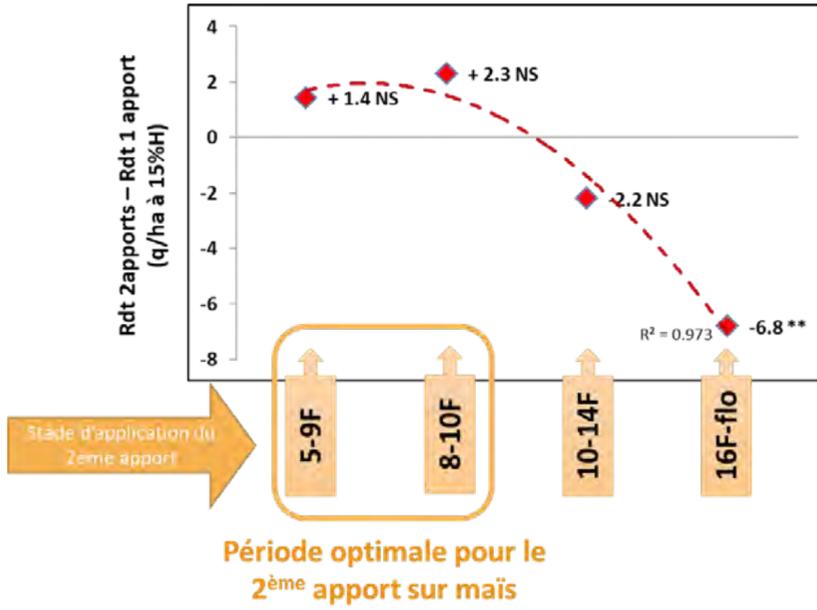


Espace 4 :

NUTRITION DES PLANTES

Fertilisation du maïs : clefs de réussite

FRACTIONNER LES APPORTS D'AZOTE

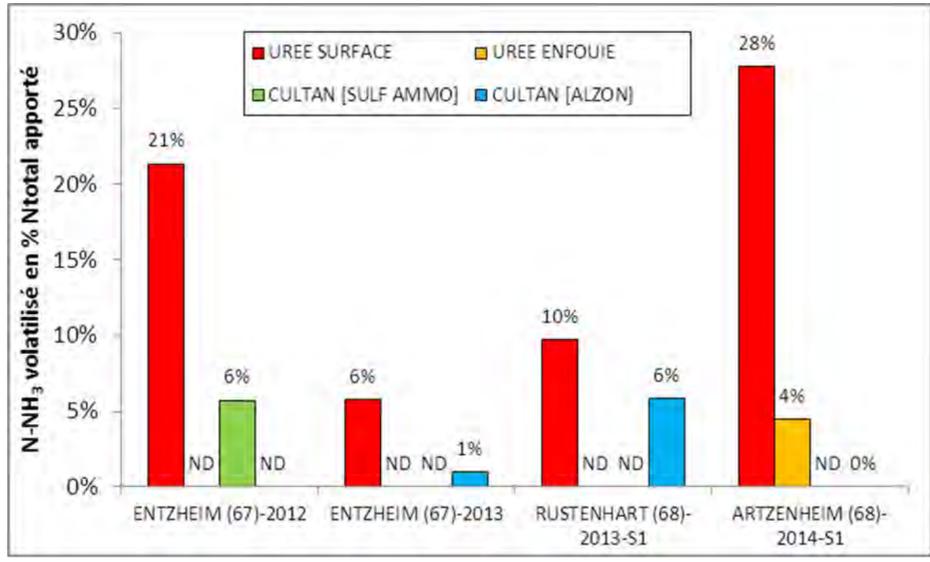


Période optimale pour le 2^{ème} apport sur maïs

Comparaisons à dose totale N identique.
1^{er} apport 40 à 70 kgN/ha d'urée en surface entre le semis et 4 feuilles
2^{ème} apport entre 5 feuilles et floraison.
Essais 1992-2017 (France entière).

+ 7.6 q/ha ! Gain du report à 5-9 feuilles de l'apport plutôt qu'au semis (en cas de reliquats importants) (moyennes de 3 comparaisons)

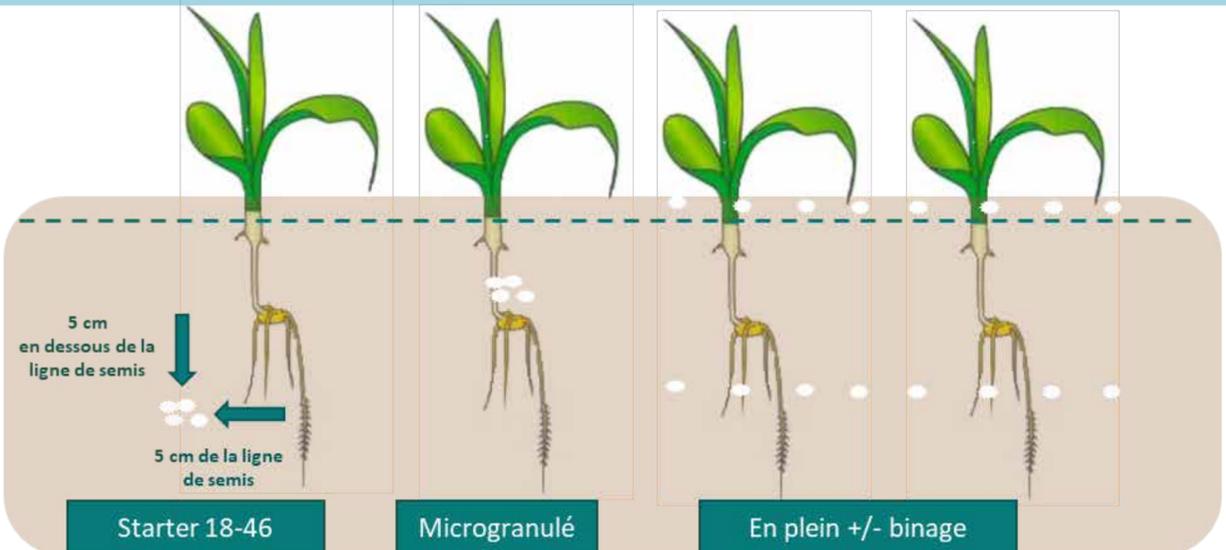
ENFOUIR LES APPORTS POUR LIMITER LA VOLATILISATION DU NH3



Comparaison du N volatilisé à dose d'N apportée identique pour différentes formes d'engrais azoté.
Arvalis - 4 essais 2012-2014, Interreg INDEE

Enfouissement = barrière physique à la volatilisation

ENGRAIS STARTER : le phosphore pour stimuler la croissance racinaire



Comparaison de différents engrais starters microgranulés à la référence starter 18-46 localisée

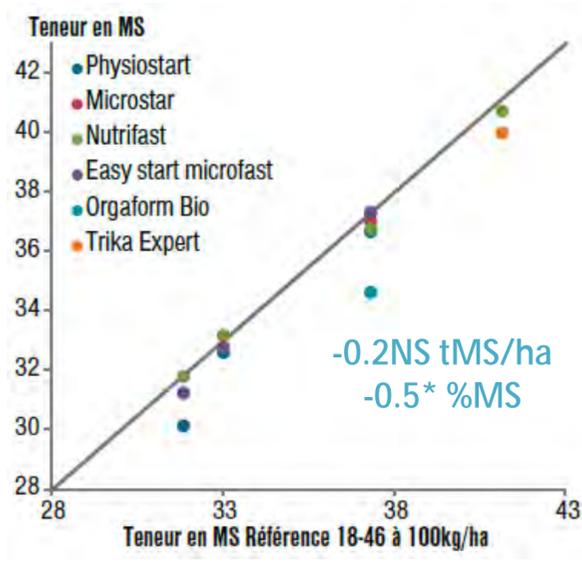
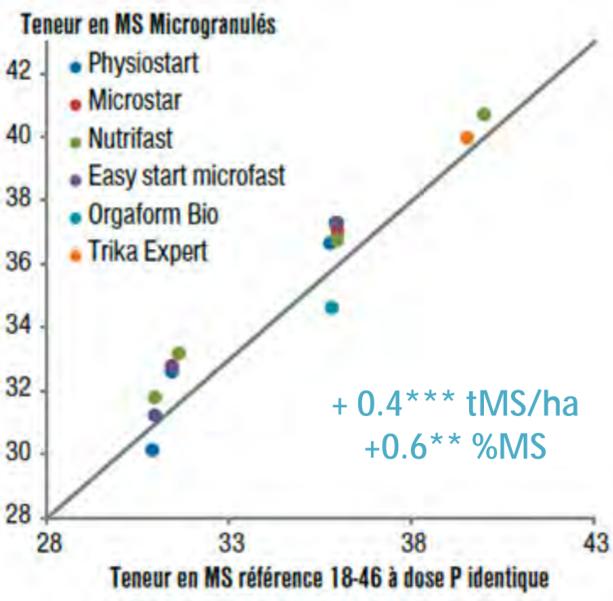
- A privilégier
- ü Pour les semis précoces
 - ü En conditions difficiles (sols frais, humides, acidité, présence de ravageurs du sol)
 - ü Selon dispo en P du sol

CQFR : intérêt du starter

- √ de la fumure de fond
- ↗ homogénéité de culture
- ↗ la vitesse d'installation du maïs
- √ le risque d'attaque des ravageurs
- Floraison avancée (1.5 à 2 jours)
- ↗ rendement :
 - Mieux préserver si les maladies du feuillage sont précoces
 - Possible selon les sols (sols légers >> Argiles)

à dose de phosphore identique env. 10 kg P₂O₅/ha

à la dose habituelle de 100 kg/ha soit 46 kg P₂O₅/ha



Biostimulants du maïs

« Biostimulant des végétaux »

- Ø Un fertilisant UE
- Ø Avec des fonctions de stimuler les processus de nutrition des végétaux indépendamment des éléments nutritifs qu'il contient
- Ø Pour améliorer une ou plusieurs des caractéristiques des végétaux ou de leur rhizosphère suivantes :

CARACTÉRISTIQUES QUALITATIVES

TOLÉRANCE AUX STRESS ABIOTIQUES

EFFICACITÉ D'UTILISATION DES ÉLÉMENTS NUTRITIFS

DISPONIBILITÉ DES ÉLÉMENTS NUTRITIFS CONFINÉS DANS LE SOL ET LA RHIZOSPHERE

Différentes origines

Composés organiques « simples »

Acides aminés et dérivés protéiques d'origine végétale ou animale, lipides, glucides)

Extraits de végétaux et d'algues

Substances minérales non nutritives (ex: silicium)

Macromolécules organiques (acides humiques, fulviques, chitosane...)

Micro-organismes (bactéries, champignons dont mycorhizes, levures) et leurs extraits dérivés

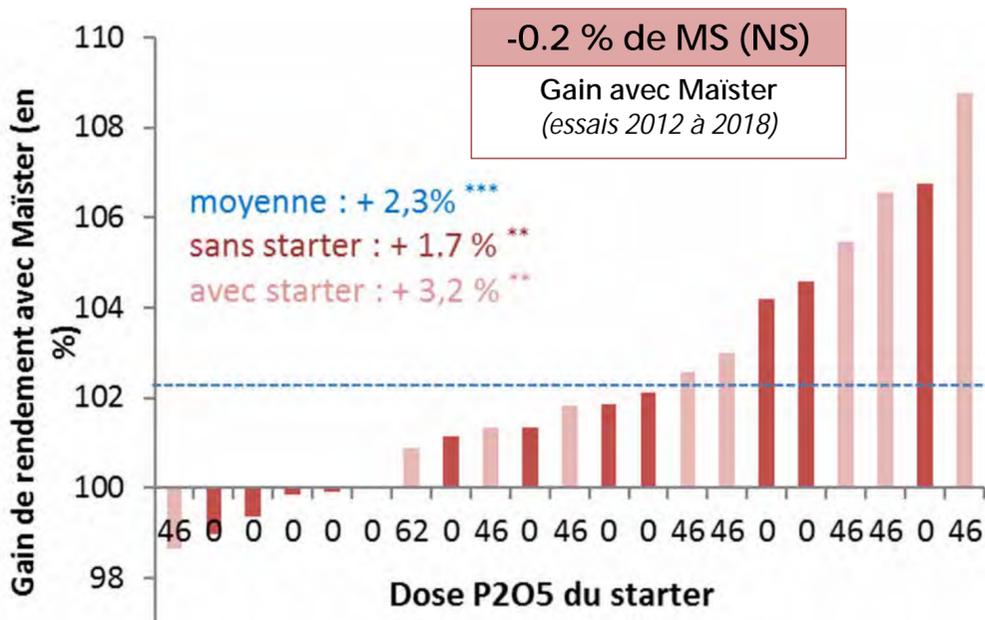
Maïster®, UPL

« amélioration de l'efficacité d'utilisation des éléments nutritifs »

Best-A®, Elicit Plant

« amélioration de la tolérance aux stress abiotiques (hydrique) »

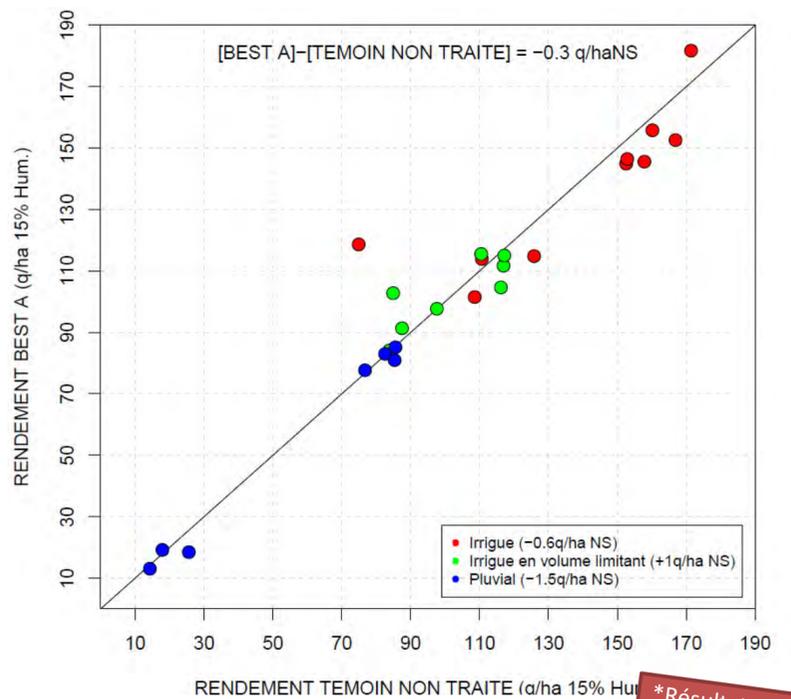
Gains de rendement obtenus avec du Maïster en complément ou non d'un apport de 18-46



Résultats des 11 essais menés entre 2012 et 2021 :

- Û Gain significatif de rendement (+2,3 %)
- Û Gain avec ou sans utilisation d'un starter
- Û Aucun gain significatif de vigueur n'a été mis en évidence

Performance comparée du témoin non traité et du BEST A sur le rendement du maïs



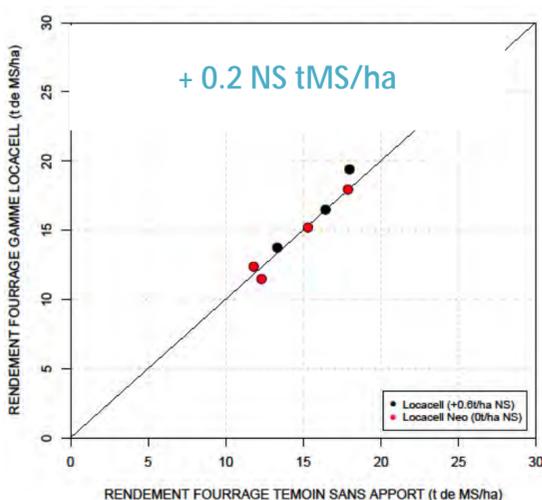
Résultats d'une seule année d'essai (2022)* :

- Û Aucun gain significatif de rendement en 2022, marquée par une absence de pluie et de stress hydrique précoce
- Û Gain sur le PMG
- Û Poursuite des essais pour mieux cerner les contextes d'application optimaux

*Résultats provisoires
A poursuivre en 2023

Rise-P Locacell® ou Rise-P Locacell Neo®, LALLEMAND

« amélioration de la disponibilité des éléments nutritifs confinés dans la rhizosphère et le sol »



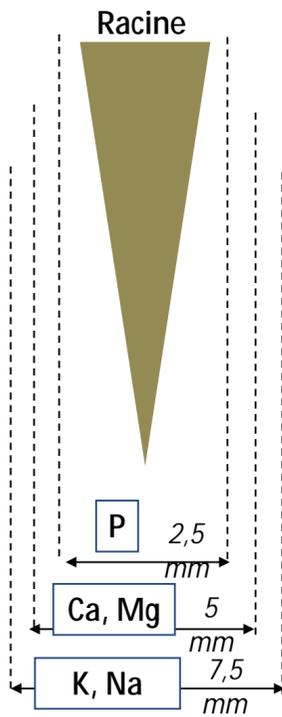
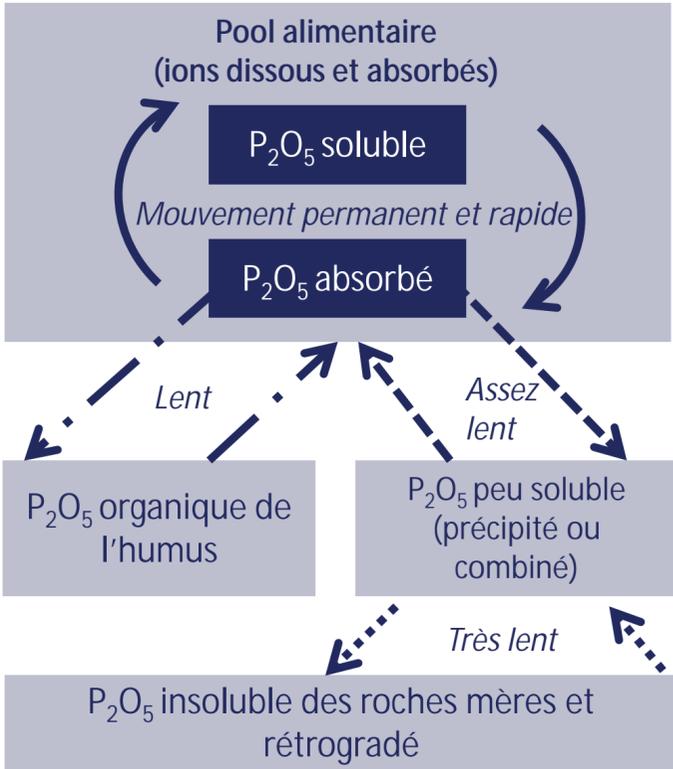
Performance comparée du témoin sans apport et de la gamme Locacell sur le rendement fourrage du maïs.

Résultats des 7 essais menés entre 2014 et 2017 sur maïs fourrage :

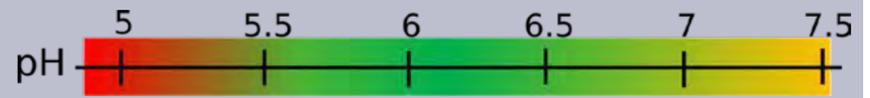
- Û Aucun gain significatif de rendement, vigueur, date de flo, %H.
- Û Résultats variables, qui peuvent être liés à : la richesse du sol en P ? Les conditions climatiques (froid après semis, sécheresse, ...) ? La ferti N au semis ? ... *essais reconduits en 2023 en maïs doux et semences*

Résultats provisoires
A poursuivre en 2023

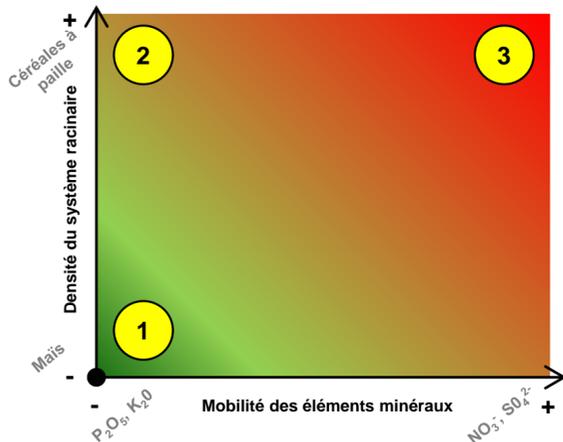
Dynamique du Phosphore dans les sols



- Répartition :
 - 1/3 organique
 - 2/3 minéral ou associé
- Quantité dans l'horizon 0-30 cm :
 - 9 à 18 t/ha de P_2O_5 total
- En solution dans l'horizon 0-30 cm :
 - La concentration de P en solution est faible : 400 g de P_2O_5 /ha
- Biodisponibilité du P en fonction du pH

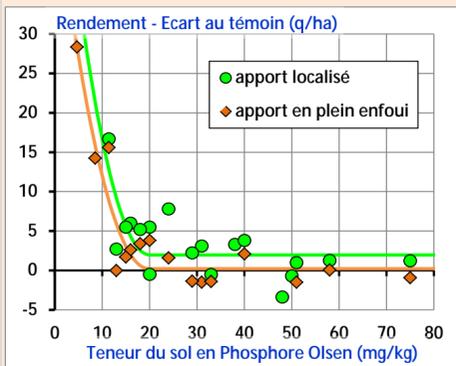


Localisation : quel intérêt ?



2 INTÉRÊT +/- ? EXEMPLE P₂O₅ sur CàP

- Inter-rang étroit



P enfoui
16 essais Arvalis 1996 à 2018^s
Plateau à 0.2^{NS} q/ha
Plateau commence 20^{***} ppm P₂O₅ Olsen

P enfoui et localisé
18 essais Arvalis + CA41 1996 à 2018^s
Plateau à +1.9^{**} q/ha
Plateau commence à 20^{***} ppm P₂O₅ Olsen

3 INTÉRÊT --- EXEMPLE NO₃⁻ sur CàP

- Élément mobile
- Inter-rang étroit

1 INTÉRÊT +++

- Les éléments peu mobiles
- Sur l'inter-rang large
- Problème de développement racinaire (sol froid ...)

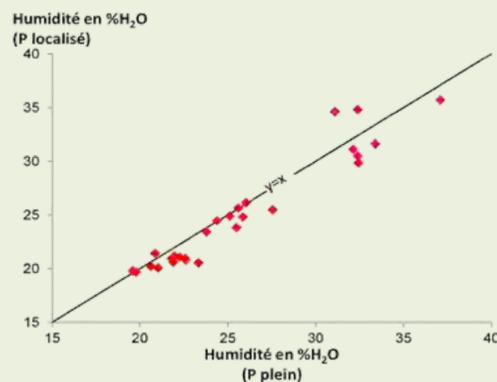
EXEMPLE P₂O₅ sur maïs

Maïs grain

La localisation du P au semis du maïs a permis :

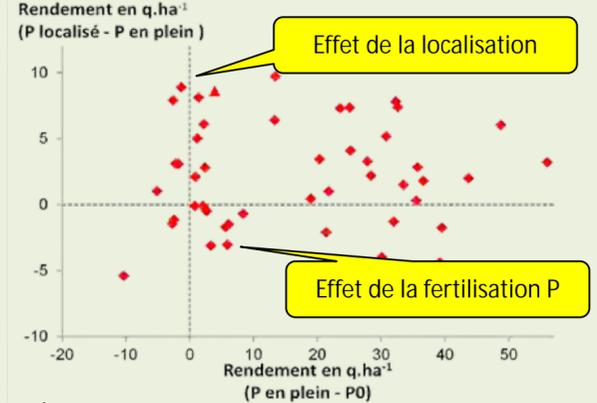
- un gain moyen de 2.5 q/ha (IC_{0.10}=1.4 q/ha)
- un gain moyen de 1.1 %H₂O (IC_{0.10}=0.4%H₂O)

Regroupement de 52 essais - 1989 à 2004 / AGPM - ITCF - Arvalis



P en plein : 18-46 ou super 45 incorporé au sol avant le semis
P localisé : 18-46 ou super 45 localisé au semis (5-5 cm)

Regroupement de 15 essais - 1967 à 1985 / ITCF-AGPM



Maïs fourrage

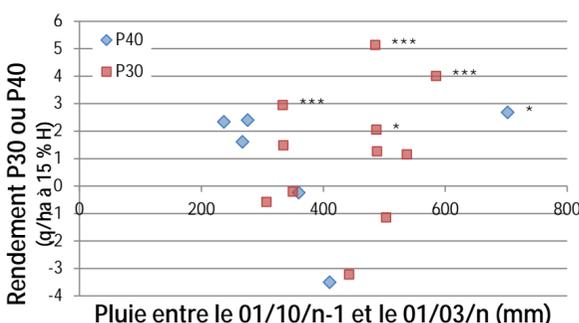
La localisation du P au semis du maïs a permis :

- un gain moyen de 1 t MS/ha (s)
- un gain moyen de 2.4 % MS (s)

Disponibilité du P dans le sol	Conditions difficiles Sol froid, excès d'eau, forte acidité, parasitisme tellurique, ...	Sol sain
Très faible	Recommandée (à compléter par un apport en plein)	Recommandée (à compléter par un apport en plein)
Faible à moyenne	Recommandée	Recommandée
Elevée	Recommandée	Apport de P inutile

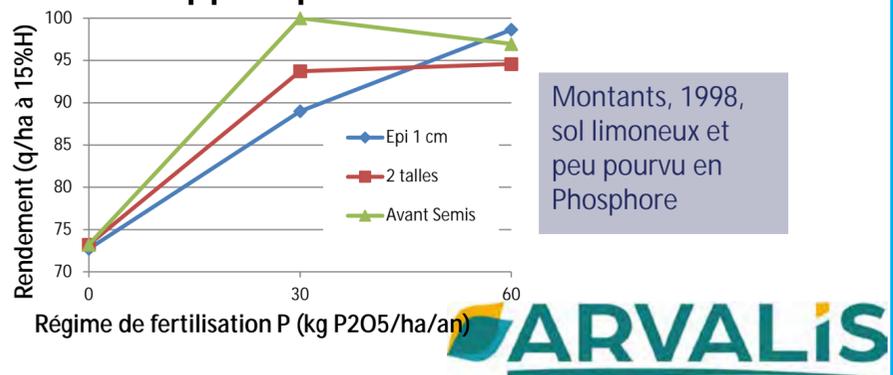
Positionnement : automne ou sortie d'hiver ?

Apport de P en sortie d'hiver (tallage) : ce n'est pas justifié par un hiver pluvieux. La réponse est liée à la teneur du sol



Relation entre la pluviosité hivernale et le gain de rendement permis par un apport de phosphore au printemps. P30 = 30 kg/ha P₂O₅/ha et P40 = 40 sous forme superphosphates. 6 essais Arvalis et 11 partenaires (CA 44, 49, 59, 60, 62, 72, 85, Calliance, Cerena).

Le P est mieux valorisé avec un apport proche du semis



Bien juger le risque d'impasse des apports en phosphore et en potassium

Est-ce que ma parcelle est carencée en Phosphore ?



Est-ce que ma parcelle est carencée en Potassium ?



Les fiches accidents ARVALIS
<https://www.arvalis.fr/outils-et-services/outils-et-fiches/les-fiches-accidents>

4 critères pour calculer la dose

1. Exigence de la culture
2. Analyse de terre et type de sol
3. Passé de fertilisation
4. Résidus du précédent

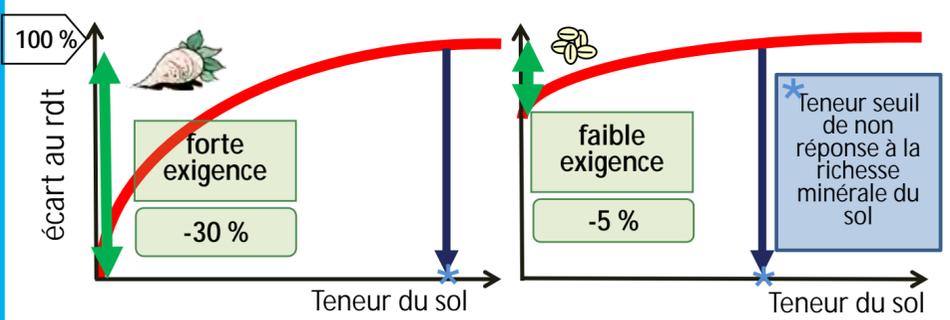
Les objectifs de la méthode

- Préservation de la fertilité P et K du sol
- Alimentation en P et K non limitante



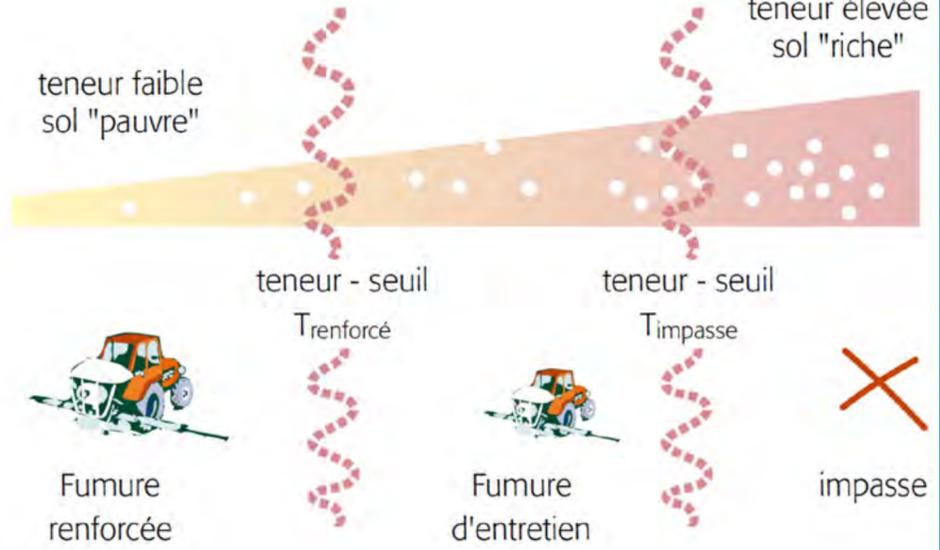
1. Exigence de la culture

Courbe de réponse d'une culture à une disponibilité minérale croissante du sol



Exigence	Cultures
P Très exigeantes	Betterave, colza, luzerne, pomme de terre
Moyennement exigeantes	Pois, blé suivant un blé, blé dur, maïs ensilage, orge, ray-grass, sorgho
Peu exigeantes	Avoine, blé tendre, maïs grain, seigle, soja, tournesol
K Très exigeantes	Betterave, pomme de terre
Moyennement exigeantes	Colza, maïs grain, Pois, tournesol, luzerne
Peu exigeantes	Avoine, seigle, soja, blé tendre, blé dur

2. Analyse de terre et types de sol : détermination des seuils



Type de sol pour le Nord-Picardie	Seuils P ₂ O ₅ , en mg/kg - Méthode Olsen					
	Forte exigence		Moyenne exigence		Faible exigence	
	Trenf	Timp	Trenf	Timp	Trenf	Timp
Limons battants	50	80	50	80	20	70
Limons argileux	50	80	50	80	20	70
Argiles	50	80	50	80	20	70
Cranettes	90	130	80	100	50	80

3. Passé de fertilisation

- Mobilité et perte de biodisponibilité des éléments d'un apport d'engrais du passé
- Plus la dernière fertilisation est ancienne, moins les éléments sont encore biodisponibles

Le calcul de la dose



4. Destination des résidus du précédent

- Même disponibilité qu'un engrais
- Impact très important pour K₂O (100 kg/ha K₂O pour les pailles de céréales)
- Impact plus faible pour P₂O₅ (maxi 40 kg/ha)

- ✓ exportés
- ✓ enfouis ou brûlés

P Fonction principale des apports de **Phosphore** : alimenter correctement les jeunes plantes lorsque les racines sont en croissance (levée à fin tallage) afin de leur permettre ensuite d'accéder à des quantités suffisantes de l'élément contenu dans le sol.

K Fonctions principales des apports de **Potassium** : l'alimentation hydrique, l'assimilation des feuilles et la résistance cellulaire au stress biotiques et abiotiques.

Teneur PK dans le sol	A quelle fréquence ?	A quelle date ?
Faible ($< T_{renforcé}$ des cultures les moins exigeantes)	Apport annuel	Le plus près possible du semis et avant le sevrage
Intermédiaire	Apports en priorité sur cultures les plus exigeantes (impasses possibles sur cultures les moins exigeantes)	Pour les cultures les plus exigeantes, le plus près possible du semis
Elevée ($> T_{impasse}$ des cultures les plus exigeantes)	Blocage de la fumure sur cultures les plus exigeantes de la rotation	Pas de contraintes agronomiques, automne ou printemps

Une OAD pour le pilotage de l'azote en pomme de terre

Quel intérêt d'augmenter l'efficacité de l'azote ?

Augmenter l'efficacité d'utilisation de l'azote de l'engrais : Maximiser la quantité d'azote valorisée en rendement par rapport à la quantité d'azote apportée avec l'engrais

Efficacité de l'engrais

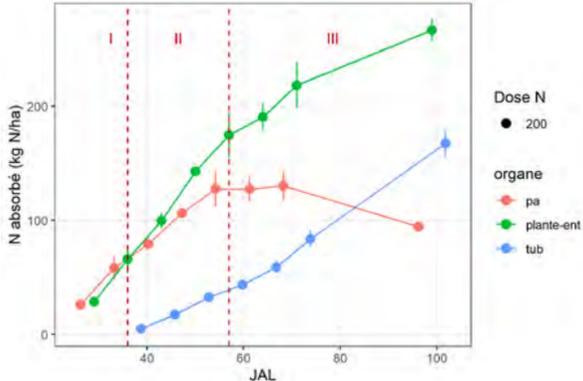
Efficacité de l'engrais
Coefficient Apparent d'utilisation de l'Engrais = CAU

Dose d'engrais N

Quantité N absorbé

Efficacité de l'azote absorbé

Rendement



Le principe du pilotage

Plantation
Apport d'azote (dose X - MER)

Levée + 30 à 45 j
Diagnostic

Un à plusieurs prélèvement(s) / mesure(s) / prise(s) de vues selon la méthode

Jusqu'à levée + 45 j
Apport complémentaire si indicateur < seuil déclenchement

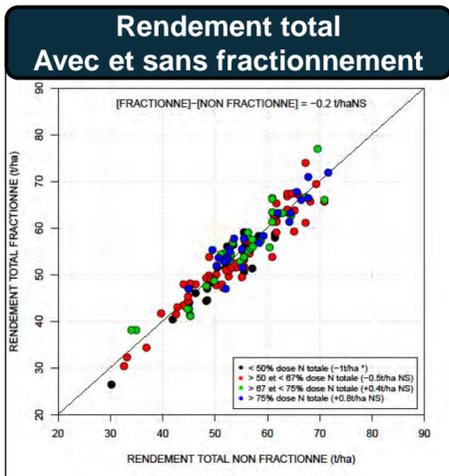


- Etape 1 : Utilisation d'un indicateur pour diagnostiquer l'état de nutrition N
- Etape 2 : Interprétation de la valeur de l'indicateur à l'aide d'un référentiel (règles de décision ou outil d'aide à la décision)
- Etape 3 : Correction de la fertilisation en cours de culture

Avec quels leviers ? Les 5 points

- Formes d'azote (ammo, sol N, etc.)
- Dose totale : estimer correctement avec le reliquat sortie d'hiver et le paramétrage de la méthode du bilan.
- Modes d'application (enfouis, localisé)
- Fractionnement et pilotage - Période d'apport : au plus près du maximum des besoins de la plante et de sa capacité d'absorption
- Valorisation des apports : par l'irrigation ou le positionnement en fonction des pluies

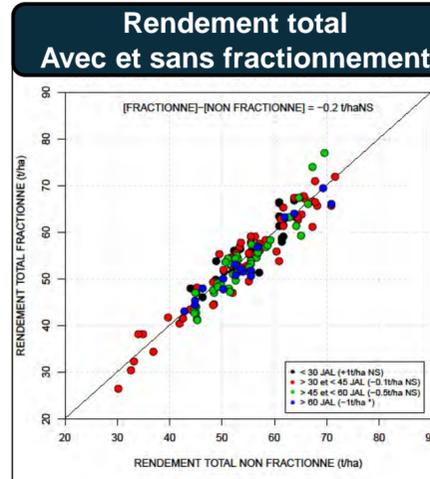
RATIO et TAUX : Quelle quantité de N doit être appliquée à la plantation ?



Le 1^{er} apport doit représenter au moins 50% de la quantité totale d'engrais azoté
Hensel & Locascio (1987) : pour maximiser les rendements, au moins 67 % de l'engrais doit être appliqué à la plantation.

Rdt total	Dose X à plantation	rdt > 50 mm
-1t/ha*	< 50 % Dose X	0t/ha ^{NS}
-0.5t/ha ^{NS}	50%<Dose X <67%	-1.2t/ha ^{***}
0.4t/ha ^{NS}	67%<Dose X <75%	-0.4t/ha ^{NS}
+0.8t/ha ^{NS}	>75%	+0.4t/ha ^{NS}

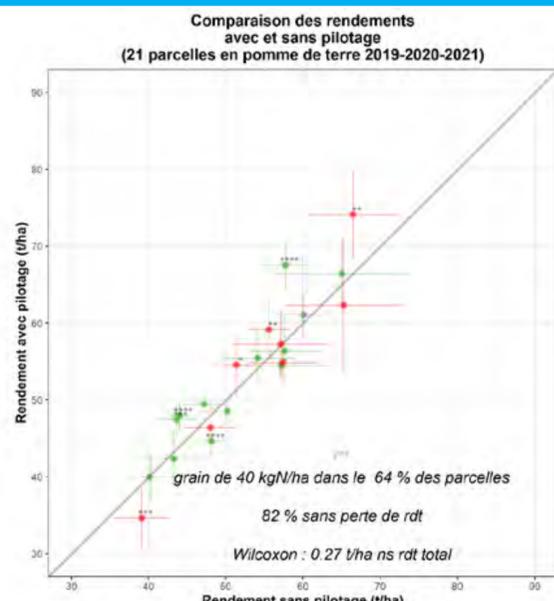
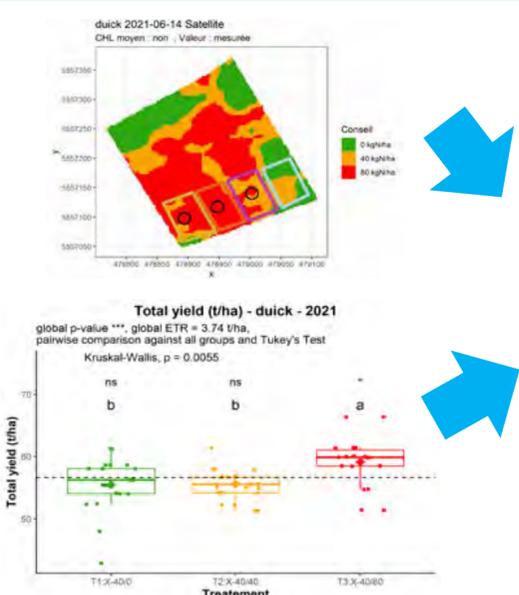
PERIODE D'APPORT : A quelles étapes du cycle de culture l'apport d'azote est-il le plus efficace ?



La meilleure efficacité est observée pour des applications entre 30 jours et jusqu'à 60 jours après l'émergence de la plante.
Vos (1999) jusqu'à 60 jours après l'émergence.

Rdt total	Somme de la T°C efficace entre la levée et le 2eme apport	rdt > 50 mm
+1t/ha ^{NS}	< 471 °C	+2.3t/ha ^{***}
-0.1t/ha ^{NS}	> 471 °C et < 624 °C	-0.8t/ha ^{NS}
-0.5t/ha ^{NS}	> 624 °C et < 813 °C	-1.2t/ha ^{***}
-1t/ha*	> 813 °C	-1.9t/ha ^{***}

DIAGNOSTIC : La culture de la pomme de terre manque-t-elle d'azote ? PROGNOSTIC : De quelle quantité d'azote la culture de pommes de terre a-t-elle besoin ?

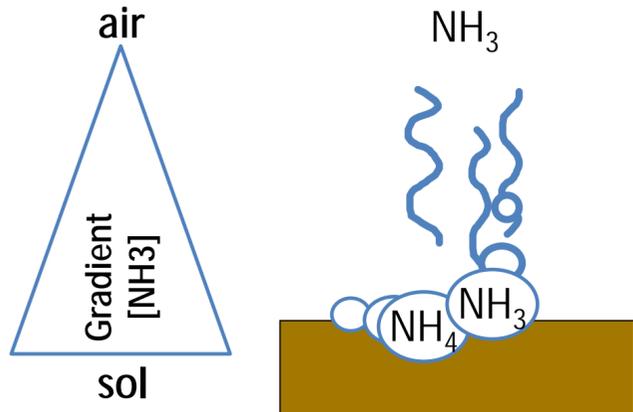


Essais en parcelle agriculteur : De grandes bandes d'agriculteurs pour évaluer la robustesse des VI et leur corrélation avec les variables agricoles.

Réduire les pertes d'azote par volatilisation

Processus physico-chimique :
 $NH_4^+ \rightleftharpoons NH_3 + H^+ \rightleftharpoons NH_3$ gazeux
 Azote ammoniacal en solution \rightleftharpoons
 Ammoniac dans l'air

Résultats acquis dans le cadre des projets VOLAT'NH3 et EVAMIN



Ordres de grandeur :

- 0 - 50% des apports d'engrais azotés
- 0 - 70% fraction NH_4 des lisiers

- Facteurs influençant la volatilisation de NH_3**
- Concentration de NH_4^+ en surface
 - Effet formes d'engrais
 - Modalités d'apport de l'engrais (enfoui ou non)
 - pH et pouvoir tampon du sol
 - Température => Risque si > 10°C
 - Humidité de surface du sol
 - Vent
 - Mauvaise absorption par la culture
 - Délai d'apparition de la première pluie
 - Besoins instantanés en N de la culture faibles

• Méthode de mesure

1. Suivi des concentrations NH_3 au champ



Principe n°1 : suivi des quantités de NH_3 émis via des pièges portant des filtres imbibés d'acide (badge ALPHA) installés et relevés à pas de temps réguliers au champ.



Principe n°2 : Suivi par modalités testées à 2 hauteurs de mesures (30 cm et 1 m) + suivi sur des mâts de 3 m entourant les essais pour capter le « bruit de fond ».

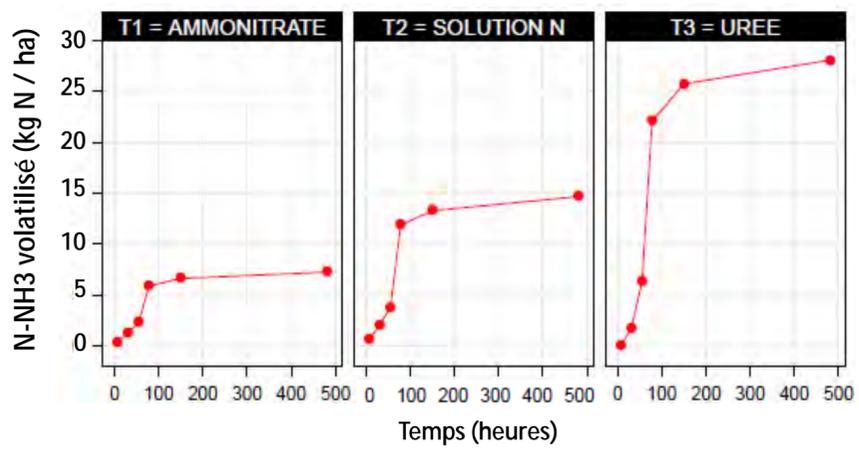


Principe n°3 : Les quantités de NH_3 captés sont extraites et quantifiées par analyses au laboratoire

2. Calcul des flux par modélisation

Calculs de flux à partir des concentrations en NH_3 mesurées et des données environnementales (vitesse et direction du vent, concentration en NH_3 de l'air ambiant)

Essai de L'Epine (51) – 2016 - Apport de 100 kg N/ha



• Résultats

Projet ADEME EVAMIN :

4 essais blé (2016-2018), 2 essais maïs (2016-2017)

Comparaison / Ammonitrate	Urée	Urée +NBPT	Solution N	Solution N +NBPT
%N volatilisé	+13.1**	-0.5NS	+9.4**	+1.6NS
	6 essais		4 essais	

39 essais blé (2013-2018)

ACOLYANCE, ARVALIS, SOUFFLET et VIVESCIA

Comparaison / Ammonitrate	Urée	Urée +NBPT	Solution N	Solution N +NBPT
CAU (%)	-3.6**	+1.7NS	-10.1***	-5.4***
	39 essais		25 essais	

Sensibilité des engrais à la volatilisation confirmée :
 Ammonitrate < Solution N < Urée

1 essai Arvalis 2019 sur blé

Comparaison / Ammonitrate	Urée	CoteN
%N volatilisé	+ 7.0	+ 0.3

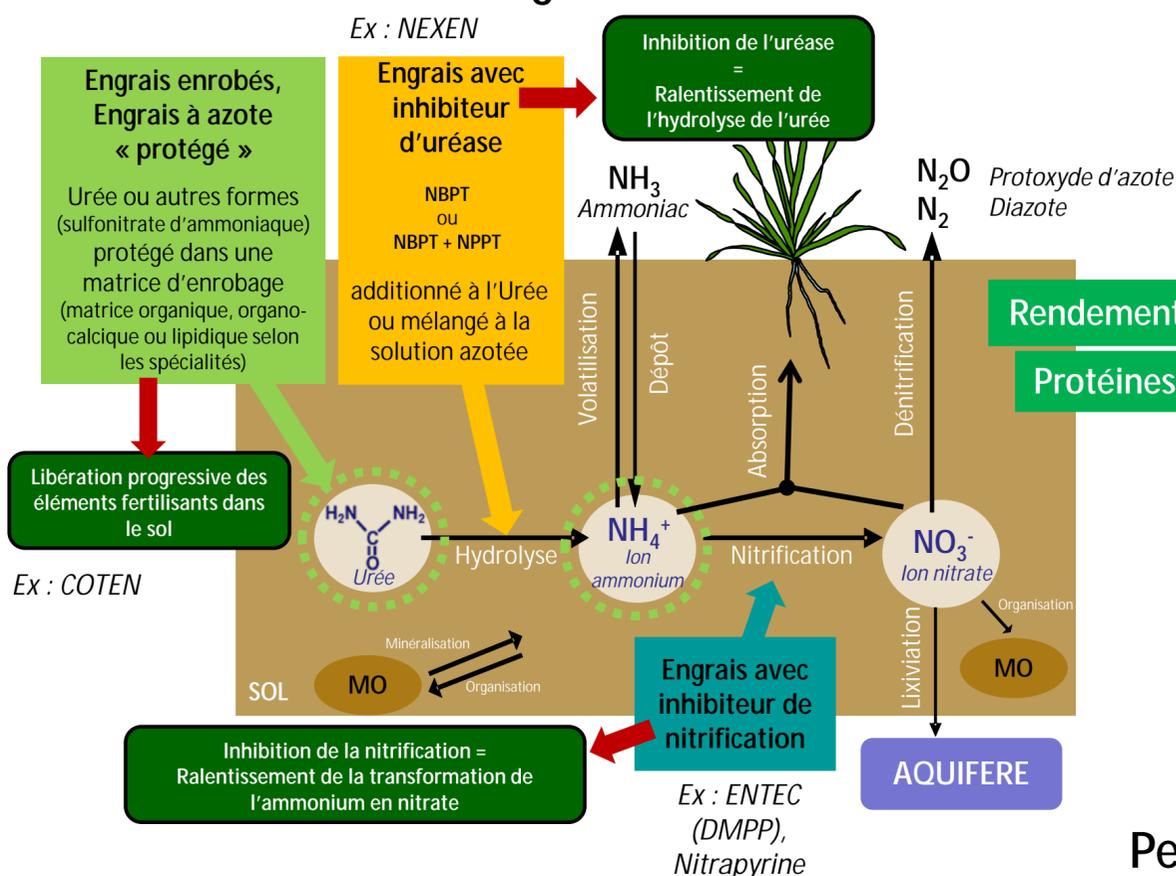
Efficacité des urées enrobées

Test statistique en comparaison à la référence Ammonitrate (comparaison de moyennes appariées) :
 Différence significative au seuil de 5 % (**) et 1% (***)
 NS : différence non significative

Solution N moins sensible à la volatilisation ammoniacale que l'urée, mais son efficacité agronomique est moindre \Rightarrow effet forme physique ?

Performances des différentes formes d'azote

Devenir de l'azote et engrais innovants



Comparaison des formes « classiques » sur blé tendre

Ecart par rapport à l'ammonitrate

UREE		SOLUTION AZOTEE	
44 (2012-2019)		34 (2013-2019)	
Calcaire (19)	Non calcaire (25)	Calcaire (19)	Non calcaire (15)
-0.4 q/ha NS	-0.5 q/ha NS	-3.5 q/ha ***	-3.0 q/ha ***
-0.23 % ***	-0.33 % ***	-0.58 % ***	-0.51 % ***

Synthèse de 44 essais ACOYANCE, ARVALIS, CA37, SOUFFLET et VIVESCIA 2012-2019

AMMO ≥ UREE > SOLUTION AZOTEE

Performances économiques (blé tendre)

Gain (€/ha) permis par la substitution de l'ammonitrate par de l'urée ou de la solution azotée

Type de sol	Engrais	Prix de vente des engrais (€/kg d'azote)	Hypothèse prix de vente 2023 faible (205€/t)	Hypothèse prix de vente 2023 moyen (250/t)	Hypothèse prix de vente 2023 élevé (295 €/t)
Calcaires	UREE	Prix 2022 faibles	60	58	56
	SOLUTION AZOTEE	(ammonitrate : 1.7, urée : 1.3 et solution azotée : 1.2)	13	-3	-18
	UREE	Prix 2022 élevés / 2023 faibles	111	109	107
	SOLUTION AZOTEE	(ammonitrate : 2.3, urée : 1.6 et solution azotée : 1.8)	13	-3	-18
	UREE	Prix 2023 élevés	162	160	158
	SOLUTION AZOTEE	(ammonitrate : 2.9, urée : 1.9 et solution azotée : 2.3)	30	15	-1
Non calcaires	UREE	Prix 2022 faibles	58	56	53
	SOLUTION AZOTEE	(ammonitrate : 1.7, urée : 1.3 et solution azotée : 1.2)	23	10	-4
	UREE	Prix 2022 élevés / 2023 faibles	109	107	104
	SOLUTION AZOTEE	(ammonitrate : 2.3, urée : 1.6 et solution azotée : 1.8)	23	10	-4
	UREE	Prix 2023 élevés	160	158	155
	SOLUTION AZOTEE	(ammonitrate : 2.9, urée : 1.9 et solution azotée : 2.3)	40	27	14

Ø Calculs pour une dose moyenne de 170 kg N/ha (moyenne des essais 2012-2019)

Ø Effet protéine non pris en compte

Performances des urées + inhibiteurs d'uréase

		UREE + INHIBITEURS D'UREASE	
Nombre d'essais		53 (2012-2019)	
Type de sol		Calcaire (21)	Non calcaire (32)
RENDEMENT	UREE	+1.8 q/ha ***	+0.9 q/ha **
	AMMO	+1.6 q/ha ***	+0.4 q/ha NS
PROTEINES	UREE	+0.29 % ***	+0.19 % ***
	AMMO	+0.05 % *	-0.09 % **

Synthèse de 53 essais ACOYANCE, ARVALIS, CA37, SOUFFLET et VIVESCIA 2012-2019

Seuil de rentabilité des urées + inhibiteurs d'uréase / ammonitrate ou urée (écart de prix en €/kg N)

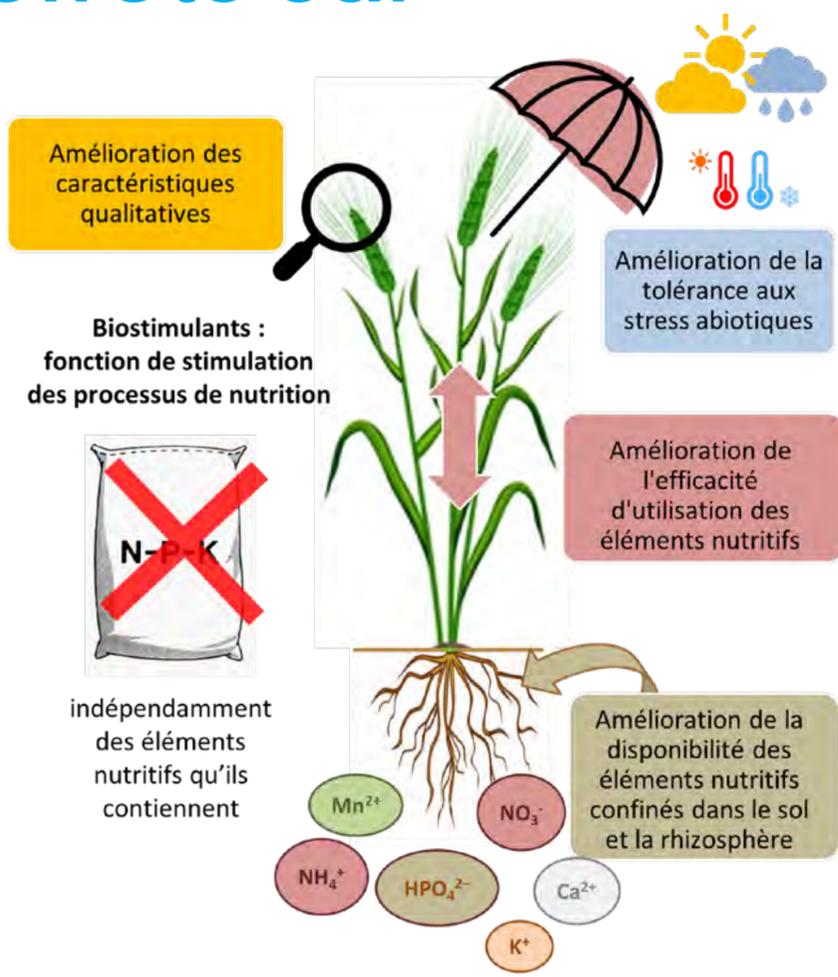
Engrais de référence	Type de sol (Nombre d'essais)	Hypothèse prix de vente 2023 faible (205€/t)	Hypothèse prix de vente 2023 moyen (250/t)	Hypothèse prix de vente 2023 élevé (295 €/t)
Ammonitrate	Calcaire (21)	0.19	0.24	0.28
	Non calcaire (32)	0.05	0.06	0.07
Urée	Calcaire (21)	0.22	0.26	0.31
	Non calcaire (32)	0.11	0.13	0.16

Biostimulants : quels effets sur la nutrition azotée ?

Définition – effets attendus

3 voies explorées d'amélioration de la nutrition azotée :

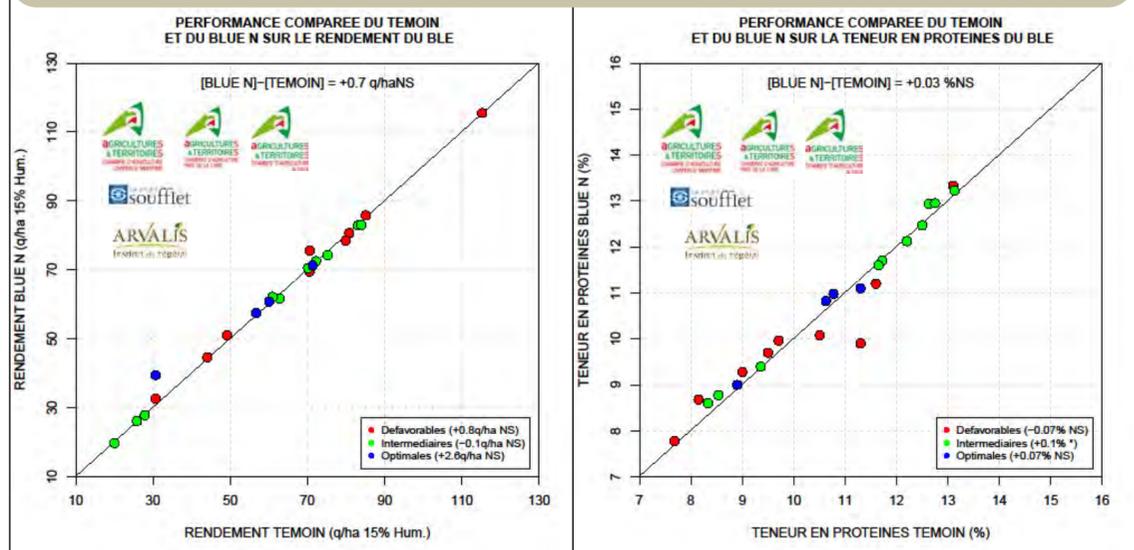
- Ø Fourniture directe d'azote à la culture : bactéries fixatrices d'azote (ex. Blue N)
- Ø Stimulation de la dégradation des MO et de la minéralisation (ex. Ferteve Wake)
- Ø Amélioration de l'efficacité d'utilisation de l'azote absorbé (ex. Gamme GO Activ)



Quelques résultats de tests au champ Blue N :

Bactéries fixatrices d'azote colonisant les feuilles

17 essais 2021-2022 sur blé tendre (15 essais), blé dur (1 essai) et blé tendre en association avec féverole (1 essai), dép. : 17, 18, 21, 27, 32, 51, 52, 60, 68 et 85

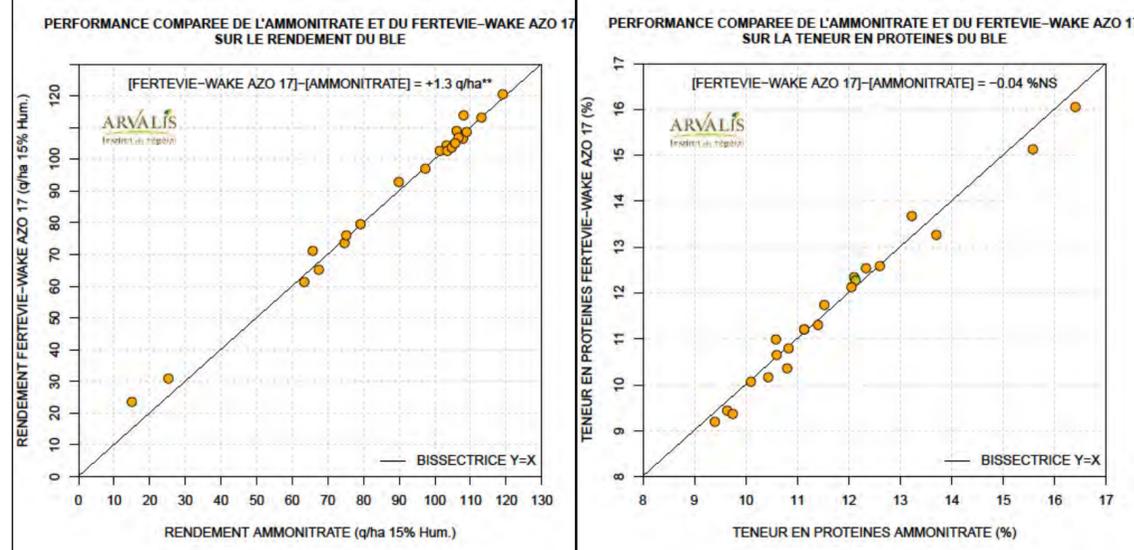


Test statistique en comparaison avec le témoin non traité (***) différence significative à 1%, ** différence significative à 5%, * différence significative à 10%, NS : Non Significatif)

FERTEVIE-WAKE AZO 17 :

Engrais NS + biostimulant à base de levure

11 essais 2015-2018 sur blé tendre (9 essais) et blé dur (2 essais), dép. : 18, 27, 41, 51, 56 et 67



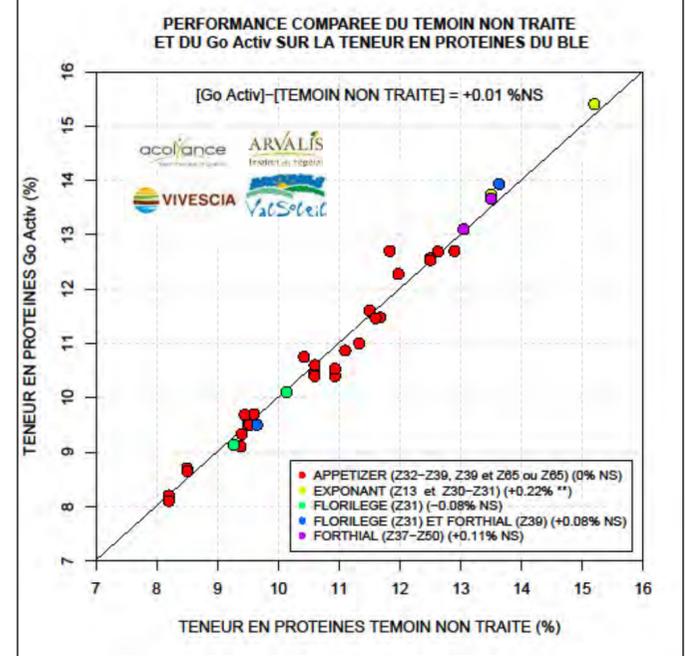
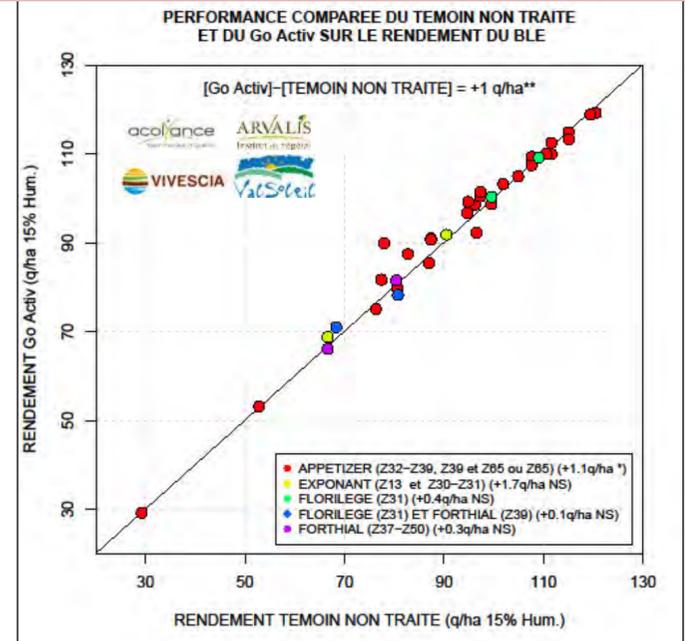
Performances fortement conditionnées par le contexte climatique et l'état de stress de la culture lors de l'application (effet sur la réponse aux stress souvent limité dans le temps, conditions spécifiques pour garantir la survie de micro-organismes...).

=> Difficulté de cibler le moment d'application optimal.

Gamme Go Activ :

Biostimulants à base de filtrat d'Algues

23 essais 2013-2022 sur blé tendre (19 essais) et blé dur (4 essais), produits testés : Appetizer, Exponent, Florilège, Forthial et Florilège + Forthial



Fertiliser et amender avec des digestats

Des produits à la fois avec un effet fertilisant court terme (N) et un effet amendant long terme (C)

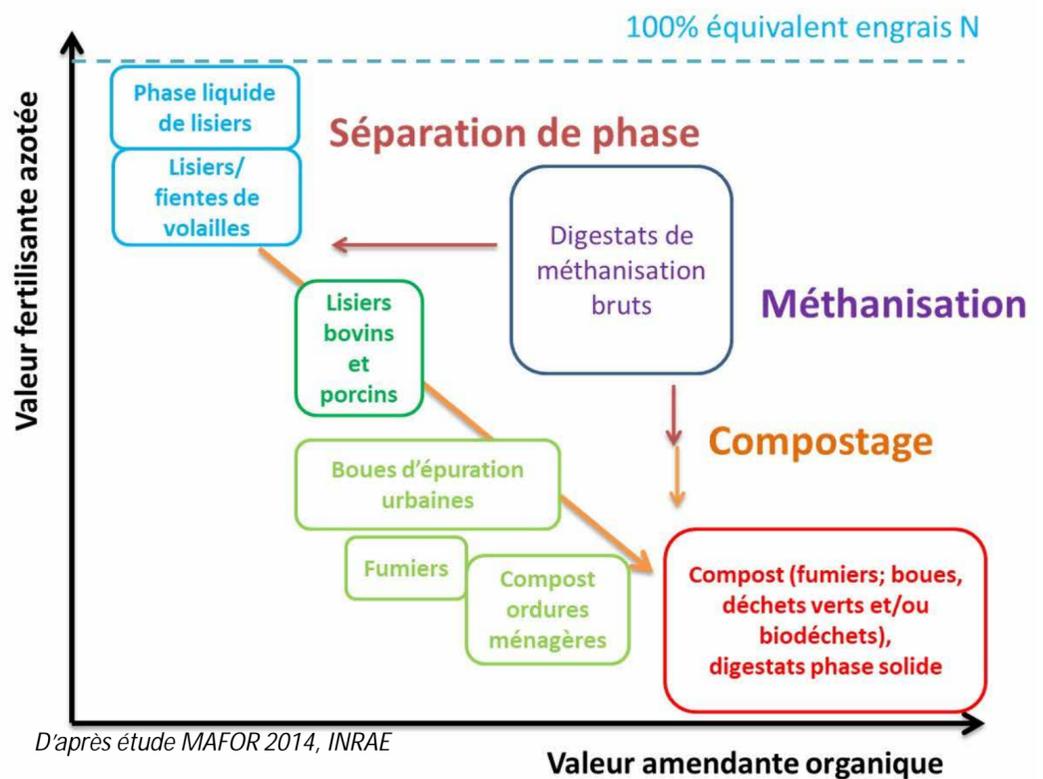


Minéral

Pendillard

Buse palette

Différents modes d'apport sont comparés pour évaluer les digestats



D'après étude MAFOR 2014, INRAE

pH_{eau} élevé et % NH₄ important

Sensibilité aux risques de volatilisation

P, K, S et oligoéléments

Des apports non négligeables, plus concentrés dans la phase solide

Indice de Stabilité de la Matière Organique (ISMO)

Bon indicateur de l'effet amendant du PRO : liquide < brut < solide

- Effet N immédiat (riche en N ammoniacal) à apporter le digestat au plus près des besoins de la culture :

- Ø Éviter les apports à l'automne
- Ø Enfouir immédiatement après l'apport

- La dose est calculée en utilisant le Keq :

$$Dose (t/ha) = \frac{Besoins (kg/ha)}{Teneur (kg/t) * Keq}$$

Source COMIFER brochure fertilisation azotée

Période d'apport :

	Période d'apport des digestats
Céréales à paille	Sortie d'hiver
Pomme de terre	Printemps avant implantation
Betterave	Printemps avant implantation
Colza	Possible en fin d'été à l'implantation (faibles doses) Sortie d'hiver
Mais	Printemps avant implantation
CIVE	Sortie d'hiver

		Culture fin printemps type maïs			Culture automne type céréales à paille		
		Fin été	automne	printemps	Fin été	automne	printemps
Fumier de bovins		0.10	0.10	0.25	0.05	0.10	
Lisiers de porcs	Incorporation dans les 24h ou en végétation	0.05	0.05	0.50	0.05	0.05	0.60
	Incorporation immédiate	0.05	0.05	0.70	0.05	0.05	
Digestat brut origine agricole*	En surface	0.00	0.05	0.50	0.05	0.05	0.65
	Incorporation immédiate	0.00	0.05	0.90			

*KeqN digestats en cours de mise à jour

Sels d'ammonium



Dissolution de l'N dans l'acide, à partir de l'air (scrubber water) ou du liquide (stripping-scrubbing)



Effluents liquides – lisiers, digestats
Ou air chargé en N



en kg/tonne de brut	Ammonium nitrate	Ammonium sulphate
Total N	86 à 198	30 à 86
dont N-NH ₄	43 à 109	30 à 86
dont N-NO ₃	43 à 89	0
Total SO ₃	0	150-250
pHeau	5.3 à 7.9	2 à 7

Absence de matière organique, de P ou de K



N équivalent à un engrais minéral



Risque de volatilisation important pH acides et risques de brûlures si application sur végétation



Appliquer au plus proche des besoins, comme un engrais minéral

Struvites



Précipitation de l'ammonium et du phosphate par un sel magnésium



Sous forme de poudre ou granulés

boues, urine, digestats ou effluents



en kg/tonne de matière sèche	Struvite de boues de STEP	Struvite d'eau usée de féculerie	Struvite d'effluents d'élevage
Total N	58 (de 18 à 106)	53	8
P ₂ O ₅	260 (de 115 à 293)	206	135
K ₂ O	<10	11	58
MgO	153 (de 83 à 193)	161	133



P peu soluble dans l'eau mais soluble par l'acide,
Entre 40 et 100% d'équivalence au TSP



Libération lente du P, ce n'est pas un engrais starter

Urinofertilisants



Issu de séparation de phase
Différentes méthodes de post-traitement : stockée, nitrifiée, concentrée, alcalinisée, acidifiée, en mélange avec matière organique



Urine humaine ou fraction liquide d'effluents d'élevage



Element en kg/m ³ brut	Urine humaine	Urine de porc
Total N	5 à 8	3 à 6
P ₂ O ₅	1 à 2	0.01 à 1
K ₂ O	1.5 à 2.5	3.2 à 4.68
pH _{eau}	6.5 à 6.9	7.6 à 9.26



KeqN au champ entre 70 et 85%



Possible présence de résidus pharmaceutiques
Forte volatilisation, jusqu'à 1/3 de l'N



Azote rapidement disponible, à épandre comme de l'urée ou de la solution azotée

Biochars

Pas un, mais DES biochars!



C'est un amendement pas un fertilisant!



Variabilité des dispositifs:
Pyrolyse (350 à 700°C); gazéification (>700°C); carbonisation hydrothermale (200°C)



Toute matière organique (végétaux biodéchets, boues de STEP, bois etc...)



Entre 25 et 95% de la MS est du C
Peut contenir P, N en faible quantité
Peut contenir des ETM selon intrants



Revendications principales : rétention d'eau, des nutriments, amélioration structure du sol, stockage C.



Evaluations au champ rares, effets observés contrastés
Ne se dégrade pas dans le sol, bien choisir des produits de qualité

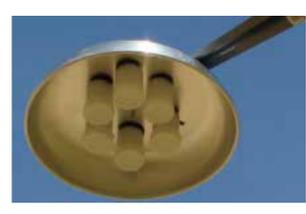
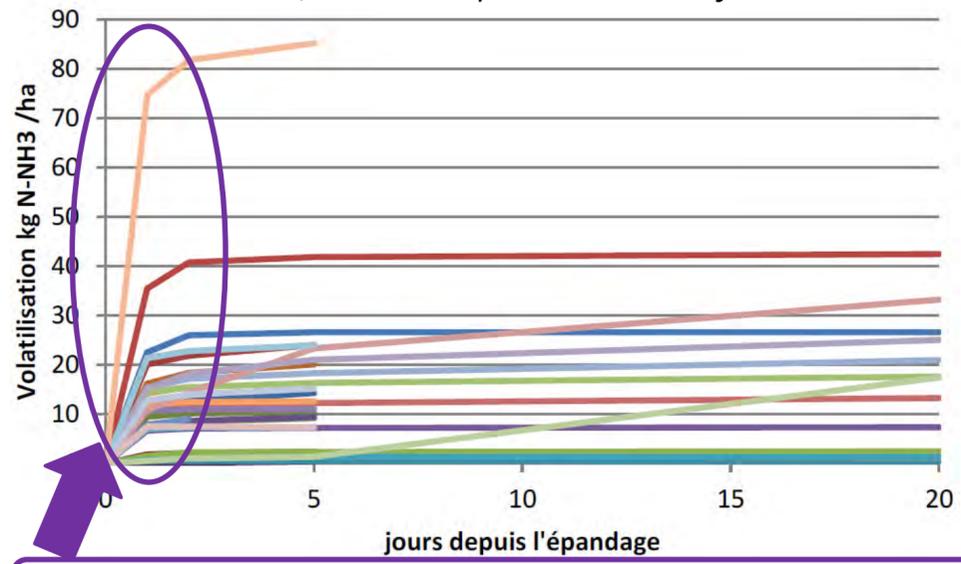


Application entre 3 et 20 t/ha
Plus utilisé en horticulture ou arboriculture qu'en grandes cultures

Limiter la volatilisation de l'azote ammoniacal lors des épandages de produits organiques

Evaluer et comprendre la volatilisation

Ensemble des cinétiques de volatilisation d'azote ammoniacale cumulée
(Résultats expérimentaux Projet EvaPRO - 2016-2017)



- Les pertes d'azote par volatilisation ammoniacale vont de 0.3 à 85.2 kgN/ha
- Pertes pour des apports en surface :
 - Produits liquides : entre 60 et 80% du total perdu en 1 jour
 - Produits solides : entre 30 et 90% du total perdu en 1 jour

La volatilisation de l'azote ammoniacale a lieu **dans les heures après l'apport** pour les PRO.

Effet du mode d'épandage sur la volatilisation



+ de risques de volatilisation

- de risques de volatilisation

Un matériel qui permet l'enfouissement des produits organiques permet de limiter la volatilisation, d'autant plus que l'enfouissement est fait proche de l'apport.

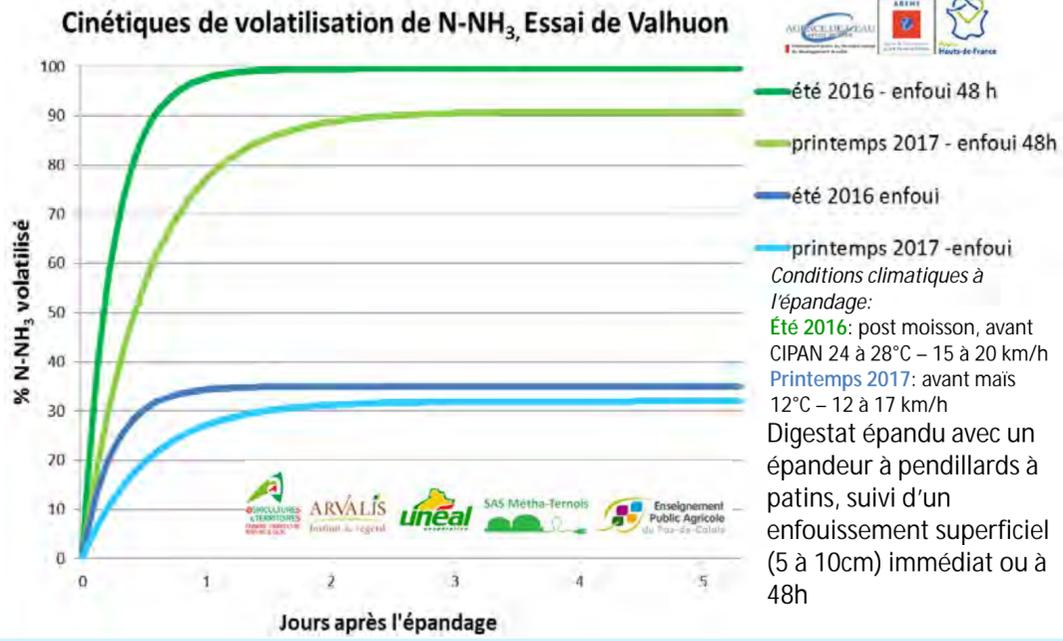
Effet du produit

Pertes par volatilisation dépendent aussi des produits :

- Composition en N-NH₄
- pH_{eau}
- %MS

Cinétiques de volatilisation équivalentes quel que soit le produit et le mode d'apport : tout se passe dans les heures après l'épandage.

Et pour des digestats ?



La réduction du risque de volatilisation est possible par :

- Choix période d'épandage à éviter période venteuse et très chaude, préférer des apports juste avant des pluies modérées
- Préparation du sol à préférer apports sur sol motteux que sol battant
- Choix du matériel d'épandage et l'enfouissement à ~10 cm, mélange avec le sol

Optimiser les conditions d'épandages permet de conserver l'azote pour la culture et de préserver la qualité de l'air.

CHN : un modèle mécaniste à potentiel applicatif



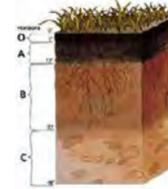
Génétique - variétés



Météo



Azote minérale

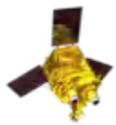


Sol



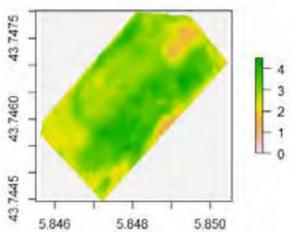
Apports organiques

Paramètres d'entrée
(parcelle + bases de données)

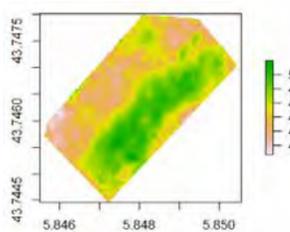


Satellites

LAI



C_{AB}

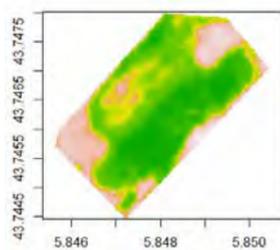
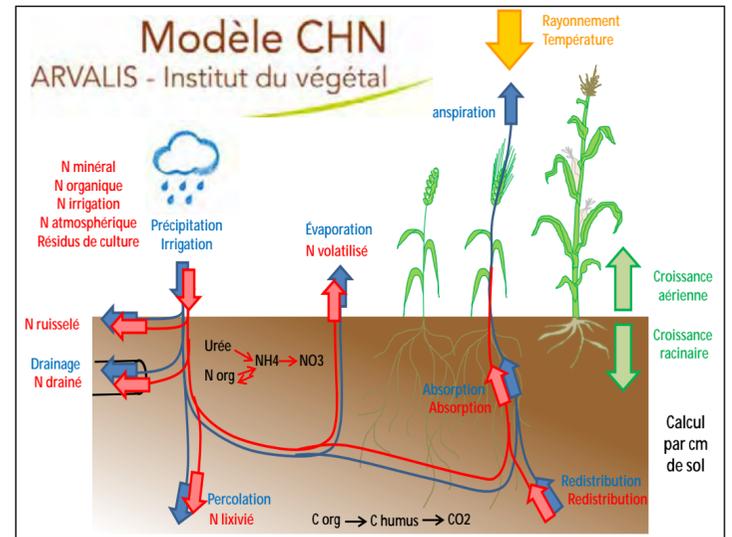


Modèle de culture

Simulations

Règles de décision

Conseil



Apport conseillé

60 KgN

Une approche dynamique
pour optimiser l'efficacité des interventions

Les règles de décision dépendent de trajectoires d'INN définies par le contexte pédoclimatique et de la variété, mais aussi du risque climatique que l'on veut bien prendre

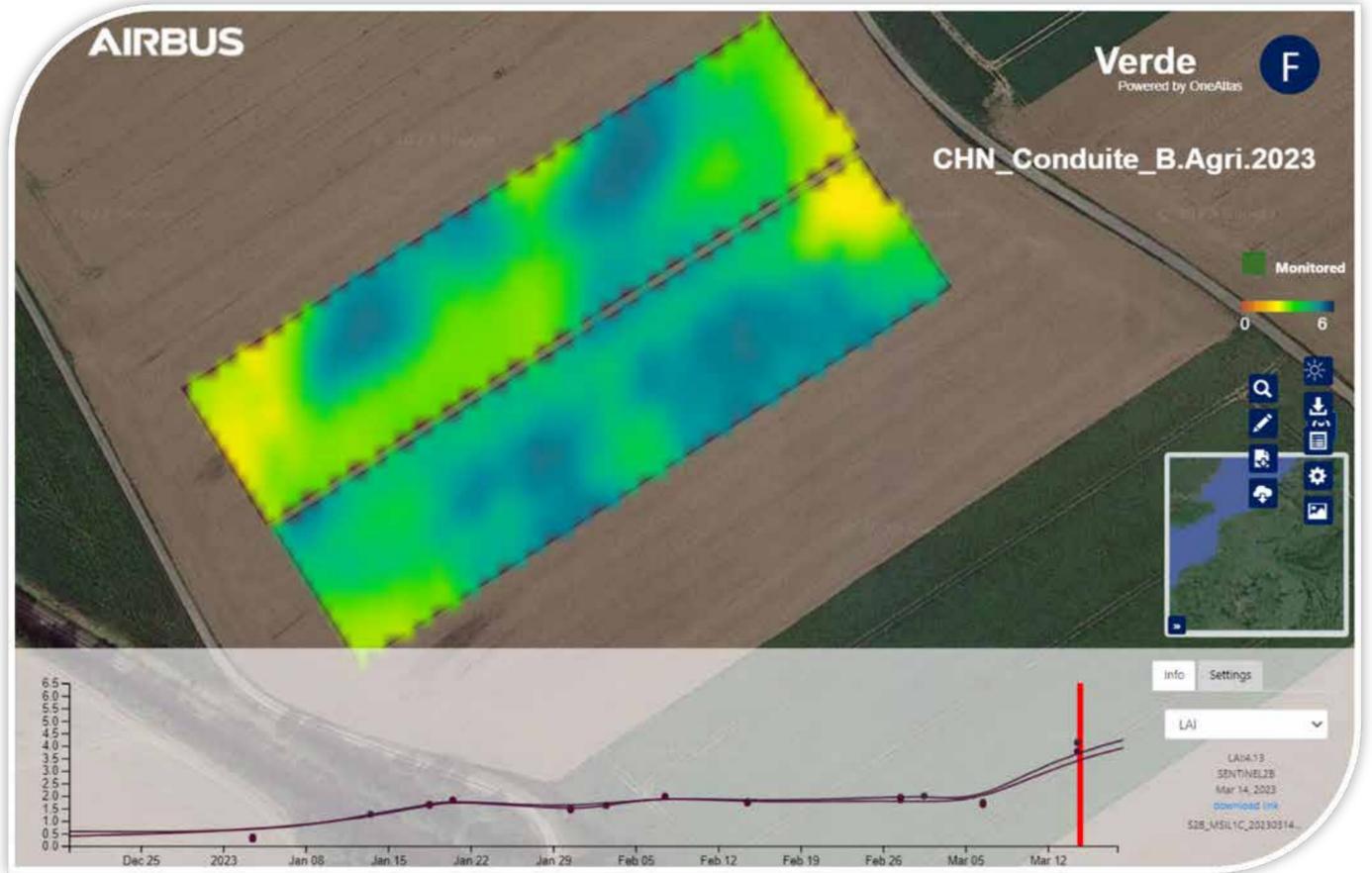
Les avantages de CHN

- S'affranchir de la dose prévisionnelle et de l'objectif de rendement
- Valoriser toutes les images satellite
- Spatialiser les conseils de fertilisation
- Simplifier la logistique de livraison des conseils
- Maximiser l'efficacité de l'N dans un contexte économique incertain



Imagerie spatiale : une opportunité de diagnostic global en temps réel

Valorisation des images SENTINEL 2



Observer la parcelle en temps quasi-réel

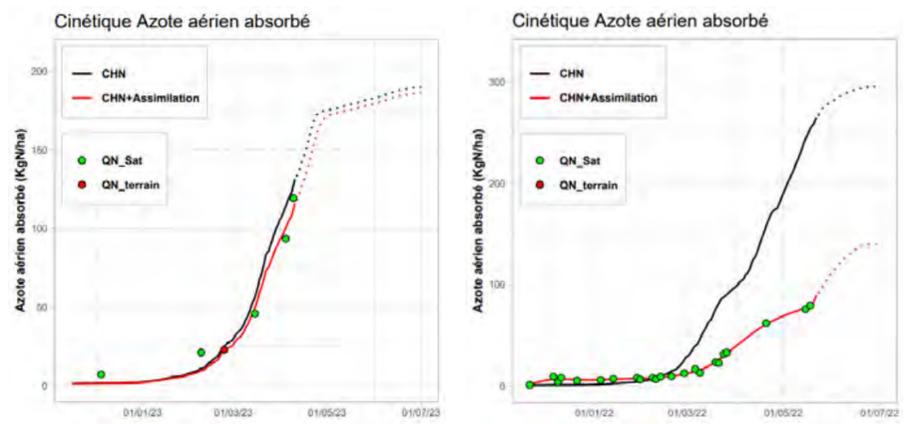
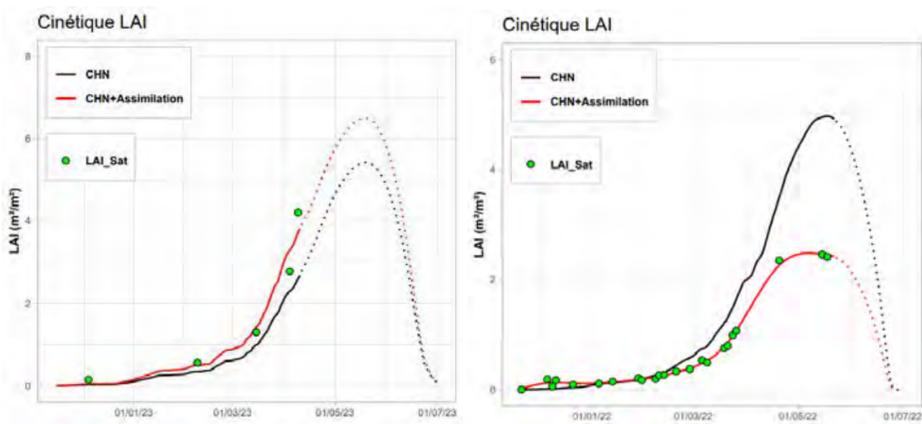
Cinétique fine de croissance et de nutrition

Appréhender l'hétérogénéité intra-parcellaire

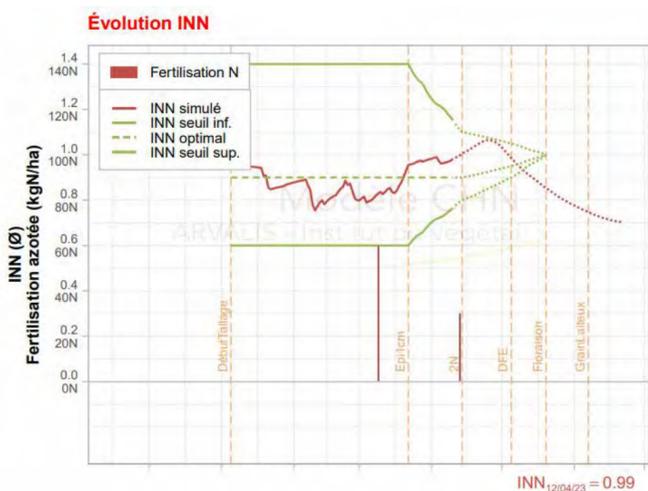
Intégration de l'information dans le modèle CHN

Diagnostiquer l'effet « année »...

Identifier le(s) facteur(s) limitant(s)...



... pour ajuster les pratiques au potentiel

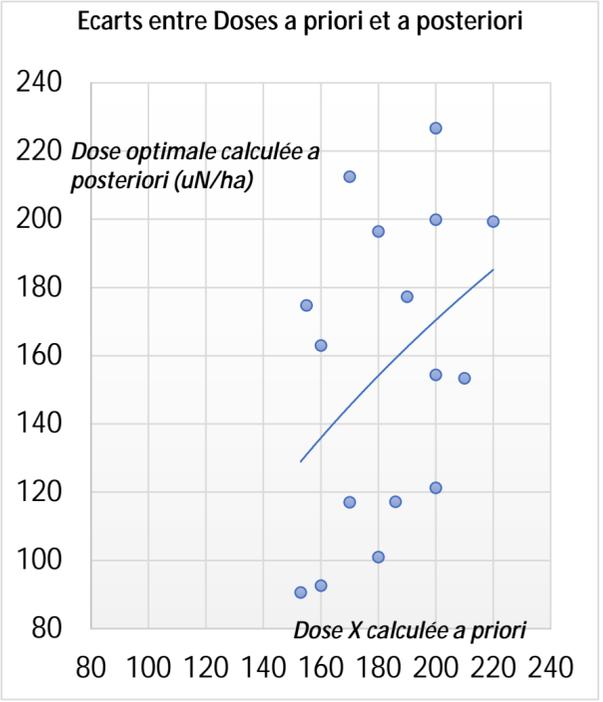
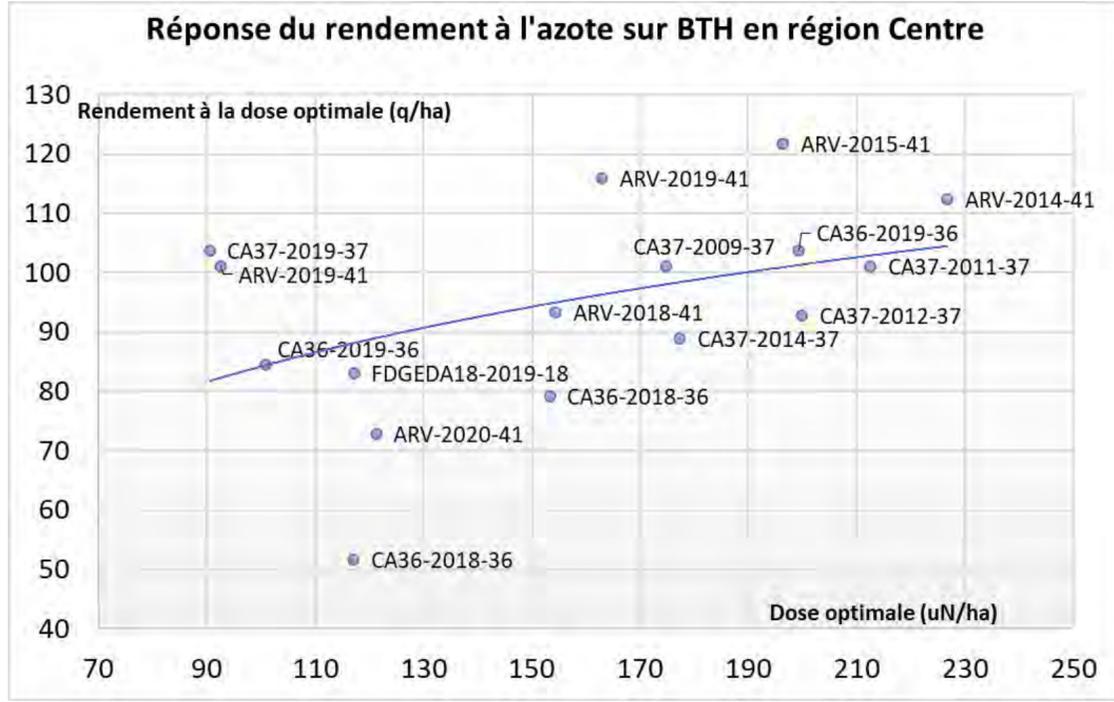


Raisonner ses interventions avec l'indice de nutrition azotée (INN) permet d'optimiser l'efficacité d'utilisation de l'azote

Un conseil moyen pour répondre à des années climatiquement et agronomiquement très différentes

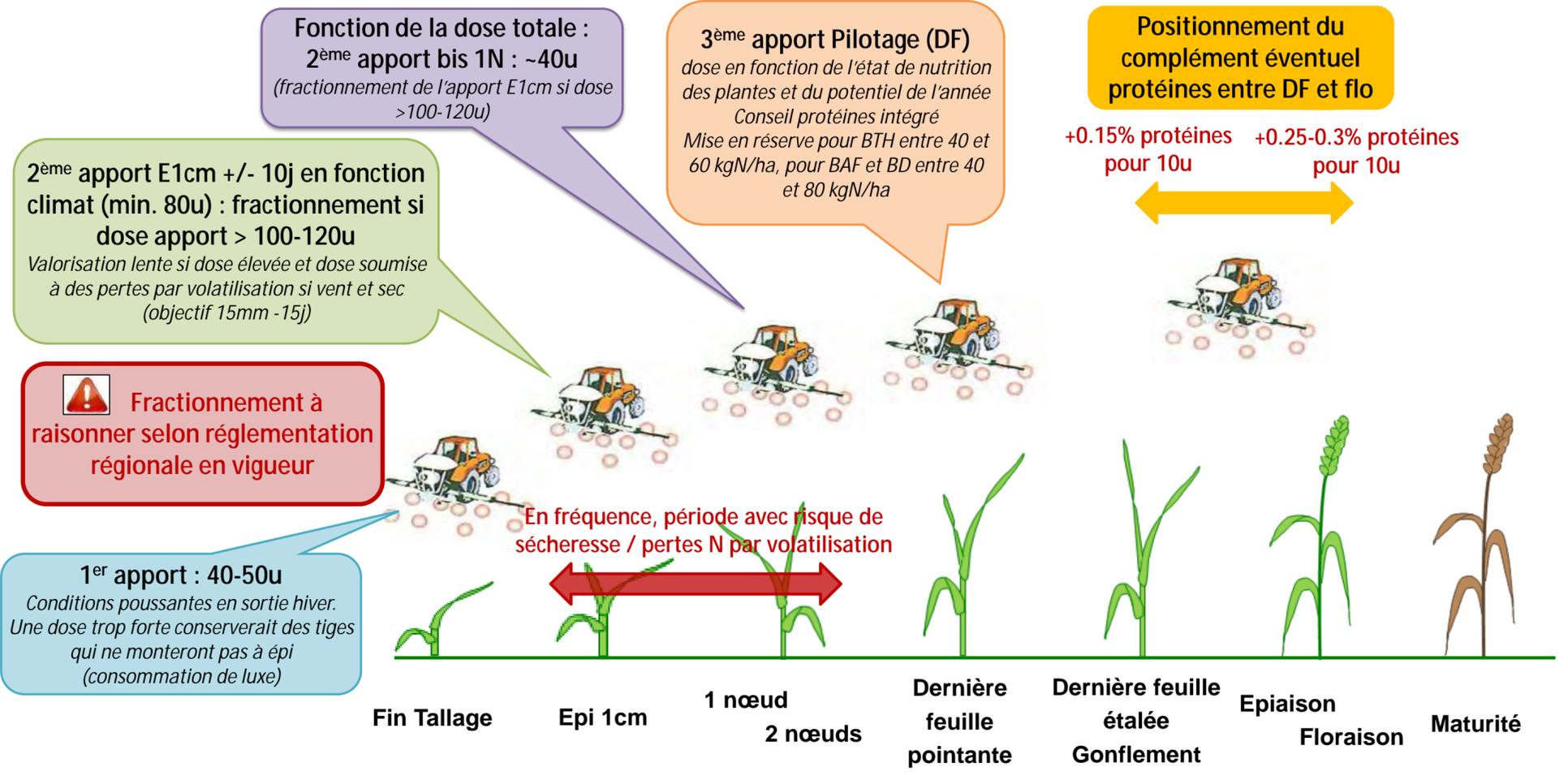
Variabilité des doses et rendements à l'optimum

Essais Azote Beauce / Gatinais / Champagne Berrichonne



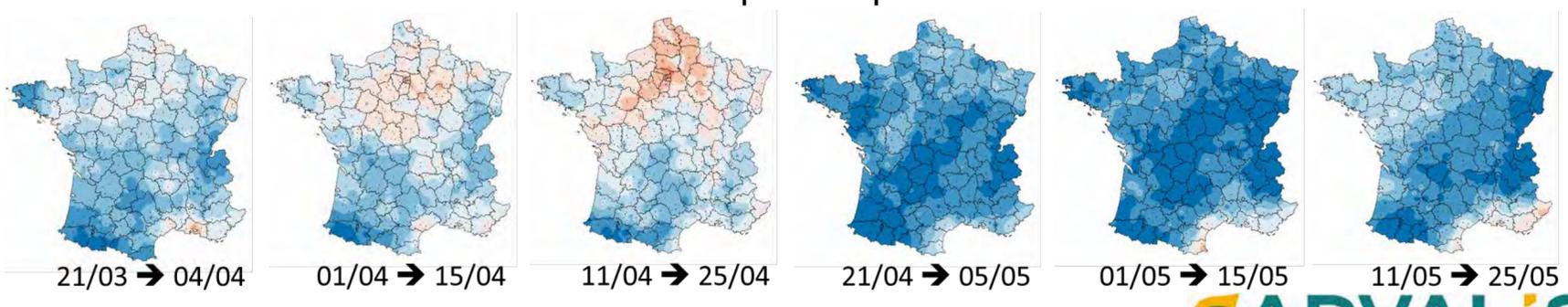
Des doses optimales extrêmement variables pour faire des rendements tout aussi variables
-> Nécessité de s'adapter à la parcelle

Mais un conseil moyenné de fractionnement de l'azote



Probabilité de cumuler plus de 15mm (%)
2011-2020

- <= 10
- 10 - 20
- 20 - 30
- 30 - 40
- 40 - 50
- 50 - 60
- 60 - 70
- 70 - 80
- 80 - 90
- > 90



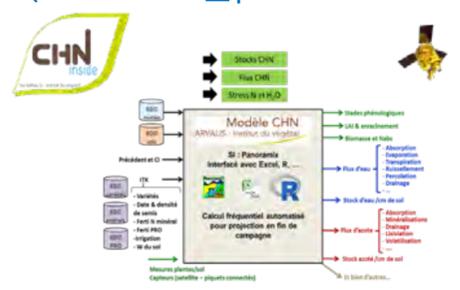
Un climat souvent très sec pendant la pleine période d'absorption Epi 1cm à 1-2 nœuds

Pilotage intégral de la fertilisation azotée avec CHN-conduite

Principe du pilotage intégral

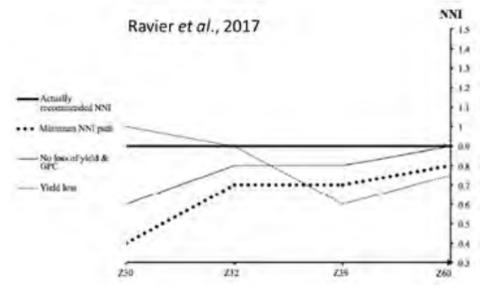
1. Utilisation du modèle de culture CHN pour des diagnostics - pronostics en cours de campagne

Ajustement des préconisations au contexte de l'année (stocks d'azote et potentiel de croissance)



2. Raisonnement des besoins en azote sur la base d'une dynamique d'INN minimale

Ajustement d'un seuil de carence tolérable



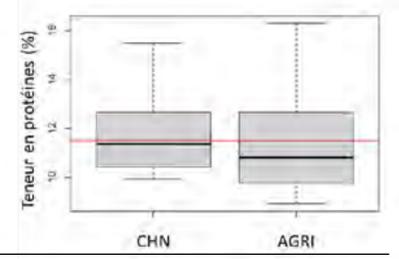
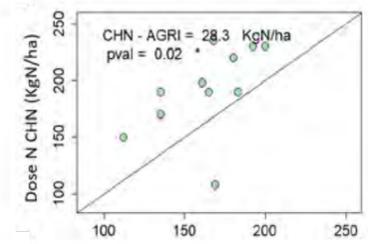
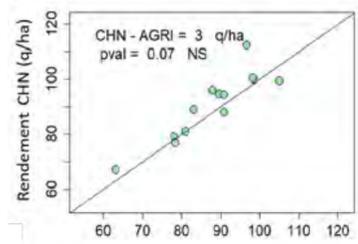
3. Gestion du risque climatique intégrée à l'outil

Optimisation des conditions de valorisation

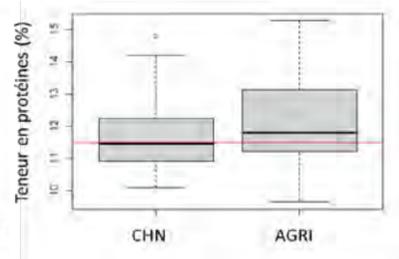
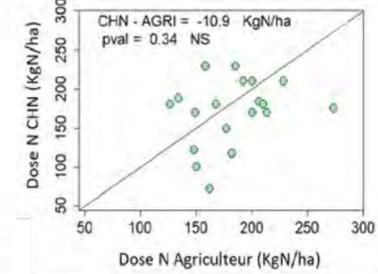
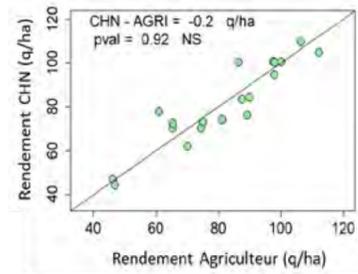


Résultats technico-économiques

2021
n=13



2022
n=21



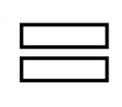
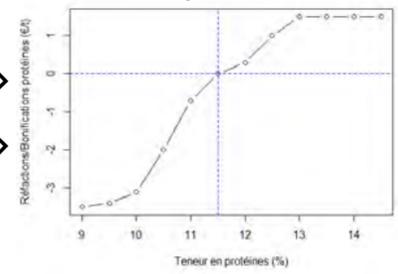
Quel impact sur la marge?

Scénarios de prix

	Scénario 2022A	Scénario 2022B	Scénario 2023
Prix engrais N (€/uN)	1.3	2.3	2.7
Prix vente grain (€/t)	300	300	300



Barème protéines



Gains moyens de marge « azote »*

	2022A	2022B	2023
Réseau 2021	+83 €/ha	+57 €/ha	+47 €/ha
Réseau 2022	+5 €/ha	+16 €/ha	+20 €/ha

* (chiffres d'affaires - charges liées aux engrais)

Retours utilisateurs

Points d'étonnement

- « Déclenche un peu plus tard que la conduite habituelle »
- « Demande de l'organisation et de la réactivité »
- « Passage supplémentaire »

« Je recommande à 100% »

Points forts

- « Faire évoluer mes pratiques »
- « Economie d'azote et adaptation au potentiel de l'année »
- « Intérêt technico économique »



1^{ère} références carbone sur des exploitations réelles

Résultats pour les exploitations céréalières



Résultats produits dans le cadre du projet CarbonThink par Agrosolutions
Objectif du projet : faire la démonstration du financement de 100 fermes en région Grand Est pour leur performance carbone



30 exploitations de grandes cultures à dominante céréalière diagnostiquées par leur conseiller agricole avec Carbon Extract dont 15 ont défini un projet de transition bas-carbone



Carte d'identité des exploitations

186 ha en moyenne

27 % des exploitations en agriculture de conservation des sols

En moyenne 7 cultures dans l'assolement

11 % de légumineuses dans l'assolement

Rendement en blé : 76 q/ha

145 kg d'azote minéral par ha

Bilan carbone initial des 30 exploitations



Emissions de gaz à effet de serre :

2,94 t_{eq}CO₂/ ha/ an

dont 90 % liés aux engrais minéraux et organiques



Variation stockage de carbone dans les sols :

-0,70 t_{eq}CO₂/ ha/ an

tendance au déstockage de carbone dans les sols



Bilan net (émissions – stockage) :

3,64 t_{eq}CO₂/ ha/ an

le déstockage de carbone du sol vient s'ajouter aux émissions de GES

Messages clés

- Leviers les plus mobilisés = leviers de stockage de carbone dans les sols par des agriculteurs qui déstockent au départ plus fortement que la moyenne
- Antagonisme entre stockage de carbone dans le sol et émissions de GES constaté > des leviers de réduction des GES peuvent engendrer un déstockage de carbone et inversement
- Coût de la transition pas couvert à 100 % par la vente de crédits carbone > d'autres financements à mobiliser
- Et l'agriculture de conservation dans tout ça ? Bilan net plus faible des exploitations (2,76 t_{eq}CO₂/ ha/ an) car moindre déstockage de carbone initial dans les sols

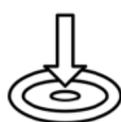
Projets de transition des 15 agriculteurs

Leviers majoritairement mobilisés par les exploitations :

- Augmenter la biomasse et la surface des intercultures
- Intégrer plus de légumineuses dans la rotation
- Réduire la volatilisation de l'azote minéral et



Impact des leviers sur le bilan carbone



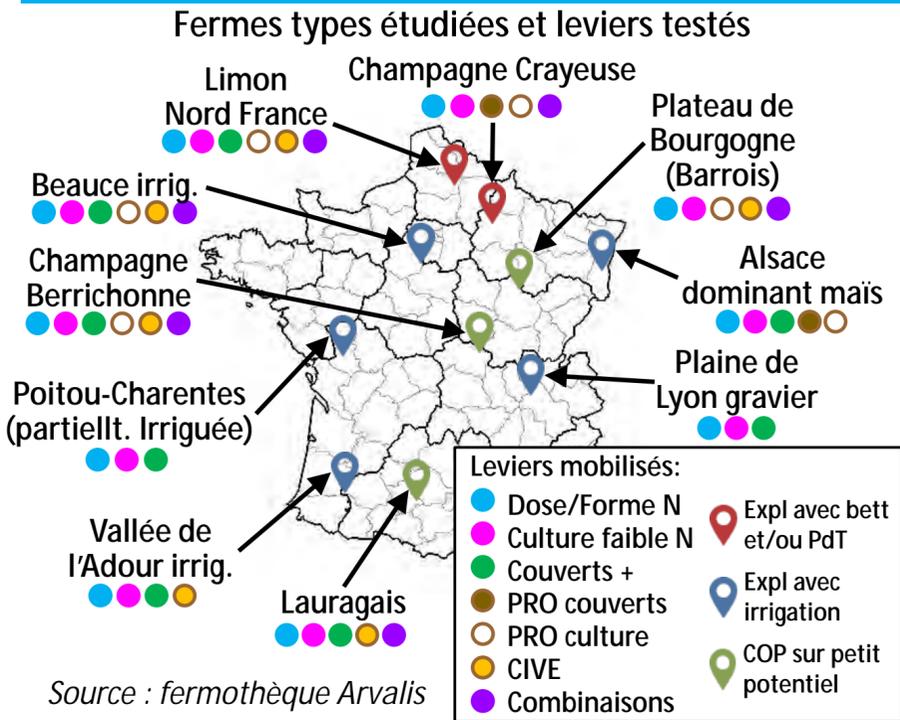
- Variation des émissions de gaz à effet de serre : -0,28 t_{eq}CO₂/ ha/ an (-10%)
- Variation du stockage de carbone dans les sols : +0,70 t_{eq}CO₂/ ha/ an
- Variation du bilan net : -0,98 t_{eq}CO₂/ ha/ an (-23%)



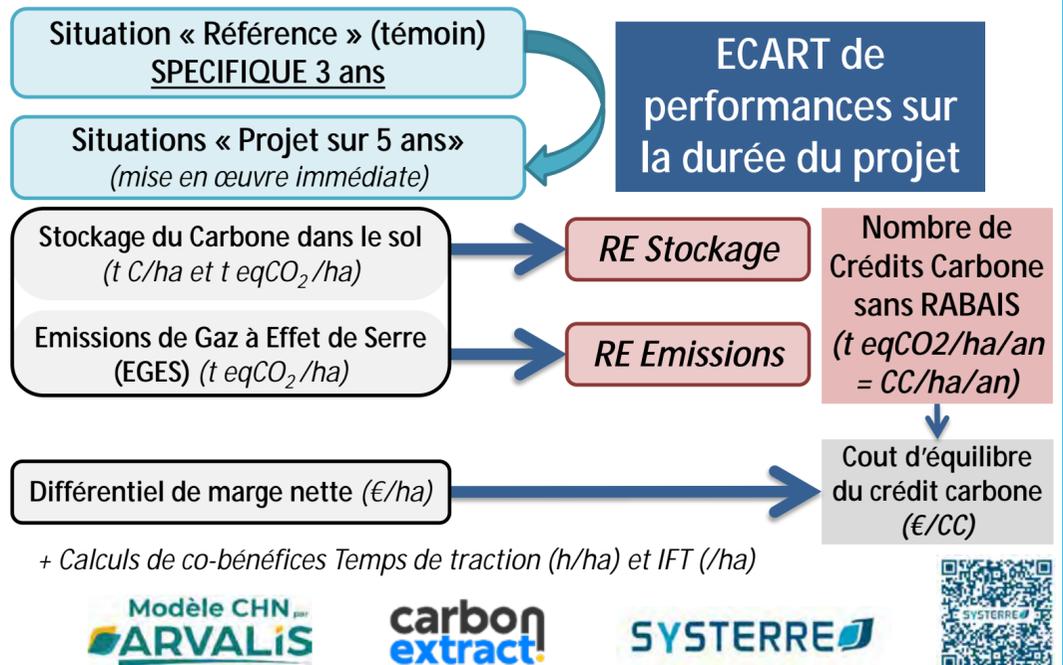
- Coût moyen des projets = 71 € /ha /an
- Crédits carbone potentiels = 0,81 crédits carbone /ha / an (après application des rabais)
- Rémunération potentielle = 32 € /ha /an (avec tonne de carbone à 40 €)

Crédits carbone : quels leviers privilégier ? Exemple sur dix Fermes Types

MÉTHODE : APPLICATION DES LEVIERS BAS CARBONE À DES FERMES TYPES PERFORMANTES



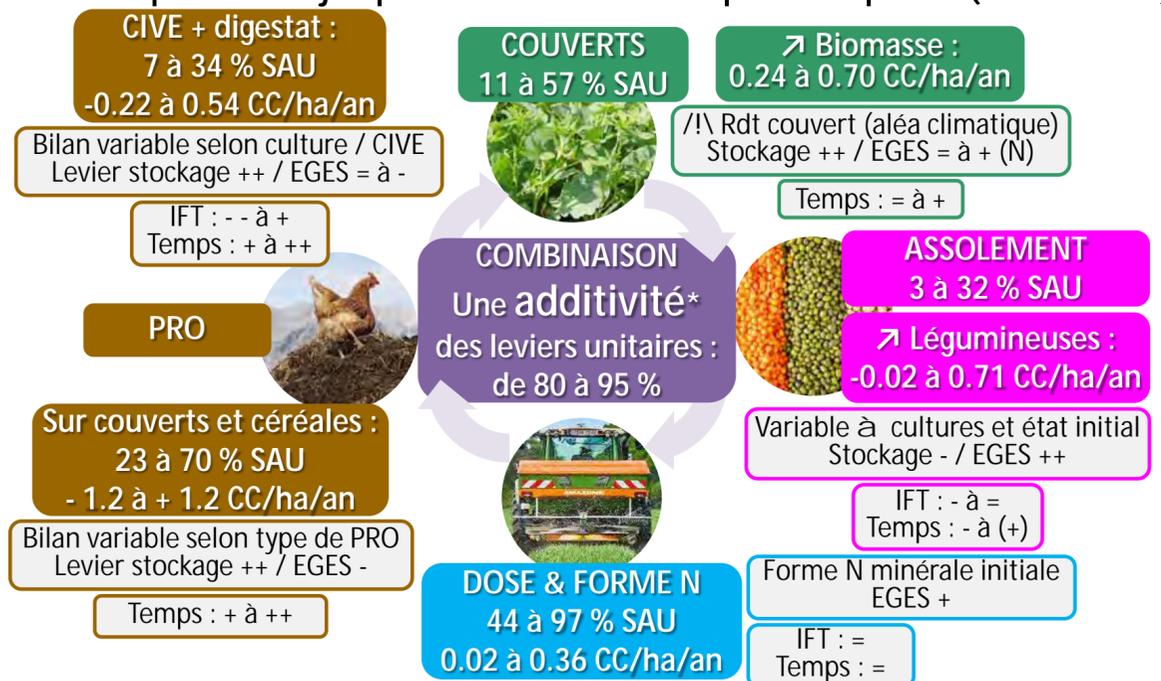
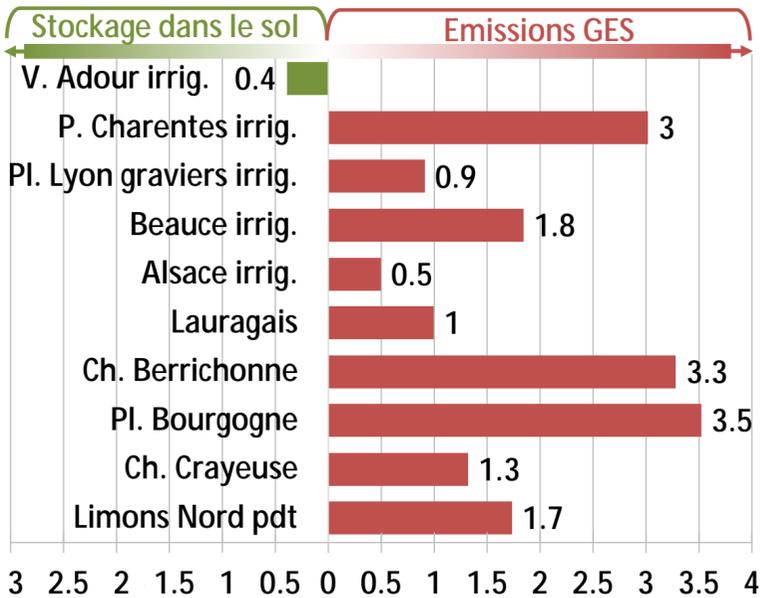
$$\text{Réduction d'Emissions} = RE_{\text{émissions}} + RE_{\text{Stockage}} + (RE_{\text{Aval}})$$



BILAN CARBONE INITIAL ET CRÉDITS CARBONE DISPONIBLES PAR LEVIER

Bilan initial avant mise en place des leviers : Des fermes émettrices nettes de GES
Exprimé en t eqCO₂/ha/an

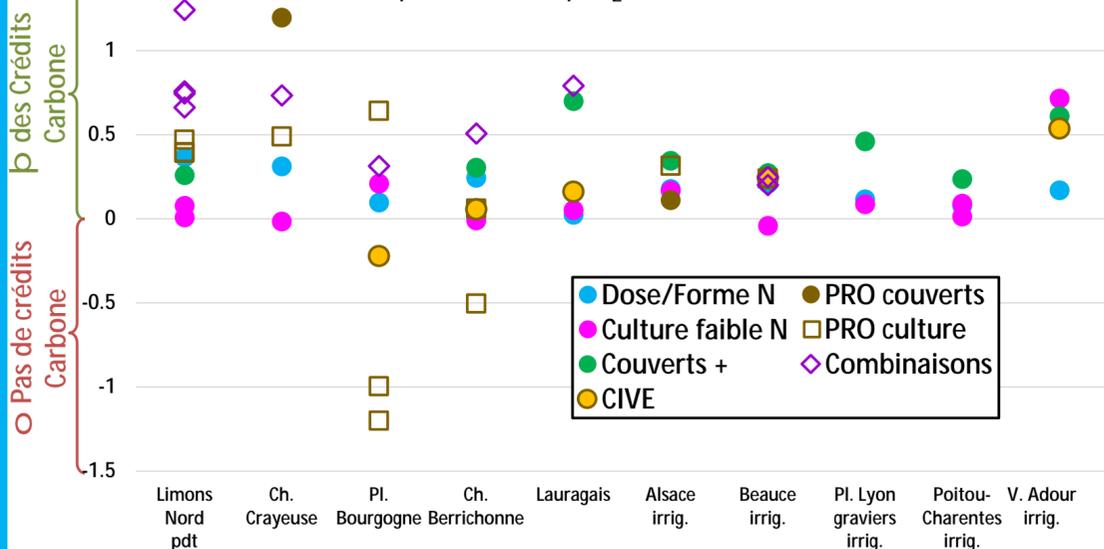
Des scénarios produisant jusqu'à 1.2 Crédit Carbone par ha et par an (avant rabais)



*Les leviers peuvent se cumuler et s'additionner dans un même projet mais l'ADDITIVITE n'est pas complète.

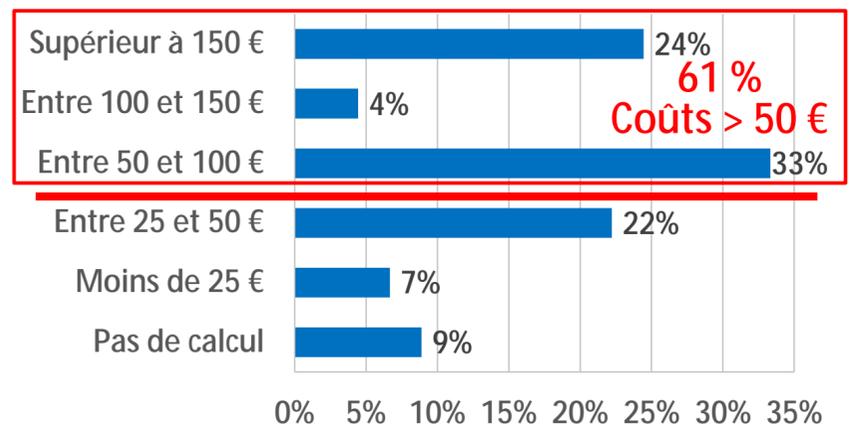
CRÉDITS CARBONE PAR FERME TYPE

Des projets générateurs de CC jusqu'à 1.2 CC/ha/an
Exprimé en t eqCO₂/ha/an



COÛT D'ÉQUILIBRE DES CRÉDITS CARBONE

Répartition des projets par valeur de coût d'équilibre* du Crédit Carbone
(en % des 45 projets avec Crédits C et marge négative à neutre)



*Coût d'équilibre : prix minimal auquel il faudrait que l'agriculteur vende ses CC pour rembourser le coût de la mise en œuvre des leviers

CONCLUSION

- Un choix de levier à raisonner selon le système de production initial.
- Des leviers +/- faciles à mettre en œuvre selon leur technicité.
- Rabais non pris en compte : une augmentation du coût d'équilibre à prévoir.
- Les travaux présentés sont avec la référence spécifique : des travaux sont en cours avec la référence générique.

Calcul du bilan Carbone

Ferme Type Beauce

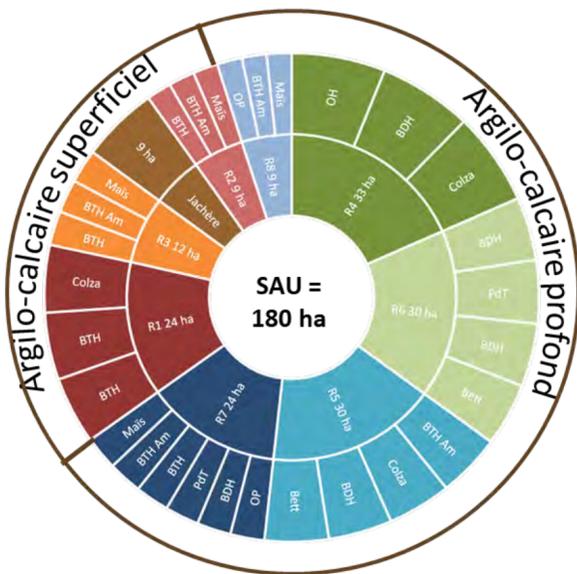


Les Culturales[®]
2023 14-15 juin
CONGERVILLE - THIONVILLE (91)

Caractéristiques de la Ferme type performante

Références Pratiques	
% labour	67
% cultures intermédiaires	28
N total	178 kg N/ha
N minéral	178 kg N/ha
N organique	/

Cultures	Rendement (moy 16-20)
Blé dur hiver	70 q/ha
BTH	78 q/ha
Colza	42 q/ha
BAF	73 q/ha
Betterave	962 t/ha
Maïs	130 t/ha
Pomme de Terre	464 t/ha
OH	74 q/ha
OP	74 q/ha
Jachère	/



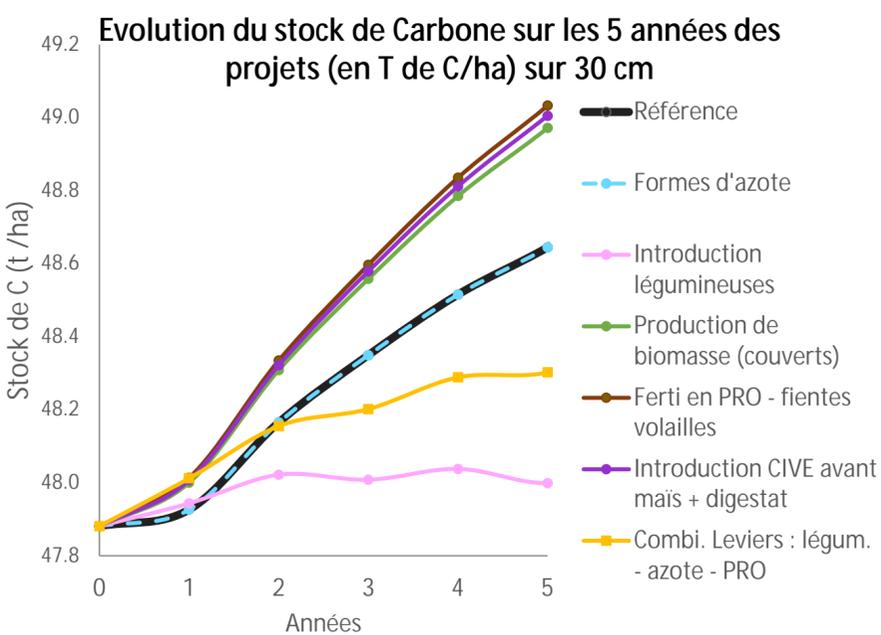
Projets
Projet 1 (unitaire): Diminution de la volatilisation de l'azote : remplacement des apports urée ou solution N par Nexen ou Ammonitrate
Projet 2 (unitaire): Introduction de pois de printemps (sur 15% SAU)
Projet 3 (unitaire): Optimisation des couverts : Vesce + trèfle + phacélie + moutarde avant maïs, OP, betterave et pomme de terre
Projet 4 (unitaire): Fertilisation des colzas avec fientes séchées de volailles
Projet 5 (unitaire): Introduction d'une CIVE seigle avant le maïs avec apport digestat sur CIVE (8% SAU)
Projet 6 (combiné): Projet 1 + Projet 2 + Projet 4

RESULTATS DES PROJETS

Stockage de C

Modèle CHN
ARVALIS - Institut du végétal

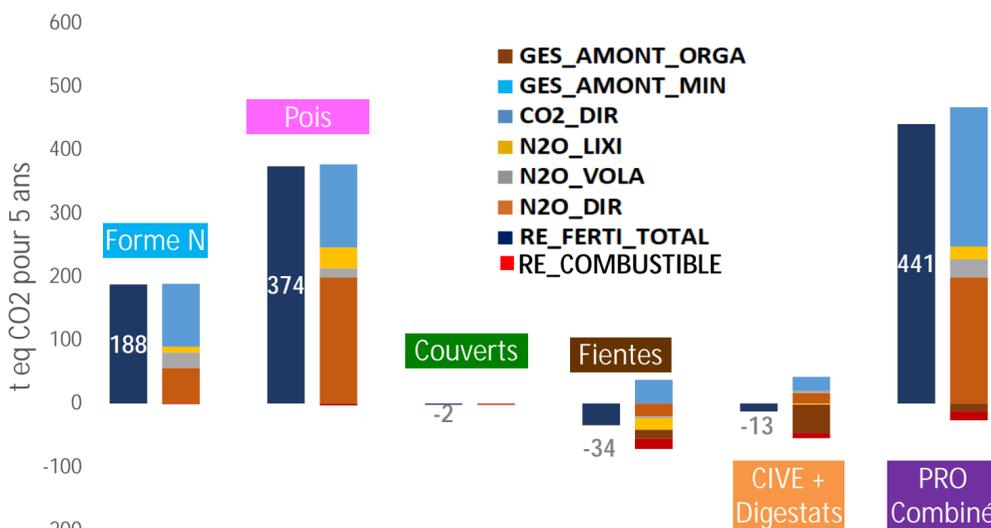
Calculs réalisés avec l'outil CHN-AMG, modèle AMG-V2



Emissions de GES

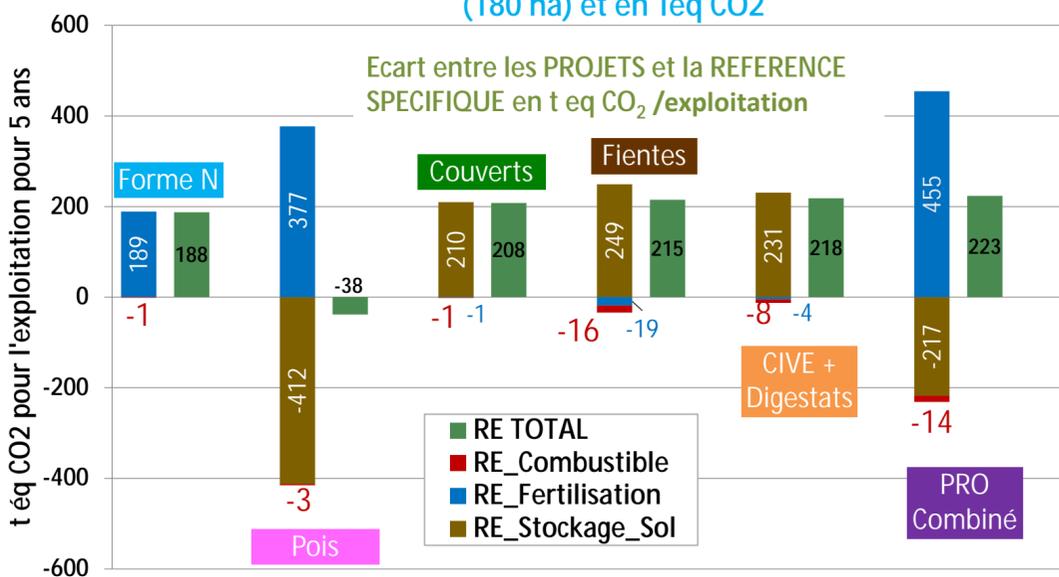


Calculs réalisés avec l'outil CarbonExtract développé par AgroSolutions
Ecart entre le projet et les REFERENCES en T eq CO2 /exploitation



GÈNÈRE-T-ON DES CRÉDITS CARBONE SUR LA FERME TYPE BEAUCE ?

Bilan des réductions sur 5 ans à l'échelle exploitation (180 ha) et en T eq CO2



Bilan économique



Projets	Nb Crédit C	Nb Crédit C	Ecart de Marge	Coût Equilibre Crédit C
	5 ans /expl	/ha/an	€/ha/an	€/CC
Forme N	188	0.21	-11	51
Pois	-38	-0.04	-76	-
Couverts	208	0.23	-9	40
Fientes	215	0.24	-42	176
CIVE + Digestats	218	0.24	+15	Que du bonus
PRO combiné	223	0.25	-113	454

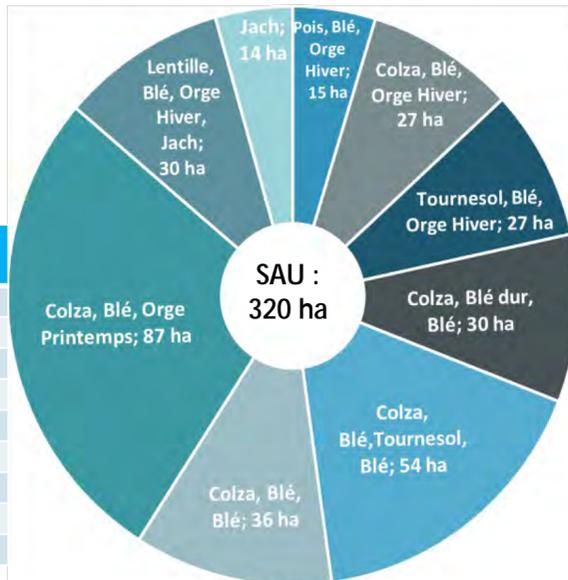
- ⊘ Les bilans Carbone à l'exploitation sont positifs pour les projets 1, 3, 4, 5 et 6 mais nécessitent des changements importants
- ⊘ Forte dépendance des leviers et de leur intérêt à la situation initiale de l'exploitation
- ⊘ Le marché Carbone ne couvre pas les coûts d'équilibre avant rabais pour tous les projets



Calcul du bilan Carbone Ferme Type Champagne Berrichonne

Caractéristiques de la ferme type performante

Références Pratiques	
% labour	15
% cultures intermédiaires	10
N total	153 kg N/ha
N minéral	153 kg N/ha
N organique	/



Cultures	Surface (ha)	Rendement (g/ha) (moy 16-20)
Blé Tendre d'Hiver	123	63
Colza d'Hiver	73	29
Orge d'Hiver	33	61
Orge de Printemps	29	62
Tournesol	22	22
Lentille	10	16
Blé dur	10	62
Pois	5	35

Projets
Projet 1 (unitaire) : Diminution de la volatilisation de l'azote : remplacement des apports urée ou solution N par Nexen ou Ammonitrate
Projet 2 (unitaire) : Introduction de pois (sur 2.8% SAU)
Projet 3 (unitaire) : Optimisation des couverts (Intercultures longues avant lentille et tournesol, association colzas-féveroles)
Projet 4 (unitaire) : Fertilisation des colzas avec fientes séchées de poules pondeuses
Projet 5 (unitaire) : Introduction de CIVE (seigle d'hiver) avant tournesol + apport de PRO (digestat brut) sur CIVE
Projet 6 (combiné) : Projet 1 + Projet 2 + Projet 3

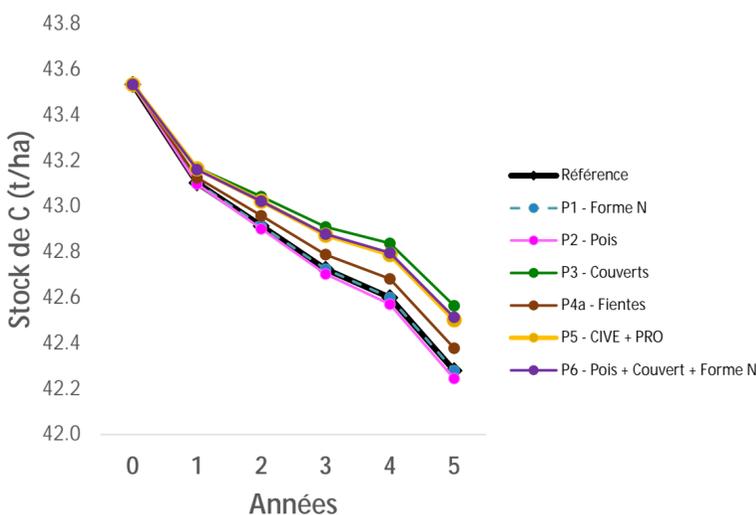
RESULTATS DES PROJETS

Stockage de C

Calculs réalisés avec l'outil CHN-AMG, modèle ARVALIS - Institut du végétal

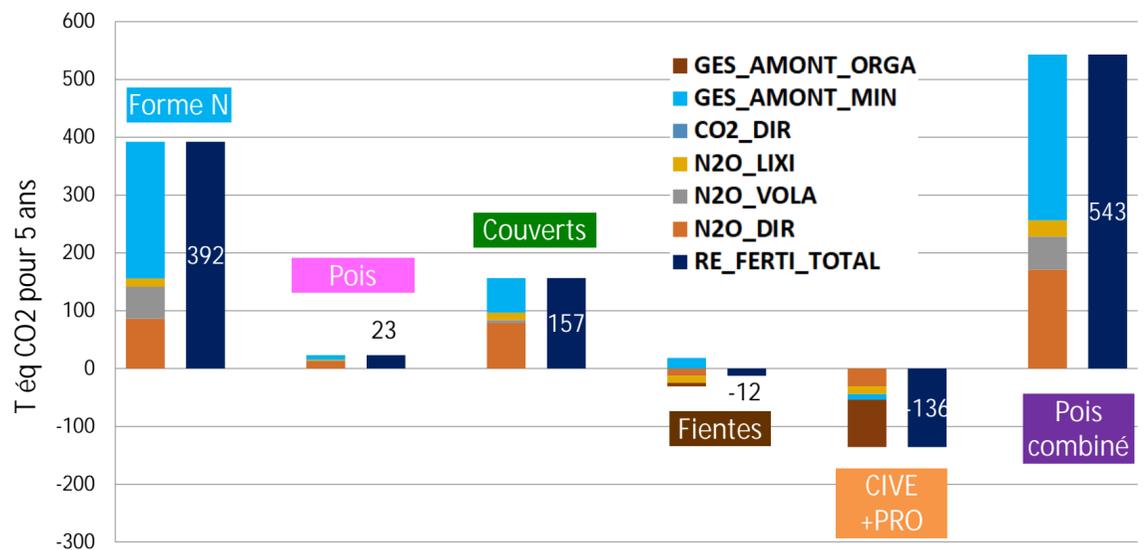


Evolution du stock de Carbone sur les 5 années des projets (en T de C/ha) sur 30 cm



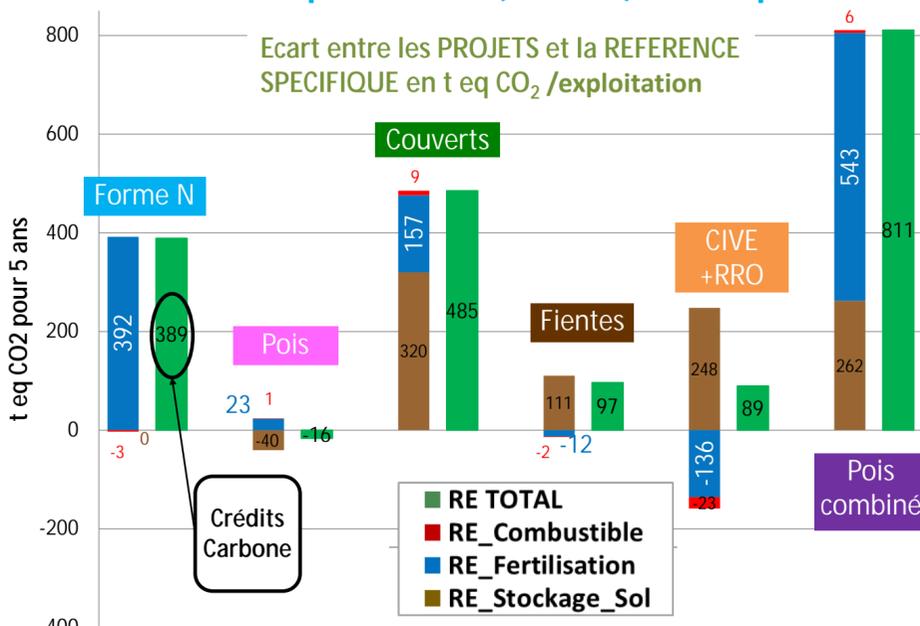
Emissions de GES

Calculs réalisés avec l'outil CarbonExtract développé par AgroSolutions
Ecart entre le projet et les REFERENCES en T eq CO₂ / exploitation



GÉNÈRE-T-ON DES CRÉDITS CARBONE SUR LA FERME TYPE CHAMPAGNE BERRICHONNE ?

Bilan des réductions sur 5 ans à l'échelle exploitation (320 ha) en Teq CO₂



Bilan économique



Projets	Nb Crédit C	Nb Crédit C	Ecart de Marge	Coût équilibre
	/5 ans /expl	/ha/an	€/ha/an	€/CC
Forme N	389	0.243	-26	108
Pois	-16	-0.01	1	-
Couverts	485	0.3	1	Que du bonus
Fientes	97	0.06	-36	592
CIVE	89	0.06	-37	662
Pois combiné	811	0.51	-22	44

⊘ Les bilans Carbone à l'exploitation sont positifs pour les projets 1, 3, 4, 5 et 6 mais nécessitent des changements de pratiques importants
⊘ Le marché du carbone actuel ne peut couvrir les coûts d'équilibre même avant rabais pour les projets mis en œuvre



Prix élevés des engrais azotés : dois-je ajuster mes doses d'apports ?

Cas du BLÉ TENDRE

Prix actuels des engrais azotés élevés

Nécessité d'intégrer prix des engrais et prix de vente des cultures dans le raisonnement de la fertilisation azotée.
à Approche par la notion d'optimum technique « rendement »

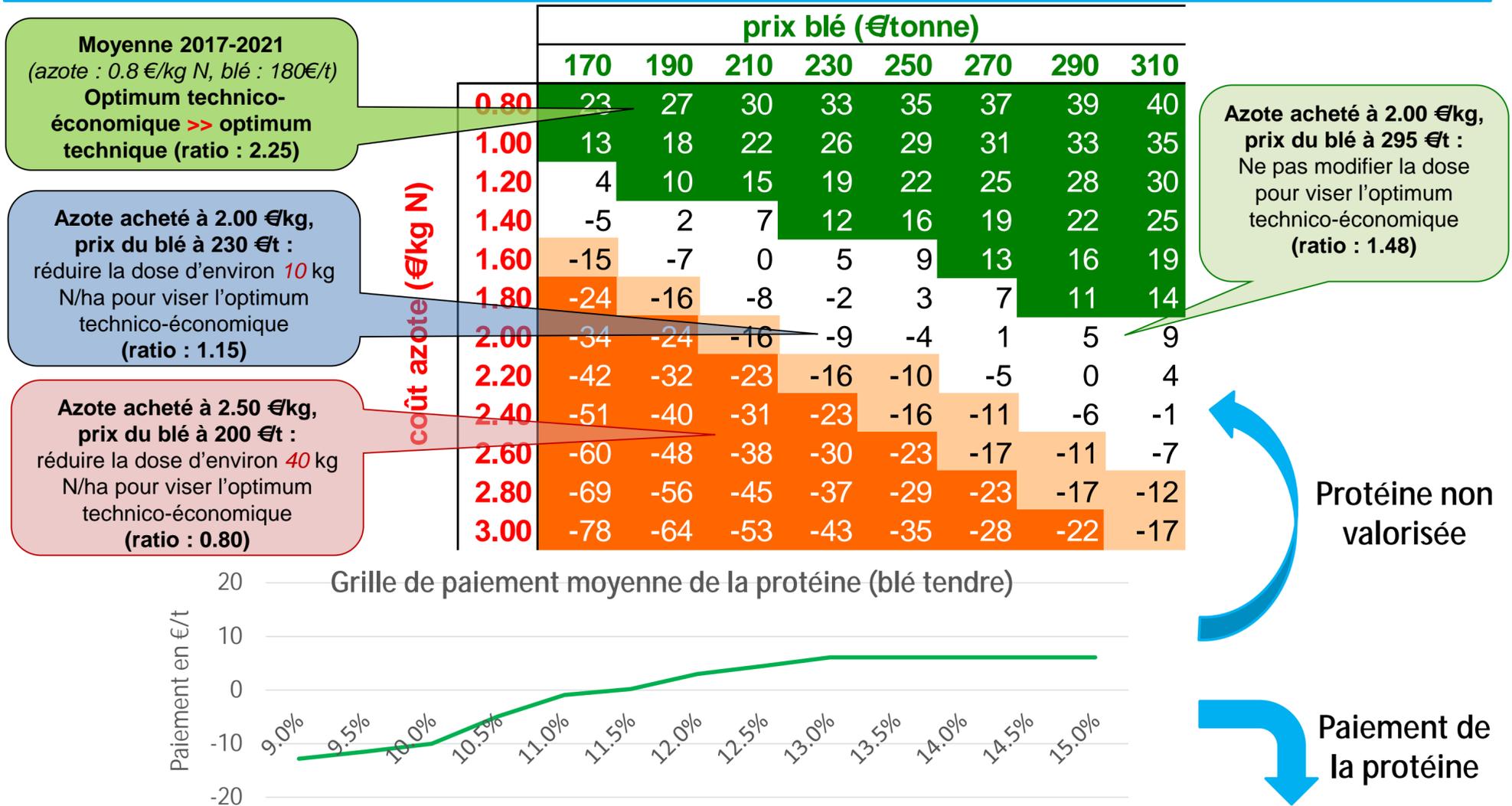
Comment retrouver ma dose à l'optimum technique « rendement » à partir de ma dose prévisionnelle ?

La dose d'azote prévisionnelle X est calculée en intégrant un objectif de qualité à travers le bq :

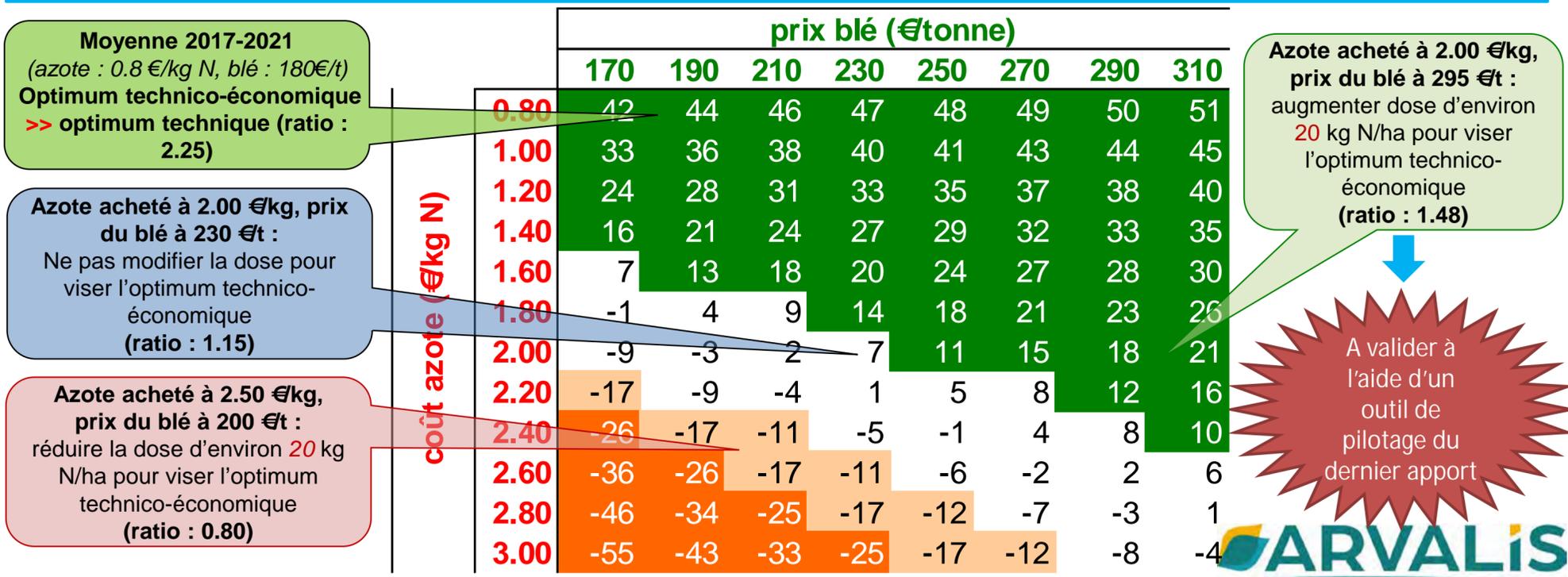
Dose à l'optimum technique « rendement » = dose X - **besoin complémentaire protéines (bc x objectif de rdt)**

Par exemple, si la dose X est de 200 kgN/ha, pour un besoin complémentaire bc de 0.2 kgN/q et un objectif de rendement de 80 q/ha alors la dose à l'optimum technique serait de 184 kg N/ha (soit 200 - 0.2 x 80).

Ecart de dose (en kg/ha) entre optimum technique et optimum technico-économique en fonction du prix du blé tendre et du prix de l'azote sans paiement de la protéine



Ecart de dose (en kg/ha) entre optimum technique et optimum technico-économique en fonction du prix du blé tendre et du prix de l'azote avec une grille de paiement moyenne de la protéine



L'engagement dans un projet bas carbone

Département: La Marne
Surface projet : 316 Ha
Filière : Grandes cultures



Orge



Betterave à sucre



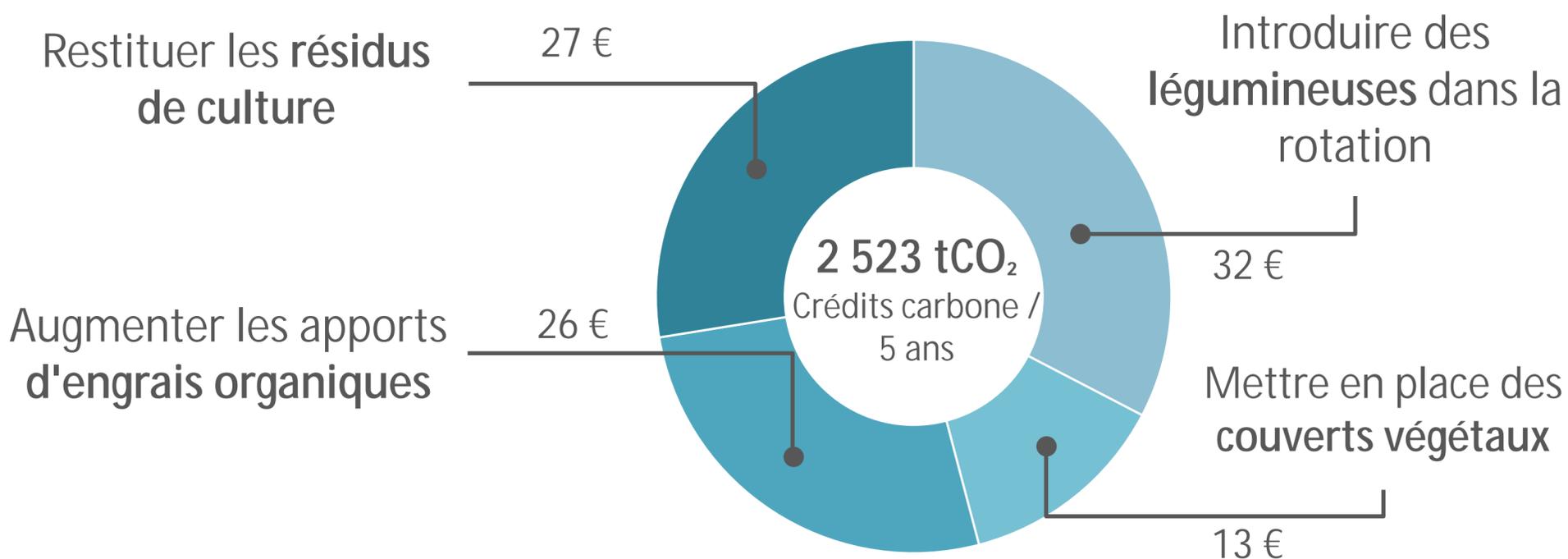
Blé



Colza

Leviers principaux mis en place

Coût des leviers (€/ha/an)



Co-bénéfices



Biodiversité

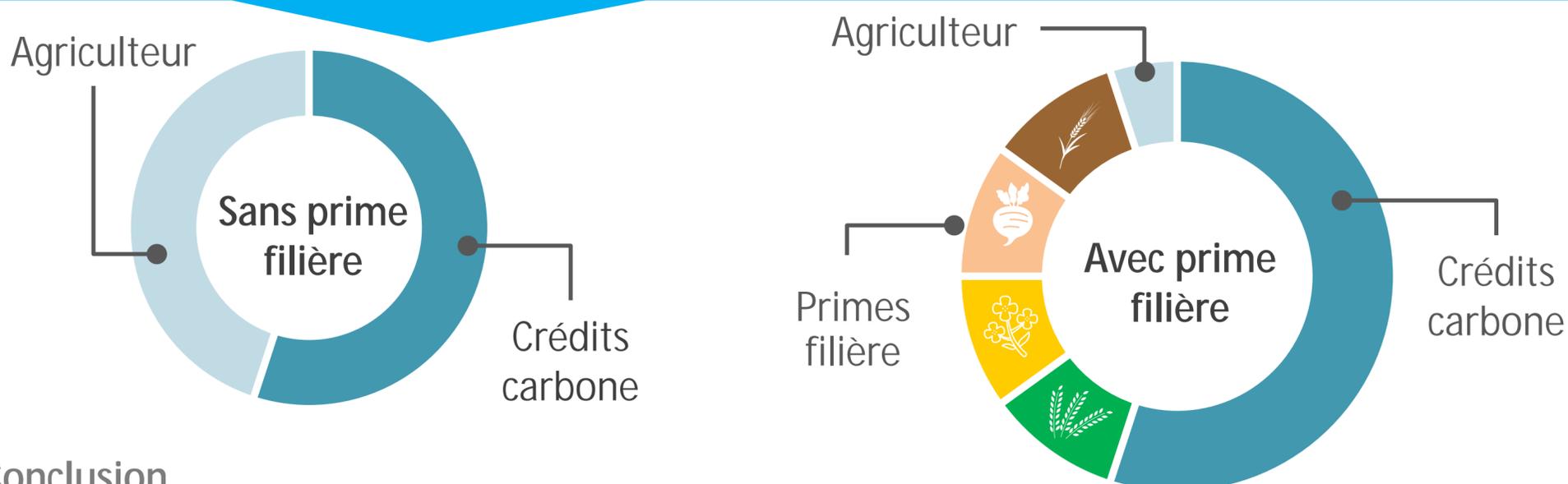


Qualité des sols



Qualité air et eau

Financement du projet (sur la base d'un prix de 45 € le crédit carbone)



Conclusion

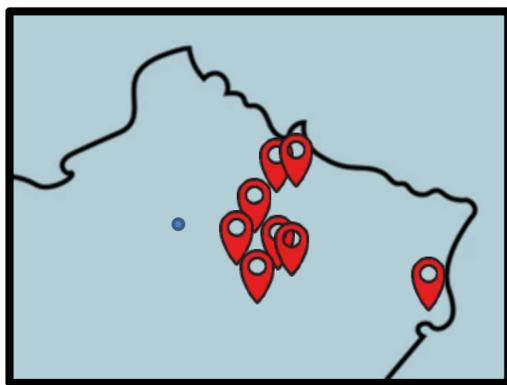
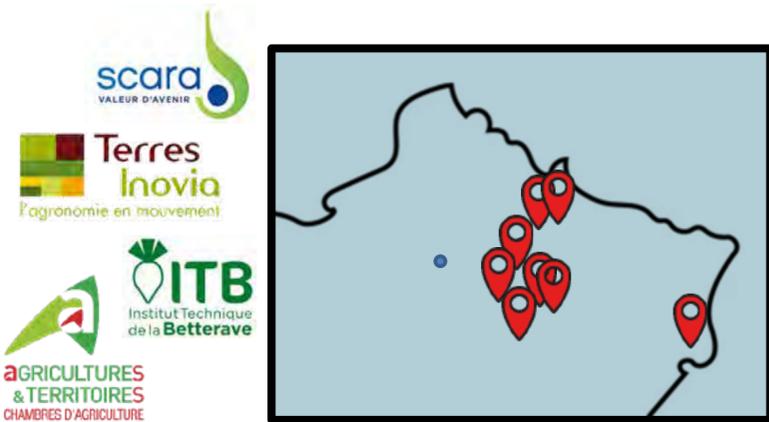
Le coût de certains projets ne peut être que partiellement couvert par la vente de crédits carbone. Dans ce cas-là et sous réserve d'une meilleure valorisation des produits issus de matières premières « bas carbone », l'apport d'une prime filière est de nature à faciliter la transition agroécologique des exploitations agricoles.

Comment les ITA accompagnent-ils la transition bas carbone?

La transition bas carbone est un enjeu majeur auquel seront confrontés nos systèmes dans les années à venir et une clé essentielle d'atténuation et d'adaptation au changement climatique.

Afin d'accompagner au mieux les agriculteurs dans cette transition, les instituts techniques agricoles français misent sur la coopération technique (actions inter-ITA, projets régionaux, projets Européens) pour travailler de concert avec de nombreux spécialistes français et européens et ainsi trouver des solutions durables et économiquement viables.

Ø Le projet Européen ClieNFarms (2021-2025)



Porteur de projet : **INRAE**

Nombre de partenaires : 33

Nombre de pays européens impliqués : 13

Objectif général: Développer et diffuser des solutions pour atteindre la neutralité climatique et la durabilité face au changement climatique.

Objectifs des ITA:

- Û Faire connaître la méthode Label Bas Carbone Grandes Cultures® au niveau Européen et la confronter à d'autres méthodes de calcul.
- Û Identifier les leviers prépondérants permettant de stocker efficacement le carbone et réduire les émissions de gaz à effet de serre grâce au suivi d'exploitations agricoles.
- Û Organiser 40 journées techniques sur la thématique Carbone pour diffuser les solutions les plus performantes.

Ø Le PPDAR - Atténuation du changement climatique (2022-2027)

Action transversale entre les instituts animaux, végétaux et arboricoles dont les objectifs sont de partager nos travaux sur :

- l'évaluation et l'accompagnement de la **mise en œuvre de leviers** améliorant les **bilans Carbone**;
- l'**amélioration des méthodes et outils** en concertation et au **bénéfice des agriculteurs** : interopérabilité, fiabilité des méthodes de quantification et d'évaluation.



Ø Les projets Européen ClimateFarmDemo (2022-2029) et ClimateSmartAdvisors (2023-2030)

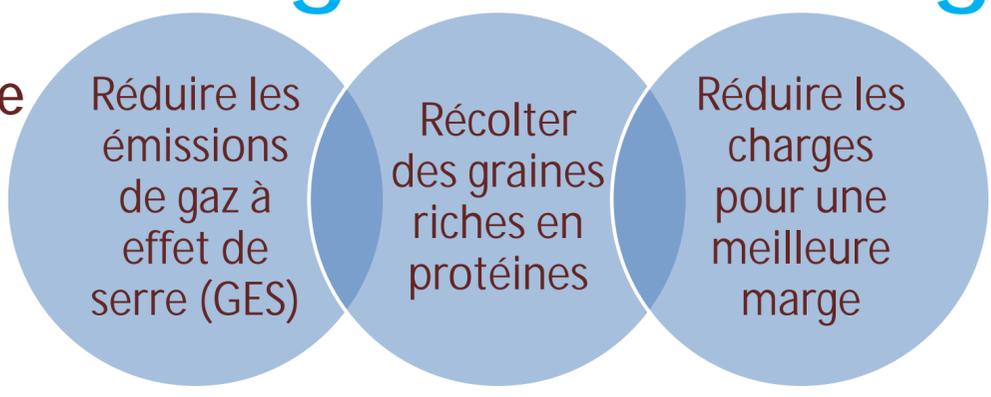


En s'engageant dans ces 2 nouveaux projets Européens sur la thématique Carbone, coordonnés respectivement par l'IDELE et l'ILVO (Belgique), les instituts techniques agricoles ont la volonté de monter en compétence sur la thématique carbone afin de toujours mieux accompagner la transition bas carbone des agriculteurs français.

Le budget alloué permettra de financer de nombreuses journées techniques, restez connectés!

Une amélioration assurée du bilan carbone des exploitations en augmentant la part des légumineuses à graines

+15 à 20% de LAG pour un triple bénéfice



A l'origine ?
= le service de fourniture d'azote des légumineuses pour le système productif, combiné à leur propre autonomie grâce à la fixation symbiotique.



Terres Inovia quantifie la réduction des émissions nettes lors d'un projet d'augmentation du pois, de la féverole ou du soja, de 15 à 20 % des surfaces de l'exploitation, en incluant, ou pas, un blé supplémentaire en culture suivante.

Sur la base de cas représentatifs*

* de la réalité moyenne des 6 territoires pédo-climatiques
Dans le cas de la région du **Grand Est** les réductions obtenues avec huit cas-types de systèmes de culture sont résumées en Figures 1&2.

15% émissions GES évitées

Par exemple le projet dans le ferme-type Barrois apporte des réductions nettes de 69,7teqCO₂/an uniquement liées à l'insertion de culture de pois dans la rotation initiale Colza-Blé-Blé-Orge, soit **0,4teqCO₂/ha/an** et (0,5teqCO₂/ha/an avec insertion supplémentaire de 2 couverts, rabais inclus).

Chiffres confortés par ailleurs

- Grand Ouest : 0,6 teqCO₂/ha/an avec pois ou soja (AgroSolutions);
- Occitanie : 0,7teqCO₂/ha/an avec soja (Arvalis).

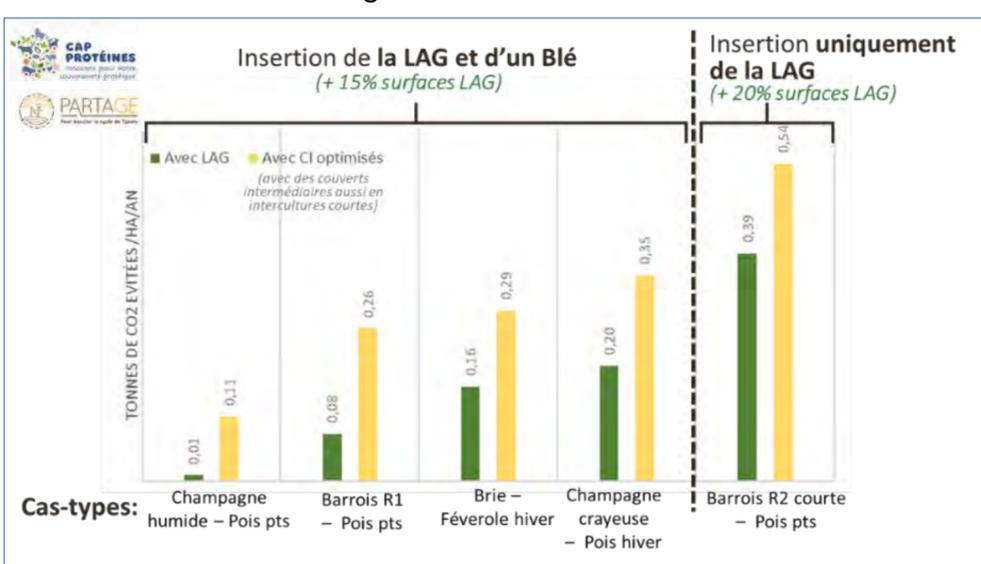


Figure 2 : Bilans nets (après rabais donc directement valorisables en crédit carbone) des réductions d'émissions permises par le levier « insertion de légumineuses à graines (LAG) » possiblement combiné avec « optimisation des couverts d'interculture » selon la méthode Label bas carbone- Grandes cultures dans plusieurs cas représentatifs du Grand Est. (M. Campoverde et al., Terres Inovia 2022).

Une contribution est significative

dans le contexte des grandes : des cas d'agriculteurs du Grand Est = une moyenne à **0,7teqCO₂** évitées par hectare et par an (CarbonThink).

Modulation: réduction supplémentaire de 10 à 20 % dans le cas où l'agriculteur obtient un meilleur rendement de la légumineuse ou alors valorise les effets sur le blé suivant (-N ou/et + Rdt)

Assiette significative : fort potentiel car actuellement il n'y a que 7 % des successions dominantes actuelles qui comprennent des LAG.

Co-bénéfices : qualité de l'air, maintien de la biodiversité, etc. : des arguments pour négocier à la hausse le prix de vente des crédits-carbone.

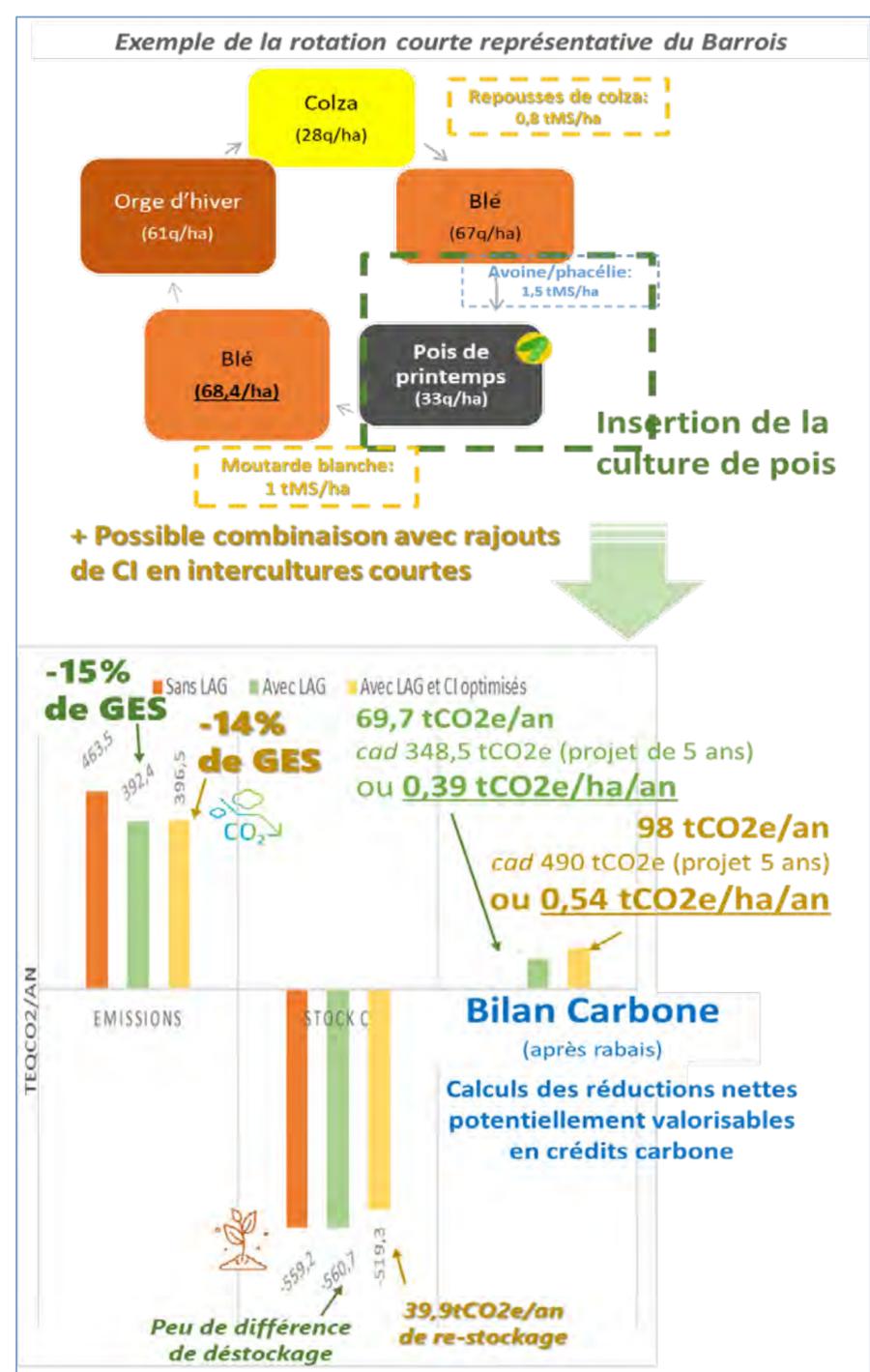


Figure 1 : Un exemple de projet d'évolution du système avec LAG.



Trouvez le couvert végétal « idéal »

1. Culture suivante et rotation culturale

Sources :
**ARVALIS, ITB,
Terres Inovia,
UNILET**

		Moutardes bl. ou br. nématocides	Radis fourrager nématocide	Autres radis	Colza	Autres crucifères	Phacélie	Lin	Tournesol	Niger	Sarrasin	Seigle, Triticale, Alpiste	Avoine cultivée, Avoine rude	Sorgho, Moha	Ray grass d'Italie	Féverole, Lupin	Pois	Fenugrec, TA, TI, Vesces R-Aphano	Autres vesces, Lentille, Gesse	Lotier, Sainfoin, TB et TV R-Aphano	Luzerne, Autres TB et TV	
Culture suivante :	Blé sur blé	PE	PE	PE	PE	PE									DN	N	N	N	N	N	N	N
Culture suivante :	Autres céréales d'hiver														DN	N	N	N	N	N	N	N
Culture suivante :	Orge de printemps											t	t	t	tDN	N	N	N	N	NC	NC	
Culture suivante :	Maïs	t	t	t	t	t					D				DNH	N	N	N	N	NC	NC	
Culture suivante :	Betteraves (nématode à kistes)	B	B	B	B	B					D				NH	NR	N	N	N	C	C	
Culture suivante :	Pommes de terre										D				NH	N	N	N	N			
Dans la rotation :	Pois, Haricot, Lentille										D						A		A		A	
Culture suivante :	Pois de conserve, Haricot	S	S	S	S	S	S	S	S	S	D				H	S	SA	S	SA	CS	CSA	
Culture suivante :	Pois protéagineux, Lentille										D				H		A		A	C	CA	
Culture suivante :	Féverole, Lupin										D				H					C	C	
Culture suivante :	Tournesol				V			V			D				NH	N	N	N	N			
Dans la rotation :	Lin				V			V														
Culture suivante :	Lin fibre ou oléagineux				V			V			D	L	L		LNH	N	N	N	N	C	C	
Dans la rotation :	Colza (présence hernie)																					
Dans la rotation :	Colza (sans hernie)																					

	Effet bénéfique du couvert
	Effet plutôt bénéfique du couvert
	Pas d'effet connu du couvert
	Légers risques générés par le couvert
	Risques générés par le couvert
	Couvert déconseillé

R-Aphano : résistant à l'Aphanomyces
S-Aphano : sensible à l'Aphanomyces

TA : Trèfle d'Alexandrie TB : Trèfle blanc
TI : Trèfle incarnat TV : Trèfle violet

2. Périodes de semis et de destruction

Couvert estival et gélif

Couvert hivernant

Association longue durée

Plantes compagnes

Couvert permanent

3. Techniques de semis et de destruction



4. Services recherchés

Couvrir facilement le sol

Récolter en fourrage

Jouer sur la prophylaxie

Entretenir la biodiversité

Protéger les sols

Accroître la fertilité chimique



Choix des couverts
La choix des couverts n'est pas toujours été au vu du nombre d'espèces et des membres
cristallins qui peuvent être pris en compte.
Cet outil vous guide pour choisir le ou les couverts qui conviennent le mieux à votre
situation.

1 2 3

Choisissez votre région :

Votre recherche :

Code postal* : 02100

Station météo associée : SAINT QUENTIN - 15km

Période de semis du couvert* : Du 25.08 au 09.09

Culture suivante* : Potager de terre

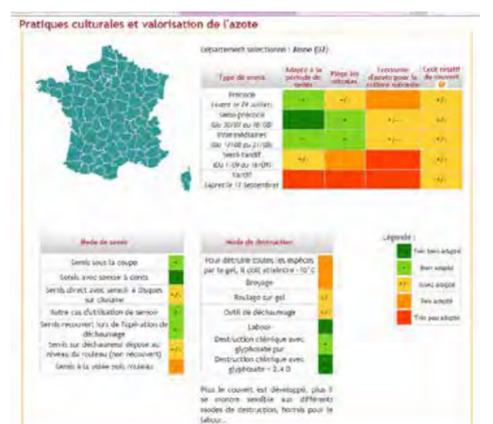
Cultures de la rotation* : Céréales à paille ou maïs Céréales sans paille

A découvrir sur:

www.choix-des-couverts.arvalis-infos.fr

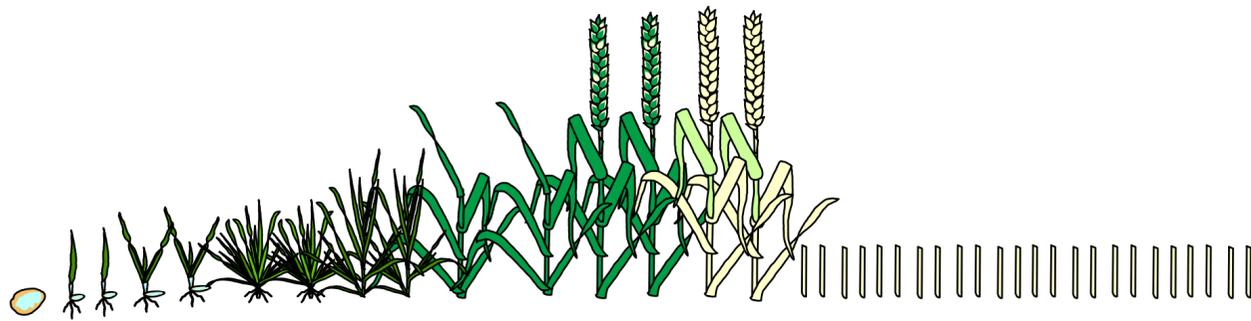
**Choix des
couverts**

En quelques clics, faites votre choix parmi plus de 200 espèces pures ou associations !



Des stratégies de semis diversifiées

De nombreuses techniques et dates de semis



Semis avec ou dans la jeune culture



Semis à la volée avant récolte



Semis direct après moisson



Semis retardé



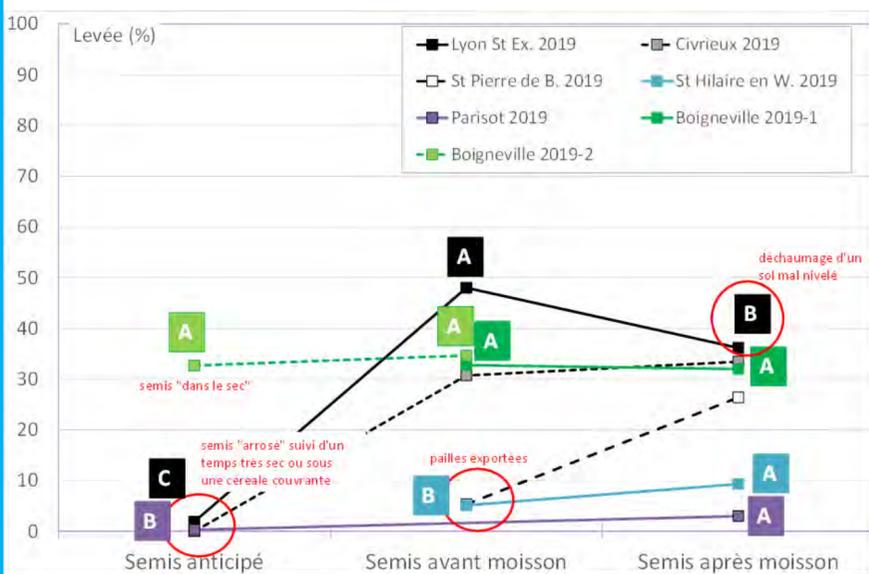
+ Humidité du sol, Semis anticipé
- Désherbage, Accès à la lumière

+ Humidité du sol, Semis précoce
- Gestion du semis, Grenaison

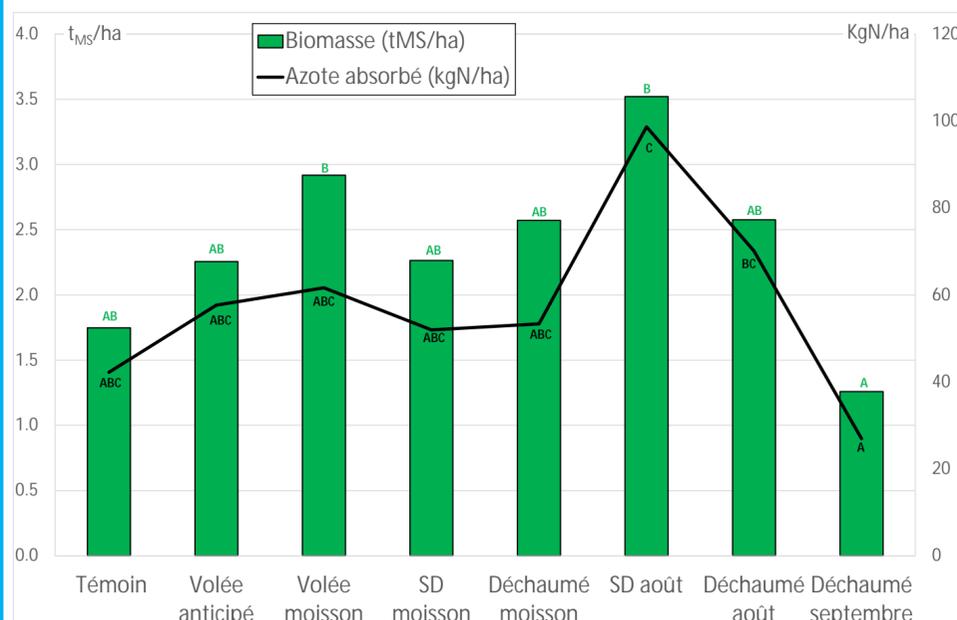
+ Humidité du sol, Semis précoce
- Gestion des pailles, Grenaison

+ Semis facilité, Levée après les étés secs
- Semis tardif, Humidité du sol

Semis à la volée avant récolte



- Des levées proches de celles obtenues après moisson, avec des espèces adaptées (crucifères, lin, sarrasin, phacélie, sorgho, moha, niger, trèfles)
- Contexte hydrique important : ne pas exporter les pailles, risque augmenté de dessèchement des plantules en semis anticipé avant récolte



Semis après récolte

Semis direct avec semoir à disques :
Semis rapide après moisson
Contact sol-graines parfois limité



Semis direct avec semoir à dents fines :
Semis rapide après moisson
Contact sol-graines amélioré / disques



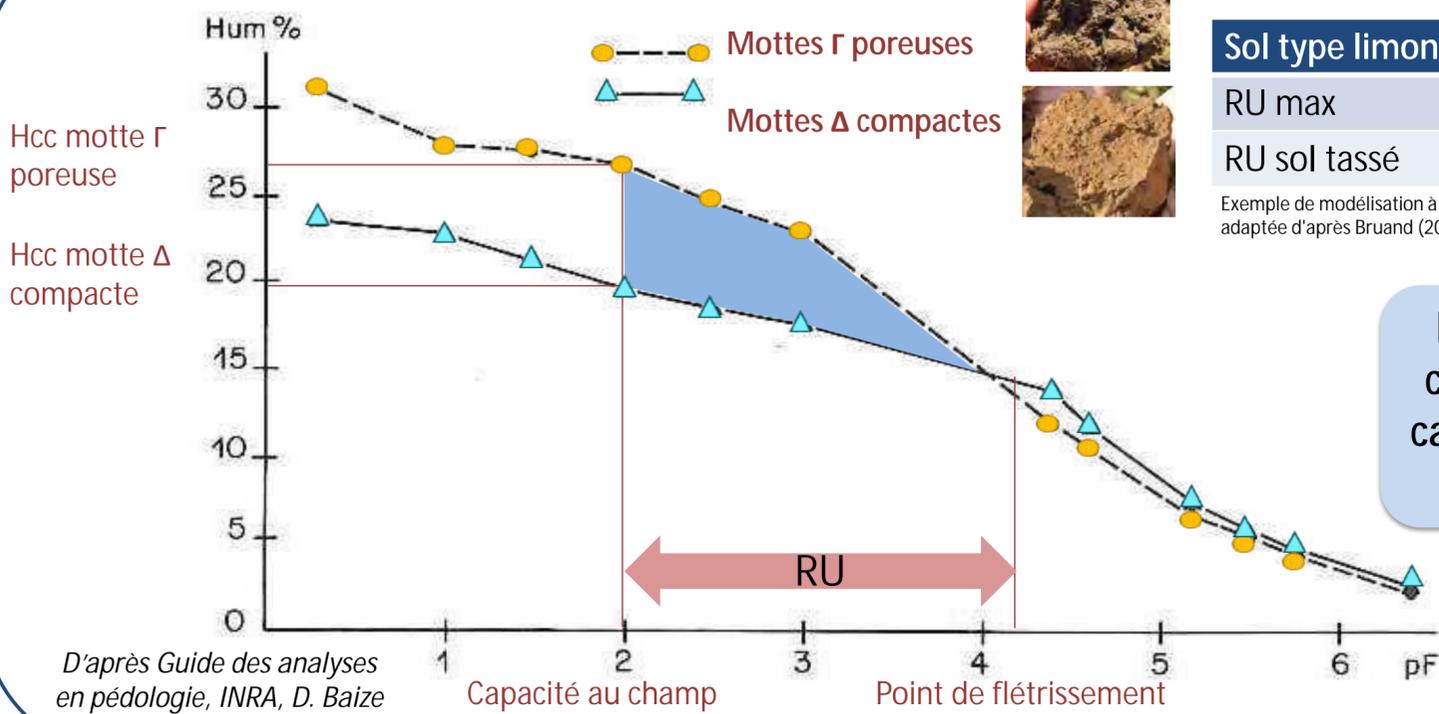
Semoir traditionnel sur sol déchaumé :
Polyvalence mais semis coûteux



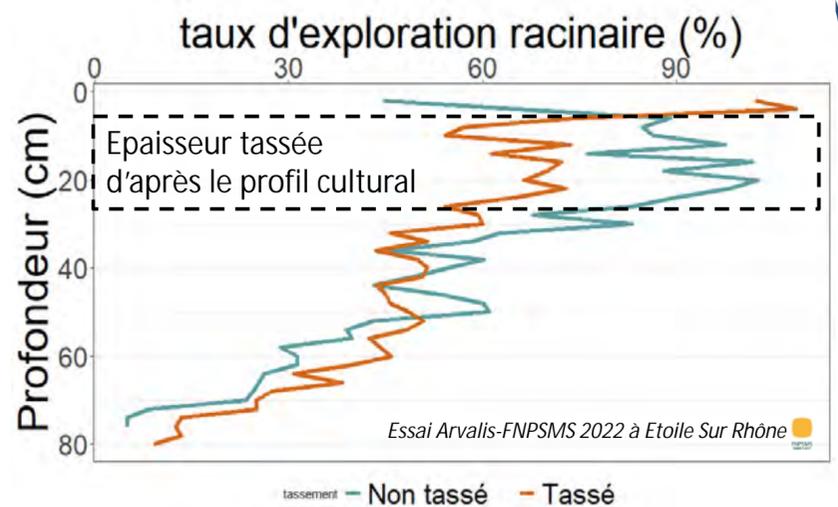
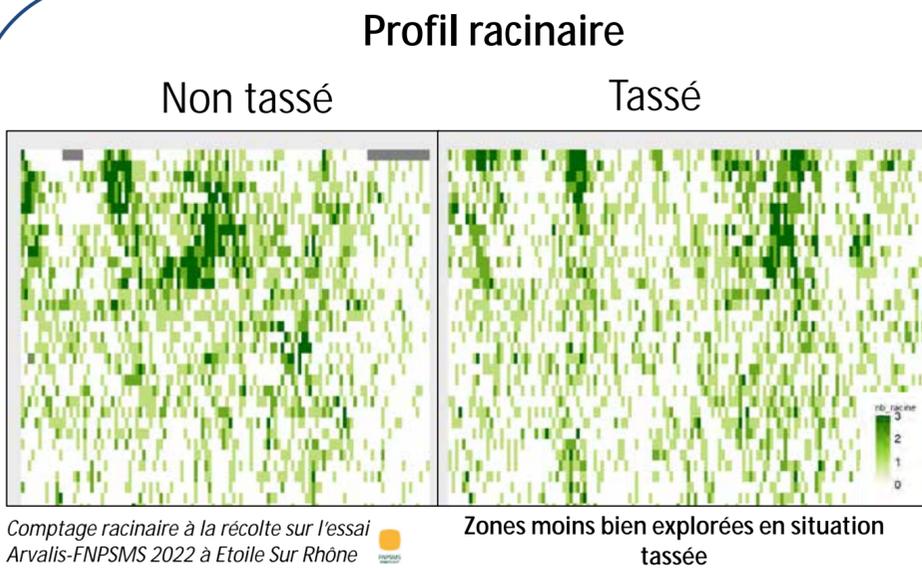
Semis à la volée sur sol déchaumé :
Bon résultats en cas de pluies
Privilégier le recouvrement des semences (sauf petites graines type trèfle) et le rappui du sol



Sur le réservoir utile



Sur l'enracinement



Le tassement freine l'enracinement : moindre volume exploré, profondeur maximale d'enracinement limitée (maïs) ou atteinte plus tardivement (blé)

Sur la production

Culture	Pertes de rendement indicatives
Blé	Limitées, sauf excès d'eau ou sécheresse
Maïs	Eviter en priorité une rupture de densité entre deux horizons
- Ensilage	30 à 35%
- Grain&Semence	15 à 25%
Luzerne	10 % à 30% sous les roues; 1 à 3% à l'échelle de la parcelle (selon la taille du matériel)
Pomme de Terre	30 % sous les passages de roues 5 à 15% à l'échelle de la parcelle



Plus le cycle de la culture est court, plus l'impact du tassement est important

Blé, maïs grain, maïs semence: Essais Arvalis à Boigneville (91), La Jaillière (44) et Montesquieu Lauragais (31). Maïs semence : essais Arvalis-FNPSMS à Etoile sur Rhône. Pomme de Terre: essai Sol-D'Phy. Luzerne: Beaudoin et Thiébaud, 2007; INRAE – Fourrages.

Mais aussi :

Surconsommation de carburant, moindre efficacité des engrais, émissions de gaz à effet de serre, moindre infiltration donc risque d'inondations et de ruissellement, etc.

Faut-il restructurer ? Avec quel outil ?

1 Diagnostiquer pour décider d'une intervention

Test bêche



Profil cultural



2 Raisonner en fonction de la culture suivante

		Culture à venir	
		Sensible (maïs, orge de printemps, pois)	Peu sensible (blé)
Tassement	Modéré ou en cours de restructuration	OUI	NON
	Sévère	OUI	Sol hydromorphe : OUI Sol sain : NON

3 Choisir l'outil en fonction de la profondeur de l'accident

Profondeur de tassement	Surface "nivelée"	Surface "défoncée"
0 - 10 cm	Travail superficiel : <i>chisels et cultivateurs</i>	Travail superficiel ou labour : <i>chisels et cultivateurs, charrue</i>
10 - 20 cm	Travail profond, pseudo-labour ou labour : <i>chisels, cultivateurs lourds ou mixtes, décompacteurs, charrue</i>	Labour : <i>charrue</i>
20 - 30 cm	Labour ou décompactage : <i>charrue, décompacteur</i>	Labour : <i>charrue</i>
> 30 cm	Régénération mécanique très coûteuse à faciliter régénération naturelle par mise en place d'une culture de service à enracinement profond présent au moins 1 à 2 ans (ex : luzerne). Si surface défoncée, prévoir labour avant implantation couvert.	

A quel moment intervenir ?

Humidité (%)	Type de sol			
Argileux				
Limono-argileux				
Limono-sableux				
Comportement de la terre	Elle est modelable et colle aux mains	Elle s'émiette en collant et forme des boulettes	Elle s'émiette sans coller et donne de la terre fine	Elle est difficile à briser et donne peu de terre fine
Consistance	PLASTIQUE	SEMI-PLASTIQUE	FRIABLE	DURE
Décompactage	Déconseillé		SITUATION OPTIMALE	Déconseillé

Passage d'outils en consistance **FRIABLE**



En mauvaises conditions, un décompactage peut avoir un effet négatif !

Comment choisir son décompacteur ?

Dent oblique ✓

Dent droite ✓

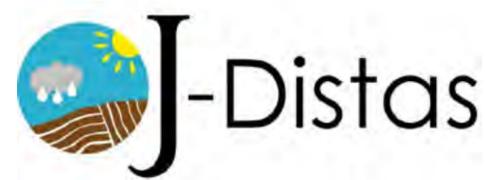
Dent incurvée ✗

Critères recherchés :

- Maximiser le volume restructuré
- Meilleure homogénéité possible
- Planéité du sol après passage
- Le moins de mottes en surface possible
- Pas/peu de mélange des horizons



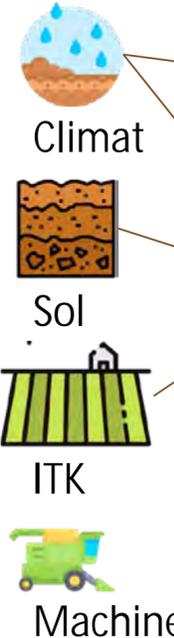
J-DISTAS : Outil de calcul des jours disponibles



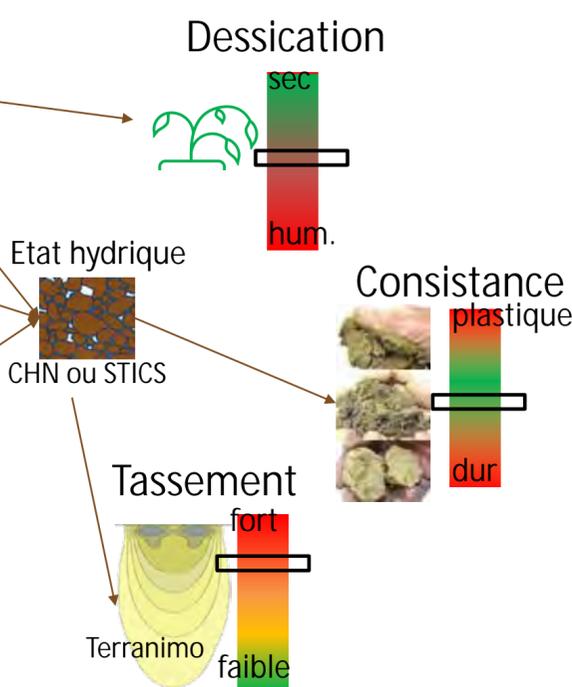
un nouvel outil pour prendre en compte la fertilité physique dans ses choix stratégiques

Fonctionnement de l'outil:

Données d'entrée



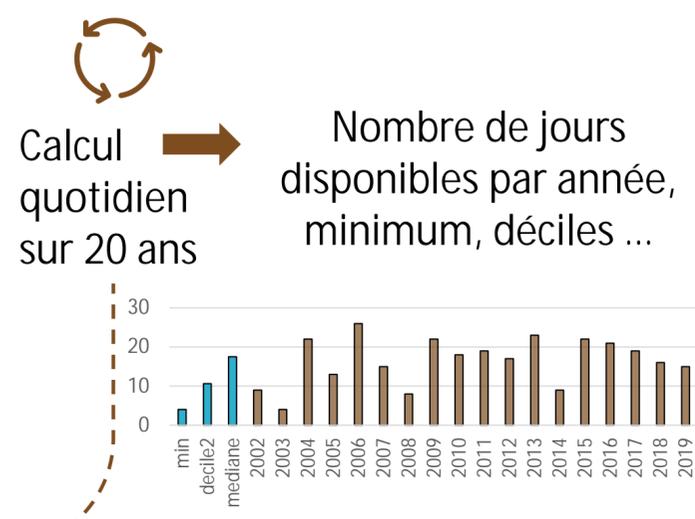
Calcul des niveaux d'aptitude



Disponibilité du jour



Synthèse des résultats



Fonctionne pour les opérations de préparation du lit de semence, semis, désherbage mécanique, récolte de maïs et de betterave, destruction de couverts.

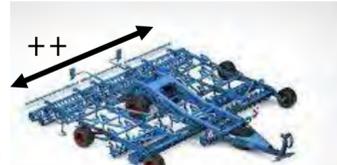
Application sur un cas concret : l'achat d'un déchaumeur

Cas d'étude : ferme expérimentale d'UniLaSalle Beauvais, 40 ha de couvert à détruire entre le 1^{er} et le 10 novembre. 5h de traction / jour

Option A: 4m

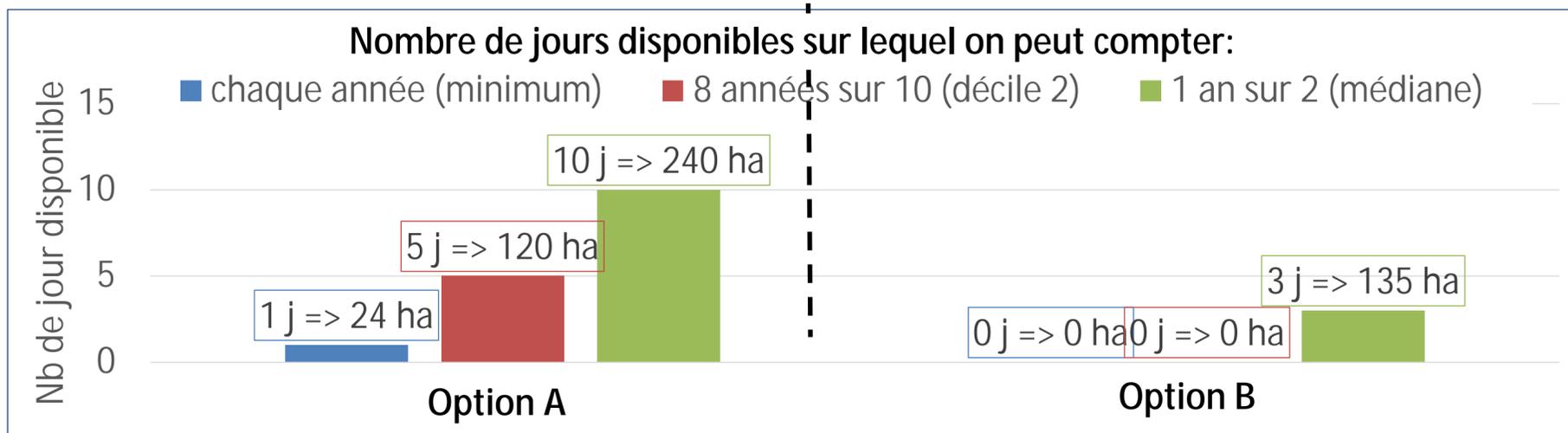


4,8 ha/h
190 cv suffisent
6,2 t sur l'essieu arrière



Option B: 6m

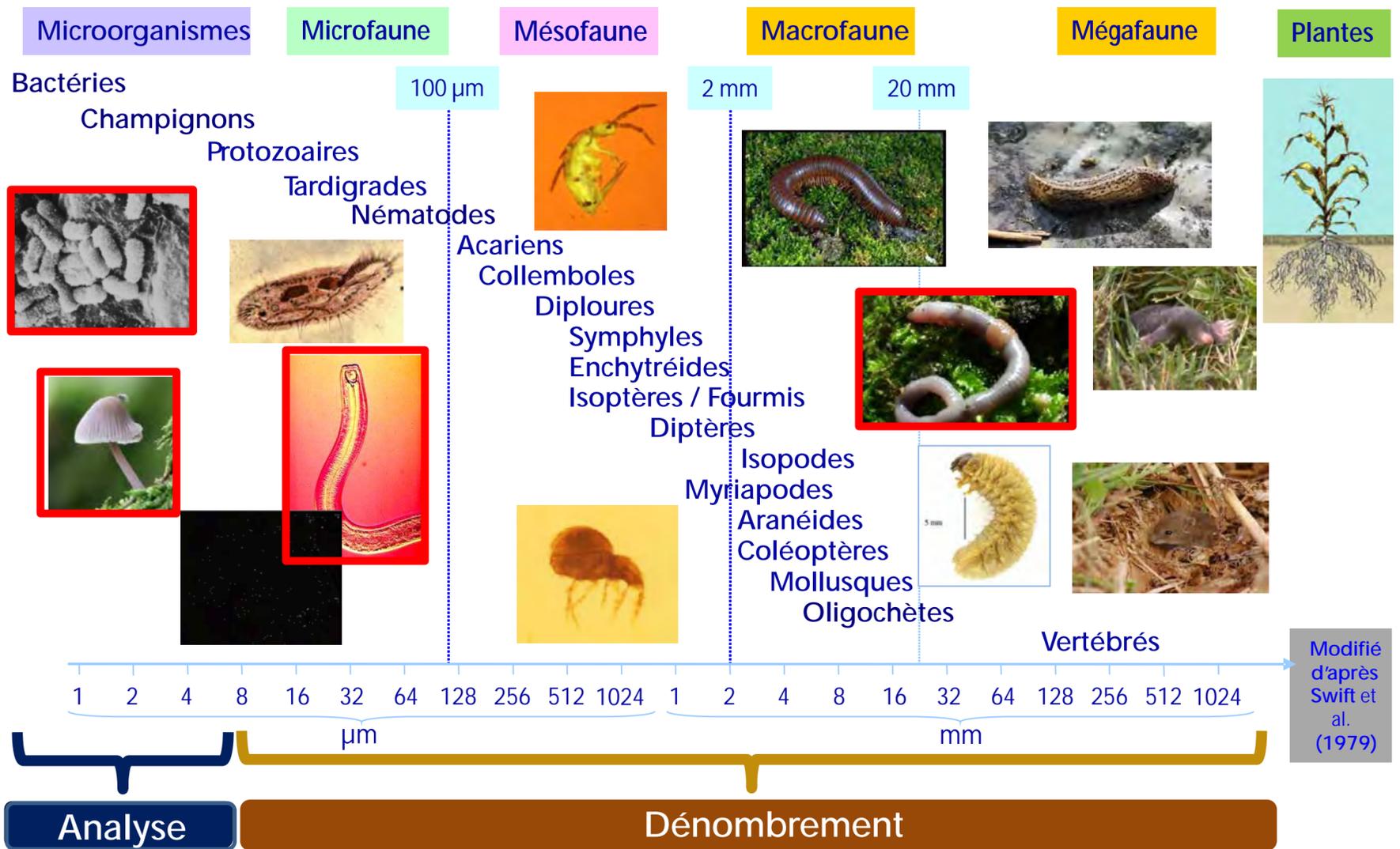
9 ha/h
245 cv nécessaires
8,3 t sur l'essieu arrière



Dans cette situation, le déchaumeur en 4m est plus adapté : il requiert moins de puissance, donc un tracteur plus léger qui génère moins de tassement et pourra entrer plus souvent dans la parcelle.

Fonctionnement biologique du sol : comment l'évaluer ?

Un écosystème diversifié



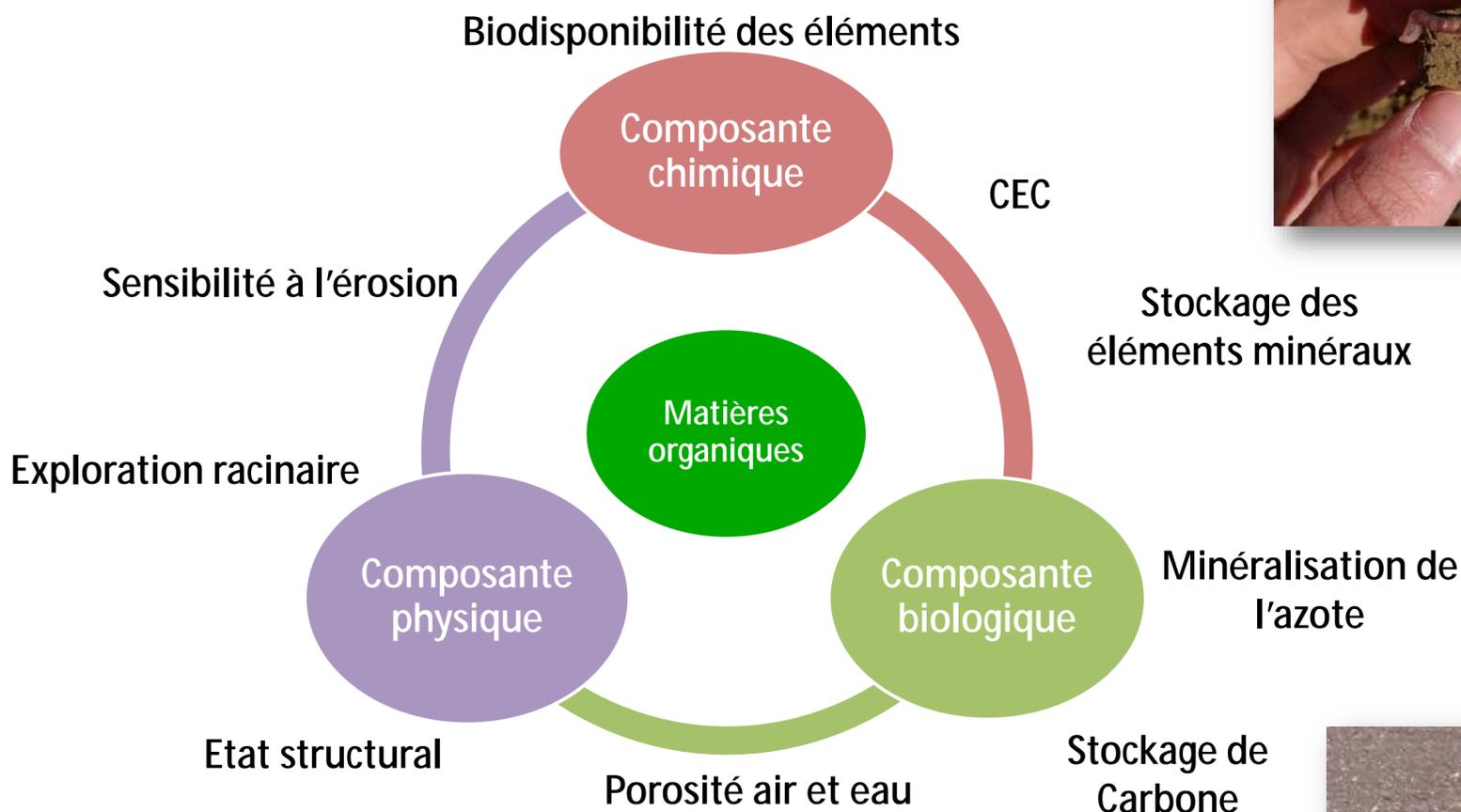
Des nouvelles méthodes d'analyse et de quantification

	Type d'indicateur	Méthode	Niveau de maturité
Statut organique	Qualité de la matière organique	• Fractionnement granulométrique de la matière organique	Méthode normalisée, référentiels laboratoires
		• Carbone microbien par fumigation- extraction	Méthode normalisée, référentiels laboratoires
		• Carbone oxydable au KMnO4	Référencement en cours
		• Azote Biologiquement Minéralisable	Référencement en cours
		• Azote Potentiellement Minéralisable	Référencement en cours
Abondance	Abondance microbienne	• ADN microbien total	Plusieurs méthodes existantes, dont INRAE Dijon, avec référentiel RMQS
		• Abondance relative des champignons (ADNr 18S) et des bactéries (ADNr 16S) (ratio F/B)	Plusieurs méthodes existantes, dont INRAE Dijon, avec référentiel RMQS
	Abondance et diversité des vers de terre, carabidés et collemboles	Identification par analyse morphologique	Méthode normalisée (prélèvement) Référentiels des chercheurs
		Diversité moléculaire de la faune du sol	Pas encore abouti
Abondance et diversité des nématodes	Identification par analyse morphologique	Méthode normalisée Référentiel ELISOL	
Activité	Activité microbienne	Activités enzymatiques (N, C, P, S)	Méthode normalisée Plusieurs laboratoires dont INRAE UMR Ecosys avec référentiel INRAE/RMQS
Diversité	Diversité des bactéries et champignons	Diversité taxonomique par séquençage ADN haut débit	Méthode INRAE Dijon avec référentiel RMQS



Evaluer la fertilité de son sol, et plus !

Pourquoi est-ce important ?



Comment l'évaluer :

Critères	Tests et indicateurs	Avantages	Inconvénients
Disponibilité et teneur en éléments minéraux	Analyse de sol : pH, CEC, teneurs PK, MO...	Mesure standardisée et précise	Délais
Abondance, diversité et activité microbienne	Analyse de sol : Corg, Coxydé, ABM, B-GLU...	Mesure standardisée	Référencement en cours pour lier à des fonctions
Etat structural	Profil cultural	Observation directe de tous les horizons prospectés	Difficulté de mise en place et mesure destructive
	Profil 3D	Simple de mise en œuvre	Hz superficiel
	Test bêche (ISARA)	Simple de mise en œuvre	Hz superficiel
	Pénétromètre : Résistance à la pénétration (kPa)	Très Rapide Extrapolation d'observations peu répétables	Très sensible à l'humidité Mesure indirecte de la structure
Infiltrométrie	Beerkan test : Vitesse d'infiltration	Simple et peu destructeur	Texture dépendant Long dans certains sols (>1h)
Sensibilité à la battance	Slake test : stabilité structurale	Simple, rapide et peu destructeur	Dépendant de la texture



Prélèvement à la tarière



Profil cultural



Beerkan test



Pénétromètre

Fertilité

aptitude d'un sol à produire durablement sous un climat et pour un système de culture

Qualité

aptitude d'un sol à remplir ses fonctions pour permettre la production, maintenir la qualité de l'eau et de l'air et soutenir la santé humaine

Diagnostic sol : interprétation des nouveaux indicateurs

Que traduisent ces indicateurs sur le fonctionnement du sol ?

- ü Référencement des indicateurs de microbiologie des sols
- ü Recherche d'indicateurs répétables, réactifs dans le temps et pertinents pour du conseil



Lien indicateur / fonction	
Relation forte	
Relation faible à moyenne	
Lien non identifié	

Indicateurs du menu Microbioterre	Recyclage des nutriments		Transformation du carbone			Structure du sol		
	Fourniture N	Perte N	Transformation MO	Minéralisation MO (CO2)	Augmentation MO	Erosion Battance	Porosité	Stockage eau
C org								
Carbone labile KMnO4								
Statut organique Fractionnement granulométrique de la MO	C 0-50 µm							
	C 50-200 µm							
	C 200-2000 µm							
	N 0-50 µm							
	N 50-200 µm							
	N 50-2000 µm							
N total								
ABM (mg/kg)								
Abondance	Carbone microbien (biomasse microbienne)							
	ADNr 18S (biomasse fongique)							
Activité	Activité enzymatique : LAP							
	Activité enzymatique : ARYLN							
	Activité enzymatique : Protéase							
	Activité enzymatique : B-Glu (nmol/min/g)							

Pilote ARVALIS Institut du végétal

Partenaires techniques financés UniLaSalle Terre & Sciences, ITAB Institut Technique de l'Agriculture Biologique, auréa Agrosciences, 60 000 Terres Inovia Expérimentation et Innovation, INRAE

Partenaires techniques non financés Sous-traitants Celesta Lab, RITMO, Université de Lorraine, SEMSE

Comment passer des indicateurs à un diagnostic et à un conseil ?

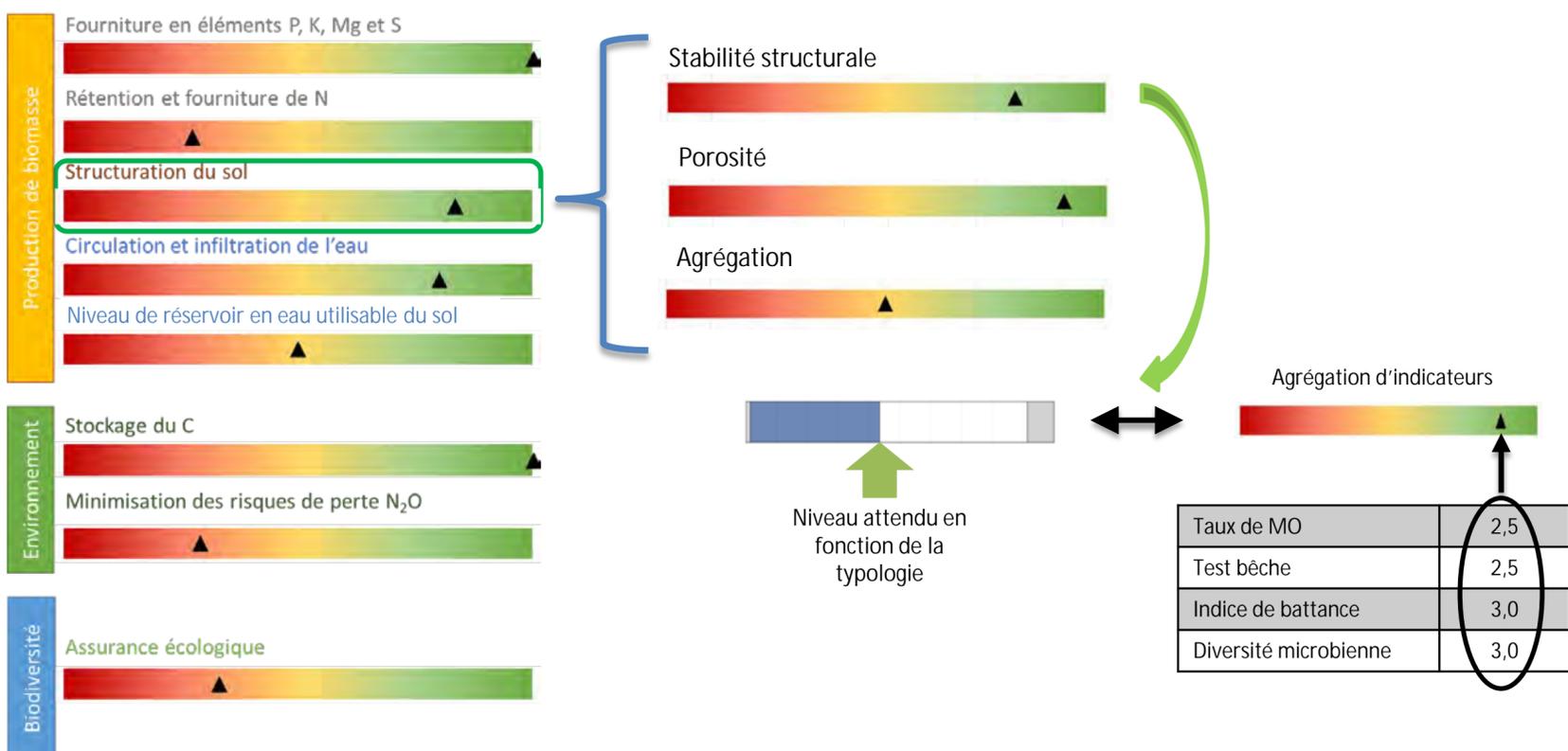
Exemple de la démarche d'interprétation Agro-Eco Sol



1- Définition d'une typologie des systèmes de culture et du pédoclimat



2- Diagnostic de satisfaction des fonctions et processus d'après les indicateurs



3- Conseil, avec déclenchement de leviers

