

La mesure d'Azote Potentiellement Minéralisable (APM) : un indicateur pour préciser le poste minéralisation du sol

ROCCA C.⁽¹⁾, VARVOUX L.⁽²⁾; AUMOND C.⁽¹⁾; SERVONNAT E.⁽¹⁾; REGNIER JM.⁽³⁾; BERNARD C.⁽³⁾;
RAYNAUD B.⁽¹⁾; DARBIN T.⁽¹⁾

¹InVivoAgrosolutions, ²TERRENA, ³InVivoLab's

Résumé :

En France, la préconisation azotée auprès des agriculteurs s'appuie sur une méthode agronomique bénéficiant d'une trentaine d'années de recul, qualifiée par le COMIFER et disponible dans les outils de plan de fumure agronomique et réglementaire. Plus concrètement, il s'agit d'établir un bilan comptable des entrées et des sorties d'azote de ce système. Cette méthode, précise, amène cependant une certaine complexité, puisqu'il s'agit de quantifier au mieux la valeur de chacun des termes de l'équation ; terme représentant chacun un compartiment azoté (le reliquat à la sortie d'hiver, la minéralisation de l'humus au printemps, l'azote apporté par les apports organiques (etc...) et les besoins de la plante). Or la taille de ces compartiments est hautement dépendante du contexte pédo-climatique, (c'est-à-dire de la combinaison type de sol et climat) influant à la fois sur les stocks d'azote et sur leur transformation en éléments disponibles. Le reliquat à la sortie d'hiver (Ri) et la minéralisation au printemps (Mh) sont les deux postes majeurs des ressources en azote de cette équation puisqu'ils interviennent de façon majoritaire quel que soit le type d'exploitation (céréalière ou élevage).

Si le reliquat peut être mesuré sur le terrain, ce n'est pas le cas de la minéralisation qui reste une donnée particulièrement difficile à évaluer. Ce poste est souvent estimé à partir de valeurs issues d'expérimentations et de ce fait, les normes utilisées ont du mal à prendre en compte toutes les situations possibles. Des méthodes in situ, de type incubation longue durée en condition contrôlée, permettent de caractériser les cinétiques de minéralisation des sols mais leur utilisation en routine, n'est pas envisageable.

C'est ainsi que dans les années 1990, le Groupe InVivo et les laboratoires Gammsol se sont attachés à mettre au point un indicateur permettant de caractériser la vitesse potentielle de minéralisation du sol grâce à une méthode de mesure rapide sur échantillon de sol via un extractant spécifique : l'APM (Azote Potentiellement Minéralisable). Pour ce faire, 36 échantillons de sol, explorant une large gamme de sol et de systèmes de culture, ont fait l'objet d'une mesure d'APM. Les données de ces mesures ont été mises en corrélation avec des vitesses de minéralisation issues d'une incubation longue durée. Les bons résultats de cette première démarche nous ont encouragés à pousser l'expérience aux champs afin de déterminer si des corrélations existaient avec les fournitures du sol mesurées en expérimentation, à savoir le rendement du témoin sans azote et la dose optimale (la plus petite dose d'azote nécessaire pour produire le meilleur rendement technico-économique). Il est ainsi apparu que l'APM ressortait comme la variable la plus explicative des corrélations avec la fourniture en azote du sol estimée à partir de ces témoins zéro-azote ou de la dose d'azote. De plus, l'APM semble être un bon indicateur intégratif des pratiques influant la minéralisation du sol que sont l'historique des apports organiques et anciennes prairies.

Fort de ces résultats encourageants, il apparaissait pertinent d'utiliser l'APM dans l'outil de plan de fumure Epiclès pour l'évaluation de la minéralisation de l'humus du sol, en déterminant ainsi une

vitesse de minéralisation dans l'équation du COMIFER ($Mh = [TNorg \times Km] \times JN$) avec $TNorg \times Km = Vp$ = vitesse potentielle de minéralisation. Pour cela, la stabilité de la mesure d'APM dans le temps a été étudiée, et les résultats montrent que cette mesure, à réaliser en hiver ou en été, est stable pendant 4 à 5 ans si les pratiques restent inchangées.

Aujourd'hui l'APM est donc utilisé pour qualifier la minéralisation de l'humus dans le sol et ce à deux périodes clé. La première, précédemment citée, concerne la minéralisation au printemps (Mh). La seconde est la minéralisation de l'humus à l'automne (impliquant des nombres de jours de minéralisations adaptés) qui permet, dans Epicles, de calculer un reliquat sortie hiver estimé (Ri). Ce reliquat est ainsi calculé à partir de l'estimation d'un reliquat entrée drainage, affecté d'un lessivage hivernal quantifié par le modèle de Burns ($RSH = \text{Reliquat entrée drainage} \times (1 - \% \text{ de lessivage}^*)$). Chaque parcelle renseignée dans l'outil Epicles bénéficie donc d'un reliquat sortie hiver et ce, quelle que soit la situation (sol superficiel ou caillouteux).

L'APM constitue ainsi, aujourd'hui, une pierre angulaire de l'outil de plan de fumure Epicles dans sa capacité à affiner la minéralisation de l'humus quelle que soit la période considérée. En effet, lors de la mise en œuvre de l'outil, chaque coopérative établit son référentiel d'APM sur les situations pédologiques de sa région. Chaque agriculteur peut également décider de réaliser une mesure spécifique sur sa parcelle, bénéficiant ainsi du caractère intégratif de la minéralisation de cette mesure, et affinant par là même son conseil.

L'APM devient alors le vecteur d'une meilleure connaissance et qualification des sols sur le terrain.

Afin de s'assurer de la pertinence de ce conseil, l'outil Epicles fait l'objet, chaque année, d'une démarche de validation sur le réseau d'expérimentation des coopératives du Pool Fertil (InVivo Agrosolutions). Il est en effet possible de mesurer l'intérêt de l'APM à deux niveaux :

- Par évaluation directe : En observant si l'intégration d'une mesure d'APM de la parcelle permet d'améliorer la pertinence de la dose calculée sur les courbes de réponse à l'azote.
- Par évaluation indirecte : en comparant les reliquats estimés par l'outil (reflet, entre autre de la minéralisation automnale) et les mesures sur le terrain.

Aujourd'hui l'évolution du cadre réglementaire, qui implique notamment une harmonisation et une clarification des approches en fertilisation azotée, justifie la présentation des éléments techniques ayant amené, il y a 20 ans, à la mise en place d'un indicateur sur la minéralisation du sol. Il nous semble donc important de mieux faire connaître, voir reconnaître, l'APM, pour son caractère opérationnel et pédagogique (puisque'il constitue un index de minéralisation des sols) consolidé par un recul important et le déploiement d'un outil sur environ 3 millions d'hectares et 33 coopératives au niveau national.

INTRODUCTION

En France, la préconisation azotée auprès des agriculteurs est une spécificité qui s'appuie sur une trentaine d'années d'agronomie et formalisée aujourd'hui par l'équation de la méthode du bilan décrite par le Comifer. La force de cette méthode réside notamment dans le fait qu'elle s'appuie d'une part sur une réflexion comptable permettant d'adapter au plus juste la majorité des termes de l'équation, et d'autre part sur une modélisation des phénomènes biologiques du sol, de la plante et de leur interactions. Cette méthode, précise, amène cependant une certaine complexité, puisque'il

s'agit de quantifier au mieux la valeur de chacun des termes de l'équation ; terme représentant chacun un compartiment azoté (le reliquat à la sortie d'hiver, la minéralisation de l'humus au printemps, l'azote apporté par les apports organiques (etc...) et les besoins de la plante). Le reliquat à la sortie d'hiver (Ri) et la minéralisation de l'humus au printemps (Mh) sont les deux postes majeurs des ressources en azote de cette équation puisqu'ils interviennent de façon majoritaire quel que soit le type d'exploitation (céréalière ou élevage). Si le reliquat peut être mesuré sur le terrain en routine, ce n'est pas le cas de la minéralisation qui reste une donnée particulièrement difficile à évaluer.

C'est aussi par son caractère intégratif que ce poste pose tant de difficulté à être évalué, puisqu'il dépend fortement à la fois de l'historique de la parcelle, du type de sol et des conditions climatiques.

Disposer d'un indicateur capable d'affiner l'estimation de la minéralisation d'une parcelle présente donc un intérêt fort d'autant qu'il permet de répondre à un autre enjeu : sensibiliser l'agriculteur à la connaissance de ses sols, de leur fonctionnement et de leur potentiel.

C'est dans l'objectif de mieux calibrer cette dimension qu'a été élaborée une mesure terrain –l'azote Potentiellement Minéralisable Gammsol (l'APM)- permettant à partir d'un prélèvement de terre soumis à un extractant spécifique, de déterminer une valeur corrélée à la minéralisation du sol et observée via l'observation des rendements des témoins sans azote des essais du Pool Fertil d'InVivoAgrosolutions (Réseau d'expérimentations en fertilisation des coopératives InVivo).

Nous nous proposons de présenter ici les éléments qui ont permis d'utiliser l'APM comme un indicateur de la capacité d'un sol à minéraliser, et qui en fait aujourd'hui un indicateur terrain robuste et fiable, capable d'affiner, dans le plan de fumure Epicles, deux postes essentiels : la minéralisation de l'humus au printemps et l'estimation du reliquat à la sortie hiver(en estimant la minéralisation de l'humus à l'automne).

I. MATERIEL ET METHODE

1.1 Rappel d'un contexte

Dès le début des années 1970, de nombreux travaux se sont orientés sur l'évaluation de la minéralisation du sol en s'attachant à mesurer son potentiel de minéralisation (c'est à dire la quantité maximale d'azote que le sol peut minéraliser) et d'y adjoindre des fonctions d'ajustements dépendant essentiellement de la température et de l'humidité pour passer de ce potentiel à une minéralisation effective.

Ainsi deux types de méthodes ont été largement travaillés :

- Les méthodes d'incubation aérobies ou anaérobies :

Parmi les travaux menés à partir des techniques d'incubation, on distingue notamment celle décrite par STANFORD et SMITH (1972). Celles-ci se révèlent être un bon modèle expérimental des phénomènes (CATROUX et al, 1987). La période de prélèvement des échantillons de terre (LAUDELOUT et LAMBERT, 1982 ; BONDE et ROSSWALL, 1987) et leur préparation avant mise en incubation (SPARLING et ROSS, 1988) ont été étudiées. L'influence de la température (STANFORD et al, 1973 - GASSMAN et MUNNS, 1980 ; MULLER et REMY, 1981 ; MARION et BLACK, 1987), de l'humidité du sol (STANFORD et EPSTEIN, 1974 - MYERS et al, 1983 - GASSMAN et MUNNS, 1980) et du système de culture (EL HARIS et al, 1983 ; BONDE et ROSSWAL, 1987) a été quantifiée.

- Les extractions chimiques :

Les techniques d'incubation sont longues et coûteuses à mettre en œuvre, ce qui exclut toute utilisation en routine au niveau du terrain. C'est pourquoi, certains auteurs cherchent à relier l'allure des cinétiques obtenues par incubation à des caractéristiques facilement déterminables (GIANELLO et BREMNER, 1986, 1988 ; CHAUSSOD et al, 1986 ; DELPHIN, 1986, 1987). La quantité d'azote extraite dépend alors largement de la méthode utilisée et peut ainsi varier de 0,5% à 80 % de l'azote du sol selon que l'extraction est douce (0.5% à 4% de l'N total), intermédiaire (20 à 30 % du N total) ou forte (60 à 80 % de l'azote total en utilisant des hydrolyses acides).

Les investissements sur ce thème ont donc été nombreux et variés dans leurs approches, avec le constat qu'elle pose de nombreuses questions sur la pertinence du choix d'une solution par rapport à une autre, et de la bonne prise en compte des facteurs endogènes et exogènes de sa détermination. C'est pourquoi la mise en œuvre d'un "index de minéralisation" doit avant tout permettre de réaliser une bonne discrimination des situations agronomiques, préalable indispensable à la prévision des quantités réellement minéralisées.

Dans le cas de l'APM, nous avons choisi de retenir l'une des deux méthodes développées par GIANELLO et BREMNER en 1986 et 1988. Ces auteurs après un travail méthodologique comparant 12 méthodes chimiques à 5 méthodes d'incubations (dont une longue durée) appliquées à une série d'échantillons de sol brésiliens, identifient deux méthodes chimiques rapides et fiables qui seraient bien corrélées à l'azote potentiellement minéralisable mesuré par incubation.

Nous proposons donc, dans un premier temps d'étudier, sur des situations caractérisées nationalement, la bonne corrélation entre l'extraction chimique selon la méthode de GIANELLO et BREMNER et la minéralisation par incubation longue durée. Dans un deuxième temps, nous étudierons la capacité de cette mesure chimique à représenter au champ les fournitures du sol sur des dispositifs expérimentaux.

Cette démarche effectuée, nous terminerons par une illustration de l'utilisation sur le terrain de cette mesure d'APM.

1.2 1995 : Elaboration d'une mesure terrain de la minéralisation, l'APM

1.2.1 Mesures en laboratoire : Incubation longue durée de 36 sols

1.2.1.1 Description des types de sols

Dans un premier temps, (automne 1989), nous avons décidé de caractériser par incubation aérobie les cinétiques de minéralisation d'un panel de 36 sols. Les échantillons de terre retenus dans l'étude ont été prélevés sur l'horizon travaillé (0 - 30 cm) et proviennent de différentes régions françaises. Ils prospectent une large gamme de situations tant au niveau des types de sol, des statuts azotés que des systèmes de culture (tableau 1). Pour cette étape, la technique d'incubation longue-durée de STANFORD et SMITH (1972) sur 72 semaines a été utilisée.

Type de sol		Précedent		Apports organiques sur la culture		Devenir des résidus	
Nature	Effectif	Nature	Effectif	Nature	Effectif	Nature	Effectif
Argile	13	Blé tendre	10	Fumier	5	Enfouis	25
Argile limoneuse	4	Maïs grain	7	Lisier	6	Exportés	11
Limoneux	8	Maïs ensilage	4	Rien	25		
Limono- sableux	1	Pois	4				
limono-argileux	5	Colza	3				
Sableux	4	Prairie Paturée	3				
Sablo-limoneux	1	Tournesol	3				
		Betteraves	1				
		Lin	1				

Tableau 1 : typologie des échantillons de 36 sols utilisés pour l'incubation de 72 semaines

1.2.1.2 Incubation longue durée

Avant la mise en incubation, l'azote minéral initialement contenu dans l'échantillon est éliminé par lessivage successif et rinçage par différents tampons (successivement CaCl₂ puis ajout d'une solution nutritive ne contenant pas d'azote). L'eau en excès est retirée au moyen d'une pompe à eau, permettant de maintenir une humidité proche de celle de la capacité au champ.

Régulièrement, les quantités d'azote minéralisées sont extraites (2 - 4 - 8 - 12 - 16 - 22 - 30 - 40 - 52 - 72 semaines) par percolation (naturelle ou forcée sans vide)

La quantité d'azote minéral des percolats issus de l'incubation est mesurée par distillation en présence de DEWARDA.

Trois répétitions ont été réalisées pour chaque sol ; la quantité d'azote minéralisée correspond à la moyenne des trois répétitions.

Chaque échantillon fait parallèlement l'objet d'une caractérisation

- Sur une référence : mesure de l'azote total (méthode KJELDAHL)
- Par un tampon spécifique défini par la méthode publiée par GIANELLO et BREMNER.

1.2.2 Validation terrain : expérimentation et démonstration azote

1.2.2.1 Corrélation entre APM et fournitures du sol : courbes de réponse.

Le réseau des coopératives InVivo réalise tous les ans de nombreux essais courbes de réponses à l'azote.

➤ Sur l'ensemble des dispositifs blé tendre, nous disposons de la dose d'azote optimale et du rendement du blé en situation d'azote très limitant. Le rendement obtenu en situation d'azote très limitant est celui du témoin "zéro - azote", ou du traitement "premier apport d'azote seul (60 - 80 kg/ha)".

Pour l'ensemble des dispositifs de type "courbe de réponse en azote" mis en place sur blé tendre d'hiver sur 5 campagnes, de 89-90 à 93-94, la dose optimale d'azote par rapport au rendement est déterminée par la plus petite dose d'azote testée dans le dispositif permettant d'atteindre le rendement maximum à + 3 q. Le seuil de 3 q/ha a été déterminé pour qu'il corresponde à un seuil de

rentabilité, valable encore aujourd'hui sur des hypothèses de prix actualisée (1€ l'unité d'azote, 200€ la tonne de blé, et un pas de dose de 40 kg/ha).

Les résultats des essais sur situations « très limitantes » en azote et sur les doses optimales nous permettront d'évaluer la pertinence de l'extraction par le tampon spécifique GIANELLO – BREMNER pour évaluer les fournitures d'azote par le sol :

- Les rendements des témoins en azote très limitant sont, en effet, le reflet de la minéralisation azotée du sol.
- Une bonne corrélation entre l'APM et la dose optimale constitue une première étape nécessaire pour identifier si l'APM peut participer à l'amélioration du poste clé de la minéralisation de l'humus (Mh) dans le calcul de la dose prévisionnelle en azote.

223 dispositifs ont été localisés sur la carte figure 1, et les principaux type de sol et précédents y ont été rappelé.

Sur les 223 dispositifs disponibles, 8 ont été éliminés de l'étude pour cause de rendement très limités (3), piétin échaudage (2), hétérogénéité de parcelle (1) résultats des mesures terrain (Reliquats sortie hiver et APM) aberrants (2).

Les analyses portent donc sur 215 dispositifs. Cependant, de par leur origine, la composition de ces 215 dispositifs est hétérogène : il s'agit en effet de compiler l'ensemble des dispositifs azote travaillés par les différentes coopératives du réseau sur des protocoles pouvant légèrement varier. Il est ainsi important de préciser sa composition plus précisément.

Nous disposons sur ces dispositifs de la dose optimale dans tous les cas (215 dispositifs), des informations parcellaires nécessaires au calcul du Mh selon la méthode des bilans (176), des mesures d'APM (202 dispositifs) et de Reliquats sortie hiver (Ri) (153 dispositifs), d'autre part, les rendements zéro-azote sont présents sur 128 dispositifs et les rendements sur 1^{er} apport d'azote, sur 185 dispositifs. Toutes ces données seront intégrées, les effectifs seront donc variables en fonction de la problématique considérée.

La mesure de Ri constituera au long de cette étude un fil conducteur important. En effet, cette mesure terrain dont le comportement et la sensibilité est bien connu servira de repère à l'interprétation des résultats de l'APM par rapport aux résultats rendement témoin ou dose optimale.

➤ Ces résultats sur blé seront complétés par des résultats témoins zero-azote maïs grain provenant de deux réseaux régionaux (Alsace (43 dispositifs) et Lot et Garonne (23 dispositifs)). Nous nous intéresserons, sur ces dispositifs plus légers, à illustrer la relation entre APM et fourniture basale du sol.

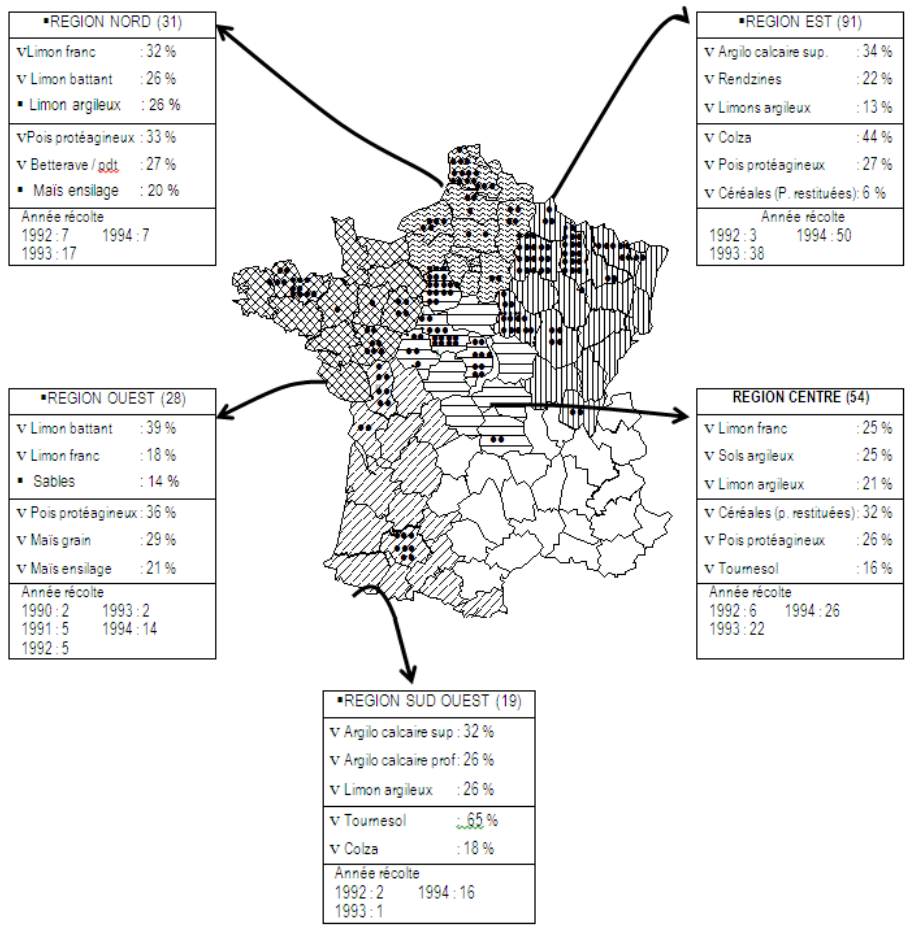


Figure 1 : Carte des 223 dispositifs courbes de réponses à l'azote en blé utilisés entre 1989 et 1994

➤ Variabilité des doses optimales sur blé tendre d'hiver

Les doses optimales d'azote constatées a posteriori varient de 0 à 250 kg/ha. L'histogramme ci-dessous présente cette variabilité.

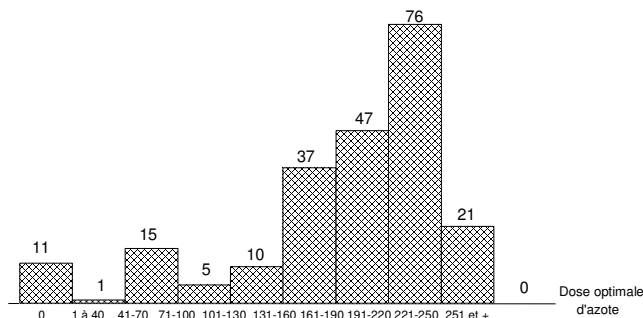


Figure 2 : Répartitions des doses optimales sur les dispositifs en u (kg/ha)

➤ Statuts azotés des sols

Le reliquat d'azote minéral mesuré à la sortie de l'hiver (Ri) varie de 5 à 420 kg/ha (moyenne : 57 kg/ha ± 50).

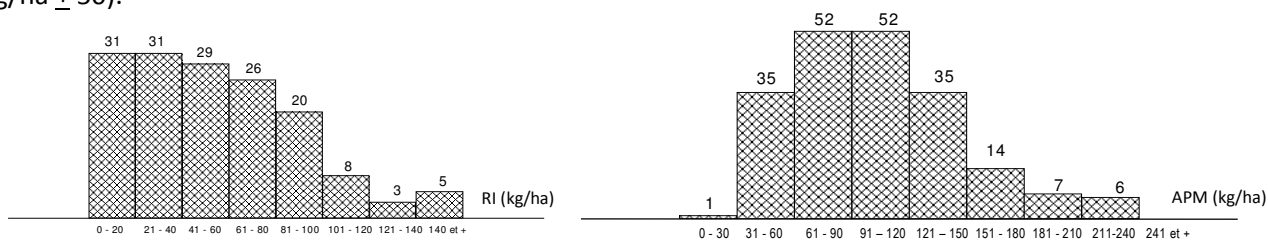


Figure 3 : Répartition des Ri en kg/ha (à gauche) et des APM en kg/ha (à droite) sur les dispositifs courbes de réponse à l'azote sur blé tendre

L'Azote Potentiellement Minéralisable mesuré à la même date est exprimé en kg/ha varie, lui, de 27 à 230 kg/ha (moyenne : 103 kg \pm 44). Les histogrammes présentent leur variabilité :

L'analyse des corrélations entre indicateurs du statut azoté du sol et résultat sur les courbes de réponse nous permettra de déterminer si notre indicateur présente un comportement suffisamment explicatif des fournitures du sol sur les essais en microparcelles.

1.2.2.2 Les facteurs d'influence sur la minéralisation. : Observatoire de mesure

Après avoir exploité les essais courbes de réponse, nous observerons si l'APM est sensible aux facteurs influant la capacité du sol à minéraliser, en particulier le type de sol, les pratiques d'apports d'effluents organiques et les antécédentes prairies. Afin d'accéder à une diversité de profil culturaux suffisant, nous avons retenu ici l'ensemble des parcelles cultivées en blé entre 1990 et 1994, à la dose prévisionnelle calculée X, présentant une détermination d'Azote Potentiellement Minéralisable effectuée en sortie d'hiver (janvier, février) que ce soient les dispositifs micro-parcelles ou des parcelles couples (suivi d'indicateur de pilotage de la nutrition azotée). Les parcelles présentant des données trop incomplètes, ainsi que celles présentant des valeurs d'azote potentiellement minéralisable trop excentrées, supérieures à 50 ppm (3 parcelles) ont été éliminées. Ainsi plus de 1 650 parcelles ont été retenues dans cette étude.

Ces données seront analysées statistiquement par ACP (Analyse des Composantes Principales) et par Corrélation Ascendante Progressive.

1.3 Témoignage Terrain Terrena : De l'APM à la dose d'azote

1.3.1 Robustesse et répétabilité de la mesure de l'APM.

Si l'APM s'avère bien être un indicateur corrélé aux fournitures d'azote et intégratif des pratiques influant sur le potentiel de minéralisation du sol, il est indispensable, avant de pouvoir l'utiliser comme indicateur de routine sur le terrain, de s'assurer de sa robustesse et définir ses domaines de validité. Nous présenterons ici les résultats de mesures d'APM effectuées pendant 5 ans sur 5 parcelles de 5 exploitations à la même période de l'année et au même endroit dans le Maine et Loire, avec la Coopérative Terrena.

1.3.1.1 La minéralisation automnale et printanière dans Epiclès :

A l'issue de ces démarches, il est apparu pertinent d'utiliser l'APM dans l'outil de plan de fumure Epiclès pour l'évaluation de la minéralisation de l'humus du sol, en déterminant ainsi une vitesse de minéralisation dans l'équation du COMIFER :

$$Mh = [TNorg \times Km] \times JN$$

avec $TNorg \times Km = Vp$ = vitesse potentielle de minéralisation.

(Brochure Calcul de la fertilisation azotée, Groupe Comifer Azote)

Cette vitesse de minéralisation est alors valorisée dans deux postes de l'équation du bilan :
Le premier, précédemment cité, concerne la minéralisation au printemps (Mh). La seconde est la minéralisation de l'humus à l'automne (impliquant des nombres de jours de minéralisations adaptés)

qui permet, dans Epicles, de participer au calcul d'un reliquat sortie hiver estimé (Ri) dont voici l'équation de calcul dans Epicles.

$$Ri = \text{Reliquat entrée drainage} \times (1 - \% \text{lessivage})$$

Avec Reliquat entrée drainage = Minéralisation automnale de l'humus + Minéralisation des résidus+ reliquat récolte + effet automne des apports organiques + effet CIPAN.

% less est calculé par le modèle de Burns.

1.3.1.2 Illustration : utilisation de l'APM dans le calcul Epicles

D'un point de vue pratique, l'utilisation d'Epicles par une coopérative implique la mise en place d'un référentiel d'APM sur les différentes situations pédologiques de la coopérative. Ce référentiel servira ainsi pour le calcul de la minéralisation de l'humus au printemps (Mh) et à l'automne, pour le calcul du reliquat (Ri). Mais chaque agriculteur peut préciser le contexte historique de sa parcelle dans ce calcul en mesurant spécifiquement cet indicateur sur cette parcelle.

C'est notamment ce qui est fait dans le cadre du Réseau Experimental Pool Fertil d'InvivoAgrosolutions où Epicles est évalué chaque année sur des courbes de réponses en blé, maïs, colza, principalement. L'analyse des résultats de ces expérimentations est essentielle pour tenter de valider l'utilisation qui en est faite actuellement sur le terrain. Elle nécessite ainsi une démarche spécifique et fera donc l'objet d'une prochaine publication. Nous souhaitons cependant illustrer ces approches par deux exemples concrets :

- Observation d'un dispositif expérimental courbe de réponse à l'azote sur un sol de marais. Sur la zone de la coopérative Terrena.

- Comparaison des Ri estimés par l'outil et les mesures réalisées à la parcelle. Les résultats portent sur les bases de données compilées de 3 coopératives sur 2 campagnes. Chaque parcelle analysée dispose à la fois d'une estimation et d'une mesure de Ri. Ces valeurs estimées et mesurées vont ainsi être présentées par type de sol et par précédent.

II. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 Corrélation de L'APM avec les vitesses de minéralisation obtenues par incubation.

3.1.1 Résultats des incubations longues durées

L'évolution des quantités d'azote minéralisé pendant les 72 semaines d'étude montre deux cinétiques de minéralisation différentes dont quelques exemples sont présentés figure 4 (les résultats sont présentés en annexe1)

- La "minéralisation de l'humus stabilisé du sol", dont la vitesse reste constante entre la 4ème semaine et la 30ème semaine d'incubation, voire plus longtemps pour certains sols. Sur cette période, la quantité d'azote minéralisée est reliée linéairement à la durée d'incubation :

- D'autre part, on voit apparaître un "flush de minéralisation" dont le pool d'azote correspondant est épuisé en 15 jours. Il correspondrait à un pool d'azote rapidement minéralisable dont l'accessibilité a été augmentée par la destruction des agrégats de terre lors du tamisage [communication personnelle - JOCTEUR MONROZIER (1995)]

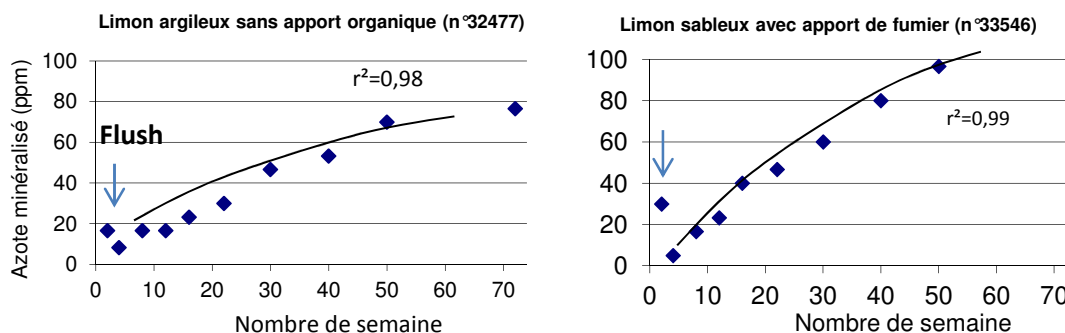


Figure 4 : cinétique de minéralisation des différents types de sol testés

Le tableau 2, ci-dessous, présente les valeurs moyennes et la variabilité des caractéristiques des deux cinétiques de minéralisation du panel de sols.

	Effectif	Moyenne	Ecart-type	1° quartile	Médiane	3° quartile
FLUSH à 15 jours (ppm)	36	25,5	13,9	15,6	23,5	32,0
Vitesse de minéralisation (ppm/semaine)	36	2,8	1,5	1,7	2,3	3,5
Quantités minéralisées (ppm)						
Entre 2 et 30 semaines	36	79,4	36,6	50,4	66,6	102,4
Entre 2 et 72 semaines	36	152,4	70,3	100,9	123,5	199,2

Tableau 2 : valeurs moyennes et la variabilité des caractéristiques des deux cinétiques de minéralisation du panel de sols

Ces résultats sont cohérents avec ceux de TABATABAI et AL-KHAFI (1980) montrant que, pour leurs sols étudiés, la quantité d'azote minéralisée est directement proportionnelle au temps. Ils y mentionnent également des vitesses de minéralisation moyenne de 2.9 ppm/semaine en incubant 12 sols différents pendant 26 semaines à 20°C.

Sur les 36 sols traités, un des échantillons (sur sol sablo-limoneux-échantillon 31) sera écarté de l'étude pour son résultat aberrant : le flush mesuré est de 76 pour des valeurs plafonnant à 45 ppm.

Les analyses porteront donc sur 35 analyses.

Sur nos échantillons, les coefficients des courbes de régressions sont supérieurs ou égaux à 0,97 sur la partie stable entre la 2ème et la 30ème semaine.

3.1.2 Corrélation entre résultat en incubation et APM.

Les mesures de minéralisation par incubation étant caractérisées et validées dans la littérature, nous nous intéressons à leur corrélation avec la valeur mesurée par l'extractant GIANELLO-BREMNER, comparativement aux autres mesures capables de caractériser le statut azoté d'un sol (azote total et carbone).

➤ La figure 5 présente les relations entre l'APM et le flush de minéralisation à 15 jours d'une part et la vitesse de minéralisation d'autre part, sur des sols non calcaires dont le comportement est différent en minéralisation (les 19 échantillons présentant un taux de calcaire total inférieur ou égal à 50 ‰)

Ces mêmes corrélations ont été testées avec l'azote total et le carbone total. Le coefficient de la courbe de régression du flush avec l'APM ($r^2=0,78$) est plus élevé qu'avec l'azote total ($r^2=0,45$) ou avec le carbone total ($r^2=0,41$). C'est également le cas du coefficient de la courbe de régression entre la vitesse de minéralisation et l'APM ($0,73$), l'azote total ($r^2=0,66$) ou le carbone total ($r=0,66$).

Nous remarquons, par ailleurs, que le coefficient de régression entre APM et le flush ou avec la vitesse de minéralisation est meilleur sur sols non calcaire que sur sols calcaire. Pour exemple, il passe de 0,63 en sol calcaire à 0,72 en sol non calcaire pour la régression APM– vitesse de minéralisation

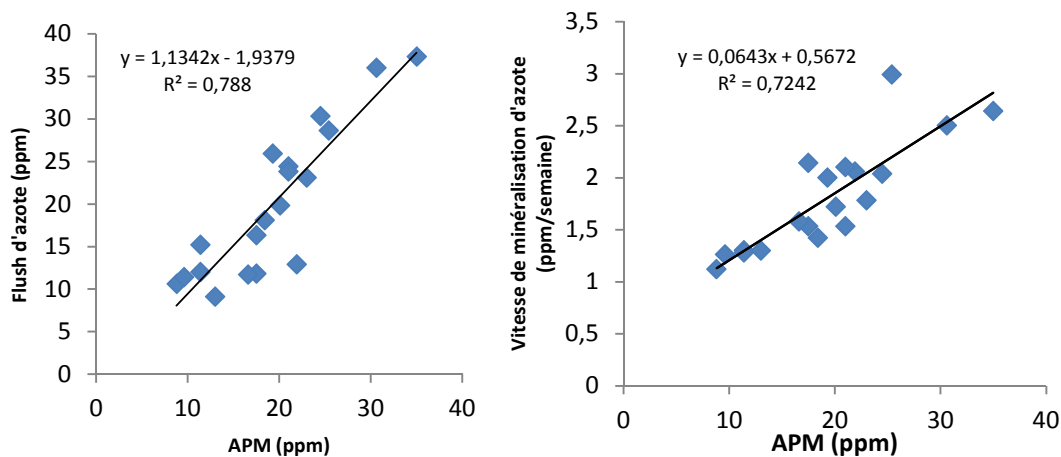


Figure 5 : Corrélation entre l'APM et les valeurs de minéralisation par incubation sur les 19 situations en sol non calcaire (taux de calcaire total < 50%). A gauche, le Flush présente une corrélation avec l'APM caractérisé par un $r^2=0,78$; à droite, la vitesse de minéralisation présente une corrélation avec l'APM par un $r^2=0,72$.

➤ Nous nous intéressons à présent à savoir quelle est la fraction d'azote total que représente l'APM. Nous mesurons ainsi le rapport APM/N TOTAL. Ce rapport varie entre 0.7 et 2.5 % pour le panel de sols étudié. Cette proportion décroît avec l'argile et le pH (fig.6 et fig.7). Caractériser cet indicateur apporte donc une information complémentaire par rapport à la connaissance de l'azote total du sol.

$$\text{Rapport (APM/N total) en \%} = 3.4 - 0.25 \text{ pHeau} - 0.001 \text{ Argile (\%)} \text{ avec } [r^2 = 0.57]$$

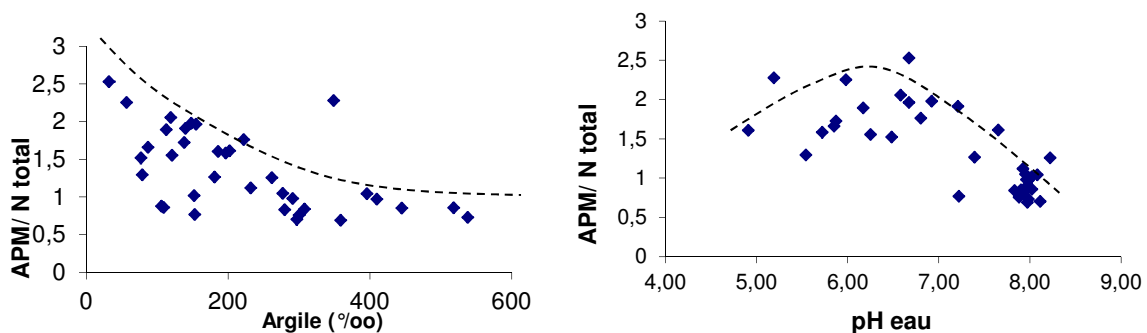


Figure 6 : Variabilité du rapport APM / N total en fonction du taux d'argile Figure 7 : Variabilité du rapport APM/Ntotal en fonction du pH

Conclusion : La mesure d'APM a donc été testée par rapport aux résultats des incubations longue durée, que ce soit le flush ou la vitesse de minéralisation. Il apparaît que

- Le coefficient des régressions sont élevés avec un r^2 allant de 0,74 à 0,86, et meilleurs que ceux des régressions testées avec d'autres variables du statut azoté des sols.
- L'APM représente 0,7 à 2,5% de l'azote total du sol, mais elle apporte une information supplémentaire puisqu'elle diminue sur les taux d'argile élevés ou sur les pH importants.
- Nous notons cependant que les corrélations entre APM et résultats des incubations sont moins bonnes sur sol calcaires et qu'il peut donc s'avérer nécessaire de corriger cette corrélation sur ce type de sol.

3.2 Validation au champ : Analyse de pertinence de l'APM pour évaluer la minéralisation

Nous cherchons désormais à voir si cette corrélation observée en laboratoire se traduit aussi au champ, et si elle constitue un indicateur suffisamment représentatif pour aider à affiner le conseil de la dose d'azote en améliorant l'évaluation de la minéralisation.

3.2.1 Corrélation entre l'APM et les fournitures du sol : essais courbes de réponse

➤ Corrélation entre l'APM et les fournitures du sol pour le blé

Afin de déterminer la possible corrélation entre l'APM et les fournitures d'azote par le sol, les différentes données disponibles sont traitées par ACP (Analyse en Composantes Principales) afin d'identifier les meilleures corrélations.

Le tableau 5 présente la matrice de corrélation entre les différentes variables disponibles pour les 215 dispositifs retenus. Il montre que l'APM est significativement corrélé avec la dose optimale d'azote (DOPT), le rendement "zéro - azote" (Rdt0) et le rendement "premier apport d'azote" (Rdt1).

		DOPT	RDT0	RDT1	APM	APMCC	Ri	Mh
DOPT	r	1	-0,71223	-0,51766	-0,63922	-0,62882	-0,4599	-0,27364
	p	0	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0002
	E	215	128	185	202	176	153	176
RDT0	r		1	0,9073	0,54858	0,51322	0,49975	0,28265
	p		0	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0033
	E		128	118	125	108	103	106
RDT1	r			1	0,46073	0,41306	0,38611	0,28932
	p			0	0,0001	0,0001	0,0001	0,0002
	E			185	173	148	137	158
APM	r				1	0,98073	0,2171	0,38422
	p				0	0,0001	0,0087	0,0001
	E				202	176	145	165
APMCC	r					1	0,09547	0,35211
	p					0	0,2895	0,0001
	E					176	125	140
Ri	r						1	0,21376
	p						0	0,0135
	E						153	133
Mh	r							1
	p							0
	E							176

DOPT : : Dose d'azote optimale.
Rdt 0 : Rendement du témoin "zéro - azote"
Rdt 1 Rendement du traitement avec un 1er apport d'azote
APM : Mesure d'APM sur prélèvement de sol
APMcc : Mesure d'APM corrigée des cailloux de la parcelle
RI : mesure de Reliquat sortie hiver
Mh Poste minéralisation calculé par la méthode des bilans (1989)

Tableau 3 : Extrait de la matrice de corrélation sur toutes les parcelles confondues, représentant le coefficient de corrélation (r), p-value et les effectifs (E). En jaune, sont représentées les corrélations où les effectifs représentent plus de 70% de la base de données parcellaires (soit 150 sur 215 données)

L'hétérogénéité des effectifs (décrite précédemment) représente ici une limite dans la comparaison des corrélations entre les différentes variables considérées. Cependant, Etant donné le nombre important de données et le fait qu'elles proviennent d'une base commune de d'information parcellaires, nous pouvons supposer que ces résultats représentent des tendances fortes dès lors que les effectifs dépassent 150 données (soit 70% des parcelles renseignées). Ces dernières corrélations sont repérées en jaune sur le tableau.

Par ailleurs, si l'on ne s'intéresse qu'à la ligne des corrélations avec le rendement 0 azote (présent dans 128 dispositifs), il paraît dès lors acceptable de comparer les régressions entre elles puisqu'elles intègrent au minimum 80% des données disponibles (les corrélations Ri-témoin zero azote sont testés sur 103 des 128 dispositifs disponibles). Sur ce jeu de données, les corrélations entre rendement témoin-zéro azote et APM sont supérieures à celles obtenues avec le Ri (qui nous serre de référence) ou le poste minéralisation (Mh) calculé par la méthode du bilan (sans intervention de l'APM).

Nous remarquons que

- Le poste de minéralisation calculé à l'époque, sans APM était particulièrement peu corrélé avec la dose optimale (rappelons qu'il était à l'époque borné à 70u)
- L'APM est la variable qui est la mieux corrélée à la dose optimale (effectifs toujours supérieurs à 150 entre l'APM, Ri et Mh)
- L'APM est la variable la mieux corrélée au rendement témoin 1^{er} apport (RDT1). Les observations sur le rendement témoin (RDT0)
- Ces éléments suggère que l'APM consolide l'information contenue dans le Ri et dans la minéralisation standard retenue dans le bilan prévisionnel

Cette corrélation entre l'APM et la fourniture d'azote par les sols est encore confirmée par les résultats obtenus dans les essais sur culture de printemps et notamment le maïs : la corrélation entre rendement du témoin zero-azote et l'APM a également été mis en évidence en 1992 sur des dispositifs maïs grain où les rendements de témoin zero- azote ont été segmenté par classe d'APM. Nous notons que ces dernières sont bien corrélées au potentiel de minéralisation.

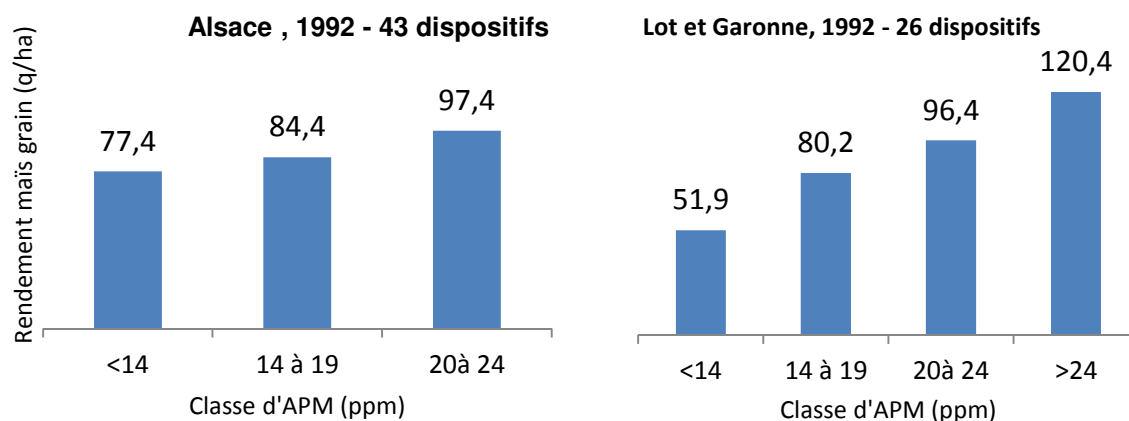


Figure 8 : Rendement maïs grain atteint sur les modalités sans azote des dispositifs segmentés par classe d'APM

➤ Corrélation entre l'APM et la dose optimale

Pour confirmer ces résultats, nous avons calculé la régression entre dose optimale et l'Azote Potentiellement Minéralisable, par précédent bien représenté (colza, pois). L'APM mesure une quantité d'azote potentiellement minéralisable par gramme de sol. Nous avons quantifié cet azote potentiellement disponible en kg/ha d'azote en tenant compte de la masse de sol sur un horizon considéré en tenant compte de la densité du sol. La figure 11 présente la relation entre dose optimale et l'APM pour les précédents colza ($r=-0,81$ pour 47 dispositifs) et pois ($r = -0.75$ pour 49 dispositifs).

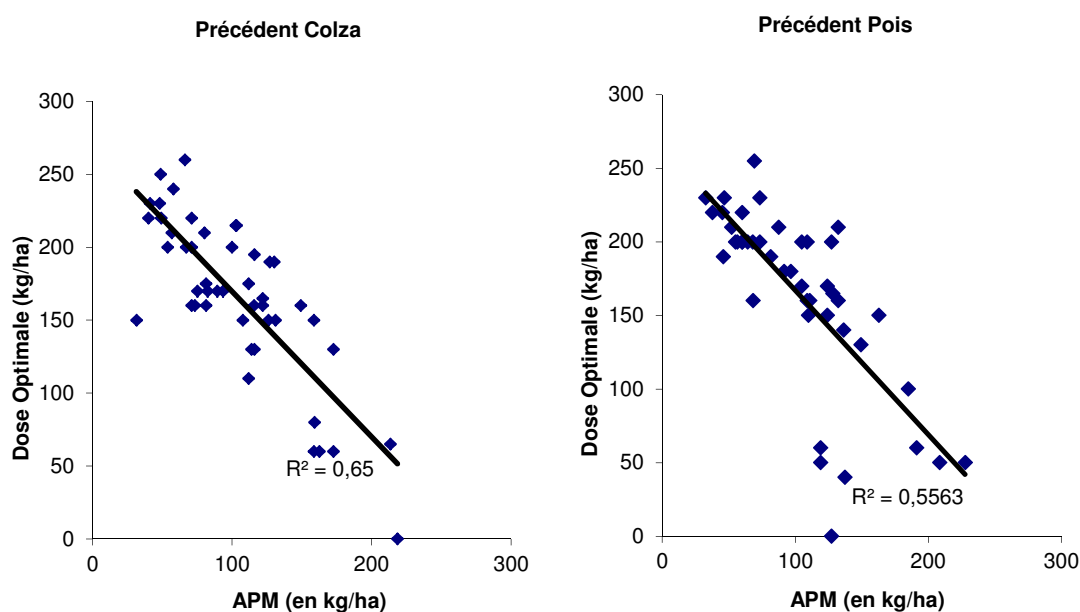


Figure 9 : corrélation entre les valeurs de APM exprimées en unités d'azote et les doses optimales identifiées sur les dispositifs blé tendre

Sur ces 2 jeux de données, l'Azote Potentiellement Minéralisable (APM) est la variable la plus explicative de la dose optimale d'azote. Les comparaisons entre APM et Ri dans la régression avec la dose optimale sont représentées tableau 6. Nous travaillons ici à périmètre identique (on ne retient que les dispositifs disposant à la fois d'un Ri et d'une APM avec le précédent considéré.) ce qui explique que les corrélations soient ici légèrement différentes.

Précédent	Coefficient de corrélation (R)		Effectifs (nombre de parcelles)
	Dose optimale - APM	Dose optimale - Ri	
Colza	-0.7621	-0.3006	31
Pois	-0.7411	-0.5300	36

Tableau 4 : comparaison des corrélations en fonction du précédent entre la Dose optimale et l'APM ou le Ri

3.2.2 Les facteurs d'influence de la minéralisation. : L'observatoire de mesure

Nous nous intéressons à présent à savoir dans quelle mesure l'APM constitue un indicateur intégratif des pratiques influentes sur le potentiel de minéralisation d'un sol.

L'analyse de ces données moyennes montre que les valeurs d'APM dépendent

- du type de sol (tableau 7): les sols calcaires et sableux présentent en moyenne des valeurs d'azote minéralisable plus faibles ainsi que les sols limoneux ou argileux . c'est également le cas des sols battants (limon franc et battant)

- des restitutions organiques (effets "vieille prairie", "apports organiques réguliers") (tableau 8

Type de sol	APM (ppm) valeur moyenne (corrigé des cailloux)					
	Sans apport organique Jamais en prairie		Avec apports organiques		Historique vieille prairie	
	Eff	Valeur	Eff	Valeur	Eff	Valeur
SOLS SABLEUX	61	21.2	10	31.7	12	29.0
LIMONS BATTANTS	209	25,9	81	29,1	55	35.0
LIMONS FRANCS	144	28,3	26	28,6	18	34,3
LIMONS ARGILEUX	264	28,6	53	31,5	33	40.0
SOLS ARGILEUX	89	30,1	28	38,2	28	34,1
SOLS ARGILLO-CALCAIRES PROFONDS	118	23,9	7	(28.4)	5	(29.1)
SOLS ARGILLO-CALCAIRES SUPERFICIELS	94	18,8	8	(20.8)	3	(24.2)
RENDZINES	62	11,1	-	-	-	-

Tableau 5 : valeurs moyenne des APM (ppm) par types de sols et pratiques d'apports organiques et d'ancienne prairie

En sols non calcaires, les effets moyens "vieille prairie" et "apports organiques réguliers" sont :

	Ecart d'APM moyen	Effectif
Effet "vieille prairie"	+ 5,3 ppm	154
Effet "Apports organiques réguliers"	+ 3,8 ppm	213

Tableau 6 : impact de conditions particulières sur sols non calcaire

Conclusion : sur les dispositifs terrain, l'APM ressort comme une variable bien corrélée aux fournitures des sols en azote. Plus précisément l'APM paraît particulièrement représentative de la dose optimale, et intégratif des facteurs influents la minéralisation du sol, tel que les pratiques d'effluents organiques et les effets vieilles prairies.

3.3 Témoignage terrain Terrena : De l'APM à la dose d'azote

Les premiers jalons de la corrélation entre la minéralisation du sol et l'APM étant posé, il nous a été demandé, et il nous semble pertinent, d'illustrer l'utilisation qu'il est fait aujourd'hui de l'APM sur le terrain. Nous insistons sur le fait que cette partie de constitue pas une argumentation expérimentale. Cette argumentation, possible grâce aux dispositifs interannuels du Pool Fertile, nécessite d'y consacrer une étude en soit. Elle ne sera donc pas traiter ici mais fera l'objet d'une prochaine publication.

Le témoignage de la coopérative Terrena consistera à illustrer trois aspects de l'intérêt pratique de l'APM :

- La stabilité de la mesure
- Son utilité pour améliorer le calcul de la dose prévisionnelle dans Epicles
- Son utilité pour estimer un Ri dans toutes les situations quand les mesures ne sont pas possible.

3.3.1 Stabilité de la mesure dans le temps

La réalisation d'APM 5 années de suite sur 5 parcelles de 5 exploitations (fig.10) à la même période de l'année montre que les valeurs évoluent très peu :

- Pour 4 des 5 parcelles, les valeurs annuelles diffèrent de la moyenne pluriannuelle de moins de 1 ppm sur au moins 3 des 5 années.
- Dans le cas de la dernière parcelle, les écarts à la moyenne sont inférieurs à 2 ppm dans 4 années sur 5
- Enfin, tous les écarts à la moyenne sont inférieurs à 3,5 ppm, et seulement 2 années présentent un écart compris entre 2 et 3 ppm.

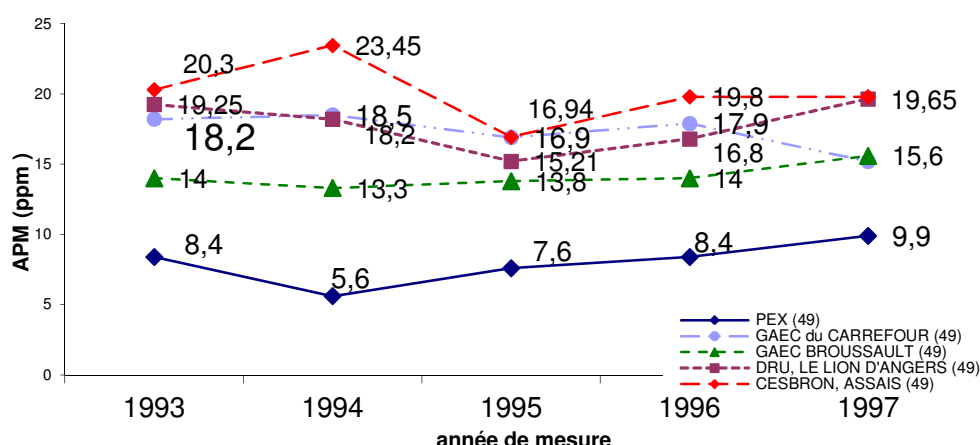


Figure 10 : Evolution interannuelle de l'APM (ppm) sur 5 exploitations et 5 années

Ces résultats illustrent la stabilité de la mesure sur une parcelle : elle est en effet valable 4 à 5 ans si les pratiques culturales restent inchangées.

3.3.1.1 Illustration de l'utilisation de l'APM dans le calcul du plan de fumure Epicles

➤ L'APM pour affiner la minéralisation de l'humus au printemps (Mh)

La figure 11 est une illustration de l'intérêt de la mesure d'APM pour mieux caler une dose d'azote prévisionnelle. L'essai fertilisation azotée mis en place par la coopérative Terrena sur une culture de maïs grain non irrigué se situe en Anjou sur un sol de marais avec une historique prairie naturelle détruite 5 ans auparavant.

La courbe de réponse à l'azote nous indique un effet dépressif des doses d'azote au delà de 40 kg/ha. Le rendement élevé du témoin sans azote confirme ainsi une forte fourniture azotée par le sol. La dose prévisionnelle d'azote calculée par l'outil Epicles (paramétré avec des mesures d'APM estimé) est de 110 unités d'azote / hectare. Mais en intégrant la valeur réelle d'APM mesurée (plus élevée que la moyenne du type de sol en question) la nouvelle dose conseillée devient cette fois ci 10 kg/ha et se rapproche donc de la dose optimale a posteriori. La mesure d'APM et son intégration dans l'outil Epicles se révèle donc être un indicateur pédagogique et pertinent pour adapter les doses d'azote conseillée au contexte pedo climatique des parcelles

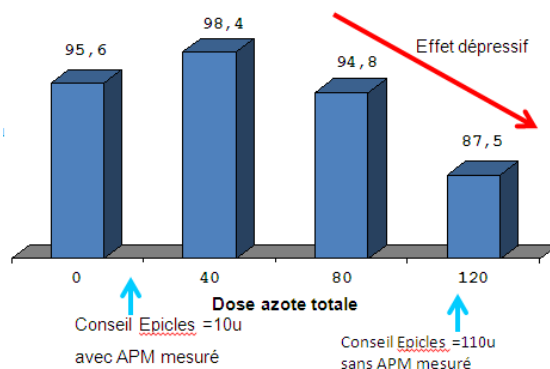


Figure 11 : rendements maïs grains (q/ha) en fonction des doses d'azote appliquées. La dose d'azote intégrant la mesure d'APM à la parcelle est de 10u, c'est la meilleur dose technico-économique de l'essai. Essai Terrena sur sol de marais (49)

3.3.1.2 L'APM pour estimer des reliquats (Ri) sur toutes les parcelles de l'exploitation.

En ce qui concerne le reliquat (Ri), l'analyse de la base de données Epicles montre que les estimations sont, comme les mesures, sensibles aux situations et au précédent. Cette sensibilité se fait dans le même sens et avec la même amplitude présentant ainsi des moyennes équivalentes par situation sauf en terre de craie.

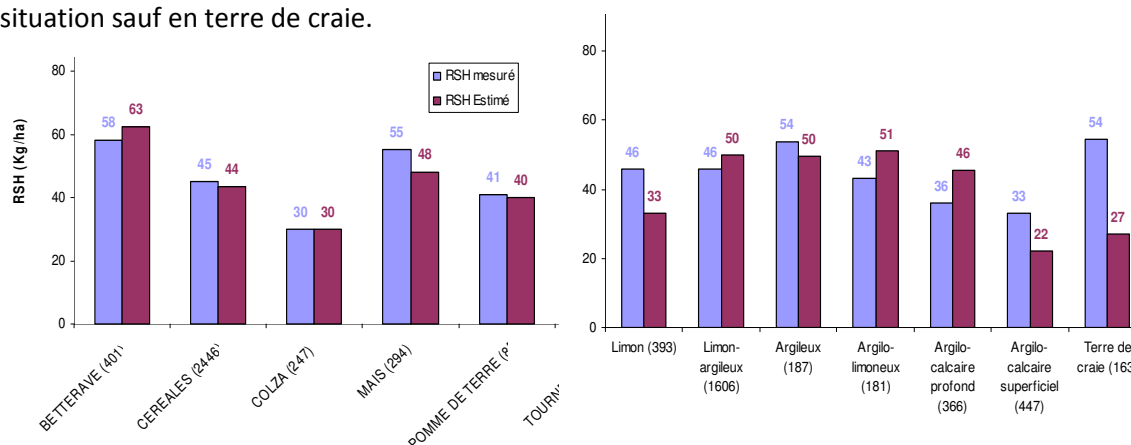


Figure 12 : comparaison entre les mesures de Ri par précédent et type de sol et les estimations réalisées sur la base de données Epicles.

III. DISCUSSION

- Les phénomènes de flush présenté en début de démarche sont classiquement décrits comme la conséquence, sur la minéralisation, du mode préparatoire de l'échantillon de terre (notamment

par le fractionnement de cet échantillon). Mais la mise en évidence du phénomène temporaire de flush et son lien évoqué avec les modalités de préparation physique des échantillons pourrait peut-être permettre d'expliquer les variabilités de valeurs de reliquats que nous même constaté.

- L'APM permet de bien décrire les phénomènes de minéralisation du sol, mais cette méthode ne permet pas de prédire les besoins des plantes en fonction notamment des conditions climatiques. Les mesures actuelles de faim d'azote réalisées par diverses méthodes de pilotage ou l'observation directe en végétation par exemple en comparant les bandes doublement fertilisées (ou le niveau de développement de la biomasse) demeurent essentielles pour décrire les interactions plante – sol – climat demeurent complémentaire de ce bilan prévisionnel amélioré par une meilleure connaissance de la minéralisation.

Cette mesure APM pourrait cependant être un élément de base au développement des approches dynamique, en particulier dans sa capacité à évaluer des vitesses de minéralisation par situation et historique culturale.

Les travaux actuels n'ont pas encore abordé l'intérêt de cette mesure dans certains type de sols pour lesquels la méthode du bilan a été complété par l'application d'un Coefficient Apparent d'Utilisation de l'azote engrais, ou par la nécessité de définir un objectifs de rendement au-delà de la moyenne olympique pour permettre d'atteindre le rendement potentiel permis par la situation agro climatique de l'année considérée.

CONCLUSION

L'évaluation de la minéralisation des sols est au cœur des préoccupations de l'agriculture, tant pour parvenir à la définition de la dose optimale que pour la connaissance des quantités d'azote minéralisées à l'automne, susceptibles d'être entraînées dans les eaux profondes.

Fortes de la bibliographie internationales sur la caractérisation de la fourniture en azote du sol, les études effectuées à INVIVO entre 1990 et 1994 ont permis de mettre au point une mesure terrain d'estimation de la minéralisation du sol utilisable au champs. Cette mesure est basée sur une méthode d'extraction douce de l'azote après incubation d'un échantillon de terre, grâce à un tampon spécifique caractérisé par GIANELLO et BREMNER en 1988..

L'expérience, menée sur un panel de 35 sols profilant des situations variées, incubés pendant 72 semaines, montre que la minéralisation de l'azote dans des conditions optimales, c'est à dire l'azote potentiellement minéralisable (20°C à humidité non limitante) est corrélée avec deux cinétiques de minéralisations successives:

- un « flush » de minéralisation dont la quantité d'azote est épuisée en 15 jours
- et une « vitesse de minéralisation de l'humus stabilisé du sol » dont la vitesse reste constante entre la 4eme et la 30eme semaine d'incubation voire plus.

L'APM, associé à d'autres caractéristiques agro climatiques caractérise alors la vitesse de minéralisation du sol. La pertinence cette mesure pour estimer la minéralisation a été vérifiée au

champ sur les dispositifs expérimentaux mis en place au sein du Pool Fertil (anciennement GAMMFERT). Les résultats montrent que l'APM est la meilleur variable explicative des fournitures du sol (témoin 0 azote) et de la dose optimale (dose permettant d'obtenir le meilleur rendement pour la plus petite dose). L'APM nous semble être est la meilleur variable prédictive testées de cette dose optimale.

On note que l'APM dépend du type de sol et est influencé par un certains nombres de paramètres connus pour leur impact sur la minéralisation comme : la teneur en matière organique du sol, l'effet ancienne prairie et la fréquence des apports organiques entraînent une majoration de sa valeur (+3.8 à +7.7 ppm). L'APM tient ainsi compte de l'historique parcellaire pouvant jouer sur la minéralisation.

Pour le calcul de la dose prévisionnelle, cet APM présente l'avantage d'être pertinente pour les cultures d'hiver et de printemps

Dans le contexte règlementaire actuel, cette mesure présente plusieurs avantages : la logistique est plus simple que celle qu'il convient d'appliquer pour la mesure des reliquats. Elle ne nécessite pas d'être réalisée sur un courte période, et est valable pendant plusieurs années, tant que les pratiques agronomiques ne sont pas radicalement changées. Enfin, Il constitue en effet un outil de sensibilisation à la connaissance des sols. Les coopératives utilisatrices d'Epicles procèdent en effet à la constitution d'un référentiel de mesure afin de mieux caractériser leur sol dans l'outil.

Ces caractéristiques permettent d'envisager de disposer progressivement de cette mesure sur toutes les parcelles de l'exploitation. Sa pertinence pour évaluer la minéralisation de l'azote pour les cultures de printemps est avérée. Il est ainsi possible de valoriser cet indicateur au sein même de la méthode du bilan prévisionnel pour affiner les estimations du Ri lorsque la mesure ne peut pas être faite sur la parcelle (sols caillouteux, sol non portant), et l'estimation standard de la minéralisation de printemps.

D'un point de vue pratique, l'APM se réalise ainsi de préférence en hiver ou en été, il est mis en place par 3 laboratoires (InVivoLab's, Proxylabo et Galys).

Et la finalisation de cette approche nous parait importante dans un contexte qui nécessite une clarification et une transparence sur les outils de conseil mis en place sur le terrain. Il nous est demandé et il nous semble important de présenter et proposer l'évaluation d'un indicateur déployé aujourd'hui par 33 coopératives. D'autant que ce indicateur nous semble de plus être porteur de progrès en participant à l'évolution des outils statiques comme Epicles vers des outils de conseils dynamiques plus performant dans la reconquête de la qualité de l'eau et de l'air.

ANNEXE

N° de l'observation	N° analyse du sol(NANA)	C total (%)	Ntot (%)	APM (ppm)	Flush (ppm)	Vitesse de minéralisation			
						Limite	Rythme	Origine	r ²
1	32475	10.814	1.3	21	24.40	40	1.53349	0.2942	0.99683
2	32477	7.7326	0.9	11.4	15.20	40	1.30367	1.2898	0.98661
3	32986	24.8256	2.51	18.4	29.30	40	3.14571	-7.0438	0.99862
4	33451	21.2209	2.28	20.1	55.70	30	4.72728	-5.5795	0.99455
5	33452	16.5698	2.03	17.5	42.70	30	3.31812	-3.3611	0.99223
6	33546	10.7558	1.16	19.3	25.90	40	2.00042	-1.1203	0.99301
7	33547	4.7674	0.45	11.4	12.00	40	1.27973	1.2652	0.98173
8	33548	25.4651	3.00	22.8	38.30	40	4.15316	-10.2833	0.99956
9	33739	35.0000	1.89	24.5	30.30	30	2.03895	3.9139	0.98651
10	33740	5.3488	0.39	8.8	10.60	30	1.12113	0.5538	0.99244
11	33878	15.9884	2.00	21.0	19.80	40	3.02735	-6.7262	0.99207
12	33879	28.3721	3.35	28.0	42.60	30	4.33483	-3.4230	0.99518
13	33880	22.6163	2.68	26.3	24.40	40	3.58317	-5.3598	0.99307
14	33881	13.9535	1.72	19.3	27.20	30	2.93590	-6.7421	0.99730
15	34873	8.4884	0.85	17.5	16.30	40	1.53358	2.3783	0.97028
16	34874	10.2907	1.24	21.9	12.90	30	2.06036	0.8217	0.98667
17	34876	32.7326	3.84	32.4	35.00	30	5.30621	-10.7952	0.99491
18	35409	43.9535	3.86	62.1	21.10	16	8.29033	-4.6833	0.99689
19	35410	20.7558	2.11	14.9	11.80	40	2.19932	-7.4548	0.99884
20	35411	19.6305	2.04	17.5	11.80	40	2.14339	-5.3896	0.99182
21	36214	33.1395	4.41	30.6	33.60	40	4.29977	-6.4367	0.99755
22	36686	19.1279	2.25	35.0	37.30	30	2.64191	3.5574	0.98387
23	37537	4.3023	0.57	13.0	9.10	40	1.30038	5.7205	0.95159
24	37538	7.9070	0.94	9.6	11.40	30	1.26134	-2.0322	0.99678
25	37539	10.1163	1.19	15.0	19.80	40	1.88838	-3.8714	0.99728
26	37540	10.4651	1.17	23.0	23.10	40	1.78097	4.0180	0.98058
27	37541	9.1860	0.97	18.4	18.10	40	1.42356	4.6167	0.99264
28	37542	20.1163	2.43	25.4	24.00	40	3.74360	-6.9508	0.99862
29	37543	9.8837	1.05	20.1	19.80	40	1.72174	-2.1413	0.99592
30	38023	17.8488	1.93	30.6	36.00	40	2.50249	10.0816	0.98075
31	38024	15.9302	3.87	29.8	76.00	30	3.30441	1.4157	0.99709
32	38025	15.2326	1.47	25.4	28.60	30	2.99090	1.3646	0.99151
33	38034	20.9302	2.46	21.0	16.40	30	4.45738	-9.7965	0.99324
34	38035	6.9767	1.09	16.6	11.70	30	1.58076	0.8616	0.99605
35	38062	12.1512	1.53	14.9	23.20	40	2.30375	-3.9907	0.98817
36	38064	9.4767	1.06	21.0	23.80	40	2.10165	3.1232	0.98732

Annexe 1 : Résultats des incubations longues durée sur les 36 échantillons de sol français

BIBLIOGRAPHIE

Les auteurs remercient les Coopératives Epicles du Réseau InVivoAgro ainsi que les trois laboratoires GAMMSOL (InVivoLab's, Galys et Proxylabo) pour leur contributions à la réalisation de cette démarche,

BONDE - LINDBERG (1988)

Nitrogen mineralization kinetics in soil during long-term aerobic laboratory incubations : a case study.
J. ENVIRON. QUAL. (17) : 147 - 153

BONDE - ROSSWALL (1987)

Seasonal variation of potentially mineralizable nitrogen in four cropping systems.
Soil Sci. Soc. Am. J. (51) : 1508 - 1514

CATROUX - CHAUSSOD - NICOLARDOT (1987)

Appréciation de la fourniture d'azote par le sol. Assesement of nitrogen supply from soil.
CR. Acad. Agric. Séance du 25 mars - (73) : 71 - 79

EL HARIS - COCHRAN - ELLIOTT - BEZ DICEK (1983)

Effect of tillage, cropping and fertilizer management on soil nitrogen mineralization potential.
Soil Sci. Am. J. (47) : 1157 - 1161

GASSMAN - MUNNS (1980)

Nitrogen mineralization as affected by soil moisture, température and depth.
Soil sci. Soc. Am. J. (44) : 1233 - 1237

GIANELLO - BREMNER (1986)

A simple chemical method of assessing potentially available organic nitrogen in soil.
Commun. in Soil Sci. Plant Anal. 17 (2) : 195 - 214

GIANELLO - BREMNER (1986)

Comparison of chemical methods of assessing potentially available organic nitrogen in soil.
Commun. in Soil Sci. Plant Anal. 17 (2) : 215 - 236

GIANELLO - BREMNER (1988)

A rapid steam distillation method of assessing potentially available organic nitrogen in soil.
Commun. in Soil Sci. Plant Anal. 19 (14) : 1551 – 1568

LAUDELOUT - LAMBERT (1982)

Variation saisonnière de la population microbienne du sol. II - Influence sur la minéralisation de

l'azote du sol.

Rev. Ecol. Biol. Sol 19 (1) : 1 - 15

MARION - BLACK (1987)

The effect of time and temperature on nitrogen mineralization in Artic Tundra Soils.

Soil Sci. Soc. Am. J. (51) : 1501 - 1508

REMY, MARIN - LAFLECHE (1974)

L'analyse de terre : Réalisation d'un programme d'interprétation automatique.

Ann. Agron. 25 (4) 607 - 632

SPARLING - ROSS (1988)

Microbial contributions to the increased nitrogen mineralization after air-drying of soils.

Plant and soil (105) : 163 - 167

STANFORD - EPSTEIN (1974)

Nitrogen mineralization - water relations in soils.

Soil Sci. Soc. Am. Proc. (38) : 103 - 107

STANFORD - FRERE - SCHWANINGER (1973)

Temperature coefficient of soil nitrogen mineralization.

Soil Sci. (115) : 321 - 323

STANFORD - SMITH (1972)

Nitrogen mineralization potential of soils.

Soil Sci. Am. Proc. (36) : 465 - 472

TABATAI, AI - KHAFAJI (1980)

Comparison of nitrogen and sulfur mineralization in soils.

Soil Sci. Soc. Am. J. (44) : 1000 - 1006