB a supporté des coûts de semences très importants (3 échecs de semis de maïs, suivis par un semis de sarrasin).

d) L'Indice de Fréquence de Traitements

MÉTHODE

L'Indice de Fréquence de Traitements (IFT) est calculé campagne par campagne à partir des doses réelles de produits de protection de synthèse utilisés et des doses homologuées de ces produits. Le système AB n'apparaît pas dans cette analyse car son IFT est nul, conformément au cahier des charges de l'agriculture biologique.

Figure 4 : Indices de Fréquence de Traitements (IFT) hors biocontrôle, sur l'ensemble de la rotation.



L'analyse des résultats annuels montre une grande disparité d'IFT entre systèmes de culture. Ainsi, on observe que l'IFT du blé du système GES de la campagne 2020-2021 est à 7,2, alors que celui du blé BI est à 1,1. On observe également de grandes différences entre campagnes culturales. Par exemple, l'IFT du blé PN de la campagne 2017-2018 est à 1,9, celui du blé PN de la campagne 2020-2021 est à 6,9.

L'IFT du système BI est le moins élevé de tous les systèmes (hors AB), pour toutes les années de la rotation. Il s'explique par une prise de risque importante en termes de réduction de la protection des cultures en lien avec des objectifs de rendement réduits, et associée à la mobilisation d'autres

pratiques agricoles telles que le décalage des dates de semis, l'utilisation de plantes compagnes, le désherbage mécanique, etc.

Le système ACS a l'IFT moyen le plus élevé sur la durée de la rotation à cause d'une utilisation accrue d'herbicide.

Les autres systèmes de culture ont un IFT plutôt maîtrisé les premières années, mais il ne se maintient pas et dépasse les objectifs dans la majorité des cas les trois dernières années de la rotation. Cela tient principalement à une augmentation de l'utilisation d'insecticides d'automne, visant à compenser le retrait de matières actives particulièrement efficaces en traitement de semence (gaucho).

C_ Focus sur la qualité de l'eau

Protocole

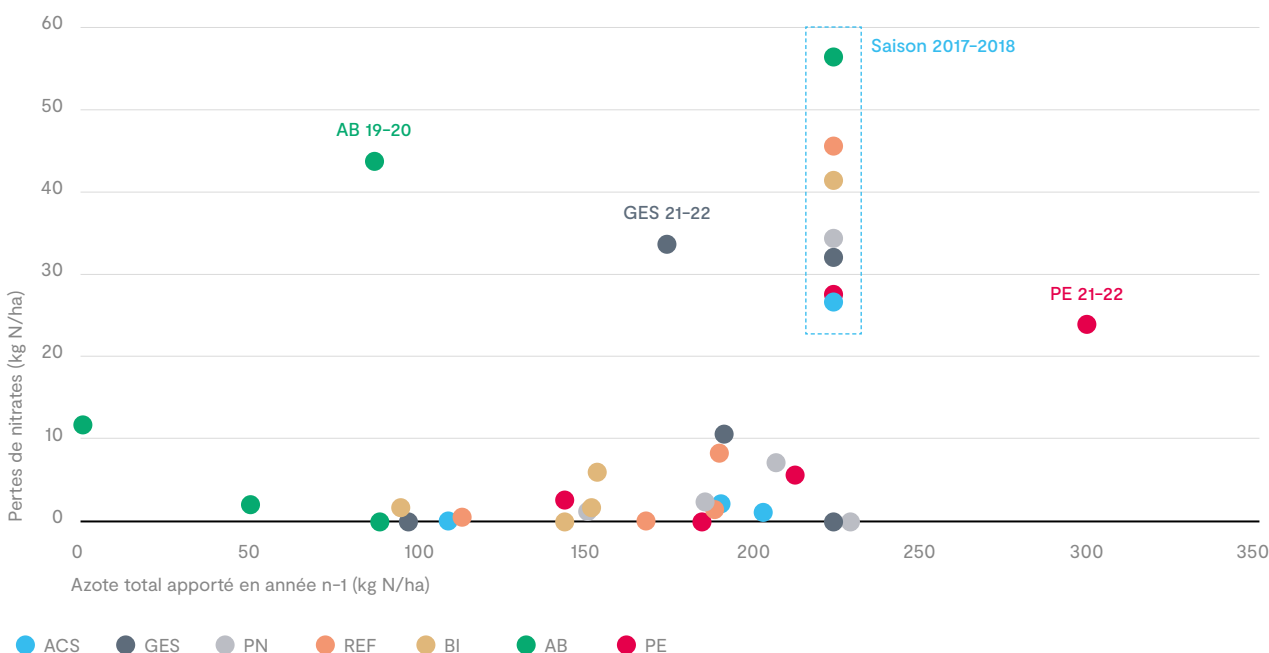
Un set de bougies poreuses (5 à 8 par système de culture) permet de prélever l'eau de drainage dans l'horizon sous-racinaire, soit à 90 cm de profondeur (voir photo en page suivante). Les prélèvements sont effectués régulièrement durant la période de drainage (automne-hiver). Les échantillons sont analysés pour déterminer leurs teneurs en nitrates et éventuellement en matières actives, en fonction du volume d'eau prélevé.

Les flux de nitrates sont calculés sur la base des concentrations sous-racinaires, multipliées par la quantité d'eau drainée durant la période automne-hiver (lame d'eau drainante). C'est en effet la lame d'eau drainante qui véhicule les éléments vers la nappe phréatique. La lame d'eau dépend des conditions climatiques de l'année culturale (pluviométrie), des cultures en place (évapotranspiration) et de la réserve utile de la parcelle (estimée à 204 mm sur Trajectoire).

Des problèmes de pollutions du matériel d'échantillonnage par certaines matières actives ont été observés. Ces pollutions concernaient le glyphosate, son métabolite l'AMPA et la propyzamide et aucun résultat n'a pu être exploité pour ces substances.

a) Les flux de nitrates

Figure 5 : Pertes de nitrates annuelles en fonction de la quantité d'azote apportée



Comme on l'observe dans la Figure 5, les pertes mesurées sont, dans la grande majorité des cas, inférieures à une dizaine de kilogramme par hectare. De plus, on observe peu de relations entre les quantités de nitrates lixiviées et la dose d'azote apportée avant la période de drainage.

Par ailleurs, de grandes variabilités interannuelles ont été observées. Ainsi, les pertes moyennes sont proches de 40 kg N/ha lors de la saison 2017-2018 alors qu'elles

étaient nulles sur la saison suivante (2018-2019) pour cause d'absence de lame d'eau drainante.

Les pertes élevées en 2017-2018 s'expliquent par une lame drainante importante (163 mm cumulés), par des reliquats élevés en entrée d'hiver à la suite du précédent maïs, et enfin par un couvert automnal de blé relativement peu développé, en particulier en AB, du fait d'un semis plus tardif.

Enfin, certains systèmes présentent ponctuellement des pertes d'azote par lixiviation importantes. C'est le cas du système AB en 2019-2020 (féverole) ainsi que des systèmes GES (féverole) et PE (seigle) en 2021-2022.

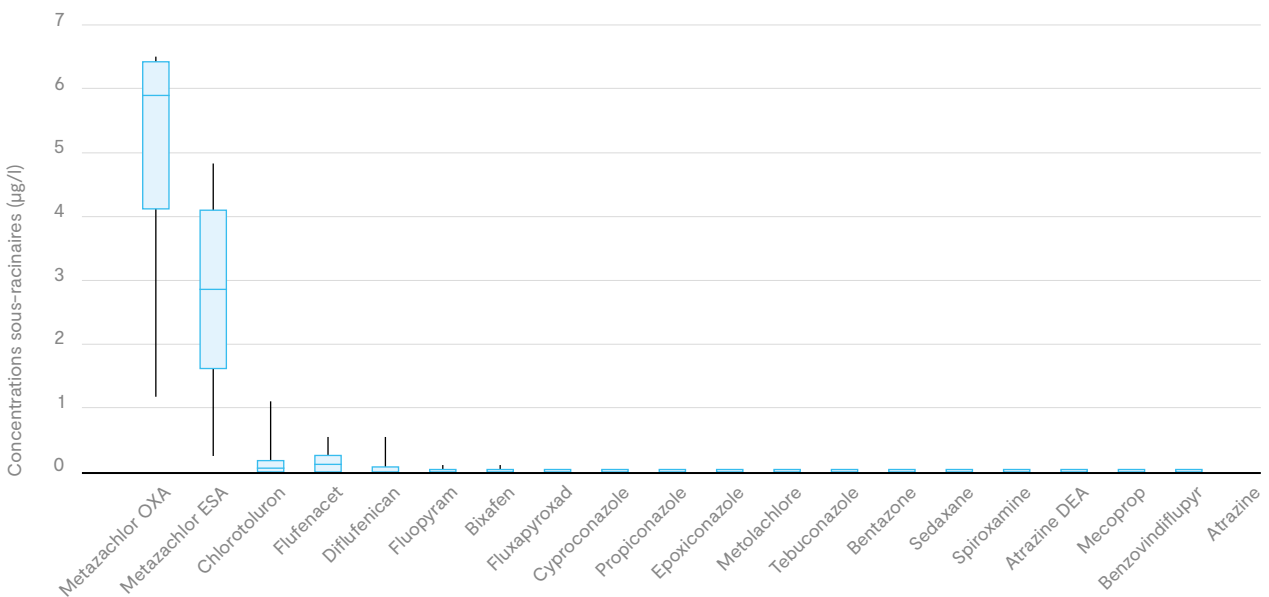
- ▶ Lors de la campagne 2019-2020, une féverole a été semée en octobre sur AB, après 2 déchaumages, alors que les autres bandes ont été semées en colza en août. La lame d'eau drainante a été forte (150 mm en moyenne) et des concentrations de nitrates sous-racinaires importantes ont été observées sous la féverole. Sous les autres bandes, semées en colza, les concentrations de nitrates sous-racinaires étaient très faibles, y compris sur PE qui avait reçu du lisier à l'automne, sans doute grâce à la valorisation de l'azote par la culture.
- ▶ Lors de la campagne 2021-2022, des intercultures ont été implantées avant le maïs : début août pour la plupart des bandes (en phacélie et légumineuses ou en moutarde), mi-septembre pour PE (seigle) et fin octobre pour GES (féverole après 2 échecs d'implantation). La lame d'eau drainante était moyenne (60 à 100 mm) et tardive et des pertes relativement importantes ont été mesurées sous PE et GES où les intercultures ont été implantées plus tardivement.

Ces résultats montrent qu'il y a eu relativement peu de pertes de nitrates sur l'ensemble de la rotation et des bandes. Ils mettent également en évidence l'effet prépondérant de la lame d'eau drainante ainsi que de la nature du peuplement végétal et de son développement sur la lixiviation des nitrates. Enfin, ils permettent de confirmer la grande efficacité du colza et des intercultures précoces comme pièges à nitrates.



b) Les flux de matière active

Figure 6 : Concentrations sous-racinaires de matières actives (MA), par MA, tous systèmes et toutes années confondus



La Figure 6 représente les concentrations des matières actives détectées sur l'ensemble des systèmes et des années culturales. Dans la grande majorité des cas, les concentrations étaient inférieures au seuil de 0,1 µg de MA par litre qui correspond à la norme de potabilité de l'eau appliquée à la distribution.

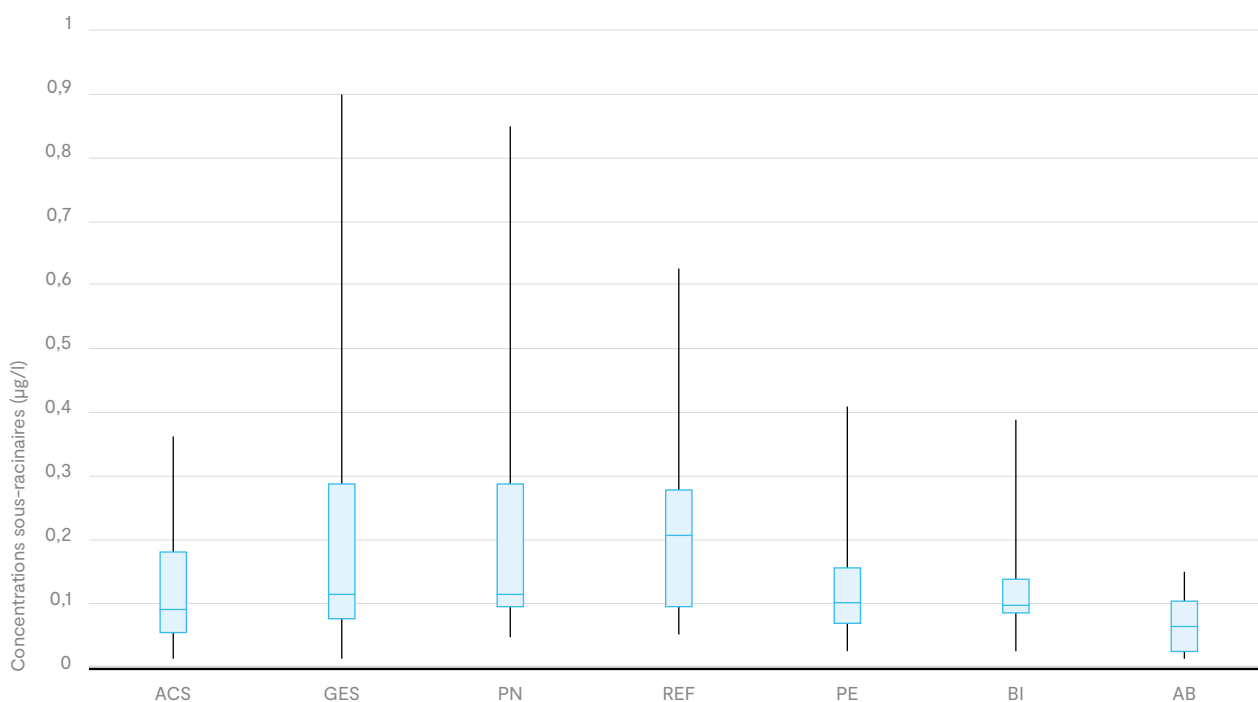
On a toutefois observé :

► Deux métabolites du Métazachlore (Métazachlore OXA et Métazachlore ESA) détectés à des concentrations extrêmement élevées allant jusqu'à 60 fois la norme mentionnée ci-dessus. Ils ont été observés uniquement sur la bande ACS qui est la seule à avoir reçu du Métazachlore en désherbage du colza (un quart de dose homologuée de Butisan S en août 2019). Sur les autres bandes, ce même herbicide était planifié mais il n'a pas été appliqué du fait d'un changement dans les prévisions météorologiques du moment. A l'échelle nationale, ces métabolites sont fréquemment impliqués dans les situations de non-conformité des captages. On notera enfin que des résultats très similaires ont été observés pour les métabolites du S-Métolachlore sur des systèmes ou lors d'années culturales non présentés ici.

► Trois matières actives détectées à des concentrations parfois élevées dépassant fréquemment le seuil de 0,1 µg de MA par litre : le Chlortoluron, le Flufenacet et le Diflufenican. Ces matières actives sont toutes issues de produits herbicides appliqués à l'automne sur les céréales. Leur présence est systématique dans les bougies lors de la saison de drainage suivante.

► Et quinze autres matières actives retrouvées à des concentrations beaucoup plus faibles, dont une majorité de fongicides. On notera que six de ces matières actives (dont l'atrazine) n'ont pas été appliquées sur la parcelle depuis plus d'une décennie. Leur présence est probablement liée à des résidus sur le matériel de mesure (céramiques des bougies) et/ou dans le sol.

Figure 7 : Concentrations sous-racinaires de matières actives (MA) par système, toutes MA (hors métabolites du métazachlore) et toutes années confondues



La comparaison entre les bandes (hors métabolites du métazachlore sur ACS) proposée en Figure 7 montre que le système AB se démarque assez clairement, avec des concentrations sous-racinaires plus basses et moins variables que les autres bandes. Sur BI, la différence est moins visible à l'échelle pluriannuelle, cependant, les données détaillées par année montrent une baisse rapide des concentrations mesurées sous ce système après l'hiver 2017-2018, où des résidus avaient été observés suite au désherbage de l'automne 2017.

Globalement, les suivis de flux de matières actives sur Trajectoire montrent le poids écrasant des deux métabolites du Métazachlore et le poids important, bien que plus faible des quelques autres herbicides d'automne sur la qualité de l'eau sous-racinaire. Il faut également noter que la présence des métabolites du métazachlore en ACS seulement n'est pas liée à une spécificité de ce système de culture mais aux circonstances particulières au moment de l'application qui ont conduit à ne pas traiter les autres systèmes. Enfin, les pratiques de réduction ou de suppression de l'utilisation des produits phytosanitaires ont des effets sur la qualité de l'eau sous-racinaire qui sont bien marqués en AB et visibles en BI.

D_ Focus sur les émissions de gaz à effet de serre et le stockage de carbone

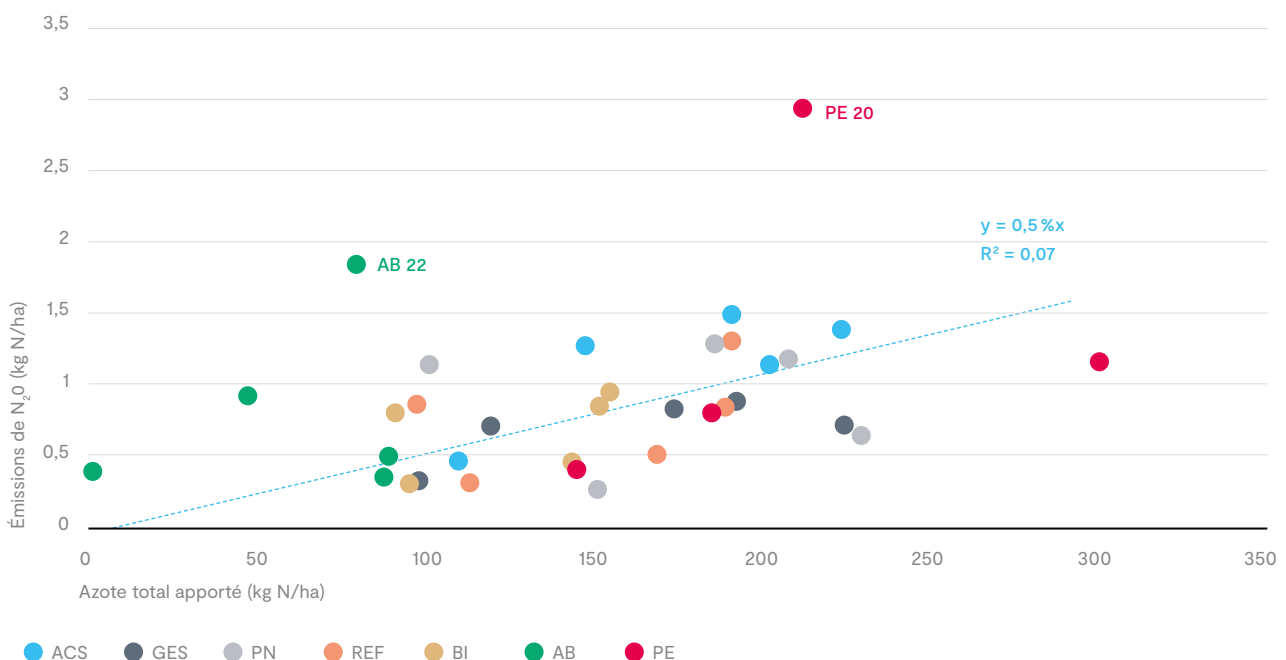
a) Les émissions de protoxyde d'azote

Protocole

Les émissions de protoxyde d'azote (N_2O) sont mesurées à l'aide de chambres statiques enfoncées dans le sol (voir photo ci-contre). Chaque système est équipé de 5 chambres et 5 autres chambres sont parfois déployées dans les zones non fertilisées de certains systèmes. À chaque date d'échantillonnage, soit environ 20 fois par an, les chambres sont fermées hermétiquement avec un couvercle, pour que les gaz émis s'accumulent à l'intérieur sur une durée totale de 30 minutes. Trois échantillons de gaz successifs sont prélevés à l'aide d'une seringue (aux temps T_0 , $T_0 + 15$ minutes, $T_0 + 30$ minutes) et sont analysés. L'évolution des concentrations dans les chambres permet de calculer des émissions par hectare et par jour. Enfin, ces émissions sont intégrées par interpolation linéaire pour estimer des émissions sur les cycles culturaux complets.



Figure 8 : Émissions de N_2O annuelles par quantité d'azote apporté sur Trajectoire



Les résultats de la [Figure 8](#) illustrent les effets importants de la dose d'azote apportée, effet qui est largement connu et documenté, ainsi :

- ▶ En moyenne, on observe que 0,5 % de l'azote apporté (sous forme organique ou minérale) a été émis sous forme de protoxyde d'azote sur la plateforme. On note que cette valeur est très inférieure au facteur d'émissions généralement utilisé pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre (1%)¹.
- ▶ L'effet dose est également visible sur BI et AB où des doses d'apport faibles à modérées sont en cohérence avec des émissions faibles, totalisant moins de 1 kg de N sous forme de N₂O par hectare. Une exception est à noter en AB pour la campagne 2021-2022, lors de laquelle le sol est resté nu tout le printemps. Trois semis de maïs consécutifs avaient été réalisés avec, à chaque fois, un travail du sol stimulant la minéralisation de l'azote et, sans doute, les émissions de N₂O. Dans ce cas, le niveau important d'émissions est à mettre en lien avec un échec technique.
- ▶ Enfin l'effet de doses importantes est visible en PE où les émissions sont régulièrement plus marquées que sur les autres systèmes, à la suite d'épandage d'effluents d'élevage. Comme une partie seulement de l'azote organique est minéralisée l'année de l'épandage, l'usage d'effluents en PE conduit en effet à l'application de doses plus importantes d'azote total. Il semblerait en outre que l'usage de ces effluents puisse être à l'origine d'un accroissement des émissions au-delà du simple effet dose. On a en effet observé en 2019-2020 des émissions particulièrement importantes en PE au semis du colza suite à l'épandage de lisier, et des niveaux d'émissions similaires ou encore plus marqués ont déjà été observés sur d'autres parcelles et d'autres années à la ferme de Grignon suite à des épandages d'automne ou de printemps.

On observe également qu'en ACS, les émissions de N₂O sont généralement plus importantes que sur les autres systèmes, avec en moyenne 28 % de plus que PN. Cela pourrait s'expliquer, en partie, par le tassement du sol lié à l'absence de travail. Le tassement peut en effet générer une saturation plus rapide en eau des pores du sol, favorable aux émissions. Il est possible que ce phénomène s'estompe avec le temps. D'autre part, la fertilisation sur ACS est plus importante en sortie d'hiver, en réponse à une minéralisation plus tardive, liée à un sol plus froid. Ces apports importants à une période favorable aux émissions peuvent également expliquer des émissions accrues.

Enfin, sur le système GES, l'utilisation d'un engrais inhibiteur de nitrification dans le programme de fertilisation a permis de réduire visiblement les émissions. Ainsi, une réduction moyenne de 23 % des émissions de N₂O sur les cycles culturaux complets a été observée sur GES par rapport à PN. L'effet a été visible 3 années sur 5 sur cette première rotation, et cela lors des années les plus émissives. Les deux autres années, les niveaux d'émissions étaient très faibles, rendant peu détectable l'effet de l'inhibiteur.

Par ailleurs, les résultats détaillés, non présentés ici, montrent la grande variabilité spatiale et temporelle des émissions. Ainsi au niveau spatial, les émissions mesurées dans les 5 chambres d'un même système présentent en moyenne un coefficient de variation de 20 à 70 % (non visible sur la [Figure 8](#)). En termes temporels et à titre d'exemple, les émissions moyennes observées lors de l'année culturale 2020 (féverole sur AB et colza sur les autres bandes) étaient 4 fois plus importantes qu'en 2019 (seconde céréale sur toutes les bandes). Cela est en partie lié au climat, en particulier aux précipitations au moment des apports azotés (il est tombé 79 mm au mois de février 2020 contre 33 en février 2019), et en partie aux pratiques culturales. S'agissant de ces dernières, les premières doses apportées sur le colza ont été plus importantes que sur les céréales ce qui a pu contribuer aux émissions plus fortes en 2020.

Globalement, les résultats des mesures d'émissions de N₂O mettent en évidence des phénomènes bien connus, tels que la variabilité interannuelle et le lien entre les émissions et la dose apportée. Ils permettent également de souligner des effets plus spécifiques de certaines pratiques ou aléas, tels que les échecs d'implantation, les engrais organiques, le non travail du sol, la fertilisation précoce et les inhibiteurs de nitrification.



¹ CITEPA, 2022. Rapport OMINEA – 19^e édition

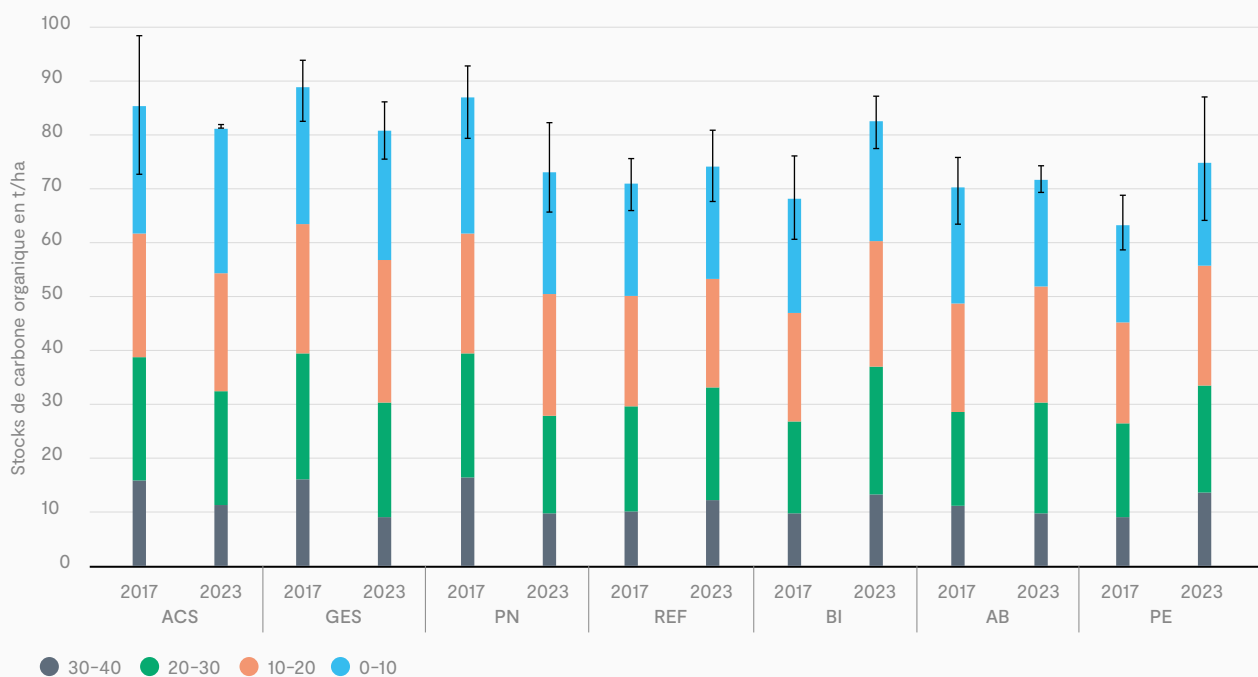
b) Les stocks de carbone organique du sol

Protocole

La méthode consiste à mesurer, pour différents horizons, la teneur en carbone du sol, qui s'exprime en g de carbone par kg de terre, ainsi que la densité apparente de ce même sol. La mesure de densité est centrale car elle permet de faire le lien entre la hauteur de terre prélevée et la masse de terre concernée par le prélèvement afin de pouvoir calculer des stocks à masse de terre constante. Six carottes de sol par système de culture et par campagne ont été prélevées entre 0 et 40 cm de profondeur à l'aide d'un carottier (voir photo ci-contre). Les carottes ont ensuite été découpées en 4 échantillons de 10 cm chacun, la moitié des carottes a servi pour l'analyse des teneurs et l'autre moitié pour l'évaluation des densités apparentes. Deux campagnes de prélèvement ont eu lieu : une en 2017 et une deuxième en 2023.



Figure 9 : Stocks de carbone organique en 2017 et 2023, à une profondeur de sol de 0 à 40 cm, par système de culture de Trajectoire



Les résultats des deux campagnes de mesure, présentés dans la Figure 9 ci-dessus, montrent des niveaux de carbone assez élevés sur les sept bandes (entre 64 et 88 tonnes de Carbone organique par ha sur 40 cm de profondeur de sol).

On observe une assez grande variabilité entre les bandes, avec un gradient de teneur de carbone organique qui décroît avec l'éloignement de la ferme (les systèmes sont classés sur le graphique selon leur disposition spatiale et ceux représentés à gauche sont les plus proches de l'exploitation). Ce gradient est cohérent avec les pratiques historiques d'épandage de matières organiques sur l'exploitation. En effet, les zones les plus proches du corps de ferme sont susceptibles d'avoir reçu plus de matières organiques que les zones plus éloignées.

On observe également une variabilité spatiale élevée entre les répétitions d'une même bande (cf. barres d'écart type) et l'évolution des stocks de carbone entre 2017 et 2023 est, la plupart du temps, inférieure à la variabilité entre les répétitions. Par conséquent, il n'est pas possible de conclure sur l'évolution des stocks de carbone, sur la base des mesures effectuées. Il semble toutefois se dessiner des tendances, plutôt à la hausse pour BI et PE, plutôt à la baisse en PN, mais ces résultats sont peu robustes.

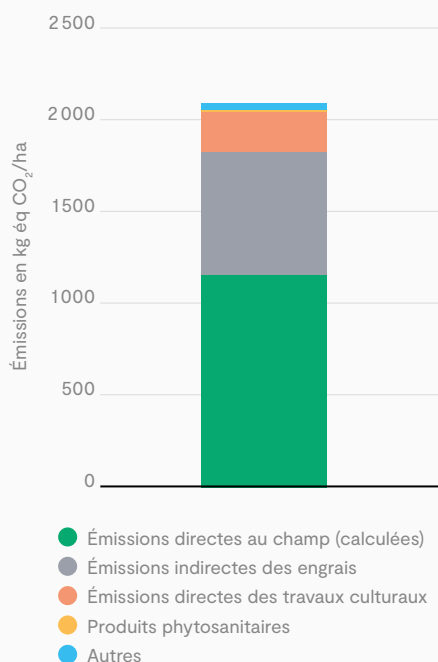
Globalement, les résultats de mesures de stocks de carbone ne sont pas conclusifs.

c) Le bilan global des émissions de gaz à effet de serre

MÉTHODE

Le calcul des émissions de gaz à effet de serre (GES) totales est basé sur les données des itinéraires techniques (quantités d'intrants et machines utilisées) et des coefficients d'impact (kg équivalent dioxyde de carbone par kg d'intrant ou par heure d'utilisation des machines), issus de tables de références. Il prend en compte les émissions directes (dioxyde de carbone issu de la combustion des carburants des tracteurs, émissions de protoxyde d'azote au champ liées aux engrais et aux résidus de culture) et les émissions indirectes (fabrication et transport des intrants et machines).

Figure 10 : Émissions de gaz à effet de serre totales du blé moyen de Trajectoire



Globalement, les résultats montrent la prépondérance des engrais dans le bilan GES des cultures. Par exemple, dans le cas du blé moyen de Trajectoire (campagnes 2017-2018, 2020-2021 et le blé PN 2018-2019, voir Figure 10 ci-contre), les émissions liées aux engrais comptent pour près de 90 % des émissions par ha de blé. Près des deux tiers des GES sont émis directement au champ, par le sol (engrais et résidus).

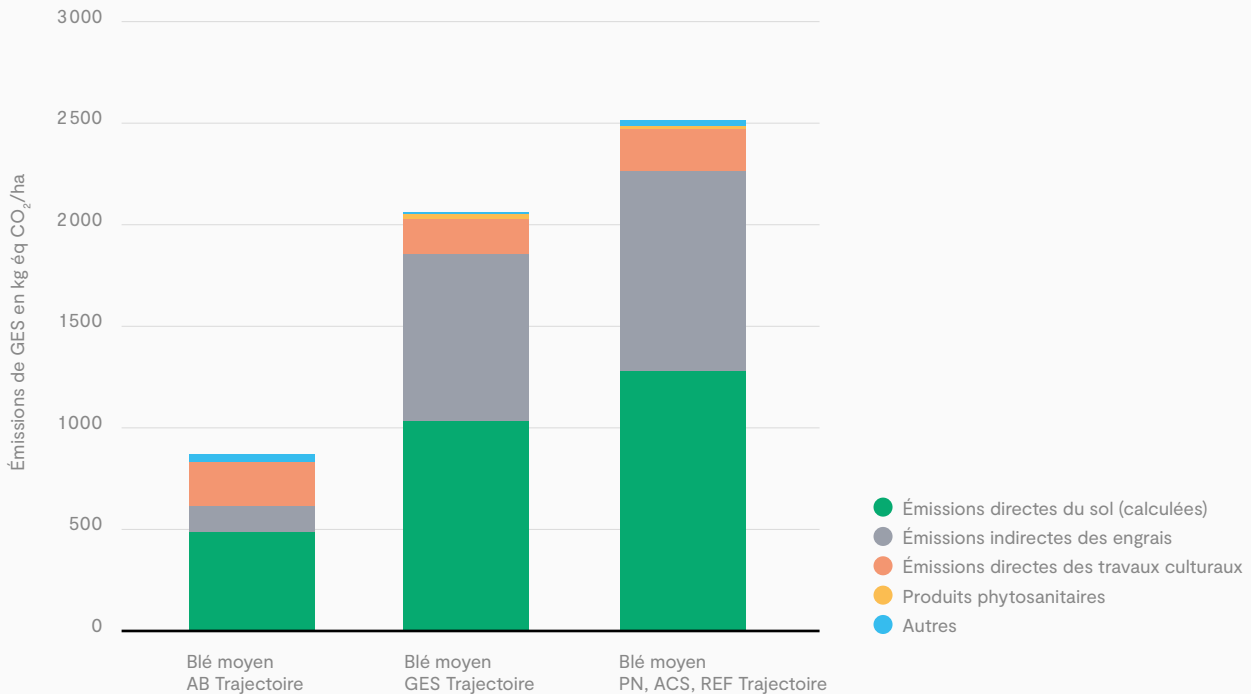
Par ailleurs, le blé moyen de Trajectoire a des émissions de GES globales inférieures de 30 % au blé moyen français². En effet :

- ▶ Les émissions au champ moyennes du blé de Trajectoire sont un peu plus faibles que la référence, sans doute grâce à la prise en compte de l'utilisation d'engrais inhibiteur de nitrification sur la bande GES, de facteurs de volatilisation récents³ et d'un taux de lixiviation de nitrates relativement faible (5 %, correspondant à la situation d'une parcelle avec des couverts en interculture et en limons profonds).
- ▶ Les émissions indirectes des engrais sont très inférieures à la référence, ce qui peut s'expliquer par l'utilisation d'engrais organiques sur les bandes AB et PE et l'utilisation d'engrais avec une base ammonitrate sur la bande GES et des coefficients d'impacts récents³ (voir explications au paragraphe suivant).

² Blé tendre conventionnel – Moyenne nationale (France), selon Agribalyse version 1.2 de mars 2015.

³ Provenant de Tailleux A. et Gac A. (2020). GES'TIM+ Référence méthodologique pour l'évaluation de l'impact des activités agricoles sur l'effet de serre, la préservation des ressources énergétiques et la qualité de l'air. Version 1.2. 517p.

Figure 11 : Émissions de GES totales du blé de Trajectoire par groupe de stratégie de fertilisation



La Figure 11 montre que les émissions directes de gaz à effet de serre au champ diffèrent selon la stratégie de fertilisation :

- ▶ Ces émissions sont nettement inférieures en AB car les apports d'azote sont inférieurs à ceux des autres systèmes (48 à 90 unités d'azote sur AB, contre plus de 150 sur les autres bandes).
- ▶ Les émissions directes de la bande GES sont plus faibles que celles de PN, ACS et REF, alors même que les apports en azote sont équivalents en moyenne. En effet, la fertilisation sur GES inclut un engrais inhibiteur de nitrification, qui génère moins d'émissions au champ. Il lui est donc appliqué un abattement de 30% des émissions directes au champ par rapport à celles de la solution azotée utilisée sur PN, ACS et REF.

La Figure 11 montre aussi que les émissions de GES liées à la production des engrais diffèrent selon la stratégie de fertilisation :

- ▶ Les émissions indirectes des engrais de la bande AB sont très faibles (-88% par rapport au blé moyen PN, ACS et REF). En effet, comme mentionné précédemment, la quantité totale d'azote apportée est beaucoup plus faible. Mais en plus, les engrais organiques utilisés sur AB sont issus de coproduits d'une autre activité. Par convention, c'est l'activité principale qui supporte la majeure partie des émissions de GES générées, et l'engrais organique qui en résulte ne supporte que les émissions liées au broyage et au séchage des coproduits.
- ▶ Les émissions indirectes des engrais de la bande GES sont relativement faibles (-16% par rapport au blé moyen PN, ACS et REF), alors que les quantités d'azote total apportées sont comparables. En effet, une partie des engrais épandus sur la bande GES sont à base d'ammonitrate (avec inhibiteur de nitrification). Or les émissions indirectes de l'ammonitrate sont inférieures de 20% à celles de la solution azotée, qui est l'engrais utilisé sur les autres bandes (hormis AB).

E_ L'évaluation multicritère pluriannuelle

MÉTHODE

L'évaluation multicritère pluriannuelle vise à donner une appréciation des performances globales de durabilité des systèmes de culture sur l'ensemble de la rotation. Elle s'appuie sur la confrontation des résultats obtenus sur Trajectoire à des références. Elle permet de déterminer comment se positionne le système par rapport à une échelle de durabilité.

Pour ce faire, on choisit un ensemble indicateurs-clés représentatifs de la durabilité d'un système de culture. Ensuite, chaque valeur d'indicateur mesurée ou calculée est positionnée sur une échelle de valeurs de référence. Les valeurs de référence sont choisies parmi les références internes à la ferme de Grignon, des références régionales de la Chambre d'Agriculture d'Île-de-France, et/ou des références plus globales issues de méthodologies nationales ou de publications scientifiques. Enfin, ces nouvelles informations sont moyennées pour n'obtenir qu'une seule valeur par indicateur par système de culture, pour la rotation. Cette valeur est comprise entre 0 et 5, 0 étant la moins bonne note et 5 la meilleure. Les notes sont ensuite transcrites dans une échelle de couleurs, allant de rouge (Non acceptable, correspondant à une note strictement inférieure à 1) à vert foncé (Très satisfaisant, correspondant à une note supérieure ou égale à 4).

Tableau 4 : Tableau de bord des indicateurs de durabilité par système de culture sur Trajectoire

	Agriculture de conservation des sols	Bas carbone	Performance nourricière	Référence ferme de grignon	Bas intrants	Agriculture biologique	Polyculture élevage
AGRONOMIE	Rendement q/ha ; tMS/ha	Rendement	Rendement	Rendement	Rendement	Rendement	Rendement
	Qualité technologique : % huile ou protéines ou humidité	Qualité	Qualité	Qualité	Qualité	Qualité	Qualité
	Stockage de carbone* : % augmentation de stock/an	Carbone	Carbone	Carbone	Carbone	Carbone	Carbone
ENVIRONNEMENT	Émissions de GES : kg eq CO ₂ /ha	GES	GES	GES	GES	GES	GES
	Émissions directes de N ₂ O (mesurées) : g N-N ₂ O/ha	N ₂ O	N ₂ O	N ₂ O	N ₂ O	N ₂ O	N ₂ O
	Consommations d'énergie fossile : MJ/ha	Energie	Energie	Energie	Energie	Energie	Energie
	Indice de Fréquence de Traitements : IFT	IFT	IFT	IFT	IFT	IFT	IFT
	Lessivage des matières actives : µg/l d'eau drainée	MA	MA	MA	MA	MA	MA
	Lessivage des nitrates : kg N-NO ₃ ⁻ /ha	NO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻
ÉCONOMIE	Marges semi-nettes : €/ha	Marges	Marges	Marges	Marges	Marges	Marges
	Charges : €/ha	Charges	Charges	Charges	Charges	Charges	Charges
SOCIAL	Temps de travail : heures/ha	Temps	Temps	Temps	Temps	Temps	Temps
	Potentiel nourricier : Nombre de personnes nourries/ha/rotation	Pers. Nour.	Pers. Nour.	Pers. Nour.	Pers. Nour.	Pers. Nour.	Pers. Nour.

* les résultats obtenus ne permettent pas de calculer une note.

● Très satisfaisant ● Satisfaisant ● Acceptable ● Peu acceptable ● Non acceptable

Le tableau 4 ci-dessus montre que les systèmes AB et BI se distinguent par l'absence de notes « peu acceptable » et « non acceptable ». Suivent ensuite, dans l'ordre des moyennes générales des notes, les systèmes REF, PN et GES, puis ACS et enfin PE. Les différences de performances de durabilité des systèmes sont détaillées dans les parties ci-après, critère par critère.

a) Le critère agronomie

Les notes reflètent les bons résultats en termes de rendement pour l'ensemble des systèmes de culture et l'hétérogénéité des qualités en fonction des années, comme expliqué dans la partie 2.B.

Toutefois, il est important de noter qu'une échelle de références spécifique a été choisie pour les rendements du système AB. Cette échelle est basée sur des seuils de rendements régionaux en agriculture biologique, qui sont très inférieurs aux seuils de rendements en conventionnel,

utilisés pour les autres systèmes de culture. La note « Satisfaisant » de AB sur le critère Rendement traduit donc le fait que les rendements moyens de la bande AB sur la durée de la rotation sont satisfaisants par rapport à des rendements en agriculture biologique. Ces rendements sont très inférieurs aux rendements des autres bandes (voir partie 2.B), et pourraient être considérés comme peu ou pas acceptables sur une autre échelle de valeurs.

b) Le critère environnement

Sur le critère environnement, AB se détache nettement, avec des notes Satisfaisant ou Très satisfaisant. La bande BI vient en second, avec des notes qui sont au moins Acceptables. Ainsi, les stratégies très économes en utilisation d'intrants par hectare donnent de bonnes notes de durabilité environnementale sur Trajectoire.

Toutes les autres bandes ont au moins une note Peu acceptable. L'indicateur IFT se démarque, avec des notes Peu acceptables sur 4 bandes, et une note Non acceptable sur la bande ACS, qui est la seule note Non acceptable du Tableau de Bord. Celle-ci est liée à l'utilisation plus importante de produits de protection des plantes sur la bande ACS sur la durée de la rotation. Comme vu en partie 2.A.d,

les autres bandes conduites en conventionnel ont des IFT relativement modérés en début de rotation, mais qui augmentent par la suite à cause d'une augmentation des pressions et au retrait de certains produits.

Concernant les consommations d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre par hectare, les indicateurs reçoivent une note Peu acceptable pour 4 bandes. Une majeure partie de ces impacts est lié à l'utilisation d'engrais, qui génèrent en moyenne 70 % des émissions de gaz à effet de serre et 65 % des consommations d'énergie. Or ces consommations d'engrais sont importantes sur les bandes qui ont un objectif de rendement élevé.

Figure 12 : Cumuls des émissions de GES par hectare des cultures de Trajectoire sur la rotation, par système de culture (en kg éq CO₂/ha, incluant les émissions du séchage du maïs grain)

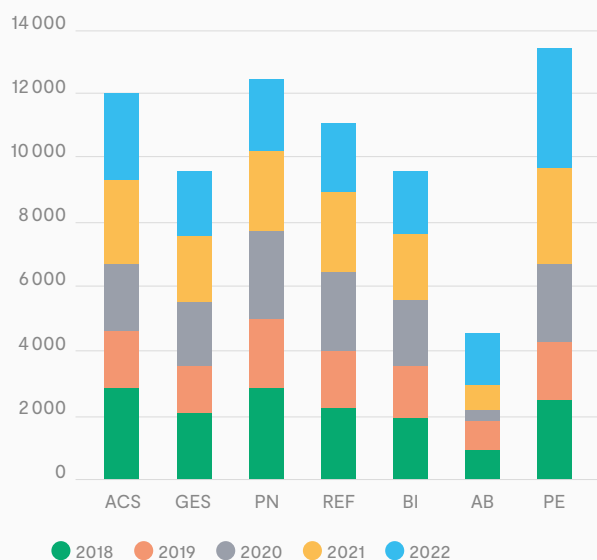
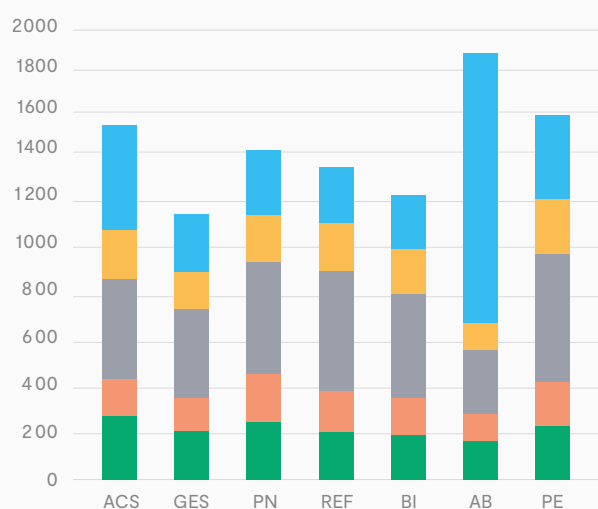


Figure 13 : Cumuls des émissions de GES par tonne des cultures sur la rotation, par système de culture (en kg éq CO₂/t, incluant les émissions du séchage du maïs grain)



Comme le montre la [Figure 12](#), le système AB cumule le moins d'émissions de gaz à effet de serre par hectare, notamment grâce à sa faible consommation d'intrants. Les systèmes GES et BI suivent, en lien avec des stratégies de fertilisation mobilisantes, pour GES, un engrais avec inhibiteur de nitrification, et, pour BI, la réduction du niveau d'intrants.

En revanche, lorsque les émissions sont rapportées à la tonne ([Figure 13](#)), c'est le système GES qui est le moins émetteur, car il combine à la fois une stratégie relativement peu émettrice par unité de surface, et un niveau de

productivité élevé. Les émissions par tonne du système AB sont particulièrement élevées lors de la campagne 2021-2022, avec beaucoup d'opérations culturales liées aux semis successifs, et un rendement en sarrasin très inférieur aux rendements des maïs des autres bandes. Toutefois, l'approche à la tonne a ses limites en termes de signification, car les cultures des différents systèmes, et donc leur fonctionnalité, ne sont pas identiques.

Figure 14 : Émissions de N sous forme de N₂O cumulées sur la rotation par système de culture, en g N-N₂O/ha

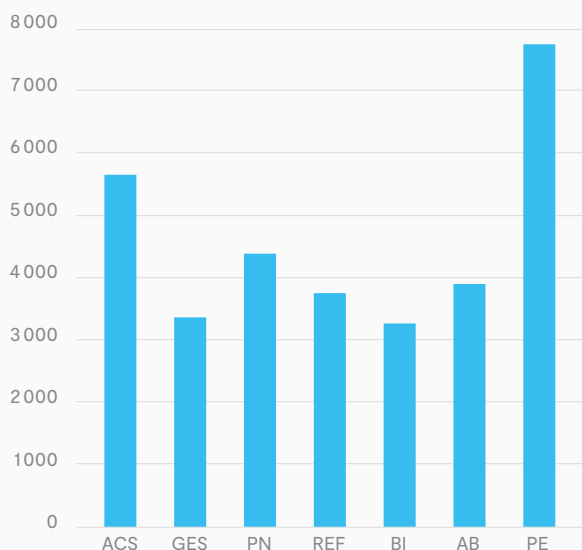
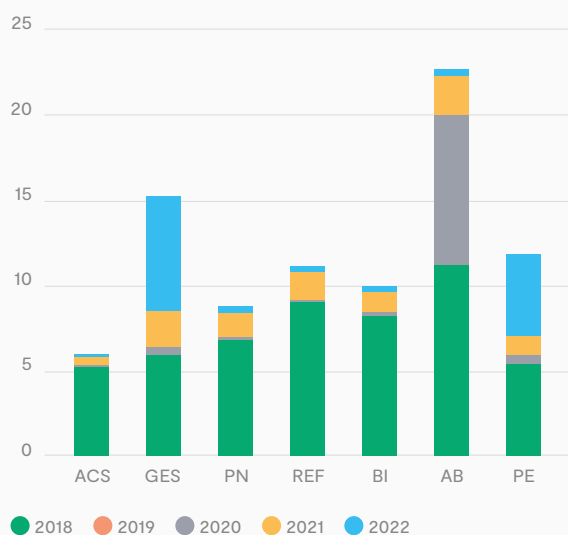


Figure 15 : Cumuls des pertes moyennes de nitrates par lixiviation sur Trajectoire, en kg N/ha



Sur le critère des émissions directes de N₂O, les notes sont uniformément bonnes à très bonnes, en lien avec des émissions mesurées faibles et des facteurs d'émission très en-dessous de celui utilisé pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre. Cependant, le cumul pluriannuel des émissions de N₂O, présenté dans la [Figure 14](#), met en évidence des émissions plus importantes en PE (liées aux apports de matières organiques) et en ACS (liées au tassement du sol) tandis que les émissions les plus faibles sont observées en BI et gaz à effet de serre (voir également la partie 2.D.a pour plus de détails).

Enfin, sur les critères en lien avec la qualité de l'eau, les bandes ont globalement des notes Satisfaisantes à Acceptables, à l'exception d'ACS sur le critère relatif au lessivage des matières actives. Cette note inférieure s'explique par la présence des métabolites du métazachlore sous le colza en 2020, suite à l'utilisation d'herbicides en août 2019 sur cette bande seule.

En matière de lessivage de nitrates, les notes Satisfaisant à Très satisfaisant de toutes les bandes s'expliquent par de faibles pertes moyennes d'azote par lixiviation sur l'ensemble des bandes (inférieures à 25 kg N/ha, voir [Figure 15](#)). Les résultats montrent bien les effets des pluviométries annuelles (récolte 2018) et des couverts (AB en 2020 et GES et PE en 2022).

c) Le critère économie

Les indicateurs économiques choisis permettent de traduire d'une part la performance économique globale (marges semi-nettes) et d'autre part la dépendance au coût des intrants et des machines (charges). La stratégie d'optimisation technique, déployée sur tous les systèmes, permet d'obtenir des notes au moins acceptables sur ces deux critères. Les moins bonnes notes sur l'indicateur de marge, obtenues par ACS, GES, AB et PE sont liées à des niveaux de charges plus élevés, associés à des niveaux de produits plus faibles pour AB et PE.

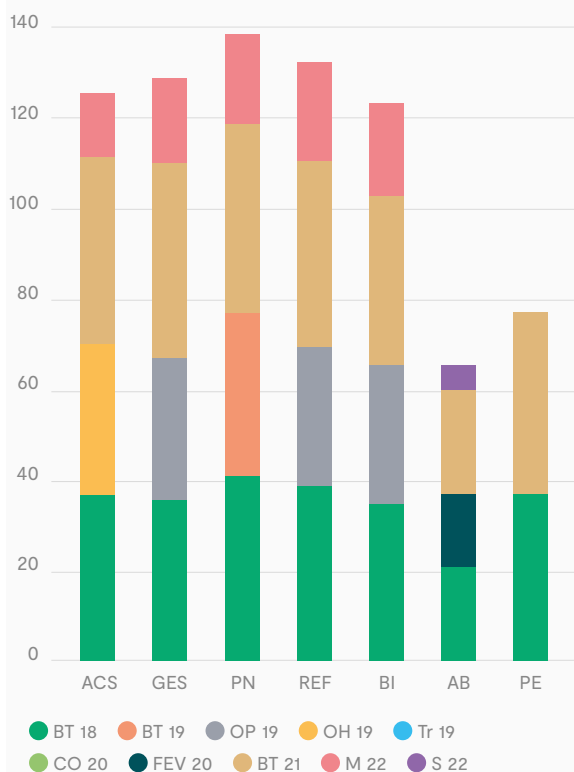
d) Le critère social

Le potentiel nourricier

MÉTHODE

La méthode PerfAlim^{®6}, développée par le Céréopa⁷, définit le nombre d'humains potentiellement nourris par les calories et les protéines fournies par l'agriculture. Les calculs sont basés sur le niveau de production annuelle des cultures, leur contenu en calories et en protéines valorisables en alimentation humaine, et les besoins moyens annuels d'un être humain en calories et en protéines. Deux potentiels nourriciers sont ainsi calculés, sur la base des calories d'une part, et des protéines d'autre part. Seul le meilleur potentiel nourricier est conservé comme indicateur pour chaque bande (dans le cas de Trajectoire, c'est le potentiel nourricier selon les besoins en protéines). À noter que les cultures fourragères ont une contribution nulle au potentiel nourricier dans PerfAlim[®].

Figure 16 : Potentiel nourricier des systèmes de culture de Trajectoire (selon besoins en protéines), en nombre de personnes par hectare.



Globalement, la majorité des systèmes ont une capacité nourricière très élevée, dû à des niveaux de production importants. Cependant, PE et AB sont en retrait, du fait de leur rotation qui inclut des cultures dédiées à l'élevage (orge fourragère et ensilage de maïs pour PE, triticale pour AB). En outre, les rendements d'AB sont significativement inférieurs aux autres bandes, malgré des niveaux très corrects pour de l'agriculture biologique.

Le temps de travail

MÉTHODE

Le temps de travail cumule les temps passés au champ sur l'ensemble de la rotation, par système de culture. Ils sont basés sur les débits de chantier moyens constatés sur la ferme et ne prennent pas en compte les spécificités de l'expérimentation. Ils visent en effet à donner une estimation du temps qui aurait été passé sur chacun des systèmes de culture, s'ils avaient été conduits sur une parcelle de taille moyenne.

Le temps de travail est noté Satisfaisant ou Très satisfaisant sur toutes les bandes sauf PE, qui nécessite des travaux supplémentaires tels que l'épandage du lisier, la récolte de la paille et l'ensilage des couverts.

⁶ <http://perfalim.com/fr/methodologie>

⁷ <https://www.cereopa.fr/>

3

Les performances des systèmes de culture



Dans ce chapitre, chaque tableau présente, pour un système de culture donné, les valeurs obtenues pour tous les indicateurs de durabilité, par campagne culturale. Chaque valeur chiffrée est accompagnée d'une case en couleur, qui représente sa note.

Les notes sont les suivantes :

- Très satisfaisant
- Satisfaisant
- Acceptable
- Peu acceptable
- Non acceptable

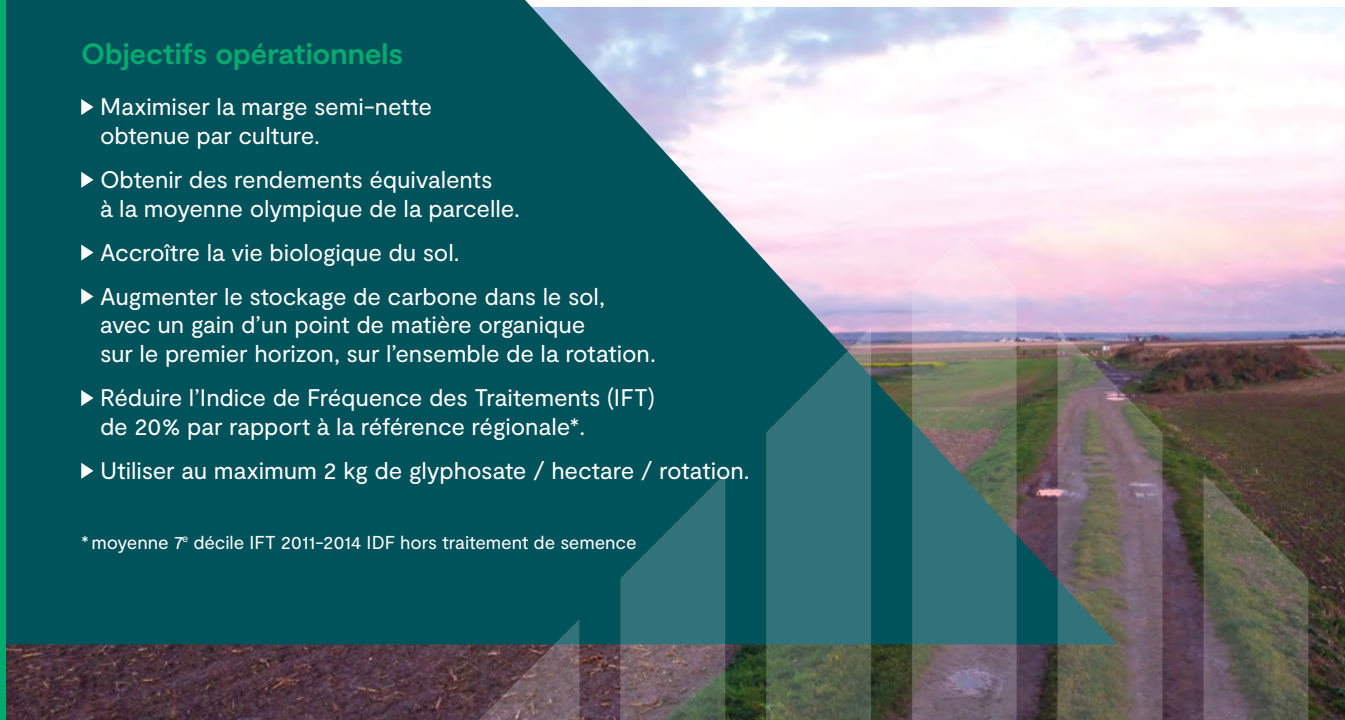
A_ Agriculture de conservation des sols

Le système Agriculture de conservation des sols repose sur l'absence de travail du sol et sur une couverture organique permanente des sols, par des résidus de culture ou des cultures de couverture.

Objectifs opérationnels

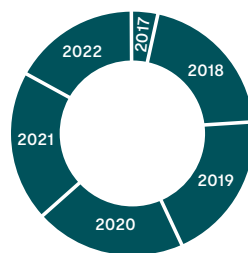
- ▶ Maximiser la marge semi-nette obtenue par culture.
- ▶ Obtenir des rendements équivalents à la moyenne olympique de la parcelle.
- ▶ Accroître la vie biologique du sol.
- ▶ Augmenter le stockage de carbone dans le sol, avec un gain d'un point de matière organique sur le premier horizon, sur l'ensemble de la rotation.
- ▶ Réduire l'Indice de Fréquence des Traitements (IFT) de 20% par rapport à la référence régionale*.
- ▶ Utiliser au maximum 2 kg de glyphosate / hectare / rotation.

*moyenne 7^e décile IFT 2011-2014 IDF hors traitement de semence

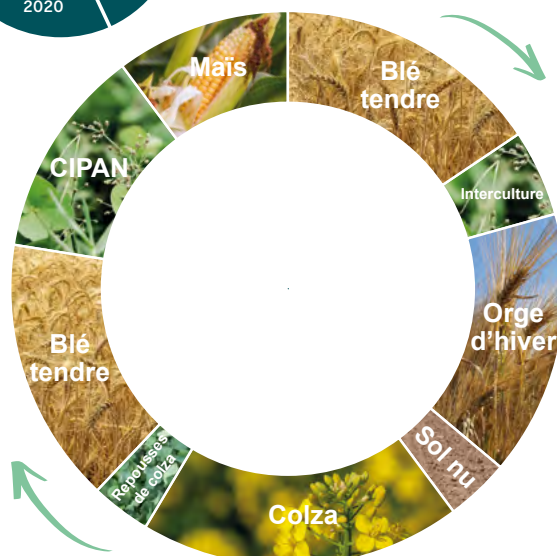


CONTRAINTES TECHNIQUES

- ▶ Utiliser des couverts végétaux, et réduire l'usage des herbicides.
- ▶ N'effectuer aucun travail du sol sur l'ensemble de la rotation.
- ▶ Réaliser des semis précoces et denses.
- ▶ Recourir à une fertilisation en cohérence avec les objectifs de rendement, en adaptant les dates par rapport à une minéralisation tardive.
- ▶ Gérer les adventices et les couverts par du désherbage chimique.
- ▶ Ne pas tolérer la présence de maladies et d'insectes sur la bande.



Rotation culturale 2017-2022



Les performances mesurées rapportées à l'hectare

		Blé 2018	Orge 2019	Colza 2020	Blé 2021	Maïs 2022
Rendement : q/ha ; tMS/ha	Rendement	102 q/ha	106 q/ha	48 q/ha	116 q/ha	59 q/ha
Qualité technologique : % d'huile/protéines ; % d'humidité	Qualité	12 % de protéines	10,5 % de protéines	46,1 % d'huile	10,1 % de protéines	28,3 % d'humidité
Émissions de GES : kg éq CO ₂ /ha	GES	2 900 kg éq CO ₂ /ha	1 700 kg éq CO ₂ /ha	2 100 kg éq CO ₂ /ha	2 500 kg éq CO ₂ /ha	2 400 kg éq CO ₂ /ha
Émissions directes N₂O : g N-N ₂ O/ha	N ₂ O	1 400 g N-N ₂ O/ha	500 g N-N ₂ O/ha	1 500 g N-N ₂ O/ha	1 100 g N-N ₂ O/ha	1 100 g N-N ₂ O/ha
Consommations d'énergie fossile : MJ/ha	Energie	21 400 MJ/ha	13 200 MJ/ha	17 400 MJ/ha	18 300 MJ/ha	14 800 MJ/ha
Indice de Fréquence de Traitements : IFT	IFT	4,8	4,1	5,4	6,3	1,9
Lessivage des matières actives : µg/l d'eau drainée	MA	0,16 µg/l	0 µg/l	10,4 µg/l	0,51 µg/l	0,07 µg/l
Lessivage des nitrates : kg N-NO ₃ /ha	NO ₃ ⁻	26,7 kg N-NO ₃ /ha	0 kg N-NO ₃ /ha	0,2 kg N-NO ₃ /ha	2,3 kg N-NO ₃ /ha	0,9 kg N-NO ₃ /ha
Marges semi-nettes : €/ha	Marges	1 170 €/ha	740 €/ha	1 160 €/ha	1 840 €/ha	620 €/ha
Charges : €/ha	Charges	700 €/ha	720 €/ha	830 €/ha	670 €/ha	1 030 €/ha
Temps de travail : heures/ha	Temps	2h35	2h50	1h25	2h05	2h10
Potentiel nourricier : nombre de personnes nourries/ha/5 ans	Pers. Nour.	116 personnes nourries/ha/5 ans				

Les performances mesurées rapportées à l'unité de production

		Blé 2018	Orge 2019	Colza 2020	Blé 2021	Maïs 2022
Émissions de GES : kg éq CO ₂ /t	GES	280 kg éq CO ₂ /t	160 kg éq CO ₂ /t	440 kg éq CO ₂ /t	220 kg éq CO ₂ /t	400 kg éq CO ₂ /t
Émissions directes de N₂O : g N-N ₂ O/t	N ₂ O	130 g N-N ₂ O/t	40 g N-N ₂ O/t	310 g N-N ₂ O/t	100 g N-N ₂ O/t	120 g N-N ₂ O/t
Consommations d'énergie fossile : MJ/t	Energie	2 100 MJ/t	1 200 MJ/t	3 600 MJ/t	1 600 MJ/t	1 700 MJ/t
Marges semi-nettes : €/t	Marges	110 €/t	70 €/t	240 €/t	160 €/t	70 €/t
Charges : €/t	Charges	70 €/t	70 €/t	170 €/t	60 €/t	120 €/t

B_ Bas Carbone

Le système Bas carbone vise la diminution des émissions de gaz à effet de serre associées à la fertilisation azotée et aux combustibles fossiles, le stockage de carbone dans le sol et la diminution des émissions de gaz à effet de serre en aval de l'exploitation (pour le séchage du grain par exemple).

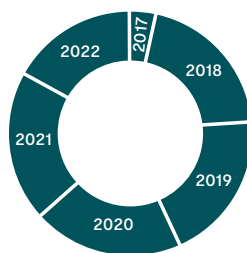
Objectifs opérationnels

- ▶ Maximiser la marge semi-nette obtenue par culture.
- ▶ Obtenir des rendements équivalents à la moyenne olympique de la parcelle.
- ▶ Minimiser les émissions de gaz à effet de serre.
- ▶ Augmenter le stockage de carbone dans le sol.
- ▶ Atteindre la neutralité carbone à l'échelle de la parcelle.
- ▶ Réduire l'Indice de Fréquence des Traitements (IFT) de 30% par rapport à la référence régionale*.

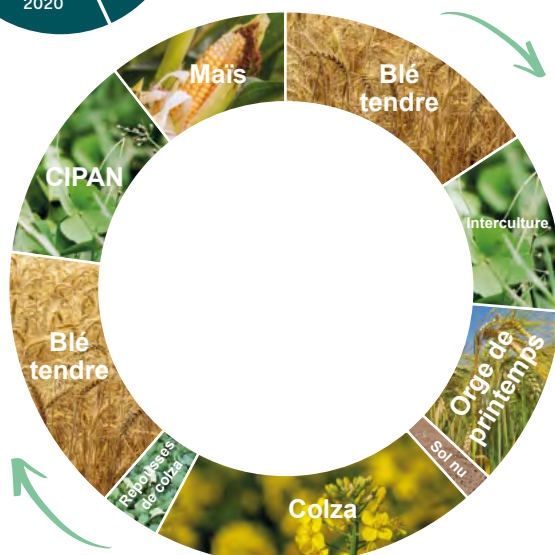
*moyenne 7^e décile IFT 2011-2014 IDF hors traitement de semence

CONTRAINTES TECHNIQUES

- ▶ Utiliser des couverts végétaux pour le stockage de carbone et les apports azotés.
- ▶ Limiter le travail du sol pour la préparation du semis, afin de limiter les émissions de gaz à effet de serre.
- ▶ Réaliser des apports azotés tardifs dans le cycle de la culture, notamment en céréales.
- ▶ Minimiser l'utilisation de fertilisations azotées et d'énergies fossiles par rapport au rendement.
- ▶ Utiliser un inhibiteur de nitrification pour réduire les émissions de protoxyde d'azote.
- ▶ Gérer les adventices et les couverts par désherbage chimique et désherbage mécanique superficiel.



Rotation culturale 2017-2022



Les performances mesurées rapportées à l'hectare

		Blé 2018	Orge 2019	Colza 2020	Blé 2021	Maïs 2022
Rendement : <i>q/ha ; tMS/ha</i>	Rendement	98 <i>q/ha</i>	100 <i>q/ha</i>	51 <i>q/ha</i>	120 <i>q/ha</i>	77 <i>q/ha</i>
Qualité technologique : <i>% d'huile/protéines ; % d'humidité</i>	Qualité	12,8 % <i>de protéines</i>	8,8 % <i>de protéines</i>	46,2 % <i>d'huile</i>	11 % <i>de protéines</i>	20,9 % <i>d'humidité</i>
Émissions de GES : <i>kg éq CO₂/ha</i>	GES	2 100 kg <i>éq CO₂/ha</i>	1 500 kg <i>éq CO₂/ha</i>	2 000 kg <i>éq CO₂/ha</i>	2 000 kg <i>éq CO₂/ha</i>	1 800 kg <i>éq CO₂/ha</i>
Émissions directes N₂O : <i>g N-N₂O/ha</i>	N ₂ O	690 g <i>N-N₂O/ha</i>	310 g <i>N-N₂O/ha</i>	870 g <i>N-N₂O/ha</i>	820 g <i>N-N₂O/ha</i>	700 g <i>N-N₂O/ha</i>
Consommations d'énergie fossile : <i>MJ/ha</i>	Energie	18 200 <i>MJ/ha</i>	10 500 <i>MJ/ha</i>	17 000 <i>MJ/ha</i>	16 300 <i>MJ/ha</i>	13 500 <i>MJ/ha</i>
Indice de Fréquence de Traitements : <i>IFT</i>	IFT	4,8	2,4	4,2	7,2	2,3
Lessivage des matières actives : <i>µg/l d'eau drainée</i>	MA	0,26 <i>µg/l</i>	0 <i>µg/l</i>	0,07 <i>µg/l</i>	0,95 <i>µg/l</i>	0,05 <i>µg/l</i>
Lessivage des nitrates : <i>kg N-NO₃/ha</i>	NO ₃ ⁻	32 kg <i>N-NO₃/ha</i>	0 kg <i>N-NO₃/ha</i>	0,3 kg <i>N-NO₃/ha</i>	11 kg <i>N-NO₃/ha</i>	34 kg <i>N-NO₃/ha</i>
Marges semi-nettes : <i>€/ha</i>	Marges	1010 <i>€/ha</i>	700 <i>€/ha</i>	1 290 <i>€/ha</i>	1 940 <i>€/ha</i>	770 <i>€/ha</i>
Charges : <i>€/ha</i>	Charges	800 <i>€/ha</i>	710 <i>€/ha</i>	830 <i>€/ha</i>	723 <i>€/ha</i>	1 380 <i>€/ha</i>
Temps de travail : <i>heures/ha</i>	Temps	1h30	2h20	3h	2h10	4h30
Potentiel nourricier : <i>nombre de personnes nourries/ha/5 ans</i>	Pers. Nour.	129 personnes nourries/ha/5 ans				

Les performances mesurées rapportées à l'unité de production

		Blé 2018	Orge 2019	Colza 2020	Blé 2021	Maïs 2022
Émissions de GES : <i>kg éq CO₂/t</i>	GES	210 kg <i>éq CO₂/t</i>	150 kg <i>éq CO₂/t</i>	140 kg <i>éq CO₂/t</i>	170 kg <i>éq CO₂/t</i>	230 kg <i>éq CO₂/t</i>
Émissions directes de N₂O : <i>g N-N₂O/t</i>	N ₂ O	70 g <i>N-N₂O/t</i>	30 g <i>N-N₂O/t</i>	170 g <i>N-N₂O/t</i>	70 g <i>N-N₂O/t</i>	90 g <i>N-N₂O/t</i>
Consommations d'énergie fossile : <i>MJ/t</i>	Energie	1840 <i>MJ/t</i>	1 040 <i>MJ/t</i>	3 350 <i>MJ/t</i>	1 360 <i>MJ/t</i>	1 750 <i>MJ/t</i>
Marges semi-nettes : <i>€/t</i>	Marges	100 <i>€/t</i>	70 <i>€/t</i>	250 <i>€/t</i>	160 <i>€/t</i>	100 <i>€/t</i>
Charges : <i>€/t</i>	Charges	80 <i>€/t</i>	70 <i>€/t</i>	160 <i>€/t</i>	60 <i>€/t</i>	180 <i>€/t</i>

C_ Performance nourricière

Le système Performance Nourricière répond aux enjeux de production alimentaire en quantité et en qualité élevées. Il a pour but de maximiser les rendements et la marge semi-nette annuelle.

Objectifs opérationnels

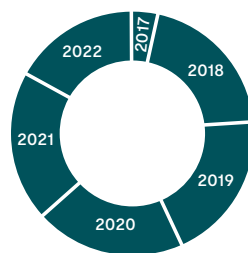
- ▶ Maximiser la marge semi-nette obtenue par culture.
- ▶ Obtenir des rendements élevés, correspondant au potentiel de la parcelle.
- ▶ Réduire l'Indice de Fréquence de Traitements (IFT) de 20 % par rapport à la référence régionale*.

*moyenne 7^e décile IFT 2011-2014 IDF hors traitement de semence

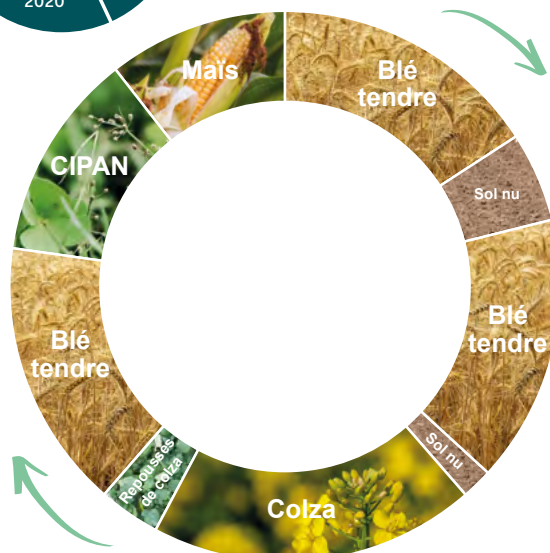


CONTRAINTES TECHNIQUES

- ▶ Réaliser un travail du sol classique par culture.
- ▶ Effectuer des semis précoces et denses.
- ▶ Recourir à une fertilisation en cohérence avec des objectifs de production élevés.
- ▶ Gérer les adventices et les couverts par désherbage chimique et mécanique.
- ▶ Ne pas tolérer la présence de maladies, d'insectes et d'adventices.



Rotation culturale 2017-2022



Les performances mesurées rapportées à l'hectare

		Blé 2018	Blé 2019	Colza 2020	Blé 2021	Maïs 2022
Rendement : <i>q/ha ; tMS/ha</i>	Rendement	113 <i>q/ha</i>	100 <i>q/ha</i>	54 <i>q/ha</i>	117 <i>q/ha</i>	82 <i>q/ha</i>
Qualité technologique : <i>% d'huile/protéines ; % d'humidité</i>	Qualité	12,4 % <i>de protéines</i>	10,6 % <i>de protéines</i>	45,9 % <i>d'huile</i>	10,7 % <i>de protéines</i>	20,2 % <i>d'humidité</i>
Émissions de GES : <i>kg éq CO₂/ha</i>	GES	2 900 kg <i>éq CO₂/ha</i>	2 100 kg <i>éq CO₂/ha</i>	2 700 kg <i>éq CO₂/ha</i>	2 500 kg <i>éq CO₂/ha</i>	2 100 kg <i>éq CO₂/ha</i>
Émissions directes N₂O : <i>g N-N₂O/ha</i>	N ₂ O	630 g <i>N-N₂O/ha</i>	250 g <i>N-N₂O/ha</i>	1 150 g <i>N-N₂O/ha</i>	1 260 g <i>N-N₂O/ha</i>	1 100 g <i>N-N₂O/ha</i>
Consommations d'énergie fossile : <i>MJ/ha</i>	Energie	21 100 <i>MJ/ha</i>	15 300 <i>MJ/ha</i>	19 700 <i>MJ/ha</i>	17 900 <i>MJ/ha</i>	12 900 <i>MJ/ha</i>
Indice de Fréquence de Traitements : <i>IFT</i>	IFT	3,7	1,9	6,4	7,2	2,3
Lessivage des matières actives : <i>µg/l d'eau drainée</i>	MA	0,35 <i>µg/l</i>	0 <i>µg/l</i>	0,17 <i>µg/l</i>	0,86 <i>µg/l</i>	0,08 <i>µg/l</i>
Lessivage des nitrates : <i>kg N-NO₃/ha</i>	NO ₃ ⁻	34 kg <i>N-NO₃/ha</i>	0 kg <i>N-NO₃/ha</i>	0,9 kg <i>N-NO₃/ha</i>	6,9 kg <i>N-NO₃/ha</i>	2,2 kg <i>N-NO₃/ha</i>
Marges semi-nettes : <i>€/ha</i>	Marges	1400 <i>€/ha</i>	980 <i>€/ha</i>	1 520 <i>€/ha</i>	1 830 <i>€/ha</i>	1 580 <i>€/ha</i>
Charges : <i>€/ha</i>	Charges	650 <i>€/ha</i>	610 <i>€/ha</i>	720 <i>€/ha</i>	690 <i>€/ha</i>	710 <i>€/ha</i>
Temps de travail : <i>heures/ha</i>	Temps	3h05	3h	2h55	2h05	5h40
Potentiel nourricier : <i>nombre de personnes nourries/ha/5 ans</i>	Pers. Nour.	139 personnes nourries/ha/5 ans				

Les performances mesurées rapportées à l'unité de production

		Blé 2018	Blé 2019	Colza 2020	Blé 2021	Maïs 2022
Émissions de GES : <i>kg éq CO₂/t</i>	GES	250 kg <i>éq CO₂/t</i>	210 kg <i>éq CO₂/t</i>	500 kg <i>éq CO₂/t</i>	210 kg <i>éq CO₂/t</i>	260 kg <i>éq CO₂/t</i>
Émissions directes de N₂O : <i>g N-N₂O/t</i>	N ₂ O	60 g <i>N-N₂O/t</i>	30 g <i>N-N₂O/t</i>	130 g <i>N-N₂O/t</i>	60 g <i>N-N₂O/t</i>	90 g <i>N-N₂O/t</i>
Consommations d'énergie fossile : <i>MJ/t</i>	Energie	1900 <i>MJ/t</i>	1 500 <i>MJ/t</i>	3 700 <i>MJ/t</i>	1 500 <i>MJ/t</i>	1 600 <i>MJ/t</i>
Marges semi-nettes : <i>€/t</i>	Marges	120 <i>€/t</i>	100 <i>€/t</i>	280 <i>€/t</i>	160 <i>€/t</i>	190 <i>€/t</i>
Charges : <i>€/t</i>	Charges	60 <i>€/t</i>	60 <i>€/t</i>	130 <i>€/t</i>	60 <i>€/t</i>	90 <i>€/t</i>

D_ Système de référence

Le Système de référence s'inscrit dans la continuité de la conduite de cultures historique de la parcelle, et plus généralement de l'ensemble de l'exploitation, en dehors des interactions avec les ateliers d'élevage, et avec la certification Haute Valeur Environnementale (HVE 3).

Il répond à la fois à des enjeux environnementaux, en visant la limitation de tous les impacts, et à des enjeux économiques, en visant notamment la sécurisation du revenu.



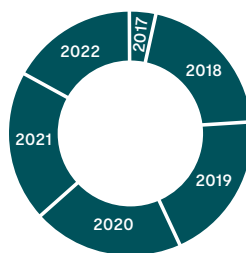
Objectifs opérationnels

- ▶ Maximiser la marge semi-nette obtenue par culture.
- ▶ Obtenir un rendement équivalent à la moyenne olympique de la parcelle.
- ▶ Réduire les émissions de gaz à effet de serre.
- ▶ Améliorer la qualité de l'eau et de l'air.
- ▶ Réduire l'Indice de Fréquence de Traitements (IFT) de 30 % par rapport à la référence régionale*.

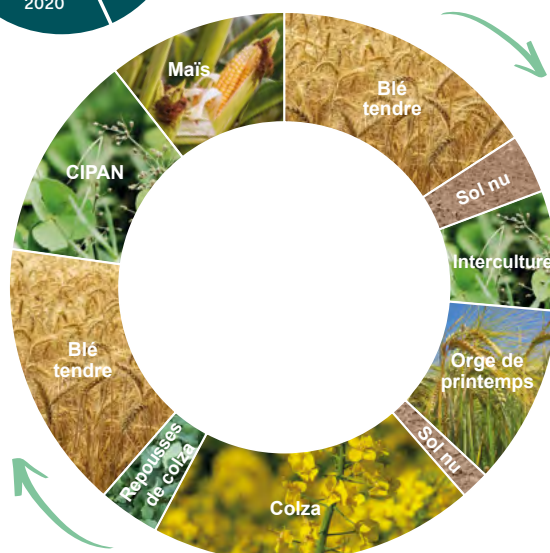
*moyenne 7^e décile IFT 2011-2014 IDF hors traitement de semence

CONTRAINTES TECHNIQUES

- ▶ Utiliser les couverts végétaux pour leurs fonctions fertilisantes.
- ▶ Réaliser un travail du sol classique par culture.
- ▶ Recourir à une fertilisation tolérant une prise de risque, dans l'optique de maximiser son efficacité.
- ▶ Gérer les adventices et les couverts par désherbage chimique et mécanique.
- ▶ Tolérer moyennement la présence de maladies et d'insectes sur la bande.



Rotation culturale 2017-2022



Les performances mesurées rapportées à l'hectare

		Blé 2018	Orge 2019	Colza 2020	Blé 2021	Maïs 2022
Rendement : <i>q/ha ; tMS/ha</i>	Rendement	107 <i>q/ha</i>	96 <i>q/ha</i>	51 <i>q/ha</i>	116 <i>q/ha</i>	88 <i>q/ha</i>
Qualité technologique : <i>% d'huile/protéines ; % d'humidité</i>	Qualité	11,7% <i>de protéines</i>	9,5% <i>de protéines</i>	46,5% <i>d'huile</i>	10,9% <i>de protéines</i>	17,9% <i>d'humidité</i>
Émissions de GES : <i>kg éq CO₂/ha</i>	GES	2 300 kg <i>éq CO₂/ha</i>	1700 kg <i>éq CO₂/ha</i>	2 500 kg <i>éq CO₂/ha</i>	2 400 kg <i>éq CO₂/ha</i>	2 000 kg <i>éq CO₂/ha</i>
Émissions directes N₂O : <i>g N-N₂O/ha</i>	N ₂ O	510 g <i>N-N₂O/ha</i>	310 g <i>N-N₂O/ha</i>	1 280 g <i>N-N₂O/ha</i>	820 g <i>N-N₂O/ha</i>	840 g <i>N-N₂O/ha</i>
Consommations d'énergie fossile : <i>MJ/ha</i>	Energie	16 700 <i>MJ/ha</i>	13 000 <i>MJ/ha</i>	18 200 <i>MJ/ha</i>	18 100 <i>MJ/ha</i>	12 500 <i>MJ/ha</i>
Indice de Fréquence de Traitements : <i>IFT</i>	IFT	3,6	2,5	4,9	7,1	2,6
Lessivage des matières actives : <i>µg/l d'eau drainée</i>	MA	0,59 <i>µg/l</i>	0 <i>µg/l</i>	0,12 <i>µg/l</i>	0,34 <i>µg/l</i>	0,15 <i>µg/l</i>
Lessivage des nitrates : <i>kg N-NO₃/ha</i>	NO ₃ ⁻	46 kg <i>N-NO₃/ha</i>	0 kg <i>N-NO₃/ha</i>	0,4 kg <i>N-NO₃/ha</i>	9 kg <i>N-NO₃/ha</i>	1 kg <i>N-NO₃/ha</i>
Marges semi-nettes : <i>€/ha</i>	Marges	1360 <i>€/ha</i>	760 <i>€/ha</i>	1 200 <i>€/ha</i>	1 810 <i>€/ha</i>	1760 <i>€/ha</i>
Charges : <i>€/ha</i>	Charges	590 <i>€/ha</i>	600 <i>€/ha</i>	720 <i>€/ha</i>	690 <i>€/ha</i>	710 <i>€/ha</i>
Temps de travail : <i>heures/ha</i>	Temps	3h05	2h55	2h55	2h05	5h50
Potentiel nourricier : <i>nombre de personnes nourries/ha/5 ans</i>	Pers. Nour.	132 personnes nourries/ha/5 ans				

Les performances mesurées rapportées à l'unité de production

		Blé 2018	Orge 2019	Colza 2020	Blé 2021	Maïs 2022
Émissions de GES : <i>kg éq CO₂/t</i>	GES	210 kg <i>éq CO₂/t</i>	180 kg <i>éq CO₂/t</i>	490 kg <i>éq CO₂/t</i>	210 kg <i>éq CO₂/t</i>	230 kg <i>éq CO₂/t</i>
Émissions directes de N₂O : <i>g N-N₂O/t</i>	N ₂ O	50 g <i>N-N₂O/t</i>	30 g <i>N-N₂O/t</i>	250 g <i>N-N₂O/t</i>	70 g <i>N-N₂O/t</i>	90 g <i>N-N₂O/t</i>
Consommations d'énergie fossile : <i>MJ/t</i>	Energie	1600 <i>MJ/t</i>	1400 <i>MJ/t</i>	3 600 <i>MJ/t</i>	1600 <i>MJ/t</i>	1400 <i>MJ/t</i>
Marges semi-nettes : <i>€/t</i>	Marges	130 <i>€/t</i>	80 <i>€/t</i>	230 <i>€/t</i>	160 <i>€/t</i>	200 <i>€/t</i>
Charges : <i>€/t</i>	Charges	50 <i>€/t</i>	60 <i>€/t</i>	140 <i>€/t</i>	60 <i>€/t</i>	80 <i>€/t</i>

E_ Bas Intrants

Le système Bas intrants comprend un ensemble de leviers agronomiques combinant des moyens biologiques, chimiques et mécaniques visant à réduire l'usage des intrants de fertilisation et de protection des cultures, pour répondre à des enjeux environnementaux. Cela implique une réduction des objectifs de rendement par rapport à la moyenne olympique de la parcelle.

Objectifs opérationnels

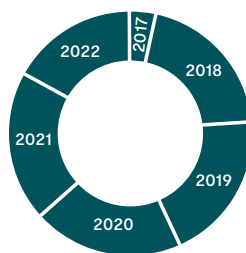
- ▶ Maximiser la marge semi-nette obtenue sur la rotation, tout en minimisant les variations interannuelles.
- ▶ Maintenir des rendements au moins équivalents à 80 à 90 % de la moyenne olympique de la parcelle.
- ▶ Réduire les émissions de gaz à effet de serre.
- ▶ Améliorer la qualité de l'eau et de l'air, grâce à l'optimisation des intrants.
- ▶ Réduire l'Indice de Fréquence de Traitements (IFT) de 60 % par rapport à la référence régionale*.

*moyenne 7^e décile IFT 2011-2014 IDF hors traitement de semence

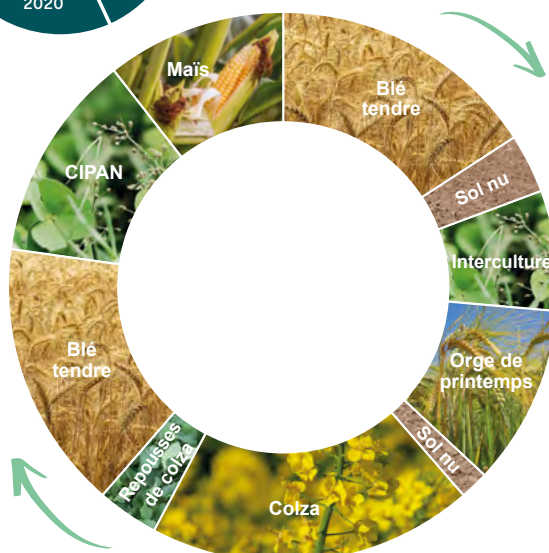


CONTRAINTES TECHNIQUES

- ▶ Utiliser des couverts végétaux pour les apports azotés.
- ▶ Réaliser un travail du sol classique par culture.
- ▶ Adapter les dates et les doses de semis pour limiter les risques de verse, de maladies, ou d'attaques de ravageurs.
- ▶ Recourir à une fertilisation tardive dans le cycle de la culture.
- ▶ Gérer les adventices et les couverts par désherbage chimique et mécanique.
- ▶ Avoir une tolérance élevée pour la présence de maladies et d'insectes sur la parcelle, jusqu'au dépassement des seuils d'intervention.



Rotation culturale 2017-2022



Les performances mesurées rapportées à l'hectare

		Blé 2018	Orge 2019	Colza 2020	Blé 2021	Maïs 2022
Rendement : <i>q/ha ; tMS/ha</i>	Rendement	97 <i>q/ha</i>	96 <i>q/ha</i>	45 <i>q/ha</i>	105 <i>q/ha</i>	83 <i>q/ha</i>
Qualité technologique : <i>% d'huile/protéines ; % d'humidité</i>	Qualité	11,7% <i>de protéines</i>	8,5% <i>de protéines</i>	45,5% <i>d'huile</i>	9,8% <i>de protéines</i>	17,9% <i>d'humidité</i>
Émissions de GES : <i>kg éq CO₂/ha</i>	GES	2 000 kg <i>éq CO₂/ha</i>	1 500 kg <i>éq CO₂/ha</i>	2 100 kg <i>éq CO₂/ha</i>	2 000 kg <i>éq CO₂/ha</i>	1 900 kg <i>éq CO₂/ha</i>
Émissions directes N₂O : <i>g N-N₂O/ha</i>	N ₂ O	440 g <i>N-N₂O/ha</i>	280 g <i>N-N₂O/ha</i>	830 g <i>N-N₂O/ha</i>	840 g <i>N-N₂O/ha</i>	790 g <i>N-N₂O/ha</i>
Consommations d'énergie fossile : <i>MJ/ha</i>	Energie	14 500 <i>MJ/ha</i>	11 200 <i>MJ/ha</i>	15 300 <i>MJ/ha</i>	14 900 <i>MJ/ha</i>	11 700 <i>MJ/ha</i>
Indice de Fréquence de Traitements : <i>IFT</i>	IFT	1,8	1,4	3,1	1,1	0
Lessivage des matières actives : <i>µg/l d'eau drainée</i>	MA	0,31 <i>µg/l</i>	0 <i>µg/l</i>	0,12 <i>µg/l</i>	0,3 <i>µg/l</i>	0,7 <i>µg/l</i>
Lessivage des nitrates : <i>kg N-NO₃/ha</i>	NO ₃ ⁻	41 kg <i>N-NO₃/ha</i>	0 kg <i>N-NO₃/ha</i>	1,4 kg <i>N-NO₃/ha</i>	6 kg <i>N-NO₃/ha</i>	1 kg <i>N-NO₃/ha</i>
Marges semi-nettes : <i>€/ha</i>	Marges	1 280 <i>€/ha</i>	840 <i>€/ha</i>	1 240 <i>€/ha</i>	1 800 <i>€/ha</i>	1 740 <i>€/ha</i>
Charges : <i>€/ha</i>	Charges	500 <i>€/ha</i>	520 <i>€/ha</i>	630 <i>€/ha</i>	450 <i>€/ha</i>	580 <i>€/ha</i>
Temps de travail : <i>heures/ha</i>	Temps	3h	2h55	2h15	2h35	5h45
Potentiel nourricier : <i>nombre de personnes nourries/ha/5 ans</i>	Pers. Nour.	123 personnes nourries/ha/5 ans				

Les performances mesurées rapportées à l'unité de production

		Blé 2018	Orge 2019	Colza 2020	Blé 2021	Maïs 2022
Émissions de GES : <i>kg éq CO₂/t</i>	GES	200 kg <i>éq CO₂/t</i>	160 kg <i>éq CO₂/t</i>	460 kg <i>éq CO₂/t</i>	190 kg <i>éq CO₂/t</i>	220 kg <i>éq CO₂/t</i>
Émissions directes de N₂O : <i>g N-N₂O/t</i>	N ₂ O	40 g <i>N-N₂O/t</i>	30 g <i>N-N₂O/t</i>	200 g <i>N-N₂O/t</i>	80 g <i>N-N₂O/t</i>	90 g <i>N-N₂O/t</i>
Consommations d'énergie fossile : <i>MJ/t</i>	Energie	1 400 <i>MJ/t</i>	1 160 <i>MJ/t</i>	3 370 <i>MJ/t</i>	1 400 <i>MJ/t</i>	1 410 <i>MJ/t</i>
Marges semi-nettes : <i>€/t</i>	Marges	130 <i>€/t</i>	90 <i>€/t</i>	270 <i>€/t</i>	170 <i>€/t</i>	210 <i>€/t</i>
Charges : <i>€/t</i>	Charges	50 <i>€/t</i>	50 <i>€/t</i>	140 <i>€/t</i>	40 <i>€/t</i>	70 <i>€/t</i>

F_ Agriculture biologique

Le système Agriculture biologique respecte le cahier des charges de l'agriculture biologique français.

En termes de conduite, il se différencie des autres systèmes, principalement par le fait qu'il comprend l'introduction d'une légumineuse dans la rotation, par l'utilisation de fertilisant organique et par le recours exclusif au désherbage mécanique.

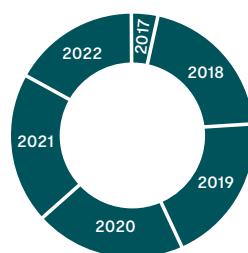


Objectifs opérationnels

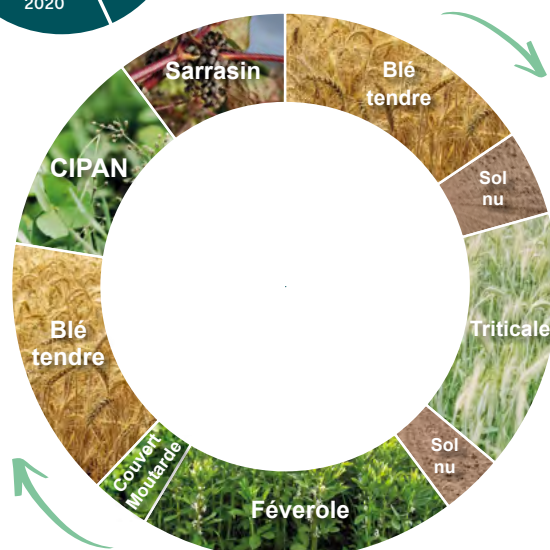
- ▶ Maximiser la marge semi-nette obtenue sur la rotation, tout en minimisant les variations interannuelles.
- ▶ Obtenir des rendements au moins équivalents à 50 à 60 % de la moyenne olympique de la parcelle en conduite conventionnelle.
- ▶ Assurer la fertilité du sol sur le long terme.
- ▶ Gérer durablement le salissement de la parcelle.
- ▶ Produire conformément au cahier des charges de l'agriculture biologique français.
- ▶ Minimiser l'usage des intrants.
- ▶ Valoriser les légumineuses dans la rotation en couvert ou en culture principale.

CONTRAINTES TECHNIQUES

- ▶ Utiliser des couverts végétaux pour leurs fonctions fertilisantes.
- ▶ Réaliser un travail du sol classique par culture.
- ▶ Adapter les dates et les doses de semis pour limiter les risques de verses, de maladies ou d'attaques de ravageurs.
- ▶ Recourir exclusivement à une fertilisation homologuée pour l'agriculture biologique.
- ▶ Gérer les adventices et les couverts par désherbage mécanique.
- ▶ Avoir une tolérance élevée pour la présence de maladies, d'insectes et d'adventices.
- ▶ Refuser l'utilisation d'intrants de synthèse sur la culture, afin d'avoir un Indice de Fréquence des Traitements (IFT) de 0.



Rotation culturale 2017-2022



Les performances mesurées rapportées à l'hectare

		Blé 2018	Triticale 2019	Féverole 2020	Blé 2021	Sarrasin 2022
Rendement : q/ha ; tMS/ha	Rendement	57 q/ha	77 q/ha	15 q/ha	64 q/ha	13 q/ha
Qualité technologique : % d'huile/protéines ; % d'humidité	Qualité	11,2% de protéines	8,7% de protéines	/	11,8% de protéines	/
Émissions de GES : kg éq CO ₂ /ha	GES	1000 kg éq CO ₂ /ha	900 kg éq CO ₂ /ha	400 kg éq CO ₂ /ha	800 kg éq CO ₂ /ha	1600 kg éq CO ₂ /ha
Émissions directes N₂O : g N-N ₂ O/ha	N ₂ O	460 g N-N ₂ O/ha	340 g N-N ₂ O/ha	380 g N-N ₂ O/ha	900 g N-N ₂ O/ha	1840 g N-N ₂ O/ha
Consommations d'énergie fossile : MJ/ha	Energie	6 700 MJ/ha	7 700 MJ/ha	3 800 MJ/ha	6 800 MJ/ha	11 000 MJ/ha
Indice de Fréquence de Traitements : IFT	IFT	0	0	0	0	0
Lessivage des matières actives : µg/l d'eau drainée	MA	0,01 µg/l	0 µg/l	0,16 µg/l	0,14 µg/l	0,03 µg/l
Lessivage des nitrates : kg N-NO ₃ /ha	NO ₃ ⁻	56 kg N-NO ₃ /ha	0 kg N-NO ₃ /ha	44 kg N-NO ₃ /ha	12 kg N-NO ₃ /ha	2 kg N-NO ₃ /ha
Marges semi-nettes : €/ha	Marges	740 €/ha	770 €/ha	550 €/ha	2 530 €/ha	570 €/ha
Charges : €/ha	Charges	590 €/ha	530 €/ha	240 €/ha	700 €/ha	1 840 €/ha
Temps de travail : heures/ha	Temps	2h50	3h10	2h30	3h35	6h54
Potentiel nourricier : nombre de personnes nourries/ha/5 ans	Pers. Nour.	65 personnes nourries/ha/5 ans				

Les performances mesurées rapportées à l'unité de production

		Blé 2018	Triticale 2019	Féverole 2020	Blé 2021	Sarrasin 2022
Émissions de GES : kg éq CO ₂ /t	GES	190 kg éq CO ₂ /t	116 kg éq CO ₂ /t	260 kg éq CO ₂ /t	120 kg éq CO ₂ /t	1 200 kg éq CO ₂ /t
Émissions directes de N₂O : g N-N ₂ O/t	N ₂ O	80 g N-N ₂ O/t	40 g N-N ₂ O/t	250 g N-N ₂ O/t	140 g N-N ₂ O/t	1 380 g N-N ₂ O/t
Consommations d'énergie fossile : MJ/t	Energie	1 180 MJ/t	990 MJ/t	2 460 MJ/t	1 060 MJ/t	8 430 MJ/t
Marges semi-nettes : €/t	Marges	130 €/t	100 €/t	360 €/t	390 €/t	440 €/t
Charges : €/t	Charges	100 €/t	70 €/t	160 €/t	110 €/t	1 410 €/t

G_ Polyculture élevage

Le système Polyculture élevage est un système de grandes cultures en interaction avec les ateliers d'élevage. Ces interactions prennent la forme d'exportations de biomasse fourragère (couverts végétaux et maïs) et de paille pour la litière vers les élevages ainsi que d'apports d'amendements organiques, de type lisier ou fumier. Le système est conforme aux pratiques historiques de la parcelle, et plus généralement de l'ensemble de l'exploitation, certifiée Haute Valeur Environnementale (HVE 3).

Ainsi, le système Polyculture élevage combine les productions végétales pour l'alimentation humaine et pour l'alimentation des troupeaux de la ferme, tout en réduisant les émissions de gaz à effet de serre et l'utilisation des intrants.

Objectifs opérationnels

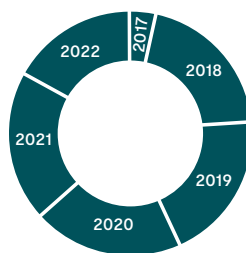
- ▶ Maximiser la marge semi-nette obtenue par culture.
- ▶ Obtenir des rendements équivalents à la moyenne olympique de la parcelle.
- ▶ Réduire les émissions de gaz à effet de serre.
- ▶ Augmenter le stockage de carbone dans le sol.
- ▶ Optimiser les interactions avec les ateliers de production animale de la ferme.
- ▶ Réduire l'Indice de Fréquence de Traitements (IFT) de 30 % par rapport à la référence régionale*.

*moyenne 7^e décile IFT 2011-2014 IDF hors traitement de semence

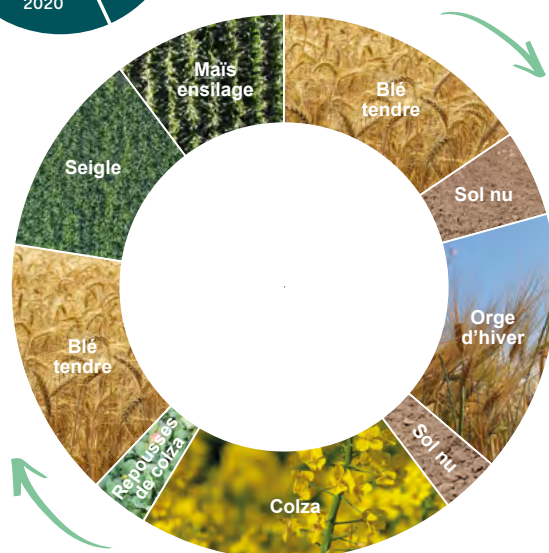


CONTRAINTES TECHNIQUES

- ▶ Utiliser des couverts végétaux et des cultures pour alimenter le cheptel en fourrage.
- ▶ Réaliser un travail du sol classique par culture.
- ▶ Recourir à une fertilisation tardive dans le cycle de la culture.
- ▶ Utiliser les effluents d'élevage comme source d'azote.
- ▶ Gérer les adventices et les couverts par désherbage chimique et mécanique.
- ▶ Avoir une tolérance moyenne pour la présence de maladies et d'insectes sur la bande.
- ▶ Exporter les pailles, afin de les utiliser en litière animale.



Rotation culturale 2017-2022



Les performances mesurées rapportées à l'hectare


		Blé 2018	Orge 2019	Colza 2020	Blé 2021	Maïs 2022
Rendement : <i>q/ha ; tMS/ha</i>	Rendement	102 <i>q/ha</i>	98 <i>q/ha</i>	42 <i>q/ha</i>	112 <i>q/ha</i>	10,2 <i>q/ha</i>
Qualité technologique : <i>% d'huile/protéines ; % d'humidité</i>	Qualité	11,5 % <i>de protéines</i>	9,5 % <i>de protéines</i>	45,8 % <i>d'huile</i>	10,3 % <i>de protéines</i>	28 % <i>d'humidité</i>
Émissions de GES : <i>kg éq CO₂/ha</i>	GES	2500 kg <i>éq CO₂/ha</i>	1800 kg <i>éq CO₂/ha</i>	2400 kg <i>éq CO₂/ha</i>	2900 kg <i>éq CO₂/ha</i>	3800 kg <i>éq CO₂/ha</i>
Émissions directes N₂O : <i>g N-N₂O/ha</i>	N ₂ O	790 g <i>N-N₂O/ha</i>	390 g <i>N-N₂O/ha</i>	2960 g <i>N-N₂O/ha</i>	1150 g <i>N-N₂O/ha</i>	2480 g <i>N-N₂O/ha</i>
Consommations d'énergie fossile : <i>MJ/ha</i>	Energie	19500 <i>MJ/ha</i>	10600 <i>MJ/ha</i>	12500 <i>MJ/ha</i>	16700 <i>MJ/ha</i>	16000 <i>MJ/ha</i>
Indice de Fréquence de Traitements : <i>IFT</i>	IFT	3,6	3,1	3,9	6,3	2,6
Lessivage des matières actives : <i>µg/l d'eau drainée</i>	MA	0,18 <i>µg/l</i>	0 <i>µg/l</i>	0,16 <i>µg/l</i>	0,42 <i>µg/l</i>	0,05 <i>µg/l</i>
Lessivage des nitrates : <i>kg N-NO₃/ha</i>	NO ₃ ⁻	28 kg <i>N-NO₃/ha</i>	0 kg <i>N-NO₃/ha</i>	2,3 kg <i>N-NO₃/ha</i>	6 kg <i>N-NO₃/ha</i>	24 kg <i>N-NO₃/ha</i>
Marges semi-nettes : <i>€/ha</i>	Marges	1200 <i>€/ha</i>	790 <i>€/ha</i>	1050 <i>€/ha</i>	1710 <i>€/ha</i>	490 <i>€/ha</i>
Charges : <i>€/ha</i>	Charges	660 <i>€/ha</i>	560 <i>€/ha</i>	700 <i>€/ha</i>	700 <i>€/ha</i>	1040 <i>€/ha</i>
Temps de travail : <i>heures/ha</i>	Temps	4h30	4h	5h	2h05	9h55
Potentiel nourricier : <i>nombre de personnes nourries/ha/5 ans</i>	Pers. Nour.	77 personnes nourries/ha/5 ans				

Les performances mesurées rapportées à l'unité de production

		Blé 2018	Orge 2019	Colza 2020	Blé 2021	Maïs 2022
Émissions de GES : <i>kg éq CO₂/t</i>	GES	240 kg <i>éq CO₂/t</i>	180 kg <i>éq CO₂/t</i>	570 kg <i>éq CO₂/t</i>	260 kg <i>éq CO₂/t</i>	370 kg <i>éq CO₂/t</i>
Émissions directes de N₂O : <i>g N-N₂O/t</i>	N ₂ O	80 g <i>N-N₂O/t</i>	40 g <i>N-N₂O/t</i>	700 g <i>N-N₂O/t</i>	100 g <i>N-N₂O/t</i>	170 g <i>N-N₂O/t</i>
Consommations d'énergie fossile : <i>MJ/t</i>	Energie	1900 <i>MJ/t</i>	1070 <i>MJ/t</i>	3000 <i>MJ/t</i>	1480 <i>MJ/t</i>	1560 <i>MJ/t</i>
Marges semi-nettes : <i>€/t</i>	Marges	120 <i>€/t</i>	80 <i>€/t</i>	250 <i>€/t</i>	150 <i>€/t</i>	30 <i>€/t</i>
Charges : <i>€/t</i>	Charges	60 <i>€/t</i>	60 <i>€/t</i>	160 <i>€/t</i>	60 <i>€/t</i>	70 <i>€/t</i>

Conclusion et perspectives





Sur cette première rotation, la plateforme agronomique Trajectoire, portée par la ferme expérimentale d'AgroParisTech, a permis de traiter de la question majeure des performances de durabilité de différents systèmes de culture typiques du bassin parisien.

Les résultats des mesures et évaluations montrent qu'aucun des systèmes de la plateforme n'est performant sur tous les plans sur cette première rotation. Aucun système n'est mauvais sur tous les plans non plus. Les résultats montrent aussi l'intérêt de certaines solutions pratiques dont les effets sont déjà connus. Les bénéfices de ces pratiques sont ici objectivés dans un cadre de contraintes « agricoles ».

Une méthode a été élaborée pour réaliser la synthèse pluriannuelle des performances de durabilité des systèmes de culture. Proposer une telle méthode paraît indispensable pour juger de la performance globale des systèmes sur l'ensemble de la rotation, mais elle est aussi questionnable et non définitive. En effet, elle repose sur un ensemble de choix méthodologiques (notamment indicateurs, références) qui pourront évoluer.

L'expérimentation a permis de rassembler des partenaires techniques et financiers, publics et privés, de la recherche de l'enseignement et du monde économique, autour de questionnements communs.

Elle permet une valorisation pédagogique conséquente dans la formation des futurs ingénieurs d'AgroParisTech mais aussi de professionnels du secteur agricole (agriculteurs, conseillers). Ainsi, la plateforme accueille environ deux cents étudiants et professionnels par an. Un séminaire de restitution des résultats de la première rotation, organisé en mars 2024, a rassemblé une centaine de participants.

Une nouvelle rotation a été entamée sur la plateforme à compter de la campagne 2022-2023 (blé sur toutes les bandes). Les bandes REF et PE ont été remplacées par une bande méthanisation orientation végétale (MOV) et méthanisation orientation animale (MOA), respectivement, qui traitent des performances de durabilité des systèmes de culture intégrant de la production de biomasse à vocation énergétique. Cette nouvelle rotation s'accompagne de nouveaux suivis et évaluations, tels que les émissions d'ammoniac, la réserve utile et le tassement du sol. Enfin, des changements ont été opérés sur la bande AB. De la luzerne a été semée à l'automne 2023 après un premier blé, en réponse au salissement de la bande et au besoin d'inclure une légumineuse dans la rotation. Cette culture sera laissée en place jusqu'en 2025 avant de revenir sur un blé.



Un projet d'AgroParisTech, financé entre 2017 et 2022 par :

Agence de l'Eau Seine-Normandie, Bioline by Invivo,
Corteva Agriscience, Eurochem, Pioneer

Contact :

sophie.carton@agroparistech.fr

Site internet :

<https://plateforme-trajectoire.agroparistech.fr>

TRAJECTOIRE
AgroParisTech 