

V.Brueel, E.Bertin – R&D beApi



La méthode du bilan prévisionnel d'azote (Comifer, 2013), largement utilisée, fait appel à de nombreux paramètres fondamentaux, dont certains postes de minéralisation qu'il convient d'approcher le plus précisément possible tant leur part dans la dose prévisionnelle d'azote est importante.

Dans cette étude il a été fait le choix d'étudier les facteurs impactant la mesure de l'APM, d'en caractériser sa variabilité inter et intra-parcellaires. Dans une moindre mesure, l'étude du nombre de jours normalisé de minéralisation est étudiée afin d'évaluer l'impact des variabilités pédoclimatiques sur son estimation. Enfin quatre scenarii de conseil caractérisés par une échelle de précision croissante permettent de mettre en avant l'impact de la prise en compte des facteurs de variabilité de l'APM et du Nbjm sur l'efficacité du bilan azoté.

Caractérisation de la variabilité de l'APM

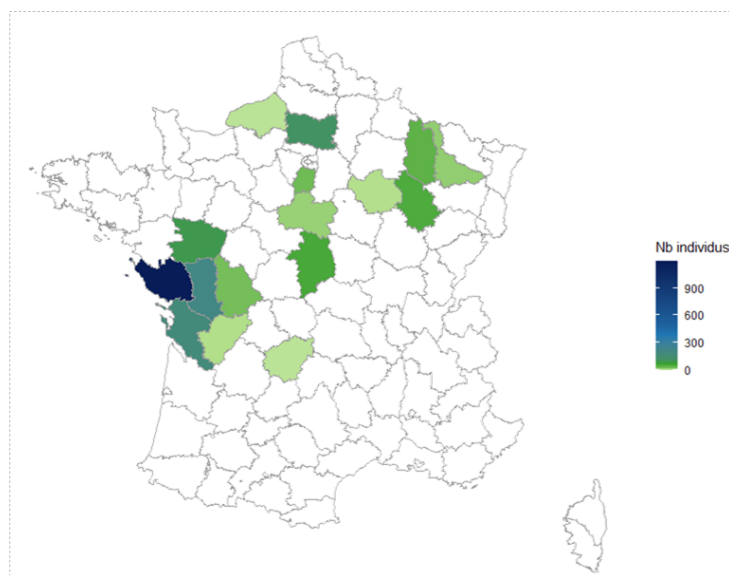
Diagramme de corrélation montrant les relations entre sept indicateurs de la qualité de l'habitat. Les indicateurs sont regroupés en six catégories thématiques : ind biologique, commande, ind physique du sol, ind chimique, assolement, et topographie. La taille de chaque ellipse représente le nombre de variables corrélées (4, 8, 12, 16), et la couleur représente le degré de complétude (0.5 à 1.0). Les indicateurs incluent MAT_ORG, ID_RESELLER, ID_ANALYSE, MGIS_ANALYSE, ID_BEAPI, MANGA, CUIVRE, K2O_MGO, cult2018, cult2000, cult2013, HCC_TOT_pot, HCC_SO3_pot, et texture.

Figure 1 : Rosace de distribution des variables par catégorie de la base de données APM

parcelle. Chaque mesure a fait l'objet de 18 carottages. La variable « historique prairie » est binaire et correspond à la présence ou non d'une prairie temporaire ou permanente sur la parcelle entre 2015 et 2023. La variable typologie d'exploitation regroupe trois niveaux (polyculture élevage, industriel, grandes cultures). Les parcelles sont catégorisées à l'échelle de l'exploitation par les critères suivants :

- Polyculture-élevage : présence de deux culture fourragère ou prairie dans la rotation ;
- industrielle : présence d'au moins deux cultures industrielles dans la rotation ;

Les parcelles ne répondant à aucun de ces deux critères appartiennent à la catégorie « grandes cultures ».



À travers cette typologie, l'objectif recherché est d'identifier les parcelles recevant des apports organiques dans la rotation (polyculture-élevage) ou présentant des exportations potentiellement excessives (industrielle).

La distribution géographique des données est hétérogène et majoritairement concentrée sur le secteur des Pays de la Loire avec le département de la Vendée qui représente 28 % du jeu de données (Figure 2).

Figure 2 : Distribution spatiale des mesures d'APM

Afin d'identifier les facteurs de variabilité de l'APM, une analyse multivariée mixte (FAMD) a été réalisée afin d'expliquer l'inertie de notre jeu de données, d'identifier les variables les plus structurantes et de mettre en évidence d'éventuelles synergies entre groupes de variables pouvant expliquer ou non le comportement de la mesure d'APM. L'indicateur d'Azote Potentiellement Minéralisable résultant de la combinaison de plusieurs facteurs (Rocca et al., 2013 ; Ramos, 2023), une modélisation par Random Forest a été conduite pour prédire la mesure d'APM. Le modèle est construit sur deux tiers du jeu de données ($n_{\text{train}} = 1558$ individus), testé sur un tiers ($n_{\text{test}} = 520$ individus), et conçu d'une sélection de variables réalisée à partir des résultats de la FAMD et de matrices de corrélation. L'analyse de l'importance des variables ayant construit le modèle permet la caractérisation et priorisation des facteurs de variabilité de l'APM.

L'analyse de la variabilité intra-parcellaire de l'APM repose sur l'étude des coefficients de variation calculés parcelle par parcelle. 551 parcelles composent le jeu de données. L'ensemble des analyses est conduit avec le logiciel R®.

Le nombre de jours normalisés de minéralisation

Le nombre de jours normalisés de minéralisation (Nbjm) correspond à une journée caractérisée par une température moyenne de 25°C dans des conditions d'humidité de l'horizon 0-30cm à capacité

au champ (Hênes, 1999 ; Boon V., 2009.). Le Nbjm est donc la résultante de la somme des produits quotidiens d'un facteur thermique et d'un facteur humidité :

$$Nbjm = \sum FT \cdot FH$$

Avec :

- Le facteur thermique : $FT = \exp \left[\frac{\ln(Q_{10})}{10} \cdot (T - T_{ref}) \right]$
Ici la minéralisation suit une loi du Q_{10} avec $Q_{10} = 3.15$ car nous prenons la température de l'atmosphère et non du sol. Il est considéré que la vitesse de minéralisation triple quand la température du sol augmente de 10°C.
- Le facteur humidité est la résultante du potentiel hydrique de l'horizon 0-30 :

$$FH = \frac{\ln \left(\frac{P_{min}}{P} \right)}{\ln \left(\frac{P_{min}}{P_{max}} \right)}$$

Avec P_{min} , P_{max} et P représentant respectivement le potentiel hydrique du sol en dessous duquel la minéralisation est stoppée, le potentiel hydrique où la minéralisation est maximale et le potentiel hydrique du sol.

Dans le bilan azoté Epiclès, les données de Nbjm constituent des références définies par département et par espèce, et sont calculées sur trois périodes :

- Nbjm_1 : du 1^{er} janvier à la date de floraison, pour l'estimation de la minéralisation de printemps (Mh_r) ;
- Nbjm_2 : de la date de floraison à la maturité pour l'estimation du reliquat à la récolte du précédent (Rrec_{r-1}) ;
- Nbjm_3 : de la date de maturité au 31 décembre pour l'estimation de l'azote dans le sol à l'implantation de la culture ou de l'interculture.

Dans le cadre de cette étude, l'estimation du Nbjm a été réalisée sur huit départements (dept : 16, 17, 52, 55, 60, 62, 85, 86), deux espèces (maïs grain et blé tendre d'hiver), seize types de sol et quinze années (2010-2024).

Les données climatiques quotidiennes proviennent du portail Agri4cast et correspondent à la moyenne des données de pluviométrie (P en mm), d'évapotranspiration réelle (ET_o en mm), de température minimum et maximum (T_{min} et T_{max} en °C) de trois à quatre dalles (25km²) par département. Les types de sol sont issus de descriptions pédologiques par fosses réalisées dans chaque département et correspondent à des sols représentatifs de chaque département étudié. Deux types de sol sont sélectionnés par département : un sol superficiel et un sol profond.

L'estimation du FH quotidien pour les deux espèces, les seize types de sol et les quinze années a été réalisée avec le modèle de culture Aquacrop. Les modélisations annuelles sont successives et reprennent l'humidité de la récolte n-1.

La définition des stades de culture, permettant de définir les 3 périodes de calcul du Nbjm, est réalisée pour chaque espèce annuellement à partir de la somme des degrés-jours (DGJ) depuis la date de semis (Tableau 1).



Tableau 1 : Paramétrage cultures pour le calcul de la date de floraison et maturité

Espèces	Semis	$\sum DGJ_{flo}$	$\sum DGJ_{mat}$
Blé tendre hiver	20/10	1739	2800
Maïs grain	10/04	870	1700

L'estimation du *FT*, la définition des dates des stades et les trois Nbjm pour les quinze années, deux espèces et seize types de sol sont calculés dans des fonctions de calcul R® intégrées dans une application R® Shiny (Figure 3).

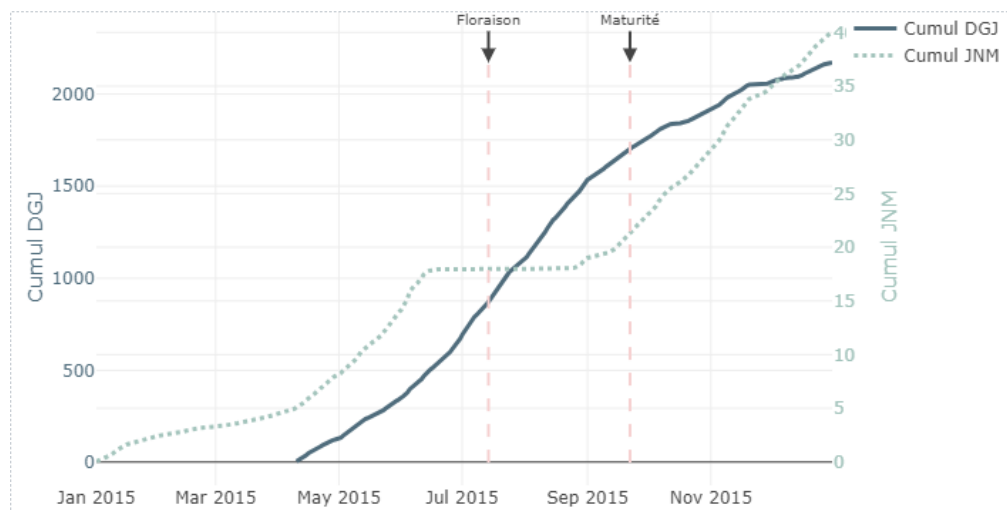


Figure 3: Courbe de cumul du Nbjm et des DGJ pour un maïs semé le 10/04/2015 en sol limoneux argileux caillouteux d'un mètre de profondeur dans le département 60

Pour chaque couple espèce × type de sol, une moyenne de chaque Nbjm_1, Nbjm_2 et Nbjm_3 a été calculée après suppression des outliers par la méthode de l'écart interquartile (IQR) avec un facteur de sensibilité IQR de 1,5.

Le conseil azoté, scenarii d'évaluation de l'efficience du bilan

Les conseils en azote ont été établis avec Epiclès, outil de gestion de la fumure prévisionnelle sur 2788 entités (zones intra-parcellaires) correspondant à 555 parcelles. Toutes ces parcelles ont fait l'objet d'une description pédologique intra-parcellaire par conductivité électrique associée à la description de fosses pédologiques (process beApi Potentiel).

L'objectif étant de montrer les impacts de variations d'APM et de Nbjm sur le bilan, les conseils ont été faits sur deux situations culturelles simplifiées (sans apport organique) :

- Blé (objectif : 80 q/ha) précédent maïs grain (100 q/ha et 200 kg N/ha) résidus exportés ;
- Maïs grain (objectif : 100 q/ha) précédent blé (80 q/ha et 200 kg N/ha) résidus exportés.

Les objectifs de rendements (et rendements réalisés) n'ont pas été spatialisés et sont appliqués de manière uniforme sur chaque parcelle. Il en est de même pour les apports d'azote sur précédents (200 kg/ha). Ainsi, la variabilité d'APM et de Nbjm est prise en compte uniquement pour le conseil sur la culture n et non sur la culture n-1.

Trois niveaux de précision de conseil azoté ont été appliqués sur l'ensemble du jeu de données :

- Conseil parcellaire avec APM de référence : le conseil N est appliqué de manière uniforme sur toute la parcelle en prenant en compte le type de sol majoritaire et l'APM de référence associée.
- Conseil intra-parcellaire avec APM de référence : le conseil N est différencié au sein de la parcelle selon les types de sol rencontrés. Les valeurs d'APM de référence sont alors variables au sein d'une même parcelle.
- Conseil intra-parcellaire avec APM mesuré : le conseil N est différencié au sein de la parcelle et dépend directement des valeurs d'APM mesurées à l'échelle intra-parcellaire.

Les variables climatiques utilisées sont issues de références départementales.

Une étude complémentaire est menée sur deux parcelles hétérogènes avec l'ajout d'un quatrième niveau de conseil intra-parcellaire, qui, en plus de prendre en compte des valeurs d'APM mesurées, intègre également des nombres de jours normalisés de minéralisation actualisés à l'échelle intra-parcellaire. Cette actualisation intègre la variabilité des types de sol rencontrés sur ces deux parcelles ainsi que des données climatiques récentes et locales.

Les deux parcelles étudiées sont :

- En Meurthe-et-Moselle (54), parcelle « Ratté ». Elle présente des variations de textures entre des limons argileux et des argiles lourdes avec des valeurs de CEC qui varient de 14 à 27 meq/100g et des taux de matière organique variant de 1,8 % à 3,4 %. Les pH sont globalement élevés (moyenne de 8). Cette parcelle présente un gradient d'altitude et un effet « vieille prairie » (retournée il y a moins de 10 ans) sur sa partie sud.
- En Vendée (85), parcelle « Roussière-Challans ». Elle présente des variations de textures entre des limons sableux (profond) et des sables limoneux (superficiels et caillouteux). Les CEC et taux de matière organique sont relativement homogènes (respectivement 5,5 meq/100g et 2 %). Le pH l'est également, autour de 6,5. Une partie de cette parcelle correspond à une ancienne prairie retournée en 2015.

Les simulations de conseil N ont été réalisées en masse et permettent d'obtenir un bilan azoté pour l'ensemble des situations (plus de 5600 conseils). Pour chaque bilan réalisé, la dose X est étudiée ainsi que les postes Mh (minéralisation printanière), Rdrai (reliquat d'azote en entrée drainage) et Ri (reliquat d'azote initial, ou sortie d'hiver). Ces données sont exprimées en kg N/ha.



Résultats

L'APM : modélisation et variabilité intra-parcellaire

Modélisation de la mesure d'APM

L'analyse multivariée mixte réalisée sur les variables ci-contre (Figure 4) permet d'expliquer près de 53 % de l'inertie du jeu de données avec un groupe de variables clé à forte contribution défini dans la dimension 1 composé de la matière organique, le pH_{eau}, la CEC et le CaO. Il s'agit ici de variables très structurantes du jeu de données (la dimension 1 explique plus de 36 % de l'inertie) mais également de variables précises dans leur mesure terrain. L'APM, quant à elle, construit à elle seule la dimension 2 et explique 16.4 % de l'inertie du jeu de données. On conclut ici qu'il n'y a pas de corrélation directe entre les variables projetées et contributives de la dimension 1. Cela ne signifie pas pour autant que l'APM est indépendant de ces dernières mais plutôt que les variations de cet indicateur peuvent être associées à une combinaison de ces variables, ce qui est avancé par les travaux de Rocca et al. (2013), Morvan et al. (2015), Ramos, M. (2023). Ici, le gradient d'APM est une expression locale de la structure globale du jeu de données. Ainsi, en intégrant dans la modélisation les variables les plus structurantes, mais aussi les plus précises en termes de mesures, et systématiquement mesurées lors d'analyses de sol, nous assurons de capter la variabilité générale du jeu de données. Cela garantit une robustesse et une généralisation de la modélisation et l'explication des facteurs de variabilité.

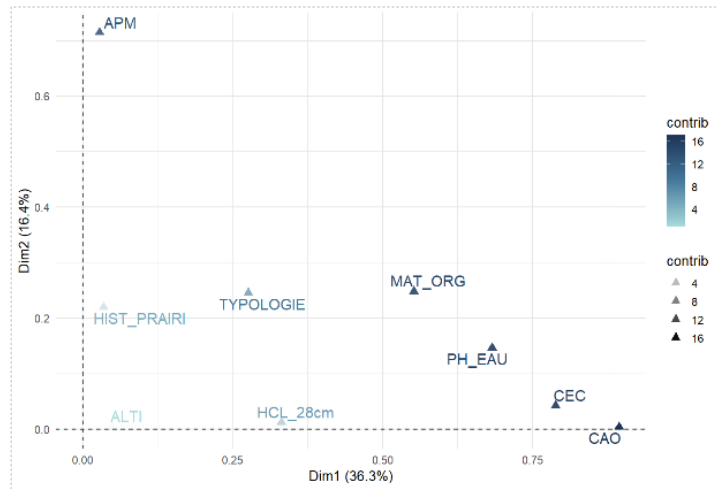


Figure 4: Graphique de contribution des variables de la FAMD

Le modèle Random Forest, entraîné sur les deux tiers des données et incluant les facteurs en Figure 5 présente d'excellentes performances pour la prédiction de la valeur d'APM (Figure 6).

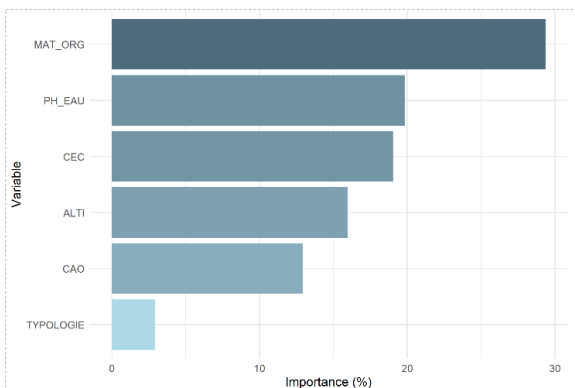


Figure 5 : Contribution relative des variables du modèle Random Forest de prédiction de l'APM

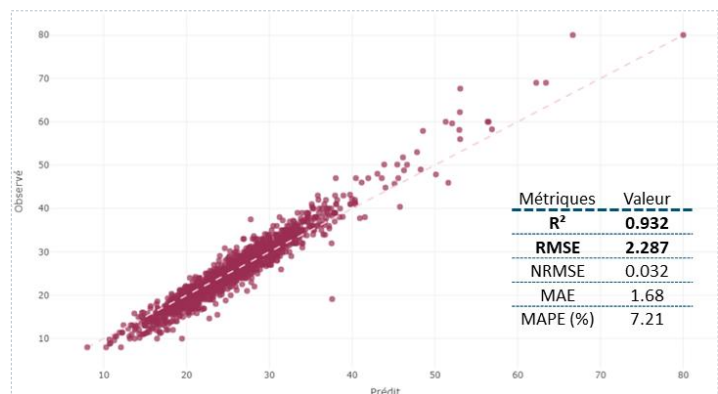


Figure 6: Diagramme de dispersion du jeu de données n_{train} des valeurs d'APM mesurées et estimés au travers du modèle RF

Avec une modélisation en Random Forest, plus complète qu'une approche linéaire, nous sommes capables de capter les interactions complexes entre variables et de détecter les effets combinés qui peuvent être faibles mais systématiques. Nous expliquons une part importante de la variance APM sans nécessiter de corrélation directe forte, ce qui semble être dans notre cas de la prédiction de la mesure d'APM.

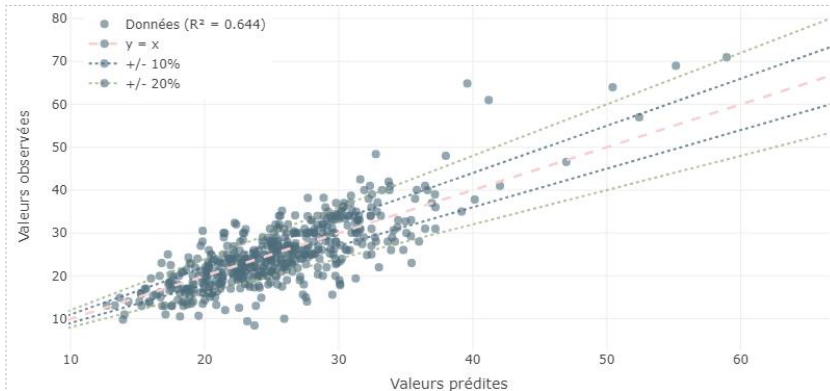


Figure 7: Diagramme de dispersion du jeu de données n_{test} des valeurs d'APM mesurées et estimées au travers du modèle RF

Ce Random Forest a été testé sur un jeu de données indépendant ($n_{\text{test}} = 520$ individus). Les résultats sont prometteurs, avec un RMSE de 4,92 mg/kg et un R^2 de 0,64 (Figure 7). 75 % des valeurs d'APM estimées présentent une erreur relative inférieure ou égale à 20 % de la valeur mesurée, c'est-à-dire l'ordre de grandeur de l'incertitude analytique laboratoire.

Plusieurs pistes d'amélioration du modèle peuvent être envisagées :

- Augmentation du jeu de données avec une répartition géographique homogène.
- Prise en compte des textures : l'ajout de la variable texture comme facteur pourrait améliorer le modèle, mais la complétude de cette information n'est que de 54 %, ce qui réduit la taille du jeu de données utilisable. Compte tenu du nombre de classes texture sol et sous-sol, son intégration telle quelle aurait dégradé la performance du modèle
- L'augmentation du niveau d'exactitude des facteurs :
 - Apport organique : approximée par la typologie basée sur l'assolement.
 - Historique prairie : binaire, qui ne couvre que la période post-2015.

La variabilité intra-parcellaire de l'APM

La distribution des coefficients de variation (CV) des mesures d'APM par parcelle renseigne sur le niveau potentiel d'hétérogénéité intra-parcellaire. Le CV moyen des 551 parcelles est de 15,1 % pour une moyenne de 3,12 mesures d'APM par parcelle. En excluant les parcelles comptant moins de trois

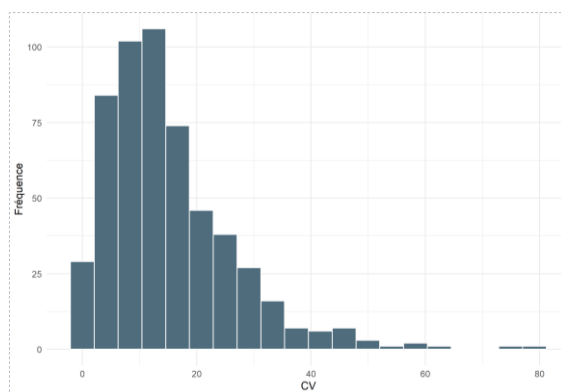


Figure 8: Distribution des coefficients de variation de la mesure d'APM par parcelle (551 parcelles)

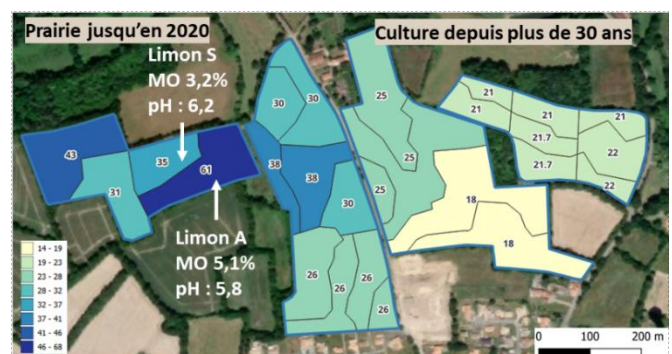


Figure 9: Cartographie intra-parcellaire des valeurs d'APM d'une exploitation vendéenne



mesures (soit 49 % des parcelles), le CV dépasse 18 %. La distribution des données est décentrée avec des valeurs de CV max dépassant les 50 %.

La Figure 9: Cartographie intra-parcellaire des valeurs d'APM d'une exploitation vendéenne illustre parfaitement l'hétérogénéité intra-parcellaire des valeurs d'APM, avec des mesures pouvant varier du simple au double sur une même parcelle.

Caractérisation de la variabilité du nombre de jours normalisés de minéralisation

Estimation du FH et FT

Le facteur thermique (FT) est calculé pour un secteur donné. Sa valeur est comprise entre 0 et $+\infty$, même s'il dépasse rarement 3 sous nos latitudes avec une T_{base} de 25°C. Son amplitude varie selon les années et les secteurs. Il est à relever que, entre 2010 et 2022, la valeur maximale du FT a doublé. Le facteur humidité (FH) est quant à lui calculé, pour un type de sol spécifique, à partir de la modélisation quotidienne de l'humidité de l'horizon 0–28 cm en présence d'une culture (W28). Le FH varie de 0 lorsque l'humidité du sol est inférieure ou égale au point de flétrissement, à 1 lorsque le sol est à la capacité au champ.

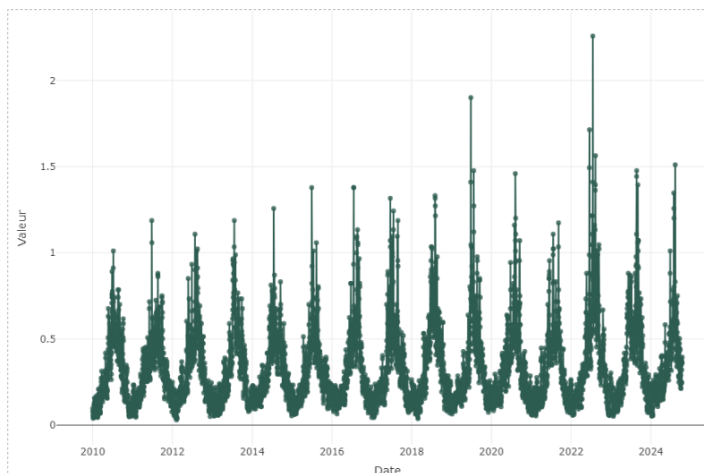


Figure 10: Facteur thermique quotidien entre 2010 et 2024 pour le département 85

La Figure 11 illustre les valeurs quotidiennes du FT et FH sur l'année 2018 pour un sol superficiel et un sol profond. La variabilité du facteur humidité est nette et l'impact du potentiel hydrique du sol peut faire varier la valeur du FH du simple au triple sur un même secteur, voire une même parcelle en cas d'hétérogénéité intra-parcellaire.

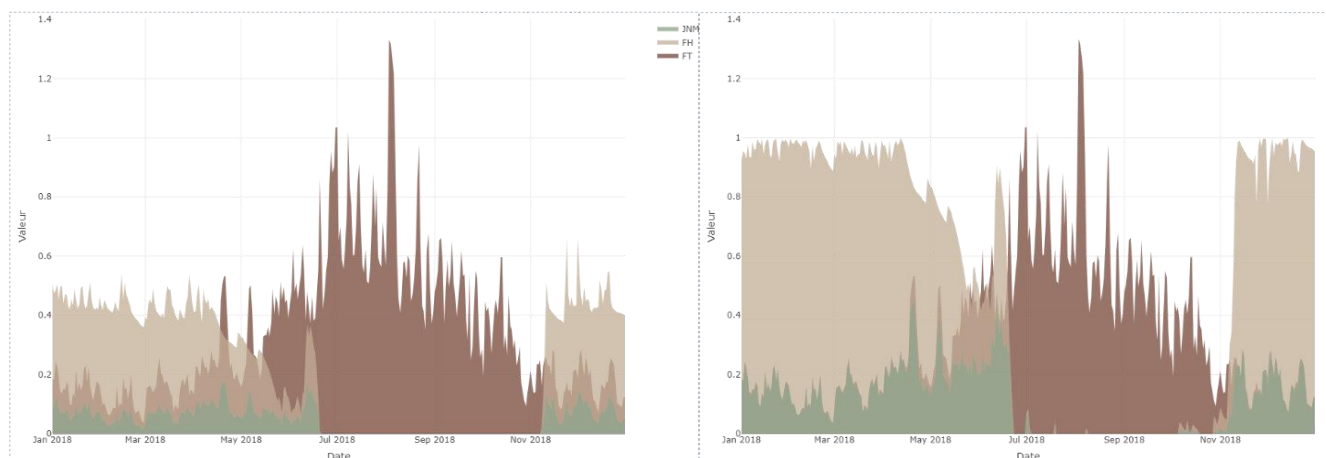


Figure 11 : Valeurs quotidiennes des indices FT, FH et du jour normalisé de minéralisation dans le département 86 sur l'année 2018 pour un sol superficiel à gauche (groie superficielle sur calcaire fissuré de 51 cm de profondeur) et profond à droite (limon battant de 1m de profondeur)

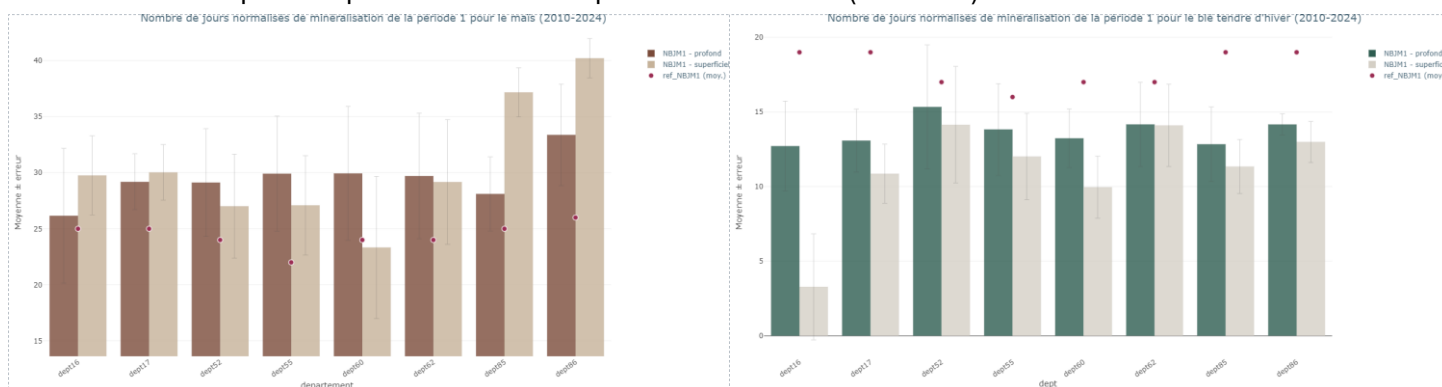


Modélisation des Nbjm

Dans l'outil de plan de fumure Epiclès, les références de Nbjm sont définies par département et par espèce, sans prise en compte d'une potentielle variabilité liée aux microclimats (proximité d'un cours d'eau, topographie, etc.) ou aux variabilités de potentiel hydrique des sols. Ces références sont représentées par un point rouge sur les deux histogrammes de la Figure 12.

L'étude de la modélisation des Nbjm pour les trois périodes d'observations imposées pour l'outil de plan de fumure Epiclès pose 2 constats majeurs :

- L'écart entre les valeurs de référence et les Nbjm modélisés (Figure 12).
- La variabilité intra-département qui découle de la prise en compte d'un sol superficiel et d'un sol profond pour chacun des départements étudiés (**Tableau 2**).



L'écart observé entre les valeurs de référence et les Nbjm modélisés peut être expliqué notamment par l'obsolescence des données utilisées. Les références du moteur ont été définies dans les années 1990/2000. Or, l'analyse de l'évolution du jour calendaire de la floraison du blé tendre d'hiver entre 2010 et 2024 montre un avancement moyen de 10 jours, à date de semis constante, sur les départements étudiés. Dans la mesure où les jours normalisés de minéralisation sont les plus nombreux autour du stade floraison (Figure 11), la perte de ces derniers jours peut engendrer une diminution significative du Nbjm1. Aussi, pour le maïs, les références de Nbjm sont identiques pour un maïs grain et un maïs ensilage malgré une variabilité significative de cumul de degrés-jours à stade équivalent entre les deux utilisations.

Tableau 2 : Coefficients moyens de variation des Nbjm à l'intra-département

	CV moyen maïs grain	CV moyen BTH
Nbjm1	17 %	26.5 %
Nbjm2	107.8 %	89.3 %
Nbjm3	38.3 %	49.8 %

Les coefficients de variation moyens par département de la modélisation des Nbjm (Tableau 2) montrent l'importance de la prise en compte du type de sol dans la détermination des références des Nbjm. Le Nbjm2 utilisé pour la modélisation du reliquat post récolte est l'indicateur dont le CV est le plus élevé. Ceci s'explique par le fait que le facteur limitant sur cette période estivale est l'humidité



du sol, elle-même majoritairement dépendante du potentiel hydrique du sol à pluviométrie équivalente.

Le conseil azoté, scenarii d'évaluation de l'efficience du bilan

Évaluation de l'efficience du conseil sur blé tendre d'hiver

En blé tendre d'hiver, sur l'échantillon parcellaire observé dans les départements 54 et 55, la prise en compte des mesures d'APM intra-parcellaires conduit à une plus forte amplitude des conseils azotés (Figure 13) directement liée à une plus grande variabilité de ces mesures (Tableau 3).

Les mesures d'APM étant plus élevées que les valeurs du référentiel, on constate une hausse des fournitures en azote du sol à travers l'augmentation du Mh de +42 % et celle du Ri de +24 %. Ces phénomènes impactent mécaniquement la dose bilan avec une diminution significative de 19 kg N/ha par rapport à un conseil parcellaire avec APM de référence pour un objectif de rendement identique. En considérant un facteur d'émission de 4,99 kg éq. CO₂/kg N pour une solution azotée, cette évolution du conseil conduit à une réduction des émissions de gaz à effet de serre de plus de 10 %.

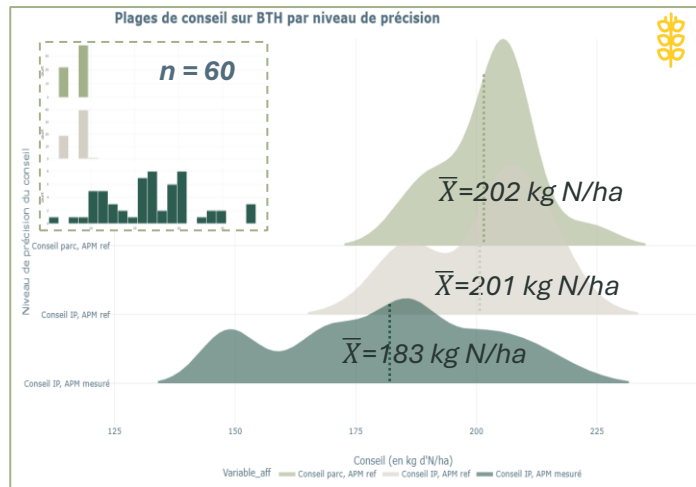


Figure 13 : Distribution des conseils azote en blé simulés à l'échelle parcellaire (APM de référence) et intra-parcellaire (APM de référence et APM mesuré) sur des parcelles des départements 54 et 55

Tableau 3 : Synthèse des valeurs d'APM utilisées sur les départements 54 et 55

(n=60)	APM mesuré (mg/kg)	APM de référence (mg/kg)
Min	16,3	16,5
Max	38,8	20,0
Moyenne	27,1	18,4

Évaluation de l'efficience du conseil sur maïs grain

En maïs grain sur les départements 85 et 17, l'efficience du conseil intra-parcellaire avec APM mesuré se traduit par une réduction moyenne de 10 kg N/ha par rapport à un conseil parcellaire avec APM de référence (Figure 14). Sur cet échantillon (n = 1800), les valeurs d'APM mesurées sont plus élevées que les valeurs du référentiel (Tableau 4). Cette différence traduit une hausse de la vitesse de minéralisation qui entraîne une réévaluation du Mh de +15 % et du Ri de +5 %. La réduction de la dose d'azote à apporter représente une diminution des émissions de gaz à effet de serre de 6 %.

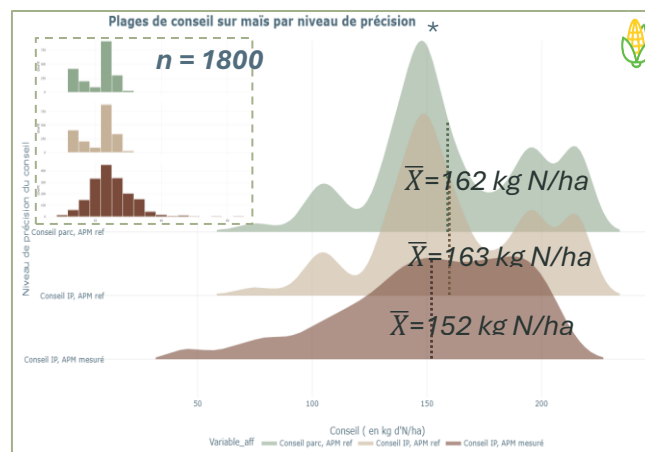


Figure 14 : Distribution des conseils azote en maïs grain simulés à l'échelle parcellaire (APM de référence) et intra-parcellaire (APM de référence et APM mesuré) sur des parcelles des départements 85

Tableau 4 : Synthèse des valeurs d'APM utilisées sur les départements 85 et 17

(n=1800)	APM mesuré (mg/kg)	APM de référence (mg/kg)
Min	8,4	14,3
Max	75,1	29,9
Moyenne	25,3	21,5

Etude de cas n°1 : Parcelle Ratté (54)

Cette parcelle présente une variabilité intra-parcellaire des valeurs d'APM mesurées entre 16.3 et 30.1 mg/kg. En considérant cette parcelle comme homogène en type de sol (Limon Argileux comme sol dominant en surface), la valeur d'APM de référence est de 18.9 mg/kg.

La prise en compte des mesures d'APM intra-parcellaires (moyenne de 22.5 mg/kg contre 18,9 mg/kg pour le référentiel) entraîne une augmentation de la vitesse de minéralisation qui impacte directement les postes Mh et Ri de +40 % pour le blé. Cette hausse des fournitures en azote du sol induit une diminution du conseil (Figure 15) de 21 N/ha (193 kg/N pour un conseil parcellaire avec APM de référence contre 172 kg N/ha pour un conseil intra-parcellaire avec APM mesuré et Nbjm actualisés). Notons l'absence d'évolution des Nbjm sur blé entre les valeurs de références et celles actualisées pour cette parcelle.

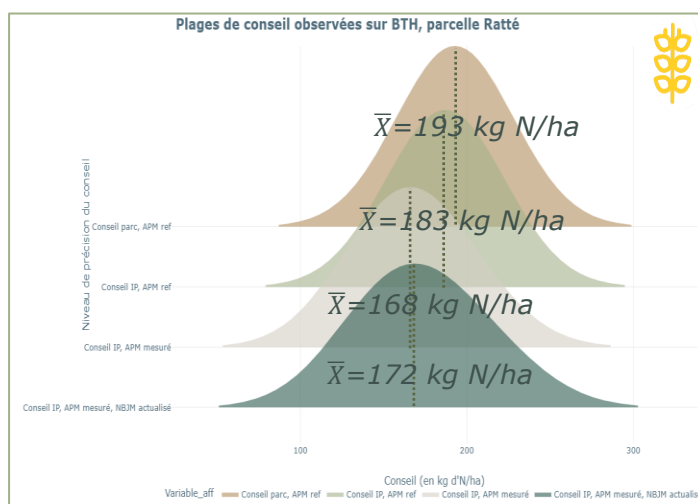


Figure 15 : Distribution des conseils azote en blé selon 4 niveaux de précision – parcelle Ratté (54)

Cette diminution de conseil se traduit par une économie d'intrant de l'ordre de 21 €/ha¹, une baisse des émissions de gaz à effet de serre d'environ 11 % d'équivalent CO₂/kg N/ha et de potentielles réductions de pertes par lessivage.

En maïs, sur cette parcelle, la diminution de conseil entre les deux niveaux de précision (parcellaire et intra-parcellaire) atteint 40 kg N/ha, conséquence directe de la hausse de vitesse de minéralisation (en lien avec l'APM et évoquée pour le blé) ainsi qu'une hausse du nombre de jours de minéralisation de + 4 jours pour les périodes 1 et 2 cumulées (25 jours pour le référentiel contre 29 jours pour la réactualisation).

Etude de cas n°2 : Parcelle Roussières-Challans

Cette parcelle présente une variabilité intra-parcellaire de l'APM très marquée, entre 14,4 mg/kg et 50,1 mg/kg. Cette différence est la conséquence de la conversion récente de prairies en culture de vente à la suite de remembrements successifs.

La prise en compte des mesures d'APM intra-parcellaires (moyenne de 22.7 mg/kg contre 25,2 mg/kg pour le référentiel) entraîne une baisse de la vitesse de minéralisation qui impacte les postes Mh (-24 %) et Ri (-42 %) pour le blé. Ces postes du bilan sont également impactés par la diminution du nombre de jours de minéralisation de plus de 5 jours (périodes 1 et 2 cumulées).

Cette variation des fournitures en azote du sol entraîne une augmentation du conseil (Figure 16) de 80 kg N/ha (145 kg N/ha pour un conseil parcellaire avec APM de référence contre 225 kg N/ha pour un conseil intra-parcellaire avec APM mesuré et Nbjm actualisés). Cette variation de conseil se traduit par :

- Une dépense supplémentaire en intrant de 80 €/ha¹.
- Un potentiel gain de rendement pouvant atteindre 11,5 q/ha², soit un gain de 210 €/ha³.

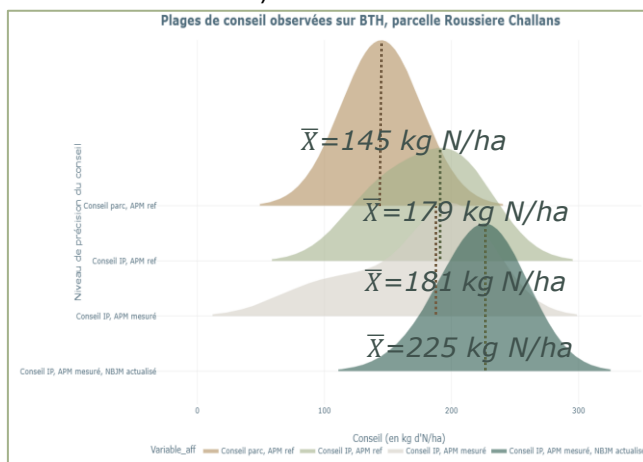


Figure 16 : Distribution des conseils azote en blé selon 4 niveaux de précision – parcelle Roussières-Challans (85)

En maïs les tendances restent les mêmes, avec une augmentation du conseil de 54 N/ha : 130 kg N/ha pour un conseil parcellaire avec APM de référence contre 185 kg N/ha pour un conseil intra-parcellaire avec APM mesuré et Nbjm actualisés. Cette augmentation de conseil est également la

¹ 1€/uN pour une solution azotée

² Données issues de 6 courbes de réponses à l'azote, dept 16, 17, 79, entre 2015 et 2020

³ Moyenne prix de vente du blé sur la période 2014-2024 : 182 €/t



conséquence des deux phénomènes simultanés ; une vitesse et un nombre de jours de minéralisation revus à la baisse.

Conclusion

L'Azote Potentiellement Minéralisable connaît une variabilité inter et intra-parcellaires fortes. Ses facteurs de variabilité identifiés avec cette approche combinée, analyse multivariée et modélisation permettent d'identifier les facteurs de variabilité suivants :

- Chimique : pH, CaO
- Physique : CEC, textures qui ne diminuent pas la qualité du modèle mais ne l'augmentent pas de manière significative dans notre jeu de données.
- Biologique : MO
- Pratiques : typologie
- Passé : historique prairie à confirmer avec une approche plus précise de la qualification de cette variable

Les travaux portés sur la modélisation de l'APM sont encourageants et offrent des possibilités à court terme de travail de réévaluation des références d'APM par type de sol sur des secteurs bien représentés dans la base de données. Dans un second temps ces résultats devront être confirmés sur des données avec une distribution géographique homogène afin d'affiner l'équation de modélisation de l'APM et de l'appliquer dans le cadre de la caractérisation des sols. Les jours normalisés de minéralisation connaissent une variabilité élevée et conditionnée par la variabilité climatique et de potentiel hydrique du sol. Sa réactualisation en tenant compte du changement climatique tout en l'indiquant sur des classes de potentiel hydrique permettrait une meilleure approximation des valeurs de référence.

L'étude de conseil en masse sur maïs grain comme en blé tendre d'hiver présente une distribution des conseils plus étendue, ainsi qu'une moyenne des conseils intra-parcellaires significativement plus faible que le conseil parcellaire.

La prise en compte de ces facteurs de variabilité à l'intra-parcellaire augmente donc la qualité du conseil en affinant l'estimation de la minéralisation au printemps (Mh), du reliquat post récolte et le calcul du reliquat sortie d'hiver (Ri) au travers de l'estimation de la minéralisation d'automne. Les gains permis en diminuant l'échelle de calcul du bilan azoté sont :

- Économiques : réduction des intrants ou gain en productivité
- Agronomiques : réduction du stress causé par une sur ou sous fertilisation
- Environnementaux : réduction des émissions de CO₂ et des pertes par lessivage.

Dans cette étude la spatialisation du rendement définie à partir du potentiel de chaque micro-zone déterminé par le potentiel hydrique et les historiques de rendement n'a pas fait partie des modalités d'observation du conseil. Sa prise en compte aurait permis un gain supplémentaire significatif sur des zones à faible potentiel pour lesquelles les valeurs d'APM et de potentiel hydrique sont majoritairement les plus faibles, avec pour conséquence des valeurs de Mh et de Ri diminuées impliquant une compensation sur le besoin en conseil.



Références bibliographiques

- Boon, V, 2009, Amélioration du paramétrage d'un modèle de minéralisation, Rapport de stage
- Brueel, V., Darbin, T. (2021). Modélisation et spatialisation des reliquats d'azote sortie hiver : Intérêt pour la modulation intra-parcellaire de la fertilisation azotée. *15ème rencontre Comifer-GEMAS*. Clermont-Ferrand.
- Epiclès, Cahier des charges bilan N
- FAO, Reference manuel, (2024) Chap1 FAO crop water productivity model to simulate yield response to water, V. 7.0-7.1
- Gauthier, M., & Champagne, M. (2017). Évaluation de la Santé Globale des Sols.
- Hénès, Annexes sur la minéralisation et le bilan hydrique, version II (1999)
- Kruse, J. S., Kissel, D. E., & Cabrera, M. L. (2004). Effects of drying and rewetting on carbon and nitrogen mineralization in soils and incorporated residues. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 69(3), 247-256.
- Meyer, N., Welp, G. & Amelung, W. Effect of sieving and sample storage on soil respiration and its temperature sensitivity (Q10) in mineral soils from Germany. *Biol Fertil Soils* 55, 825–832 (2019). <https://doi.org/10.1007/s00374-019-01374-7>
- Morvan T., B. L. (2015). Minéralisation de l'azote des sols (Ouest) : résultats du projet "Mh".
- N'Dayegamiye, A., Giroux, M., & Gasser, M. O. (2007). La contribution en azote du sol reliée à la minéralisation de la MO: facteur climatique et régions agricoles influençant les taux de minéralisation d'azote. In *Colloque sur l'azote, CRAAQ-OAQ* (pp. 2-17).
- Plaza-Bonilla, D., Mary, B., Valé, M., & Justes, E. (2022). The sensitivity of C and N mineralization to soil water potential varies with soil characteristics: Experimental evidences to fine-tune models. *Geoderma*, 409, 115644.
- Ramos, M. (2023). Typologie et fourniture azotée des sols volcaniques pour une amélioration de la fertilisation de la canne à sucre à la Réunion (Doctoral dissertation, Université de la Réunion).
- Rocca C., V. L. (2013). La mesure d'Azote Potentiellement Minéralisable (APM) : un indicateur pour préciser le poste minéralisation du sol. *Les 11èmes rencontres COMIFER-GEMAS de la fertilisation raisonnée et de l'analyse*. Poitiers-Futuroscope.
- Valé, M. (2024). JT24-Comifer-PRESENTATION-INDICATEURS-BIOLOGIQUES

