

Modélisation et spatialisation des reliquats d'azote minéral sortie d'hiver : Intérêt pour la modulation intra-parcellaire de la fertilisation azotée

Valentin Bruel, Thierry Darbin,



Introduction et Problématique

La gestion de la fertilisation azotée est un enjeu majeur non seulement pour (i) la production agricole, car elle conditionne la quantité et la qualité des récoltes, mais aussi pour (ii) l'environnement et la qualité de l'eau car ses excès sont sources de pollutions et de nuisances ainsi que pour (iii) le réchauffement climatique car elle génère 40% des émissions de gaz à effet de serre produits par l'agriculture française.

En France, le calcul de la dose d'azote prévisionnelle à apporter sur une culture annuelle est effectuée grâce à la méthode dite du bilan prévisionnel (COMIFER, 2013). Cette méthode, largement utilisée à l'échelle parcellaire, fait appel à plusieurs paramètres, dont le besoin prévisible en azote de la culture souvent déterminé en fonction d'un objectif de rendement réaliste, et du reliquat d'azote minéral du sol en ouverture de bilan (Ri) couramment appelé RSH pour les cultures d'hiver.

L'hétérogénéité intra-parcellaire, tant du potentiel de production que de la fourniture en azote du sol, complexifie la mise en œuvre de la méthode. Cette hétérogénéité peut induire au sein d'une même parcelle des différences très significatives de doses d'azote optimales, pouvant aller jusqu'à 100 kg N ha⁻¹ (LARK et WHEELER, 2003 ; KINDRED et SYLVESTER-BRADLEY, 2014). Cette variabilité des doses d'azote optimales a été mise en évidence en positionnant plusieurs essais de type courbe de réponse à l'azote avec répétitions dans différentes zones d'une même parcelle (KINDRED et SYLVESTER-BRADLEY, 2014 ; be Api, 2021).

De nombreuses publications montrent l'intérêt de la modulation intra-parcellaire de la fertilisation azotée. En apportant la bonne dose au bon endroit, celle-ci améliore significativement l'efficacité des apports, réduit les quantités apportées et limite les pertes par lessivage (KHOSLA et al., 2002 ; DELGADO et al., 2005 ; PENG et al., 2010 ; DIAGONO et al., 2012 ; BASSO et al., 2016 ; DEL PILAR MUSCHIETTI-PIANA et al., 2018).

Les dispositifs expérimentaux mis en place et suivis par les services agronomiques de coopératives agricoles partenaires de be Api ont confirmé que la dose optimale d'azote du blé tendre et du colza peut varier selon l'endroit d'une même parcelle culturale, avec des écarts pouvant dépasser 100 kg N ha⁻¹, toutes choses étant égales par ailleurs (be Api, 2021). Le graphe ci-dessous (Fig.1), issu d'un essai implanté en Normandie en 2015, sur blé tendre, par la coopérative NATUP, l'illustre en mettant en évidence sur une même parcelle :

- Un écart de rendement de 25 q/ha entre la zone de sol à forte réserve utile d'eau et la zone de sol à faible réserve utile d'une même parcelle ;
- Un écart de dose optimale d'azote de 70 kg N ha⁻¹.

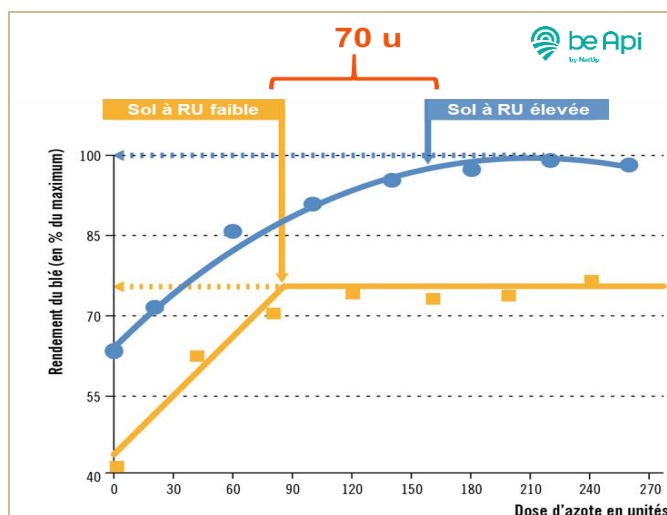


Fig.1 Courbes de réponse à l'azote (Blé, 2015) - NATUP

Ces résultats montrent tout l'intérêt de moduler la fertilisation azotée. Cette modulation est possible grâce à (i) la spatialisation des objectifs de production, mais également à (ii) la spatialisation des fournitures en azote du sol dont celui du reliquat d'azote minéral sortie d'hiver (Ri).

Pour faciliter la mise en œuvre de cette pratique d'agriculture de précision, be Api a étudié la faisabilité technico-économique d'une cartographie de la variabilité intra-parcellaire des reliquats d'azote minéral sortie d'hiver. Celle-ci peut être établie à partir de mesures réalisées au sein d'une même parcelle avec ou sans système d'interpolation (BAXTER and OLIVER, 2005). Ces méthodes, qui ouvrent des perspectives scientifiques intéressantes, restent actuellement coûteuses et ne sont pas encore opérantes.

De ce fait, une étude a été conduite pour :

- (i) Quantifier la variabilité intra-parcellaire des reliquats d'azote minéral mesurés en sortie d'hiver ;
- (ii) Modéliser et spatialiser la variabilité du reliquat en couplant carte de sol et mesure annuelle réalisée en sol profond.

1. Matériels et Méthodes

1.1 Le choix d'une parcelle d'étude

En 2011, une parcelle agricole a été choisie pour mener cette étude. Elle se situe sur la commune « Les Ventes » dans le département de l'Eure. La localisation (proximité avec les expérimentateurs), la surface, la technicité de l'agriculteur et le système cultural sont autant d'éléments qui justifient le choix de ce site.

1.2 Caractéristiques agro-pédo-climatiques

a) Succession culturale

L'ilot d'étude, de 30 hectares (ha), est très souvent scindé en deux parcelles culturales de taille équivalente (zone nord et zone sud). Ces deux parcelles suivent une même rotation de type Colza – Blé – Blé – Lin textile – Blé – Blé, mais décalée d'une culture dans le temps.

Le décalage de cultures entre les deux parcelles culturales permet de comparer l'effet du précédent et/ou de la culture en place (ou à venir pour le lin textile) sur les valeurs de reliquat d'azote minéral sortie d'hiver.

b) Pédologie

Ce site a fait l'objet d'une description précise de l'hétérogénéité intra-parcellaire du sol en associant mesures, observations, notations et connaissances de l'agriculteur. Une mesure de la conductivité électromagnétique a été réalisée à la capacité au champ pendant l'hiver 2010-2011. L'observation de six profils pédologiques, géolocalisés sur des zones de conductivité contrastées, a permis de décrire les sols et de caractériser précisément leurs propriétés hydriques. Pour chacun des profils observés, ont été renseignées les informations suivantes :

- L'épaisseur de chaque horizon ;
- La texture de chaque horizon ;
- La charge et la nature des éléments grossiers de chaque horizon ;
- Les traces éventuelles d'hydromorphie et leur importance ;
- La réaction à l'acide chlorhydrique de chaque horizon ;
- La profondeur potentielle d'enracinement ;
- Des informations complémentaires (état de surface, topographie, compaction ...).

La cartographie ci-dessous (Fig.2) représente la conductivité électromagnétique (mS/m^{-1}) sur laquelle est positionnée des profils pédologiques (en rouge) et des points de prélèvements pour les mesures de reliquat d'azote minéral sortie d'hiver (en noir).

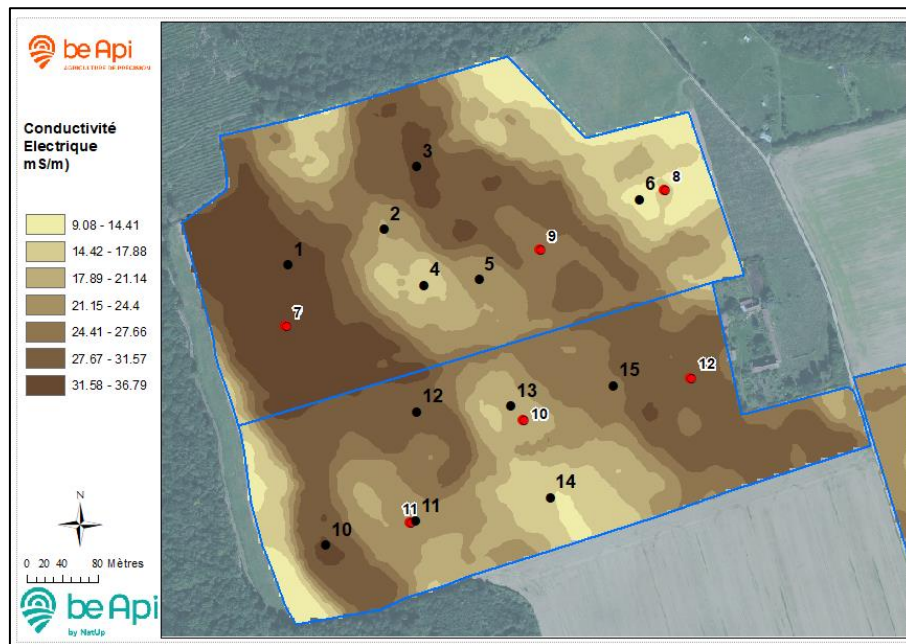


Fig.2 Cartographie de la conductivité électrique et géolocalisation des observations

Les sols sont limono-argileux, avec une variabilité de leur épaisseur et de leur charge en cailloux. La profondeur d'apparition du sous-sol, composé d'argile à silex, est variable (entre 30 et 150 cm) ainsi que la profondeur potentielle d'enracinement.

La tableau (Tab.1) ci-dessous reprend les principales caractéristiques mesurées pour chaque profil :

Tab.1 Caractéristiques pédologiques et hydriques des six profils

N° profil	Type	Profondeur potentielle (cm)	RU totale (mm)	RU 90 cm (mm)	HCC 90 cm (%)	Conductivité (mS/m ⁻¹)
7	Limon profond	120	237	180	32,7	33,1
8	Limon superficiel caillouteux	60	46	46	12,0	15,0
9	Limon profond	120	234	180	32,8	26,34
10	Limon profond caillouteux	60	111	111	27,8	20,2
11	Limon peu profond	60	120	120	30,0	21,9
12	Limon profond	120	240	180	32,7	29,3

La RU totale correspond à la réserve utile d'eau sur la profondeur potentielle d'enracinement. Cette donnée est nécessaire à la spatialisation des objectifs de production (sujet que nous n'aborderons pas dans cet article). La RU 90 cm correspond à la réserve utile d'eau du sol calculée sur la profondeur potentielle d'enracinement bornée maximale à 90 cm ;

A la vue des résultats, les profils de sol ont été regroupés en trois catégories :

- Sol Profond (RU > 150 mm)
- Sol Intermédiaire (RU de 90 à 150 mm)
- Sol Superficiel (RU < 90 mm)

c) Climatologie

La parcelle d'étude se situe en zone à climat océanique, marquée par des hivers relativement doux et des précipitations annuelles d'environ 600 mm. Les précipitations hivernales (cumul des pluies entre le 1^{er} septembre et le 31 janvier) sont variables comme l'indique le tableau ci-dessous (Tab.2).

Tab.2 Pluviométries hivernales constatées sur les dix campagnes

Campagnes	2011 2012	2012 2013	2013 2014	2014 2015	2015 2016	2016 2017	2017 2018	2018 2019	2019 2020	2020 2021
<i>Pluviométrie Hivernale (mm)</i>	321	318	276	216	246	166	329	218	311	331

Les pluviométries ont été regroupées en trois classes (Faible/Moyen/Elevé)

1.3 Géo-positionnement et mesure des reliquats sortie hiver

Sur l'hiver 2011-2012, 12 points de mesure ont été géolocalisés en concertation avec l'agriculteur. Chaque année, le reliquat d'azote minéral sortie d'hiver est mesuré sur 3 horizons maximum (H1 : 0-30 cm, H2 : 30-60 cm et H3 : 60-90 cm). Un prélèvement correspond à 15 carottages élémentaires autour du point géoréférencé. Les mesures sont réalisées en fin de période de lessivage avant la reprise de végétation (souvent courant février).

Les échantillons sont prélevés par tarière motorisée et envoyés le jour même au laboratoire le plus proche (Proxilabo situé à Rouen). L'analyse se fait sur échantillon frais. L'azote contenu dans l'échantillon est mesuré sous deux formes : ammoniacale (NH_4^+) et nitrique (NO_3^-). La valeur de reliquat obtenue est calculée de la façon suivante :

$$\text{Reliquat Sortie d'hiver (Ri)} = \text{NO}_3^-(\text{H1}) + \text{NH}_4^+(\text{H1}) + \text{NO}_3^-(\text{H2}) + \text{NO}_3^-(\text{H3})$$

Le nombre d'horizons pris en compte dépend de la profondeur de sol et donc de la profondeur de prélèvement possible (un pour les sols superficiels dont le sous-sol est caillouteux, deux pour les sols intermédiaires, trois pour les sols profonds non caillouteux)

A noter que la campagne 2017-2018 n'a malheureusement pas fait l'objet de mesures, l'agriculteur ayant épandu l'azote avant le prélèvement. En 2011-2012 seule la zone nord de la parcelle (prévu en lin textile) a été prélevée, la zone sud (en blé) ayant reçu un apport d'azote. En 2014-2015, les analyses par types de sol pour chacune des deux zones ont été regroupées (6 résultats sur les 12 attendus).

Depuis la première année d'expérimentation, ce sont 96 mesures de reliquats qui ont été effectuées :

Campagne	Nombre de mesures
2011-2012	6
2012-2013	12
2013-2014	12
2014-2015	6
2015-2016	12
2016-2017	12
2018-2019	12
2019-2020	12
2020-2021	12

1.4 Modèle de prédiction des reliquats sortie hiver

a) Principe général

L'outil pour établir le conseil de fumure azotée utilisé par be Api est *Epiclès*. L'ensemble des informations pédologiques collectées lors de l'observation des profils de sol sont intégrées à la plateforme et assimilées par l'outil.

L'outil *Epiclès*, lancé en 1997, propose une estimation de la valeur du reliquat d'azote en entrée de bilan (Ri) pour les parcelles ne faisant pas l'objet d'analyse. Cette estimation est établie à partir du contexte pédoclimatique, de l'historique culturale de la parcelle et intègre la pluviométrie hivernale (du 1^{er} septembre au 31 janvier ou plus tardivement si besoin).

L'outil *Epiclès*, calcule en routine la valeur de Ri en utilisant le modèle suivant :

$$\mathbf{Ri} = \alpha (1 - \% \text{ Less})$$

Avec

- *Ri* : Reliquat d'azote minéral en entrée de bilan (kg N ha^{-1})
- α : Quantité d'azote minéral présent dans le sol en début d'hiver (kg N ha^{-1})
- % Less : Coefficient de lessivage hivernal

Le coefficient de lessivage hivernal est calculé à l'aide du modèle simplifié de BURNS :

$$\% \text{ Less} = \left(\frac{Ld}{Ld+HCC} \right)^{Penr/2}$$

Avec

- Ld = *Lame d'eau drainante (cm)*
- HCC : *Humidité volumique à la capacité au champ*
- $Penr$: *Profondeur potentielle d'enracinement (cm)*

La valeur de la lame d'eau drainante est estimée à partir d'une référence régionale modulée par le cumul des précipitations (entre le 1er septembre et le 31 janvier), par la réserve utile d'eau du sol (RU), par la nature de la culture précédente et celle en place pendant l'automne qui jouent sur l'état hydrique du sol ou sur la consommation d'eau pendant cette période (MEYER et al., 2019). La pertinence du modèle a été évaluée en corrélant les valeurs estimées par *Epiclès* à celles observées dans des cases lysimétriques de plusieurs régions françaises et dont les valeurs ont été publiées (DARBIN T., 2007).

b) *Spatialisation du Ri*

La méthode testée consiste à estimer la valeur du reliquat sortie d'hiver d'une zone de sol à partir de la valeur de reliquat sortie d'hiver mesurée en sol profond, selon :

$$Ri_{zone} = Ri_{prof} \cdot \left(\frac{1 - \%Less_{zone}}{1 - \%Less_{prof}} \right)$$

Cette méthode repose sur les hypothèses suivantes : (i) la variation intra-parcellaire de la valeur de α est faible pour une même situation culturale et une même année et, (ii) la variation de la valeur α est essentiellement interannuelle puisqu'elle dépend de la gestion de la culture précédente (nature, fumure azotée, rendement, traitement des résidus de culture), du type de sol et des conditions de minéralisation automnale (BOONE., 2009).

La première hypothèse a été prise après avoir constaté des valeurs d'APM peu différentes d'un point de prélèvement à l'autre. Rappelons que l'APM permet d'apprécier le pouvoir de minéralisation d'un sol (ROCCA et al., 2013 ; MORVAN et al., 2015).

1.5 *Constitution d'une base de données*

Depuis 2012, 96 mesures de Ri ont été effectuées et leurs valeurs renseignées dans une base de données incluant des variables climatiques (pluviométrie hivernale, température...), pédologiques (Type de sol, Réserve Utile, Lessivage...) et culturales (rotation, résidus de culture, rendements...). Les données qualitatives ou quantitatives (observées, mesurées, estimées) sont les suivantes (Tab.3) :

Tab.3 Synthèse des variables recueillies ou calculées pour chaque mesure de Ri

Générales	Climatiques	Culturales	Pédologiques	Reliquat	Hydriques
Campagne	Pluie hivernale	Précédent	Profil associé	Ri mesuré	RU 90 cm
Zone parcelle		Résidus de récolte	Nb horizons	α calculé par <i>Epiclès</i>	HCC 90 cm
Point de prélèvement		Culture	Type Sol	Ri spatialisé	Lame d'eau drainée
Identifiant		Effet précédent	Conductivité	Valeur de la référence régionale	Coefficient de lessivage
		Effet Culture	Profondeur d'enracinement	APM	

2. Résultats

2.1 Variabilité interannuelle des reliquats

Les mesures de Ri sur les neuf campagnes montrent des niveaux très différents d'une année à l'autre, valeurs qui s'expliquent par la pluviométrie hivernale et la culture présente (Tab.4).

Tab.4 Moyennes annuelles du Ri (kg N ha⁻¹) par campagne et culture

	C_Pluv	Blé	Colza	Lin	Moyenne
2011-2012	Elevé	-	-	82.4	82
2012-2013	Elevé	28.3	-	36.3	31
2013-2014	Moyen	11.1	-	-	11
2014-2015	Faible	20.0	19.4	-	20
2015-2016	Moyen	17.4	14.9	-	16
2016-2017	Faible	51.5	-	-	52
2018-2019	Faible	23.3	-	28.8	26
2019-2020	Fort	11.4	-	-	11
2020-2021	Fort	15.0	12.2	-	14

L'analyse de variance confirme que l'effet du cumul de pluies entre le 1^{er} septembre et le 31 janvier est hautement significatif. L'effet culture est statistiquement non évaluable compte tenu du fait que le lin n'est jamais présent en classe de pluviométrie moyenne (C_Pluv = Moyen).

En réalisant une analyse de variance en ne conservant que les situations où la culture en place est soit un blé soit un colza, la classe de pluviométrie reste hautement significatif et la culture apparaît comme significatif à 5% (Tab.5).

Tab.5 Analyse de variance des Ri expliquée par la culture et la pluviométrie

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Culture	1,000	842,565	842,565	4,111	0,046 (*)
C_Pluv	2,000	7444,926	3722,463	18,161	0,000 (***)
Culture*C_Pluv	2,000	758,608	379,304	1,850	0,165 (NS)

*** *Hautement Significatif*, ** *Très Significatif*, * *Significatif*

Nous pouvons formuler quelques hypothèses pour expliquer les valeurs observées de Ri les plus hautes :

- 2011-2012 (Pluviométrie élevée) : plafonnement des rendements lié aux conditions de sécheresse en fin de printemps et début d'été ; la mauvaise valorisation de l'azote par la culture induit des niveaux de reliquat post-moisson élevés et donc de la valeur α ;
- 2016-2017 (Pluviométrie faible) : une pluviométrie hivernale extrêmement faible (166 mm) limite le lessivage d'où les niveaux élevés de Ri constatés.

2.2 Variabilité intra-parcellaire des reliquats

Le tableau ci-dessous (Tab.6) présente la variabilité intra-parcellaire des valeurs de Ri :

Tab.6 Moyennes annuelles du Ri (kg N ha⁻¹) par classe de RU

	RU élevé	RU intermédiaire	RU faible
2011-2012	95	59	-
2012-2013	46	34	20
2013-2014	14	8	7
2014-2015	27	14	14
2015-2016	21	14	9
2016-2017	69	38	31
2018-2019	35	18	15
2019-2020	16	8	5
2020-2021	17	11	11
Moyenne	36	24	15
Ecart-Type	28	20	10
CV	76 %	84	66
Min - Max	12 - 113	7 - 74	5 - 44

L'analyse de variance confirme un effet hautement significatif de la classe de RU (Tab.7)

Tab.7 Analyse de variance du Ri par la Réserve Utile et la pluviométrie

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
C_RU	2,000	7737,567	3868,784	9,223	0,000 (***)
C_Pluv	2,000	6585,164	3292,582	7,849	0,001 (**)
C_RU*C_Pluv	4,000	1278,280	319,570	0,762	0,553 (NS)

*** Hautement Significatif, **Très Significatif, *Significatif

L'interaction entre la classe de RU (C_RU) et la classe de pluviométrie (C_Pluv) n'est pas significative ce qui indique que les valeurs de Ri par classe de RU se classent de la même façon, quelle que soit la valeur de pluviométrie.

Le graphique (Fig.3) ci-dessous présente les valeurs moyennes de Ri classées par RU (bleu : RU élevé, rose : RU moyen, beige : RU faible). Les différents box plot présentent les statistiques par point de mesure, toutes cultures et années confondues.

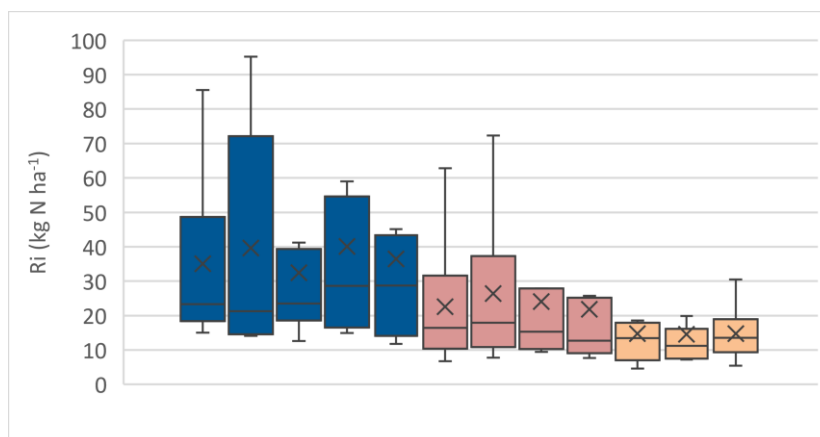


Fig.3 Variabilité intra-parcellaire des Ri sur les 12 points de mesure – Moyenne 9 années

Les deux facteurs RU et Pluviométrie hivernale jouent de façon importante, non seulement sur les valeurs de Ri, mais aussi sur le coefficient de lessivage qui varie en moyenne de 80% en sol superficiel à 30% en sol profond.

L'amplitude observée des valeurs de Ri dans une même catégorie de RU est d'autant plus faible que la RU est faible. L'enjeu de la spatialisation est d'autant plus important que le sol présente une forte hétérogénéité intra-parcellaire de RU et de sol

2.3 Modélisation et spatialisation des reliquats

Force est de constater, qu'avec les enseignements tirés des premiers résultats (forte variabilité interannuelle et intra-parcellaire), il apparaît nécessaire de modéliser annuellement le Ri par zone de sol.

Les 96 mesures ont fait l'objet d'une modélisation selon l'équation présentée plus haut :

$$Ri_{zone} = Ri_{prof} \cdot \left(\frac{1 - \%Less_{zone}}{1 - \%Less_{prof}} \right)$$

a) Un modèle prédictif

Le graphique (Fig.4) ci-dessous montre une très bonne corrélation entre les valeurs observées (96 mesures au champ) et modélisées. Pour chacune des situations Année/Précédent/Culture, la prédiction du Ri de chacune des zones de sol de la parcelle (établie à partir d'une mesure en sol profond) est excellente ($R^2 = 0.936$). A partir des cartes de sol et de RU préalablement établies, il est alors possible de spatialiser et de cartographier les valeurs de reliquat d'azote minéral sortie d'hiver.

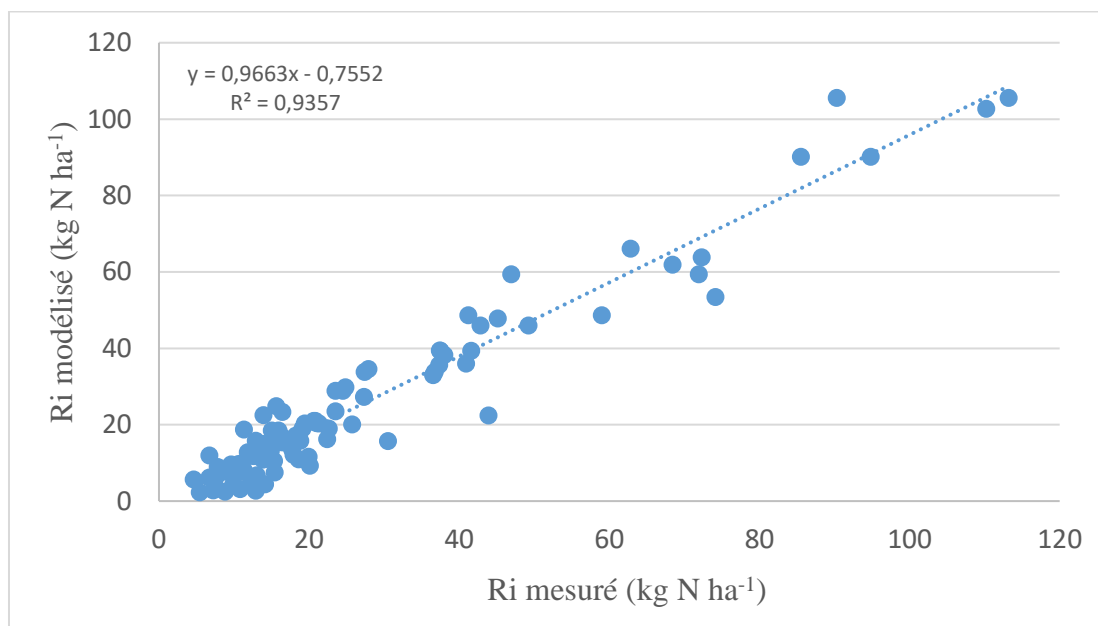


Fig.4 Qualité de prédiction des Ri (kg N ha⁻¹)

Les écarts en valeur absolue au modèle sont en moyenne de 4 kg N ha⁻¹ avec des écarts compris entre 0 kg N ha⁻¹ et 21 kg N ha⁻¹.

Ces écarts au modèle sont expliqués :

- Par la culture en place : effet très significatif *** ($p=2.821^{-07}$, $F=12.98$) ;
- Par le type de sol : effet significatif * ($p=0.017$, $F=4.84$) ;
- Par la pluviométrie : effet significatif * ($p=0.038$, $F=3.09$).

L'effet de la culture en place est synthétisé dans le tableau (Tab.8) ci-dessous :

Tab.8 Qualité de prédiction du Ri (kg N ha⁻¹) par culture

Culture	Blé (63)	Colza (15)	Lin (18)	Toutes Cultures (96)
R ²	0.94	0.69	0.89	0,94
Pente	0.97	1.1	0.93	0,97
Ecart absolu (min-max)	0 - 15	0 -10	0 - 21	0 - 21

Les cultures *Colza* et *Lin* expliquent en grande partie les écarts au modèle. Pour le colza, on observe une tendance à la sous-estimation du Ri avec une régression de qualité inférieure aux autres cultures. Pour le lin, l'écart moyen absolu est de 9 kg N ha⁻¹ (de 0 kg N ha⁻¹ à 21 kg N ha⁻¹) avec une tendance à la surestimation du Ri.

b) Comparaison du modèle avec différents scénarios

La modèle de prédiction a été confronté à deux scénarios :

- La mesure d'un reliquat d'azote moyen à la parcelle (pas de spatialisation)¹
- La spatialisation des reliquats issus de références régionales²

Dans le premier cas, nous avons calculé pour chaque campagne et parcelle culturale la valeur moyenne de Ri (tous types de sol confondus). Les valeurs moyennes ont été comparées aux valeurs mesurées pour chaque point de prélèvement.

Dans le deuxième cas, nous avons affecté à chaque point de prélèvement la valeur de référence régionale établie annuellement en fonction de la culture en place, du précédent, du devenir des résidus de récolte, du type de sol et du nombre d'horizons et les avons comparées aux valeurs mesurées.

Les deux graphiques ci-dessous (Fig.5 et Fig.6) montrent que le modèle de prédiction (présenté ci-dessus) permet de spatialiser le Ri avec plus de précision.

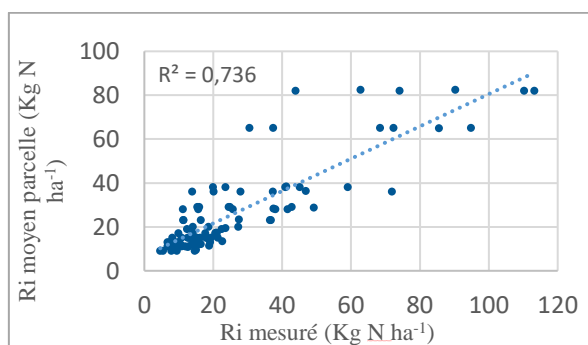


Fig.5 Ri mesuré / Ri moyen à la parcelle culturale

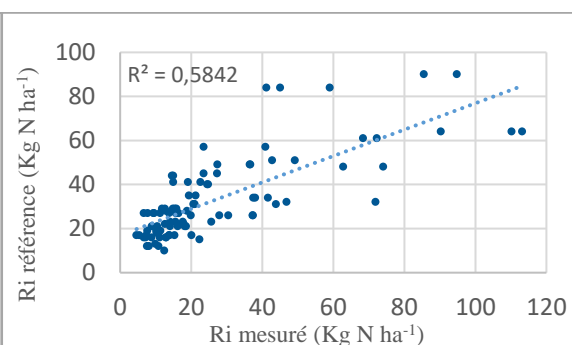


Fig.6 Ri mesuré / Ri référence régionale (kg N ha⁻¹)

¹ La directive nitrates impose d'analyser chaque année au minimum 1 reliquat d'azote par exploitation ayant des parcelles en zone vulnérable (sauf si 100 % en prairie) : l'analyse doit être réalisée sur l'une des trois principales cultures présentes en zone vulnérable.

² Pour aider les agriculteurs, des synthèses régionales des valeurs de reliquats d'azote minéral mesurées sont établies annuellement. Ces synthèses sont souvent structurées par culture (céréales à paille, colza, cultures de printemps), type de sol et profondeur, précédents et devenir des résidus de récolte avec parfois, les apports organiques. Les valeurs données dans ces synthèses sont proposées de façon indicative.

Dans le premier cas, les écarts en valeur absolue entre un Ri moyen à la parcelle et ceux mesurés aux différents points de prélèvement peuvent atteindre 39 kg N ha⁻¹. Le 2^{ème} scénario, encore moins précis entraîne des erreurs qui vont jusqu'à 49 kg N ha⁻¹. Pour rappel, le modèle testé (spatialisation d'une valeur mesurée en sol profond) entraîne des erreurs qui atteignent au maximum 21 kg N ha⁻¹.

Le nombre de cas d'écarts en valeur absolue supérieurs à 10 kg N ha⁻¹ est :

- 8/96 avec le modèle de spatialisation ;
- 26/96 avec une mesure moyenne à la parcelle ;
- 53/96 avec la spatialisation de valeurs de référence.

3. Discussion et perspectives

Cette étude, menée sur un seul site, montre l'intérêt de considérer l'azote minéral du sol comme un paramètre variable dans des parcelles hétérogènes. La méthodologie utilisée dans cette étude nécessite une bonne description des sols pour bien prévoir leur comportement hydrique. Les résultats ouvrent des perspectives intéressantes pour un meilleur contrôle de la fertilisation azotée.

3.1 Un modèle robuste et perfectible

L'hétérogénéité intra-parcellaire des types de sol a conduit à la conception et à l'utilisation d'un modèle de spatialisation. Cette synthèse de neuf années d'étude confirme la robustesse du modèle de prédiction et surtout son intérêt vis-à-vis d'autres méthodes de prise en compte du reliquat d'azote sortie d'hiver.

La pertinence des résultats est directement liée à une description précise des variables pédologiques (à travers un profil de sol), au calcul de variables agro-pédologiques puis à leur assimilation par un modèle agronomique qui a fait ses preuves.

- ⇒ Les résultats probants de cette étude doivent être confirmés sur d'autres situations pédoclimatiques. Il conviendra de déployer ce type d'étude sur un plus grand nombre de contextes parcellaires.

Les résultats obtenus ont montré que des voies d'amélioration sont possibles sur certaines cultures, notamment le colza. Pour cette culture, la croissance peut être différente au sein d'une même parcelle souvent en fonction des différences de types de sol (petit, moyen, gros colza). Ce paramètre pourra être testé pour améliorer le modèle. Dans le cas du lin, culture de printemps précédée d'une culture intermédiaire, il est difficile de se faire une idée compte tenu du jeu de données actuel. Les investigations doivent se poursuivre.

- ⇒ Des mesures de l'état de développement de la culture (colza, culture intermédiaire, ...) par télédétection pourront être associées à cette méthode.

La quantité d'azote minéral présent dans le sol en début d'hiver (α) estimée par la valeur du reliquat d'azote minéral sortie d'hiver mesuré et divisée par le paramètre (1 - % Less) présente une importante variabilité interannuelle avec des valeurs parfois très élevées (de 18 kg N ha⁻¹ à 118 kg N ha⁻¹). Ce point est cohérent avec les résultats de l'étude de BOONE (2009) qui montre, par simulation climatique que la minéralisation automnale de l'humus du sol peut varier très fortement selon le climat (de 25 kg N ha⁻¹ à 95 kg N ha⁻¹ pour un sol limoneux en Normandie sur 10 années successives).

- ⇒ Une attention devra être portée sur la variabilité intra-parcellaire de la minéralisation automnale, qui pourra être quantifiée par des analyses de la teneur en matières organiques du sol ou mieux par la mesure de l'APM, Azote Potentiellement Minéralisable (ROCCA et VARVOUX, 2013 ; MORVAN et al., 2015), dont les valeurs peuvent être différentes selon l'historique et les types de sol au sein des parcelles.

3.2 Intérêt pour la modulation intra-parcellaire

Rappelons que modulation de la dose d'azote doit intégrer la variabilité intra-parcellaire des objectifs de production et celle des fournitures en azote du sol.

Dans le cas d'une année à faibles reliquats (exemple de 2014-2015), les fournitures du sol étant très faibles, ce sont les écarts d'objectif de rendement qui détermineront la dose. Les courbes de réponses ont montré qu'une diminution de dose de l'ordre de 50 kg N ha⁻¹ est possible dans les zones à faible RU. La réduction moyenne à la parcelle dépendra de l'importance relative des zones à faible RU au sein de la parcelle.

Dans le cas d'une année à plus forts reliquats, l'optimisation de la fertilisation pourra être affinée en fonction de la variabilité des fournitures du sol. Les écarts intra-parcellaires de fournitures en azote du sol peuvent dépasser 40 kg N ha⁻¹ entre un sol profond et superficiel. L'absence de prise en compte de cette variabilité peut avoir plusieurs conséquences :

- L'hypothèse d'une seule mesure de Ri en sol profond (sans extrapolation sur les autres types de sol) entraîne alors une sous-fertilisation d'environ 40 kg N ha⁻¹ sur les sols superficiels et 20 kg N ha⁻¹ sur les sols intermédiaires ce qui impacte le rendement et la qualité du blé ;
- L'hypothèse d'une seule mesure de Ri sur la parcelle induit une sur-fertilisation de 20 kg N ha⁻¹ en sol profond et une sous-fertilisation du même ordre en sol superficiel. Dans les sols profonds, l'excédent d'azote a alors un impact environnemental préjudiciable.

Ces considérations montrent toute l'importance de caractériser précisément l'hétérogénéité intra-parcellaire et de moduler la fertilisation azotée sur la base d'une meilleure connaissance des sols et de leurs impacts sur la croissance des cultures. Les publications scientifiques citées au début de l'article en témoignent.

Conclusion

La maîtrise de la fertilisation azotée s'est améliorée au cours des trente dernières années. Durant les années 1990, les efforts se sont concentrés pour réduire « les erreurs de fertilisation ». Pendant la décennie 2000 à 2010, l'attention s'est portée plus particulièrement sur la gestion des intercultures. Sur celle 2010-2020, un important travail a été réalisé pour améliorer la précision des valeurs de références nécessaires au calcul d'une dose prévisionnelle ainsi que la prise en compte de données caractérisant l'état de développement de la culture en place grâce à divers capteurs ou à la télédétection. Gageons que pour la nouvelle décennie qui commence (2020-2030), les travaux se mobiliseront sur la prise en compte de l'hétérogénéité intra-parcellaire et ses conséquences sur la modulation de la fertilisation azotée, gisement d'amélioration encore insuffisamment exploité.

Plusieurs études réalisées par be Api ont montré que (i) deux tiers des agriculteurs ont conscience de cette hétérogénéité intra-parcellaire, (ii) que la non prise en compte de cette hétérogénéité peut constituer un obstacle au raisonnement et (iii) que cette hétérogénéité est une réalité d'ampleur importante quelles que soient les régions agricoles.

La caractérisation de l'hétérogénéité intra-parcellaire doit d'abord se faire à partir du sol : leurs effets sont d'autant plus marqués que la culture avance dans son cycle de développement et bien souvent, s'expriment complètement après le dernier apport d'azote. Les outils de modélisation climatologique et de télédétection viennent en appui.

La modulation de la fertilisation de l'azote peut être réalisée par bon nombre d'agriculteurs qui disposent déjà des solutions d'épandage adaptées. Plus de 50% des exploitations agricoles françaises en cultures annuelles disposent de tracteurs équipés de GPS, et 30% d'épandeurs à engrais pouvant moduler. Ce taux d'équipement ne fait qu'augmenter avec le temps. Reste à élaborer les méthodes agronomiques qui faciliteront la généralisation de cette pratique responsable et durable, et qui se fondent sur une réalité : les parcelles culturales actuelles sont hétérogènes. Une meilleure prise en compte de cette hétérogénéité améliore l'efficacité des apports d'azote en apportant la bonne dose au bon endroit et par conséquent, permet de réduire les quantités apportées (de l'ordre de 20% d'après les études publiées et celles de be Api).

Le travail d'acquisition de références et le calage des méthodes de spatialisation pourraient être accélérés grâce à un accompagnement financier des pouvoirs publics et l'implication des institutions de recherche. Ensemble saisissons-nous de cette problématique afin d'apporter rapidement de nouvelles solutions opérationnelles aux agriculteurs français qui les attendent tout en réduisant les impacts négatifs dus à la fertilisation azotée des cultures.

Bibliographie

- BASSO B. and al. (2016): Environmental and economic benefits of variable rate nitrogen fertilization in a nitrate vulnerable zone. *Science of the Total Environment* 545-546 p 227-235.
- BAXTER S.J. and OLIVER M.A. (2005): the spatial prediction of soil mineral N and potentially available N using elevation. *Geoderma*, volume 18, Issue 3-4, October 2005, p 325-339
- BE API (2021) : Synthèse des dispositifs expérimentaux de type Courbe de réponse à l'azote : mise en évidence de l'importance de la variabilité intra-parcellaire des doses optimales d'azote. Document interne, be Api, 21 pages
- BOONE V. (2009) : Amélioration du paramétrage d'un modèle de minéralisation. Rapport de stage, projet Recherche-développement. ESIPTA (Septembre 2009) 29 p.
- COMIFER (2013) : Calcul de la fertilisation azotée – Guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales. Cultures annuelles et prairies. Editions COMIFER, Groupe Azote, 2013 : 159 p.
- DARBIN T. (2007) : Estimation du lessivage hivernal. Document interne, InVivo, 44 pages.
- DEL PILAR MUSCHIETTI-PIANA M. and al. (2018): Using site-specific nitrogen management in rainfed corn to reduce the risk of nitrate leaching. *Agricultural Water Management* (2018) 199 p 61-70
- DELGADO J. and al. (2005): Nitrogen fertilizer management based on site-specific management zones reduces potential for nitrate leaching. *Journal of Soil and Water Conservation* 60 (6) p 402-410
- DIAGONO M. and al. (2012): Precision Nitrogen Management of Wheat: A review. In *Agronomy for Sustainable Development*, Springer Verlag/EDP Sciences/INRA, 2012, 33 (1), p 219-24. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01201355>
- KHOSLA R. and al. (2002): Use of site-specific management zone to improve nitrogen management for precision agriculture. *Journal of Soil and Water conservation*, 57 (2) p 513-518
- KINDRED D. and SYLVESTER-BRADLEY R. (2014): Using Precision Farming technologies to improve nitrogen management and empower on-farm. Conference paper: Crop production in Southern Britain, Precision decisions for profitable cropping. Aspects of Applied Biology, November 2014
- LARK R M. and WHEELER H C. (2003). A method to investigate within-field variation of the response of combinable crops to an input. *Agronomy Journal* 95 p 1093–1104.
- MEYER N. and al. (2019): Cover crops reduce water drainage in temperate climates: A meta-analysis. *Agronomy for Sustainable Development*, Springer Verlag/EDP Sciences/INRA, 2019, 39 (1), p 3-11
- PENG S. and al. (2010): Improving nitrogen fertilization in rice by site-specific N management: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, Springer Verlag/EDP Sciences/INRA, 2010, 30 p 640-656
- MORVAN T. et al. (2015) : Minéralisation de l'azote des sols (Ouest) - résultats du projet "Mh". 12ième rencontre de la fertilisation raisonnée et des analyses organisée par le COMIFER, le GEMAS et l'AFES, les 18 et 19 novembre 2015 à Lyon (France). Article disponible sur le site de l'association du COMIFER.
- ROCCA C., VARVOUX L. (2013) : La mesure d'Azote Potentiellement Minéralisable : un indicateur pour préciser le poste minéralisation du sol. 11ième rencontre de la fertilisation raisonnée et des analyses organisées par le COMIFER, le GEMAS et l'AFES, les 20 et 21 novembre 2013 à Paris (France). Article disponible sur le site de l'association du COMIFER.