



RAPPORT

Recensement et analyse des outils de raisonnement dynamique et de pilotage de la fertilisation azotée

Ministère de l'agriculture,
de l'agroalimentaire et de
la forêt



CLIENT

RAISON SOCIALE	Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt DGPE/SCPE/SDPE
COORDONNÉES	3 rue Barbet de Jouy – FR 75349 Paris 07 SP Tel : 01 49 55 49 55
INTERLOCUTEUR <i>(nom et coordonnées)</i>	Mathieu DOURTHE Chargé de mission nitrates Bureau Eau, Sols et Economie Circulaire Tél : 0 1 49 55 54 19 E-Mail : mathieu.dourthe@agriculture.gouv.fr

SCE

COORDONNÉES	4, rue René VIVIANI - CS 26220 44262 NANTES Cedex 2 Tél. 02.51.17.29.29 - Fax 02.51.17.29.29 – E-mail : sce@sce.fr
INTERLOCUTEUR <i>(nom et coordonnées)</i>	Monsieur Christophe BUYS Tél. 02.51.17.28.78 E-mail : christophe.buys@sce.fr

RAPPORT

TITRE	Recensement et analyse des outils de raisonnement dynamique et de pilotage de la fertilisation azotée
NOMBRE DE PAGES	81

SOMMAIRE

Résumé	5
1. Contexte et objectifs de la mission.....	5
1.1. contexte.....	5
1.2. Objectifs	6
2. Cycle et principaux déterminants de l'utilisation de l'azote par les cultures	7
2.1. Facteurs influençant la disponibilité de l'azote pour les cultures	7
2.2. L'ajustement de la fertilisation azotée en cours de campagne, une stratégie parmi d'autres pour la gestion de l'azote	9
2.3. La méthode du bilan prévisionnel : Outil principal pour gérer la fertilisation azotée, mais qui présente des incertitudes.....	10
3. Les différents types d'outils d'aide au calcul de l'équilibre de la fertilisation azotée et leurs fonctions	11
3.1. Outil de calcul dose prévisionnelle.....	11
3.2. Outil de raisonnement dynamique ou de pilotage	11
3.2.1. Ajustement du poste « azote absorbé » à l'ouverture du bilan	12
3.2.2. Ajustement d'une date d'apport de fertilisant azoté	12
3.2.3. Ajustement d'une dose d'azote en cours de végétation.....	12
3.2.4. Spatialisation d'une dose d'azote en fonction de l'hétérogénéité du parcellaire	13
4. Recensement et caractéristiques des outils de raisonnement dynamique et de pilotage de la fertilisation azotée	14
4.1. Les outils basés sur une mesure du stock d'azote disponible dans le sol	14
4.1.1. Principe général	14
4.1.2. Les outils existants	14
4.1.3. Les outils en cours de développement	16
4.2. Les outils basés sur une mesure du végétal	16
4.2.1. Outils basés sur la résistance physique du couvert végétal.....	16
4.2.1.1. Principe général.....	16
4.2.1.2. Les outils existants	16
4.2.2. Indicateur de croissance.....	17
4.2.3. Changement de couleur par rapport à un témoin.....	17
4.2.3.1. Principe général.....	17
4.2.3.2. Fiches outils.....	17
4.2.4. Concentration de la teneur en nitrate du jus de pétiole ou de base de tige.....	20
4.2.4.1. Principe général.....	20
4.2.4.2. Fiches outils.....	20
4.2.5. La concentration en chlorophylle des feuilles par la mesure de la lumière transmise à travers la feuille (transmittance)	28
4.2.5.1. Principe général.....	28
4.2.5.2. Fiches outils.....	28
4.2.6. Concentration en chlorophylle et absorbance UV par les polyphénols des feuilles (Fluorescence)	34

4.2.6.1.	Principe général.....	34
4.2.6.2.	Fiches outils.....	34
4.2.7.	Concentration en chlorophylle par la mesure de la réflexion de la lumière par la biomasse aérienne (ou canopée) (réflectance).....	37
4.2.7.1.	Principe général.....	37
4.2.7.2.	Fiches outils.....	37
4.3.	Les outils de raisonnement dynamique de la fertilisation	58
4.3.1.	Principe général	58
4.3.2.	Les outils existants	58
5.	Synthèse des outils recensés	63
5.1.	Caractéristiques	63
5.2.	Analyse transversale des essais de calibration et de validation des outils recensés.....	66
6.	Pistes de réflexion pour une méthode d'évaluation.....	68
6.1.	Propositions de critères d'évaluation	68
6.1.1.	Les critères d'évaluation de l'efficacité de la fertilisation	68
6.1.1.1.	Le rendement	68
6.1.1.2.	La qualité	69
6.1.1.3.	La marge brute	69
6.1.1.4.	L'efficacité de l'utilisation de l'azote	69
6.1.2.	Les critères d'évaluation environnementaux	70
6.1.2.1.	Qualité des eaux.....	71
6.1.2.2.	Qualité de l'air.....	73
6.1.2.3.	Evaluation des pertes par modélisation	74
6.1.2.4.	Indicateur simple, le complément à 100 du CAU	75
6.1.3.	Les critères proposés.....	75
6.2.	Les approches d'évaluation possibles	76
6.2.1.	Recommandations opérationnelles pour la mise en place d'une méthode d'évaluation	76
6.2.2.	Comparaison dose recommandée à une dose optimale	76
6.2.3.	Evaluation des conséquences de l'application de la dose recommandée sur différents critères	78
6.3.	Synthèse des pistes d'évaluation.....	78
7.	Conclusion et perspectives	79

Résumé

Il existe différentes stratégies pour gérer l'azote dans un système cultural, soit en évitant les pertes par des successions culturales et interculturelles appropriées, soit en intégrant des légumineuses dans la rotation pour capter l'azote atmosphérique, soit en raisonnant la fertilisation d'une culture en apportant la bonne dose d'engrais au bon moment et au bon endroit.

En France, le raisonnement de la fertilisation azotée est basé historiquement sur le calcul de la dose d'azote à apporter pour couvrir les besoins d'une culture. Pour cela, les exploitants agricoles peuvent s'appuyer sur les outils de calcul de la dose prévisionnelle, mais cette méthode présente un certain nombre d'incertitudes liées notamment aux conditions pédoclimatiques changeantes d'une année sur l'autre. Ces incertitudes peuvent être compensées en partie par l'utilisation d'outils de raisonnement dynamique et de pilotage de la fertilisation azotée en cours de végétation.

Pour cela, il existe une multitude d'outils basés sur différents principes (mesure du stock d'azote disponible dans le sol, mesure sur le végétal, raisonnement dynamique) et capables de remplir une ou plusieurs fonctions (estimation du poste « azote absorbé » à l'ouverture du bilan, pilotage d'une date d'apport, pilotage d'une dose d'apport, spatialisation de la dose en fonction de l'hétérogénéité du parcellaire). Ces outils présentent une grande variabilité dans leur principe de fonctionnement, dans les fonctions qu'ils remplissent, dans les règles de décisions associées, dans leur déploiement.

Les outils recensés dans le cadre de cette étude ont été conçus pour améliorer l'efficacité de la fertilisation azotée. Une validation éventuelle de ces outils avec pour double objectif « amélioration de l'efficacité de la fertilisation et réduction de l'impact sur l'environnement » devra se baser sur une évaluation de l'application d'une dose recommandée par l'outil sur différents critères (rendement, qualité environnement) par rapport à une dose calculée par la méthode du bilan prévisionnel.

1. Contexte et objectifs de la mission

1.1. contexte

Une nutrition azotée limitante des plantes impacte généralement¹ le niveau de production et de qualité de la culture. À l'inverse, les excès d'apports d'engrais azotés par rapport aux besoins de la culture entraînent une diminution de l'efficacité de l'utilisation de l'azote. En plus d'être une source de gaspillage, ces excès sont des sources de pollution pour l'environnement (eau et air).

L'équilibre de la fertilisation azotée, un élément clé du 5^{ème} programme d'actions

Afin de réduire la pollution des eaux provoquée ou induite par les nitrates à partir de sources agricoles et de prévenir toute nouvelle pollution de ce type, la directive 91/676/CEE dite directive « nitrates » demande aux États membres de définir des programmes d'actions d'application obligatoire en zone vulnérable.

Dans son 5^{ème} programme d'actions nitrates, la France privilégie, pour la limitation de l'utilisation de fertilisants organiques et minéraux, **une approche agronomique**, tenant compte des besoins en azote des cultures, des différents apports (notamment par le sol) et pertes d'azote.

¹ Selon la période du cycle d'apparition de la carence azotée, le rendement n'est pas forcément impacté. Pour la culture du blé, par exemple, une carence précoce (en l'absence de maladie et de stress hydrique) n'handicape pas le rendement (cf. Jeuffroy et Bouchard, 1999).

Pour garantir cet équilibre de fertilisation, **le programme d'actions national impose d'estimer la dose prévisionnelle d'azote à apporter par le calcul de l'équilibre prévisionnel de la fertilisation azotée pour tout îlot cultural** situé en zone vulnérable.

De plus, le programme d'actions national n'autorise le dépassement de la dose prévisionnelle estimée que lorsque celui-ci est justifié par l'utilisation d'un outil de raisonnement dynamique ou de pilotage de la fertilisation en cours de végétation, par une quantité d'azote exportée supérieure au prévisionnel ou en cas d'accident cultural postérieur au calcul de la dose prévisionnelle.

Les outils d'aide à la décision relatifs aux apports de fertilisants azotés peuvent être classés en deux grandes catégories :

- **le calcul de la dose prévisionnelle** encadré par des référentiels régionaux arrêtés par les préfets de régions. Cette règle ne vise pas à imposer l'utilisation des références et paramètres de calcul de l'arrêté « référentiel », mais de s'assurer de la cohérence avec la méthode générale de calcul fixée à l'échelon national. Le groupe national d'appui aux GREN², sous conventionnement du MAAF³, réalise depuis 2013 un travail visant à construire un cadre de validation de ces outils ;
- **les outils de raisonnement dynamique et de pilotage de la fertilisation azotée en cours de campagne** permettant d'ajuster la dose définie par calcul prévisionnel, dont l'utilisation est recommandée dans le cadre du programme d'actions national. Cette présente étude vise à avancer les réflexions sur ces outils afin de construire un cadre de validation.

Une étude également prévue dans le cadre du Plan d'Actions pour la compétitivité des filières céréalières

Les outils de raisonnement dynamique et de pilotage de la fertilisation azotée en cours de végétation constituent une piste d'avenir très intéressante pour améliorer les performances économiques et environnementales des exploitations. C'est pourquoi, dans le cadre du plan d'actions pour la compétitivité des filières céréalières, le MAAF s'est engagé à soutenir la diffusion des outils les plus performants.

1.2. Objectifs

Les objectifs de cette étude sont :

- Objectif principal : Le recensement et la caractérisation des différents outils de raisonnement dynamique et de pilotage de la fertilisation azotée en cours de végétation ;
- Objectif secondaire : proposer des pistes de réflexion pour la mise en place d'une méthode d'évaluation de ces outils.

² Groupes Régionaux d'Expertise Nitrate

³ Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt

2. Cycle et principaux déterminants de l'utilisation de l'azote par les cultures

2.1. Facteurs influençant la disponibilité de l'azote pour les cultures

Le stock d'azote minéral présent dans le sol d'une parcelle cultivée résulte de la différence entre :

■ **les flux d'azote alimentant ce stock :**

- la minéralisation des matières organiques constituées par l'humus, les résidus de culture, les produits résiduels organiques et la biomasse microbienne du sol,
- la fixation biologique symbiotique des légumineuses et des bactéries fixatrices libres du diazote (N_2) de l'air,
- les dépôts atmosphériques,
- les apports d'azote minéral des engrais de synthèse et fertilisants organiques (fumier, lisier, boues, ...);

■ **et les flux diminuant ce stock :**

- l'absorption par les cultures,
- la réorganisation de l'azote minéral,
- les pertes par volatilisation de l'azote ammoniacal,
- les pertes sous formes gazeuses (NO , N_2O , N_2) au cours des processus de dénitrification,
- la lixiviation (lessivage) du nitrate.

Chaque processus alimentant ou diminuant le stock d'azote est influencé par plusieurs facteurs, faisant varier leur importance au niveau du cycle :

- les caractéristiques du sol (Structure, composition, ...),
- le climat,
- les pratiques culturales.

Le schéma suivant synthétise ces différents flux :

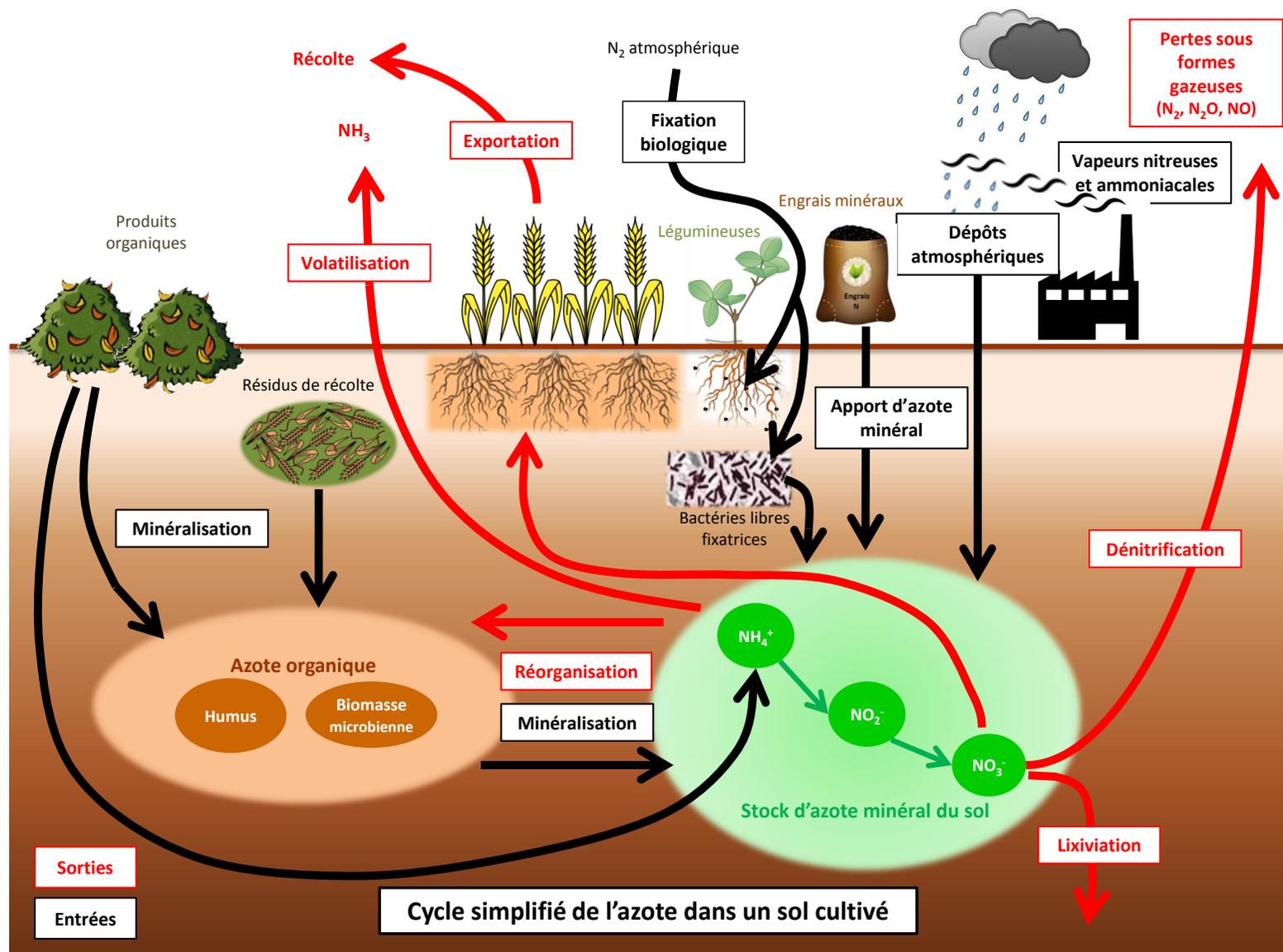


Figure 1 : Cycle simplifié de l'azote, inspiré du schéma de Mariotti, 1996

Au-delà des facteurs influençant les contributions liées au sol, l'efficacité des apports d'engrais peut varier.

Sous une culture annuelle, la disponibilité de l'azote de l'engrais dans le sol diminue très rapidement après l'application et est influencée par plusieurs facteurs :

- **l'absorption par la culture** qui dépend de la cinétique de croissance au moment de l'apport, du stade cultural et de l'état végétatif de la plante ;
- **l'absorption par la flore adventice** qui dépend de la nature et de la densité de flore adventice présente au moment de l'apport ;
- **l'organisation** (immobilisation) qui est la conversion par les micro-organismes de l'azote minéral en azote organique. L'organisation se produit simultanément à la minéralisation (processus inverse). En général, la minéralisation de l'azote l'emporte sur son organisation. Toutefois, une immobilisation nette de l'azote est susceptible de se produire quand le rapport C/N de la matière organique décomposable atteint un certain seuil, ce qui cause une demande élevée en azote de la part des micro-organismes décomposeurs ;
- **les pertes par volatilisation** qui dépendent de différents facteurs agissant en interaction :
 - les conditions climatiques au moment de l'apport (température, vent, humidité, ...),
 - la nature physique et chimique de l'engrais minéral,
 - les caractéristiques du sol au moment de l'apport (pH, Humidité, ...),
 - le mode d'apport (en surface, localisation dans le sol) ;
- **la lixiviation** qui dépend de différents facteurs :
 - la caractéristique des sols et notamment leur capacité de rétention en eau,
 - les conditions climatiques qui précèdent et qui suivent l'apport.

2.2. L'ajustement de la fertilisation azotée en cours de campagne, une stratégie parmi d'autres pour la gestion de l'azote

Il existe différentes stratégies pour bien gérer l'azote dans les sols et dans les systèmes de culture :

- limiter les pertes d'azote :
 - gérer les successions culturales pour capter l'azote disponible (bon enracinement au moment des périodes favorables à la minéralisation, ou pour utiliser l'effet précédent),
 - gérer les intercultures pour recycler l'azote du sol,
 - éviter les apports d'engrais organiques et minéraux en mauvaises conditions,
 - ... ;
- raisonner la fertilisation azotée pour trouver le bon équilibre entre besoin et fourniture d'azote :
 - calculer une dose prévisionnelle,
 - fractionner les apports d'azote,
 - ajuster les doses de fractionnement à l'aide de mesure en cours de campagne.

Les outils de raisonnement dynamique et de pilotage de la fertilisation azotée en cours de campagne ne représentent donc qu'une partie des actions possibles pour bien gérer l'azote dans le système sol/culture d'une exploitation.

2.3. La méthode du bilan prévisionnel : Outil principal pour gérer la fertilisation azotée, mais qui présente des incertitudes

Dans le cadre du programme d'actions national, l'estimation de la dose prévisionnelle de fertilisation azotée par la méthode des bilans est obligatoire sur tous les îlots culturaux situés en zone vulnérable.

La méthode générale de calcul est basée sur la méthode développée par le COMIFER, puis cette méthode est déclinée à l'échelon régional et fixée par un arrêté préfectoral qui rappelle :

- la méthode générale,
- les paramètres de calcul nécessaires fixés sur la base des propositions émises par les groupes régionaux d'expertise « nitrates », afin de tenir compte des particularités agro-pédo-climatiques propres à chaque région.

La méthode générale consiste à calculer la quantité d'engrais à apporter en comparant les besoins de la culture aux fournitures. Il existe différentes versions permettant de calculer le bilan prévisionnel, l'équation suivante est la version proposée par le COMIFER :

$$X = (b \cdot Y - P_i + R_f) - (R_i + M_{hs} + M_{ha} + M_{hp} + (M_r \text{ ou } M_{rci}))$$

- X : Quantité d'engrais azoté (minéral et/ou organique) nécessaire
- b : azote absorbé par unité de rendement
- Y : Rendement objectif de la culture
- P_i : Quantité d'azote absorbé par la culture à l'ouverture du bilan
- R_f : Quantité d'azote minéral dans le sol à la fermeture du bilan
- R_i : Quantité d'azote minéral dans le sol à l'ouverture du bilan
- M_{hs} : contribution de l'humus du sol
- M_{ha} : fournitures d'azote par les amendements organiques des années précédentes
- M_{hp} : Minéralisation nette due à un retournement de prairie
- M_r ou M_{rci} : Minéralisation nette de résidus de récolte ou des CIPAN après destruction

Malgré les nombreuses références collectées depuis de nombreuses années et dans la plupart des conditions pédo-climatiques françaises, les valeurs des différents postes de la méthode du bilan restent incertaines notamment :

- l'estimation du rendement objectif,
- l'estimation des fournitures du sol (M_{hs}, M_{ha}, M_{hp}, M_r ou M_{rci}) car la minéralisation dépend de plusieurs facteurs qui peuvent différer d'une parcelle à l'autre (type de sol, taux de matière organique, historique de la parcelle, ..) et d'une année à l'autre (climat).

L'utilisation de mesures collectées en cours de saison peut potentiellement permettre de réduire ces incertitudes.

3. Les différents types d'outils d'aide au calcul de l'équilibre de la fertilisation azotée et leurs fonctions

Avant d'aller plus loin dans ce rapport, il est nécessaire de rappeler la définition des différents outils permettant de calculer la dose d'azote à apporter pour une culture donnée dans une situation bien précise. En effet, la frontière entre un outil de pilotage dynamique de la fertilisation azotée et un outil d'aide au calcul prévisionnel n'est pas toujours très nette.

■ Qu'est-ce qu'un outil d'aide à la décision ?

D'une manière générale, un outil d'aide à la décision est l'ensemble des techniques permettant à une personne donnée d'opter pour la meilleure prise de décision possible.

Cette étude traite des outils d'aide à la décision de la fertilisation azotée, soit l'ensemble des démarches d'aide au raisonnement des doses d'azote et de leurs dates d'apport, en tenant compte d'une mesure du milieu.

L'ensemble de la démarche comprend donc :

- une mesure (qu'elle soit réalisée par un instrument ou non),
- les règles de décisions explicites associées à cette mesure,
- l'ensemble des processus permettant de transmettre la préconisation.

3.1. Outil de calcul dose prévisionnelle

Dans le cadre de cette étude, on entend par **Outil d'aide au calcul de la dose prévisionnelle d'azote**, la combinaison d'une grille de calcul / d'un moteur de calcul (version papier / informatique) et d'un paramétrage permettant de calculer la dose prévisionnelle d'azote à apporter pour atteindre un rendement objectif d'une production végétale en année moyenne.

3.2. Outil de raisonnement dynamique ou de pilotage

Les outils de raisonnement en cours de végétation peuvent utiliser deux stratégies différentes :

- le **pilotage en cours de végétation**, c'est-à-dire l'ajustement d'une dose selon une mesure du milieu (disponibilité de l'azote dans le sol) ou de la culture (état de nutrition azotée de la plante, par exemple),
- ou le **bilan dynamique**, c'est-à-dire la mise à jour des différentes variables d'entrée du calcul d'un bilan (préalablement calculé sur des conditions moyennes pluriannuelles) avec les conditions de l'année.

Il est donc délicat de proposer une définition unique pour ces types d'outils. Dans le cadre de cette étude, on entend par **Outil de raisonnement dynamique ou de pilotage de la fertilisation azotée**, toute démarche instrumentée (méthodes et règles de décision explicites) visant l'ajustement de la fertilisation azotée (dose et fractionnement) aux conditions locales de la parcelle, et qui permet d'atteindre au moins un des deux objectifs suivants :

- renseigner une ou des variables d'entrée du bilan dynamique d'azote,
- diagnostiquer et prévoir l'évolution à court terme de l'état de nutrition azotée du peuplement cultivé.

Ces objectifs nécessitent la mise en œuvre de mesures ponctuelles associées à un plan d'échantillonnage adapté, ou des mesures spatialisées permises par des capteurs positionnés sur des vecteurs roulants ou aéroportés.

Selon cette définition, les différents outils recensés peuvent remplir une ou plusieurs des fonctions suivantes :

- ajustement du poste « azote absorbé » à l'ouverture du bilan,
- ajustement d'une date d'apport de fertilisant azoté,
- ajustement d'une dose d'azote en cours de végétation,
- spatialisation d'une dose d'azote en fonction de l'hétérogénéité du parcellaire.

3.2.1. Ajustement du poste « azote absorbé » à l'ouverture du bilan

Les outils permettant l'ajustement du poste « azote absorbé » à l'ouverture du bilan, regroupent toute démarche instrumentée permettant de renseigner la variable « Quantité d'azote absorbé par la culture à l'ouverture du bilan » (P_i , dans l'équation du COMIFER).

Comme énoncé précédemment, la frontière entre un outil de calcul de dose prévisionnelle et un outil de pilotage dynamique de la fertilisation azotée n'est pas toujours très nette. Cette fonctionnalité « *ajustement du poste « azote absorbé » à l'ouverture du bilan* » est une bonne illustration de ce fait.

Pour autant, cette fonctionnalité est l'une des plus importantes en termes de surfaces pilotées et de développement d'outil.

La plupart des outils fonctionnant sur le principe de la réflectance remplissent cette fonction. Mais, il en existe d'autres, basés sur d'autres mesures comme la pesée de biomasse fraîche, ou le traitement numérique de photographies, ou d'observations, comme par exemple, la réglette azote, Image IT, ...

3.2.2. Ajustement d'une date d'apport de fertilisant azoté

Les outils permettant l'ajustement d'une date d'apport regroupent toute démarche visant à optimiser le déclenchement d'un apport de fertilisant azoté au plus proche des besoins de la culture.

La bande double densité (ou bande Limaux) est l'exemple le plus connu de pilotage d'une date d'apport, mais d'autres outils permettent de « décaler » l'apport prévu si la culture est suffisamment pourvue au moment de la mesure.

3.2.3. Ajustement d'une dose d'azote en cours de végétation

Les outils permettant l'ajustement d'une dose en cours de végétation, regroupent toute démarche instrumentée (méthodes et règles de décision explicites) permettant de diagnostiquer et prévoir l'évolution à court terme de l'état de nutrition azotée du peuplement cultivé.

La plupart des outils recensés dans cette étude sont des outils d'ajustement d'une dose en cours de végétation.

3.2.4. Spatialisation d'une dose d'azote en fonction de l'hétérogénéité du parcellaire

Les outils de spatialisation d'une dose d'azote en fonction de l'hétérogénéité du parcellaire regroupent toute démarche instrumentée (méthodes et règles de décision explicites) permettant de mesurer un indice de végétation et de spatialiser une dose d'azote en fonction de l'hétérogénéité du parcellaire.

Ces objectifs nécessitent la mise en œuvre de mesures spatialisées permises par des capteurs positionnés sur des vecteurs roulants ou aéroportés.

NB : Si le nombre d'échantillons est suffisamment important, tous les outils, y compris les outils de mesure ponctuelle, peuvent permettre de spatialiser une dose d'azote. Dans le cadre de cette étude, seuls les outils permettant la modulation au cours d'une même mesure ou du résultat de l'interprétation de différentes données cartographiques (sols, carte de rendement, ...), seront considérés comme outils de spatialisation d'une dose.

4. Recensement et caractéristiques des outils de raisonnement dynamique et de pilotage de la fertilisation azotée

Le chapitre suivant recense, par principe de fonctionnement, les principaux outils développés en France.

Si ce recensement se veut le plus complet possible, il n'est pas exhaustif et évoluera en fonction de l'apparition de nouveaux outils et de l'abandon d'anciens outils.

L'objectif de cette partie est de caractériser en priorité les outils permettant de piloter la fertilisation azotée en cours de campagne existants. C'est pourquoi, les outils en cours de développement, non commercialisés en France, ou ne permettant que d'estimer le poste « azote absorbé » à l'ouverture du bilan, ne font pas l'objet de fiche.

4.1. Les outils basés sur une mesure du stock d'azote disponible dans le sol

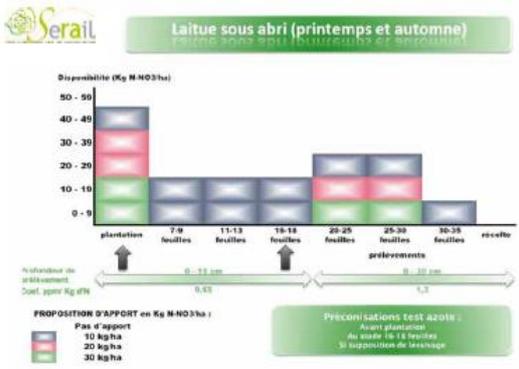
4.1.1. Principe général

Le principe général repose sur la disponibilité en azote du sol et les besoins de la culture en fonction de son stade.

La disponibilité en azote du sol est estimée à partir d'analyse de reliquats d'azote prélevés à des moments clés de la culture ou de capteur de la concentration en temps réel de l'azote dans le sol. La dose d'azote prévisionnelle est ensuite ajustée selon une grille de décision basée sur la culture, son stade, son potentiel de rendement et le fractionnement éventuel de sa fertilisation.

4.1.2. Les outils existants

Le seul outil basé sur ce principe recensé dans le cadre de cette étude a été développé par la SERAIL et le CTIFL pour le pilotage de certaines espèces légumières. La fiche suivante synthétise les principales caractéristiques de cet outil.

			
Représentant légal	SERAIL		
Concepteur(s)	Etape		Intervenant
	Conception de la méthode		CTIFL / SERAIL
Caractéristiques techniques			
Nature de l'indicateur	Disponibilité en azote du sol		
Mode de fonctionnement	<p>Cette méthode est basée sur la disponibilité en azote du sol et les besoins de la plante en fonction de son stade phénologique.</p>		
	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;">  <p>PROPOSITION D'APPORT en Kg NNO3/ha :</p> <ul style="list-style-type: none"> Pas d'apport 10 kg/ha 20 kg/ha 30 kg/ha <p>Préconisations test azote :</p> <ul style="list-style-type: none"> avant plantation au stade 15-18 feuilles si disponibilité de levainage </div> <div style="width: 50%;"> <p>Elle consiste à mesurer la concentration en azote du sol à un stade clé de la culture et selon le résultat et une grille de décision prédéfinie, préconise une dose d'azote à apporter pour atteindre la prochaine mesure ou la récolte.</p> </div> </div>		
Cultures gérées	Ail d'automne, Aubergine, Blette, Cardon, Céleri branche, Céleri rave, Chicorée d'été, Chou cabus, courgette de plein champ, Laitue, Melon, Oignon, Poireau, Tomate sous abri.		
Pilotage d'une date	Oui (selon le résultat de la mesure, l'apport peut être décalé)		
Pilotage d'une dose	Culture	Stade(s)	
	Cultures gérées	En fonction des grilles de décision	
Outil de calcul de dose prévisionnelle	Oui		
Outil d'aide à la modulation intra parcellaire	Non		
Utilisateurs cibles	Techniciens et Producteurs		
Préconisations d'utilisation	NC		
Autres champs d'actions couverts	Non		

4.1.3. Les outils en cours de développement

Au moins un autre outil basé sur ce principe est en cours de développement :

Le projet Innoperf-Blé, du fonds unique interministériel (FUI), porté par AgroNutrition et Agri-Intranet et développé en collaboration avec Sirea, LAAS-CNRS et l'INRA, est en cours pour piloter le blé dur et le blé tendre (puis d'autres grandes cultures).

Le principe est basé sur :

- la mesure en temps réel de la concentration en azote dans le sol par des capteurs situés à plusieurs profondeurs et placé à des endroits représentatifs de la parcelle, d'une part,
- une amélioration mesurée de l'efficacité de la fertilisation azotée grâce à des compléments nutritionnels foliaires, d'autre part.

4.2. Les outils basés sur une mesure du végétal

4.2.1. Outils basés sur la résistance physique du couvert végétal

4.2.1.1.Principe général

Le principe général est d'estimer la densité du couvert végétal d'une culture en mesurant sa résistance physique.

4.2.1.2.Les outils existants

Le seul outil recensé basé sur ce principe n'est pas développé en France, mais en Allemagne, il s'agit du CROP-Meter®.



Le CROP-Meter® est constitué d'un pendule passant dans le couvert végétal relié à un potentiomètre qui mesure l'angle d'inclinaison de ce pendule. La mesure de l'angle est corrélée à la densité de biomasse du couvert végétal.

Le CROP-Meter® permet donc d'estimer les différences de densité d'une végétation. C'est avant tout un outil de modulation intraparcellaire.

Figure 2 : CROP-Meter® ; Source CLAAS

4.2.2. Indicateur de croissance

L'indicateur de croissance est utilisé en colza pour estimer la quantité d'azote absorbé à l'ouverture du bilan.

Plus le colza est développé, plus il a absorbé de l'azote, inversement, un petit colza aura absorbé peu d'azote.

La mesure peut se faire :

- par pesée de biomasse,
- par estimation visuelle,
- par une analyse numérique d'une photographie de la parcelle (exemple : Image IT développé par YARA)
- par réflectance, sur une longueur d'onde permettant une estimation de la biomasse (exemple : Farmstar, Cérélia, Agro-Rendement, N-Pilot, mes dron'im@ges, technologie Airinov, ...).

La **réglette azote** développée par Terre Inovia (ex CETIOM) est basée sur ce principe.

Elle fonctionne selon la méthode du bilan, en précisant le poste « azote absorbé » à l'entrée du bilan (Pi) en fonction de la masse de colza d'une parcelle à la reprise de végétation (ou à la différence de masse entre l'entrée et la sortie de l'hiver) et ajuste l'azote nécessaire pour atteindre l'objectif de rendement fixé.

4.2.3. Changement de couleur par rapport à un témoin

4.2.3.1.Principe général

Le principe est basé sur la comparaison de deux situations azotées différentes au sein d'une même parcelle. Cette comparaison peut porter sur :

- la mise en place d'une bande avec une densité de culture plus importante pour induire une demande en azote plus forte et plus précoce, et identifier plus finement le moment où le premier apport d'azote doit être réalisé (cas de la bande double densité),
- la mise en place d'une bande fertilisée au semis, puis de sa comparaison avec le reste de la parcelle, une différence de couleur indique une situation de carence azotée pour le reste de la parcelle, et permet ainsi de décider si la fertilisation est nécessaire, la quantité d'azote à apporter est fonction du stade d'apparition de la différence (cas de l'Héliotest sur tournesol).

4.2.3.2.Fiches outils

Deux outils sont basés sur ce principe :

- La bande double densité sur blé,
- L'Héliotest sur tournesol.

<h1>Bande double densité</h1>		 Source Arvalis	
Représentant légal	NC		
Concepteur(s)	Etape	Intervenant	
	Mise au point	F. LIMAUX (Chambre Régionale d'Agriculture de Lorraine)	
Caractéristiques techniques			
Nature de l'indicateur	Changement de couleur / témoin		
Mode de fonctionnement	L'objectif de la méthode est de détecter le plus tôt possible, le moment où le premier apport d'azote doit être réalisé sur la culture du blé. Avant le stade « épi 1cm », la demande en azote d'une céréale est faible, et souvent, les fournitures du sol suffisent à les couvrir. Le principe consiste à doubler la densité de blé sur une bande qui consommera plus d'azote et plus tôt que le reste de la parcelle. La différence de couleur s'observe à partir de la fin janvier et permet d'anticiper l'apport sur le reste du champ.		
Cultures pilotées	Blé		
Pilotage d'une date	Oui		
Pilotage d'une dose	Culture	Stade(s)	
	Blé	Non	
Outil de calcul de dose prévisionnelle	Non		
Outil d'aide à la modulation intra parcellaire	Non		
Utilisateurs cibles	Agriculteurs		
Préconisations d'utilisation	Bien positionner la bande et avec une densité suffisante.		
Autres champs d'actions couverts	Non		
Caractéristiques économiques			
Année de sortie	2001		
Prix de vente	0 €		
Déploiement en 2015	Surface pilotée	Nombre d'utilisateurs	
	NC	NC	
Méthode d'évaluation et de calibration de l'outil			
Protocole expérimental	Les essais sont des comparaisons entre deux modalités de fertilisation. L'une basée sur la méthode des bilans avec le calcul d'une dose X et un fractionnement établi selon les recommandations « locales », et l'autre modalité avec la même dose X, mais avec des règles de déclenchement du premier apport basé sur la décoloration de la bande double densité par rapport au reste de la parcelle.		
Analyse des résultats	NC		

HELIOTEST® Terres Inovia			
Représentant légal	Terres Inovia (ex CETIOM)		
Concepteur(s)	Etape	Intervenant	
	Ensemble du développement		Terres Inovia
Caractéristiques techniques			
Nature de l'indicateur	Changement de couleur / témoin		
Mode de fonctionnement	<p>L'objectif de la méthode est de détecter une éventuelle carence en azote de la culture du tournesol en appliquant 60 à 80 unités d'azote au semis sur une bande de la parcelle.</p> <p>A partir du stade « 6 feuilles » et avant le stade « 14 feuilles », la constatation d'une différence visuelle entre la bande fertilisée et le reste de la parcelle, peut conduire à déclencher un apport d'azote dont la dose dépend de l'objectif de rendement, et du stade auquel cette différence apparaît (de 0 à 100 kg N/ha).</p>		
Cultures pilotées	Tournesol		
Pilotage d'une date	Oui		
Pilotage d'une dose	Culture	Stade(s)	
	Tournesol	De « 6 feuilles » à « 14 feuilles » (généralement 1 seul apport en tournesol)	
Outil de calcul de dose prévisionnelle	Oui		
Outil d'aide à la modulation intra-parcellaire	Non (sauf si le positionnement de la bande azotée permet d'appréhender tout ou partie de la variabilité intra-parcellaire)		
Utilisateurs cibles	Agriculteurs		
Préconisations d'utilisation	<p>Par rapport à l'itinéraire commun où la fertilisation azotée est réalisée au semis, l'utilisation de l'Héliotest implique un épandage en végétation (si nécessaire).</p> <p>En plus du fait que le Tournesol n'est généralement pas une culture très pilotée, la contrainte principale est la réalisation de la bande azotée au semis qui oblige quand même à utiliser l'épandeur au semis.</p>		
Autres champs d'actions couverts	Non		
Caractéristiques économiques			
Année de sortie	2002		
Prix de vente	10 € l'outil		
Déploiement en 2015	Surface pilotée	Nombre d'utilisateurs	
	NC (mais très peu d'utilisation)	NC	

Méthode d'évaluation et de calibration de l'outil	
Protocole expérimental	<p>Les essais ayant permis de valider le concept de la bande double densité.</p> <p>Le développement de la méthode a été réalisé en essais en bandes avec différentes modalités (0 azote, azote au semis, 1 ou 2 modalités d'azote en végétation) de 2000 à 2003 sur 115 dispositifs dans les régions productrices de tournesol (Sud-Ouest, Centre Poitou-Charentes et Rhône-Alpes), pour tester la pertinence de l'indicateur visuel.</p> <p>Les critères mesurés :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Le rendement et la teneur en huile • L'azote absorbé au stade « 12 feuilles » <p>Puis l'outil a été validé :</p> <p>Validation relative : différence de rendement et de marge brute (en prenant plusieurs hypothèses de prix de production et d'azote)</p> <p>Validation absolue pour juger de la pertinence de l'utilisation de l'outil par rapport à l'optimum (a posteriori)</p>
Analyse des résultats	NC

4.2.4. Concentration de la teneur en nitrate du jus de pétiole ou de base de tige

4.2.4.1. Principe général

Le principe est basé sur l'évolution du stock d'ions nitrate présents dans le jus de base de tige ou de pétiole au cours de la croissance de la culture.

Le jus de base de tige ou de pétiole est un extrait aqueux des tissus constitutifs de ces organes (cytoplasme, vacuole, sève). Il ne s'agit donc pas d'une mesure de sève, ou d'une mesure d'un flux d'absorption, mais d'une mesure d'un stock d'ions nitrate, résultant du fonctionnement de la plante dans les jours précédant la mesure.

En début de cycle (par exemple au tallage pour le blé), la croissance est faible, et la plante absorbe généralement plus d'azote qu'elle n'en assimile. Elle se constitue un **stock d'azote nitrique**, en particulier dans la base de la tige.

Puis, au fur et à mesure que la plante croît, sa capacité d'assimilation d'azote augmente. La teneur en nitrate du jus de base de tige va diminuer si l'absorption de l'azote par la plante (conditionnée par le stock d'azote disponible dans le sol) est plus faible que la demande en azote (assimilation) nécessaire pour sa croissance.

La mesure de l'état du stock d'ion, permet donc de pronostiquer à court terme l'installation d'une déficience en azote, et selon des grilles de décision, d'établir un conseil de fertilisation pour éviter les carences.

4.2.4.2. Fiches outils

Trois outils sont basés sur ce principe :

- Jubil®
- Ramses® / Ramses II®
- PILAzo®

JUBIL® INRA / Arvalis institut du végétal		
Représentant légal	INRA / Arvalis institut du végétal	
Concepteur(s)	Etape	Intervenant
	Conception de la méthode	Thèse cofinancée par l'INRA et ITCF (Arvalis Institut du végétal)
	Conception matérielle de l'outil	Arvalis Institut du végétal, INRA et Challenge Agriculture
	Distribution de l'outil	Challenge Agriculture (Nitrachek) et Agro-Systèmes (Aurea) (RQFlex)
Caractéristiques techniques		
Nature de l'indicateur	Teneur en Nitrate du jus de base de tige	
Mode de fonctionnement	<p>La méthode JUBIL® consiste à associer l'estimation de nutrition azotée de la culture grâce à la mesure de la teneur en nitrate du jus (JU) de base de tige, à la méthode du bilan (BIL) prévisionnel.</p> <p><u>Pour le blé tendre</u> : (blés biscuitiers, blés panifiables supérieur et courants, blé à autres usages) : la méthode JUBIL® (optimisation du rendement) se déroule en 4 étapes :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Calcul de la dose X à apporter à l'aide de la méthode du bilan prévisionnel (à l'aide d'un autre outil) • Apport de la dose prévue avec une mise en réserve de 40 uN • Mesure de la teneur en nitrate du jus de base de tige au stade « 1 nœud », puis, en fonction du résultat, mesure au stade « 2 nœuds » et éventuellement au stade « dernière feuille pointante » • Apport d'azote complémentaire, si la teneur en nitrate du jus de base de tige est inférieure ou égale au seuil d'intervention fixé. Une grille d'interprétation basée sur la mesure de nitrate du JBT, la densité de plantes en sortie d'hiver, le groupe variétal et le type de sol (craie ou hors craie) permet d'estimer la dose à apporter (entre 0 – 40 – 60 ou 80 uN). <p>La méthode JUBIL® PROTEINES, est une déclinaison de la méthode pour mieux satisfaire des objectifs de teneur en protéines. La méthode comporte un seuil supplémentaire (seuil impasse protéines) ; les doses préconisées sont légèrement supérieures et les déclenchements plus tardifs.</p> <p><u>Pour le blé dur</u> :</p> <p>Seule la variété LLOYD est « pilotable » et seulement dans le centre de la France. La sécheresse en début de montaison, assez fréquente dans le sud, perturbe l'absorption des premiers apports et fausse la mesure. La méthode est identique, à la différence qu'il n'y a pas de mise en réserve, la mesure s'effectue au stade « dernière feuille ligulée », et les doses recommandées sont 0-40-70 ou 90 uN, selon la concentration en nitrate mesurée.</p> <p><u>Pour l'orge brassicole de printemps</u> :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Calcul de la dose X à apporter à l'aide de la méthode du bilan prévisionnel • Apport de la dose prévue (sans mise en réserve) • Mesure de la teneur en nitrate du jus de base de tige au stade « 1 nœud » • Apport d'azote complémentaire (0 -30 ou 50 uN), si la teneur en nitrate du jus de base de tige est inférieure ou égal au seuil d'intervention fixé. 	

MINISTERE DE L'AGRICULTURE DE L'AGROALIMENTAIRE ET DE LA FORET
 RECENSEMENT ET ANALYSE DES OUTILS DE RAISONNEMENT DYNAMIQUE ET DE
 PILOTAGE DE LA FERTILISATION AZOTEE

	<p><u>Pour le maïs</u>, l'outil permet le pilotage si l'apport tardif (floraison) est possible, sinon c'est un outil de diagnostic :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Calcul de la dose X à apporter à l'aide de la méthode du bilan prévisionnel • Apport de la dose prévue avec une mise en réserve de 50 uN • Mesure de la teneur en nitrate du jus de base de tige entre le stade « 15 feuilles » et le stade « floraison femelle » • Apport d'azote complémentaire (0 ou 50 uN), selon mesure et précocité de la variété <p><u>Pour la pomme de terre</u>, l'outil permet le pilotage de la fertilisation azotée des pommes de terre irriguées sur 9 variétés:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Calcul de la dose X à apporter à l'aide de la méthode du bilan prévisionnel • Apport de la dose prévue avec une mise en réserve de 40 uN • Mesure de la teneur en nitrate du jus de pétiole entre 40 et 60 jours après la levée (ou 30 à 50 jours selon les variétés) • Apport d'azote complémentaire (0 ou 40 uN), selon la mesure et la variété. 	
Cultures gérées	<ul style="list-style-type: none"> • Blé tendre (blés biscuitiers, blés panifiables supérieur et courants, blés à autres usages) • Blés durs (variété LLOYD) • Orge brassicole de printemps • Maïs grain • Pomme de terre de consommation irriguée (9 variétés) 	
Pilotage d'une date	Oui (selon le nombre de mesures, l'apport peut être décalé)	
Pilotage d'une dose	Culture	Stade(s)
	Blé tendre (BAU, BPS, BPC, BB)	De 1 nœud à Dernière feuille pointante
	Blé dur	Dernière feuille ligulée
	Orge de printemps	1 nœud
	Maïs grain	De 15 feuilles à Floraison femelle
	Pomme de terre	De 40 à 60 jours (ou de 30 à 50 jours selon variétés)
Outil de calcul de dose prévisionnelle	Non, mais s'appuie dessus (complémentaire)	
Outil d'aide à la modulation intra parcellaire	Non	
Utilisateurs cibles	Techniciens et agriculteurs	
Préconisations d'utilisation	<p>Comme pour tous les outils d'aide à la décision dans le respect de leur mode d'emploi (échantillonnage, stade, manipulation, ...).</p> <p>Les conditions climatiques exceptionnelles au printemps, notamment les printemps très secs mettent en défaut la méthode.</p>	
Autres champs d'actions couverts	Non	
Caractéristiques économiques		
Année de sortie	1993	
Prix de vente	Malette + consommable ≈ 400€	
Déploiement en 2015	Surface pilotée	Nombre d'utilisateurs
	NC	NC

Méthode d'évaluation et de calibration de l'outil	
Protocole expérimental	<p>La mise au point de la méthode a été réalisée par une approche expérimentale.</p> <p>En premier lieu, les seuils de décision ont été construits sur la base de la relation entre la teneur en nitrate du JBT et l'Indice de Nutrition Azoté (INN) qui représente l'indicateur de référence. Au bout de 2 à 3 ans d'acquisition simultanée de ces 2 indicateurs, sur des essais avec courbes de réponse à l'azote, des effets de la variété, de la densité de peuplement et du milieu ont été révélés et quantifiés.</p> <p>En second lieu, les seuils ainsi définis ont été testés et validés sur des essais comprenant aussi des courbes de réponse à l'azote, avec au minimum la modalité « pilotage ».</p> <p>Généralement, les essais ont été menés en dispositifs en bloc, factoriel, avec 4 répétitions.</p> <p>Les mesures effectuées sont :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Les critères de rendement : Rendement (ou rendement commercial pour les pomme de terres), les composantes du rendement, la biomasse. • Les critères de qualité : protéines (céréales), calibrage (orge brassicole) • Les critères environnementaux : reliquat post récolte (non systématique) • Autres critères : N absorbé et coefficient d'utilisation des engrais (non systématique) <p>En France, la méthode a été développée sur la base de : 186 essais entre 1995 et 1999 (+ essais de validation interne chaque année), principalement en céréales, distribués sur l'ensemble du territoire métropolitain.</p>
Analyse des résultats	<p>La validation de la méthode a été établie sur la base de la validation statistique de 3 hypothèses :</p> <ul style="list-style-type: none"> • H1 : si valeur du JBT du traitement < seuil de déclenchement, alors N est limitant et le traitement N+ doit démontrer une augmentation de rendement significative (seuil 5%) • H2 : si valeur du JBT du traitement > seuil de déclenchement, alors N est non limitant et le traitement N+ ne doit pas démontrer d'augmentation de rendement (test NS) • H3 : Sur les traitements X-40 pilotés avec le JBT, les performances du traitement doivent être en moyenne \geq au traitement X non piloté sur le critère rendement, dose N et teneur en protéines <p>De plus, sur l'ensemble du référentiel expérimental et analysé par année, le couplage méthode du bilan avec dose N minorée puis pilotage JUBIL doit en fréquence améliorer les performances de la méthode du bilan :</p> <ul style="list-style-type: none"> • en limitant la fréquence de sous fertilisation (perte de rendement), • en limitant la fréquence de sur fertilisation, • en conséquence augmenter la fréquence des fertilisations jugées optimales (déterminées sur la base d'ajustement quadratique et à dire d'expert c'est-à-dire, la dose où le gain de rendement de la dose immédiatement supérieure est < 2 q/ha).

Ramses® / Ramses II® SMAG			
Représentant légal	SMAG (Smart Agriculture)		
Concepteur(s)	Etape	Intervenant	
	développement agronomique	InVivo	
Caractéristiques techniques			
Nature de l'indicateur	Teneur en Nitrate du jus de bas de tige		
Mode de fonctionnement	<p>La méthode estime l'état de nutrition azotée de la culture grâce à la mesure de la teneur en nitrate du jus de base de tige à la montaison.</p> <p>Il existe 2 versions :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ramses® : les mesures sont effectuées à partir du stade 1noeud, tous les 15 jours ou 3 semaines et déclenche (ou retarde) l'apport prévu par la dose prévisionnelle. • Ramses II ® : permet de piloter l'apport de fin de cycle. La fertilisation est réalisée à partir de la dose prévisionnelle avec une mise en réserve de 40 uN. Le diagnostic est réalisé entre 2 nœuds et dernière feuille et préconise une dose (entre 20 et 60uN) en fonction des besoins de la plante 		
Cultures gérées	Céréales d'hiver : Blés, orges, Triticales et Seigles		
Pilotage d'une date	oui		
Pilotage d'une dose	Culture	Stade(s)	
	Céréales d'hiver	De 1 Nœud à Dernière feuille pointante	
Outil de calcul de dose prévisionnelle	Oui		
Outil d'aide à la modulation intra parcellaire	Non		
Utilisateurs cibles	Techniciens		
Préconisations d'utilisation	Comme pour tous les outils d'aide à la décision, les mesures doivent être effectuées dans des conditions relativement « normales ». Les conditions climatiques hors normes au printemps, notamment les printemps très secs mettent en défaut la méthode.		
Autres champs d'actions couverts	Non		
Caractéristiques économiques			
Année de sortie	Ramses® : 1998 / Ramses 2 ® :2004		
Prix de vente	NC		
Déploiement en 2015	Surface pilotée	Nombre d'utilisateurs	
	Environ 100 000 ha	NC	

Méthode d'évaluation et de calibration de l'outil	
Protocole expérimental	<p>Validation de la méthode sur des essais qui ont été menés en dispositifs en bloc, factoriel, avec 4 répétitions.</p> <p>La validation de Ramses 2® a été réalisée sur une période de 2004 à 2010 sur une cinquantaine d'essais avec au moins 3 modalités pour l'apport de fin de cycle (Conseil / 40 unités / Pas d'apport de fin de cycle) permettant de valider ou non la dose préconisée.</p> <p>Les mesures effectuées sont :</p> <ul style="list-style-type: none">les critères de rendement : Rendement, les composantes du rendement (grain/m², PMG, PS), <p>les critères de qualité : protéines</p>
Analyse des résultats	<p>L'analyse des résultats est réalisée sur la moyenne des répétitions, et la règle de décision pour le calage de la dose optimale est la dose où le rendement de la dose immédiatement supérieure de 40 unités ne permet pas le gain de plus de 2 q/ha (sauf si la dose immédiatement supérieure permet de passer le seuil protéine).</p>

			
Représentant légal	Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes		
Concepteur(s)	Etape		Intervenant
	Conception de la méthode		CTIFL et INRA
Caractéristiques techniques			
Nature de l'indicateur	Teneur en nitrates pétiolaire		
Mode de fonctionnement	<p>PILazo® réunit deux outils :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Le bilan azote avant la mise en culture (dérivé de la méthode des bilans appliquée en grandes cultures) • Le test pétiolaire nitrates pour ajuster les fertilisations en cours de culture <p>Le principe est donc de calculer l'azote nécessaire pour couvrir les besoins de la culture jusqu'aux stades où les 1^{er} tests nitrates pétiolaires seront réalisés, par des analyses de reliquats d'azote et une évaluation des fournitures du sol. Puis le pilotage de la fertilisation se fait à l'aide de tests nitrates sur pétioles de jeunes feuilles adultes selon des grilles de décision propres à chaque espèce / variété / créneau de production.</p>		
Cultures gérées	<ul style="list-style-type: none"> • Aubergine • Carotte • Chou-fleur d'hiver • Fraisier production de fruits • Melon • Poivron • Pomme de terre primeur • Tomate • Fraisier : pépinière de plants (en cours de validation) • (Laitue : en construction) • (poireau : en construction) 		
Pilotage d'une date	Oui (selon le résultat de la mesure, l'apport peut être décalé)		
Pilotage d'une dose	Culture	Stade(s)	
	Cultures gérées	En fonction des grilles de décision	
Outil de calcul de dose prévisionnelle	Oui		
Outil d'aide à la modulation intra-parcellaire	Non (Réalisation possible de plusieurs tests au sein de la parcelle en fonction de l'hétérogénéité intra-parcellaire supposée et/ou avérée pour une gestion de l'azote en conséquence)		
Utilisateurs cibles	Techniciens et Producteurs (dans la pratique, l'outil est quasiment toujours utilisé par un technicien)		
Préconisations d'utilisation	Respect du mode d'emploi (échantillonnage, stockage, ...)		
Autres champs d'actions couverts	Non		

Caractéristiques économiques	
Année de sortie	1997
Prix de vente	NC
Déploiement en 2015	Surface pilotée
	Nombre d'utilisateurs
Pas de chiffres précis, son utilisation dépend beaucoup de l'investissement du technicien de terrain	
Méthode d'évaluation et de calibration de l'outil	
Protocole expérimental	<p>Construction de la méthode en 4 étapes :</p> <ul style="list-style-type: none"> Définition de la courbe critique et détermination de la pertinence du test nitrate en tant qu'indicateur (ex : 2 essais successifs à 4 à 5 doses sur 4 à 5 répétitions) Essais en réseau sur les zones de production : mise à l'épreuve des références expérimentales autour d'un protocole commun Test des règles de décisions selon les résultats du test nitrate Rédaction du guide de fertilisation et diffusion des grilles de décision et du mode opératoire de mise en œuvre de la méthode. <p>Les critères mesurés :</p> <ul style="list-style-type: none"> le rendement et la qualité (ex. fraisier : acidité, résistance au choc, taux de sucre, ...ex. laitue : teneur en nitrates des produits à la récolte, pourcentage de matière sèche). La grille est bâtie pour atteindre un optimum de production, en termes de rendement et de qualité (critères selon les productions). Reliquat post récolte : associé aux expérimentations en général ; pas systématique (à titre indicatif). Paramétrage de modèles d'impact environnemental (STICS, Syst'N) : travaux en cours
Analyse des résultats	NC

4.2.5. La concentration en chlorophylle des feuilles par la mesure de la lumière transmise à travers la feuille (transmittance)

4.2.5.1. Principe général

Le principe est basé sur l'estimation de la **teneur en chlorophylle**, très corrélée à la **teneur en azote**, en mesurant la quantité de lumière transmise à travers les feuilles.

Lorsqu'un rayon lumineux atteint une feuille, son énergie peut être :

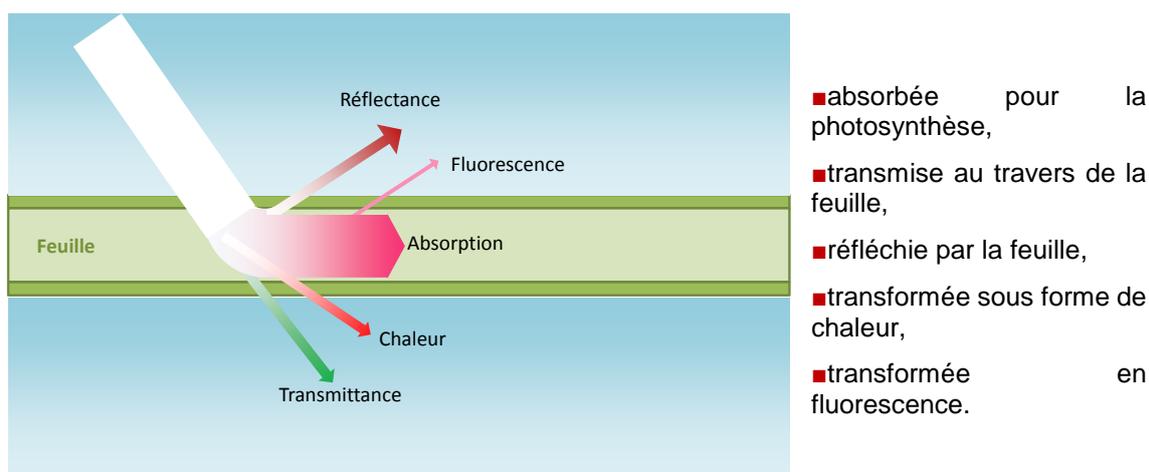


Figure 3 : Schéma du devenir de l'énergie d'un rayon traversant une feuille.

La chlorophylle absorbe, de façon proportionnelle à sa teneur dans la feuille, le rayonnement d'une longueur d'onde bien précise (430nm). Les effets d'absorption non chlorophyllienne liés aux parois cellulaires et à la teneur en eau de la feuille sont corrigés par la mesure d'une deuxième longueur d'onde (750 nm) très peu absorbée par la chlorophylle (Dwyer et al. 1994 ; Waskom et al. 1996 ; Shapiro, 1999).

Chaque outil basé sur ce principe interprète cette mesure selon une grille de décision propre à chaque culture (voire à chaque variété), définie à un stade de développement clé.

4.2.5.2. Fiches outils

Deux outils sont basés sur ce principe :

- N-Tester®
- NS-Digites®

<h2>Méthode Yara N-Tester®</h2> <p>Yara</p>		
Représentant légal	Yara France, Yara International	
Concepteur(s)	Etape	Intervenant
	Chlorophylle-mètre :	Konica-Minolta en partenariat avec Yara International
	Mise au point de la méthode et calibration sur blé, blé dur, blé améliorant, maïs, orge de printemps et pomme de terre :	Pour la France : Yara France en partenariat avec Arvalis-Institut du végétal
Caractéristiques techniques		
Nature de l'indicateur	Transmittance	
Mode de fonctionnement	<p>L'analyse est basée sur l'interprétation de la mesure indirecte de la teneur en Chlorophylle des feuilles. La mesure est étroitement corrélée à l'indice de Nutrition Azotée (INN) du blé (travaux Inra- Arvalis – Yara 1995-1996)</p> <p>Le principe de la méthode se déroule en 3 étapes :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Prévoir : Calcul de la dose prévisionnelle par la méthode des bilans développée par le COMIFER • Fertiliser : apport la dose bilan avec une mise en réserve de 40 uN (sauf pour l'orge de printemps, dose bilan sans minoration) • Diagnostiquer : estimation de l'état de nutrition azotée de la plante (entre 2 nœuds et gonflements) à l'aide de la pince, et ajuster la dose finale en fonction des besoins réels de la plante <p>Le diagnostic est réalisé sur 30 feuilles (étage foliaire ou feuille mesurée dépendant du stade de la culture) sur 3 à 4 répétitions (soit 90 à 120 feuilles) :</p> <ul style="list-style-type: none"> • soit directement par des mesures sur blé tendre d'hiver, Yara, Arvalis et Aurea réalisent annuellement un calage des nouvelles variétés, • soit en interprétant le ratio mesures parcelle / mesures zone étalon (dose bilan +100 à 150 uN) où l'azote n'est pas l'élément limitant sur blé dur, blé améliorant, orge de printemps, pomme de terre, maïs. <p>Les mesures sont ensuite renseignées dans une base de données en ligne (internet, application smartphone, ...) pour accéder au conseil. Cette base de données permet d'assurer une traçabilité de l'utilisation de l'outil, et de fournir des bulletins de conseils adaptés aux conditions de l'année.</p>	
Cultures pilotées	<ul style="list-style-type: none"> • Blé tendre d'hiver • Blé améliorant • Blé dur • Orge d'hiver • Orge de printemps brassicole • Maïs grain • Pomme de terre 	
Pilotage d'une date	Oui (selon le nombre de mesures, l'apport peut être décalé)	

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE DE L'AGROALIMENTAIRE ET DE LA FORÊT
 RECENSEMENT ET ANALYSE DES OUTILS DE RAISONNEMENT DYNAMIQUE ET DE
 PILOTAGE DE LA FERTILISATION AZOTÉE

	Culture	Stade(s)
Pilotage d'une dose	Blé tendre	De 2 Nœuds à Gonflement
	Blé dur, blé améliorant	De 2 Nœuds à Gonflement
	Orge	1 à 2 nœuds
	Pomme de terre (irriguée)	40 à 60 jours après levée (30 à 50 pour chair ferme)
	Maïs grain	Début floraison mâle
Outil de calcul de dose prévisionnelle	Non	
Outil d'aide à la modulation intra parcellaire	Non	
Utilisateurs cibles	Techniciens et agriculteurs	
Préconisations d'utilisation	<p>Comme pour tous les outils d'aide à la décision, les mesures doivent être effectuées dans des conditions relativement « normales ». Les conditions climatiques hors normes au printemps, notamment les printemps très secs mettent en défaut la méthode, des avertissements et notes d'accompagnement sont produites et mises en ligne sur le site web N-Tester par Arvalis pour avertir les utilisateurs en cas de contexte d'utilisation difficile.</p> <p>La mesure N-tester n'est pas uniquement liée à la teneur en azote de la plante, une carence en soufre ou en phosphore peut entraîner des erreurs d'interprétation.</p>	
Autres champs d'actions couverts	Non, mais travaux en cours sur vigne (intensité chlorose ferrique)	
Caractéristiques économiques		
Année de sortie	1997 (1995 en Allemagne)	
Prix de vente	1 710€ HT par appareil	
Déploiement en 2015	Surface pilotée	Nombre d'utilisateurs
	≈ 600 000 ha (99,8% en blé)	≈ 2015 appareils distribués en 2015 en France ≈ 7400 au niveau mondial

Méthode d'évaluation et de calibration de l'outil

<p>Protocole expérimental</p>	<p>Le développement de la méthode a été réalisé par une approche expérimentale courbes de réponse du rendement à 5 à 6 doses d'azote différentes fractionnées en 2 ou 3 apports avec au minimum la modalité « pilotage » (dose X-40 + pilotage). Généralement, les essais ont été menés en dispositifs en bloc, factoriel, avec 4 répétitions.</p> <p>Les mesures effectuées sont :</p> <p>Les critères de rendement : Rendement (ou rendement commercial pour les pommes de terres), les composantes du rendement, la biomasse.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Les critères de qualité : protéines (céréales), calibrage (orge brassicole) • Les critères environnementaux : reliquat post récolte (non systématique) • Autres critères : N absorbé et coefficient d'utilisation des engrais (non systématique) <p>En France, la méthode a été développée sur la base de :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Blé tendre : <ul style="list-style-type: none"> ○ De 1994 à 2003, 251 essais de fertilisation azotée sur l'ensemble du territoire français avec mesures N-Tester à différents stades pour la mise au point (1994-1997) puis l'amélioration et la validation de la méthode sur blé. Localisation des essais essentiellement dans les zones de grandes cultures et sur les plateformes expérimentales d'Arvalis, ○ De 1994 à 2015, 267 essais comprenant 20 à 35 variétés de blé pour le calage variétal ; • blé dur : 25 essais multilocaux 1995-1999 avec Arvalis ; • blé améliorant : ≈ 20 essais multilocaux 1995-1999 avec Arvalis ; • pomme de terre : 22 essais multilocaux 1995-2000 avec Arvalis ; • maïs : ≈ 15 essais ; • orge printemps Brassicole : 17 essais de 1999-2001 <p><i>Les sites expérimentaux sélectionnés ont été prioritairement des sites avec réponses à la fertilisation azotée afin de bien discriminer et classer les niveaux de nutrition des cultures.</i></p>
<p>Analyse des résultats</p>	<p>Le calage opérationnel de la méthode a été établi par l'analyse de covariance et ou de régression multiple des relations entre le ratio indice de grain (IG) / indice de grain max (IG max) et la mesure N-Tester (qu'elle soit absolue, ou relative (ratio zone étalon)). La définition des seuils d'intervention a été établie en fonction du déficit de dose d'azote par rapport à l'optimum a postériori, défini par la dose d'azote correspondant à la valeur $IG/IG\ max = 97\%$.</p> <p>La validation de la méthode a été établie sur la base de la validation statistique de 3 hypothèses :</p> <ul style="list-style-type: none"> • H1 : si valeur N-Tester du traitement < seuil de déclenchement, alors N est limitant et le traitement N+ doit démontrer une augmentation de rendement significatives (seuil 5%) • H2 : si valeur N-Tester du traitement > seuil de déclenchement, alors N est non limitant et le traitement N+ ne doit pas démontrer d'augmentation de rendement (test NS) • H3 : Sur les traitements X-40 pilotés avec le N-Tester, les performances du traitement doivent être en moyenne \geq au traitement X non piloté sur le critère rendement, dose N et teneur en protéines <p>De plus, sur l'ensemble du référentiel expérimental et analysé par année, le couplage méthode du bilan avec dose N minorée puis pilotage N-Tester doit en fréquence améliorer les performances de la méthode du bilan :</p> <ul style="list-style-type: none"> • en limitant la fréquence de sous fertilisation (perte de rendement), • en limitant la fréquence de sur fertilisation, • en conséquence augmenter la fréquence des fertilisations jugées optimales (déterminées sur la base d'ajustement quadratique et à dire d'expert, c'est-à-dire, la dose où le gain de rendement de la dose immédiatement supérieure est < 2 q/ha.

NS DIGITES® SMAG			
Représentant légal	SMAG (Smart Agriculture)		
Concepteur(s)	Etape	Intervenant	
	Mise au point de la méthode et développement agronomique	Département agronomie d'INVIVO	
Caractéristiques techniques			
Nature de l'indicateur	Transmittance		
Mode de fonctionnement	<p>L'analyse est basée sur l'interprétation de la mesure indirecte de la teneur en Chlorophylle des feuilles.</p> <p>Le principe de la méthode se déroule en 3 étapes :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Prévoir : Calcul de la dose prévisionnelle par la méthode des bilans développée par le COMIFER • Fertiliser : apport la dose bilan avec une mise en réserve de 40 uN • Diagnostiquer : estimation de l'état de nutrition azotée de la plante (entre 2 nœuds et épiaison) à l'aide de la pince, et ajuster la dose finale en fonction des besoins réels de la plante <p>Le calcul de la préconisation se fait par le pincement de quelques feuilles F2-F3.</p>		
Cultures pilotées	<ul style="list-style-type: none"> • Blé tendre d'hiver • Blé dur 		
Pilotage d'une date	Non		
Pilotage d'une dose	Culture	Stade(s)	
	Blé tendre, Blé dur	De 2 Nœuds à épiaison	
Outil de calcul de dose prévisionnelle	Non		
Outil d'aide à la modulation intra parcellaire	Non		
Utilisateurs cibles	Techniciens		
Préconisations d'utilisation	<p>Comme pour tous les outils d'aide à la décision, les mesures doivent être effectuées dans des conditions relativement « normales » sur feuille saine (absence de maladie, de carence en soufre, phosphore, ...) et sèche.</p> <p>Les conditions climatiques hors normes au printemps, notamment les printemps très secs mettent en défaut la méthode.</p>		
Autres champs d'actions couverts	Non		

Caractéristiques économiques		
Année de sortie	1999	
Prix de vente	NC	
Déploiement en 2015	Surface pilotée	Nombre d'utilisateurs
	≈ 20 000 ha	≈ 1000 agriculteurs
Méthode d'évaluation et de calibration de l'outil		
Protocole expérimental	<p>Le développement de la méthode a été réalisé par une approche expérimentale courbe de réponse à l'azote sur 6 années et environ une centaine d'essais. Généralement, les essais ont été menés en dispositifs en bloc, factoriel, avec 4 répétitions.</p> <p>La validation de la méthode a été réalisée sur une période de 5 à 6 ans sur une cinquantaine d'essais avec au moins 3 modalités pour l'apport de fin de cycle (Conseil / 40 unités / Pas d'apport de fin de cycle) permettant de valider ou non la dose préconisée.</p> <p>Les mesures effectuées sont :</p> <ul style="list-style-type: none"> • les critères de rendement : Rendement, les composantes du rendement (grain/m², PMG, PS), • les critères de qualité : protéines 	
Analyse des résultats	<p>L'analyse des résultats est réalisée sur la moyenne des répétitions, et la règle de décision pour le calage de la dose optimale est la dose où le rendement de la dose immédiatement supérieure de 40 unités ne permet pas le gain de plus de 2 q/ha (sauf si la dose immédiatement supérieure permet de passer le seuil protéine).</p>	

4.2.6. Concentration en chlorophylle et absorbance UV par les polyphénols des feuilles (Fluorescence)

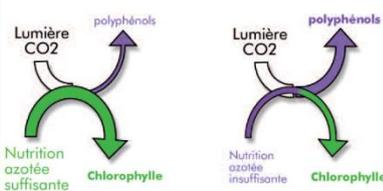
4.2.6.1. Principe général

Le principe est basé sur la mesure de deux indicateurs du statut azoté d'une plante : la chlorophylle et les flavonols.

Lorsqu'une plante est en fonctionnement optimal, elle réalise son métabolisme primaire et synthétise des protéines (molécules azotées) contenant la chlorophylle, et peu de flavonols (composés carbonés). En revanche, lorsque la plante se retrouve en carence azotée, elle oriente alors son métabolisme vers la production de flavonols.

Cette méthode présente une sensibilité potentiellement supérieure pour évaluer le statut azoté de la culture, car la variation de la concentration en phénols (flavonols) en relation avec le statut azoté peut être détectée avant que la teneur en chlorophylle ou l'indice de surface foliaire ne soient modifiés (Cartelat et al, 2005).

4.2.6.2. Fiches outils

<h1 style="margin: 0;">Dualex®</h1> <h2 style="margin: 0;">Force A</h2>		
Représentant légal	Force A	
Concepteur(s)	Etape	Intervenant
	Totalité de la conception	Force A
Caractéristiques techniques		
Caractéristiques optiques	Fluorescence + transmittance	
Mode de fonctionnement	<p>L'analyse est basée sur la mesure de la chlorophylle par transmittance, et sur la mesure des flavonols par fluorescence :</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> <p>Balance azotée</p>  </div> <div style="text-align: left;"> <p>lorsque la nutrition azotée est suffisante, la plante produit de la chlorophylle, et lorsque la nutrition azotée est insuffisante, la plante produit des polyphénols et notamment des flavonols. L'outil permet de mesurer l'indice de statut azoté (NBI Nitrogen Balance Index) qui est le rapport entre la teneur en chlorophylle et en flavonols.</p> </div> </div> <p>A partir du NBI, et grâce à différentes grilles de décisions développées par Force-A, 3 logiciels sont disponibles pour 3 applications différentes.</p> <p><u>Dualex® Blé Fertilisation</u> Comparaison du NBI d'un échantillon (30 feuilles mesurées) et d'une référence (30 feuilles) obtenue sur une bande surfertilisée lors du 2nd apport d'azote. Les grilles de décision développées par FORCE-A permettent de déclencher ou non, un troisième apport. La dose de cet apport s'affiche à l'écran.</p> <p><u>Dualex® Blé Protéine</u> Le NBI d'un échantillon (30 feuilles) permet d'estimer la teneur en protéines de la future récolte aux stades épiaison et floraison, via un modèle.</p> <p><u>Dualex® Vigne (FA-Vigor)</u> Le NBI d'un échantillon (30 feuilles) est calculé pour caractériser le niveau de vigueur de la vigne.</p> <p>Les résultats s'affichent à l'écran du Dualex® à la fin des mesures. Les données sont stockées sur Dualex® et récupérables via USB. Dualex® est doté d'un GPS intégré.</p>	
Cultures pilotées	Blé tendre d'hiver et vigne	
Pilotage d'une date	Non	
Pilotage d'une dose	Culture	Stade(s)
	Blé tendre d'hiver	Fertilisation : 2N à éclatement de la gaine

Outil de calcul de dose prévisionnelle	Non	
Outil d'aide à la modulation intra parcellaire	Non	
Utilisateurs cibles	Blé : Dualex® est proposé en location aux techniciens (firmes d'engrais, coopératives et négociés) Vigne : Dualex® est proposé en location aux techniciens et viticulteurs	
Préconisations d'utilisation	Préconisations classiques de la plupart des Outils d'Aide à la Décision, à savoir, l'efficacité du dernier apport avant la mesure. La mesure doit se faire sur feuille saine.	
Autres champs d'actions couverts	Non	
Caractéristiques économiques		
Année de sortie	Dualex® Blé : 2010 Dualex® Vigne : 2014	
Prix de vente	Entre 10 et 15€ par analyse	
Déploiement en 2015	Surface pilotée	Nombre d'utilisateurs
	Blé : 30 à 50 000 ha	
Méthode d'évaluation et de calibration de l'outil		
Protocole expérimental	<p><u>Dualex® Blé (Fertilisation et Protéine)</u> L'outil a été développé sur la base d'expérimentations sur 4 années (2005 à 2008). Sur la base d'essais de courbe de réponse du rendement à 4 à 5 doses d'azote différentes (Dose bilan X, X-80, X-40, X+40, ...) avec des pilotages à 4 ou 5 stades différents. Les critères mesurés sont le rendement et la protéine, et de façon plus ponctuelle, la biomasse, le statut azoté de la plante et le reliquat post récolte. La validation a eu lieu en 2009 avec un panel d'agriculteurs.</p> <p><u>Dualex® Vigne</u> Parcelles expérimentales suivies entre 2007 et 2012. Corrélations entre le NBI et le statut azoté mesuré de façon chimique.</p>	
Analyse des résultats	<p><u>Dualex® Blé Fertilisation</u> : comparaison des doses recommandées par rapport à la dose optimale. <u>Dualex® Blé Protéine</u> : modèle mathématique. <u>Dualex® Vigne</u> : corrélations entre le NBI et le % d'azote des feuilles mesuré de façon chimique.</p>	

4.2.7. Concentration en chlorophylle par la mesure de la réflexion de la lumière par la biomasse aérienne (ou canopée) (réflectance)

4.2.7.1.Principe général

Le principe est basé sur la variation de réflectance liée aux propriétés optiques des feuilles (variant selon leur composition), et à la structure du couvert végétal (densité, port, ...).

Les différents outils basés sur ce principe vont mesurer la lumière réfléchi par un couvert à différentes longueurs d'onde :

- dans le rouge du spectre visible pour estimer la teneur en chlorophylle,
- dans le proche infrarouge pour estimer la biomasse.

Cette propriété de réflectance peut être détectée sur une gamme d'altitude très importante, les capteurs peuvent être portés par des vecteurs très différents : homme, tracteur, drone, ULM, avion, satellite.

4.2.7.2.Fiches outils

La majorité des outils utilisés pour le pilotage de la fertilisation en cours de végétation sont basés sur ce principe. Au moins 12 outils ont été recensés pour cette étude :

- N-Pilot® et GPN_Pilot®
- Greenseeker Handheld®
- Greenseeker RT 200®
- Cropsensor ISARIA®
- N-Sensor® et N-Sensor ALS®
- Technologie Airinov®
- Mes dron'im@ages®
- AgroRendement®
- Farmstar®
- Cérélia®⁴

⁴ Pour cet outil, l'enquête n'a pu être réalisée, il n'y a donc pas de fiche correspondante.

N-Pilot® / GPN-Pilot® Borealis		
Représentant légal	Borealis L.A.T.	
Concepteur(s)	Etape	Intervenant
	Algorithme et choix de longueur d'onde	INRA Avignon + Service agro AZF
	Fabrication matériel	Microtech
	Développement agronomique	Borealis L.A.T + Humans Connexion
Support informatique		
Caractéristiques techniques		
Mode de fonctionnement	Réflectance	
Mode de fonctionnement	<p>L'analyse est basée sur une mesure de la réflectance d'un couvert végétal sur 2 longueurs d'onde différentes, une permettant d'estimer la biomasse et l'autre permettant d'estimer la teneur en chlorophylle.</p> <p>L'appareil est muni d'un 3^{ème} capteur de luminosité pour corriger les variations lumineuses pouvant intervenir en cours de mesures.</p> <p>L'outil permet de piloter la fertilisation du blé entre le stade « 2 nœuds » et le stade « gonflement ». La préparation se fait donc à partir d'une dose prévisionnelle (<i>calcul réalisé en parallèle mais non intégré à l'outil</i>) avec une mise en réserve de 40uN de l'apport de fin de cycle.</p> <p>L'outil nécessite la mise en place d'une bande étalon surfertilisée (+50 uN) au moment de l'apport du stade épi 1cm pour créer une zone étalon où l'azote n'est pas l'élément limitant (sur orge, cette zone étalon sera effectuée au premier apport sur la culture).</p> <p>A partir du stade « 2 nœuds », la mesure s'effectue calibrant l'appareil au-dessus de la zone étalon, puis en mesurant le reste de la parcelle. Le principe pivot de l'outil est donc basé sur une comparaison de développement de la culture entre la zone de référence et le reste de la parcelle afin de suivre au plus près le besoin réel de la culture.</p> <p>Pour le N-Pilot® : Une application smartphone ainsi qu'un site internet spécifique, associés à un compte utilisateur, permettent de recevoir, consulter et archiver les rapports de mesures automatiquement envoyés par l'appareil. Sa fonction de géo-référencement offre aux utilisateurs un suivi et une traçabilité de leurs relevés de mesures pour toutes les parcelles, et permet de générer un historique des précédents diagnostics. Le N-Pilot® est équipé d'une fonction de mise à jour annuelle, visant à prendre en compte de nouvelles cultures ou de nouvelles variétés, et à autoriser de nouveaux développements du logiciel.</p> <p>Pour le GPN-Pilot® : la lecture est réalisée directement à l'écran et les données sont transcrites sur un carnet souche, les mises à jour se font via l'envoi d'un CD-Rom.</p>	
Cultures pilotées	Blé tendre Blé dur Blé de force Orge d'hiver Orge de printemps Triticale (Colza : estimation azote absorbé, uniquement pour le N-Pilot® estimation biomasse avec algorithme validé par Terres Inovia. Le conseil azote final se fait via la Réglette azote Terres Inovia)	

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE DE L'AGROALIMENTAIRE ET DE LA FORÊT
**RECENSEMENT ET ANALYSE DES OUTILS DE RAISONNEMENT DYNAMIQUE ET DE
 PILOTAGE DE LA FERTILISATION AZOTÉE**

Pilotage d'une date	Oui (selon nombre de mesures, permet d'attendre l'assimilation du 2 ^{ème} apport d'azote)	
Pilotage d'une dose	Culture	Stade(s)
	Céréales (hors Orge de printemps)	2N à début épiaison
	Orge de printemps	1-2 nœuds
	Colza	Entrée et sortie hiver
Outil de calcul de dose prévisionnelle	Non	
Outil d'aide à la modulation intra parcellaire	Non	
Utilisateurs cibles	Techniciens et agriculteurs	
Préconisations d'utilisation	Bien anticiper la zone de référence.	
Autres champs d'actions couverts	Non	
Caractéristiques économiques		
Année de sortie	GPN-Pilot® : 2003 N-Pilot® campagne 2015	
Prix de vente	N-Pilot® : 2200€HT / Appareil (+2500€ / HT si tablette)	
Déploiement en 2015	Surface pilotée	Nombre d'utilisateurs
	NC	N-Pilot®≈1500 agriculteurs GPN-Pilot®≈400 appareils vendus
Méthode d'évaluation et de calibration de l'outil		
Protocole expérimental	<p>Les essais de validation sont effectués chaque année par Borealis et ses partenaires (Terres Inovia, Chambres d'agriculture, distributeurs, ...).</p> <p>Les mesures effectuées sont :</p> <ul style="list-style-type: none"> • les critères de rendement : Rendement, les composantes du rendement (poids de mille grains, nombre d'épis au m², ...), la biomasse (au moment de la mesure), • les critères de qualité : protéines, • quelques essais avec des mesures de reliquats post-récolte (pas systématique). <p>Le conseil est paramétré pour obtenir l'optimum de rendement.</p>	
Analyse des résultats	La méthode analytique de calcul de la dose optimale n'a pas été transmise.	

<h1 style="margin: 0;">GREENSEEKER HANDHELD</h1> <p style="margin: 0;">Trimble</p>		
Représentant légal	Trimble	
Concepteur(s)	Etape	Intervenant
	Capteur :	Développement de l'outil par N-Tech (Acheté par Trimble)
	Partie agronomique :	Trimble en partenariat avec des universités américaines, notamment l'Oklahoma state university
	Distribution en France	
Caractéristiques techniques		
Nature de l'indicateur	Réflectance	
Mode de fonctionnement	<p>L'analyse est basée sur la mesure d'un indice de végétation, le NDVI (Normalised Difference Vegetation Index), calculée sur la réflectance de 2 longueurs d'onde lumineuse permettant d'estimer la biomasse.</p> <p>L'outil est un capteur actif (disposant de sa propre source lumineuse) ce qui l'affranchit des conditions climatiques lors de la mesure.</p> <p>L'outil permet de piloter la fertilisation du blé entre le stade « 2 nœuds » et le stade « gonflement ». La préparation se fait donc à partir d'une dose prévisionnelle (<i>calcul réalisé en parallèle mais non intégré à l'outil</i>) avec une mise en réserve de 40uN de l'apport de fin de cycle.</p> <p>L'outil nécessite la mise en place d'une bande surfertilisée (+40 à +50 uN) au moment de l'apport du stade épi 1cm pour créer une zone étalon où l'azote n'est pas l'élément limitant.</p> <p>La mesure est réalisée d'abord sur la zone étalon, puis sur le reste de la parcelle, les valeurs sont renseignées dans une application informatique (internet ou smartphone) qui calculera la dose à apporter (la dose est plafonnée à 80uN).</p>	
Cultures pilotées	Blé tendre d'hiver et blé améliorant (Blé dur, Orge d'hiver en cours de développement)	
Pilotage d'une date	Non (sauf si la mesure est prise régulièrement)	
Pilotage d'une dose	Culture	Stade(s)
	Blé	De 2 Nœuds à Gonflement
Outil de calcul de dose prévisionnelle	Non	
Outil d'aide à la modulation intra parcellaire	Non	
Utilisateurs cibles	Agriculteurs, techniciens Coopératives et Négoces, techniciens Chambre d'agriculture et de CETA	

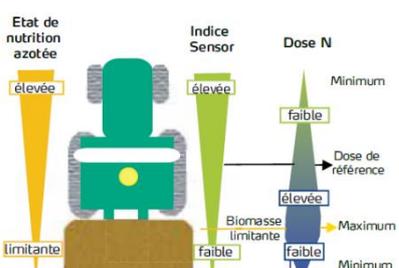
Préconisations d'utilisation	<p>Préconisations classiques de la plupart des Outils d'aide à la décision, à savoir, l'efficacité du dernier apport avant la mesure.</p> <p>Nécessite une application rigoureuse de la zone étalon (ne fonctionne pas sur les doublures de rampes).</p> <p>Un développement trop important de la biomasse peut dans certains cas faire saturer le capteur.</p> <p>Eviter l'usage sur feuille mouillée.</p>	
Autres champs d'actions couverts	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluation de la biomasse du colza • Estimation du risque de verse • Pilotage de l'apport en fongicide • Evaluation du rendement au stade épiaison 	
Caractéristiques économiques		
Année de sortie	2012	
Prix de vente	500€ par appareil, puis 200€/an pour l'accès à l'algorithme de calcul	
Déploiement en 2015	Surface pilotée	Nombre d'utilisateurs
	Pas de données	Pas de données
Méthode d'évaluation et de calibration de l'outil		
Protocole expérimental	<p>Les essais de développement de l'outil ont été réalisés aux Etats-Unis, et les documents transmis ne permettent pas de caractériser les protocoles expérimentaux utilisés.</p> <p>Pour la France, des essais de validation ont été réalisés par différents acteurs (Chambre d'agriculture d'Ile de France, d'Eure et Loire, CETA d'Evreux, ...) pour tester différents outils d'aide à la décision.</p> <p>Les essais ont été conduits en courbe de réponse à l'azote, où 4 à 5 doses sont testées (Dose bilan X, X-80, X-40, X+40, ...).</p> <p>Les critères mesurés sont le rendement, la qualité et l'azote absorbé.</p>	
Analyse des résultats	La méthode analytique de calcul de la dose optimale n'a pas été transmise.	

<h1 style="margin: 0;">GREENSEEKER RT 200</h1> <p style="margin: 0;">Trimble</p>			
Représentant légal	Trimble		
Concepteur(s)	Etape	Intervenant	
	Capteur :	Développement de l'outil par N-Tech (Acheté par Trimble)	
	Partie agronomique :	Trimble en partenariat avec des universités américaines, notamment l'Oklahoma state university	
	Distribution en France		
Caractéristiques techniques			
Nature de l'indicateur	Réflectance		
Mode de fonctionnement	<p>L'analyse est basée sur la mesure d'un indice de végétation, le NDVI (Normalised Difference Vegetation Index), calculée sur la réflectance de 2 longueurs d'onde lumineuse permettant d'estimer la biomasse et le taux de chlorophylle du couvert.</p> <p>L'outil est un capteur actif (disposant de sa propre source lumineuse) ce qui l'affranchit des conditions climatiques lors de la mesure.</p> <p>L'outil permet de cartographier la parcelle et de moduler en temps réel la dose d'azote autour d'une dose « pivot »</p> <p>Comme pour la version Handled (portable), l'outil permet de piloter la fertilisation du blé entre le stade « 2 nœuds » et le stade « gonflement ». La préparation se fait donc à partir d'une dose prévisionnelle (<i>calcul réalisé en parallèle mais non intégré à l'outil</i>) avec une mise en réserve de 40uN de l'apport de fin de cycle L'outil nécessite la mise en place d'une bande surfertilisée (+40 à +50 uN) en début de cycle pour créer une zone étalon où l'azote n'est pas l'élément limitant.</p> <p>La mesure est réalisée d'abord sur la zone étalon, puis l'application d'azote est réalisée en temps réel sur le reste de la parcelle.</p> <p>L'outil est connecté, les données collectées sont stockées en temps réel.</p>		
Cultures pilotées	Maïs Blé Colza (mesure de la biomasse) Vignes (autres cultures en développement)		
Pilotage d'une date	Non		
Pilotage d'une dose	Culture	Stade(s)	
	Blé pilotage dose	De 2 Nœuds à Gonflement	
	Toutes cultures (modulation)	Tout stade post levée	
Outil de calcul de dose prévisionnelle	Non		
Outil d'aide à la modulation intra parcellaire	Oui		
Utilisateurs cibles	Techniciens et agriculteurs		

Préconisations d'utilisation	<p>Préconisations classiques de la plupart des Outils d'aide à la décision, à savoir, l'efficacité du dernier apport avant la mesure.</p> <p>Nécessite une application rigoureuse de la zone étalon (ne fonctionne pas sur les doublures de rampes).</p> <p>Un développement trop important de la biomasse peut dans certains cas faire saturer le capteur.</p> <p>Eviter l'usage sur feuille mouillée.</p> <p>Respect des plages de hauteur de la rampe où sont situés les capteurs.</p>	
Autres champs d'actions couverts	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluation de la biomasse du colza • Estimation du risque de verse • Evaluation du rendement au stade épiaison 	
Caractéristiques économiques		
Année de sortie	2008	
Prix de vente	Capteur ≈ 9000€ Ecran associé ≈ 4 à 5000€ Rampe (option) ≈ 5000€	
Déploiement en 2015	Surface pilotée	Nombre d'utilisateurs
	Pas de données	Pas de données
Méthode d'évaluation et de calibration de l'outil		
Protocole expérimental	Les documents transmis ne permettent pas de caractériser les protocoles expérimentaux utilisés	
Analyse des résultats	La méthode analytique de calcul de la dose optimale n'a pas été transmise.	

<h1 style="margin: 0;">CROSENSOR ISARIA</h1> <p style="margin: 0;">CLAAS E-Systems</p>		
Représentant légal	CLAAS France SAS	
Concepteur(s)	Etape	Intervenant
	Capteur :	Fritzmeier
	Partie agronomique :	Université de Munich
	Interface de communication Tracteur / Outil (ISOBUS) :	CLAAS
Caractéristiques techniques		
Nature de l'indicateur	Réflectance	
Mode de fonctionnement	<p>L'analyse est basée sur la mesure d'un indice de Biomasse et d'un indice de Nutrition Azotée. Le capteur dispose de sa propre source lumineuse pour être actif dans toutes les conditions de luminosité (y compris de nuit).</p> <p>L'outil permet de moduler spatialement la dose en fonction de l'hétérogénéité du parcellaire :</p> <ul style="list-style-type: none"> soit autour de deux valeurs de dose fixées sur une partie à faible potentiel et une partie à fort potentiel (mode Dual-point), soit autour d'une valeur moyenne calibrée sur un point représentatif de la parcelle, avec la définition d'un minimum et d'un maximum de dose par l'utilisateur (mode single-point), soit en mode automatique où l'utilisateur détermine une dose moyenne à apporter, avec la définition d'un écart de variation. <p>Pour le blé tendre d'hiver, l'outil dispose d'un mode de fertilisation complet qui va automatiquement calculer la dose à apporter en fonction de la mesure de l'absorption d'azote de la culture au moment de l'application, et de la quantité d'azote nécessaire pour atteindre le stade du prochain apport.</p> <p>Afin d'affiner le plus possible la carte du potentiel d'une parcelle, l'outil peut compiler plusieurs cartes (inventaire des sols, altitude, carte de rendement des années antérieures, ...).</p>	
Cultures pilotées	<p>Toutes les cultures « en vert » (blé tendre, blé dur, orge, avoine, triticale, soja), herbe et colza.</p> <p>Limite technique sur le maïs et le tournesol (entre rang) qui nécessite de positionner le capteur sur le rang.</p>	
Pilotage d'une date	Non	
Pilotage d'une dose	Culture	Stade(s)
	Blé tendre d'hiver	Tous les stades
	Autres cultures	Modulation pour chaque apport
Outil de calcul de dose prévisionnelle	Oui	
Outil d'aide à la modulation intra parcellaire	Oui	
Utilisateurs cibles	Agriculteurs, Entreprises de Travaux Agricoles, Coopératives (selon les services proposés)	
Préconisations d'utilisation	Peu d'années d'utilisation en France, donc peu de retour de limite d'utilisation.	
Autres champs d'actions couverts	Non	

Caractéristiques économiques		
Année de sortie	2014 (Allemagne : 2005, puis 2 ^{ème} version en 2011)	
Prix de vente	Selon options, entre 22 000 et 32 000 € (~ 30 000) par appareil	
Déploiement en 2015	Surface pilotée	Nombre d'utilisateurs
	~ 600 ha	2 dont une ferme pilote Claas
Méthode d'évaluation et de calibration de l'outil		
Protocole expérimental	<p>L'outil a été évalué et calibré en Allemagne.</p> <p>Les résultats d'essai transmis par CLAAS, ne représentent qu'une petite partie des expérimentations. Les essais sont construits en bande de comparaison entre une application constante sans pilotage et une application pilotée avec l'Outil.</p> <p>Les mesures effectuées concernent :</p> <ul style="list-style-type: none"> le rendement, la qualité, les critères agronomiques, la marge brute de la culture. <p>En France, il n'y a pas, à proprement parler, de mise en place d'expérimentation (des discussions sont en cours pour mettre en place des essais sur le territoire).</p> <p>Les essais sont réalisés par bande témoins, et les résultats sont communiqués à l'Allemagne, notamment pour les variétés spécifiques à la France.</p>	
Analyse des résultats	<p>Les essais transmis ne permettent pas de définir la méthode d'analyse utilisée pour l'interprétation des résultats, mais sont disponibles si une méthode de validation est mise en place.</p>	

<h1>N-Sensor®</h1> <p>Yara</p>		
Représentant légal	Yara International	
Concepteur(s)	Etape	Intervenant
	Développement optique et électronique	Yara international station de recherche de Hanninghof Duermen Allemagne Team Precision Farming
	Calage agronomique	
	Détermination des longueurs d'onde et ratio de réflectance	
	Développement compatibilité matériel	
	Validation dans différents pays	
Distribution en France	SBS Services	
Caractéristiques techniques		
Nature de l'indicateur	Réflectance	
Mode de fonctionnement	<p>L'outil détermine en temps réel l'état de nutrition azotée de la culture grâce à la mesure de réflectance du couvert végétal sur deux longueurs d'onde (l'une reliée à la teneur en chlorophylle, l'autre reliée à la biomasse).</p> <p>Il existe 2 modèles :</p> <ul style="list-style-type: none"> • N-Sensor « classique » : équipé de 4 capteurs (2 par côté) mesurant la réflectance de la lumière naturelle et d'un capteur d'irradiance orienté vers le ciel pour corriger la mesure en conditions lumineuses changeantes, • N-Sensor ALS : équipé de 2 capteurs couplés à 2 sources lumineuses permettant son utilisation même de nuit. 	
	<div style="display: flex; align-items: center;">  <div style="margin-left: 20px;"> <p>Le N-Sensor est principalement un outil de modulation intraparcellaire d'une dose d'azote « pivot » pilotée en amont par un outil d'aide à la décision (pesée de biomasse (colza), N-Tester, Jubil, N-Pilot, ...).</p> <p>Après un étalonnage sur une zone de référence de la parcelle, l'outil va permettre de diminuer l'azote apporté sur les zones à forte absorption d'azote mesurée, et d'augmenter l'azote apporté dans la situation inverse dans la limite d'un indice de biomasse suffisant pour exprimer un potentiel (l'outil permet de ne pas apporter d'azote sur les sols nus ou à faible végétation).</p> </div> </div> <p><i>Figure 12 - N-Sensor® module la dose d'azote en prenant en compte la quantité de chlorophylle et la biomasse en chaque point de la parcelle.</i></p>	
<p>L'utilisation de l'outil est la dernière étape du processus d'optimisation de la fertilisation azotée : Détermination de la dose prévisionnelle > Pilotage en cours de végétation à la parcelle > Modulation de la dose intraparcellaire.</p> <p>Les informations recueillies par l'outil sont stockées et les cartographies réalisées permettent d'assurer une traçabilité des épandages et de suivre une parcelle sur plusieurs années culturales.</p>		
Cultures gérées	<p>Céréales d'hiver : Blés, orges, Triticales et Seigles Blé de printemps et orges de printemps Colza, Pomme de terre, Maïs, Canne à sucre, coton (Prairie en cours de développement)</p>	

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE DE L'AGROALIMENTAIRE ET DE LA FORÊT
 RECENSEMENT ET ANALYSE DES OUTILS DE RAISONNEMENT DYNAMIQUE ET DE
 PILOTAGE DE LA FERTILISATION AZOTÉE

Pilotage d'une date	Non	
Pilotage d'une dose	Culture	Stade(s)
	Céréales d'hiver	De 2 Nœuds à Gonflement
	Colza	Reprise de végétation à Boutons accolés
Outil de calcul de dose prévisionnelle	Non	
Outil d'aide à la modulation intra parcellaire	Oui	
Utilisateurs cibles	Agriculteurs et CUMA (2/3 des utilisateurs) ETA et distributeurs pour le développement d'épandage en prestation de service	
Préconisations d'utilisation	Préconisations classiques de la plupart des outils d'aide à la décision, à savoir : <ul style="list-style-type: none"> • couvert suffisamment développé pour « extérioriser » des différences de nutrition azotée, • efficacité des apports précédant la mesure. Pour le capteur N-Sensor « Classique » : élévation solaire suffisante. Pour le capteur N-Sensor ALS : Effet de la rosée.	
Autres champs d'actions couverts	Développements opérationnels ou en cours avec d'autres partenaires (Agricon, Université Wageningen Bayer, ...) sur la modulation de produits phytosanitaires : <ul style="list-style-type: none"> • régulateurs de croissance, • défoliant pomme de terre, • ... 	
Caractéristiques économiques		
Année de sortie	2001	
Prix de vente	De 22 000 à 33 000 € selon version Entre 18 et 23€/ha en prestation de service (incluant l'épandage d'engrais)	
Déploiement en 2015	Surface pilotée	Nombre d'utilisateurs
	Environ 50 000 ha en France (Environ 1 600 000 ha dans le monde)	Environ 100 appareils en France Environ 1400 appareils en Europe
Méthode d'évaluation et de calibration de l'outil		
Protocole expérimental	Les essais scientifiques (essais microparcelles et équipement spécifique pour le calage agronomique de l'outil par culture) ont été réalisés en Allemagne (sauf pour les cultures exotiques, coton et canne à sucre réalisées avec des universités locales (Brésil par exemple). Les essais de validation du concept (essais généralement en bandes répétées en parcelles agriculteur) ont été réalisés dans différents pays européens et généralement sur céréales d'hiver et sur colza. En France, les essais de validation ont été réalisés Par Yara de 1998 à 2001 puis avec Arvalis de 2004 à 2007 sur des parcelles agriculteurs avec leur matériel (épandeur et moissonneuse équipés d'un capteur de rendement et d'humidité et pesées élémentaires au pont bascule ou pèse essieux) en alternant des bandes modulées et non modulées. La quantité d'azote apportée est la même entre les deux modalités (seule la répartition de l'azote à l'intérieur des bandes change). Les éléments mesurés sont : <ul style="list-style-type: none"> • rendement, • teneur en protéines (céréales), • balance N (apport – export). 	
Analyse des résultats	La méthode analytique pour les essais de validation est basée sur une analyse des moyennes entre la modalité « dose modulée » et la modalité « dose non modulée ».	

<h2 style="color: white;">Technologie Airinov</h2> <p style="color: white;">(anciennement Agridrone) Airinov</p>			
Représentant légal	Airinov		
Concepteur(s)	Etape	Intervenant	
	Capteur	Airinov et INRA Avignon	
	Algorithme de développement et agronomie	Airinov	
Caractéristiques techniques			
Nature de l'indicateur	Réflectance		
Mode de fonctionnement	<p>L'analyse est basée sur une mesure de la lumière réfléchiée par le couvert végétal dans 4 bandes distinctes (rouge, vert, infrarouge et proche infrarouge) pour estimer différents indicateurs (liste non exhaustive) :</p> <ul style="list-style-type: none"> • la biomasse (fraîche /sèche), • la densité foliaire, • le taux de chlorophylle et la quantité de chlorophylle, • l'azote absorbé. <p>Le capteur dispose d'un capteur de luminosité pour corriger le signal en réflectance en fonction de l'intensité lumineuse, de la couleur de la lumière et de son angle d'incidence.</p> <p>Pour le colza, le drone survole la parcelle deux fois (en entrée d'hiver et en sortie hiver) pour estimer le poste « azote absorbé à l'ouverture du bilan (sortie hiver) » et ainsi ajuster le plan prévisionnel de fumure azotée.</p> <p>Pour le blé, l'outil permet de piloter la dose d'azote à apporter sur un blé entre le stade « 2 nœuds » et le stade « sortie dernière feuille », soit le dernier ou les 2 derniers apports d'azote selon le fractionnement. La préparation se fait donc à partir du calcul d'une dose prévisionnelle (<i>calcul réalisé en parallèle mais non intégré à l'outil</i>) avec une mise en réserve de l'apport de fin de cycle. Après le survol de la parcelle, Les images recueillies permettent l'édition d'une carte de biomasse sèche et d'azote absorbé, et révèlent les disparités sur la parcelle. Le conseiller valide et fournit le calcul de la dose conseillée à la parcelle, la variation intraparcellaire ou la modulation automatique.</p> <p>Pour l'ensemble des céréales, l'outil permet de spatialiser une dose « pivot », c'est-à-dire d'indiquer les secteurs de la parcelle nécessitant plus d'azote et les secteurs nécessitant moins d'azote.</p>		
Cultures pilotées	Colza (mesure de la biomasse entrée et sortie hiver) Blé tendre, blé dur et orge		
Pilotage d'une date	Non		
Pilotage d'une dose	Culture	Stade(s)	
	Céréales	De 2 nœuds à sortie dernière feuille	
	Colza	Ajustement dose prévisionnelle	
Outil de calcul de dose prévisionnelle	Non (l'outil en tant que tel ne calcule pas une dose prévisionnelle, mais la méthode est basée sur le conseil d'un technicien sur l'ensemble de la fertilisation azotée) + réactualisation de plan de fumure +utilisation de la réglette azote de Terres Inovia		
Outil d'aide à la modulation intra parcellaire	Oui, carte directement intégrable au terminal du tracteur		
Utilisateurs cibles	Techniciens, agriculteurs		

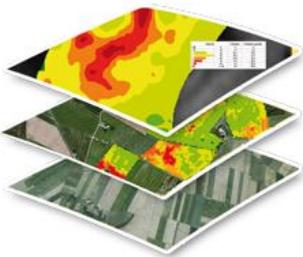
Préconisations d'utilisation	Comme pour tous les outils de pilotage de la végétation, les conditions « extrêmes » antérieures à la mesure peuvent fausser l'interprétation (efficacités des apports précédents, ...). Comme pour tous les drones, les conditions climatiques (vent > 60km/h, pluie) peuvent limiter les capacités de survol.	
Autres champs d'actions couverts	Non	
Caractéristiques économiques		
Année de sortie	2012	
Prix de vente	Colza (2 vols) ≈ 15€/ha (+1€/ha si édition de cartes intégrables) Céréales (1vol) ≈ 10 €/ha (+ 1€/ha si édition de cartes intégrables)	
Déploiement en 2015	Surface pilotée	Nombre d'utilisateurs
	85 000 ha (35 000 colza, 50 000 en blé)	5400 agriculteurs (pour 1000 techniciens)
Méthode d'évaluation et de calibration de l'outil		
Protocole expérimental	Calibration des capteurs : afin d'assurer une mesure homogène, les capteurs qui équipent les drones bénéficient d'une calibration avant leur mise en service. De plus, lors de chaque acquisition, une calibration permet de prendre en compte le spectre lumineux ambiant (décalage du spectre solaire en fonction de l'heure de la journée et des conditions nuageuses). Pour le colza, les mesures sont accompagnées, à chaque campagne, de prélèvements de terrain pour corriger les effets interrégionaux. Pour le blé, des essais de courbes de réponse à l'azote sont réalisés chaque année, accompagnés de prélèvements et d'analyses physico-chimiques en laboratoires indépendants.	
Analyse des résultats	NC	

<h1>Mes dron'im@ges</h1> <p>APCA</p>			
Représentant légal	Assemblée permanente des chambres d'agriculture (APCA)		
Concepteur(s)	Etape	Intervenant	
	Solution logistique avec support logistique et base du modèle agronomique	Airinov	
	Modèle agronomique	Chambres d'agriculture	
Caractéristiques techniques			
Nature de l'indicateur	Réflectance		
Mode de fonctionnement	<p>L'analyse est basée sur une estimation de la biomasse et du statut de nutrition azotée d'un couvert par un drone équipé d'un capteur multispectral. Le capteur dispose d'un capteur de luminosité pour corriger les mesures réalisées vers la végétation.</p> <p>Pour le colza, le drone survole la parcelle deux fois (en entrée d'hiver et avant février) pour estimer le poste « azote absorbé à l'ouverture du bilan (sortie hiver) » et ainsi ajuster le plan prévisionnel de fumure azotée.</p> <p>Pour le blé, l'outil permet de piloter la dose d'azote à apporter sur un blé entre le stade « 2 nœuds » et le stade « sortie dernière feuille », soit le dernier ou les 2 derniers apports d'azote selon le fractionnement. La préparation se fait donc à partir du calcul d'une dose prévisionnelle avec une mise en réserve de l'apport de fin de cycle (la mise en réserve n'est pas systématique et dépend des contextes pédoclimatiques et du conseil du technicien). Après le survol de la parcelle, les images recueillies permettent l'édition d'une carte de biomasse et de l'azote absorbé, et révèlent les disparités sur la parcelle. A partir de ces éléments, une dose conseillée est établie, basée sur une interprétation du niveau de nutrition (INN) et de la prise en compte de la minéralisation attendue et d'éventuels objectifs qualitatifs. Le conseiller valide et fournit en moins de 4 jours, le résultat du diagnostic à la parcelle sous forme de carte qui illustre la variation intra-parcellaire. Pour les agriculteurs équipés, un fichier de modulation automatique est aussi disponible en option.</p>		
Cultures pilotées	Colza (mesure de la biomasse entrée et sortie hiver) Blé tendre d'hiver		
Pilotage d'une date	Non		
Pilotage d'une dose	Culture	Stade(s)	
	Blé tendre d'hiver Colza	De 2 nœuds à sortie dernière feuille Ajustement dose prévisionnelle	
Outil de calcul de dose prévisionnelle	Non (l'outil en tant que tel ne calcul pas une dose prévisionnelle, mais la méthode est basée sur le conseil d'un technicien sur l'ensemble de la fertilisation azotée)		
Outil d'aide à la modulation intra parcellaire	Oui		
Utilisateurs cibles	Technicien chambre coopérative ou négoce		

Préconisations d'utilisation	<p>Comme pour tous les outils de pilotage de la végétation, les conditions « extrêmes » antérieures à la mesure peuvent fausser l'interprétation (efficacités des apports précédents, ...).</p> <p>Comme pour tous les drones, les conditions climatiques (vent, pluie) ou géographiques (proximité d'un aéroport, ...) peuvent limiter les capacités de survol.</p> <p>La mesure se fait sur culture simple (pas sur colza en culture associée) et après validation expérimentale des variétés dans le cas du blé (nouvelles variétés).</p>	
Autres champs d'actions couverts	<p>Estimation de dégât de gibier Cartographie du parcellaire</p>	
Caractéristiques économiques		
Année de sortie	Campagne 2013-2014	
Prix de vente	Colza ≈ 15€/ha Blé de 10 à 15€/ha	
Déploiement en 2015	Surface pilotée	Nombre d'utilisateurs
	11 000 ha	Environ 300
Méthode d'évaluation et de calibration de l'outil		
Protocole expérimental	<p>L'outil a été évalué par les chambres d'agriculture en partenariat avec Airinov.</p> <p>Sur 3 niveaux d'expérimentation :</p> <ul style="list-style-type: none"> • calage des variétés de blé, • courbe de réponse à l'azote, • courbe de réponse à l'azote en fin de cycle sur différentes modalités de doses apportées avant la fin de cycle. <p>Les mesures effectuées sont :</p> <ul style="list-style-type: none"> • les critères de rendement : Rendement, les composantes du rendement (poids de mille grains, nombre d'épis au m², ...), la biomasse et la teneur en azote (au moment de la mesure), • les critères de qualité : protéines, • pas de mesures environnementales. <p>Le conseil est paramétré pour obtenir l'optimum de rendement. En complément, une version protéine est disponible.</p>	
Analyse des résultats	<p>Les documents transmis ne permettent pas de définir la méthode d'analyse utilisée pour l'interprétation des résultats.</p>	

AGRO-RENDEMENTS® DRONE AGRICOLE			
Représentant légal	DRONE AGRICOLE		
Concepteur(s)	Etape	Intervenant	
	Ensemble de la conception	DRONE AGRICOLE	
Caractéristiques techniques			
Nature de l'indicateur	Réflectance		
Mode de fonctionnement	<p>L'analyse est basée sur une estimation de la biomasse et une évaluation du potentiel de rendement réel de la culture par un vecteur (ULM, drone, satellite, avion) équipé d'un capteur multispectral.</p> <p>Pour le blé, l'outil permet de piloter la dose d'azote à apporter sur un blé entre le stade 2 nœuds et le stade « sortie dernière feuille », soit le dernier ou les 2 derniers apports d'azote selon le fractionnement. La préparation se fait donc à partir du calcul d'une dose prévisionnelle avec une mise en réserve de l'apport de fin de cycle. La règle de décision du conseil est basée sur une méthode statistique de mise à jour du potentiel de rendement à partir de l'état végétatif de la plante à l'instant T ; c'est-à-dire que l'appareil estime l'état végétatif de la plante à partir des indicateurs de biomasse et du taux de chlorophylle, et met à jour le potentiel de rendement de la parcelle. Par exemple, si lors du dernier survol, l'état végétatif estimé ne permet pas d'atteindre l'objectif de rendement fixé en début de cycle, la dose préconisée sera revue à la baisse, et inversement.</p> <p>Les données collectées sont stockées et une carte de modulation intraparcellaire est établie et restituée sous format papier et numérique compatible avec toutes les marques d'épandeurs permettant une modulation automatique.</p>		
Cultures pilotées	Blé tendre d'hiver Colza (mesure de la biomasse entrée et sortie hiver)		
Pilotage d'une date	Non		
Pilotage d'une dose	Culture	Stade(s)	
	Blé tendre d'hiver	De 2 nœuds à sortie dernière feuille	
Outil de calcul de dose prévisionnelle	Oui (sur option)		
Outil d'aide à la modulation intra parcellaire	Oui		
Utilisateurs cibles	Agriculteurs		
Préconisations d'utilisation	Comme pour tous les outils de pilotage de la végétation, les conditions « extrêmes » antérieures à la mesure peuvent fausser l'interprétation (efficacités des apports précédents, ...).		
Autres champs d'actions couverts	Blé tendre d'hiver = Modulation de l'apport d'azote au stade épi 1cm – début montaison / Risque de verse Orge d'hiver = Modulation de l'apport d'azote au stade épi 1cm – début montaison Toutes cultures = Dégâts de gibier / Zonage de sols et modulation de semis		

Caractéristiques économiques		
Année de sortie	Campagne 2013 2014	
Prix de vente	Blé (1vol) ≈ 10 €/ha Colza (2 vols) ≈ 15€/ha	
Déploiement en 2015	Surface pilotée	Nombre d'utilisateurs
	55 000 ha	3500
Méthode d'évaluation et de calibration de l'outil		
Protocole expérimental	La validation de l'outil est réalisée par chaque client (Distribution, CETA, ...) par des essais de comparaison pour évaluer la pertinence de l'outil sur le rendement et la qualité des blés. Pour le colza, la validation se fait a posteriori pour la campagne 2015/2016 (et en temps réel à partir de la campagne 2016/2017), en partenariat avec Terres Inovia par des vols de parcelles faisant l'objet de prélèvements de biomasse.	
Analyse des résultats	L'analyse est réalisée par une comparaison de moyennes des résultats entre les différentes modalités testées (dose prévisionnelle seule, modalité avec pilotage, modalités pilotages autres outils).	

<h2 style="margin: 0;">FARMSTAR Expert</h2> <p style="margin: 0;">Arvalis institut du végétal / AIRBUS D et S</p>		
Représentant légal	Arvalis institut du végétal / AIRBUS D et S	
Concepteur(s)	Etape	Intervenant
	Conception	Arvalis institut du végétal / AIRBUS D et S / Terres Inovia
	Développement agronomique	Arvalis institut du végétal / Terres Inovia
	Développement commercial	AIRBUS D et S
Caractéristiques techniques		
Nature de l'indicateur	Réflectance dans plusieurs longueurs d'onde	
Mode de fonctionnement	<p>L'analyse est basée sur l'interprétation de la mesure de plusieurs longueurs d'onde permettant d'estimer par inversion des modèles de transfert radiatif l'indice foliaire (LAI) très corrélé à la biomasse du couvert et la teneur en Chlorophylle des feuilles (Cab), très corrélée au statut azoté de la plante (modèles internes Arvalis institut du végétal et Airbus).</p> <p>Les mesures sont réalisées par deux types de vecteurs : le satellite (permettant d'accéder au LAI) et le vol avion permettant d'accéder à un indicateur de Chlorophylle du couvert. Le vecteur drone est également possible pour accéder à la fois au LAI et à la Cab.</p> <p>FARMSTAR Expert propose 2 produits :</p> <ul style="list-style-type: none"> • ajustement du calcul de la dose prévisionnelle d'azote par l'estimation du poste « azote absorbé en sortie d'hiver » pour le colza, l'orge, le blé et le triticale, • pilotage de l'apport de fin de cycle pour les blés tendres et durs. <p>Pour le pilotage des blés :</p> <ul style="list-style-type: none"> • l'outil réalise donc un calcul de la dose prévisionnelle, via Azofert, Epicles, Fertiweb (selon les clients) avec une estimation de l'azote absorbé en sortie d'hiver. En fonction de la dose, un conseil de fractionnement avec une mise en réserve de 40 kgN/ha (modulable) est émis, • courant montaison, une mesure du LAI et de la teneur en chlorophylle des feuilles permet d'ajuster la dose prévue en fin de cycle en fonction du statut azoté de la plante et de son potentiel de croissance de biomasse à floraison selon la méthode « QN ». Cette méthode, mise en place dans FARMSTAR en 2014, a succédé à l'ancienne méthode dite « Chlorophylle 0 ». <p>Pour le colza :</p> <p>Il y a deux mesures de biomasse (en entrée d'hiver et avant février) pour estimer le poste « azote absorbé à l'ouverture du bilan (sortie hiver) » et ainsi ajuster la dose prévisionnelle d'azote.</p>	
Cultures pilotées	<ul style="list-style-type: none"> • Blé tendre (yc blé améliorant) diagnostic de l'état de nutrition azoté et pronostic pour la dose début montaison • Blé dur diagnostic de l'état de nutrition azoté et pronostic pour la dose début montaison • Orge et Colza ajustement de la dose prévisionnelle sans diagnostic de l'état de nutrition azotée 	

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE DE L'AGROALIMENTAIRE ET DE LA FORÊT
 RECENSEMENT ET ANALYSE DES OUTILS DE RAISONNEMENT DYNAMIQUE ET DE
 PILOTAGE DE LA FERTILISATION AZOTÉE

Pilotage d'une date	Non	
Pilotage d'une dose	Culture	Stade(s)
	Blé tendre et blé dur	Début montaison à sortie dernière feuille
Outil de calcul de dose prévisionnelle	Oui	
Outil d'aide à la modulation intra parcellaire	Oui	
Utilisateurs cibles	Agriculteurs, avec encadrement de techniciens	
Préconisations d'utilisation	<p>La variété pilotée doit être connue (traduction du signal de mesure en information agronomique).</p> <p>Le dernier apport d'azote doit avoir été réalisé au plus tard à « 1 nœud ».</p> <p>Si les conditions hydriques précédant le passage n'ont pas permis une absorption « normale » des apports précédents, le conseil doit être interprété par le conseiller.</p> <p>L'utilisation du calcul de la dose totale, des règles de fractionnement et la mise en réserve préconisée doivent être respectés pour que le diagnostic se fasse dans de bonnes conditions.</p>	
Autres champs d'actions couverts	Estimation du risque de verse et estimation du potentiel de rendement. Conseils Maladies (Piétin verse, Fusariose, Septoriose)	
Caractéristiques économiques		
Année de sortie	2003	
Prix de vente	7 à 14€/ha (≈10€/ha) selon densité de parcelles contractualisées	
Déploiement en 2015	Surface pilotée	Nombre d'utilisateurs
	448 000 ha (740 000 en comptant le colza et l'orge)	≈ 17 000 agriculteurs

Méthode d'évaluation et de calibration de l'outil

Protocole expérimental

Pour la construction / le paramétrage des modèles :

Quelques ressources, avec des références sur les essais utilisés :

- 1997 à 2000 : 1^{er} projet avec l'INRA, MATRA et ITCF (rapport E. De Chezelles) -> naissance du projet CROPSTAR blé
- travaux sur les modèles biophysiques d'inversion des modèles de transfert radiatif (OVERLAND)
- 2000 à 2002 : amélioration du conseil (rapport S. Vautrin) -> naissance de Farmstar
- 2010 à 2013 : mise au point de la méthode QN (rapports B. Brunet et B. Soenen) -> changement de méthode pour QN

Un grand nombre d'essais a servi à la validation des indicateurs et à la création des règles de décision du pilotage de l'apport montaison :

- soit des essais avec plusieurs doses N,
- soit le réseau interannuel permanent, toute France, d'essais de suivi physiologique, du blé tendre principalement, avec quelques variétés, (une seule dose N, 2 densités, et mesure de nombreux indicateurs dont l'INN à « Floraison »).

Pour la validation de l'outil :

La prise en compte de la résolution du capteur (20m pour les capteurs portés par satellite et avion, 20cm pour les capteurs sur l'arche de phénotypage ou drones) est primordiale pour déterminer le type d'essai à conduire.

Plusieurs types d'essais de validation ont pu être réalisés :

- Type 1 : Essais en bandes de 40m de large minimum dans des parcelles agriculteurs homogènes, avec différenciation uniquement de la fertilisation azotée sur le dernier apport sur la base de la préconisation QN (dose F) calculée, encadrée de +/- 40 kgN/ha : 1 bande avec la dose F- 40kgN/ha, 1 bande avec la dose F appliquée, 1 bande avec la dose F + 40 kgN/ha appliquée. Ces bandes peuvent être répétées dans la parcelle si sa taille le permet. Les acquisitions sont réalisées par satellite et avion.
- Type 2 : Essais en microparcelles et dispositifs en bloc sur des surfaces homogènes avec différenciation uniquement de la fertilisation azotée sur le dernier apport avec des modalités F-40, F et F+40 répétées. Les acquisitions sont réalisées par satellite et avion.
- Type 3 : Essais en microparcelles et dispositifs en bloc avec des doses d'azote croissantes appliquées, qui peuvent être différenciées avant l'acquisition. Les acquisitions seront suivies par des capteurs de résolution fine (arche de phénotypage ou capteur sur drone).

Les mesures effectuées sont :

- LAI et Cab par mesure de capteur
- INN (biomasse, %N) au moment de l'acquisition et à la floraison.
- Rendement à la récolte et teneurs protéiques des grains

Analyse des
résultats

L'approche globale qui a été utilisée pour valider la méthode QN dans FARMSTAR est la comparaison des performances de la préconisation Farmstar par rapport à la méthode classique des bilans, considérée ici comme la pratique de référence de la fertilisation azotée du blé sans utilisation du pilotage.

- Performance par rapport au rendement :

Les méthodes du bilan classique et FARMSTAR ont été comparées par rapport à l'atteinte de la dose optimale d'azote de l'essai (dose minimale d'azote pour maximiser le rendement). Pour cela deux types d'analyses ont été effectuées :

- Calcul de la dose optimale sur l'ensemble des points expérimentaux par ajustement quadratique-plateau de l'indice de rendement en fonction de l'écart à la dose conseillée pour les méthodes FARMSTAR et du bilan classique. La méthode la plus performante est celle pour laquelle la dose optimale est la plus faible.
- Calcul par essai de la dose optimale (par ajustement d'une courbe de réponse à l'azote sur les essais de type 3 ou égale à la modalité qui permet d'atteindre 97% du rendement maximal pour les essais de type 1 et 2) et comparaison par rapport à la dose calculée pour la méthode des bilans (X) et à la dose préconisée FARMSTAR (F). On calcule ensuite le pourcentage de situations dans les trois classes : « Doses X ou F inférieures à la dose optimale » / « Doses X ou F égales à la dose optimale » / « Doses X ou F supérieures à la dose optimale ». L'outil le plus performant est celui qui maximise les situations comprises dans la classe « Doses X ou F égales à la dose optimale ».

- Performance par rapport à la teneur en protéines.

Les méthodes du bilan classique et FARMSTAR ont été comparées par rapport à l'atteinte de la teneur en protéines maximale. La méthode la plus performante est celle qui permet d'atteindre le taux protéique le plus élevé.

4.3. Les outils de raisonnement dynamique de la fertilisation

4.3.1. Principe général

Le principe du raisonnement dynamique de la fertilisation azotée est basé sur l'ajustement des différents postes utilisés dans le bilan prévisionnel selon les conditions de l'année.

L'objectif de ces outils de raisonnement dynamique est donc de réduire les incertitudes liées aux estimations prises lors du calcul de la dose prévisionnelle comme :

- **Le potentiel de rendement** : en début de cycle, le potentiel de rendement est estimé sur l'historique de la parcelle. Ce potentiel peut être ajusté à la hausse ou à la baisse selon les événements de l'année, comme par exemple de très bonnes conditions climatiques qui ont permis un bon développement de la plante et qui permettent de revoir le potentiel de rendement à la hausse, ou à l'inverse, un problème parasitaire (champignon, échec dans le contrôle de la flore adventice ou attaque de ravageur) qui a réduit le potentiel de rendement prévu initialement.
- **Les fournitures du sol** : lors du calcul de la dose prévisionnelle, la minéralisation est calculée par type de sol selon les conditions d'une année climatique moyenne. Cette estimation peut être ajustée selon les conditions de l'année en cours, à la hausse, si les conditions climatiques sont plus favorables à la minéralisation qu'en année moyenne, ou à la baisse, si au contraire les conditions sont moins favorables qu'en année normale.

4.3.2. Les outils existants

Si un certain nombre de projets sont en cours de développement, il existe peu d'outils effectifs, basés sur ce principe. Deux outils ont été recensés dans le cadre de cette étude :

- Index-N® développé par Agro Conseil et le service pédologique de Belgique,
- AzoFert®, développé par L'INRA, le LDAR et L'ITB.

Index-N® AGRO CONSEIL		 AGRO CONSEIL S.A.	
Représentant légal	Service Pédologique de Belgique AGRO CONSEIL		
Concepteur(s)	Etape		Intervenant
	Développement de la méthode		Service Pédologique de Belgique
	Distribution en France		AGRO CONSEIL
Caractéristiques techniques			
Nature de l'indicateur	Raisonnement dynamique de la fertilisation		
Mode de fonctionnement	<p>L'Index-N® est une mesure de la quantité d'azote qui sera disponible pour la culture spécifique pendant la saison de croissance.</p> <p>Il est calculé selon 18 facteurs répartis en 3 groupes agissant les uns sur les autres avec plus ou moins d'impact selon les conditions du climat, les caractéristiques du sol et celles de la plante :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Groupe 1 : Réserve d'azote utile pour la culture : <ul style="list-style-type: none"> ○ Azote présent dans le sol (reliquat) ○ Azote déjà assimilé par la culture ○ Fumure azotée déjà appliquée au moment de l'échantillonnage • Groupe 2 : Facteurs influençant la disponibilité de l'azote <ul style="list-style-type: none"> ○ Migration de l'azote nitrique vers les couches sous-jacentes après l'échantillonnage ○ Battance ○ Travail du sol ○ pH ○ ... • Groupe 3 : Facteurs estimatifs de la minéralisation utile <ul style="list-style-type: none"> ○ Minéralisation de l'humus (en fonction du type de sol) ○ Minéralisation de la matière organique fraîche (résidu de récolte, fumure organique, engrais verts) ○ Minéralisation spécifique (arrière effet prairie, chaulage, ...) <p>A chaque étape du fractionnement, la dose est recalculée par le système expert en fonction de l'évolution des différents facteurs au cours de la culture (conditions climatiques, développement de la culture, changement d'une information agriculteur, ...). Le système de modélisation réévalue l'azote disponible dans chaque horizon, et permet d'ajuster la dose à appliquer au stade considéré. Pour des raisons de traçabilité, aucune modification manuscrite n'est autorisée, un nouveau bulletin de conseil est édité.</p>		
Cultures pilotées	Multicultures (hors prairie)		
Pilotage d'une date	Oui (le conseiller envoie une préconisation à chaque fractionnement)		
Pilotage d'une dose	Culture		Stade(s)
	Toute culture		A chaque stade (raisonnement dynamique)
Outil de calcul de dose prévisionnelle	Non		
Outil d'aide à la modulation intra parcellaire	Non (ce n'est pas un outil de modulation intra parcellaire en tant que tel, l'hétérogénéité peut être approchée selon l'échantillonnage, c'est pourquoi, la validité du conseil est limité à une surface maximale de 8ha)		
Utilisateurs cibles	Agriculteurs par l'intermédiaire du conseiller Agro Conseil		

Préconisations d'utilisation	Nécessite une formation à la méthode	
Autres champs d'actions couverts	Non	
Caractéristiques économiques		
Année de sortie	1977	
Prix de vente	Selon le nombre de conseils 165€ la prestation (ce qui revient à environ 20€/ha car limité à 8ha homogènes) La prestation inclut l'ensemble : échantillonnage, analyse, interprétation, conseil et accompagnement du conseil	
Déploiement en 2015	Surface pilotée	Nombre d'utilisateurs
	≈ 40 000 ha	≈ 1000 agriculteurs
Méthode d'évaluation et de calibration de l'outil		
Protocole expérimental	<p>La méthode a été développée d'abord en Belgique sur la base d'essais pluriannuels et multisites en microparcelles disposées en blocs aléatoires sur 4 répétitions. Les modalités diffèrent par la dose totale apportée et son fractionnement.</p> <p>Les mesures effectuées sont :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Les critères de rendement : Rendement, les composantes du rendement (poids de mille grains, nombre d'épis au m², ...), • Les critères de qualité • les critères technico-économiques (marges) • Les critères environnementaux (mesure de reliquats à différents stades). • Les critères biologiques (teneurs en azote de différents compartiments à différents stades) <p>Le conseil est paramétré pour obtenir l'optimum de rendement</p> <p>En France, le calage de la méthode selon le protocole scientifique des champs d'essais du Service pédologique de Belgique a été réalisé dans les années 70/80.</p> <p>Puis, à la demande des partenaires d'Agro Conseil (CETA, Distributeur, ...) souhaitant développer la méthode, des comparaisons de méthodes (Index-N, Dose bilan seule, autres outils) ont été mises en place.</p>	
Analyse des résultats	L'optimum de rendement est défini selon une analyse statistique pluriannuelle et selon la méthode quadratique.	

		
Représentant légal	LDAR / INRA / ITB	
Concepteur(s)	Etape	Intervenant
	Conception de la méthode Paramétrage	INRA / LDAR
	Validation	LDAR / INRA / ITB
	Diffusion	LDAR
Caractéristiques techniques		
Nature de l'indicateur	Raisonnement dynamique de la fertilisation	
Mode de fonctionnement	<p>AzoFert® est un logiciel d'aide à la décision pour la fertilisation azotée des cultures. Basé sur la méthode d'un bilan d'azote minéral complet, le logiciel interprète un fichier de données d'entrée :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Besoins totaux : <ul style="list-style-type: none"> ○ besoin de la culture en azote, ○ reliquat fermeture ; • Azote fourni par le sol : <ul style="list-style-type: none"> ○ azote absorbé à l'ouverture du bilan, ○ reliquat à l'ouverture, ○ minéralisation de l'humus, ○ arrière-effet prairie ; • Autres fournitures d'azote : <ul style="list-style-type: none"> ○ cultures intermédiaires, ○ résidus de culture précédente ○ apport par l'eau de pluie et d'irrigation, ○ effet direct des amendements organiques, ○ fixation symbiotique ; • Azote non utilisable : <ul style="list-style-type: none"> ○ lixiviation, ○ organisation microbienne, ○ volatilisation ; <p>AzoFert® fonctionne donc comme un logiciel de calcul d'une dose bilan d'azote minéral complet, mis à jour par les données de l'année culturale en cours. Au moment choisi par l'agriculteur ou le technicien, la dose est « recalculée » selon les caractéristiques de l'année. L'outil fournit une préconisation à l'unité près.</p> <p>Le raisonnement dynamique de la fertilisation est réalisé à plusieurs niveaux :</p> <ul style="list-style-type: none"> • la possibilité du réajustement de l'objectif de rendement en fonction des événements apparus depuis l'ouverture du bilan (ravageur, maladie, accident climatique, ...) • la modification des apports si le réalisé ne correspond pas au prévu, • la prise en compte des conditions climatiques de l'année <ul style="list-style-type: none"> ○ dans les cinétiques de dégradation des apports organiques, des résidus de culture, des cultures intermédiaires, ... ○ dans la minéralisation de l'humus 	

	L'utilisation du logiciel peut être réalisée à différents niveaux : <ul style="list-style-type: none"> • directement par l'agriculteur en renseignant une fiche papier ou en saisissant ses données via une interface web, • par l'intermédiaire de laboratoire d'analyses de reliquats azotés • par l'intermédiaire d'un bouquet de services informatiques (logiciels de traçabilité par exemple) En termes de traçabilité, les données sont conservées dans des serveurs sécurisés du LDAR.	
Cultures pilotées	Environ 40 cultures sont prises en comptes (en évolution)	
Pilotage d'une date	Non	
Pilotage d'une dose	Culture	Stade(s)
	Toute culture	A chaque stade (raisonnement dynamique)
Outil de calcul de dose prévisionnelle	Oui	
Outil d'aide à la modulation intra parcellaire	Oui, selon le format des données d'entrée (si les types de sol, ou les objectifs de rendements sont spatialisés, les conseils peuvent l'être)	
Utilisateurs cibles	Agriculteurs / Techniciens / Laboratoires	
Préconisations d'utilisation	L'outil est très précis et très sensible aux données d'entrée. Une formation à l'outil est donc très fortement recommandée.	
Autres champs d'actions couverts	Oui, l'outil permet aussi d'estimer des indicateurs environnementaux comme la volatilisation et la lixiviation	
Caractéristiques économiques		
Année de sortie	V1 en 2005	
Prix de vente	Variable selon la commercialisation (en direct, ou via une offre de service)	
Déploiement en 2015	Surface pilotée	Nombre d'utilisateurs
	≈ 700 000 ha	≈ 15 000 agriculteurs
Méthode d'évaluation et de calibration de l'outil		
Protocole expérimental	Chaque module de l'outil a d'abord été calibré sur la base des essais de l'INRA, pour tester la fiabilité des calculs. La validation des préconisations a été réalisée sur un grand nombre d'essais de plein champ (essais internes + essais utilisateurs) sur la base de courbe de réponse à une dose d'azote. Les préconisations ont été paramétrées sur la base d'une dose d'azote optimale (à posteriori) basée sur le critère rendement + qualité (par exemple rendement sucre pour la betterave) Les mesures effectuées pour les essais de validation sont : <ul style="list-style-type: none"> • Les critères de rendement : Rendement, les composantes du rendement (poids de mille grains, nombre d'épis au m², ...), • Les critères de qualité • Les critères environnementaux (mesure de reliquats post récolte). 	
Analyse des résultats	L'optimum de rendement est défini selon une analyse statistique pluriannuelle selon la méthode quadratique + plateau	

5. Synthèse des outils recensés

5.1. Caractéristiques

Il existe une multitude d'outils complémentaires aux outils de calcul d'une dose prévisionnelle d'azote, basés sur différents principes :

- mesure du stock d'azote disponible dans le sol ;
- mesure sur le végétal :
 - résistance du couvert,
 - indicateur de croissance,
 - changement de couleur de la culture par rapport à une zone témoin,
 - teneur en nitrate du jus de base de tige ou du pétiole,
 - transmittance,
 - fluorescence,
 - réflectance ;
- raisonnement dynamique ;

et capable de remplir une ou plusieurs fonctions :

- estimation du poste « azote absorbé » à l'ouverture du bilan,
- pilotage d'une date d'apport,
- pilotage d'une dose d'apport,
- spatialisation d'une dose en fonction de l'hétérogénéité de la parcelle.

En résumé, il existe une grande diversité d'outils, tant dans leur principe de fonctionnement, dans les fonctions qu'ils remplissent, que dans leur ancienneté (Jubil a plus de 20 ans d'existence, et d'autres sont en cours de développement) et leur niveau de déploiement (de quelques hectares à plusieurs centaines de milliers d'hectares). Certains outils peuvent être basés sur le même matériel de mesure, mais se différencient dans les règles d'interprétation de la mesure réalisée.

A quelques exceptions près (outils utilisés en légumes, outils de raisonnement dynamique), les outils capables d'ajuster une dose d'azote en cours de végétation permettent le pilotage des apports de fin de cycle de la culture du blé. Il existe encore assez peu de solutions pour piloter les autres apports et les autres cultures.

De plus, une majorité d'outils utilisent la même stratégie, c'est-à-dire le calcul d'une dose prévisionnelle à l'ouverture du bilan, avec une mise en réserve d'environ 40 unités d'azote en fin de cycle, et un ajustement de cet apport, à la hausse ou à la baisse, selon la mesure réalisée par l'outil.

Le tableau suivant synthétise les différents outils recensés selon leur principe de fonctionnement et selon les fonctions qu'ils remplissent.

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE DE L'AGROALIMENTAIRE ET DE LA FORÊT
RECENSEMENT ET ANALYSE DES OUTILS DE RAISONNEMENT DYNAMIQUE ET DE PILOTAGE DE LA FERTILISATION AZOTÉE

Principe de fonctionnement	Nom	Représentant	Stratégie initiale	Surfaces pilotées en 2015	Cultures pilotées						
						Calcul dose prévisionnelle	Estimation "azote absorbée" à l'ouverture du bilan	Pilotage d'une date d'apport	Ajustement de dose en cours de campagne	Spatialisation d'une dose	Traçabilité du conseil
Disponibilité en azote du sol	Grille Zénit®	SERAIL / CTIFL	Calcul d'une dose prévisionnelle à un stade clé pour atteindre la récolte ou un autre stade clé en fonction de la disponibilité en azote du sol au stade clé	?	Ail d'automne, Aubergine, Blette, Cardon, Céleri branche, Céleri rave, Chicorée d'été, Chou cabus, courgette de plein champ, Laitue, Melon, Oignon, Poireau.	X	X	X	X		X
Indicateur de croissance	Réglette azote	Terres Inovia	Calcul d'une dose prévisionnelle avec estimation de la biomasse du colza à l'ouverture du bilan	?	Colza	X	X				
Changement de couleur	HELIOTEST®	Terres Inovia	Détection d'une carence azotée par comparaison d'une bande fertilisée au semis, avec le reste de la parcelle non fertilisée au semis	NC	Tournesol	X		X	X		
	Bande double densité	CRAL Agro-Transfert	Détection précoce d'un besoin en azote par comparaison d'une bande dense par rapport au reste de la parcelle	?	Blé			X			
Teneur en Nitrate du jus de bas de tige	JUBIL®	INRA / Anvalis institut du végétal	Calcul d'une dose prévisionnelle (à l'aide d'un autre outil) avec une mise en réserve de 40 uN, puis ajustement de la dose en fonction de la mesure	NC	Blé tendre (BAU, BPS, BPC, BB), blé dur, orge de printemps, maïs grain, pomme de terre			X	X		
	Ramses® / Ramses II®	SMAG (Smart Agriculture)	Calcul d'une dose prévisionnelle avec une mise en réserve de 40 uN, puis ajustement de la dose en fonction de la mesure	≈ 100 000 ha	Céréales d'hiver : blés, orges, triticales et seigles	X		X	X		X
Teneur en nitrate du pétiole	PILazo®	Centre Technique interprofessionnel des Fruits et Légumes	Calcul d'une dose prévisionnelle avant la mise en culture et ajustement de la dose en fonction de la mesure	NC	Aubergine, carotte, choux-fleur d'hiver, fraiser, melon, poivron, pomme de terre primeur, tomate, fraiser/production de fruits et pépinière de plants	X		X	X		X
Transmittance	Méthode Yara N-Tester®	Yara France, Yara International	Calcul d'une dose prévisionnelle (à l'aide d'un autre outil) avec une mise en réserve de 40 uN, puis ajustement de la dose en fonction de la mesure	≈ 600 000 ha	Blé tendre d'hiver, blé améliorant, blé dur, orge de printemps brassicole, maïs grain, pomme de terre			X	X		X
	NS-Digites®	SMAG (Smart Agriculture)	Calcul d'une dose prévisionnelle (à l'aide d'un autre outil) avec une mise en réserve de 40 uN, puis ajustement de la dose en fonction de la mesure	≈ 20 000 ha	Blé tendre d'hiver, blé dur				X		X
Fluorescence + transmittance	Dualex®	Force A	Calcul d'une dose prévisionnelle (à l'aide d'un autre outil) avec une mise en réserve de 40 uN, puis ajustement de la dose en fonction de la mesure	De 30 à 50 0000 ha	Blé tendre d'hiver et vigne				X		

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE DE L'AGROALIMENTAIRE ET DE LA FORÊT
RECENSEMENT ET ANALYSE DES OUTILS DE RAISONNEMENT DYNAMIQUE ET DE PILOTAGE DE LA FERTILISATION AZOTÉE

Principe de fonctionnement	Nom	Représentant	Stratégie initiale	Surfaces pilotées en 2015	Cultures pilotées						
						Calcul dose prévisionnelle	Estimation "azote absorbée" à l'ouverture du bilan	Pilotage d'une date d'apport	Ajustement de dose en cours de campagne	Spatialisaiton d'une dose	Traçabilité du conseil
Réflectance	N-Pilot® / GPN-Pilot®	Borealis L.A.T.	Calcul d'une dose prévisionnelle (à l'aide d'un autre outil) avec une mise en réserve de 40 uN, puis ajustement de la dose en fonction de la mesure	NC	Blé tendre, blé dur, blé de force, orge d'hiver, orge de printemps, triticale, colza (pour le N-Pilot®)		X Colza	X	X		X
	GREENSEEKER HANDHELD	Trimble	Calcul d'une dose prévisionnelle (à l'aide d'un autre outil) avec une mise en réserve de 40 uN, puis ajustement de la dose en fonction de la mesure	NC	Blé tendre d'hiver et blé améliorant		X Colza	X	X		X
	GREENSEEKER RT 200	Trimble	Calcul d'une dose prévisionnelle avec une mise en réserve de 40 uN, puis ajustement de la dose en fonction de la mesure	NC	Mais, Blé, Colza, Vignes		X Colza		X	X	X
	CROSENSOR ISARIA	CLAAS France SAS	Mesure de l'azote absorbé au moment du passage, et calcul de la dose d'azote nécessaire pour atteindre le stade d'apport suivant ou la récolte	≈ 600 ha	Toutes les cultures « en vert » (blé tendre, blé dur, orge, avoine, triticale, soja) et éventuellement herbe et colza.	X	X Colza		X	X	X
	N-Sensor® et N-Sensor-ALS®	Yara International	Modulation intraparcelle d'une dose d'azote « pivot »	≈ 50 000 ha	Blés d'hiver, orges d'hiver, triticales, seigles, blé de printemps et orges de printemps, colza, pomme de terre, maïs, canne à sucre, coton		X			X	X
	Technologie Airinov	Airinov	Calcul d'une dose prévisionnelle (à l'aide d'un autre outil) avec une mise en réserve de 40 uN, puis ajustement de la dose en fonction de la mesure	85 000 ha	Colza, blé tendre, blé dur et orge		X Colza		X	X	X
	Mes dron'im@ges	Assemblée permanente des chambres d'agriculture (APCA)	Calcul d'une dose prévisionnelle (à l'aide d'un autre outil) avec une mise en réserve de 40 uN, puis ajustement de la dose en fonction de la mesure	11 000 ha	Colza, blé tendre d'hiver		X Colza		X	X	X
	AGRO-RENDEMENTS®	Drone agricole	Calcul d'une dose prévisionnelle avec une mise en réserve de 40 uN, puis ajustement de la dose en fonction de la mesure	75 000 ha	Blé tendre d'hiver, colza	X	X Colza		X	X	X
	Farmstar	Arvalis Airbus D et S	Calcul d'une dose prévisionnelle avec une mise en réserve de 40 uN, puis ajustement de la dose en fonction de la mesure	740 000 ha	Blé tendre, Blé dur, Blé améliorant, Orge et Colza	X	X Orge et Colza		X	X	X
Raisonnement dynamique de la fertilisation	Index-N®	Service Pédologique de Belgique, AGRO CONSEIL	Recalcul de la dose à chaque étape du fractionnement en fonction de l'évolution de différents critères (conditions climatiques, développement de la culture, ...)	≈ 40 000 ha	Multicultures (hors prairie)		X	X	X		X
	AzoFert®	INRA / LDAR / ITB	Recalcul de la dose à chaque étape du fractionnement en fonction de l'évolution de différents critères (conditions climatiques, développement de la culture, ...)	≈ 700 000 ha	Environ 40 cultures (en évolution)	X	X		X	X	X

5.2. Analyse transversale des essais de calibration et de validation des outils recensés

L'objectif de cette étude n'étant pas de « valider » les outils, mais plutôt de comprendre les méthodes de développement utilisées, il n'a pas été demandé aux concepteurs, l'ensemble de leurs résultats d'essai ou de calibration. Leur analyse devra être réalisée lorsque la méthode de validation sera clairement définie. Cette analyse transversale a donc été réalisée sur les résultats des enquêtes menées auprès des concepteurs.

Une des premières analyses de ces enquêtes est qu'il existe une disparité assez forte sur les méthodes de calibration et de validation des outils recensés, sur leur principe de base, sur leurs fonctionnalités, sur leur déploiement, mais aussi sur leur stratégie de calibration ou de développement.

Si la plupart des outils ont été développés dans les conditions pédoclimatiques et économiques françaises, d'autres ont été évalués et calibrés à l'étranger (Allemagne, États-Unis, Belgique), puis testés en France par différents acteurs (CETA, Chambres d'agriculture, ...).

La grande majorité des outils (du moins, ceux pour lesquels l'analyse des protocoles expérimentaux a été possible) ont été développés sur la base d'essais en microparcelles disposées en blocs aléatoires de 4 répétitions ou en bandes parcellaires pour les outils permettant de spatialiser les doses. Les essais ont généralement été réalisés sur différents sites et sur plusieurs années.

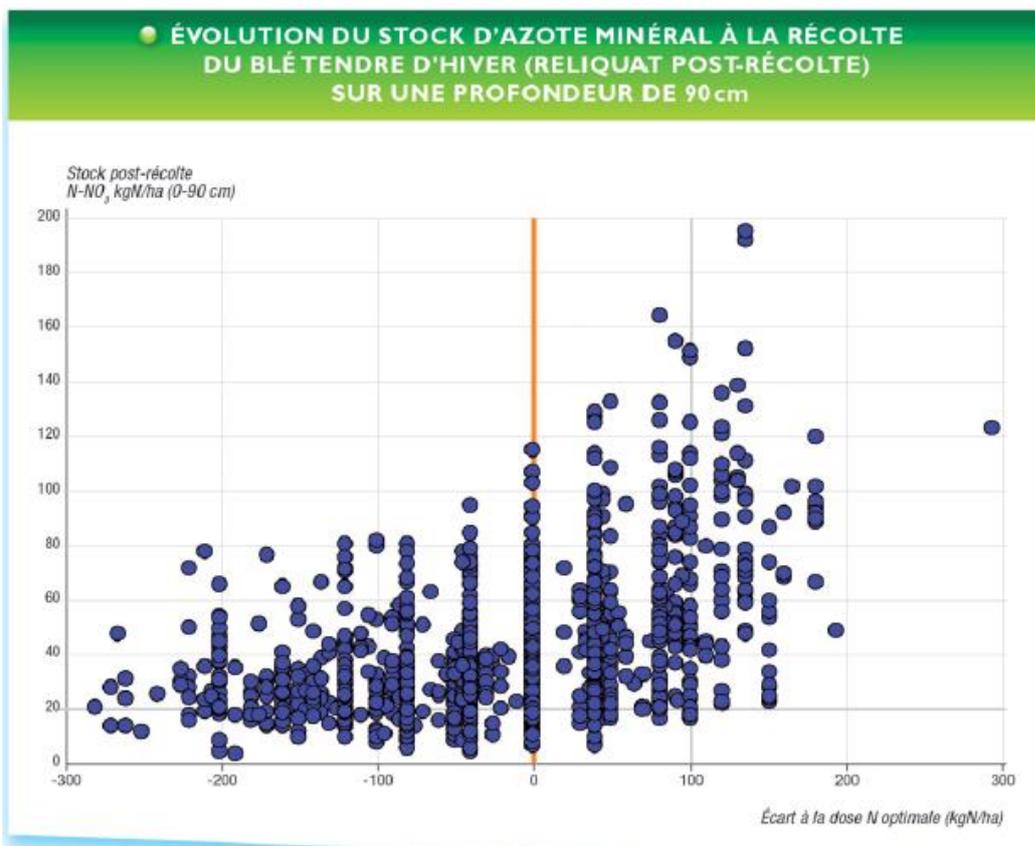
L'estimation des doses préconisées a généralement été réalisée selon des courbes de réponse du rendement (et de la qualité pour certains outils) à l'azote (Dose bilan X, X-80, X-40, X+40, ...). La dose optimale est généralement déterminée selon l'analyse statistique quadratique.

Les critères mesurés sont :

- les critères de rendement : rendement, les composantes du rendement (poids de mille grains, nombre d'épis au m², ...), la biomasse, ...,
- les critères de qualité (teneur en protéines des grains, généralement, car la plupart des outils sont développés sur le blé).

Concernant les critères environnementaux, les reliquats post-récoltes sont parfois mesurés, mais pas de manière systématique.

La grande majorité des outils ont été conçus pour améliorer l'efficacité de la fertilisation, c'est-à-dire pour permettre aux exploitants agricoles d'avoir la meilleure productivité possible avec le minimum d'azote. Ils sont donc calibrés pour atteindre un rendement maximal (ou un rendement commercial maximal prenant en compte le rendement et la qualité), avec le minimum d'azote possible, et non pas un impact environnemental minimal. Même si, selon une étude menée par le COMIFER en 1997, le stock d'azote minéral à la récolte du blé tendre d'hiver (aussi appelé reliquat post-récolte) n'augmente de façon significative qu'à partir du moment où on applique des doses supérieures à la dose optimale technique. En effet, l'interprétation de la courbe est sujette à caution, et mériterait d'être confirmée par une analyse statistique rigoureuse.



Graphique 1 : évolution du stock d'azote minéral à la récolte du blé tendre d'hiver (reliquat post-récolte) sur une profondeur de 90 cm en fonction de l'écart de dose d'azote appliquée par rapport à la dose optimale technique. Source : étude COMIFER 1997 (1271 données élémentaires)

Les essais de développement et de validation des outils ne sont donc pas suffisants pour répondre à un double objectif : une meilleure productivité et un impact environnemental minimal.

6. Pistes de réflexion pour une méthode d'évaluation

Ce chapitre a pour objet de proposer des pistes de réflexion pour la mise en place d'une méthode d'évaluation des outils de raisonnement dynamique et de pilotage de la fertilisation azotée en cours de végétation, qui permettent de répondre à la question suivante :

«En comparaison avec une situation, où, seul le calcul prévisionnel de la dose d'azote est utilisé, l'utilisation d'un outil de raisonnement dynamique et/ou de pilotage de la fertilisation azotée en cours de végétation, permet-elle d'améliorer l'efficacité de la fertilisation, sans impact négatif sur l'environnement ?»

Il ne s'agit donc pas ici de proposer une méthode de validation mais de présenter les éléments permettant sa mise en place.

6.1. Propositions de critères d'évaluation

La problématique posée présente deux objectifs différents :

- l'outil permet-il d'améliorer l'efficacité de la fertilisation azotée ?
- l'outil permet-il de diminuer les risques environnementaux, par rapport à une situation où seul le calcul prévisionnel de la dose d'azote est utilisé.

L'évaluation devra se faire sur ces deux objectifs.

6.1.1. Les critères d'évaluation de l'efficacité de la fertilisation

Les critères utilisés pour l'évaluation sont :

- le rendement,
- la qualité,
- la marge brute de la culture, mais plus difficile à mettre en place.

6.1.1.1. Le rendement

Le rendement est la masse de produit récolté sur une surface cultivée donnée. En grandes cultures, le rendement est calculé à une humidité standard (par exemple 15% pour les céréales).

L'avantage de ce critère est qu'il est relativement simple à évaluer, notamment pour les grandes cultures, sur lesquelles la plupart des outils existants officient.

Dans un certain nombre d'essais, le rendement est évalué conjointement à ses composantes (poids spécifique, poids de mille grains, biomasse, densité, nombre d'épis au m², ...).

6.1.1.2. La qualité

Selon les cultures ou leur destination, le critère rendement peut ne pas être suffisant, le produit agricole est généralement associé à des impératifs de qualité.

La qualité regroupe l'ensemble des critères propres à chaque culture permettant sa valorisation dans une filière spécifique.

Le blé étant la culture la plus pilotée, le taux de protéines est le critère de qualité le plus étudié, surtout si la filière de distribution nécessite un niveau minimal de qualité.

Il existe cependant, une multitude de critères de qualité selon la culture considérée (taux huile pour le colza, calibre et protéine pour l'orge, calibre de la pomme de terre, taux de sucre des fruits, ...).

6.1.1.3. La marge brute

La marge brute évalue la rentabilité d'une culture. C'est la différence entre le produit brut (rendement * prix) et les intrants. Ce critère est important, car il permet d'estimer la compétitivité économique de l'itinéraire cultural.

Ce critère est très délicat à prendre en compte, car il est soumis aux **fortes fluctuations** des prix du produit agricole et de l'engrais azoté, et peut donner des résultats très différents (à rendement, qualité égale) d'une année sur l'autre et d'une exploitation à l'autre.

Si la marge brute est un critère intéressant, elle reste difficile à mettre en œuvre en tant que critère de validation.

6.1.1.4. L'efficacité de l'utilisation de l'azote

Pour caractériser l'efficacité de la fertilisation, la notion « d'efficacité d'utilisation de l'azote » est régulièrement retrouvée dans la littérature scientifique.

Le CAU

L'un des indicateurs que l'on retrouve est le coefficient apparent d'utilisation de l'azote (CAU) qui permet d'estimer la part de l'apport d'engrais valorisé par la culture. Pour cela, on quantifie l'accroissement de l'absorption d'azote permis par un apport en comparaison à une situation non fertilisée :

- $CAU = (QN_D - QN_0) / D$
 - CAU : Coefficient apparent d'utilisation
 - D : Fertilisation en kg N / ha
 - QN_D : Azote absorbé pour une fertilisation de D
 - QN_0 : Azote absorbé en l'absence de fertilisation

Le CRU

Le CAU représente le coefficient apparent de l'utilisation de l'engrais en estimant que les fournitures d'azote par le sol soient indépendantes des apports d'engrais. Pour déterminer le coefficient réel d'utilisation (CRU), il faut avoir recours au marquage isotopique ¹⁵N. Cependant, en situation fertilisée, l'azote fourni par le sol est supérieur au QN_0 . Il existe une interaction entre les apports d'azote et la fourniture d'azote par le sol. Une partie des besoins en azote de la microflore du sol est assurée par l'azote de l'engrais alors que la biomasse microbienne restitue de l'azote minéral utilisé par la culture (Limaux, 1999; Recous et al. 1997). Le CAU est globalement proportionnel au CRU tout en étant plus facilement accessible à des dispositifs expérimentaux de plein champ.

Bons indicateurs pour estimer l'efficacité de la fertilisation, mais pas suffisant pour estimer l'impact sur l'environnement

La dose d'azote doit être prise en considération, pour estimer un impact sur l'environnement. En effet, une très forte dose appliquée en situation de forte efficacité peut avoir plus d'impact qu'une dose faible appliquée en situation d'efficacité moyenne.

Exemple :

dose apportée	Valorisation par la culture	dose résiduelle
100	80%	20
30	60%	12

Le complément à 100 du CAU $[(1-\text{CAU}) \times \text{Dose}]$ permet d'estimer cette dose résiduelle, et sera traité dans le chapitre suivant.

6.1.2. Les critères d'évaluation environnementaux

De mauvaises pratiques de fertilisation qui engendrent un excès d'azote par rapport aux besoins des cultures provoquent des impacts négatifs sur l'environnement :

- **dégradation de la qualité des eaux** (lixiviation du nitrate) et eutrophisation des milieux aquatiques,
- **dégradation de la qualité de l'air** (volatilisation d'ammoniac et d'oxydes d'azote),
- **augmentation des émissions de gaz à effet de serre** (volatilisation de protoxyde d'azote),
- **surconsommation d'énergie** liée à la production des engrais azotés utilisés en excès.

La quantification des impacts environnementaux de la fertilisation azotée a fait l'objet de nombreuses recherches, notamment en matière d'impact sur l'eau et l'air. Cependant, ces expérimentations ont été principalement réalisées dans le cadre d'analyse d'impacts de systèmes cultureux, et très peu dans le cadre d'analyse comparative d'optimisation de la fertilisation.

D'autres critères environnementaux comme la consommation d'énergie, l'occupation des sols, l'acidification des sols, l'eutrophisation des milieux ou encore l'écotoxicité n'ont pas été utilisés dans le panel d'études analysées, excepté dans l'étude portant sur l'analyse du cycle de vie (mais ils n'ont alors pas fait l'objet de mesures directes et ont été déduits de travaux précédents).

Les essais expérimentaux que nous avons pu analyser dans le cadre de cette étude ont pris en compte exclusivement les **trois premiers critères cités ci-dessus**.

Les chapitres suivants synthétisent les différentes méthodes de quantification de perte d'azote :

- sur la qualité des eaux,
- sur la qualité de l'air,
- par modélisation,
- par le complément à 100 du CAU.

6.1.2.1. Qualité des eaux

Pour étudier l'impact environnemental de la fertilisation sur les masses d'eaux, les scientifiques recourent soit :

- au flux d'azote dans les eaux de ruissellement,
- à la concentration en ammonium et nitrate dans les lixiviats.

La quantification de la lixiviation d'azote a fait l'objet de nombreuses recherches méthodologiques, basées sur des mesures directes ou indirectes (bilan statique, modèle dynamique, traçage isotopique).

L'objectif de cette étude étant de déterminer des critères d'évaluation utilisables sur le plus grand nombre de situations possibles, les méthodes destinées aux sites expérimentaux (lysimètre fermé, dispositifs de drainage artificiel, ..) ne seront abordées que très partiellement car elles nécessiteraient une logistique trop importante.

6.1.2.1.1. Les lysimètres ouverts

Un lysimètre est un dispositif permettant de mesurer l'évolution de l'eau dans un sol.

Il existe deux types de lysimètres :

- le lysimètre fermé, microparcelle isolée hydrologiquement qui comporte 4 faces verticales étanches, la face inférieure étant constituée d'une plaque drainante qui sert au recueil de l'eau et des percolats,
- le lysimètre ouvert, plaque drainante installée à la profondeur maximale d'enracinement.



Figure 4: Lysimètres ouverts avec mèche en fibre de verre ; source : INRA

Si leur nombre de répétitions est suffisant, les lysimètres ouverts permettent de recueillir des eaux de percolation représentatives de la parcelle (Brandi-Dohrn et al., 1997 ; Feaga et al., 2009). Cependant, les aspects pratiques dus à leur pose et aux prélèvements des eaux de percolation, les rendent difficilement utilisables à une large échelle.

6.1.2.1.2. Les bougies poreuses

La bougie poreuse est un dispositif de prélèvement de l'eau libre du sol, formé d'une tête de prélèvement en céramique poreuse et d'un tube en PVC fonctionnant comme une chambre de mise en dépression, pour récolter l'eau du sol à travers la céramique (Ballif et Muller, 1990).

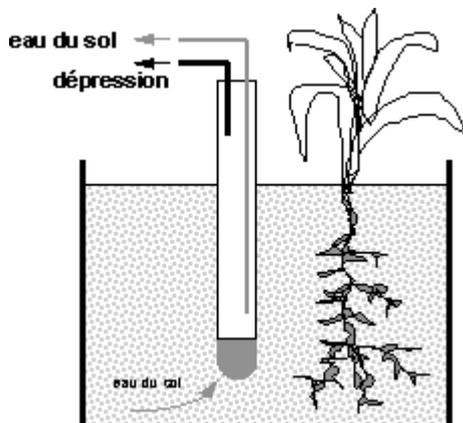


Figure 5: schéma de bougie poreuse ; source : INRA

Les bougies poreuses permettent de mesurer la concentration en azote de l'eau libre du sol qui peut différer de la concentration moyenne de la solution du sol (Garnier et al., 2001). Pour déterminer le flux de nitrate, il est donc nécessaire en complément de mesurer (à l'aide de lysimètres annexes) ou d'estimer (bilan hydrique) le flux d'eau percolé.

L'avantage de cette méthode est qu'elle permet de recueillir très rapidement et régulièrement les échantillons d'eau.

La limite principale de cette méthode est qu'elle nécessite un sol filtrant (pas trop argileux, ni trop caillouteux).

6.1.2.1.3. Le carottage du sol

Cette méthode consiste à déterminer la concentration en azote d'un sol sur tout ou partie de son profil. Pour calculer un flux d'azote, à partir des données d'analyse des carottes de prélèvement, il est nécessaire en complément de calculer ou d'estimer le flux d'eau.

Cette méthode est relativement simple à mettre en place, mais nécessite des répétitions (une douzaine de prélèvements par échantillon) pour assurer une bonne représentativité, ce qui est coûteux en temps de travail.

Cette méthode est utilisée dans la plupart des essais « azote » et dans les programmes d'actions de territoires « sensibles » (Zones d'Actions Renforcées, Captages Grenelles, bassins algues vertes, ...) par l'utilisation de reliquats post récoltes (ou reliquats post absorption).

Les prélèvements sont réalisés après la récolte de la culture en place (ou après la période d'absorption) mais avant le lessivage vers les nappes, la mesure du reliquat post-récolte permet de doser l'azote minéral du sol n'ayant pas été utilisé par la culture en place et donc d'estimer la pertinence d'une stratégie de fertilisation a posteriori.

6.1.2.2. Qualité de l'air

Les flux d'azote liés à la volatilisation au champ peuvent être estimés selon différentes stratégies, dont la plupart ne peuvent être mises en œuvre que sur des sites expérimentaux (enceintes de mesure, méthode micrométéorologiques, marquage isotopique).

Une autre approche méthodologique (Cohan et al 2013) basée sur l'utilisation de capteurs passifs (badges ALPHA), permettant de mesurer les concentrations en ammoniac, couplés à la modélisation de flux d'ammoniac, méthodes par gradients (Flechard and Fowler 1998; Sutton et al. 2000) et modèle de diffusion FIDES (Loubet et al. 2001 et 2010), permet son utilisation au champ sur des unités de surface restreintes (400m²).



Figure 6 : Badges ALPHA ; Source Arvalis

Cette dernière technique présente l'avantage d'être relativement peu coûteuse (en comparaison avec les autres méthodes de mesures de volatilisation) et d'être déployées sur plusieurs sites expérimentaux.

La question sur la pertinence d'utiliser ce critère pour évaluer l'impact environnemental d'un outil d'aide à la décision se pose, car, comme nous l'avons vu dans le chapitre 2.1, les pertes par volatilisation sont dépendantes de différents facteurs et il est très difficile (voire impossible) de définir quel impact présente l'utilisation de l'outil par rapports aux autres facteurs (type d'engrais, mode d'apport, type de sol, ...).

6.1.2.3. Evaluation des pertes par modélisation

Les modèles utilisés permettent de comparer les pertes d'azote (par volatilisation, lixiviation) au rendement obtenu (cas des modèles STICS, WHCNS⁵, Hydrus-1D⁶, SPWS⁷); voire d'évaluer uniquement le rendement (cas du modèle de croissance C3⁸).

■ Quels sont les données d'entrée ?

Les données requises en entrée sont relativement nombreuses : date de plantation ou de semis, méthode de semis, densité, dose d'irrigation, dose de fertilisant, type de travail du sol, enfouissement des pailles de la culture précédente... Ces données permettent de réaliser des simulations en utilisant un modèle qui est calibré au fur et à mesure, par l'intermédiaire d'expérimentation en champs nécessitant plusieurs répliques d'un même test pour différents itinéraires culturaux.

■ Quelles sont les données en sortie ?

Les modèles délivrent des résultats sur le rendement, la sortie totale en azote (parfois détaillée par poste : minéralisation, ammoniac volatilisé, dénitrification, nitrate perdu dans le ruissellement, assimilation par la plante, lixiviation), l'efficacité de l'utilisation de l'eau et l'efficacité de l'utilisation de l'azote.

■ Quelles sont les hypothèses de travail (utilisation d'autres modèles, ...) ?

Les modèles se réfèrent à de nombreux travaux antérieurs leur permettant d'approcher les phénomènes de dégradation, de transport des solutés etc... Certains paramètres sont ainsi pris initialement dans la littérature, puis corrigés en fonction des données observées. Des hypothèses sont prises (les taux de nitrification et dénitrification sont les mêmes dans toutes les couches de sol) puis réajustées au regard des résultats observés.

Sont ainsi utilisés, par exemple, l'évaluation de l'évapotranspiration potentielle, l'estimation de l'infiltration (Green & Ampt), la redistribution de l'eau dans le sol (équation de Richards), l'évaluation du ruissellement (approche du NRCS)...

■ Quels sont les besoins d'instrumentation/métriologie ?

Les phases de calibration ou validation des modèles se font généralement sur 2 saisons a minima. Elles nécessitent un recours important aux prélèvements et analyses à l'aide d'un matériel spécifique.

Ainsi, les profils de sol sont réalisés, avec analyse des propriétés physico-chimiques (densité, pH, m.o...), utilisation de mesures de réflectance (taux d'humidité du sol), de spectrophotométrie (K disponible), analyseur de flux....

La collecte des eaux de ruissellement, de la solution de sol, le piégeage de l'azote par des pièges à H₂SO₄, ainsi que les prélèvements successifs de certaines parties de la plante pour mesurer sa biomasse et sa concentration en azote, ou encore la mesure de la surface foliaire sont autant d'indicateurs nécessaires. Une métriologie spécifique doit donc être déployée.

Chacun des modèles expérimentés semble concluant dans les limites de l'expérimentation réalisée, c'est-à-dire correspondant à certaines aires géographiques, certaines cultures... Il est nécessaire de réaliser de nouveaux essais de terrain pour étendre la validité de ces modèles à d'autres systèmes de cultures.

⁵ Evaluation of water and nitrogen use efficiencies in a double cropping system under different integrated management practices based on a model approach, Zhoujin Li & al. 2014

⁶ Evaluation of nitrogen balance in a direct-seeded-rice field experiment using Hydrus-1D, Yong Li & al., 2014

⁷ Evaluation of nitrogen fate, water and nitrogen use efficiencies of winter wheat in North China Plain based on model approach, Liang Jin a al., 2014

⁸ Testing the use of an analytical and mechanistic C3-biomass accumulation model for precision fertilization, Mikko Hakojärvi & al., 2014

6.1.2.4. Indicateur simple, le complément à 100 du CAU

Pour déterminer les pertes d'azote issues de l'engrais, il existe un autre indicateur : le complément à 100 du CAU. Comme indiqué au chapitre [2.1, p 5](#), il existe une compétition entre l'absorption de l'azote par la plante, l'organisation, les pertes par voies gazeuses et la lixiviation. Le complément à 100 du CAU intègre ces pertes.

- $(1-\text{CAU}) \times D = \Delta R_f + G_x + I_x + L_x$
 - CAU : Coefficient apparent d'utilisation,
 - D : Fertilisation en kg N / ha,
 - $\Delta R_f = \text{RPR}_D - \text{RPR}_0$ (stock d'azote minéral du sol après récolte par rapport à une culture non fertilisée),
 - G_x : les pertes par voies gazeuses,
 - I_x : pertes par organisation (Immobilisation),
 - L_x : pertes par Lixiviation.

Ce critère peut donc être concevable comme critère de validation, car il ne nécessite pas de mise en œuvre trop importante pour une expérimentation de plein champ, et constitue une bonne approche pour mesurer l'efficacité d'un apport.

6.1.3. Les critères proposés

Pour répondre au double objectif de la problématique de cette étude :

- l'outil permet-il d'améliorer l'efficacité de la fertilisation azotée ?
- l'outil permet-il de diminuer les risques environnementaux, par rapport à une situation où seul le calcul prévisionnel de la dose d'azote est utilisé.

Les critères à prendre en compte doivent donc être a minima :

- le rendement,
- la qualité (critères à définir selon la production),
- le complément à 100 du CAU.

6.2. Les approches d'évaluation possibles

La recherche bibliographique et technique réalisée dans le cadre de cette étude a permis de déterminer l'existence de méthodes d'évaluation d'outils portant sur des critères techniques, économiques ou environnementaux. Cependant, il ne semble pas y avoir de méthodes d'évaluation portant simultanément sur les 3 critères.

6.2.1. Recommandations opérationnelles pour la mise en place d'une méthode d'évaluation

La mise en œuvre d'une méthode de validation nécessite la nomination d'une expertise technique, dont le but sera de déterminer le cahier des charges de la validation d'un outil :

- choix définitifs des critères et de leur niveau de tolérance⁹,
- choix des caractéristiques obligatoires de l'outil (traçabilité, respect des préconisations d'utilisation, ...),
- ...

Pour sa composition, cette expertise technique devra être constituée de membres présentant les compétences suffisantes dans les différents domaines concernés par cette validation (par exemple : spécialistes de la fertilisation azotée, utilisateurs potentiels (agriculteurs, techniciens, ...), contrôleur potentiel (DDT(M)), les DRAAF, ...) tout en assurant une neutralité afin d'éviter les conflits d'intérêts.

6.2.2. Comparaison dose recommandée à une dose optimale

La méthode la plus employée actuellement pour évaluer la pertinence d'un outil de pilotage, est la comparaison de la dose préconisée par l'outil avec une dose jugée optimale, c'est-à-dire la dose d'azote minimale à apporter pour maximiser le rendement.

Cette méthode consiste à la mise en place d'essais de courbe de réponse à l'azote généralement menés en dispositif en bloc, factoriel avec 4 répétitions comprenant :

- différentes modalités de fertilisation croissante, dont le pas et le maximal est à définir selon les cultures (espèce + destination commerciale),
- une modalité basée sur le calcul de la dose prévisionnelle (méthode de référence),
- une (ou des) modalité(s) basée sur la (les) dose(s) pilotée(s) par l' (les)outil(s) testé(s).

Le principal avantage de cette méthode réside dans le fait qu'elle est utilisée pour le développement de la plupart des outils commercialisés en France. Le choix de cette méthode éviterait pour ces outils une nouvelle série d'essais de validation.

⁹ Par exemple, l'outil n'augmente pas le reliquat post absorption dans 80% (100%, 50% ?) des cas.

Le principal inconvénient de cette approche réside dans le fait que l'optimum n'est valable que pour un critère mesuré (ce qui se conçoit parfaitement dans le cadre du développement des outils, dont le but principal est d'améliorer la productivité des cultures avec le minimum d'intrant azoté).

Or, la question posée ajoute une dimension environnementale, et l'approche doit répondre au double objectif « productivité et environnement ». Il y aura donc plusieurs doses optimales selon les critères pris en compte (rendement, qualité, environnement, ...), et la validation d'un outil devra être le résultat de « compromis », donc d'une hiérarchisation de l'importance des critères.

De plus, la détermination d'une dose optimale dépend aussi de l'analyse statistique de la courbe de réponse. Par exemple, dans une étude de comparaison entre la méthode du bilan simplifié et la méthode du bilan sur le calcul de la dose prévisionnelle sur Colza (Makowski et al, 2005), la valeur optimale change selon le choix du modèle de réponse à l'azote.

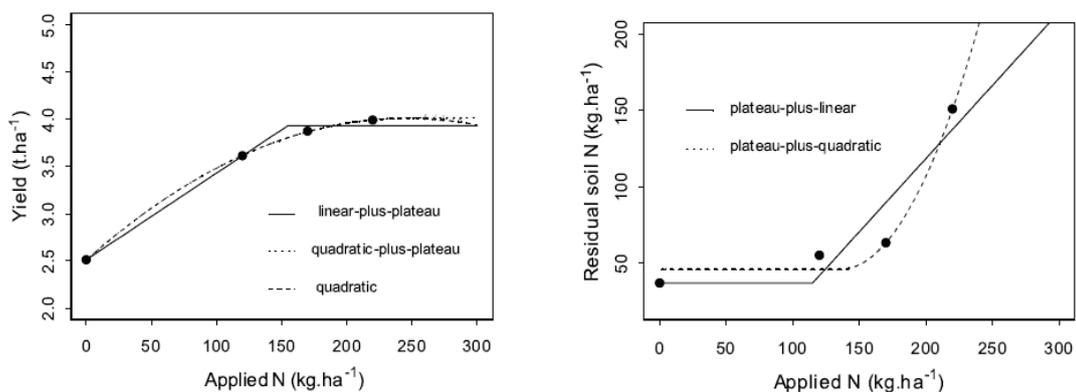


Figure 7 : Courbe de réponse à l'azote sur le rendement et sur le reliquat post récolte en culture de colza ; Makowski et al, 2005

Sur les graphiques ci-dessus, si on considère le rendement, la dose optimale est de 250 unités d'azote selon le modèle quadratique et de 150 unités d'azote selon le modèle linéaire plus plateau. Et si on considère le critère reliquat post-récolte, la dose optimale est de 120 unités d'azote selon le modèle linéaire plateau et 150 unités d'azote selon le modèle quadratique plateau.

6.2.3. Evaluation des conséquences de l'application de la dose recommandée sur différents critères

Cette approche est inspirée de la méthode d'inscription des variétés. Pour être inscrite au catalogue officiel, une nouvelle variété doit présenter des valeurs suffisantes pour chacun des critères évalués (valeur agronomique, technologique et environnementale) par rapport aux variétés les plus utilisées du moment. Cette approche peut être transposée à l'évaluation des outils d'aide à la décision de la fertilisation azotée en cours de végétation, avec pour point de comparaison la situation où seul le calcul de la dose prévisionnelle est utilisée¹⁰.

Cette approche consiste à la mise en place d'essais, soit en microparcelles (dispositif en bloc factoriel à 4 répétitions), soit en placette ou bande de répétition (pour les outils permettant de compenser l'hétérogénéité du parcellaire). Ils devront présenter au minimum, une modalité correspondant à la situation où seul le calcul de la dose prévisionnelle est pris en compte et une modalité correspondant à une situation « pilotée » par l'outil à évaluer. Ces essais devront être implantés dans des champs représentatifs de zones climatiques et pédologiques sur plusieurs années.

L'analyse des critères observés se fera par la comparaison des moyennes observées pour chaque modalité et critères mesurés.

L'avantage de cette approche est qu'elle permet une analyse multicritère (rendement, qualité, reliquat, marge, ...).

L'inconvénient principal est qu'elle nécessite la mise en place de nouveaux essais (multisites, pluriannuel) et donc un investissement non négligeable pour les concepteurs d'outils.

6.3. Synthèse des pistes d'évaluation

La prise en compte d'un double objectif « efficacité de la fertilisation et impact sur l'environnement » pour la mise en œuvre d'une méthode d'évaluation des outils de raisonnement dynamique et de pilotage de la fertilisation en cours de végétation nécessite la prise en considération de plusieurs critères (productivité, qualité, environnement).

L'impact environnemental peut être mesuré sur 2 compartiments, eau et atmosphère. Cependant, les techniques permettant de mesurer l'impact de la fertilisation sur l'atmosphère demandent une logistique difficile à mettre en place en plein champ sur une multitude de sites, et la volatilisation de l'azote est interdépendante de facteurs que les outils ne pilotent pas (mode d'apport, type d'engrais, ...).

La validation des outils sur plusieurs situations pédoclimatiques nécessite la mise en place de nombreux essais, la proposition de critères d'évaluation ci-dessous prend compte aussi de leur facilité de mise en œuvre. Pour répondre au double objectif, les essais de validation devront mesurer a minima :

- le rendement,
- la qualité (critères à définir selon la production),
- le complément à 100 du CAU,

L'évaluation de l'application d'une dose recommandée par un outil sur différents critères par rapport à une dose calculée par la méthode du bilan prévisionnel semble être l'approche la plus adaptée pour répondre au double objectif de l'évaluation. Cependant, elle nécessite la mise en place de nouveaux essais.

¹⁰ Méthode de référence selon les conclusions de l'étude sur les outils de calculs de dose prévisionnelle.

7. Conclusion et perspectives

Une multitude d'outils remplissant différentes fonctions

La fertilisation azotée peut être raisonnée à l'aide d'une multitude d'outils remplissant différentes fonctions (ajustement du poste « azote absorbé » à l'ouverture du bilan, ajustement d'une date d'apport, ajustement d'une dose en cours de végétation et spatialisation de la dose en fonction de l'hétérogénéité du parcellaire). Pour le pilotage de la fertilisation en cours de végétation, les différents outils existants utilisent différentes stratégies :

- pilotage à partir d'une mesure du stock d'azote disponible dans le sol ;
- pilotage à partir d'une mesure sur le végétal :
 - résistivité du couvert,
 - indicateur de croissance,
 - changement de couleur,
 - concentration en nitrate du pétiole ou de la base de tige,
 - transmittance,
 - fluorescence,
 - réflectance ;
- pilotage à partir du raisonnement dynamique de la fertilisation.

Il existe une grande variabilité d'outils, tant dans leur principe de fonctionnement, dans les fonctions qu'ils remplissent, dans leurs règles de décision, que dans leur ancienneté et leur niveau de déploiement.

Des ajustements de doses d'azote surtout pour les apports de fin de cycle de la culture du blé

La plupart des outils capables d'ajuster une dose d'azote en cours de végétation permettent le pilotage des apports de fin de cycle de la culture du blé. Il existe encore assez peu de solutions pour piloter les autres apports et les autres cultures. De plus, une majorité d'outils utilisent la même stratégie, c'est-à-dire le calcul d'une dose prévisionnelle à l'ouverture du bilan, avec une mise en réserve d'environ 40 unités d'azote en fin de cycle, et un ajustement de cet apport, à la hausse ou à la baisse, selon la mesure réalisée par l'outil.

La méthode de validation à cadrer selon l'objectif fixé

Si la validation éventuelle des outils de raisonnement dynamique et de pilotage de la fertilisation azotée en cours de végétation doit répondre à un double objectif « efficacité de la fertilisation et impact minimal sur l'environnement », l'approche la plus appropriée serait une évaluation de l'application d'une dose recommandée par un outil sur différents critères par rapport à une dose calculée par la méthode du bilan prévisionnel, à la façon des essais variétaux préalables à l'inscription au catalogue officiel, où les critères de rendement, de qualité et de compléments à 100 de la CAU seraient mesurés. Les outils ont avant tout été conçus pour améliorer l'efficacité de la fertilisation azotée, cela nécessitera donc la mise en place de nouveaux essais de validation.

Si l'objectif de la validation des outils de raisonnement dynamique et de pilotage de la fertilisation azotée est de répondre au « programme d'actions national à mettre en œuvre dans les zones vulnérables afin de réduire la pollution des eaux par les nitrates d'origine agricole », qui ne mentionne pas de manière explicite la prise en compte de critères environnementaux, la prise en compte des critères d'efficacité de la fertilisation suffisent, car l'arrêté du 19 décembre 2011 stipule que :

« Tout apport d'azote (réalisé) supérieur à la dose prévisionnelle totale calculée [...] doit être dûment justifié par l'utilisation d'un outil de raisonnement dynamique ou de pilotage de la fertilisation, par une quantité d'azote exportée par la culture supérieure au prévisionnel ou, dans le cas d'un accident cultural intervenu postérieurement au calcul de la dose prévisionnelle, par la description détaillée, dans le cahier d'enregistrement, des événements survenus (nature et date notamment). »

Perspectives

Pour aller plus loin dans la caractérisation des outils, cette étude peut être complétée par une enquête auprès d'un panel représentatif d'utilisateurs d'outils, afin de savoir quels sont les avantages et les limites de l'utilisation de l'outil vu par les utilisateurs, les raisons du choix de l'utilisation (raisonnement de la fertilisation, conformité réglementaire, ...).

Sur la mise en œuvre d'une méthode d'évaluation des outils, une fois l'approche évaluative choisie, il restera à réaliser :

- le choix définitifs des critères par production,
- la définition des seuils d'acceptabilité des critères pour leur validation, c'est-à-dire, un outil est-il validé s'il permet d'améliorer l'efficacité de la fertilisation dans 100, 80, 50% des situations ?
- le choix des caractéristiques obligatoires de l'outil (traçabilité, respect des préconisations d'utilisation, ...) pour faciliter les contrôles.



www.sce.fr

GRUPE KERAN