

Le conseil de fertilisation azotée à la parcelle: Validation d'un nouveau logiciel de fertilisation : Azofert®

REMY DUVAL ⁽¹⁾, JEAN-MARIE MACHET ⁽²⁾

(1) ITB, 45 rue de Naples, 75008 PARIS, France

(2) INRA, Unité Agro-Impact Laon-Mons., rue Fernand Christ, 02007 LAON Cedex, France

RESUME

Depuis plus de 20 années, la méthode du bilan est utilisée avec succès en France pour établir les doses d'azote minéral à la parcelle, sur la base d'une mesure de reliquat d'azote minéral en fin d'hiver. Plusieurs modes de calcul se sont succédés, mais c'est le logiciel INRA AZOBIL qui a vraiment standardisé le calcul et accéléré son application par les laboratoires d'analyse. Aussi les doses d'azote, par application de la méthode du bilan sur actuellement plus de 50% des parcelles de betterave sucrière en France, ont-elles régulièrement baissé tandis que les rendements sucre/ha continuaient à croître. La baisse des doses s'explique par un meilleur ajustement des doses d'une part, mais aussi par l'accroissement des surfaces recevant des fertilisants organiques d'origines diverses, également par la mise en œuvre généralisée de plantes de couvertures en interculture. Ces évolutions dans la conduite des cultures tendent à augmenter le nombre de paramètres qui doivent être pris en compte pour ajuster la dose d'azote minérale au printemps. Aussi l'INRA a développé un nouveau logiciel de conseil : AzoFert®, mettant en application des modèles qui simulent l'évolution des résidus de la culture précédente, des apports organiques réalisés à l'automne, ou encore des résidus de couverts après incorporation au sol. Ces modèles anticipent aussi le devenir de l'engrais apporté, et évaluent l'organisation microbienne et les pertes par volatilisation.. Ces modèles utilisent les données de stations météorologiques proches de la parcelle, prenant ainsi en compte les caractéristiques très locales du climat.

Ce logiciel a été testé et validé par l'ITB sur la base de références expérimentales regroupées dans une base de données. Le travail de validation montre que le gain de précision dans la prise en compte de chaque poste du bilan conduit à améliorer la qualité des conseils par rapport au précédent logiciel. La mise en œuvre de modèles ouvre des perspectives nouvelles de développement de l'outil Azofert®.

FIELD N RECOMMENDATION: VALIDATION OF A NEW SOFTWARE, AZOFERT®

ABSTRACT

For more than 20 years, the balance method for a precise Nitrogen dose calculation for each field, based on residual mineral N measurement at the end of the winter, has been used successfully in France. The previous INRA software, AZOBIL, had standardized the calculation and made it possible to develop the method on a large scale. The mean N doses, using the balance method currently applied on more than 50% of French sugar beet area, have been constantly declining whilst sugar yield/ha has continued to increase. This reduction in the mineral N supply is partly due to a better adjustment of calculated doses, but it can also be explained by an increase in the use of various organic compounds as sugar beet fertilizers, and by the generalization of cover crops during the autumn preceding the sugar beet crop. These developments in crop management lead to an increase in the number of parameters that must be taken into account for adjusting the recommended N dose before sowing. To this end, INRA has developed the new calculation software, Azofert®, integrating models that simulate the developments of previous crop residues, of

organic compounds spread in autumn or the development of cover crop residues after soil incorporation. The models also anticipate the losses of mineral fertiliser by Nitrogen volatilisation and microbial organisation. The software uses meteorological data from the nearest stations, taking into account the very local climate characteristics.

The new Azofert® software has been tested and validated by ITB with a data base of experimental results established in N trials. The study shows that the improvement of precision in each element of the balance method leads to an improvement of the whole calculation when compared to previous software. With the use of models in Azofert®, we can imagine new ways of using and new developments for this software in the future.

STICKSTOFFDÜNGEEMPFEHLUNGEN IM ZUCKERRÜBENANBAU: VALIDIERUNG DER AZOFERT® -BERECHNUNGS SOFTWARE

KURZFASSUNG

Seit mehr als 20 Jahren wird in Frankreich mit Erfolg die Methode der Stickstoffbilanz benutzt, um den Mineralstickstoffbedarf einer Parzelle auf Basis des Reststickstoffgehaltes am Ende des Winters festzustellen. Mehrere Berechnungsmodelle folgten aufeinander, aber es ist die Software INRA AZOBIL, die die Berechnung standardisiert und seine Anwendung durch Analyselaboratorien beschleunigt hat. Dazu sind die Ausbringungen von Stickstoff, die gegenwärtig für mehr als 50% der Rübenanbauflächen Frankreichs durch Anwendung der Bilanz-Methode ausgeführt werden, regelmäßig gesunken, während die Zuckererträge pro Hektar weiter anstiegen. Der Rückgang der Stickstoffmengen erklärt sich einerseits durch eine bessere Anpassung der Mengen, aber auch durch die Zunahme der Anbauflächen, die organischen Dünger unterschiedlichen Ursprungs erhalten, sowie durch die Verallgemeinerung des Anbaus von Zwischenfrüchten.

Diese Entwicklungen im Feldfruchtmanagement tendieren zu einer Erhöhung der Anzahl der Parameter, die berücksichtigt werden müssen, um die Mineralstickstoffdosis im Frühling anzupassen. INRA hat eine neue Beratungssoftware entwickelt, die Modellen anwendet, welche die Entwicklung der Rückstände der vorhergehenden Feldfrucht, der Ausbringung von organischem Dünger im Herbst oder der Rückstände der Zwischenfrucht nach Einarbeitung in den Boden simulieren. Diese Modelle sehen auch die Entwicklung des ausgebrachten Düngemittels vor und schätzen die Verluste durch Mikobenaktivität und Verflüchtigung ab. Diese Modelle benutzen die Daten von Wetterwarten unweit der Parzelle und berücksichtigen damit die lokalen klimatischen Bedingungen.

Diese Software wurde auf Basis einer aus Versuchsreferenzen zusammengefassten Datenbank von ITB getestet und bestätigt. Die Auswertungsarbeit zeigt, daß der Genauigkeitserfolg bei der Berücksichtigung jedes Aspektes der Bilanz im Vergleich zur vorherigen Software zu einer Verbesserung der Beratungsqualität führt. Die Anwendung der Modelle eröffnet neue Perspektiven für die Entwicklung des Azofert®-Instruments.

INTRODUCTION / INTRODUCTION / EINLEITUNG

La filière betterave-sucre a toujours été attentive à l'évolution des connaissances sur l'azote et la gestion de l'alimentation des cultures. Cet intérêt est justifié par l'incidence forte de la fertilisation azotée sur la productivité en sucre et sur la qualité de la récolte. Aussi les acteurs de la filière se sont-ils impliqués dans la recherche et le développement de méthodes pour l'établissement des conseils de fertilisation à la parcelle. En France, l'application à grande échelle de la méthode des bilans avait été fortement accélérée avec le lancement, par l'INRA de Laon, d'un premier logiciel de fertilisation : AZOBIL®, basé sur un bilan statique. Ce logiciel avait été mis en application à grande échelle sur la culture de betterave sucrière.

Face à de nouveaux enjeux que sont le développement de la production de carburants agricoles, dont le bilan énergétique est très dépendant des doses d'engrais apportées, et la nécessité d'une gestion toujours plus rigoureuse de la fertilisation pour en limiter les impacts environnementaux, un nouveau logiciel a été proposé par l'INRA, nommé AZOFERT®, intégrant une approche dynamique. Ce logiciel, qui utilise des modèles de simulation pour établir les termes du bilan à la parcelle, a fait l'objet d'un travail de validation par l'ITB, pour la culture de betterave sucrière, en utilisant sa base de données expérimentales.

On abordera successivement 3 parties. La première partie montrera en quoi la betterave sucrière est une plante qui s'adapte bien à la démarche du bilan prévisionnel. La seconde partie fera un état de l'avancée de l'utilisation de la méthode dans la pratique, et analysera les limites des logiciels de première génération (type AZOBIL®) face à ces évolutions. La troisième partie montrera les apports du nouveau logiciel et sa validation sur betterave.

1 Le bilan prévisionnel : Une méthode bien adaptée au calcul de fertilisation azotée de la betterave à la parcelle.

1.1 La méthode du bilan prévisionnel

En France, les travaux de la recherche publique (INRA) et des instituts techniques des principales grandes cultures se sont assez tôt référés à un modèle générique, le « bilan prévisionnel » pour établir un conseil de dose à la parcelle cultivée. Le terme de bilan fait référence à une méthode de type comptable. Ce bilan s'applique à la quantité d'azote minéral présent dans le sol sur le volume contenu entre 0 et 90 cm de profondeur. Le calcul revient à équilibrer les entrées et les sorties d'azote pendant une période comprise entre l'ouverture du bilan, où l'on mesure un stock initial R_i (reliquat mesuré en sortie d'hiver), et la fermeture du bilan qui correspond, selon les cultures, à la récolte ou à l'arrêt des prélèvements par la plante ([figure 1](#)). Les entrées à considérer sont les fournitures d'azote liées à la minéralisation de l'humus, à la contribution des résidus de culture précédente et des résidus de culture intermédiaire, à la contribution des produits organiques apportés. On doit y ajouter les apports d'azote par l'eau d'irrigation et l'eau de pluie. Les sorties d'azote minéral correspondent aux prélèvements par la plante, auxquelles s'ajoutent la perte d'azote du stock initial par lixiviation, la consommation d'engrais par organisation microbienne, enfin la part de l'engrais perdue par volatilisation. A la fermeture du bilan, on considère un stock d'azote minéral résiduel dans le sol, stock minimal que la plante ne peut pas absorber.

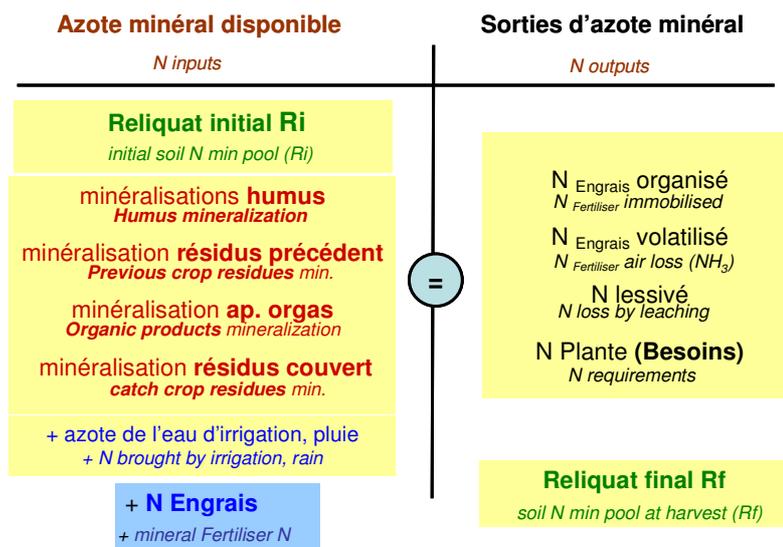
La quantité d'azote à apporter sera établie comme le complément d'azote sous forme d'engrais minéral qu'il faut ajouter aux entrées du bilan pour l'équilibrer.

1.2 La méthode du bilan prévisionnel à la betterave sucrière

Le développement de la méthode du bilan pour la culture de betterave sucrière s'explique par une bonne adéquation entre les principes du calcul et les caractéristiques de la culture.

- ⇒ Généralement, les apports d'azote pour la betterave sucrière sont réalisés en France en un seul apport avant semis, ou en apport localisé lors du semis, éventuellement juste après semis pour des doses faibles. On sait que la culture valorise mal les apports plus tardifs, comme le montrent les résultats expérimentaux ITB (figure 2). Cette contrainte fait qu'il n'est pas envisageable d'ajuster ultérieurement la dose en végétation.

Figure 1: Principe de la méthode du « bilan prévisionnel »
Predictive balance sheet method for N fertilizer advice



- ⇒ La culture se caractérise par une longue durée de végétation et un enracinement profond, qui lui permet de valoriser pleinement l'azote disponible. Comme la culture tolère des stress hydriques modérés et présente une bonne capacité de « rattrapage », ses capacités de prélèvements sont assez constantes du début à la fin de végétation, d'autant que les protections phytosanitaires assurent ce bon fonctionnement végétatif. La conséquence est que l'azote considéré comme disponible dans le bilan sera normalement bien consommé par la culture, avec une incidence assez faible des aléas climatiques. Aussi est-il assez facile d'estimer le stock d'azote final Rf, que l'on considère, selon les sols, entre 15 et 40 kg/ha sur une profondeur de 90 cm (figure 3).

Figure 2: Comparaison d'apports post-levée et apports conventionnels avant semis
Comparison of N fertilizer spreading after emergence and before sowing (conventional)

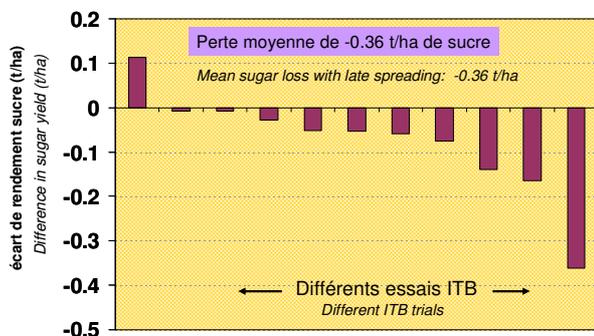
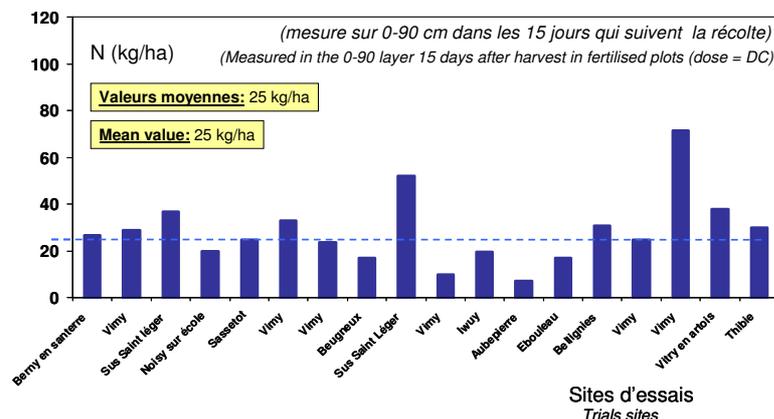
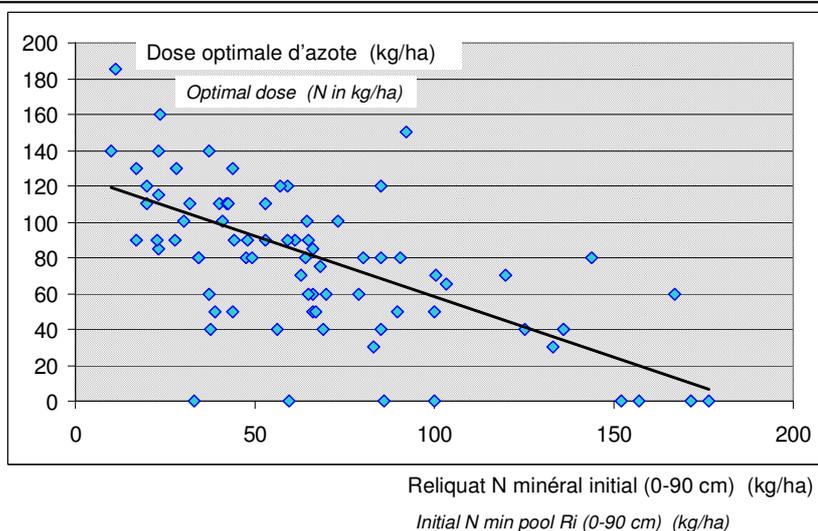


Figure 3: Valeurs de reliquats post récolte Rf mesurées dans les essais fertilisation ITB
N min pool at harvest (Rf) measured in ITB field trials



⇒ La méthode du bilan repose sur une mesure du stock d'azote minéral à l'ouverture du bilan (Ri). La betterave étant cultivée majoritairement en sol profond, ce stock d'azote initial peut être important, et représenter une forte contribution à l'alimentation de la plante. La figure 4 montre la relation assez étroite qui lie le stock initial Ri à la dose d'azote-engrais optimale.

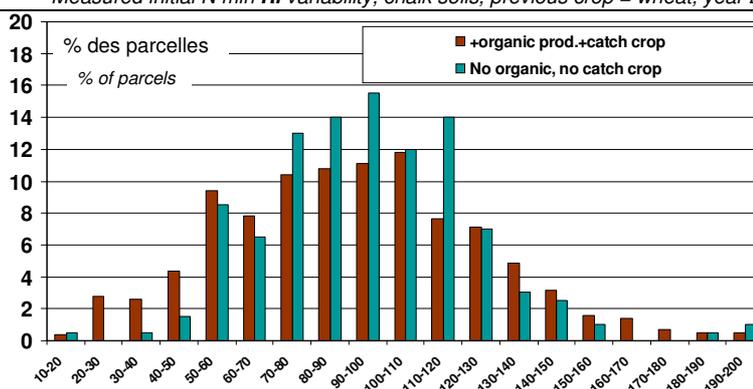
Figure 4: Relation entre reliquat d'azote minéral sur 0-90 cm (Ri) et dose optimale
Relationship between Ri and optimal N fertiliser dose



Source: Essais ITB « réseau azote », 1990 à 98, régions nord-ouest (Pas de Calais - ouest Picardie - Normandie)

La mesure du stock initial Ri est précédée par une période d'interculture longue. La constitution de ce stock dépend de facteurs multiples : Bilan de fertilisation du précédent cultural, gestion de la parcelle (apports organiques, culture intermédiaire, travail du sol), caractéristiques texturales du sol et du sous-sol, climats de l'automne et de l'hiver, etc.... Même en réduisant les sources de variabilité en ne considérant qu'un seul type de sol d'une région, la répartition des valeurs de Ri reste très étendue (figure 5).

Figure 5: Variabilité des reliquats d'azote minéral Ri, sol de craie, précédent blé, année 2007.
Measured initial N min Ri variability, chalk soils, previous crop = wheat, year 2007.



	Moyenne	Ecart-type
Ap.Orga., couvert	93	36.6
Sans orga., sol nu	94	25.5

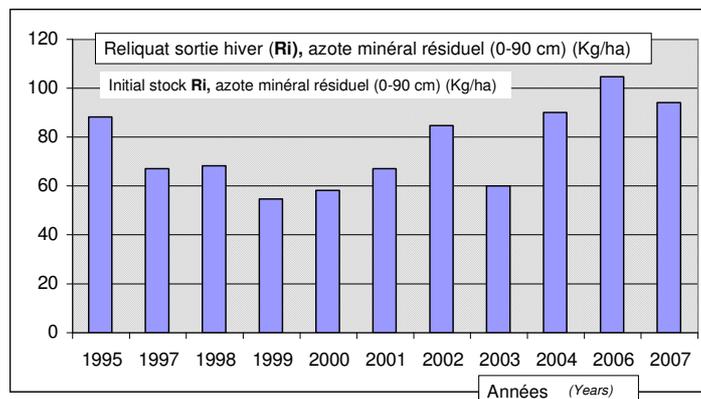
N min (0-90 cm) (Kg/ha)(par classes de 10 kg/ha)

*N min (0-90 cm) (Kg/ha)
(classified with a 10 kg/ha step)*

Source: Laboratoire CAMA, campagne azote 2007

En comparant les années pour un même type de sol et en l'absence d'apports organiques et de culture intermédiaire, on constate également une fluctuation assez importante des valeurs moyennes annuelles (figure 6). Il est donc difficile de se passer de sa mesure, sauf à tolérer une grosse incertitude sur un poste qui représente environ le 1/3 des besoins de la plante en moyenne. Il reste que cette mesure nécessaire représente une charge et un coût non négligeable pour l'agriculteur et pour la filière betterave-sucre.

Figure 6: Variabilité inter annuelle des reliquats d'azote minéral R_i , sol de craie, précédent blé sans ap.org., sol nu en interculture
Measured soil N min pool R_i variability, chalk soils, previous crop = wheat without org., bare soil



Source: Laboratoire CAMA, campagnes azote 1995 à 2007

2 Développement de la méthode du bilan prévisionnel : des acquis incontestables, des possibilités d'amélioration

2.1 Développement du bilan prévisionnel dans les régions betteravières

La filière betterave-sucre a été moteur dans le développement de la mesure du reliquat d'azote minéral (R_i) à la parcelle, et a favorisé le développement de ces analyses et calculs dans les laboratoires de conseils des régions betteravières. La filière s'est impliquée très tôt dans l'organisation des campagnes de prélèvement de janvier à mars. Le volume d'échantillons, toutes cultures confondues, avait fortement augmenté après les années 1990 avec l'impulsion donnée par le premier logiciel de conseil développé pour les laboratoires, AZOBIL (figure 7).

Figure 7: Evolution du nombre de parcelles analysées annuellement par la laboratoire Ldar (Laon)
Number of N min measured fields, for the Ldar laboratory (Laon, North-east region)

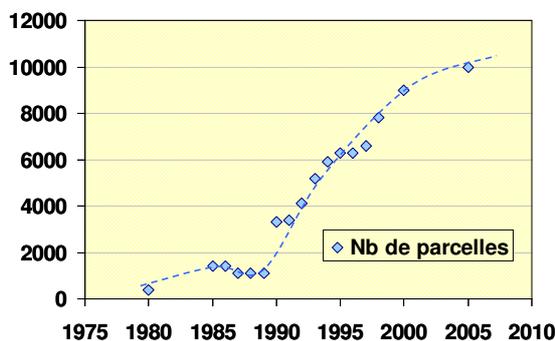
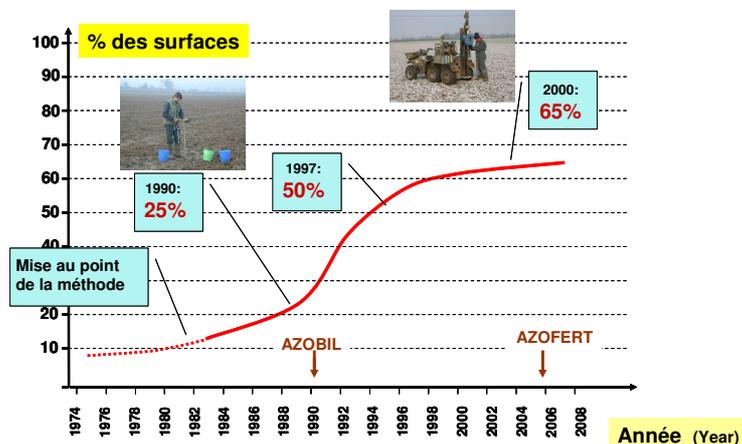
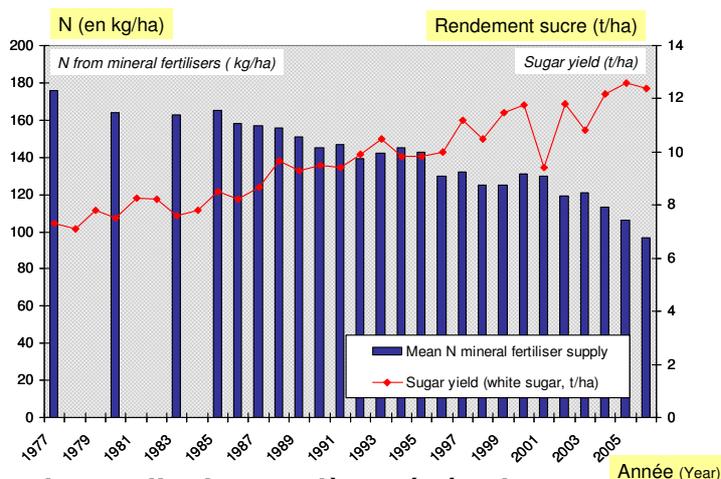


Figure 8: Taux de mesure du reliquat d'azote minéral en sortie d'hiver avant betterave
Rate of N min measured parcels in France, according to ITB – site survey



Pour la culture de betterave, on est passé relativement rapidement de 20 % des surfaces analysées à 50 % dans les années 2000, pour atteindre actuellement plus de 60% (figure 8). Cette évolution montre la confiance acquise par les agriculteurs vis-à-vis de la mesure du stock Ri et vis-à-vis du conseil azoté établi selon la méthode du bilan. Ce recours à la mesure et au conseil a sans aucun doute fortement contribué à l'évolution des doses d'azote sous forme d'engrais minéral appliquées sur la culture depuis les années 1980, évolution caractérisée par une diminution régulière qui semble se poursuivre ces dernières années. Elle a permis de bien accompagner l'évolution des pratiques, en particulier l'augmentation régulière des apports de fertilisants organiques et l'accroissement des implantations de cultures intermédiaires, facteurs qui expliquent en partie l'évolution des doses. Cette évolution est à l'inverse de celle des rendements, qui progressent régulièrement (figure 9). Pour l'industrie, l'adoption par une majorité d'agriculteurs du conseil par la méthode du bilan prévisionnel a favorisé la réception de betteraves de bonne qualité industrielle, conséquence voulue d'une diminution des teneurs en azote alpha-aminé mélassigènes dans les racines récoltées.

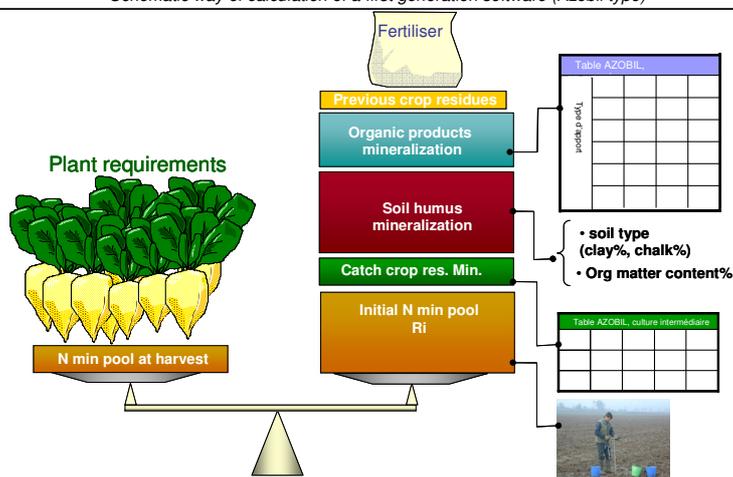
Figure 9: Évolution des doses d'azote minéral et rendement sucre/ha
Evolution of N fertiliser supply for sugar beet in France, and yields increase



2.2 Les points faibles des outils de première génération

La première génération d'outils, parmi lesquels AZOBIL® fait référence, avait fait l'objet d'améliorations progressives pendant une décennie d'utilisation, mais se trouve aujourd'hui confrontée à des limites liées à son mode de calcul. Dans ces outils, les différents postes du bilan étaient chiffrés à partir de tables de valeurs de référence (constantes et forfaitaires) (figure 10). Le logiciel allait chercher ces valeurs en utilisant des clés de choix permettant d'approcher au mieux la situation renseignée par l'agriculteur sur sa parcelle, mais ces valeurs ne pouvaient qu'être des moyennes relatives à des situations standardisées. Aussi ces logiciels pouvaient-ils difficilement répondre à la diversité des situations (climats, sols, pratiques culturales...), à la fois parce que les tables de référence à générer sont rapidement très volumineuses, également parce qu'il est difficile de combiner plusieurs paramètres dans des clés de choix.

Figure 10: Fonctionnement schématique d'un logiciel type Azobil (bilan « statique »)
Schematic way of calculation of a first generation software (Azobil type)



Une difficulté particulière est que la période de calcul du bilan, qui est la période de végétation de la culture dans le cas de la betterave, ne correspond pas à la durée de déroulement des décompositions et évolutions des fertilisants organiques et des résidus végétaux incorporés au sol. Ce non recouvrement des calendriers rend difficile l'intégration chiffrée de processus déjà commencés avant l'ouverture du bilan, et qui ne sont pas terminés à sa fermeture (figure 11). Il oblige à établir des tables de référence pour chaque espèce cultivée, et pour le mode de culture le plus fréquent, en ignorant les situations qui s'en éloignent.

Figure 11: Cinétiques de décomposition et positionnement du calcul de bilan
Decomposition of organic compounds and effect on soil mineral N

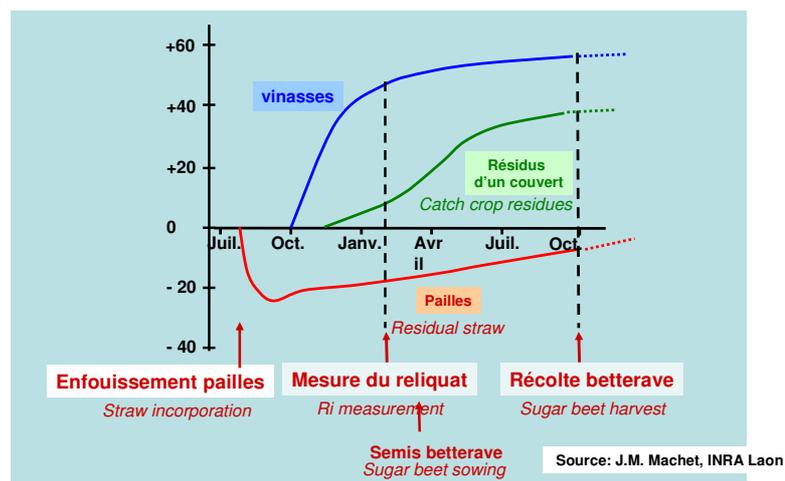
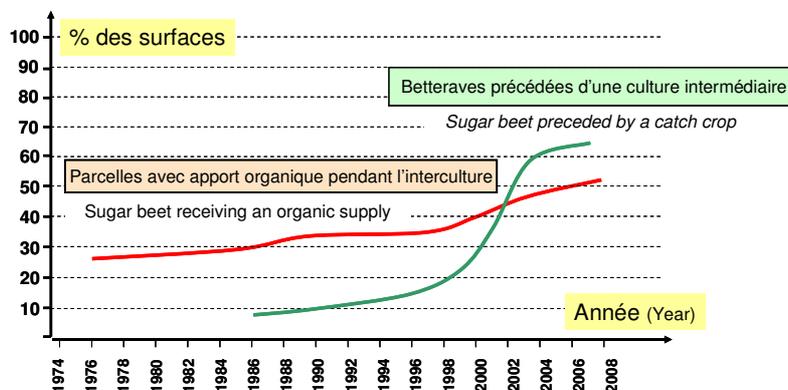


Figure 12: Evolution des pratiques de gestion de l'interculture avant betterave
Evolution of parcel management during intercrop time



Cette difficulté est accentuée par l'évolution des pratiques, qui voit une augmentation régulière des utilisations de produits organiques d'origines diversifiées, avec une part croissante, parmi les produits épandus, des effluents exogènes issus d'industries (boues de papeteries, résidus d'industries alimentaires) ou des villes (boues urbaines, composts, etc.). (Voir figure 12). La diversité est liée à l'origine, mais aussi aux modes de traitement, ou à des mélanges de produits. Ces produits peuvent avoir des cinétiques de décomposition propres, et leur effet sur la disponibilité en azote pour la plante peut être difficile à prévoir.

Une autre évolution récente est le développement des couverts végétaux en période d'interculture avant betterave pour limiter les fuites de nitrate vers la nappe phréatique (figure 12). Elles représentent un paramètre supplémentaire à prendre en compte dans le bilan, avec là encore une variabilité dans les espèces semées, les dates de destruction, et une vitesse de décomposition qui sera fortement dépendante du climat après incorporation, donc fin d'automne et hiver.

Ainsi, les postes du bilan deviennent plus nombreux, et leurs effets combinés plus difficiles à appréhender.

Au moment où était apparue la nécessité de construire des outils informatiques pour le calcul des doses d'azote, les connaissances étaient jugées insuffisamment étayées pour établir l'ensemble des termes du bilan. Les pertes par volatilisation d'ammoniac et l'organisation microbienne aux dépens de l'engrais n'étaient pas prises en compte, et le calcul était établi en considérant que la totalité de l'engrais était prélevé par la plante. Le fait de faire figurer les pertes liées à l'apport d'engrais minéral apporte une information supplémentaire à l'agriculteur, et peut-être une sensibilisation à l'impact environnemental de la fertilisation réalisée.

2.3 Une exigence environnementale accrue

Dans l'objectif de réduire les teneurs en nitrates dans les nappes phréatiques, les pouvoirs publics exercent une pression constante sur la profession agricole pour l'adoption de pratiques raisonnées. L'azote est un critère de qualité pour l'eau, il est également aujourd'hui mis en question dans les phénomènes de réchauffement climatique avec les émissions de N₂O, et dans la qualité de l'air pour les émissions de NH₃. On voit que l'acceptabilité d'une production agricole, en particulier à vocation énergétique, devra remplir un cahier des charges exigeant qui inclura une gestion très rigoureuse de la fertilisation azotée. Même si l'on sait que les conséquences sur l'environnement d'un excès d'apport d'engrais ne sont pas immédiates, et jouent plus à moyen terme qu'à court terme, il est évident que le conseil précis de la dose apportée, tenant compte des caractéristiques de la parcelle, est un gage de bonnes pratiques environnementales.

3 Les apports du nouvel outil AZOFERT®

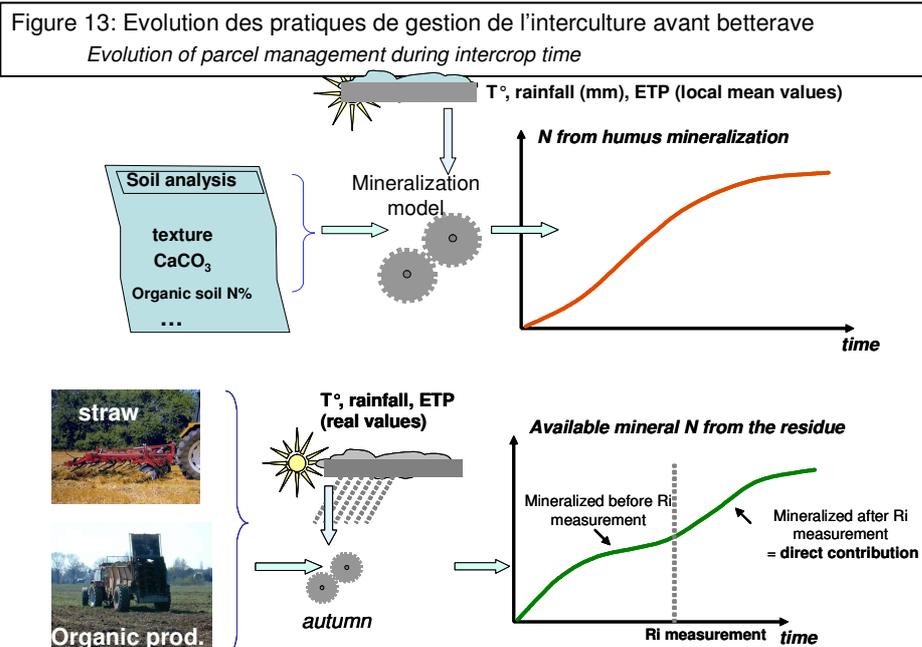
3.1 Un outil basé sur des modèles :

En 2004, l'INRA de Laon et le laboratoire de Laon (Ldar) proposent un nouveau logiciel AzoFert® destiné à prendre progressivement la place du logiciel précédent Azobil, dans la prescription des doses d'azote sur toutes cultures. Il a pour vocation de mieux répondre aux demandes actuelles en basant la préconisation sur l'utilisation de modèles établis par l'INRA. Le modèle global reste le bilan prévisionnel établi à l'échelle de la parcelle. Par rapport au modèle antérieur, il est innovant sur plusieurs points :

- ⇒ Il établit un bilan complet, incluant les différents mécanismes relatifs au devenir de l'engrais (volatilisation d'ammoniac, organisation microbienne), concurrents du prélèvement d'azote par la plante.
- ⇒ C'est un outil générique qui peut s'adapter à toute culture annuelle, pour laquelle les besoins en azote et le cycle de développement sont connus.
- ⇒ Là où Azobil utilisait des données sous forme de tables, chaque terme du bilan est calculé dans Azofert® par simulation, à partir du descriptif parcellaire fourni par l'agriculteur, et en utilisant des données climatiques issues d'une station météorologique proche de la parcelle.

Le calcul par simulation est schématisé sur la [figure 13](#). Le pas de temps est la décade. Les processus de minéralisation de l'humus et de décomposition des différentes sources organiques (résidus de cultures, produits organiques) sont dépendants de la température et de l'humidité du sol de la couche labourée.

A l'ouverture du bilan (fin d'hiver pour les cultures d'automne, semis pour les cultures de printemps), le pool d'azote minéral du sol est mesuré sur la profondeur d'exploitation racinaire. Pour prendre en compte les contributions des résidus de culture, des cultures intermédiaires et des produits organiques apportés au stock d'azote minéral résiduel, la décomposition des différentes sources organiques est simulé (en utilisant les données climatiques réelles de l'année) de la récolte de la culture précédente jusqu'à l'ouverture du bilan. Le concept de « temps normalisé » est utilisé pour intégrer, par décade, les variations de température et d'humidité. La température et l'humidité de référence, prises en compte dans AzoFert®, sont respectivement 15°C et l'humidité à la capacité au champ. De l'ouverture du bilan jusqu'à la récolte de la culture, les contributions nettes ultérieures des différentes sources organiques et la minéralisation nette de la matière organique humifiée sont simulées avec un temps normalisé calculé à partir des données climatiques moyennes (Figure 1).



3.2 Avantages de cette conception :

Tel qu'il est conçu, le logiciel peut réaliser des simulations dans toutes situations en restant fidèle aux interventions réellement pratiquées dans la parcelle (dates d'apports d'effluents, dates d'incorporations de résidus végétaux, etc.). Il doit donc mieux rendre compte des situations éloignées des pratiques courantes. Surtout, il intègre des données climatiques qui régionalisent de facto le conseil. En particulier, lors d'années climatiques particulières, comme ce fut le cas pendant l'automne et l'hiver 2006-2007, le conseil pourra mieux « coller » à la réalité en intégrant les données climatiques enregistrées.

En période d'évolution climatique, on peut penser qu'une mise à jour régulière des moyennes climatiques sera à même d'adapter le conseil, adaptation difficile à réaliser avec un logiciel de première génération.

Certains facteurs qui jouent sur la disponibilité de l'engrais (apports d'engrais localisés au semis) ou qui ont une incidence sur la minéralisation de l'humus (apports d'eau par irrigation), peuvent être pris directement en compte dans les modèles.

De même, sous réserve de rester dans le domaine de validité des modèles utilisés, cette conception doit permettre une utilisation dans une région nouvelle et un climat nouveau sans un lourd travail d'établissement de nouvelles références pour chaque terme du bilan.

3.3 Validation sur betterave sucrière à partir de la base de données de l'ITB

Entre les années 1987 et 1998, l'ITB avait accompagné le développement du conseil de fertilisation sur betterave sucrière en testant chaque année la méthode du bilan dans un réseau d'essais annuels. L'objectif était d'une part de valider les conseils auprès des agriculteurs - utilisateurs, d'autre part d'identifier les situations d'échec et d'en évaluer les causes. Les essais comprenaient 4 à 6 niveaux de disponibilités en azote, incluant toujours un témoin sans apport d'azote minéral, et correspondaient à un dispositif randomisé en blocs. Les doses optimales avaient été établies a posteriori. Elles correspondent à la dose minimale permettant d'obtenir le rendement sucre/ha maximal.

L'ensemble des résultats d'essais (180 au total) a permis de constituer une base de données intégrant, pour chaque essai, un descriptif des conditions culturales et des caractéristiques du sol, et une courbe de réponse aux doses testées. L'ensemble des essais regroupés dans la base est décrit dans le [tableau 1](#).

Cette base de données a été mise à profit pour tester les calculs du logiciel Azofert® sur la culture de betterave sucrière.

Tableau 1 : Caractéristiques des sites d'essais dans chacune des régions

Région	Nbre essais	Sols	Irrigation	Interculture	Précédents	Fertilisants organiques
Champagne	40	Sol de craie : 37 Limon : 3	Sans irrigation	Sol nu : 21 Couvert : 18	Céréale à paille : 37 Autre : 3	Vinasses : 14 Fumier bovin: 3 Lisier porc : 2 Aucun : 21
Nord - Pas de Calais	27	Limon: 12 Limon argileux : 6 Limon sableux : 9	Sans irrigation	Sol nu : 26 Couvert : 1	Céréale à pailles : 27	Fumier bovin: 10 Lisier porc : 5 Boues, compost : 4 Aucun : 8
Picardie - Normandie	83	Limon: 37 Limon argileux : 21 Limon sableux : 17 Sable : 4 Limon calcaire : 4	Sans irrigation	Sol nu : 59 Couvert : 24	Céréale à pailles : 74 Pois : 4 Lin à fibre : 4 Autre : 1	Vinasses : 25 Fumier bovin: 15 Fientes volailles : 9 fumier porc : 1 Boues, compost : 2 Aucun : 31
Beauce - Centre-est	51	Argileux : 8 Limon argileux : 33 Limon: 7 Limon sableux : 1 Argilo-calcaire : 2	Irrigué : 34 Non irrigué : 17	Sol nu : 48 Couvert : 3	Céréale à pailles : 48 Autre : 3	Fumier bovin: 4 vinasses : 5 fumier ovin : 4 Fientes volailles : 2 Aucun : 35

Pour chaque essai, les doses calculées respectivement par AZOBIL® et par AZOFERT® ont été comparées à la dose optimale. Les écarts entre doses conseillées et doses optimales ont été répartis en classes de 30 kg/ha. On peut considérer en effet qu'une dose est bien estimée lorsqu'elle s'écarte de moins de 30 kg/ha de la dose optimale, dans la mesure où la réponse de la culture est peu sensible à de faibles écarts de dose.

Cette classification des réponses permet de visualiser la qualité du conseil obtenu sur l'ensemble des sites d'essais. La [figure 14](#) présente ces résultats pour les régions Picardie et Normandie, caractérisée par un climat assez pluvieux et une forte présence de fertilisants organiques (environ 60% des parcelles), et la [figure 15](#) présente ceux relatifs à la région Beauce, en climat plus sec, avec recours à l'irrigation et plus faible présence d'apports organiques (environ 40 % des parcelles).

Figure 14: Validation sur la base de données d'expérimentations de l'ITB, région Picardie-Normandie
 ITB trials, Picardie-Normandie: trials classification on the distance (calc. dose - optimal dose)

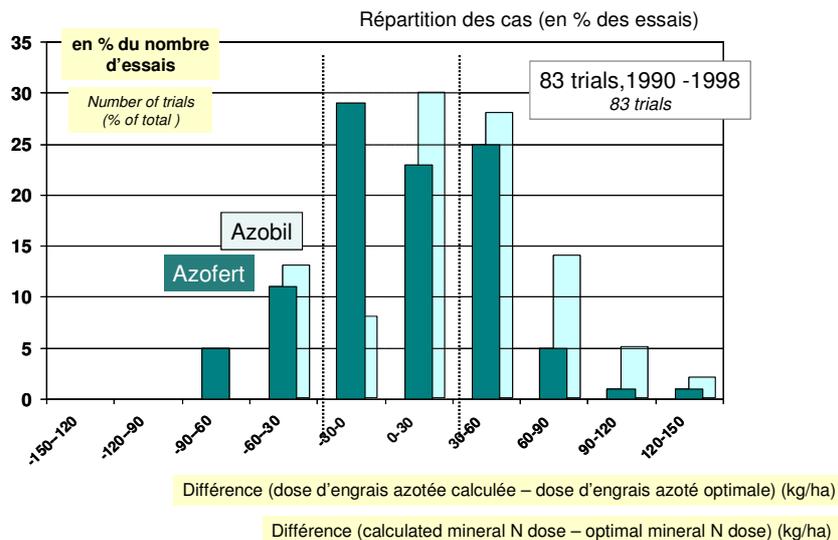
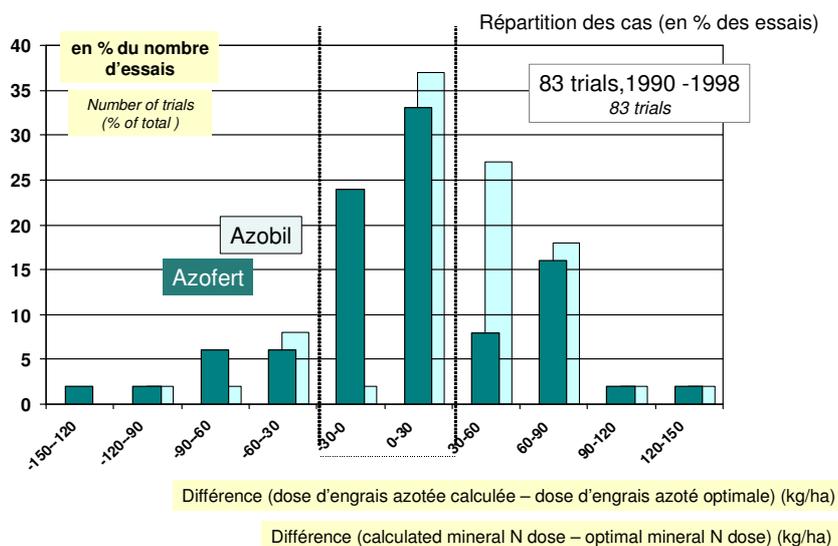


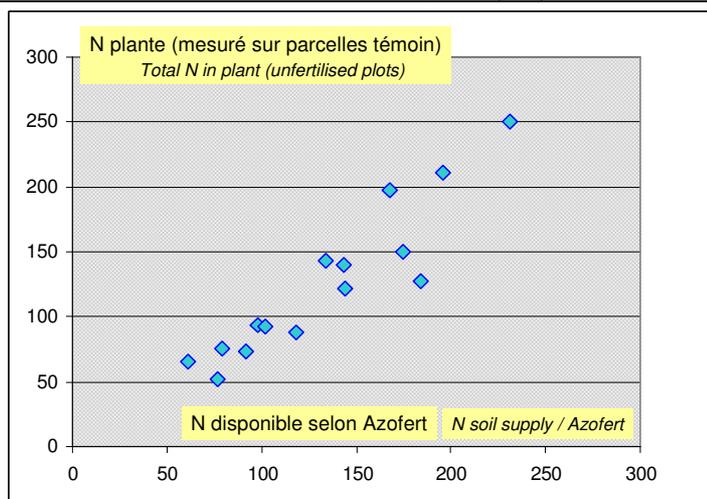
Figure 15: Validation sur la base de données d'expérimentations de l'ITB, région Beauce



Dans ces 2 régions, les résultats montrent un meilleur centrage des conseils avec Azofert, alors que le premier logiciel tendait à surestimer la dose à apporter. On peut l'expliquer par une meilleure prise en compte des conditions d'apports de fertilisants organiques dans le premier cas, et en Beauce par une meilleure prise en compte des caractéristiques du climat et la prise en compte des effets de l'irrigation sur la fourniture d'azote par le sol.

En 2007, dans des parcelles à teneur en CaCO_3 élevées (sols de craie de Champagne et sols argilo-calcaire de la région de Gâtinais), nous avons comparé les fournitures d'azote prévues par Azofert® à des mesures d'azote prélevé par les plantes dans des parcelles sans apport d'engrais, afin de valider les minéralisations de l'humus simulées par le logiciel. Le graphique de la figure 16 présente les résultats obtenus sur 6 sites expérimentaux, qui montrent la validité des estimations réalisées avec Azofert®.

Figure 16: Comparaison des fournitures d'azote et des prélèvements par la plante (en été et récolte)
Mesures dans 6 essais en 2007
*Comparison between available N (Azofert calc.), and total plant N measured on unfertilised plots
Measurements in summer and october, 6 trials (2007)*



CONCLUSION

Le conseil de fertilisation azotée à la parcelle est nécessaire pour garantir la productivité de la culture, un bon niveau de richesse et une bonne qualité industrielle de la récolte. Face à l'exigence d'une agriculture durable et d'une limitation de ses impacts environnementaux, la filière doit proposer une gestion rigoureuse de la fertilisation azotée, donc l'utilisation d'outils performants et capables d'évoluer. Le logiciel Azofert® renouvelle fortement l'approche de la fertilisation par la méthode du bilan prévisionnel, en intégrant des modèles dynamiques, prenant en compte les caractéristiques pédo-climatiques de la parcelle, les systèmes de cultures et techniques culturales qui lui sont appliqués. Sa validation pour la betterave sucrière confirme la valeur des conseils apportés par le logiciel, et montre qu'il apporte une amélioration significative par rapport aux outils de première génération.

D'autres utilisations du logiciel et de ses modèles peuvent être envisagées. A titre d'expertise, les simulations réalisées a posteriori peuvent apporter un diagnostic après une année au climat particulier, et éventuellement donner des explications au comportement observé de la culture.

Par ailleurs, la mesure du stock initial R_i reste aujourd'hui indispensable, dans le schéma actuel d'établissement du conseil à la parcelle, afin d'en garantir la qualité. Ces mesures représentent un coût non négligeable pour l'agriculteur, et un travail d'organisation assez fastidieux pour l'ensemble de la filière. A moyen terme, on peut envisager, au moins dans des situations relativement simples, d'utiliser pleinement le résultat des modèles de simulation depuis la récolte du précédent jusqu'à la récolte de la betterave, et supprimer cette mesure de stock initial R_i . Si on risque de perdre un peu de qualité en passant d'une mesure à une estimation d'un stock R_i virtuel, on pourrait sans doute gagner sur d'autres points :

- ⇒ L'estimation du stock initial pourrait se faire à l'échelle de zones intra-parcellaires, pour des parcelles présentant une hétérogénéité de texture de sol.
- ⇒ La simulation permettrait d'estimer le stock d'azote minéral disponible au-delà de la profondeur de 90 cm. On sait que la racine pivotante est capable de descendre dans

des horizons profonds en cours d'été, donc est capable de s'alimenter sur des réserves disponibles situées au-delà de la profondeur de mesure du stock Ri.

Le logiciel Azofert® pourrait donc être une étape décisive dans l'évolution du conseil de la fertilisation azotée, en proposant un conseil fiable tout en diminuant les coûts pour l'agriculteur et la filière betterave-sucre.

REFERENCES / RÉFÉRENCES / REFERENZEN

- 1) MACHET, J.M. , DUBRULLE, P. , LOUIS, P. 1990. AZOBIL: a computer program for fertilizer N recommendations based on a predictive balance sheet method. *Congress of the European Society of Agronomy*, Paris (FRA). Scaife, A. (Editeur). ESA, European Society of Agronomy, Colmar (FRA). *Proceedings of the First Congress of the European Society of Agronomy*. ESA, Colmar (FRA), 211, 1990
- 2) NICOLARDOT, B.; RECOUS, S.; MARY, B. 2001. Simulation of C and N mineralisation during crop residue decomposition: a simple dynamic model based on the C: N ratio of the residues. *Plant and Soil*, 228, 83-103.
- 3) MARY, B., BEAUDOIN, N., JUSTES, E.; MACHET, J.M. 1999. Calculation of nitrogen mineralization and leaching in fallow soil using a simple dynamic model *European Journal of Soil Science*. , 50, 549-566.
- 4) RECOUS, S., LOISEAU, P., MACHET, J.M., MARY, B. 1996. Transformations et devenir de l'azote de l'engrais sous cultures annuelles et sous prairies Colloque ; Reims (FRA). Lemaire, G. (Editeur) ; Nicolardot, B. (Editeur). *Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes*. INRA Editions, Paris (FRA) ; *Colloques de l'INRA*., 83, 105-120.
- 5) A dynamic version of the predictive balance sheet method for fertiliser N advice. Controlling nitrogen flows and losses. 12th Nitrogen Workshop, University of Exeter, UK, 21-24 September 2003, D.J. Hatch, D.R. Chadwick, S.C. Jarvis, J.A. Roker eds. Wageningen Academic Publishers, pp. 191-193 (poster).