



HAL
open science

Évaluation par la modélisation des performances agroenvironnementales d'outils d'aide à la décision en fertilisation azotée

Manon Lebourg

► **To cite this version:**

Manon Lebourg. Évaluation par la modélisation des performances agroenvironnementales d'outils d'aide à la décision en fertilisation azotée. Sciences du Vivant [q-bio]. 2021. dumas-03578948

HAL Id: dumas-03578948

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03578948v1>

Submitted on 17 Feb 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

CFR Angers CFR Rennes

<p>Année universitaire : 2020 - 2021</p> <p>Spécialité : Master Biologie Agrosociétés</p> <p>Spécialisation (et option éventuelle) : Amélioration, Production et Valorisation du Végétal, option Fonctionnement et Gestion des Agrosystèmes</p>	<p>Mémoire de fin d'études</p> <p><input type="checkbox"/> d'ingénieur de l'École nationale supérieure des sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage (AGROCAMPUS OUEST), école interne de l'institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> de master de l'École nationale supérieure des sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage (AGROCAMPUS OUEST), école interne de l'institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement</p> <p><input type="checkbox"/> d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)</p>
---	---

Évaluation par la modélisation des performances agroenvironnementales d'outils d'aide à la décision en fertilisation azotée

Par : Manon LEBOURG



Soutenu à Rennes, le jeudi 24 juin 2021

Devant le jury composé de :

Président : Olivier GODINOT

Rapporteur : Virginie PARNAUDEAU

Maître de stage : Herinaina A. L. ANDRIAMANDROSO

Enseignant référent : Matthieu CAROF

Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle d'AGROCAMPUS OUEST

REMERCIEMENTS

Mes remerciements s'adressent dans un premier temps, à mon maître de stage A. L. Herinaina Andriamandroso, pour son encadrement et ses précieux conseils pour la rédaction de mon mémoire ; à Marie-Astrid Bouchard pour son implication dans le projet et pour les réponses à mes questions ; et à Bertrand Vandoorne pour ses conseils et pour le suivi régulier des missions qui m'ont été confiées.

Je tiens à témoigner toute ma reconnaissance envers l'ensemble des partenaires du projet et plus particulièrement envers Anne Blondeau de l'institut de Genech et Alexandre Klein du Groupe Carré pour avoir pris le temps de répondre à mes différentes questions sur la conduite culturelle des parcelles d'essais.

Un grand merci à Julien Dassonneville et à Victoria Poulain pour leur aide sur le terrain ainsi qu'à tous les autres stagiaires et le personnel de l'équipe ISAS pour m'avoir accueillie dans les meilleures conditions possibles.

Je remercie également toute l'équipe STICS et plus précisément toutes les personnes impliquées dans l'organisation du webinaire de formation à l'outil qui a eu lieu fin janvier 2021. Cette formation m'a été très utile pour comprendre les bases conceptuelles de STICS mais également pour la prise en main rapide et efficace de l'outil. J'adresse aussi un grand merci à Sitraka Andrianarisoa et à Lucie Buchi qui ont su me guider lors de la phase d'amélioration de la calibration des différents modèles STICS produits dans le cadre de ce projet.

TABLE DES MATIERES

1	Introduction	1
1.1	Le cycle biogéochimique de l'azote	1
1.2	La fertilisation et les risques de pollution	2
1.3	Le raisonnement de la fertilisation	4
1.4	Le projet « OAD en fertilisation azotée »	5
1.4.1	Les partenaires du projet OAD N	5
1.4.2	Les OAD testés.....	6
1.4.3	Problématique du mémoire	8
2	Matériels et méthodes.....	8
2.1	Présentation des sites expérimentaux	8
2.2	Présentation du dispositif expérimental	8
2.3	Les données récoltées	10
2.4	La modélisation sur STICS.....	11
2.4.1	Création des modèles STICS	11
2.4.2	Evaluation des modèles.....	13
2.4.3	La calibration des modèles.....	14
2.4.4	Les variables de sorties d'intérêt.....	14
3	Résultats	15
3.1	Evaluation de la qualité de prédiction des modèles.....	15
3.1.1	Qualité de prédiction des paramètres plante	15
3.1.2	Qualité de prédiction du fonctionnement du sol.....	16
3.2	Quantification des flux d'azote des systèmes de culture étudiés	17
4	Discussion	19
4.1	Fiabilité de la prédiction des modèles STICS	19
4.2	Quantification des différents flux d'azote	20
4.3	Limites de l'étude.....	21
4.4	Perspectives	22
5	Conclusion	22
6	Bibliographie	23
7	Annexes	26

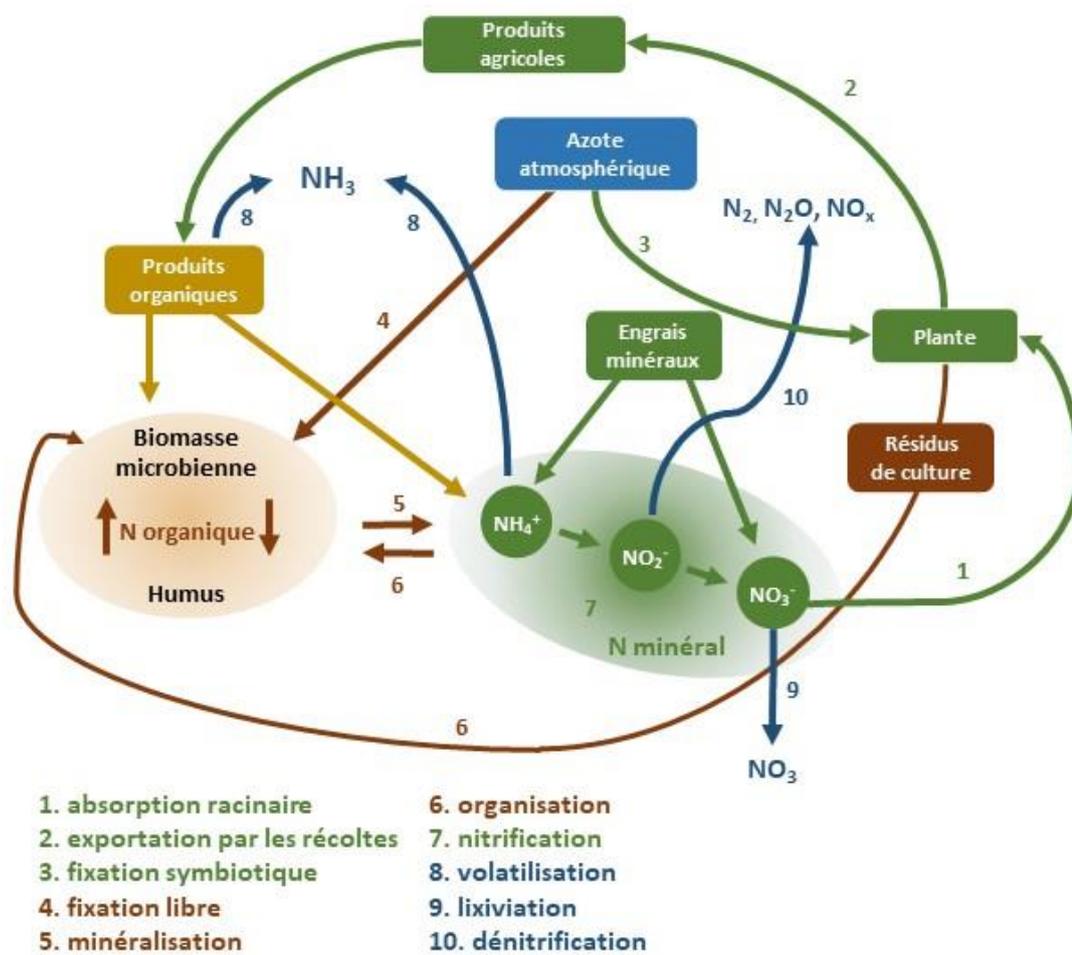


Figure 1 : Cycle simplifié de l'azote dans un sol agricole (Comifer, 2013)

1 INTRODUCTION

1.1 LE CYCLE BIOGEOCHIMIQUE DE L'AZOTE

L'azote est un élément nutritif jouant un rôle fondamental dans l'amélioration du rendement et de la qualité des cultures des systèmes de production agricole actuels (Litke et al., 2018). L'azote est même avec l'eau, le principal facteur limitant de la production des céréales (ARVALIS - Institut du végétal, 2007). En effet, en tant que composant des acides aminés, des protéines, des parois cellulaires, des membranes et des acides nucléiques, l'azote est l'un des éléments les plus importants dans la constitution de la matière végétale (Marschner et Marschner, 2012). Une alimentation azotée insuffisante entraîne une diminution de la synthèse protéique, ce qui peut perturber profondément la croissance et le développement des plantes (Schvartz et al., 2005 ; Vos et al., 2005 ; Uribelarrea et al., 2009). Un déficit azoté provoque également une réduction de l'efficacité photosynthétique foliaire en raison d'un déficit de synthèse de la chlorophylle, ce qui se traduit visuellement par un jaunissement des feuilles (Schvartz et al., 2005 ; Vos et al., 2005). Finalement, dans une telle situation, c'est une baisse de la productivité qui peut être observée (Vos et al., 2005 ; Uribelarrea et al., 2009 ; Litke et al., 2018).

Après l'hydrogène, l'oxygène et le carbone, l'azote est l'un des éléments les plus abondants dans l'univers (Schvartz et al., 2005). Cependant, même s'il est très présent à la surface du globe, les êtres vivants ne peuvent que très marginalement tirer profit de cette abondance : plus de 99% de cet azote est présent sous une forme inerte, le diazote (N_2), que plus de 99% des êtres vivants sont incapables d'utiliser (Jenkinson, 1990). Les composés azotés peuvent être organisés en deux groupes : non-réactif et réactif. L'azote non-réactif est le N_2 ; l'azote réactif comprend le nitrate (NO_3^-), l'ammonium (NH_4^+), l'ammoniac (NH_3), les oxydes d'azote gazeux (NO_x), le protoxyde d'azote (N_2O) et de nombreuses autres formes d'azote inorganique et organique (Sutton et al., 2011). Les plantes absorbent l'azote sous forme d'ion nitrate NO_3^- et d'ion ammonium NH_4^+ , présent dans la solution du sol, grâce à leurs racines. La majorité des plantes annuelles cultivées assimilent de plus grandes quantités de nitrates que d'ammonium : l'assimilation du nitrate est plus rapide en raison de sa forte mobilité en solution dans l'eau du sol (UNIFA, s.d.). L'ammonium, quant à lui chargé positivement, est adsorbé sur la capacité d'échange cationique (CEC) du sol, son assimilation par les racines est donc plus lente et la majeure partie de l'ammonium est transformée en nitrates avant d'être absorbée par les plantes (UNIFA, s.d.). La quantité d'azote absorbée par une plante dépend de nombreux facteurs, dont le stade de croissance, la teneur des autres éléments nutritifs dans le sol, la disponibilité de l'eau du sol ou encore les conditions météorologiques (Tremblay et al., 2001).

Dans un sol cultivé, le stock d'azote minéral est alimenté par différents flux biogéochimiques parmi lesquels figurent notamment la fixation atmosphérique, la minéralisation, les dépôts atmosphériques (par voie sèche ou humide) ou encore les apports azotés (**Figure 1**). Le processus de fixation atmosphérique est défini comme étant la transformation du diazote atmosphérique (N_2) en azote organique. Pour cela, l'azote est d'abord réduit en azote ammoniacal ($N-NH_4$), avant d'être incorporé dans les chaînes de synthèses protéiques et transformé en azote organique. On distingue d'une part la fixation libre, effectuée par certaines bactéries et algues bleues (cyanophycées), et d'autre part, la fixation symbiotique, qui résulte de l'association entre les légumineuses et les bactéries du genre *Rhizobium* (Schvartz et al., 2005 ; Comifer, 2013). La minéralisation de la matière organique du sol (MOS) est caractérisée par un ensemble de processus de transformations biologiques dans les sols de différentes molécules organiques en composés minéraux. Ce phénomène conduit à la production d'azote ammoniacal ($N-NH_4$), puis d'azote nitrique ($N-NO_3$) par le processus biologique de nitrification, qui se déroule sous l'action de bactéries

autotrophes spécifiques (Schvartz et al., 2005 ; Comifer, 2013). Le stock d'azote minéral du sol est également alimenté par des apports en azote, qu'ils soient d'origine minérale (engrais, dépôts atmosphériques) ou organique (lisiers, fumiers, composts, digestats de méthanisation). En effet, dans les systèmes de production actuels, la fourniture d'azote minéral du sol étant très rarement suffisante pour répondre aux besoins des plantes, des engrais azotés sont très fréquemment apportés aux cultures en complément (Comifer, 2013). Dans les sols, ces apports subissent tout une série de transformations microbiennes qui favorisent l'absorption par la plante (par exemple minéralisation des MOS, nitrification), mais aussi leur incorporation aux MOS (organisation) et leur élimination par retour à la forme N_2 par dénitrification (**Figure 1**).

Ainsi donc, il existe également des flux biogéochimiques qui vont aboutir à une diminution de ce stock d'azote minéral dans les sols dont, par exemple, l'exportation par les récoltes, les pertes par volatilisation, par dénitrification, par nitrification et par lixiviation ou encore le phénomène d'organisation (**Figure 1**). La volatilisation correspond au processus physico-chimique de passage du NH_4^+ adsorbé sur le complexe argilo-humique ou dissous dans la solution du sol vers sa forme gazeuse NH_3 libérée dans l'atmosphère (Comifer, 2013). Ce phénomène s'opère à la surface du sol, à partir d'une source d'azote ammoniacal (engrais minéral ou produit résiduaire organique (PRO)) et se produit rapidement après l'apport (de quelques heures à quelques jours). Les pertes par volatilisation peuvent dépasser 20 % des apports d'engrais minéral selon les formes et les conditions d'apport (Comifer, 2013). L'intensité de ce phénomène est étroitement liée aux conditions pédoclimatiques locales (Schvartz et al., 2005 ; Comifer, 2013). La dénitrification est un processus biochimique de transformation de l'azote nitrique en azote gazeux N_2 qui s'opère sous l'action de bactéries spécifiques (Schvartz et al., 2005). De surcroît, aux faibles valeurs de pH, l'enchaînement des réactions chimiques est incomplet, ce qui conduit à la production de formes intermédiaires d'oxyde d'azote dont le protoxyde d'azote N_2O , un puissant gaz à effet de serre (Schvartz et al., 2005). La lixiviation désigne la perte d'éléments minéraux dissous, entraînés par les eaux d'infiltration à la suite de pluie ou d'irrigation vers la profondeur (Comifer, 2013). Contrairement à l'ammonium (NH_4^+) qui est adsorbé sur la capacité d'échange cationique (CEC) du sol, l'ion nitrate (NO_3^-), plus mobile, est facilement entraîné. La quantité de nitrate entraînée au-delà de la zone accessible aux racines dépend en particulier de la lame d'eau drainante, de la quantité d'azote nitrique présente, de sa répartition dans le profil de sol, du type et de la profondeur du sol (Comifer, 2013).

Finalement, les processus qui déterminent la disponibilité de l'azote minéral dans le sol sont pour la plupart sous le contrôle de la biomasse microbienne, dont l'activité dépend fortement des conditions du milieu sol (oxygène, température, et humidité). Certains flux sont aussi sous la dépendance de facteurs pédoclimatiques, comme, par exemple, la lixiviation. De plus, certains des phénomènes cités ci-dessus se déroulent tout au long de l'année avec une intensité variable (minéralisation, organisation, etc.) alors que d'autres sont limités à certaines périodes de l'année (volatilisation, lixiviation) (Comifer, 2013).

La connaissance du cycle de l'azote est ainsi essentielle à l'évaluation des capacités de recyclage biogéochimique de cet élément, et donc à la compréhension de l'évolution du stock d'azote minéral des sols cultivés, ce qui en fin de compte permet l'identification des leviers pour introduire de l'azote dans les parcelles de façon plus raisonnée.

1.2 LA FERTILISATION ET LES RISQUES DE POLLUTION

Historiquement, le maintien de la fertilité des parcelles cultivées a d'abord été basé sur une pratique de culture itinérante, puis sur la jachère, qui assurait un transfert de fertilisants des zones pâturées vers les zones en culture, et enfin par l'apport d'engrais, organiques et minéraux (Schvartz et al., 2005). Entre 1950 et 2000, la multiplication par 2,5 de la production alimentaire mondiale s'est accompagnée d'une multiplication par 8 de la quantité

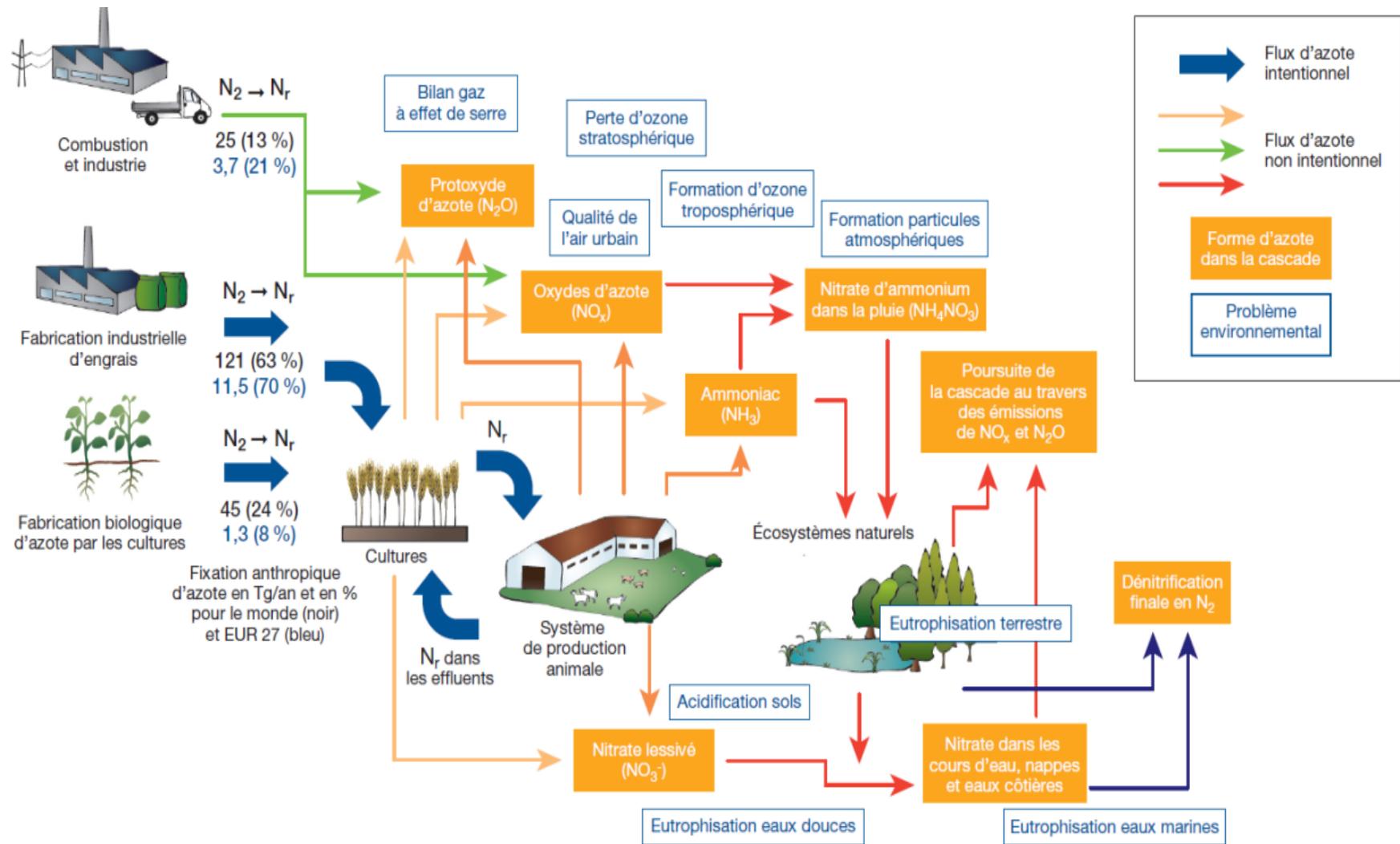


Figure 2 : Schéma simplifié de la cascade de l'azote (Cellier, 2019).

d'engrais azotés apportés (Tilman et al., 2002). Cette hausse repose notamment sur la mise au point, au début du XX^e siècle, du procédé Haber-Bosch, permettant de synthétiser de l'ammoniac NH_3 à partir du diazote atmosphérique N_2 (Erisman et al., 2008). Ce procédé a été la source de la production massive d'engrais minéraux. Il a été l'un des principaux éléments de l'intensification de la production végétale, ce qui a permis de répondre à l'augmentation de la demande alimentaire après la Seconde Guerre Mondiale. Il a été estimé en 2008 que les engrais minéraux azotés issus de ce procédé industriel contribuaient à satisfaire les besoins alimentaires de la moitié (48 %) de la population mondiale (Erisman et al., 2008).

La forte augmentation de l'utilisation d'engrais azotés fait que nous sommes passés, en un siècle, d'une situation où la production agricole était limitée par cet élément qu'est l'azote, à une situation d'apports dépassant souvent, et parfois largement, les besoins des cultures. Et donc, malgré ses immenses avantages du point de vue de la sécurité alimentaire, le recours massif à ces engrais a généré des dégradations de l'environnement telles que la pollution des nappes par les nitrates, l'augmentation de la production de gaz à effet de serre N_2O , l'augmentation des émissions de gaz NO_x et l'acidification des sols et des eaux douces (Vitousek et al., 1997 ; Sutton et al., 2011).

Le cycle de l'azote a été profondément modifié par les interventions humaines de l'échelle de la parcelle agricole à l'échelle mondiale. Depuis la découverte du procédé Haber-Bosch, la circulation d'azote réactif a doublé à l'échelle planétaire, amplifiant la cascade de l'azote (Galloway et al., 2003). Le concept de cascade de l'azote (**Figure 2**), introduit par Galloway et ses collaborateurs en 2003, désigne l'ensemble des transferts successifs des formes réactives de cet élément depuis leur introduction dans l'environnement par l'activité humaine jusqu'à leur retour par dénitrification dans le réservoir atmosphérique sous forme de diazote inerte. Cette approche de la dynamique de l'azote dans l'environnement permet de faire le lien entre l'utilisation de l'azote dans les agroécosystèmes et ses impacts multiples sur l'environnement et la santé (Galloway et al., 2003). La cascade de l'azote est une chaîne de processus qui débute avec la production industrielle d'engrais azotés par la transformation d'une molécule de diazote (N_2) en ammoniac (NH_3) grâce au procédé Haber-Bosch. Il a été estimé que seule la moitié de l'engrais azoté apporté aux cultures se retrouvait dans les parties récoltées (Tilman et al., 2002). L'autre moitié s'échappe vers l'atmosphère (NH_3 , NO_x , N_2O ou N_2), vers l'eau (NO_3^- , azote organique dissous) ou est stockée dans le sol sous forme de matières organiques (Cellier, 2019). C'est de ces phénomènes que découlent les problèmes environnementaux liés aux pratiques de fertilisation azotée. Cinq menaces majeures associées aux excès d'azote dans l'environnement ont pu être identifiées : la qualité des eaux, la qualité de l'air, l'effet de serre, les écosystèmes et la biodiversité et la qualité des sols (Sutton et al., 2011). Concernant la pollution des eaux par l'azote : des concentrations élevées en nitrates dans l'eau, d'une part la rendent impropre à la consommation, et d'autre part peuvent induire des problèmes d'acidification des eaux douces et d'eutrophisation (prolifération de végétaux liée à un excès de nutriments) notamment dans les eaux littorales situées en aval, ce qui peut amener à un déséquilibre biologique des milieux aquatiques (Cellier, 2019). L'azote est fortement impliqué dans deux problématiques majeures en termes de qualité de l'air : l'ozone troposphérique et les particules. En France métropolitaine, l'agriculture est responsable de la majorité des émissions d'ammoniac, un précurseur de particules fines, reconnues pour leurs effets négatifs sur la santé (Cellier, 2019). L'azote est impliqué dans le changement climatique par de multiples façons. La plus directe est l'émission de N_2O par les sols qui contribue pour 4% aux émissions totales de gaz à effet de serre à l'échelle globale et pour 9% à l'échelle française (Cellier, 2019). Il faut aussi noter que la production industrielle d'azote réactif, en permettant un accroissement conséquent de la population mondiale (Erisman et al., 2008) a très probablement amplifié les sources de gaz à effet de serre. De plus, la production de ces engrais azotés consomme des quantités importantes d'énergie, essentiellement sous forme de gaz naturel (Cellier, 2019).

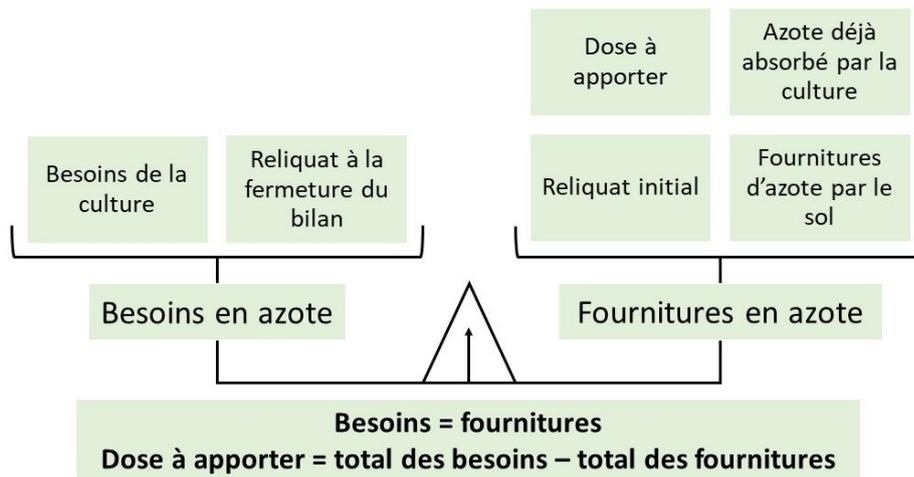


Figure 3 : Méthode du bilan prévisionnel (Comifer, 2013)

$$Dose X = (Pf + Rf) - (Pi + Ri + Mh + Mr + MrCi + Mpro + Mhp + Nirr)$$

Avec :

- *Pf* : Quantité d'azote absorbé par la culture à la fermeture du bilan
- *Rf* : Quantité d'azote minéral dans le sol à la fermeture du bilan (ou reliquat post-récolte)
- *Pi* : Quantité d'azote absorbé par la culture à l'ouverture du bilan
- *Ri* : Quantité d'azote minéral dans le sol à l'ouverture du bilan (ou reliquat sortie hiver)
- *Mh* : Minéralisation nette de l'humus du sol
- *Mr* : Minéralisation nette des résidus de récolte
- *MrCi* : Minéralisation nette des résidus de culture intermédiaire (CIPAN)
- *Mpro* : Minéralisation nette de l'azote organique des produits organiques
- *Mhp* : Minéralisation nette due à un retournement de prairie
- *Nirr* : Azote apporté par l'eau d'irrigation

Équation 1 : Méthode du bilan prévisionnel (Comifer, 2013)

$$Pf = \text{besoins de la culture par unité de rendement} * \text{objectif de rendement (kg/ha)}$$

Avec :

- *Pf* : la quantité d'azote absorbé par la culture à la fermeture du bilan

Équation 2 : Les besoins en azote de la culture (Comifer, 2013)

1.3 LE RAISONNEMENT DE LA FERTILISATION

La gestion des engrais azotés est donc un enjeu majeur de l'activité agricole, autant sur le plan économique que sur le plan environnemental. En 1980, le rapport Hénin déclenche une prise de conscience des enjeux environnementaux liés à fertilisation en établissant le lien entre la qualité de l'eau et l'utilisation d'engrais azotés. De cela s'ensuivit la mise en place progressive de la politique de protection des eaux en France et plus largement en Europe. En 1984, en France, est créé le CORPEN (Comité d'Orientation pour des Pratiques agricoles respectueuses de l'ENvironnement) dont l'objectif est de coordonner une expertise nationale sur les pratiques agricoles susceptibles de réduire la pollution de l'eau par les nitrates, afin de les vulgariser. En 1991, c'est la directive européenne 91/676/CEE concernant la protection des eaux contre la pollution par les nitrates à partir de sources agricoles, dite « directive nitrates » qui entre en vigueur. La directive nitrate se concentre sur trois principales actions : le suivi de la qualité de l'eau, la délimitation de zones vulnérables aux nitrates et l'établissement d'un code de bonnes pratiques agricoles et de mesures à mettre en œuvre sous forme de programmes d'action dans les zones vulnérables aux nitrates (calendrier d'épandage, raisonnement de la fertilisation, etc.) (Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, 2014).

C'est dans ce contexte que les approches de fertilisation raisonnée se sont développées en France. On peut définir le raisonnement de la fertilisation azotée comme une méthode permettant d'ajuster les apports d'engrais (minéraux ou organiques) aux besoins de la culture pour atteindre un objectif de production donné, tout en prenant en compte les autres fournitures d'azote par le sol. Cet ajustement de la dose entre les besoins et les fournitures contribue à la maîtrise technico-économique de la production et à la limitation des transferts d'azote dans l'environnement (Comifer, 2013). La fertilisation est donc au centre de plusieurs enjeux majeurs : la productivité, la qualité des récoltes (la teneur en azote ou en protéines des récoltes peut être une condition d'accès au marché ou de valeur de la production), de la qualité de l'eau et de l'air, et du changement climatique.

Le raisonnement de fertilisation azotée se base sur le principe des 4B c'est-à-dire l'utilisation du bon produit, à la bonne dose, au bon moment et au bon endroit. L'estimation de la bonne dose d'azote à apporter aux cultures s'appuie le plus souvent sur la méthode du bilan, développée par Hébert en 1969 puis Rémy-Hebert en 1974 (Comifer, 2013). Le calcul de la dose globale par cette méthode de raisonnement repose sur l'établissement d'un bilan prévisionnel entre les besoins du peuplement et les fournitures du sol (**Figure 3, Equation 1**). En raison de l'impossibilité de prévoir en pratique les pertes par lixiviation durant la période de lessivage hivernal et de minéralisation automnale, le bilan est souvent établi pour une période comprise entre la sortie de l'hiver et la récolte de la culture (Comifer, 2013). La mesure de reliquat azoté à l'ouverture du bilan permet de connaître la quantité d'azote minéral à l'état initial. Il s'agit du seul poste du bilan mesuré, tous les autres postes sont estimés ou calculés en prenant en compte les conditions pédoclimatiques locales et le système de culture. De ce fait, la méthode du bilan délivre une dose d'azote prévisionnelle qui peut souffrir de quelques imprécisions, notamment sur l'estimation des besoins réels du couvert et sur la détermination des différents termes du bilan dépendant des conditions pédoclimatiques locales de la parcelle (Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, 2016). Par exemple, les besoins de la culture en azote sont calculés à partir d'un rendement objectif (**Equation 2**), qui est fixé sachant qu'il est impossible de connaître à l'avance les conditions climatiques qui détermineront en partie les performances de cette culture.

Un des moyens d'améliorer la précision de la dose est de compléter la méthode du bilan par l'évaluation d'un indicateur du statut azoté de la culture en cours de développement par l'utilisation d'outils d'aide à la décision (OAD). Ces OAD vont venir optimiser la fertilisation azotée aux conditions locales de la parcelle en cours de campagne, en

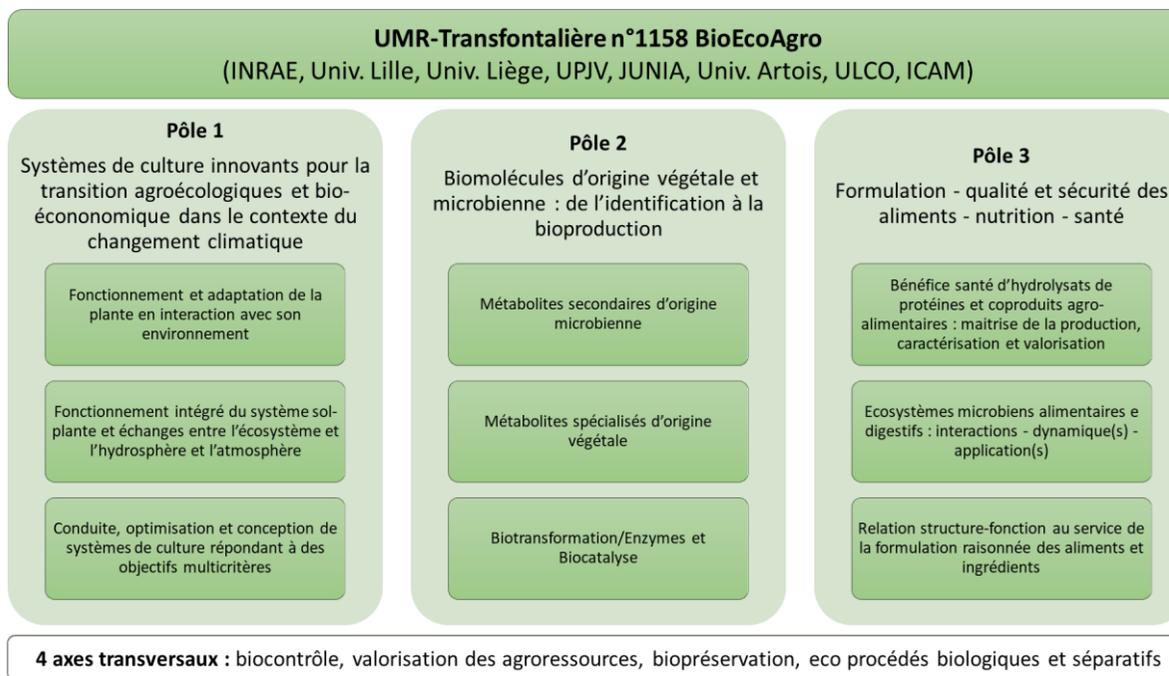


Figure 4 : Structure de l'UMR-Transfrontalière BioEcoAgro (BioEcoAgro, 2019)

remplissant une ou plusieurs des fonctions suivantes : ajustement du poste « azote absorbé par la culture » à l'ouverture du bilan, ajustement d'une date d'apport, ajustement d'une dose d'apport en cours de végétation, spatialisation d'une dose d'azote (Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, 2016). Il existe aujourd'hui une multitude d'outils basés sur différents principes : la mesure du stock d'azote disponible dans le sol, la mesure sur le végétal ou le raisonnement dynamique de la fertilisation (ce dernier permet de mettre à jour différentes variables d'entrée du calcul d'un bilan avec les conditions de l'année) (Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, 2016). Ces outils présentent une grande variabilité dans leur principe de fonctionnement, dans les fonctions qu'ils remplissent et donc dans les règles de décisions associées. La majorité de ces outils ont été conçus avant tout pour améliorer la productivité et permettent tous de déplaçonner la dose préconisée par la méthode du bilan (Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, 2016). Ils sont donc calibrés pour atteindre un rendement maximal (ou un rendement commercial maximal prenant en compte la qualité des cultures), avec le minimum d'azote possible, et non pas un impact environnemental minimal. C'est dans ce contexte que le projet OAD en fertilisation azotée s'est développé.

1.4 LE PROJET « OAD EN FERTILISATION AZOTÉE »

Le projet OAD en fertilisation azotée (OAD N) a été mis en place en 2016 et a pour objectif d'évaluer les performances agronomiques et environnementales de quelques OAD en fertilisation azotée sur une rotation de type céréales à paille - oléagineux sur deux sites avec des contextes pédologiques différents dans la région des Hauts-de-France.

1.4.1 Les partenaires du projet OAD N

Cette étude est née de la collaboration de plusieurs acteurs de la région des Hauts-de-France : l'ISA Lille, l'institut de Genech, le Groupe Carré et l'UR INRAE AgroImpact (Agroressources et Impacts environnementaux) et est en partie financée par l'agence de l'eau Artois-Picardie (ministère chargé de l'écologie et du développement durable).

L'ISA Lille est la structure d'accueil de ce stage et est une école d'ingénieurs qui forme aux métiers de l'ingénierie en agriculture, agroalimentaire, environnement, agroéconomie et en paysage. Elle fait partie, du groupe JUNIA, qui co-tutelle plusieurs laboratoires de recherche dont l'unité mixte de recherche transfrontalière BioEcoAgro (UMRT 1158 BioEcoAgro). Les thématiques de recherche cette UMRT s'articulent autour de 3 pôles, 9 équipes et 4 axes transversaux (**Figure 4**). C'est dans le premier pôle (systèmes de culture innovants pour la transition agroécologique et bioéconomique dans le contexte du changement climatique) que se place l'équipe de l'ISA : « Conduite, optimisation et conception de systèmes de culture répondant à des objectifs multicritères », dont les axes de recherche se positionnent autour du pilotage des systèmes de culture et de l'optimisation des techniques culturales au sein de ces systèmes, mais également, autour de la conception de systèmes de culture innovants, via la production d'indicateurs de performances agronomiques, économiques, et environnementales (BioEcoAgro, 2019).

L'Institut de Genech est un établissement d'enseignement général, professionnel et technologique privé, qui forme aux métiers de l'agriculture, de l'horticulture et des paysages. L'Institut possède une exploitation de polyculture élevage, principalement pensée pour la pédagogie, le bien-être animal et la performance technico-économique. Elle est implantée sur une surface totale de 59 hectares, et comprend un élevage de vaches laitières, un troupeau de brebis et 41 hectares dédiés aux cultures végétales (céréales, betteraves, maïs, luzerne, etc.) (Institut de Genech, 2016). L'exploitation est en constante adaptation face aux enjeux de l'agriculture d'aujourd'hui et de demain. L'institut étant inscrit dans une dynamique du « produire autrement », le projet OAD N qui consiste en l'optimisation des apports en azote en production végétale s'accorde donc avec leurs valeurs.

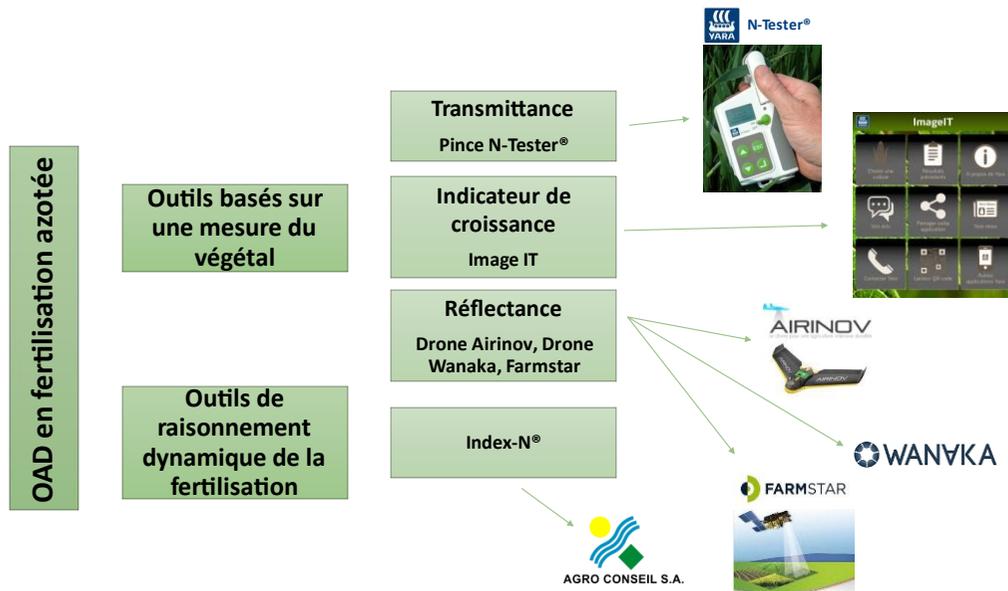


Figure 6 : Classification des OAD testés au cours de l'étude

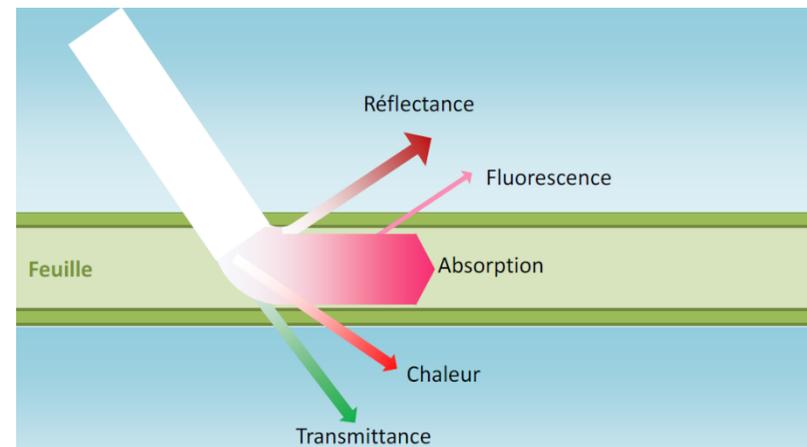


Figure 5 : Schéma du devenir de l'énergie d'un rayon traversant une feuille (ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt, 2016)

Tableau 1 : Caractéristiques des OAD testés dans le cadre de ce projet

Nom	Développeur	Date de développement	Principe de fonctionnement	Cultures pilotées	Ajustement de la dose	Spatialisation d'une dose
IMAGE-IT	Yara	2012	Indicateur de biomasse	Blé, Orge et Colza	Au dernier apport	Non
N-tester®	Yara, Arvalis	1997	Transmittance	Blé, Orge, Maïs, Pomme de terre	Au dernier apport	Non
Airinov	Airinov	2010	Réflectance	Blé, Orge et Colza	Au dernier apport	Oui
Wanaka	Wanaka	2013	Réflectance	Blé, Orge et Colza	Au dernier apport	Oui
Farmstar	Arvalis, Terres Inovia, Airbus	2002	Réflectance	Blé, Orge et Colza	Au dernier apport	Oui
INDEX-N®	Agro-conseil	1977	Raisonnement dynamique	Multicultures (hors prairie)	A chaque apport	Non

Le Groupe Carré est une entreprise spécialisée dans le négoce agricole et la collecte de céréales et est localisée dans le Nord de la France. En 2015, le Groupe Carré inaugure sa ferme pilote dans le Pas-de-Calais à Gouy-sous-Bellone : une exploitation de 190 hectares de polycultures dont 20 hectares sont dédiés à la recherche. La ferme pilote à trois principaux objectifs : l'étude, la recherche et le développement de pratiques innovantes permettant de concilier productivité, qualité et respect de l'environnement ; la formation des agriculteurs et des conseillers aux bonnes pratiques et techniques agroécologiques ; la pédagogie et la communication auprès du grand public (Groupe Carré, s.d.).

L'unité de recherche INRAE AgrolImpact est localisée sur deux sites : Barenton-Bugny près de Laon dans l'Aisne (02) et Estrées-Mons près de Péronne dans la Somme (80) L'objectif de l'unité est de rechercher et d'évaluer des voies : d'amélioration de l'efficacité de production, de l'autonomie en intrants (notamment azotés) et du bilan environnemental des systèmes de culture ; d'adaptation de ces systèmes aux nouveaux usages (bioénergie et chimie biosourcée) et aux contraintes environnementales (notamment climatiques et liées à la disponibilité en azote) (INRAE, s.d.).

1.4.2 Les OAD testés

. Les OAD évalués dans le cadre de ce projet sont INDEX-N[®] (proposé par Agro Conseil), le drone agricole (de Airinov puis de Wanaka), Farmstar (développé par Arvalis et Airbus), la pince N-tester[®] (développée par YARA) et Image IT (YARA) (**Figure 5, Tableau 1**). A l'exception de l'OAD INDEX-N[®] qui est un outil de raisonnement dynamique, tous les outils testés lors de cette étude se basent sur une mesure du végétal pour ajuster la dose d'azote en cours de campagne.

Image IT est une application pour smartphone développée par Yara en partenariat avec Terres Inovia. Elle évalue la biomasse et la quantité d'azote absorbée par les cultures de colza, blé et orge d'hiver en entrée et sortie d'hiver grâce à une analyse numérique d'une photographie de la parcelle (Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, 2016 ; Yara, 2018b). L'estimation de la quantité d'azote absorbée par la culture se base sur l'indice de couverture, le taux de pixels verts et une évaluation des feuilles sénescentes (Yara, 2018b). Cet outil a l'avantage d'être assez simple d'utilisation et directement utilisable par les agriculteurs.

La pince N-tester[®] est un outil développé par Yara. Il s'agit d'un chlorophylle-mètre directement utilisable au champ sur les cultures de blé, d'orge de printemps, de maïs et de pomme de terre. L'appareil mesure la transmittance à travers la feuille de la lumière émise (Figure 6) par deux diodes correspondant au rouge et à l'infrarouge, respectivement les longueurs d'onde 650 nm (le maximum d'absorption de la chlorophylle) et 960 nm (Arregui et al., 2006). Le N-tester calcule une valeur numérique sans dimension, proportionnelle à la quantité de chlorophylle foliaire, elle-même fortement corrélée à l'indice de nutrition de la plante (Yara, 2018a). En effet, l'azote assimilé par la plante est stocké à 80 % dans les feuilles, sous forme de protéines, localisées à environ 75 % dans les chloroplastes, ce qui fait qu'une corrélation étroite existe entre l'azote contenu dans les feuilles et la quantité de chlorophylle (Soenen, 2011). L'ajustement de la fertilisation par l'utilisation de cet appareil repose sur le couplage avec la méthode du bilan prévisionnel présentée précédemment. Le calcul de la dose à apporter aux cultures correspond à la dose bilan avec une mise en réserve de 40 unités d'azote sur les apports de fin de cycle. La dose finale est ajustée aux besoins réels de la plante par l'estimation de l'état de nutrition azotée de la plante à l'aide de la pince (Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, 2016).

La teneur en chlorophylle du couvert peut également être mesurée par réflectance (**Figure 6**) à l'aide de capteurs embarqués dans des satellites, des avions ou des drones (Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, 2016). Trois services de

pilotage de la fertilisation reprenant ce principe ont été testés dans cette étude : le drone Airinov, le drone Wanaka et Farmstar. Le pilotage de la fertilisation par ces trois OAD repose, tout comme la pince N-tester[®], sur le calcul d'une dose prévisionnelle avec une mise en réserve et un ajustement sur les apports en fin de cycle, à la différence qu'ils produisent des cartes de modulation permettant de prendre en compte la variabilité intra-parcellaire.

Fondée en 2010, Airinov est une entreprise spécialisée dans les drones à usage agricole dont les principaux objectifs sont le pilotage des fertilisations, le conseil sur la dose d'intrants et l'amélioration de la qualité des épandages. Le pilotage de la fertilisation par le drone Airinov peut être réalisé sur culture de blé, de colza et d'orge et est basé sur la mesure de la lumière réfléchiée par le couvert végétal dans 4 bandes distinctes (rouge, vert, infrarouge et proche infrarouge). Ces mesures permettent l'estimation de différents indicateurs tels la biomasse, la densité foliaire, le taux et la quantité de chlorophylle ou encore l'azote absorbé. Le capteur embarqué sur le drone dispose d'un capteur de luminosité qui permet de corriger le signal en réflectance en fonction de l'intensité lumineuse, de la couleur de la lumière et de son angle d'incidence (Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, 2016).

Wanaka est une société créée en 2013, spécialisée dans la commercialisation d'OAD et d'outils d'agriculture de précision. Wanaka distribue des solutions créées et développées par Agroptimise, une entreprise de recherche et développement issue de la collaboration entre l'université de Liège et le Luxembourg Institute of Science and Technology. Actuellement, Wanaka se concentre sur quatre domaines d'action : le zonage des sols et modulation de semis, la gestion de la fumure azotée, la gestion des risques phytosanitaires et le diagnostic des dégâts (WANAKA, s.d.). La gestion de la fumure azotée peut être réalisée sur trois cultures différentes (le blé, le colza et l'orge) et repose sur l'utilisation de modèles agronomiques, alimentés par des données issues de la télédétection et de la météorologie.

Développé par ARVALIS - Institut du végétal, Airbus, et Terres Inovia, le service Farmstar combine imagerie (par satellite et par avion) et expertise agronomique pour établir un diagnostic de l'état nutritif des plantes à l'échelle de la parcelle. L'établissement d'un conseil par Farmstar repose sur les modèles agronomiques et la télédétection par satellite et avion. Les satellites tournent autour de la terre à une altitude de 800 km et acquièrent chaque jour des images qui peuvent être complétées par des observations à plus basse altitude (7 500 m) réalisées à partir d'avions. Grâce au principe de réflectance, les images obtenues sont tout d'abord analysées pour être converties en valeurs liées à la biomasse ou la teneur en chlorophylle avant d'être combinées à des données météorologiques et des modèles agronomiques développés par Arvalis et Terres Inovia (Farmstar, s.d.). Les algorithmes évaluent les besoins de la plante et établissent des cartes de conseil azote directement exploitables par les agriculteurs (Farmstar, s.d.). Elles indiquent les apports nécessaires pour chaque zone de la parcelle et sont lisibles par les consoles embarquées dans le tracteur.

INDEX-N[®] est un outil de raisonnement dynamique pour la gestion de la fumure azotée, développé en 1977 par Agro Conseil SA, un bureau d'expertise agricole indépendant. Cet OAD estime la quantité d'azote qui sera disponible pour la culture au cours de la saison. A chaque étape du fractionnement, la dose est recalculée par un système de modélisation qui tient compte de l'évolution de différents facteurs du système de culture (conditions climatiques, développement de la culture, etc.). Le système de modélisation réévalue l'azote disponible dans chaque horizon, ce qui permet d'ajuster la dose à appliquer au stade considéré (Agro Conseil, s.d.). Le calcul de la quantité d'azote disponible pour la culture se base sur dix-huit facteurs répartis en trois groupes (la réserve d'azote utile pour la culture, les facteurs influençant cette disponibilité de l'azote et les facteurs estimatifs de la minéralisation utile) (Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, 2016).

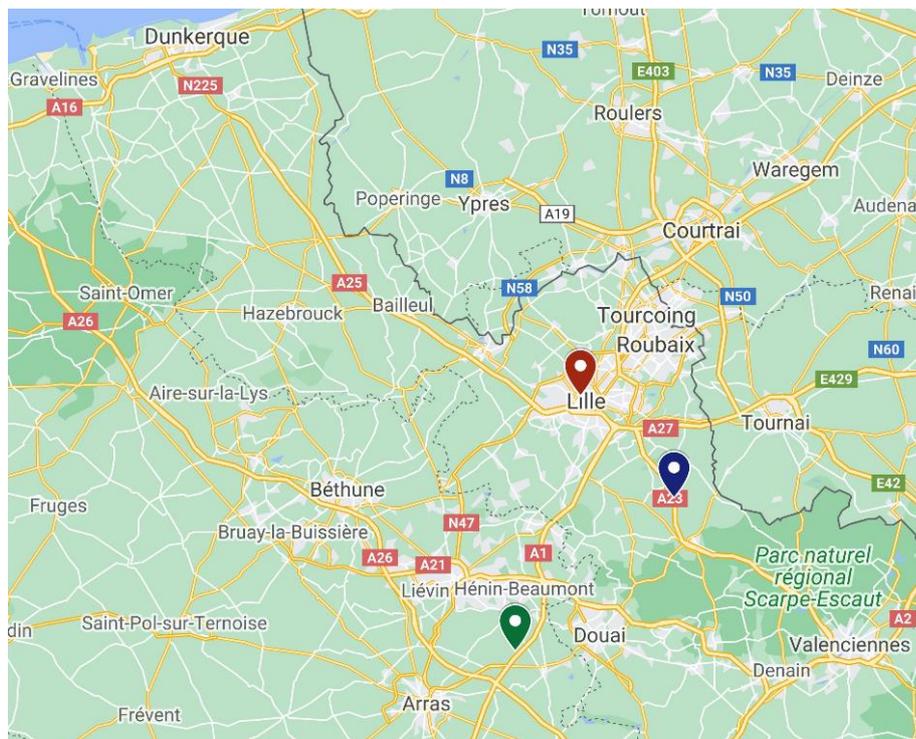


Figure 7 : Localisation des deux sites expérimentaux
(en rouge : ISA Lille, en bleu : site de Genech, en vert : site d'Izel)

Tableau 2 : Analyses physico-chimiques du sol des deux sites expérimentaux
(n=24 pour le site de Genech ; n=6 pour chaque horizon du site d'Izel)

Analyses physico-chimiques		Genech		Izel	
		Horizon 0-30 cm	Horizon 0-30 cm	Horizon 0-30 cm	Horizon 30-90 cm
Argile ¹	%	15.3	31.7	52.99	
Limon ¹	%	50.3	52.2	27.5	
Sable ¹	%	34.4	16	19.5	
CaCO ₃	%	< 1	60.1	55	
pH eau		7.5	8.5	8.6	
Densité apparente		1.49	1.35	1.39	
Carbone organique	g.kg ⁻¹	9.5	12	10.1	
Matière organique	g.kg ⁻¹	19.1	24	20.08	
Azote total Kjeldahl	g.kg ⁻¹	0.9	1.2	1.1	
Rapport C/N		10.6	9.6	9.3	

¹ : après décarbonatation

1.4.3 Problématique du mémoire

Comme vu précédemment, de très nombreux outils d'aide à la décision (OAD) existent actuellement pour aider les agriculteurs à raisonner la dose d'intrants azotés sur leur parcelle et à l'appliquer au bon moment et au bon endroit. Ces outils ne fonctionnent pas tous sur le même principe et n'apportent donc pas exactement le même conseil de fertilisation. La plupart sont utilisés par les agriculteurs pour ajuster la dose préconisée par la méthode du bilan prévisionnel. La question se pose alors de leur efficacité et de leur efficacité, tant du point de vue agronomique qu'environnemental.

L'objectif de ce stage consiste en l'évaluation par la modélisation des performances agronomiques et environnementales de systèmes de culture dont la fertilisation azotée a été pilotée par un des outils d'aide à la décision présentés précédemment, sur une rotation de type céréales à paille – oléagineux et sur deux types de sol différents. Il s'agit plus précisément de réaliser un bilan environnemental complet par la quantification des flux d'azote au sein de ces systèmes de culture. Pour y parvenir, de nombreuses données agronomiques et environnementales ont été récoltées tout au long de l'expérimentation (mesure du rendement, des teneurs en protéines, de la quantité d'azote épandue, des quantités de reliquats azotés, des quantités d'azote lixiviées (par la mise en place d'un dispositif de bougies poreuses) ou encore du devenir de l'azote épandu (via l'application d'azote marqué ^{15}N)). Ces données ont servi dans un premier temps à paramétrer les modèles de culture et dans un second temps à en évaluer la qualité et la robustesse. En donnant accès à une diversité d'indicateurs difficilement accessibles par expérimentation, comme par exemple, les flux de solutés ou de composés gazeux azotés, la modélisation agronomique tient une place importante dans ce projet. Ici, les modèles de cultures sont créés à l'aide de l'outil de simulation STICS. Les simulations ainsi créées ont pu donner lieu par la suite à la quantification des différents flux d'azote au sein des systèmes sol, plante, atmosphère étudiés.

2 MATERIELS ET METHODES

2.1 PRESENTATION DES SITES EXPERIMENTAUX

Pour répondre aux objectifs du projet, deux sites expérimentaux avec des contextes pédologiques distincts ont été mis en place dans la région des Hauts-de-France, l'un sur une parcelle du lycée agricole de Genech dans le département du Nord et l'autre sur une parcelle du Groupe Carré à Izel-lès-Equerchin dans le département du Pas-de-Calais (**Figure 7**). Les deux parcelles sont localisées en zone vulnérable à la pollution des eaux par les nitrates d'origine agricole établie par le programme d'actions directive Nitrates (Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, 2014).

La parcelle expérimentale du site de Genech a été mise en place dès le début du projet, en 2016, et repose sur un brunisol à texture limon fin (**Tableau 2**) très profond avec des taches d'hydromorphie temporaire à partir de 50 cm de profondeur. La parcelle expérimentale d'Izel a été mise en place un an après le début du projet, soit en 2017, et repose quant à elle sur un rendosol (c'est-à-dire un sol peu évolué sur une roche-mère calcaire) qui est à texture limon argileux fin (**Tableau 2**).

2.2 PRESENTATION DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Les deux dispositifs expérimentaux sont identiques et suivent un dispositif en blocs complets à 6 niveaux de traitements sur 4 blocs (4 répétitions). Chaque niveau de traitement correspond à une quantité totale d'azote apportée aux cultures avec : un témoin non fertilisé, un témoin fertilisé à la dose bilan, et quatre autres modalités dont la fertilisation azotée a été pilotée par les OAD testés (Farmstar, N-tester®, drone, INDEX-N®). Chaque micro-parcelle



Figure 8 : Implantation des micro-parcelles d'essais à Genech (a) et à Izel (b)

(FS : Farmstar, DR : Drone (Airinov ou Wanaka), NT : N-tester® (ou Image IT), AG : Agro-conseil (INDEX-N®), TF : Témoin fertilisé à la dose bilan, TO : témoin non fertilisé)

Tableau 3 : Conduite culturale des parcelles des deux sites expérimentaux

Site	Culture	Année	Cultivar	Labour		Semis			Date de récolte
				Date	Profondeur (cm)	Date	Profondeur (cm)	Densité (grains/m ²)	
Genech	Orge	2016/2017	Zoo	12/06/16	20 / 25	12/06/16	3 / 4	170	22/06/17
	Blé	2017/2018	Rubisko	/	/	07/11/17	3 / 4	300	26/07/18
	Colza	2018/2019	Hunic	24/08/18	20 / 25	24/08/18	3 / 4	33	01/08/19
	Blé	2019/2020	Amboise	29/10/19	20 / 25	29/10/19	3 / 4	221	22/07/20
Izel	Blé	2017/2018	Rubisko	09/01/18	23 / 25	09/01/18	2 / 3	300	26/07/18
	Colza	2018/2019	Hunic	24/08/18	23 / 25	24/08/18	1 / 2	33	31/07/19
	Blé	2019/2020	Amboise	21/10/19	23 / 25	21/10/19	2 / 3	221	29/07/20

fait 240 m² (12 m de largeur sur 20 m de longueur). Entre chacune de ces micro-parcelles, des bandes tampon de 2 m ont été installées afin d'éviter les transferts de terre d'une modalité à l'autre, notamment lors du travail du sol. Les plans expérimentaux des deux parcelles d'essais sont présentés dans la **Figure 8**.

La parcelle expérimentale de Genech, mise en place en 2016, a suivi une rotation escourgeon, blé tendre d'hiver, colza et blé tendre d'hiver. La parcelle d'Izel, mise en place un an plus tard a suivi une rotation blé tendre d'hiver, colza, blé tendre d'hiver. Toutes les interventions techniques des deux sites concernant le travail du sol, le semis et la récolte sont résumées dans le **Tableau 3**. En ce qui concerne les pratiques de fertilisation azotée : il est important de noter qu'il n'y pas eu d'apport de produits résiduels organiques au cours du projet (à l'exception d'un apport de fumier de bovin, fin août 2020, soit après la récolte du blé tendre d'hiver de variété Amboise) et que la fertilisation des quatre cultures était donc exclusivement sous forme minérale. Sur les deux parcelles d'essais, les apports azotés ont été réalisés, chaque année, à l'aide d'ammonitrate 27 sous forme solide grâce à un distributeur d'engrais Nodet DP-12.

Sachant qu'un niveau de traitement du dispositif expérimental est défini par une dose d'azote apportée aux cultures : pour une année culturale donnée, chaque modalité de chaque site a reçu une dose d'azote totale qui lui est propre. Concernant les micro-parcelles de la modalité non fertilisée, celles-ci n'ont pas reçu d'azote, et ce, pendant les quatre années d'essais. Pour toutes les autres modalités, étant donné que le calcul de la dose totale d'azote dépend du reliquat initial, pour chaque culture et pour chaque site, des échantillons de sol ont été prélevés en sortie d'hiver afin de mesurer ce reliquat. Les parcelles de la modalité témoin fertilisé ont reçu une dose calculée selon la méthode du bilan prévisionnel du Comifer. Et enfin, les micro-parcelles dont la fertilisation est pilotée par l'OAD proposé par Agro-conseil ont vu tous leurs apports d'azote modulés, alors que pour les trois autres modalités testant le conseil d'OAD, la modulation de la dose s'est faite uniquement sur le dernier apport (les premiers apports étant identiques à la méthode du bilan).

Pour chaque culture, la dose totale a été fractionnée en plusieurs apports à des dates et des doses coïncidant avec les besoins de la culture pour maximiser le coefficient réel d'utilisation de l'azote (CAU) et minimiser les risques de pertes d'azote (par voie gazeuse ou par lixiviation) liées à des conditions climatiques défavorables (Comifer, 2013). Concrètement, la dose a été fractionnée en trois apports pour l'escourgeon, en trois ou quatre apports pour le blé tendre d'hiver et en deux apports pour le colza. Les apports d'azote sur la culture escourgeon se sont faits au stade tallage, au stade épi 1 cm et au stade 1 nœud. Pour la culture de blé tendre d'hiver, les apports ont été réalisés au stade tallage, avant le début de la montaison (parfois fractionnés en deux apports : au stade épi 1 cm et au stade 2 nœuds), et entre le stade 2 nœuds et gonflement de l'épi. Enfin, concernant le colza, l'azote a été apporté à la sortie de l'hiver (à la reprise de la végétation) et au stade boutons accolés (stade C2-D2).

Le pilotage de la fertilisation des micro-parcelles de certaines modalités n'a pas été réalisé de la même façon tout au long du projet. En effet, lors de la première année d'essai, c'est-à-dire lorsque la culture implantée était de l'orge d'hiver, les micro-parcelles FS (Farmstar) et DR (drone) ont été fertilisées à la dose bilan en raison d'un problème survenu au moment de la souscription aux services Farmstar et Airinov ; ces deux services n'ont donc pas pu être testés cette année-là. Par ailleurs, ces deux OAD n'ont également pas été étudiés la quatrième année du projet (2019 – 2020), mais pour des raisons différentes. En juillet 2019, la société Airinov a annoncé sa cessation d'activité, l'OAD proposé ne pouvant plus être expérimenté, il a été « remplacé » par l'outil de pilotage de la fertilisation proposé par l'entreprise Wanaka, présenté précédemment. Concernant le service Farmstar, un retour d'Arvalis sur le projet a établi que l'ajustement de la dose du dernier apport était très probablement biaisé par la trop petite surface des micro-parcelles. Ainsi en 2019 – 2020, les

Tableau 4 : Dose d'azote apportée par culture, par modalité et par site

Année culturale	Culture	Modalité	Description	Site de Genech		Site d'Izel	
				Dose apportée (kg N/ha)	Ecart au TF (kg N/ha)	Dose apportée (kg N/ha)	Ecart au TF (kg N/ha)
2016/2017	Orge	T0	Témoin 0	0	-94		
		TF	Témoin fertilisé à la dose bilan	94	=		
		NT	N-tester	87	-7		
		AG	Agro-Conseil	172	+78		
2017/2018	Blé	T0	Témoin 0	0	-200	0	-156
		TF	Témoin fertilisé à la dose bilan	200	=	156	=
		NT	N-tester	200	=	153	-3
		FS	Farmstar	210	+10	160	+4
		AG	Agro-Conseil	236	+36	236	+80
		DR (AI)	Drone Airinov	228	+28	190	+34
2018/2019	Colza	T0	Témoin 0	0	-170	0	-180
		TF	Témoin fertilisé à la dose bilan	170	=	180	=
		NT (IT)	Image IT	200	+30	200	+20
		FS	Farmstar	200	+30	200	+20
		AG	Agro-Conseil	160	-10	210	+30
		DR (AI)	Drone Airinov	200	+30	170	-10
2019/2020	Blé	T0	Témoin 0	0	-179	0	-136
		TF	Témoin fertilisé à la dose bilan	179	=	136	=
		NT	N-tester	193	+14	170	+34
		AG	Agro-Conseil	201	+22	207	+71
		DR (WA)	Drone Wanaka	187	+8	125	-11

micro-parcelles de la modalité Farmstar ont été fertilisées selon la courbe de réponse à l'azote (X-80, X-40, X+40 et X+80). Et enfin, concernant la modalité NT, étant donné que la pince N-tester ne peut pas piloter la fertilisation du colza, celle-ci a été remplacée par l'OAD Image IT.

Toutes les informations concernant les doses totales apportées aux cultures par site et par modalité, ainsi que les écarts de dose par rapport au témoin fertilisé à la dose bilan sont résumées dans le **Tableau 4**.

2.3 LES DONNEES RECOLTEES

Afin d'évaluer les performances agronomiques et environnementales des différents OAD testés, des données expérimentales ont été récoltées tout long de ce projet.

Les performances agronomiques des micro-parcelles ont été évaluées par la mesure systématique du rendement, des composantes du rendement et de la qualité des récoltes. Concernant la qualité des récoltes, c'est le taux de protéines dans le grain pour les céréales et la teneur en huile pour le colza qui a été mesuré.

Le développement des cultures a été suivi principalement par la mesure de la biomasse (sèche ou fraîche) tout au long des différents cycles culturaux. Pour les cultures céréalières, quatre prélèvements ont été réalisés et les pesées ont été effectuées après un passage des échantillons à l'étuve à 65°C pendant 72 heures. Pour le colza, c'est la biomasse fraîche qui a été mesurée et les pesées se sont faites à deux reprises : en début et en fin d'hiver. La plupart des biomasses fraîche ont été estimées à l'aide de l'application Image IT (seules les biomasses des micro-parcelles du témoin fertilisé ont été déterminées par prélèvements (dans le but de calibrer l'estimation de la biomasse fraîche par Image IT)).

L'évolution de la quantité d'azote minéral du sol de chaque micro-parcelle a été évaluée par la mesure de deux à trois reliquats par année culturale : en entrée hiver, en sortie hiver et en post-récolte. Pour ce faire, à chaque campagne de prélèvement une carotte de terre de 90 cm est extraite et la teneur en azote minéral est mesurée sur les horizons 0 – 30 cm, 30 – 60 cm et 60 – 90 cm. Les analyses ont, par la suite, été réalisées au laboratoire de l'ISA à l'aide d'un analyseur automatisé à flux continu : le San++ de Skalar (Skalar Analytical B.V., Breda, Pays-Bas). Sur ces reliquats, la teneur en eau gravimétrique a également été mesurée.

Chaque année culturale, lors des derniers apports, de l'engrais marqué à l'isotope 15 de l'azote est apporté. L'engrais minéral, de l'ammonitrate $^{15}\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$ présentant une abondance isotopique de 2% ^{15}N , est apporté sur une surface de 6.25 m² (2.5 m sur 2.5 m), sur chaque micro-parcelle des trois premiers blocs de chaque site. Le marquage isotopique de l'azote a pour objectif de suivre le devenir de cet élément dans le matériel végétal et dans la solution du sol. La solution du sol a été collectée chaque année pendant la période de drainage à l'aide d'un dispositif de bougies poreuses. Ce dispositif a été mis en place au début du projet sur chaque micro-parcelle des trois premiers blocs de chaque site. Les bougies poreuses permettent d'échantillonner l'eau du sol qui s'est infiltrée sur 1 m de profondeur par application d'une dépression à l'intérieur de ces bougies via un système de pompage. Sept cannes de prélèvements positionnées horizontalement dans le sol sous le profil racinaire sont positionnées sous chacune des micro-parcelles concernées. Les surfaces recevant de l'azote marqué correspondent également à la zone où sont disposées les bougies poreuses : trois des sept cannes sont orientées pour capter la solution du sol dans la zone traitée au ^{15}N . La teneur en azote minéral des eaux a été mesurée au laboratoire à l'aide du Skalar San++. Ce dispositif permet donc de mesurer l'impact des systèmes de cultures sur les pertes en nitrates.

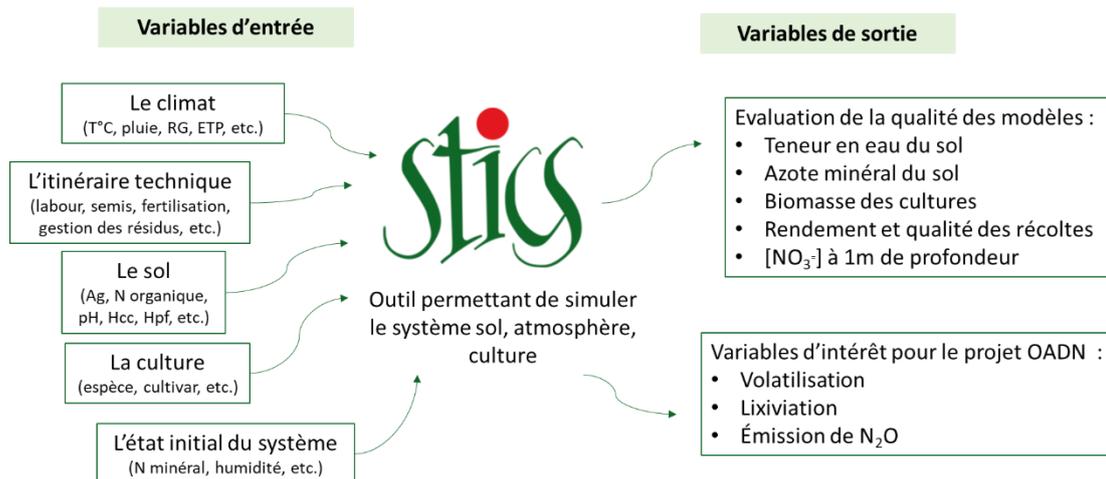


Figure 9 : Présentation du modèle de culture STICS

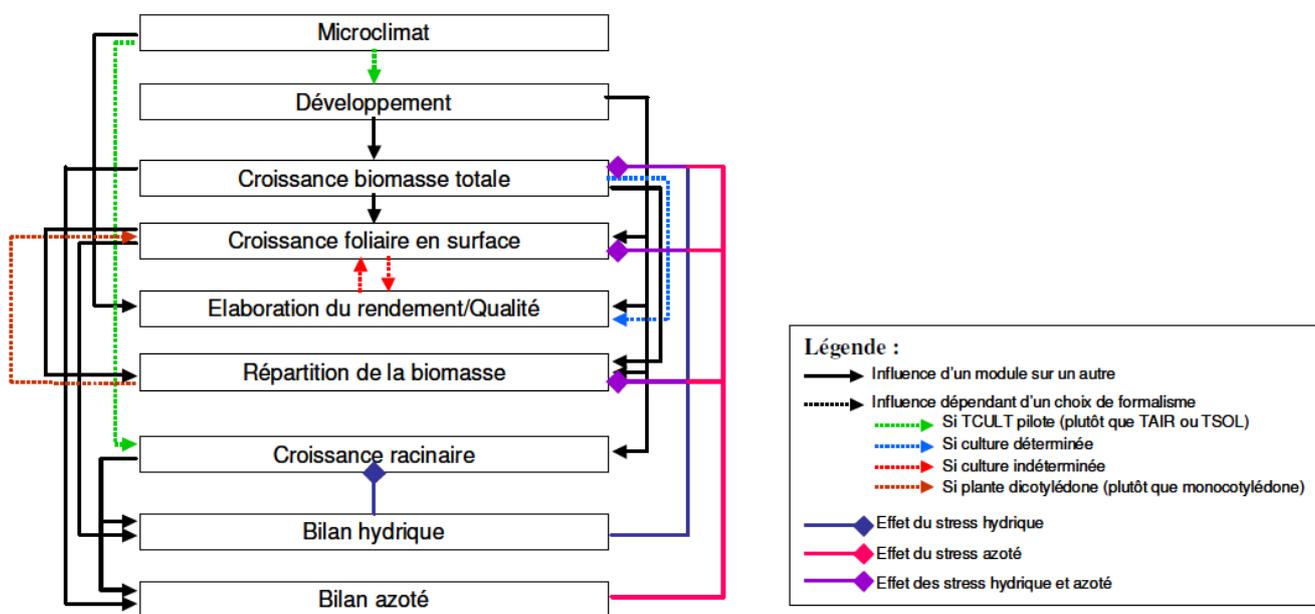


Figure 10 : Schéma des différents modules de STICS et leurs influences respectives (Launay et al., 2005)

(Avec TCULT, TAIR et TSOL respectivement la température de la culture, de l'air et du sol)

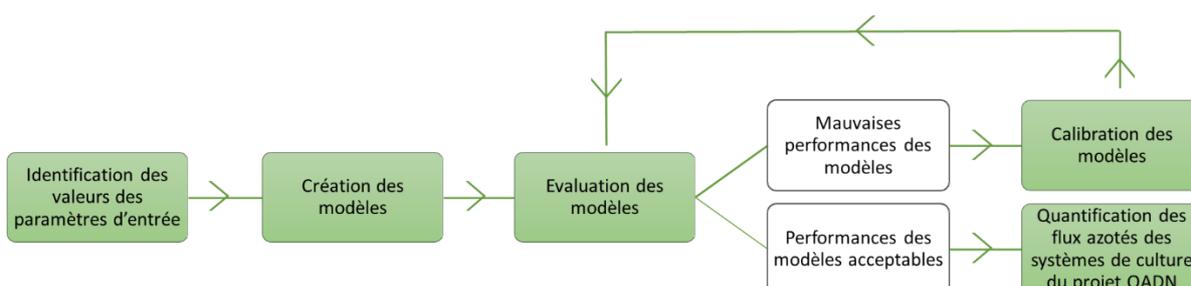


Figure 11 : Méthodologie de simulation des systèmes de culture du projet OAD N avec STICS

Les données expérimentales, acquises tout au long des quatre années du projet ont permis une première évaluation des performances agronomiques et environnementales des systèmes de cultures dont la fertilisation a été pilotée par un OAD. Cependant, ces données ne suffisent pas à comprendre et à décrire la globalité des systèmes et c'est pour cela que la modélisation est importante à ce projet. En effet, elle permet une prise en compte de paramètres qui n'ont pas pu être quantifiée car difficilement mesurable par expérimentation (par exemple les flux de composés gazeux azotés). Les données expérimentales restent toutefois indispensables à la modélisation puisqu'elles permettent le paramétrage, l'optimisation et l'évaluation des modèles produits.

2.4 LA MODELISATION SUR STICS

STICS (Simulateur mulTIdisciplinaire pour les Cultures Standard) est un modèle de fonctionnement des cultures à pas de temps journalier (Brisson et al., 1998 ; 2002 ; 2003). Plus précisément, il s'agit d'un modèle dynamique qui simule le comportement du système sol / atmosphère / culture au cours d'une année. STICS est né en 1996 à l'INRA à l'initiative de Nadine Brisson et a pour principal objectif la simulation des conséquences des variations du milieu et du système de culture sur la production d'une parcelle agricole (Brisson et al., 2008). Les variables d'entrée du modèle sont relatives au climat, au sol et au système de culture (**Figure 9**). STICS simule divers processus dont la croissance et le développement des cultures, le bilan de carbone, le bilan d'eau ou encore le bilan d'azote du système. Cela permet d'estimer à la fois des variables agricoles, des variables environnementales et des variables liées à l'évolution des caractéristiques du sol sous l'effet de la culture dans diverses situations agricoles (**Figure 9**) (Brisson et al., 2003).

Le modèle STICS est organisé en modules, chaque module étant composé de sous-modules traitant de mécanismes spécifiques (**Figure 10**). Un premier ensemble de trois modules traite de l'écophysiole des parties aériennes des plantes (développement, croissance aérienne, élaboration du rendement), un second ensemble de quatre modules traite du fonctionnement du sol en interaction avec les parties souterraines des plantes (croissance racinaire, bilan hydrique, bilan azoté et les transferts). A l'interface se trouve un module de gestion des interactions entre les techniques culturales et le système sol / culture, qu'il s'agisse des apports d'eau, d'engrais ou du microclimat (Brisson et al., 2003).

STICS a été conçu comme un modèle générique capable de s'adapter facilement à divers types de cultures et conditions environnementales. La spécificité de chaque culture est définie à l'aide d'options écophysiole et des paramètres végétaux et comprennent à la fois des paramètres spécifiques et des paramètres de cultivar. Pour un certain nombre d'espèces et de cultivars, des valeurs par défaut sont fournies avec le modèle. Les paramètres d'entrée pour la gestion des sols et des cultures sont spécifiques au site et sont les seuls qui doivent être remplis par les utilisateurs. Les variables météorologiques quotidiennes doivent également être fournies au modèle, ainsi que les valeurs initiales de certaines variables d'état (comme la teneur initiale en eau du sol et en azote minéral). Une description de tous les paramètres est disponible dans la documentation téléchargeable avec le modèle. Dans ce travail, la dernière version disponible du modèle STICS (v9.2) a été utilisée. Les principales étapes de la modélisation sur STICS des différents systèmes de culture de ce projet sont décrites dans la **Figure 11** et sont détaillées ci-dessous.

2.4.1 Création des modèles STICS

Tout d'abord, une base de données compilant les données récoltées lors des précédentes années du projet OAD N a été créée. Cela a abouti à l'élaboration de 176 unités de simulation (appelées « usm »). Une usm correspond généralement au cycle de la croissance d'une plante (ou à une période de sol nu), sur un sol donné, avec des pratiques

Tableau 5 : Paramètres estimés permettant de décrire le sol dans le modèle STICS

Paramètre	Définition	Site de Genech	Site d'Izel	Méthode de détermination
ALBEDO	Albédo du sol nu à l'état sec	0.27	0.31	Abaque de la documentation STICS ¹
Q0	Limite d'évaporation de la phase potentielle d'évaporation du sol (mm)	9.22	10.54	8+0.08*%Argile
CONCSEUIL	[NH ₄] minimale (kgN.ha ⁻¹ .mm ⁻¹)	0.01	0.01	Abaque de la documentation STICS ¹
OBSTARAC	Obstacle à l'enracinement (cm)	120	90	Ajustement lors de l'étape de calibration
PROFHUM	Profondeur équivalente d'humification (cm)	30	30	Profondeur du premier horizon
HCC	Humidité à la capacité au champ (g.g ⁻¹) de la terre fine	22	27.1	Abaque de la documentation STICS ¹ , puis ajustement
HMINF	Humidité minimale exploitable par la plante (g.g ⁻¹)	12	12.8	Abaque de la documentation STICS ¹ , puis ajustement

¹ (Brisson et al., 2008)

Tableau 6 : Description générale du fichier observation STICS créé pour ce projet

Variable observée	Moment de l'observation	Nombre de mesures			Détail (pour un site expérimental donné)	
		Genech	Izel	Total		
Rendement 0%	t.ha ⁻¹	Récolte	100	76	176	1 valeur par micro-parcelle, par année
PMG	g	Récolte	47	24	72	1 valeur par micro-parcelle et par année (sur céréales) ¹
Taux en azote du grain	%	Récolte	74	48	122	1 valeur par micro-parcelle et par année (sur céréales)
Teneur en huile du grain	%	Récolte	24	24	48	1 valeur par micro-parcelle et par année (sur colza)
Biomasse sèche	t.ha ⁻¹	Croissance	186	90	276	3 à 4 valeurs par micro-parcelle et par année (sur céréales) ¹
Biomasse fraîche	t.ha ⁻¹	Croissance	48	48	96	2 valeurs par micro-parcelle et par année (sur colza)
Quantité de N minéral	kgN.ha ⁻¹	Entrée et sortie hiver, post-récolte	350	304	654	1 à 3 valeurs par horizon, par micro-parcelle et par année
Humidité du sol	%	Entrée et sortie hiver, post-récolte	384	309	693	1 à 3 valeurs par horizon, par micro-parcelle et par année
[NO ₃ ⁻] de la solution du sol à 1 m de profondeur	mg.L ⁻¹	Période de drainage	61	5	66	1 à 12 valeurs par modalité et par année ²

¹ les valeurs de l'année 2019/2020 (culture de blé) n'ont pas pu être intégrées au fichier observation STICS | ² uniquement de 2019 à 2020

et un climat donné. Avec une usm par micro-parcelle, par site et par année culturale, 100 usm ont été produites pour le site de Genech et 76 usm pour le site d'Izel. Les 176 usm ont été créées à l'aide du logiciel R (v4.0.3) (R Core Team, 2017), et plus précisément à l'aide du package STICSmailing (v0.3.30) permettant de créer tous les fichiers d'entrée de STICS à partir d'une base de données Excel, préalablement complétée avec les différentes données du projet OADN. La création d'une usm requiert une période de simulation et les différents fichiers d'entrée, à savoir, un fichier plante, un fichier climat, un fichier sol, un fichier initialisation et un fichier technique.

Les fichiers climatiques STICS (un fichier par année et par site) sont alimentés par différentes variables météorologiques : la température minimale et maximale, les précipitations, le vent, le rayonnement global et l'évapotranspiration potentielle. Dans cette étude, les données climatiques journalières ont été extraites de différentes stations météorologiques. En effet, pour le site de Genech, les données proviennent de la station de Lille-Lesquin. Concernant le site d'Izel, les données proviennent de la station météorologique d'Arras, mais également de la station du Groupe Carré mise en place le 15 mai 2018 à Izel-lès-Équerchin. Les données de rayonnement global et d'évapotranspiration potentielle n'étant plus disponible depuis 2018 à Lille et Arras, les fichiers climatiques des deux sites expérimentaux ont été complétés à l'aide des données de rayonnement de la station de Valenciennes et de l'évapotranspiration potentielle calculée au point de grille le plus proche.

Ensuite, dans le cadre de ce travail, un fichier sol STICS par site expérimental a été créé. Certains des paramètres ont pu directement être renseignés par des mesures faites sur le terrain et en laboratoire. C'est le cas par exemple de la teneur en argile après décarbonatation, la teneur en azote organique du sol, la teneur totale en carbonate, le pH, le rapport C/N (**Tableau 2**). D'autres paramètres, plus difficilement mesurables ont été estimés à partir de fonctions de pédotransferts décrites par Brisson et al. dans la documentation de STICS (Brisson et al., 2008) (**Tableau 5**). Parmi ces paramètres estimés, certains ont ensuite été ajustés lors de la phase de calibration des modèles.

Pour ce projet, l'initialisation des modèles a été réalisée sur sol nu, c'est-à-dire avant le semis, ce qui permet de ne pas renseigner de valeurs concernant les paramètres de la culture. Ainsi, l'initialisation repose uniquement sur des paramètres du sol, à savoir la teneur en eau et en azote minéral des différents horizons. Chaque usm possède une initialisation qui lui est propre et qui correspond à la mesure des reliquats post-récolte du précédent. Etant donné que les reliquats n'ont pas été mesurés en tout début de projet, les valeurs d'initialisations des usm de la première année de la rotation de Genech et d'Izel ont été estimées à partir des reliquats régionaux (avec prise en compte des précédents culturaux).

Les fichiers techniques de STICS sont renseignés par toutes les interventions techniques qui ont eu lieu au cours de la période de simulation (travail du sol, semis, irrigation, fertilisation organique et/ou minérale ou encore gestion des résidus de culture). Ici, chaque usm possède un fichier technique qui lui est propre en raison d'une gestion de la fertilisation azotée minérale spécifique. Néanmoins, sachant que la grande majorité des micro-parcelles d'une même modalité d'une même année et d'un même site reçoivent la même dose d'azote, les usm de ces parcelles sont alimentés par des fichiers techniques identiques.

Enfin, un fichier contenant toutes les données récoltées tout au long du projet a été créé. Le **Tableau 6** présente toutes les variables constituant le fichier observation de STICS, ainsi que les nombres de mesures qui leur sont associées. Ce fichier observation est indispensable pour la modélisation sur STICS puisqu'il permet la comparaison des données simulées avec les données observées et donc l'évaluation de la qualité des modèles. Pour une évaluation objective des modèles, l'ensemble des données utilisé pour le paramétrage des modèles n'a pas été inclus dans le fichier observation.

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$$

Équation 3 : EF (Model Efficiency)

(Avec S les valeurs observées, O les valeurs simulées et n le nombre de paires observées - simulées)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}$$

Équation 4 : RMSE (erreur quadratique moyenne)

(Avec S les valeurs observées, O les valeurs simulées et n le nombre de paires observées - simulées)

$$RRMSE = \frac{RMSE}{\bar{O}}$$

Équation 5 : rRMSE (erreur quadratique moyenne relative)

(Avec \bar{O} la moyenne des valeurs observées).

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})(O_i - \bar{O})}{\sigma_s \sigma_o} \right]^2$$

Équation 6 : R²

(Avec S les valeurs observées, \bar{S} la moyenne des valeurs observées, O les valeurs simulées, \bar{O} la moyenne des valeurs observées et n le nombre de paires observées - simulées).

2.4.2 Evaluation des modèles

L'évaluation de la qualité de prédiction des modèles produits par modélisation est essentielle. Premièrement, cela oblige à répondre à quelques questions de base, notamment sur l'objectif du modèle et sur le niveau de qualité acceptable. Deuxièmement, l'amélioration du modèle est impossible sans évaluation. En effet, en l'absence de mesures de la qualité du modèle, il est impossible de savoir si une amélioration est nécessaire. Enfin, l'évaluation, en renseignant sur la qualité du modèle, permet d'indiquer le niveau de précision de ce modèle dans la reproduction du système simulé et donc de décider de la crédibilité à accorder aux résultats (Wallach et al., 2019).

Dans ce travail, la qualité des modèles a été évaluée à l'aide du package du logiciel R : SticsEvalR (v1.38) dont l'objectif est l'évaluation des performances du modèle STICS. Les performances des modèles produits ont tout d'abord été évaluées de façon qualitative avec la production de graphiques comparant les valeurs observées et prédites. Les graphiques sont des aides visuelles importantes pour l'évaluation des modèles. Par la suite, de façon complémentaire, la qualité des modèles a été évaluée par des mesures quantitatives, ici encore, basées sur la comparaison entre les valeurs observées et simulées.

Concernant les représentations graphiques, deux types de graphiques ont été produits. Le premier type de graphique correspond aux graphiques des valeurs simulées par rapport aux valeurs mesurées. Pour chaque mesure, la valeur x est la valeur mesurée et la valeur y est la valeur correspondante simulée avec le modèle. S'il n'y a pas d'erreur de modèle, les valeurs calculées et les valeurs mesurées sont identiques et donc chaque point sera exactement sur la ligne 1:1. L'avantage de ce type de graphique est que l'on peut voir en un coup d'œil à quel point les calculs de modèle et les mesures concordent.

Le second type de graphique utilisé pour évaluer la qualité des modèles de ce projet correspond à représentation des valeurs mesurées et simulées au cours du temps. Il est donc possible de réaliser ces graphiques uniquement sur les variables de sorties étant fonction du temps et pour lesquelles des valeurs observées sont disponibles. Il s'agit ici de la biomasse ou encore de la quantité d'azote minéral et l'humidité par horizon de sol. Il est important de souligner que le modèle produit des valeurs calculées quotidiennement alors que les mesures sont beaucoup plus clairsemées dans le temps.

Ensuite, la précision des résultats de simulation a été quantifiée par le calcul de trois critères statistiques complémentaires, ici encore, basés sur la comparaison des données observées et simulées.

Le premier critère, le model efficiency EF (**Equation 3**), mesure l'accord entre les valeurs simulées et les observations. Il varie de 1 (performances parfaites) à une valeur négative infinie. Une valeur négative indique que la moyenne des observations est un meilleur prédicteur que le modèle, et une valeur zéro indique que le modèle ne fonctionne pas mieux que la moyenne des valeurs observées, on considère une qualité de prédiction satisfaisante lorsque $EF > 0.2$ (Coucheney et al., 2015).

L'ampleur de l'erreur du modèle a été estimée par l'erreur quadratique moyenne (RMSE) (**Equation 4**), qui a la même unité que la variable considérée, et la RMSE relative en % (rRMSE) (**Equation 5**). Plus les valeurs sont basses, meilleure est la prédiction du modèle (Coucheney et al., 2015).

Le coefficient de détermination (R^2), qui est le carré du coefficient de corrélation de Pearson entre les valeurs simulées et les observations, décrit la proportion de la variance totale dans les données observées qui peut être expliquée par le modèle (**Equation 6**). Si le R^2 est nul, cela signifie que l'équation de la droite de régression détermine 0 % de la

Tableau 7 : Ajustement des paramètres des fichiers plante de STICS

Paramètre ajusté	Définition	Processus	Critère utilisé pour l'ajustement	Valeur des paramètres							
				Orge		Blé (Rubisko)		Colza		Blé (Amboise)	
				Initiale	Finale	Initiale	Finale	Initiale	Finale	Initiale	Finale
EFCROIVEG (g.MG ⁻¹)	Efficacité maximale d'utilisation des rayonnements pendant la phase végétative	Croissance en biomasse et absorption azote	Biomasse sèche (t/ha)	4.25	5	4.25	Non modifiée	2.8	2.4	4.25	5
EFCROIREPRO (g.MG ⁻¹)	Efficacité maximale d'utilisation du rayonnement pendant le remplissage du grain			4.25	5	4.25	Non modifiée	2.4	Non modifiée	4.25	5
VITIRCARB (g grain.g plante ⁻¹ .jour ⁻¹)	Taux d'augmentation de l'indice de récolte de carbone	Elaboration du rendement	Rendement sec (t/ha)	0.011	Non modifiée	0.0107	Non modifiée	0.008	0.006	0.0107	0.0109
NBGRMAX	Nombre maximum de grains par m ²			0.045	Non modifiée	30000	32000	800000	Non modifiée	30000	32000
PGRAINMAXI (g)	Poids maximum d'un grain			29000	25000	0.04	Non modifiée	0.00415	0.005	0.04	0.045
VITIRAZO (g grain.g plante ⁻¹ .jour ⁻¹)	Taux d'augmentation de l'indice de récolte de l'azote	Elaboration qualité des organes récoltés	Taux d'azote dans le grain (%)	0.016	0.02	0.0145	0.02	0.01757	Non modifiée	0.0145	0.02

distribution des points et cela signifie que le modèle mathématique utilisé n'explique pas la distribution des points. A l'inverse, si le R^2 vaut 1, cela signifie que l'équation de la droite de régression est capable de déterminer 100 % de la distribution des points. Le R^2 caractérise la capacité à rendre compte de la dispersion, mais ne tient pas compte des erreurs systématiques (c'est-à-dire du biais) (Coucheney et al., 2015).

Plusieurs évaluations des modèles ont été réalisées : la première sur le paramétrage initial (avant l'ajustement des modèles), et les suivantes à l'issue de chaque étape d'ajustement afin de vérifier l'amélioration progressive du paramétrage. Seule l'évaluation des modèles finaux (après ajustement) sera présentée dans ce rapport.

2.4.3 La calibration des modèles

La calibration des modèles est une procédure itérative permettant d'améliorer l'estimation de certains paramètres d'entrée qui ne peuvent pas ou qui peuvent difficilement être mesurés. Les valeurs de ces paramètres ont été estimées par optimisation, c'est-à-dire en cherchant à minimiser l'écart entre les valeurs simulées de certaines variables et leurs mesures expérimentales. L'objectif final de cette phase de calibration est donc l'amélioration de la qualité des sorties des modèles. Dans ce travail, deux méthodes ont été utilisées : un ajustement manuel des paramètres par essais-erreurs, et un ajustement automatique à l'aide de l'algorithme d'optimisation STICS et d'un critère observé permettant l'optimisation des paramètres concernés. Les paramètres à ajuster ont été préalablement identifiés lors des différentes phases d'évaluations des modèles.

La première évaluation des modèles produits par STICS a permis l'ajustement de certains des paramètres sol dont OBSTARAC (obstacle à l'enracinement), HCCF (humidité à la capacité au champ) ou encore HMINF (humidité minimale exploitable par la plante). Les valeurs finales prises par ses trois variables ont été présentées précédemment dans le **Tableau 5**. HCCF et HMINF ont été calibrées à partir des teneurs en eau mesurées sur les différents horizons de sol des deux sites expérimentaux tout au long du projet.

Par la suite, d'autres paramètres, mais cette fois-ci issus des fichiers plante ont pu être ajustés. Les trois cultures implantées sur les parcelles d'essais, à savoir : l'escourgeon, le blé tendre d'hiver et le colza, sont des cultures déjà paramétrées dans STICS, et ce fait la grande majorité des paramètres plante n'ont pas été modifiés. Les quelques paramètres qui ont été modifiés ont permis la calibration des différentes variétés des cultures implantées au cours de ce projet. Pour cela, le schéma de calibration variétale présenté dans le document « Notice d'aide à l'adaptation de STICS à de nouvelles cultures » de la documentation fournit avec STICS a été suivi, et ce, pour chaque cultivar (Launay et al., 2005). A chaque modification, une phase d'évaluation a été réalisée afin de suivre l'amélioration du paramétrage. Au total, pour chaque fichier plante, les valeurs de sept variables ont été ajustées à l'aide de l'algorithme STICS (**Tableau 7**).

2.4.4 Les variables de sorties d'intérêt

Suite à leurs évaluations, les modèles produits par STICS ont permis la quantification des différents flux d'azote au sein des systèmes sol, plante, atmosphère étudiés. Pour chaque micro-parcelle des deux sites expérimentaux, un bilan annuel des quantités d'azote minéral mises en jeu dans ces systèmes de cultures a été réalisé. Les variables qui composent ce bilan sont classées en deux groupes : les entrées d'azote minéral (reliquat initial, fertilisation et minéralisation de l'humus et des résidus de cultures), et les quantités d'azote minéral des flux faisant suite à ces entrées d'azote minéral dans le système (reliquat final, exportation par les cultures, restitution par les cultures, lixiviation et pertes par voie gazeuse (NH_3 , N_2 , N_2O)). Dans ce travail, les bilans sont moyennés par modalité, ce qui fait un bilan pour chaque modalité, par année, pour un site donné. Les bilans ne sont pas

Tableau 8 : Critères statistiques calculés en comparant les prédictions aux observations de différents paramètres plantes

Variable	Critère statistique	Par site		Tous les sites, par culture				Toutes les simulations
		Genech	Izel	Orge	Blé Rubisko	Colza	Blé Amboise	
Rendement	EF	0.86	0.74	-0.03	0.73	0.2	0.29	0.81
	RRMSE	13.58	21.36	20.47	10.69	17.43	18.08	17.25
	R ²	0.87	0.8	-0.01	0.81	0.67	0.47	0.82
Teneur en azote dans le grain	EF	-1.23	-3.15	-2.7	-0.14	NA	-6.97	-1.24
	RMSE	23.03	16.89	36.42	10.02	NA	21.81	21.26
	R ²	0.51	0.71	0.47	0.82	NA	0.05	0.59
Biomasse sèche	EF	0.45	-0.56	0.69	-0.08	NA	NA	0.23
	RRMSE	62.91	120.14	37.07	103.89	NA	NA	78.67
	R ²	0.79	0.77	0.87	0.78	NA	NA	0.76
Biomasse fraîche	EF	-1.59	-3.33	NA	NA	-2.14	NA	-2.14
	RRMSE	38.75	66.53	NA	NA	58.98	NA	58.98
	R ²	0.05	0.06	NA	NA	-0.01	NA	-0.01

(*EF* : Model efficiency, *RRMSE* : Relative Root Mean Square Error, *R²* : Coefficient de détermination)

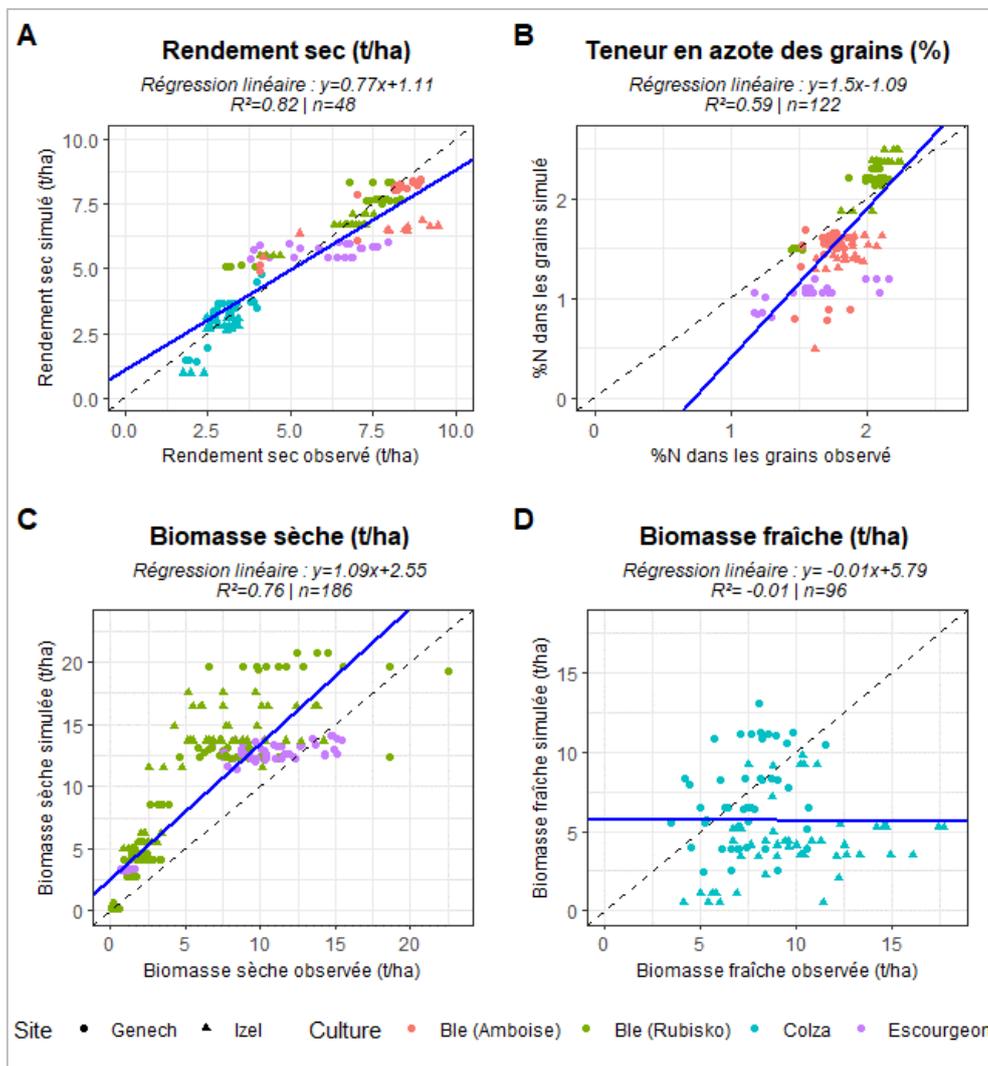


Figure 12 : Valeurs des paramètres plantes simulées par STICS en fonction des valeurs observées (**A** : rendement sec ($t \cdot ha^{-1}$), **B** : teneur en azote dans les grains (%), **C** : biomasse sèche ($t \cdot ha^{-1}$) et **D** : biomasse fraîche ($t \cdot ha^{-1}$) | **ligne bleue** : droite de régression linéaire).

calculés sur une année calendaire mais sur la période des simulations du modèle STICS. L'absorption d'azote journalière par les cultures, ainsi que la quantité quotidienne de NO₃-N lessivée à la base du profil du sol a été observées sur toute la rotation, par modalité et par site. Pour chaque OAD, les écarts moyens avec le témoin fertilisé sur la dose apportée, le rendement, la qualité et les pertes azotées ont été calculés sur toute la rotation.

3 RESULTATS

3.1 EVALUATION DE LA QUALITE DE PREDICTION DES MODELES

3.1.1 Qualité de prédiction des paramètres plante

La qualité de prédiction des modèles STICS a été évaluée sur quatre variables des paramètres plante, à savoir : le rendement sec, la teneur en azote dans les grains, la biomasse sèche et la biomasse fraîche (**Tableau 8**). Les graphiques des valeurs simulées par STICS par rapport aux valeurs mesurées de ces paramètres sont présentés **Figure 12**.

Le modèle a donné une assez bonne prédiction globale des rendements, traduite par un R² égal à 0.82 (**Figure 12A**). La qualité des prédictions est assez similaire entre les deux sites expérimentaux. Néanmoins, des différences de prédiction peuvent être observées entre culture : l'efficacité du modèle est satisfaisante pour le blé et pour le colza (supérieure à 0.2) mais assez mauvaise pour l'orge (inférieure à 0) (**Tableau 8**). Cela peut être observé graphiquement par le plafonnement des rendements simulés pour toutes les micro-parcelles à 6 t/ha alors que les rendements mesurés associés varient entre 4 et 8 t/ha (**Figure 12A**). Les valeurs de EF sont comparables à celles rapportées par Beaudoin et al. (2008).

Ensuite, concernant la teneur en azote dans les grains, la **Figure 12B** montre une corrélation entre les valeurs simulées et les valeurs mesurées assez médiocre (R²=0.59). Ici encore, la qualité des prédictions est assez similaire entre les deux sites d'essais. Pour la teneur en azote des grains d'orge, les valeurs simulées sont sous-estimées : elles plafonnent toutes aux alentours de 1% alors que les valeurs observées sont comprises entre 1.2 et 2.2%. Les teneurs en azote des grains du blé du cultivar Amboise sont également sous-estimées par STICS, ce qui se traduit par des critères statistiques non satisfaisants (EF<0, R²<0.1) (**Tableau 8**). Toutefois l'écart entre les valeurs observées et mesurées reste faible (0.5% de différence en moyenne). Concernant le blé (cultivar Rubisko), la qualité de prédiction de la teneur en azote est assez bonne et cela est confirmé par un R² assez élevé ainsi qu'un RRMSE assez faible, cependant, le critère EF est égal est inférieur à 0 puisque les valeurs de prédiction sont légèrement surestimées par le modèle (+0.3% en moyenne).

L'efficacité du modèle (EF) pour la biomasse des cultures est assez hétérogène (**Figure 12C, 12D**). Elle est assez bonne (supérieure à 0,50) pour l'orge, mais assez mauvaise (inférieure à 0) pour le colza et pour le blé (cultivar Rubisko) (**Tableau 8**). Concernant la culture d'orge, le même schéma que pour le rendement et la teneur en azote dans les grains peut être observé, c'est-à-dire un plafonnement des valeurs simulées pour toutes les micro-parcelles. Il s'agit plus précisément des valeurs de biomasse sèche à la récolte, toutes simulées à 12 t/ha. Les biomasses mesurées en début en cycle sont assez bien corrélées avec les valeurs simulées (**Figure 12C**), c'est pour cela que EF est supérieur à 0.5. Par ailleurs, cela explique également que l'efficacité du modèle pour la prédiction de la biomasse sèche soit meilleure sur le site de Genech puisque l'orge n'a pas été expérimenté sur le site d'Izel. Ensuite, pour le blé (Rubisko), une tendance à la surestimation de la biomasse peut être observée sur les deux sites expérimentaux (**Figure 12C**). De ce fait, l'efficacité du modèle est faible (EF=0), le R² est assez élevé et le RRMSE est faible (10%). Et enfin, concernant le colza, la biomasse est mal simulée sur les deux sites expérimentaux et généralement sous-estimée. Cela s'observe relativement facilement sur la **Figure 12D**, avec un nuage de point assez dispersé et cela est également confirmé par le calcul des critères statistiques (EF négatif, RRMSE élevé et R² faible).

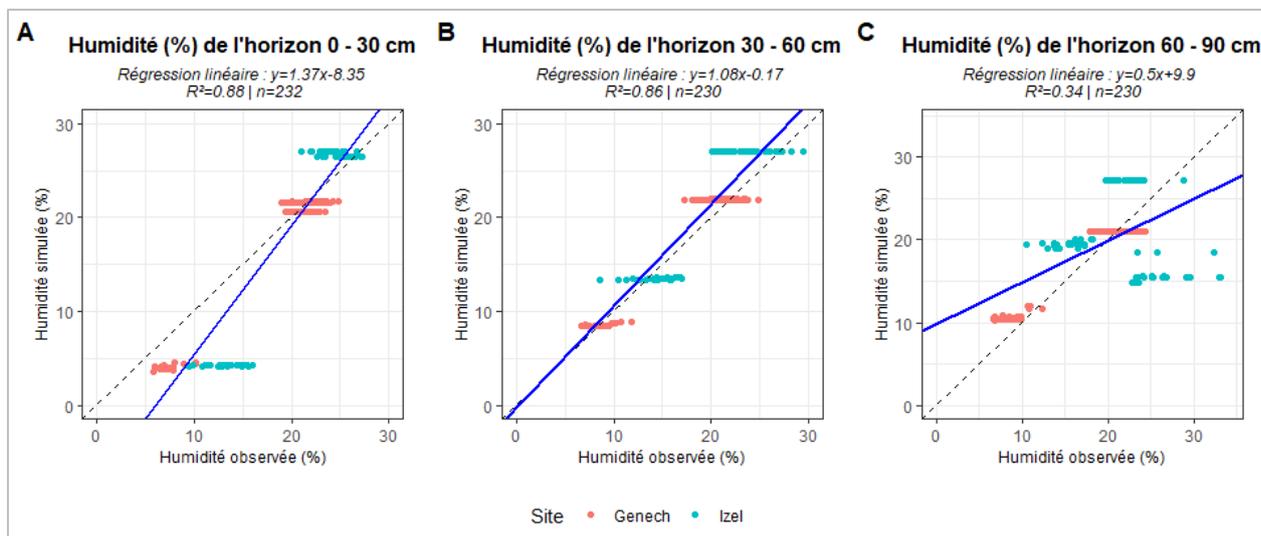


Figure 13 : Humidité du sol simulée par STICS en fonction de l'humidité observée
(**A :** horizon 0-30 cm, **B :** horizon 30-60cm, **C :** horizon 60-90cm | **ligne bleue :** régression linéaire)

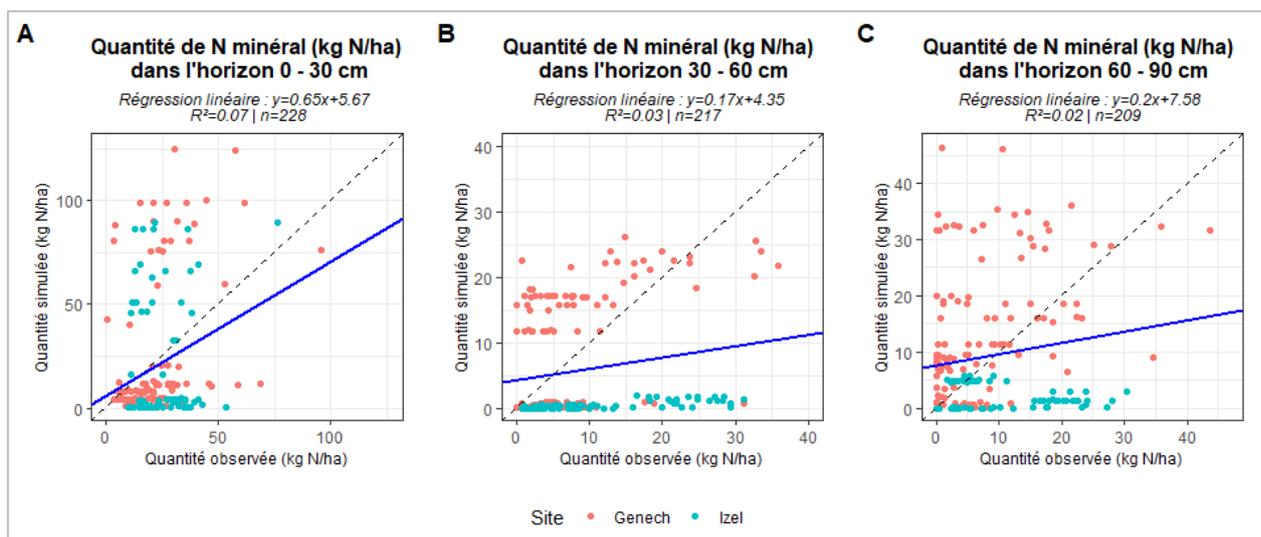


Figure 14 : Quantité d'azote minéral simulée par STICS en fonction de la quantité observée
(**A :** horizon 0-30 cm, **B :** horizon 30-60cm, **C :** horizon 60-90cm | **ligne bleue :** régression linéaire)

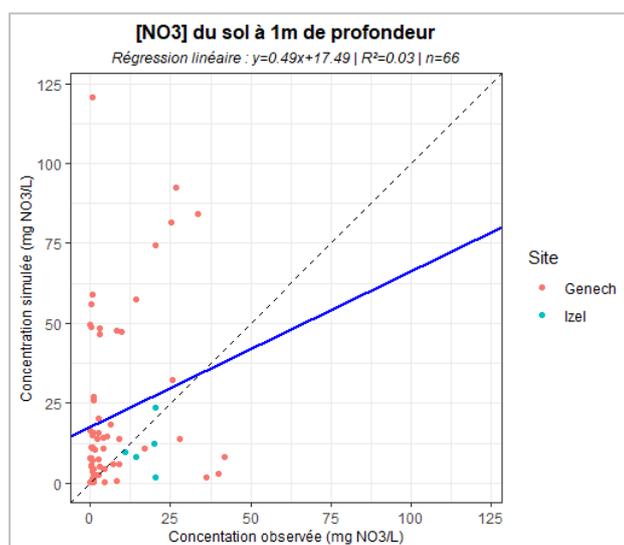


Figure 15 : Concentration en nitrate de la solution du sol à 1 m de profondeur simulée en fonction de la concentration observée (**ligne bleue :** droite de régression linéaire)

3.1.2 Qualité de prédiction du fonctionnement du sol

La qualité de prédiction des modèles STICS sur les paramètres du compartiment sol a été évaluée à partir des données mesurées de l'humidité gravimétrique et la quantité de d'azote minéral par horizon de sol, et de la concentration en nitrate de la solution de sol à un mètre de profondeur. Les **Figures 13, 14 et 15** représentent les valeurs de ces trois variables simulées par STICS en fonction de leurs valeurs observées correspondantes. Comme précédemment, toutes les valeurs des critères statistiques calculées sont résumées dans un tableau (**Tableau 9**). Et enfin, les graphiques dynamiques de ces variables simulées par STICS sont présentés dans les annexes (**Annexes 1 à 12**).

Globalement, la qualité de prédiction de l'eau dans le sol est assez bonne ($R^2=0.7$, $EF>0.2$). Les valeurs de RRMSE sont comparables à celles rapportées dans d'autres études (entre 6 et 30%) qui ont utilisé STICS pour simuler l'humidité du sol (Beaudoin et al. 2008 ; Coucheney et al. 2015). La simulation de l'humidité sur la parcelle de Genech est un peu meilleure que sur la parcelle d'Izel et, ce, pour les trois horizons (**Figure 13**). Cela est également observable sur les graphiques dynamiques, avec des valeurs observées très proches des valeurs simulées pour Genech (**Annexes 1, 2 et 3**). Pour les deux sites, une sous-estimation de l'humidité du premier horizon aux faibles valeurs peut être observée (les mesures ont été faites pendant l'été 2020, post-récolte blé) (**Figure 13A**). En prenant en compte les deux sites, l'humidité de l'horizon de sol intermédiaire (30 – 60 cm) est la mieux modélisée des trois horizons (**Figure 13B**). Et finalement, la qualité de prédiction de l'eau dans le sol de l'horizon le plus profond (60 – 90 cm) semble moins bonne pour le site d'Izel (**Figure 13C**). Plus précisément, une sous-estimation de l'humidité est observée à la sortie de l'hiver 2019 : les mesures de l'humidité sur les reliquats en sortie hiver sont aux alentours 24% alors que STICS simule des humidités comprises entre 16 et 18 % sur cette période (**Annexe 6**).

La **Figure 14** montre des corrélations mauvaises entre les valeurs simulées et les valeurs observées de la quantité d'azote minéral dans le sol pour les trois horizons des deux sites expérimentaux. Cela est confirmé par le calcul des critères statistiques : le critère EF est négatif (inférieur à -0.5), le RRMSE est élevé (supérieur à 100%) et le R^2 est faible (inférieur à 0.2) (**Tableau 9**). Les graphiques dynamiques supportent également ces observations (**Annexes 7 à 12**). Les performances du modèle sont moins bonnes que celles rapportées par Beaudoin et al. (2008), et Coucheney et al. (2015) (RRMSE allant de 36,4% à 103,4 % et EF allant de -2,6 à 0,7). Pour le site d'Izel, on peut observer des différences entre les valeurs simulées et observées allant de quelques kg N/ha jusqu'à plus de 75 kg N/ha pour l'horizon de surface (**Figure 14A**). Pour les deux autres horizons, le modèle simule une quantité comprise entre 0 et 5 kg N/ha alors que les valeurs mesurées varient entre 0 et 30kg/ha (**Figure 14B et C**). Enfin, concernant la parcelle de Genech, les nuages des points sont plus dispersés pour les trois horizons de sol, que la parcelle du site d'Izel. On peut observer des différences entre les valeurs simulées et observées allant de quelques kg N/ha à plus de 100 kg N/ha pour l'horizon de surface (**Figure 14A**), et jusqu'à 30 kg/ha de différences pour les deux autres horizons (**Figure 14B et C**).

La qualité de prédiction de la concentration en nitrate de la solution de sol sous le profil racinaire, à un mètre de profondeur par les modèles est assez médiocre (**Figure 15, Annexe 13**). En effet, le R^2 est inférieur à 0.5, le critère EF est négatif, et, ce, pour les deux sites expérimentaux. La qualité de prédiction est meilleure sur la parcelle d'Izel. Cependant, le nombre d'observations est assez inégal entre les sites avec 5 observations pour la parcelle d'Izel et 61 observations pour Genech. Cela peut être expliqué par le contexte pédologique des deux sites : les horizons profonds de la parcelle d'Izel étant assez sec (**Annexe 6**), très peu de solution a pu être récoltée. Sur la parcelle de Genech, les modèles ont tendances à surestimer les concentrations : les valeurs mesurées varient entre 0 et 50 mg NO_3/L , alors que les valeurs simulées sont comprises entre 0 et 125 mg/L.

Tableau 9 : Critères statistiques calculés en comparant les prédictions aux observations de différents paramètres sol

Variable	Critère statistique	Par site		Tout
		Genech	Izel	
Teneur en N minéral 0-30cm	EF	-3.48	-7.16	-4.34
	RRMSE	137.5	119.5	129.76
	R ²	0.15	-0.01	0.07
Teneur en N minéral 30-60cm	EF	-0.33	-1.45	-0.8
	RRMSE	108.93	120.71	118.08
	R ²	0.2	0.52	0.03
Teneur en N minéral 60-90cm	EF	-1.28	-1.43	-1.26
	RRMSE	165.96	114.92	140.84
	R ²	0.17	0.02	0.02
Humidité du sol 0-30cm	EF	0.9	-0.1	0.57
	RRMSE	10.46	28.53	20.43
	R ²	0.96	0.92	0.88
Humidité du sol 30-60cm	EF	0.89	0.47	0.75
	RRMSE	9.56	18.33	14.07
	R ²	0.92	0.78	0.86
Humidité du sol 60-90cm	EF	0.88	-0.99	0.27
	RRMSE	9.84	33.45	23.61
	R ²	0.91	-0.01	0.34
[NO ₃ ⁻] à 1 m de profondeur	EF	-6.553	-5.14	-6.35
	RRMSE	418.77	55.29	44.14
	R ²	0.03	-0.28	0.49

(**EF** : Model efficiency, **RRMSE** : Relative Root Mean Square Error, **R²** : Coefficient de détermination)

3.2 QUANTIFICATION DES FLUX D'AZOTE DES SYSTEMES DE CULTURE ETUDIES

La quantification des différents flux d'azote dans le système sol / plante / atmosphère fait suite à la phase d'évaluation des modèles présentés précédemment. Il est important d'avoir un regard critique sur les résultats présentés ci-dessous, puisqu'ils sont issus de la modélisation : les valeurs simulées peuvent donc ne pas refléter ce qu'il se passe « réellement » au champ. Au regard des qualités de prédictions des modèles, il est donc très important d'avoir du recul sur les résultats.

Les bilans annuels des quantités d'azote minéral simulés par le modèle STICS des systèmes de culture étudiés de chaque campagne sont présentés dans la **Figure 16** pour le site expérimental de Genech et dans la **Figure 17** pour le site d'Izel. Les entrées d'azote minéral dans le système comprennent la quantité d'azote minéral initiale (après la récolte du précédent), la minéralisation totale de l'azote du sol (c'est-à-dire la minéralisation de l'humus et des résidus de culture), la fertilisation azotée et l'azote des précipitations.

Les quantités d'azote minéral initiales sont en liens directs avec les résultats présentés dans la partie 3.1 sur la qualité de prédiction du modèle de l'azote dans le sol (**Figure 14, Annexes 7 à 12**). Les modèles simulent des reliquats initiaux de plus en plus faible pour le site d'Izel, ce qui n'est pas cohérent avec les résultats mesurés au champ, ce qui montre bien que la qualité de prédiction des modèles sur l'azote dans le sol soit peu fiable.

Concernant la minéralisation de l'humus pour une année culturale donnée, aucune différence n'est observable entre les traitements, et cela sur les deux sites expérimentaux. Sur la parcelle de Genech, la minéralisation de l'humus est en moyenne de 57 kg/ha la première année d'essai, de 122 kg/ha lors de la deuxième année, de 132 kg/ha la troisième année et de 144 kg/ha la dernière année de l'essai. Pour Izel les valeurs annuelles de minéralisation de l'humus sont beaucoup plus faibles avec 23 kg/ha la première année, 33 kg/ha la deuxième année et 35 kg/ha la dernière année. Il y a donc un effet site significatif avec une minéralisation de l'humus annuelle moyenne de 110 kg/ha pour Genech et de 30 kg/ha pour Izel. Un schéma similaire peut être observé pour la minéralisation des résidus. En effet, il y a un effet du site expérimental, alors qu'il n'y pas de différence visible entre les traitements, et ce, pour les deux sites expérimentaux. En moyenne la minéralisation des résidus est de -22 kg/ha/an pour la parcelle de Genech et de -30 kg/ha/an pour Izel. Ainsi la moyenne de la minéralisation totale annuelle de Genech est de 79 kg/ha, alors qu'elle est proche de 0 pour Izel.

De l'autre côté du bilan annuel d'azote minéral on retrouve : l'exportation d'azote par les cultures, la restitution d'azote par les résidus de cultures, la quantité d'azote minéral finale (ici encore, liée à la partie sur la qualité de prédiction de l'azote minéral dans le sol, partie 3.1), le phénomène d'organisation et les pertes d'azote par lixiviation ou par voie gazeuse (N_2 , N_2O , NH_3) (**Figures 16 et 17**).

Concernant la quantité d'azote exportée par les cultures, des différences peuvent être observées entre les années d'essais, dépendante la dynamique d'absorption d'azote de la culture implantée, mais également entre les différents traitements, c'est-à-dire entre les différents niveaux de fertilisation résultant du conseil des OAD testés et les sites d'essais (**Figure 18**). Pour l'escourgeon, uniquement cultivé sur le site de Genech, la modalité AG (Agro-conseil) se démarque avec en moyenne une quantité d'azote exportée à la récolte de 93 kg/ha. En effet, cette quantité est en moyenne de 76 kg/ha pour les modalités TF (témoin fertilisé) et NT (N-tester), et aux alentours de 61 kg/ha pour le témoin non fertilisé (T0). Ces observations sont également visibles dans la **Figure 18A** avec une plus forte absorption d'azote en fin du cycle de l'orge pour la modalité AG. Sur les deux parcelles d'essais, pour le blé de cultivar Rubisko, on observe ici encore que les micro-parcelles de modalité AG ont

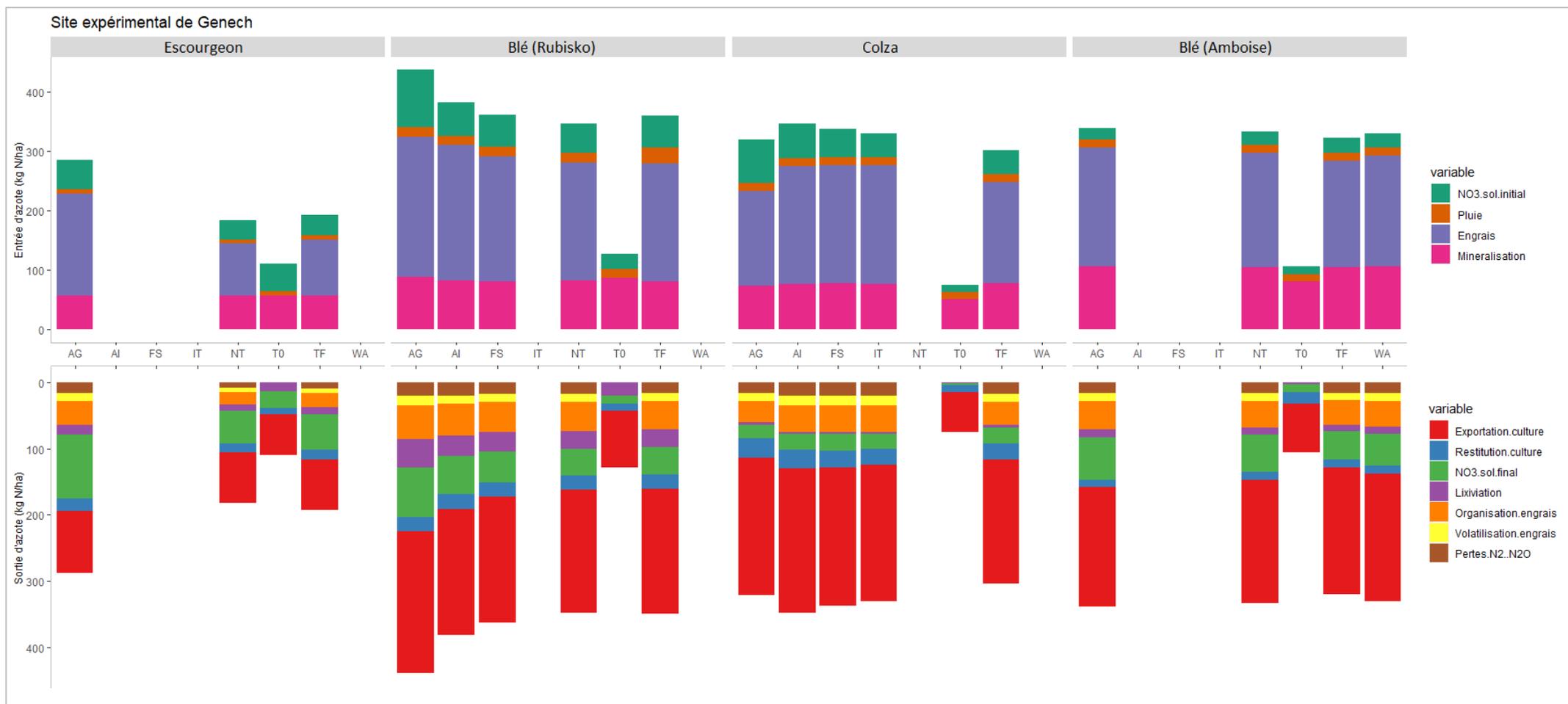


Figure 16 : Bilan annuel de l'azote minéral simulé (kg/ha), par modalité sur le site expérimental de Genech

(**AG** : modalité Agro-Conseil, **AI** : drone Wanaka, **FS** : Farmstar, **IT** : Image IT, **NT** : N-tester, **TO** : témoin non fertilisé, **TF** : témoin fertilisé à la dose bilan, **WA** : drone Wanaka)

des quantités d'azote exportées à la récolte plus importantes avec 205 kg/ha en moyenne, alors que cette valeur est environ égale à 180 kg/ha pour les micro-parcelles de modalité AI (drone Airinov), FS (Farmstar), TF et NT et à 100 kg/ha, pour les micro-parcelles T0. La **Figure 18A/B** montre une absorption d'azote plus importante pour le blé de modalité AG, mais cette fois-ci, en début de cycle. Pour le colza, la quantité d'azote exportée sur la parcelle Genech est de 210 kg/ha pour les modalités ayant reçu un conseil d'un OAD, 187 kg/ha pour le TF et 60 kg/ha pour le T0. Ici encore, cela peut être visible sur la **Figure 18A** avec une plus faible quantité d'azote absorbée par le colza de modalité TF en fin de cycle. Ces quantités simulées sont un peu plus faibles sur la parcelle d'Izel, avec environ 173 kg/ha pour les modalités dites « OAD », 156 kg/ha pour le TF et 41 kg/ha pour le T0. Et enfin, concernant le blé de cultivar Amboise, on retrouve la même tendance que précédemment, avec une quantité d'azote exportée à la récolte plus importante sur la parcelle de Genech que sur celle d'Izel. En effet, ces quantités sont respectivement aux environs de 135 kg/ha et 100 kg/ha pour les modalités fertilisées, et de 53 kg/ha et 30 kg/ha pour les modalités non fertilisées.

Chaque année culturale, une part de l'azote des engrais subit le phénomène d'organisation (c'est-à-dire l'intégration de l'azote minéral dans la matière organique sous l'effet des microorganismes du sol). C'est un processus continu le long du cycle de la culture qui capte ici 21 % de la quantité totale d'engrais apportée. Une autre partie de l'azote des engrais est volatilisée dans l'atmosphère sous forme de NH₃. Sur la parcelle de Genech, cela représente 6% des apports azotés. Ainsi, par exemple, pour une fertilisation totale de 200U, 12 kg/ha d'azote est volatilisé. Cependant cette dynamique n'est pas observable pour la parcelle d'Izel : les quantités d'azote en jeu dans le phénomène dépendent plutôt des années de cultures et sont plus importantes que sur le site de Genech. Sur la parcelle d'Izel, lorsque le blé de variété Rubisko était implanté, les quantités d'azote volatilisées simulées étaient comprises entre 13 et 18 kg/ha. Pour l'année où le colza était cultivé, ces valeurs se trouvaient dans un intervalle allant de 18 à 23 kg/ha. Ce même intervalle est observé pour la période concernant le blé de variété Amboise avec cependant un dé plafonnement à 26 kg/ha d'azote volatilisé pour les micro-parcelles de la modalité AG

Concernant les quantités d'azote lixiviées simulées, celles-ci varient entre 0 et 45 kg/ha/an pour les deux sites. Pour le site de Genech, des différences entre année et entre traitement (pour une année donnée) peuvent être observées. L'année en orge, les modèles ont simulés une perte d'azote par lixiviation de 10 kg/ha pour les modalités NT et TF, et de 14 kg/ha pour la modalité AG. La première année en blé, c'est environ 29 kg d'azote/ha qui a été lixivié pour les modalités AI, FS, TF et NT, et environ 43 kg/ha pour la modalité AG. Les deux dernières années de la rotation, peu de différences entre modalités ont été simulées et donc en moyenne 3 kg/ha d'azote ont été lixiviés lors de la période en colza et 11 kg/ha pour la dernière année en blé. Pour le site d'Izel, les quantités d'azote lixiviées sont similaires pour année donnée, mais diffèrent d'une année de simulation à l'autre. Ainsi, la première année en blé 25 kg/ha d'azote ont été lixiviés, l'année en colza il n'y a pas eu de phénomène de lixiviation, et la dernière année en blé, c'est 2 kg/ha d'azote qui ont été lixiviés selon les modèles. Les dynamiques des quantités d'azote lixiviés sont présentées **Annexe 14**.

Les pertes d'azote par voie gazeuse sous forme de N₂ et de N₂O, varient quant à elles entre 10 et 21 kg/ha/an pour les micro-parcelles fertilisées du site de Genech et entre 13 et 26 kg/ha/an pour celles d'Izel. Sur le site de Genech, lors de l'année en orge, les pertes simulées sont de 10 kg/ha pour les modalités NT et TF, alors qu'elles sont de 17 kg/ha pour la modalité AG. Lors de l'année en blé (Rubisko) et en colza, ces pertes sont en moyenne de 19 kg/ha pour quelle que soit la modalité fertilisée. Pour l'année en blé (Amboise), elles sont en moyenne de 17 kg/ha ici encore quel que soit le traitement (en dehors du T0). Concernant la parcelle d'Izel, la première année en blé, les pertes simulées sont de 18 kg/ha pour la modalité AI, de 15 kg/ha pour la modalité AI et de 13 kg/ha pour les modalités FS, TF et NT. L'année en colza les pertes sont de 22 kg/ha pour les modalités AG, FS et IT et de



Figure 17 : Bilan annuel de l'azote minéral simulé, par modalité sur le site expérimental d'Izel

(**AG** : modalité Agro-Conseil, **AI** : drone Wanaka, **FS** : Farmstar, **IT** : Image IT, **NT** : N-tester, **TO** : témoin non fertilisé, **TF** : témoin fertilisé à la dose bilan, **WA** : drone Wanaka)

19 kg/ha pour les modalités TF et AI. Et enfin, pour la dernière année en blé, les pertes étaient de 26 kg/ha pour AG, de 22 kg/ha pour NT et de 17 kg/ha pour TF et WA.

Finalement, les écarts moyens sur les critères de performances agronomiques et environnementales entre les différentes modalités OAD et la modalité témoin fertilisée à la dose bilan, sur toute la rotation et par site sont résumés dans le **Tableau 10**.

4 DISCUSSION

Pour rappel, le projet OAD N a pour objectif l'évaluation des performances agronomiques et environnementales de différents systèmes de culture dont la fertilisation a été pilotée par différents OAD. En lien avec ce projet, l'objectif de ce mémoire est la quantification des différents flux du cycle de l'azote au sein de ces systèmes.

4.1 FIABILITE DE LA PREDICTION DES MODELES STICS

L'évaluation finale des modèles STICS a permis de mettre en évidence une qualité de prédiction des paramètres assez hétérogène. Concrètement, les rendements, la teneur en azote dans les grains et le statut de l'eau dans le sol sont des paramètres assez bien prédits par le modèle alors que les paramètres en rapport avec la biomasse et avec l'azote dans le sol sont moins bien simulés.

Les prédictions de la biomasse des différentes cultures auraient pu être corrigées par la calibration des différents temps thermiques cumulés entre deux stades de développement. Plus simplement, l'optimisation de ces paramètres aurait permis de caler dans le temps les différents stades de développement simulés avec ceux réellement observés au champ. Etant donné que les dates de début de chaque stade phénologique n'ont pas été relevées dans cette étude, la calibration des différents temps thermiques cumulés n'a pas pu être réalisée. Ces paramètres n'ont donc pas été modifiés afin de ne pas compromettre la cohérence globale des fichiers plante. Il faut également avoir conscience que certaines des mesures de biomasse fraîche du colza ont été estimées à l'aide de l'application pour smartphone Image IT et qu'elles peuvent donc manquer de précision.

Graphiquement, la qualité de prédiction de l'azote dans le compartiment sol observée est assez médiocre. Il faut toutefois souligner que l'évaluation de cette qualité de simulation est assez difficile puisque le modèle STICS produit des valeurs calculées tous les jours alors que les mesures sont plus clairsemées dans le temps. Cela est d'autant plus vrai lorsque la variable de sortie fluctue assez rapidement avec le temps, ce qui est le cas pour la quantité et de la concentration en azote dans le sol. De plus, il faut également prendre en compte la qualité du jeu de données : il peut y avoir des incertitudes sur les sorties de certaines valeurs mesurées à l'aide de l'auto-analyseur à flux continu (Skalar San++). C'est le cas, par exemple, du reliquat post-récolte 2018 du premier horizon de la micro-parcelle 15 du site d'Izel qui est très élevé en comparaison avec les autres reliquats mesurés (**Annexe 10E**).

Dans le cadre du projet Gazelle (Agro-Transfert), des simulations des systèmes de cultures du projet OAD N ont été réalisées avec l'outil SYST'N. Cet outil comporte un modèle dynamique qui simule les flux d'azote dans le système sol-plante-atmosphère (Parnaudeau et al., 2012). Ainsi, vers la fin de ce stage, une comparaison entre les sorties de STICS et de SYST'N a été réalisée afin de savoir si la qualité de nos résultats de quantification des flux azotés pouvait être améliorée. Cependant, aucune différence n'a pu être constatée, ce qui en soit est assez logique puisque les équations de SYST'N combinent des sous-modèles existants dont STICS pour les bilans eau et nitrate dans les sols (Dupas et al., 2015).

Ainsi, tous les résultats d'évaluation présentés précédemment sont importants puisqu'ils renseignent sur le niveau de précision de ce modèle dans la reproduction du

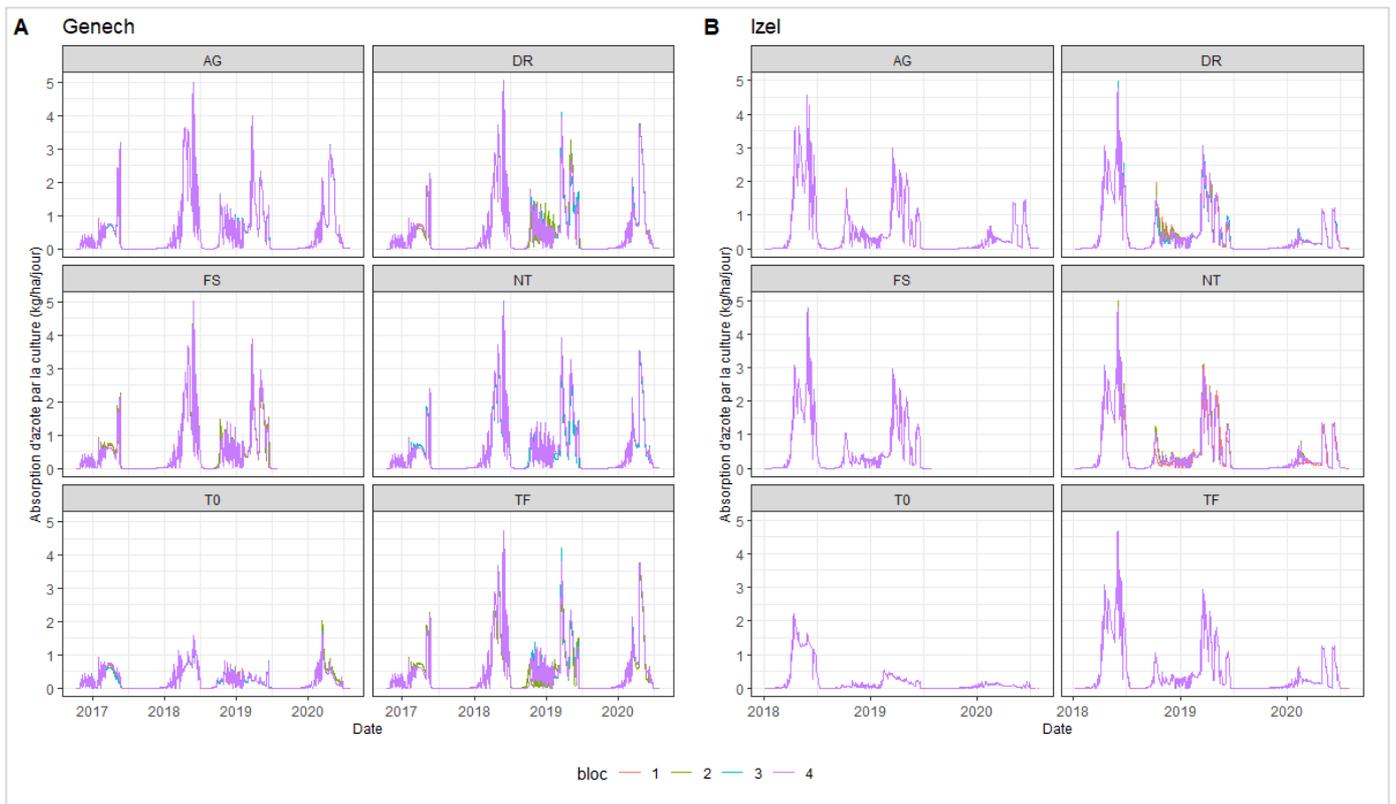


Figure 18 : Absorption d'azote (kg/ha/jour) par les cultures par modalité sur le site de Genech (A) et d'Izel (B) (2016/17 : orge, 2017/18 : blé (*Rubisko*), 2018/19 : colza, 2019/20 : blé (*Amboise*))

système simulé. Cela permet de connaître le niveau de crédibilité que l'on peut accorder aux différents résultats qui seront produits par la suite à partir des variables de sortie de ces modèles de culture. Il est toutefois difficile de quantifier ce niveau de crédibilité, spécialement dans les situations où, comme ici dans cette étude, les résultats montrent des performances de prédiction assez hétérogène. Ainsi, comme évoqué précédemment, il faut avoir un regard critique sur les résultats simulés de quantification des flux d'azote au sein des systèmes de cultures.

4.2 QUANTIFICATION DES DIFFERENTS FLUX D'AZOTE

Globalement, les résultats observés concordent avec les observations des années précédentes. Tout d'abord, chaque année, on peut observer un effet significatif de la fertilisation sur les performances agronomiques des cultures. Les apports d'azote minéral par les engrais induisent une augmentation de la quantité d'azote biodisponible dans le sol et permettent donc une plus grande absorption d'azote par les cultures, ce qui finalement, à un effet positif sur la croissance en biomasse mais également sur le rendement et la qualité des récoltes. Bien entendu, l'absence de fertilisation permet de réduire considérablement les problématiques environnementales liées à l'azote.

Sur la parcelle de Genech, la première année, l'OAD proposé par Agro-conseil (AG) a émis un conseil de fertilisation déplaçant la dose bilan de 25 kg/ha sur chacun des trois apports. La comparaison avec le témoin dose bilan (TF) montre que ce surplus d'azote a été valorisé par la plante, mais seulement en fin de cycle (**Figure 18A**). Cela peut expliquer les précédentes conclusions à ce sujet montrant que la modalité AG se démarquait statistiquement du TF non seulement au niveau du rendement mais également sur la teneur en protéine. Néanmoins, malgré des performances agronomiques meilleure cette année-là, le déplaçonnement de la dose des apports en début de cycle n'a pas été mieux valorisé par la plante, par rapport aux autres modalités. Cela a eu des répercussions sur les performances environnementales de cet outil puisque les pertes d'azote par voie gazeuse (NH_3 , N_2O , N_2) liées aux engrais sont dépendante de la dose apportée : on observe une différence totale de 11 kg/ha/an entre les pertes de la modalité AG et le témoin dose bilan. Cette « sur-fertilisation » a également permis un stockage d'azote minéral dans le sol (reliquat post-récolte plus élevé). Cependant, une partie de cet azote n'a pas été valorisée par la culture suivante en raison des grandes quantités d'azote lixiviés pendant l'hiver 2017/2018 (+16kg/ha par rapport au TF) (**Annexe 14A**). Par ailleurs, en blé (variété Rubisko), les micro-parcelles AG, ont encore ici reçu une dose totale supérieure à celles du TF avec 36U de différence. Cependant la dynamique d'absorption de l'azote de la modalité AG est similaire au TF : le rendement et le taux de protéines ne sont pas significativement différents. Cela peut être expliqué par la mauvaise valorisation de certains apports par la plante en raison du manque de précipitations juste après. En effet, un cumul de 15 mm de pluie dans les 15 jours suivant l'apport est nécessaire pour assurer une efficacité maximale de l'engrais (néanmoins, l'engrais utilisé ici, l'ammonitrate, est moins volatil que la solution azotée et donc moins sensible à un épisode de sécheresse après l'apport) (ARVALIS - Institut du végétal, s.d.). Cela se traduit par un reliquat post-récolte plus élevé (+30 kg/ha pour AG par rapport au TF). L'année suivante, en colza, les micro-parcelles AG ont reçus 10U d'azote en moins que le TF. Ainsi, des performances agronomiques et environnementales similaires sont observées entre les deux traitements et les reliquats post-récolte simulées sont également similaires. La dernière année (blé, cultivar Amboise), la même chose a pu être constatées. Les parcelles AG ont cependant reçu 22U d'azote de plus que TF, surplus qui se retrouve finalement stocké dans le sol (reliquat post-récolte plus élevé). Sur le site d'Izel, malgré un déplaçonnement plus important, la même tendance que pour le site de Genech peut être observée : le surplus d'azote par rapport au TF n'induit pas une absorption plus importante, cela mène même à des pertes gazeuses d'azote plus importante (+10 kg/ha et +16 kg/ha pour les deux années en blé) et à des reliquats post-récolte plus important (+30 kg/ha en moyenne).

Tableau 10 : Ecart moyens des résultats agronomiques et environnementaux entre les OAD testés et le témoin fertilisé (TF), par site, sur toute la rotation

Site	OAD	Nombre d'utilisation	Ecart moyen avec le TF				
			Dose apportée (kgN/ha/an)	Rendement (q/ha)	Qualité (protéine / huile) (%)	Lixiviation (kgN/ha/an)	Pertes sous forme gazeuse (kgN/ha/an)
Genech	AG	4	+31,5	+3.8	+0.35	+6	+4.45
	NT	3	+1	-1.2	0	-0.6	+0.17
	AI	2	+29	+1.8	+0.1	+1.5	+4.5
	FS	2	+20	-0.1	-0.2	+1	+3
	WA	1	-29	+6.1	+0.4	+0.5	+1
	IT	1	+30	-1.4	-0.5	0	+5
Izel	AG	3	+60	+3.9	+0.1	-0.7	+10.7
	NT	2	+15,5	+0.2	+0.1	0	+3.5
	AI	2	+12	+1.1	-0.1	0	+0.5
	FS	2	+12	+2	-0.2	0	-2
	WA	1	-11	-5.8	+0.1	-1	-4
	IT	1	+20	+1.6	-0.3	0	+4

(TF : témoin fertilisé, AG : Agro-conseil, NT : N-tester, AI : Airinov, FS : Farmstar, WA : Wanaka, IT : image IT)

La fertilisation de la modalité drone, non testée sur l'orge, a été pilotée par Airinov (AI) au début du projet, puis par Wanaka (WA) la dernière année. Concernant la modalité AI sur le site de Genech, les deux années (blé Rubisko et colza), la dose totale conseillée était 30U supérieure à la dose bilan. Cependant, comme précédemment avec AG, peu de différences ont été observées entre les modalités AI et TF en ce qui concerne les paramètres agronomiques (**Tableau 10**). Pour les performances environnementales, toujours en comparaison avec TF, on peut observer des pertes d'azote sous forme gazeuse légèrement supérieures pour AI (+9 kg/ha/an en moyenne) dû au déplafonnement de la dose bilan, il n'y a cependant aucune différence au niveau de la quantité d'azote lixiviée. Le surplus d'azote apporté aux parcelles AI a été stocké dans le sol lors de l'année en blé (mauvaise valorisation de l'apport). L'année en colza, le modèle indique que le surplus d'azote apporté par fertilisation a été valorisé par la plante et donc exporté à la récolte, le reliquat post-récolte AI étant similaire au TF. Sur le site d'Izel, la fertilisation du blé de la modalité AI a été déplafonnée de 30U par rapport à TF, alors que le colza a reçu une dose de 10U de moins que TF. On retrouve la même dynamique que pour la parcelle de Genech, à savoir : pas de différence entre AI et TF pour une année donnée concernant les performances agronomiques (rendement et qualité des récoltes), et les performances environnementales (pertes sous forme gazeuse et lixiviation). Les deux années, le surplus d'azote de la modalité AI est donc stocké dans le sol. Le service Wanaka, a quant à lui, permis une réduction de la dose par rapport au TF de 29U pour Genech et de 10U pour Izel. Dans les deux cas, aucune différence significative avec TF n'a été observée concernant les performances agronomiques du blé, ce qui peut être expliqué par le fait que les reliquats initiaux WA sont supérieurs aux reliquats TF. Concernant les performances environnementales, il n'y a pas différence entre WA et TF et ce pour les deux sites expérimentaux (**Tableau 10**).

La première année en blé, le conseil de fertilisation de Farmstar déplafonne la dose bilan de 10U pour le site de Genech et de 4U pour Izel. Ce surplus étant assez faible, il n'y a pas de différence observable sur les performances agroenvironnementales entre cette modalité (FS) et TF. Finalement, ce surplus d'azote se « retrouve » dans les reliquats post-récolte. En colza, FS prodigue un conseil de fertilisation déplafonnant de 30U la dose bilan pour la parcelle de Genech et de 20U pour Izel. Selon les modèles, cette sur-fertilisation a été valorisée par la culture : les quantités d'azote exportées sont plus importantes, cependant les données mesurées au champ montrent que la différence par rapport au TF est non significative.

Sur les cultures céréalières, les conseils de fertilisation du N-tester (NT) sont très souvent similaires à la dose bilan, à l'exception du blé en dernière année à Izel (+34U). Ainsi, les performances agronomiques et environnementales entre les micro-parcelles NT et TF sont similaires, à l'exception des pertes gazeuses causées par le fort déplafonnement de la dose en blé à Izel. Les résultats des années précédentes ont montrés un taux de protéines dans le grain de blé (Amboise) à Izel significativement différent de TF, cependant non observable par modélisation. En colza, ces micro-parcelles ont été fertilisées à la dose conseillée par Image IT, soit 20U de plus que la dose bilan pour Izel et 30U de plus pour Genech. Pour les deux sites, seule la quantité N perdue sous forme gazeuse diffère du TF avec +4kgN/ha/an pour Izel et +5 kg/ha/an pour Genech en raison du déplafonnement de la dose (**Tableau 10**). Le surplus d'azote est ici encore stocké dans le sol et retrouve dans les reliquats post-récolte.

4.3 LIMITES DE L'ETUDE

Le modèle STICS est un outil qui a l'avantage de donner accès à une diversité d'indicateurs difficilement accessibles par expérimentation, cependant, un modèle est nécessairement une simplification de la réalité et ne peut donc pas « comprendre » toutes les variables et leurs relations dans le système sol / plante / atmosphère étudié.

Au regard du résultat d'évaluation de la capacité de prédiction des modèles STICS, il a été assez compliqué de savoir quel niveau de crédibilité accorder aux résultats et donc d'estimer si les valeurs des flux azotés simulés sont proches des valeurs dites « réelles ». Néanmoins, la qualité de prédiction des modèles STICS est difficilement améliorable en raison d'un manque de données expérimentales. En effet les quantités d'azote minéral et les taux d'humidité par horizon avant le semis de la première culture, c'est-à-dire, le jour de l'initialisation des modèles n'ont pas été mesurées. C'est également le cas des dates de début de chaque stade phénologique, de chaque culture. Il y a aussi la biomasse sèche du blé (cultivar Amboise), non mesurée en raison des mesures de confinement liées à la pandémie de COVID-19. De plus, l'activation des options de nitrification et de dénitrification n'a pas été possible étant donné que les quantités de NO_3 et de NH_4 par horizon n'étaient pas disponibles (seules les quantités totales d'azote minéral étaient renseignées dans le fichier observation).

4.4 PERSPECTIVES

Initialement, il avait été prévu d'intégrer une évaluation technico-économique de chaque OAD à ce travail. Cependant, par manque de temps, cela n'a pas été possible. Ainsi, il serait intéressant pour la suite du projet de réaliser cette évaluation économique puisque cela permettrait d'avoir une vision globale sur les performances de chaque outil. Pour chaque année d'étude, il faudrait prendre en compte les coûts des engrais, du service de l'OAD, et du calcul de la dose bilan (si besoin), en opposition, avec le prix commercialisable (avec la prise en compte du rendement et de la qualité des récoltes). L'objectif étant de mettre en évidence les gains en rendement, en qualité et en intrant de chaque outil.

La première partie de ce projet, qui s'est terminée en 2020, a permis de tester ces outils sur trois cultures d'hiver (orge, blé, colza). Pour la deuxième partie de ce projet, il a été prévu d'intégrer des cultures de printemps (betterave et maïs) ainsi que des intercultures. Il serait ainsi intéressant donc de voir le comportement des outils testés sur ces cultures de printemps, notamment sur le phénomène de lixiviation.

5 CONCLUSION

Cette étude a pour but l'évaluation des performances agronomiques et environnementales de différents systèmes de culture dont la fertilisation a été pilotée par différents OAD par la quantification des différents flux du cycle de l'azote au sein de ces systèmes à l'aide du modèle STICS. Les OAD testés, à savoir : Index-N d'Agro-conseil, la pince N-tester, le drone Airinov, Farmstar, le drone Wanaka et l'application pour smartphone Image IT, prodiguent un conseil de fertilisation déplaçant très souvent la dose calculée selon la méthode du bilan prévisionnel. Les conditions d'apports en azote étant similaires entre OAD pour une année et un site donné (même matériel, même engrais, même date), seule la quantité d'azote apportée varie d'une modalité à l'autre. Tous les OAD ont globalement le même comportement sur les deux sites d'essai (brunisol et rendosol).

La comparaison entre les systèmes de culture avec une fertilisation pilotée par un OAD et les témoins fertilisés à la dose bilan montre que le déplaçonnement de la dose a un impact positif sur les performances agronomiques de ces systèmes de cultures. Cependant, à l'exception des cas déplaçant énormément la dose bilan, les différences de rendement et de qualité des récoltes sont très souvent non significatives, le surplus étant très souvent stocké dans le sol. Enfin, concernant les impacts environnementaux du déplaçonnement de la dose bilan : plus le déplaçonnement est grand, plus les pertes en azote sous forme gazeuses (NH_3 , N_2 , N_2O) sont importantes (4.5 kgN/ha/an en plus lors d'un déplaçonnement de 30U). Cela est également observable pour le phénomène de lixiviation. En effet, le surplus d'azote alimente très souvent le stock d'azote minéral post-récolte, augmentant la quantité d'azote potentiellement lessivable pendant la période hivernale suivante.

6 BIBLIOGRAPHIE

AGRO CONSEIL, [sans date]. Fumure azotée: Index-N®. In : *Agro Conseil* [en ligne]. [Consulté le 8 janvier 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.agro-conseil.fr/prestations/fumure-azotee.html>.

ARREGUI, L.M., LASA, B., LAFARGA, A., IRAÑETA, I., BAROJA, E. et QUEMADA, M., 2006. Evaluation of chlorophyll meters as tools for N fertilization in winter wheat under humid Mediterranean conditions. In : *European Journal of Agronomy*. février 2006. Vol. 24, n° 2, pp. 140-148. DOI 10.1016/j.eja.2005.05.005.

ARVALIS - INSTITUT DU VÉGÉTAL, 2007. Les Fiches Accidients, céréales à paille, carence en azote. In : *ARVALIS - Institut du végétal* [en ligne]. 2007. [Consulté le 17 mars 2021]. Disponible à l'adresse : <http://www.fiches.arvalis-infos.fr>.

ARVALIS - INSTITUT DU VÉGÉTAL, [sans date]. Valorisation de l'engrais azoté : 15 mm de pluies nécessaires. In : [en ligne]. [Consulté le 8 juin 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.arvalis-infos.fr/oui-il-faut-15-mm-de-pluie-pour-valoriser-un-apport-d-engrais-azote-@/view-18372-arvarticle.html>.

BEAUDOIN, N., LAUNAY, M., SAUBOUA, E., PONSARDIN, G. et MARY, B., 2008. Evaluation of the soil crop model STICS over 8 years against the "on farm" database of Bruyères catchment. In : *European Journal of Agronomy*. juillet 2008. Vol. 29, n° 1, pp. 46-57. DOI 10.1016/j.eja.2008.03.001.

BIOECOAGRO, 2019. UMR Transfrontalière BioEcoAgro. In : [en ligne]. 2019. [Consulté le 20 mai 2021]. Disponible à l'adresse : https://www.bioecoagro.eu/umrt-bioecoagro_fre/Structure.

BRISSEON, N, GARY, C, JUSTES, E, ROCHE, R, MARY, B, RIPOCHE, D, ZIMMER, D, SIERRA, J, BERTUZZI, P, BURGER, P, BUSSIÈRE, F, CABIDOUCHE, Y.M, CELLIER, P, DEBAEKE, P, GAUDILLÈRE, J.P, HÉNAULT, C, MARAUX, F, SEGUIN, B et SINOQUET, H, 2003. An overview of the crop model stics. In : *European Journal of Agronomy*. janvier 2003. Vol. 18, n° 3-4, pp. 309-332. DOI 10.1016/S1161-0301(02)00110-7.

BRISSEON, N, RUGET, F, GATE, P, LORGEOU, J, NICOUILLAUD, B, TAYOT, X, PLENET, D, JEUFFROY, M.H, BOUTHIER, A, RIPOCHE, D, MARY, B et JUSTES, E, 2002. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. II. Model validation for wheat and corn. In : *Agronomie*. 2002. n° 22, pp. 69-93.

BRISSEON, Nadine, LAUNAY, Marie, MARY, Bruno et BEAUDOIN, Nicolas, 2008. *Conceptual basis, formalisations and parameterization of the STICS crop model*. Versailles : Éditions Quæ. ISBN 978-2-7592-0169-3.

BRISSEON, Nadine, MARY, Bruno, RIPOCHE, Dominique, JEUFFROY, Marie Hélène, RUGET, Françoise, NICOUILLAUD, Bernard, GATE, Philippe, DEVIENNE-BARRET, Florence, ANTONIOLETTI, Rodrigo, DURR, Carolyne, RICHARD, Guy, BEAUDOIN, Nicolas, RECOUS, Sylvie, TAYOT, Xavier, PLENET, Daniel, CELLIER, Pierre, MACHET, Jean-Marie, MEYNARD, Jean Marc et DELÉCOLLE, Richard, 1998. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. In : *Agronomie*. 1998. Vol. 18, n° 5-6, pp. 311-346. DOI 10.1051/agro:19980501.

CELLIER, Pierre, 2019. De la fertilisation des cultures à la cascade de l'azote. In : *Agronomie, Environnement & Sociétés, Association Française d'Agronomie (Afa)*. 2019. Vol. 9, n° 1, pp. 13-17.

COMIFER, 2013. *Calcul de la fertilisation azotée* [en ligne]. 2013. S.l. : s.n. [Consulté le 11 janvier 2021]. Disponible à l'adresse : https://comifer.asso.fr/images/publications/brochures/BROCHURE_AZOTE_20130705web.pdf.

COUCHENEY, Elsa, BUIS, Samuel, LAUNAY, Marie, CONSTANTIN, Julie, MARY, Bruno, GARCÍA DE CORTÁZAR-ATAURI, Iñaki, RIPOCHE, Dominique, BEAUDOIN, Nicolas, RUGET, Françoise, ANDRIANARISOA, Kasaina Sitraka, LE BAS, Christine, JUSTES, Eric et LÉONARD, Joël, 2015. Accuracy, robustness and behavior of the STICS soil–crop model for plant, water and nitrogen outputs: Evaluation over a wide range of agro-environmental conditions in France. In : *Environmental Modelling & Software*. février 2015. Vol. 64, pp. 177-190. DOI 10.1016/j.envsoft.2014.11.024.

DUPAS, Rémi, PARNAUDEAU, Virginie, REAU, Raymond, JEUFFROY, Marie-Hélène, DURAND, Patrick et GASCUEL-ODOUX, Chantal, 2015. Integrating local knowledge and biophysical modeling to assess nitrate losses from cropping systems in drinking water protection areas. In : *Environmental Modelling & Software*. juillet 2015. Vol. 69, pp. 101-110. DOI 10.1016/j.envsoft.2015.03.009.

ERISMAN, Jan Willem, SUTTON, Mark A., GALLOWAY, James, KLIMONT, Zbigniew et WINIWARTER, Wilfried, 2008. How a century of ammonia synthesis changed the world. In : *Nature Geoscience*. octobre 2008. Vol. 1, n° 10, pp. 636-639. DOI 10.1038/ngeo325.

FARMSTAR, [sans date]. La technologie FARMSTAR. In : [en ligne]. [Consulté le 8 janvier 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.myfarmstar.com/fr/la-technologie/>.

GALLOWAY, James N., ABER, John D., ERISMAN, Jan Willem, SEITZINGER, Sybil P., HOWARTH, Robert W., COWLING, Ellis B. et COSBY, B. Jack, 2003. The Nitrogen Cascade. In : *BioScience*. 2003. Vol. 53, n° 4, pp. 341. DOI 10.1641/0006-3568(2003)053[0341:TNC]2.0.CO;2.

GROUPE CARRÉ, [sans date]. Groupe Carré : Négoce de produits agricoles et collecte de céréales. In : *Groupe Carre* [en ligne]. [Consulté le 26 avril 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.groupe-carre.fr/>.

INRAE, [sans date]. AgroImpact (Agroressources et Impacts environnementaux). In : [en ligne]. [Consulté le 26 avril 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www6.hautsdefrance.inrae.fr/agroimpact/>.

INSTITUT DE GENECH, 2016. L'Institut de Genech, un héritage de 120 ans d'Histoire ! In : *Votre avenir au coeur de la nature* [en ligne]. 2016. [Consulté le 26 avril 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.institutdegenech.fr/fr/qui-sommes-nous/>.

JENKINSON, D.S., 1990. An introduction to the global nitrogen cycle. In : *Soil Use and Management*. juin 1990. Vol. 6, n° 2, pp. 56-61. DOI 10.1111/j.1475-2743.1990.tb00800.x.

LAUNAY, M, FLENET, F, RUGET, F et GARCIA DE CORTAZAR ATAURI, I, 2005. Généricité et méthodologie d'adaptation de STICS à de nouvelles cultures. In : *Séminaire STICS, Carry-le-Rouet*. 2005. pp. 55-57.

LITKE, L., L., GAILE, Z. et RUŽA, A., 2018. Effect of nitrogen fertilization on winter wheat yield and yield quality. In : . 2018. pp. 332.2Kb. DOI 10.15159/AR.18.064.

MARSCHNER, Horst et MARSCHNER, Petra (éd.), 2012. *Marschner's Mineral nutrition of higher plants*. 3. ed. Amsterdam : Elsevier, Academic Press. ISBN 978-0-12-384905-2.

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE, DE L'AGROALIMENTAIRE ET DE LA FORÊT, 2014. *Mieux gérer l'azote pour réduire la pollution des eaux par les nitrates d'origine agricole*. 2014. S.l. : s.n.

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE, DE L'AGROALIMENTAIRE ET DE LA FORÊT, 2016. *Recensement et analyse des outils de raisonnement dynamique et de pilotage de la fertilisation azotée* [en ligne]. S.l. [Consulté le 8 janvier 2020]. Disponible à l'adresse : https://comifer.asso.fr/images/bilan-azote/outils-de-pilotage/2016_Rapport_OAD_Pilotage_Ferti_SCE.pdf.

PARNAUDEAU, V, REAU, R et DUBRULLE, P, 2012. Un outil d'évaluation des fuites d'azote vers l'environnement à l'échelle du système de culture: le logiciel Syst'N. In : *Innovations Agronomiques*. 2012. Vol. 21, pp. 59-70.

R CORE TEAM, 2017. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. In : [en ligne]. 2017. [Consulté le 9 juin 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.r-project.org/>.

SCHVARTZ, Christian, MULLER, Jean-Charles, DECROUX, Jacques, et COMITE FRANCAIS D'ETUDES ET DE DEVELOPPEMENT DE LA FERTILISATION RAISONNEE, 2005. *Guide de la fertilisation raisonnée: grandes cultures et prairies*. Paris : Editions France Agricole. ISBN 978-2-85557-120-1.

SOENEN, Baptiste, 2011. Blés, Pilotage de la fertilisation azotée : bien choisir sa méthode. In : *Perspectives agricoles*. décembre 2011. n° 384, pp. 55-57.

SUTTON, Mark A., HOWARD, Clare M., ERISMAN, Jan Willem, BILLEN, Gilles, BLEEKER, Albert, GRENNFELT, Peringe, VAN GRINSVEN, Hans et GRIZZETTI, Bruna (éd.), 2011. *The European Nitrogen Assessment: Sources, Effects and Policy Perspectives* [en ligne]. Cambridge : Cambridge University Press. [Consulté le 24 mars 2021]. ISBN 978-0-511-97698-8. Disponible à l'adresse : <http://ebooks.cambridge.org/ref/id/CBO9780511976988>.

TILMAN, David, CASSMAN, Kenneth G., MATSON, Pamela A., NAYLOR, Rosamond et POLASKY, Stephen, 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. In : *Nature*. août 2002. Vol. 418, n° 6898, pp. 671-677. DOI 10.1038/nature01014.

TREMBLAY, Nicolas, CANADA, et AGRICULTURE ET AGROALIMENTAIRE CANADA, 2001. *Régie de l'azote chez les cultures maraîchères: guide pour une fertilisation raisonnée* [en ligne]. Ottawa : Agriculture et agroalimentaire Canada. [Consulté le 22 mars 2021]. ISBN 978-0-662-85826-3. Disponible à l'adresse : <http://publications.gc.ca/Collection/A42-92-2001F.pdf>.

UNIFA, [sans date]. Le cycle de l'azote (N). In : *UNIFA* [en ligne]. [Consulté le 22 mars 2021]. Disponible à l'adresse : <https://fertilisation-edu.fr/cycles-bio-geo-chimiques/le-cycle-de-l-azote-n.html>.

URIBELARREA, Martín, CRAFTS-BRANDNER, Steven J. et BELOW, Fred E., 2009. Physiological N response of field-grown maize hybrids (*Zea mays* L.) with divergent yield potential and grain protein concentration. In : *Plant and Soil*. mars 2009. Vol. 316, n° 1-2, pp. 151-160. DOI 10.1007/s11104-008-9767-1.

VITOUSEK, Peter M., ABER, John D., HOWARTH, Robert W., LIKENS, Gene E., MATSON, Pamela A., SCHINDLER, David W., SCHLESINGER, William H. et TILMAN, David G., 1997. HUMAN ALTERATION OF THE GLOBAL NITROGEN CYCLE: SOURCES AND CONSEQUENCES. In : *Ecological Applications*. août 1997. Vol. 7, n° 3, pp. 737-750. DOI 10.1890/1051-0761(1997)007[0737:HAOTGN]2.0.CO;2.

VOS, J., PUTTEN, P.E.L. van der et BIRCH, C.J., 2005. Effect of nitrogen supply on leaf appearance, leaf growth, leaf nitrogen economy and photosynthetic capacity in maize (*Zea mays* L.). In : *Field Crops Research*. juillet 2005. Vol. 93, n° 1, pp. 64-73. DOI 10.1016/j.fcr.2004.09.013.

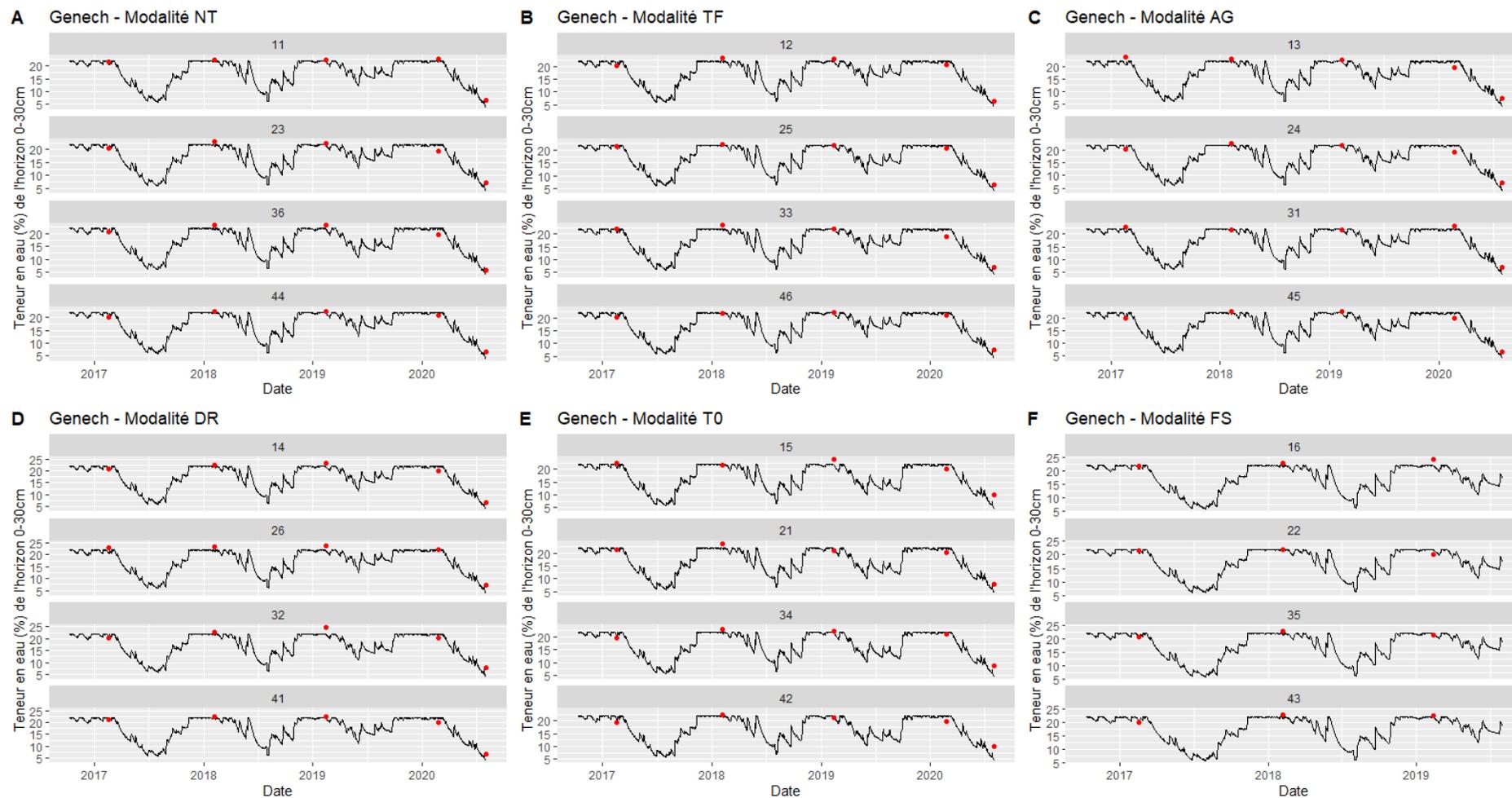
WALLACH, Daniel, MAKOWSKI, David, JONES, James W. et BRUN, François, 2019. Model Evaluation. In : *Working with Dynamic Crop Models* [en ligne]. S.l. : Elsevier. pp. 311-373. [Consulté le 9 mai 2021]. ISBN 978-0-12-811756-9. Disponible à l'adresse : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128117569000095>.

WANAKA, [sans date]. Gestion de la fumure azotée. In : [en ligne]. [Consulté le 11 janvier 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.wanaka.io/engrais.html>.

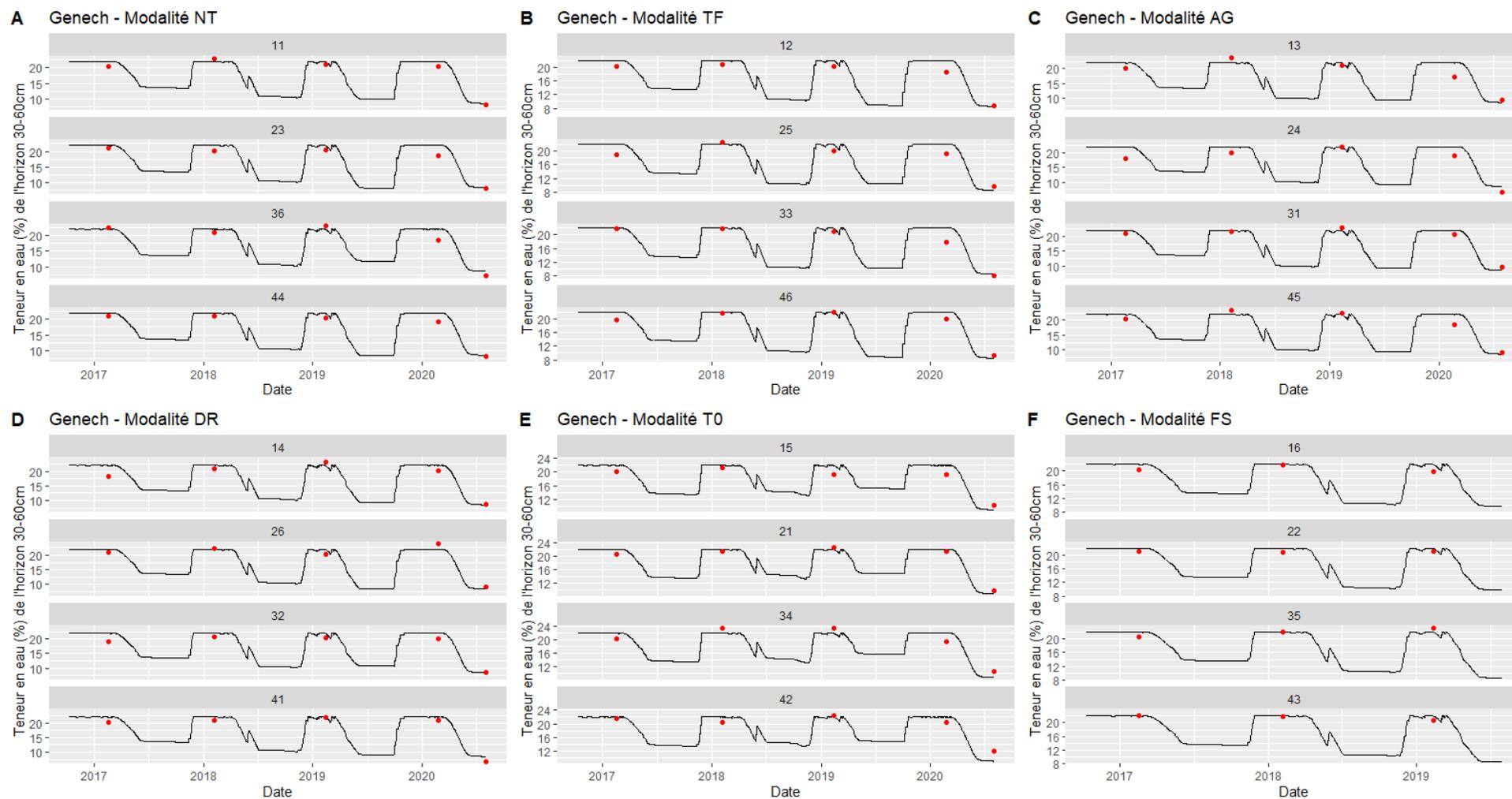
YARA, 2018a. N-Tester® : piloter la nutrition azotée. In : *Yara France* [en ligne]. 2018. [Consulté le 8 janvier 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.yara.fr/fertilisation/pur-nutriments/agriculture-precision-durable/N-Tester-pilotage-azote/>.

YARA, 2018b. Yara ImageIT. In : *Yara France* [en ligne]. 2018. [Consulté le 11 janvier 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.yara.fr/fertilisation/outils-et-services/yara-imageit/>.

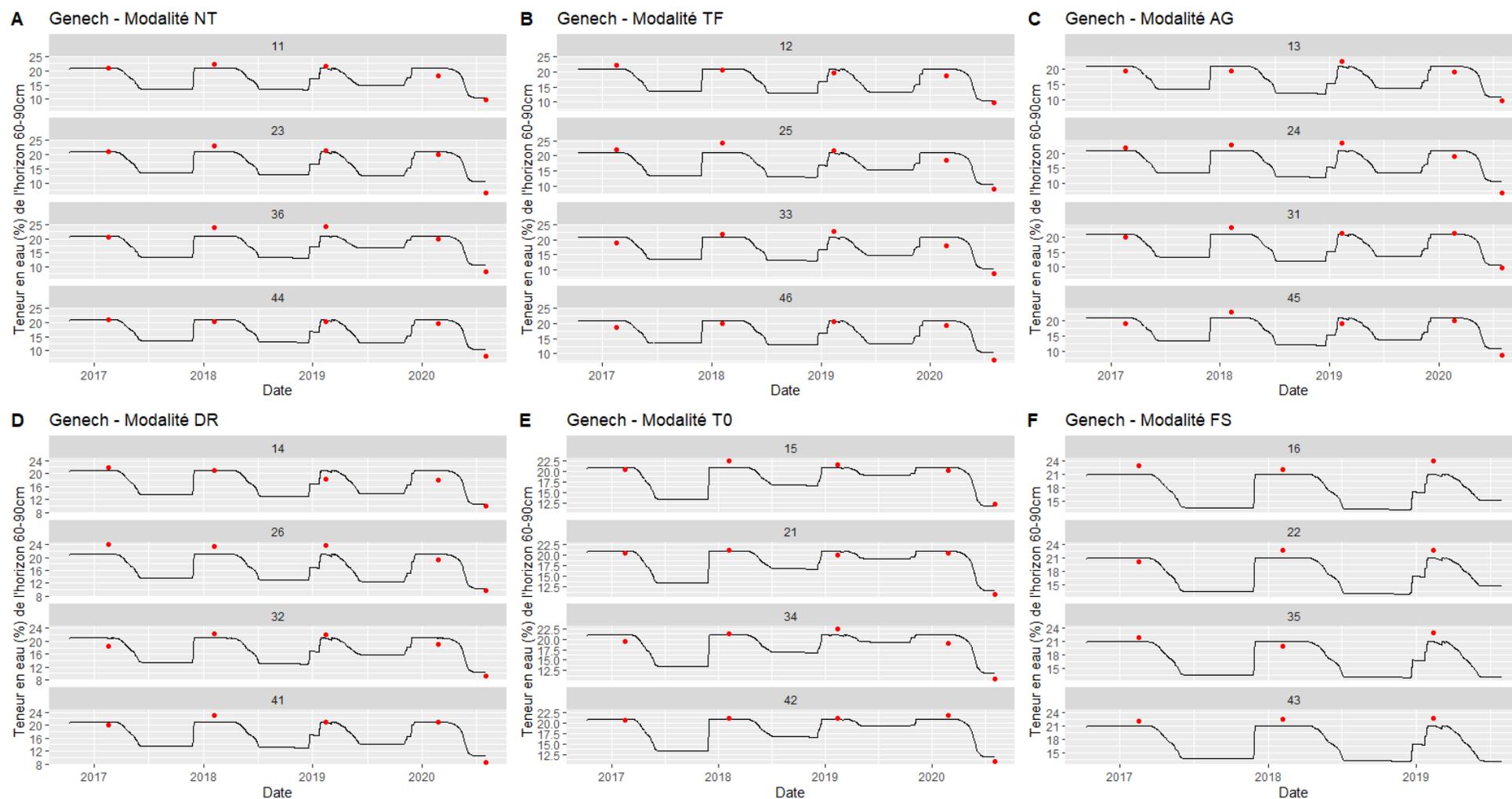
7 ANNEXES



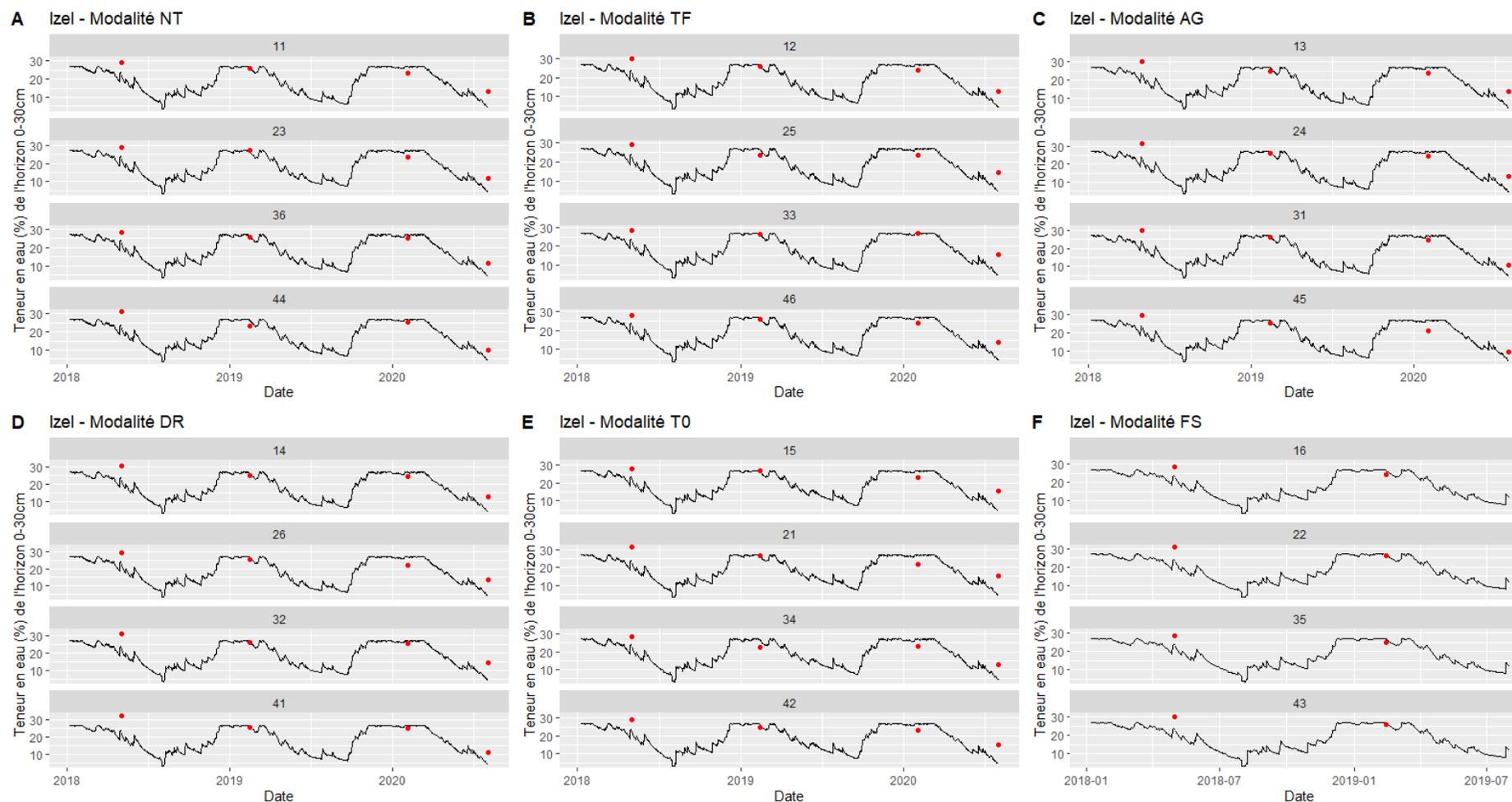
Annexe 1 : Teneur en eau (%) de l'horizon de surface (0 – 30 cm) des 24 micro-parcelles du site de Genech au cours du temps
(A : modalité N-tester, B : témoin fertilisé, C : modalité Agro-Conseil, D : modalité drone, E : témoin non fertilisé, F : modalité Farmstar)
(ligne noire : simulation par STICS, points rouges : valeurs observées)



Annexe 2 : Teneur en eau (%) de l'horizon 30 – 60 cm des 24 micro-parcelles du site de Genech au cours du temps
(A : modalité N-tester, B : témoin fertilisé, C : modalité Agro-Conseil, D : modalité drone, E : témoin non fertilisé, F : modalité Farmstar)
(ligne noire : simulation par STICS, points rouges : valeurs observées)

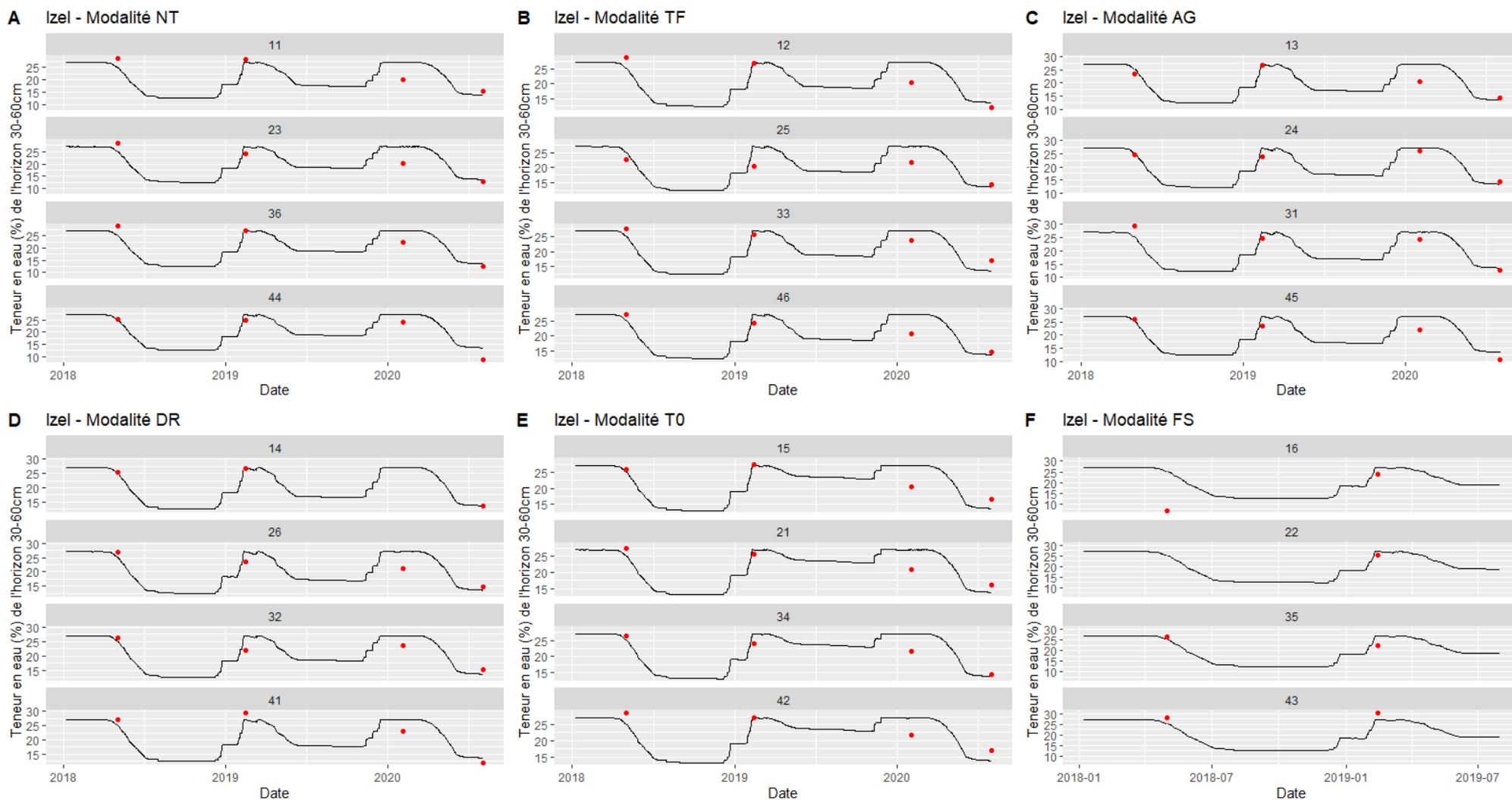


Annexe 3 : Teneur en eau (%) de l'horizon 60 – 90 cm des 24 micro-parcelles du site de Genech au cours du temps
(A : modalité N-tester, B : témoin fertilisé, C : modalité Agro-Conseil, D : modalité drone, E : témoin non fertilisé, F : modalité Farmstar)
(ligne noire : simulation par STICS, points rouges : valeurs observées)

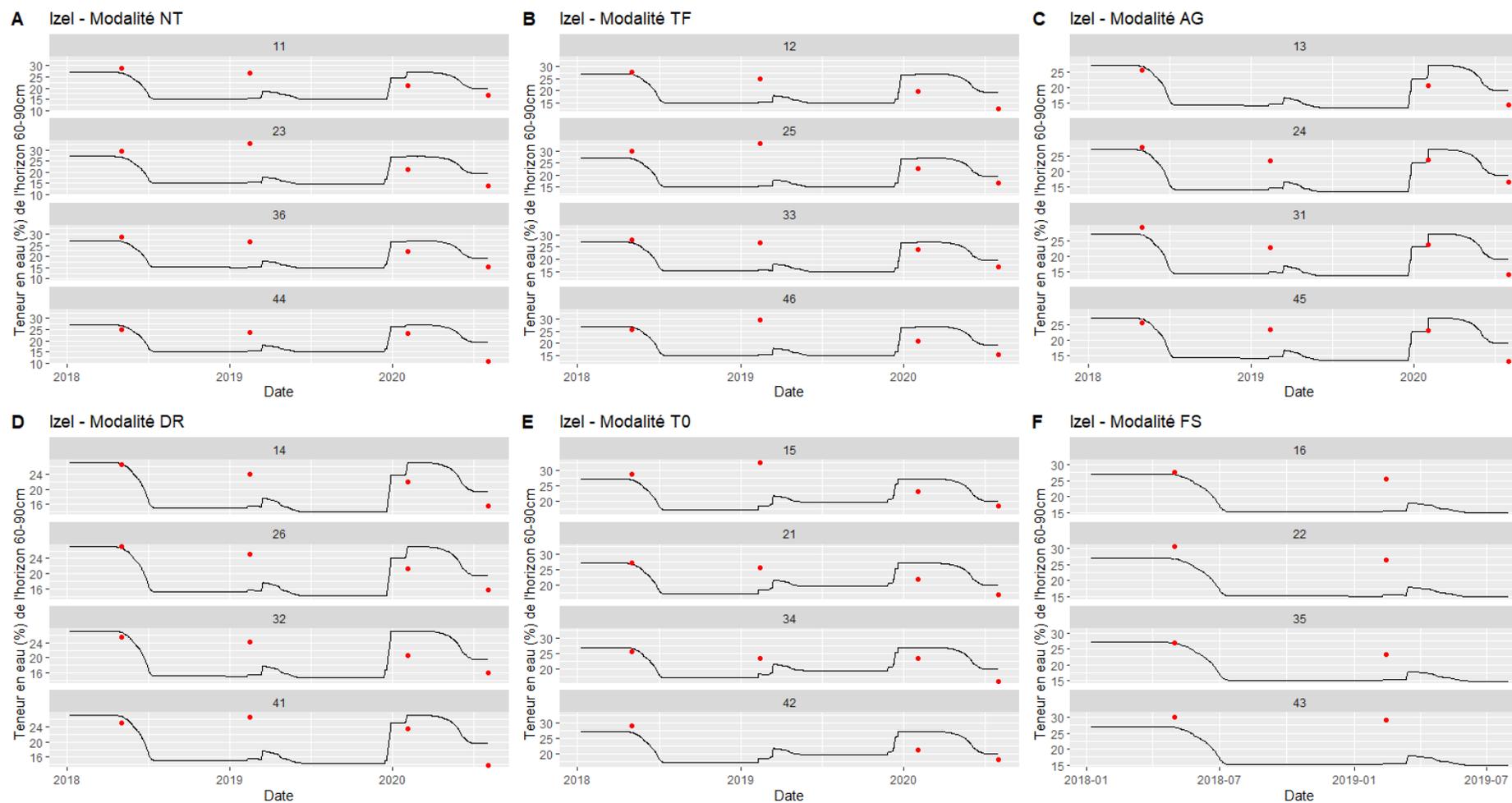


Annexe 4 : Teneur en eau (%) de l'horizon 0 – 30 cm des 24 micro-parcelles du site d'Izel au cours du temps

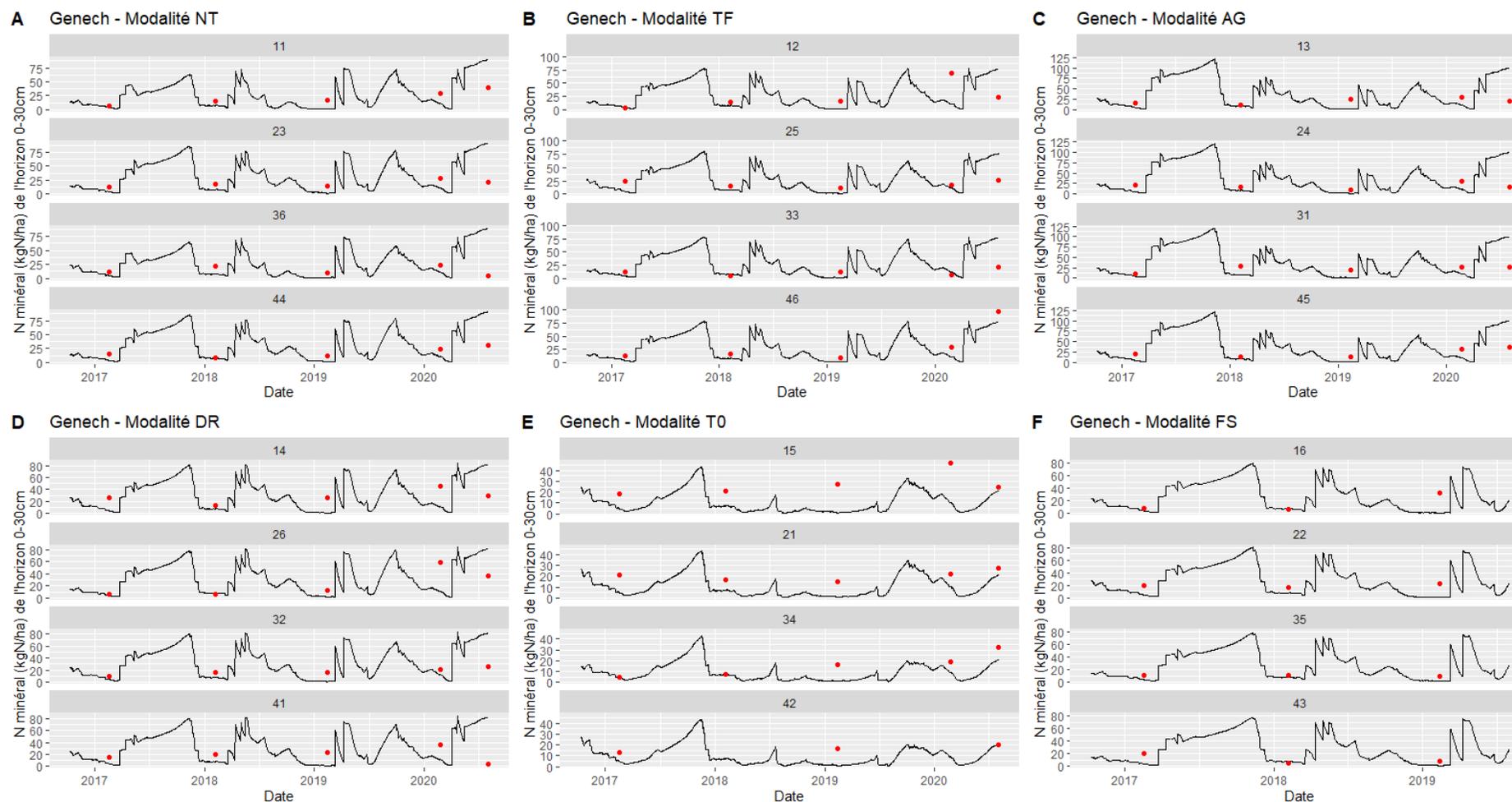
(A : modalité N-tester, B : témoin fertilisé, C : modalité Agro-Conseil, D : modalité drone, E : témoin non fertilisé, F : modalité Farmstar)
(ligne noire : simulation par STICS, points rouges : valeurs observées)



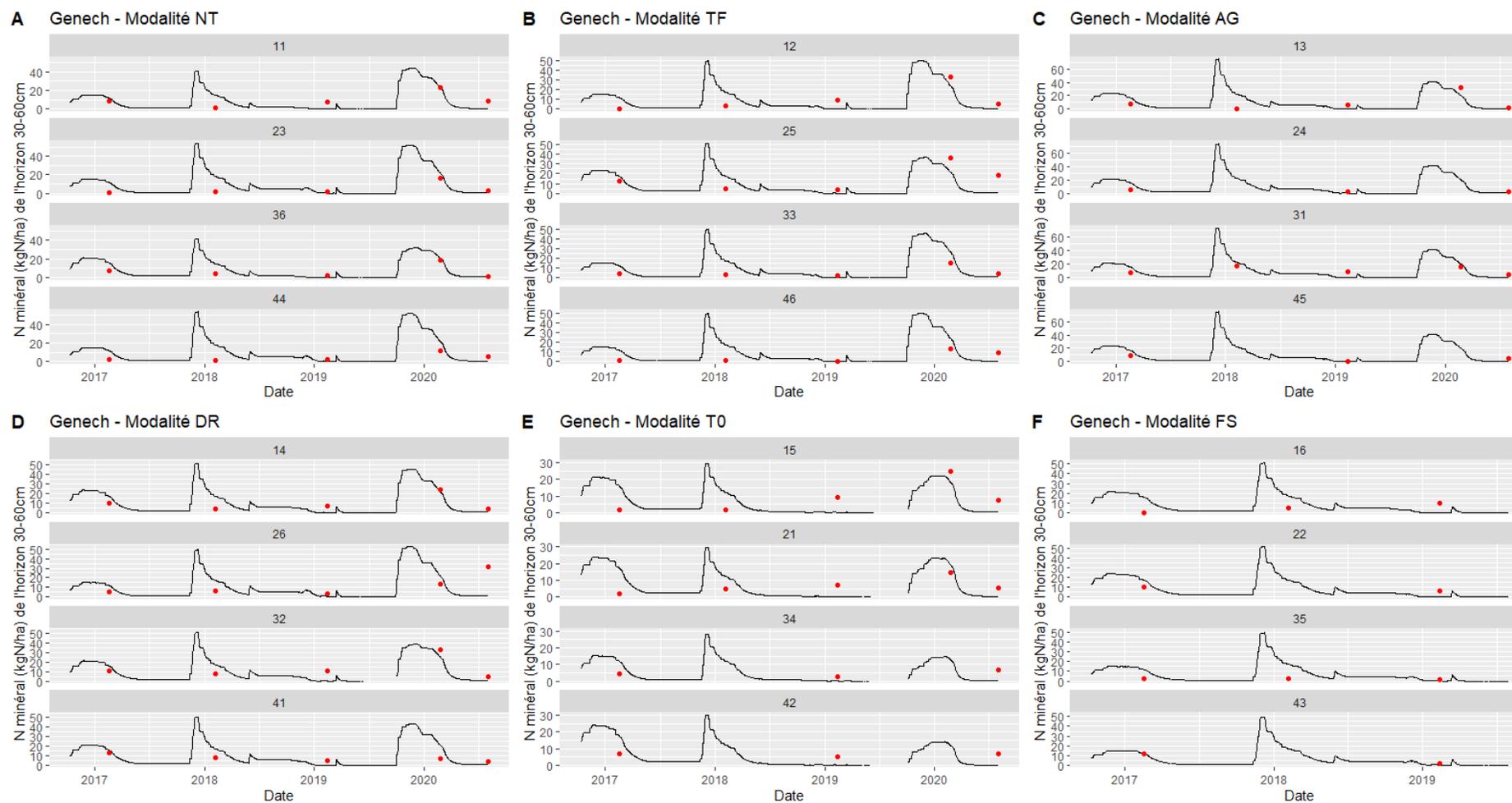
Annexe 5 : Teneur en eau (%) de l'horizon 30 – 60 cm des 24 micro-parcelles du site d'Izel au cours du temps
(A : modalité N-tester, B : témoin fertilisé, C : modalité Agro-Conseil, D : modalité drone, E : témoin non fertilisé, F : modalité Farmstar)
(ligne noire : simulation par STICS, points rouges : valeurs)



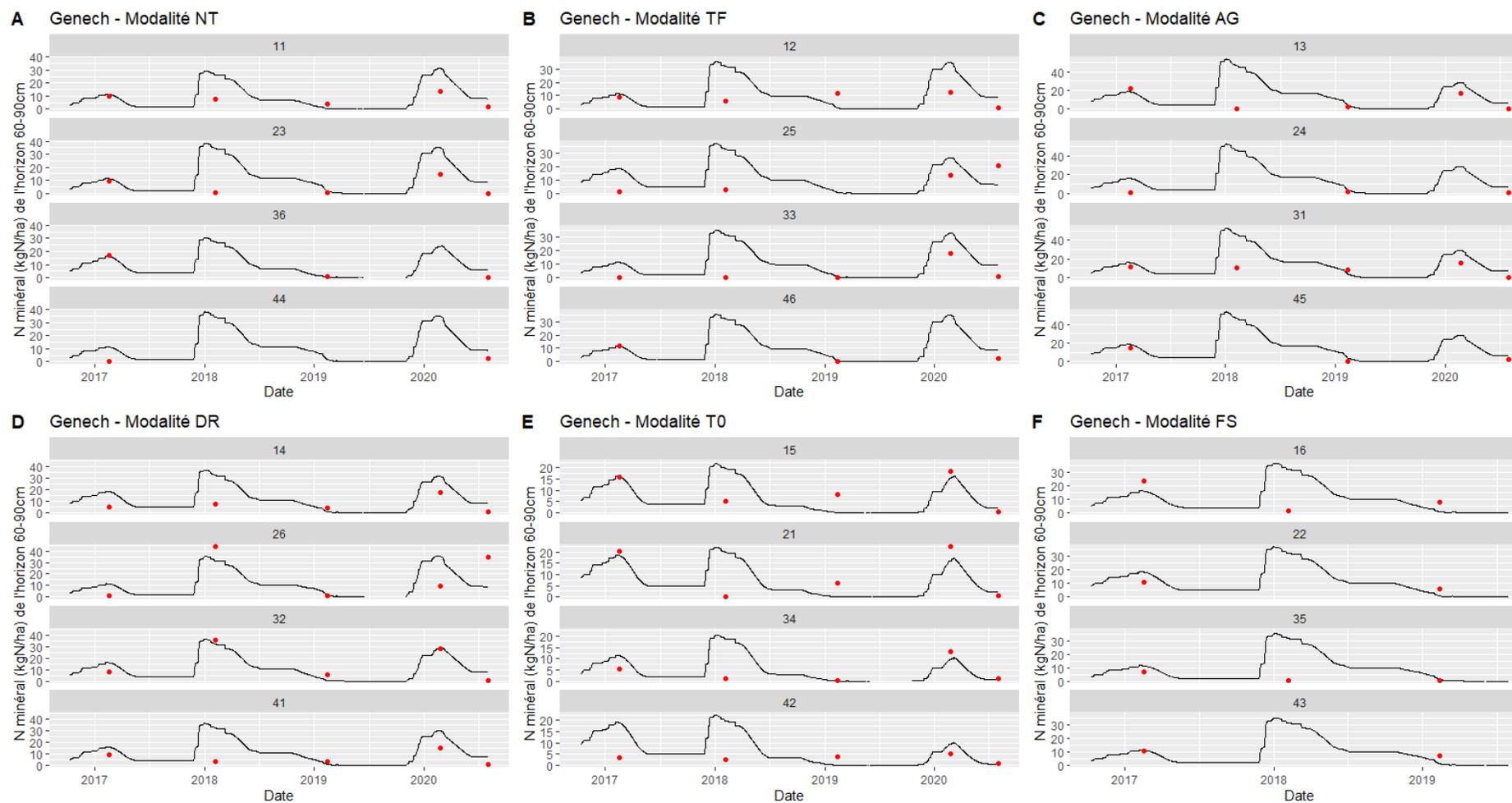
Annexe 6 : Teneur en eau (%) de l'horizon 60 – 90 cm des 24 micro-parcelles du site d'Izel au cours du temps
(A : modalité N-tester, B : témoin fertilisé, C : modalité Agro-Conseil, D : modalité drone, E : témoin non fertilisé, F : modalité Farmstar)
(ligne noire : simulation par STICS, points rouges : valeurs observées)



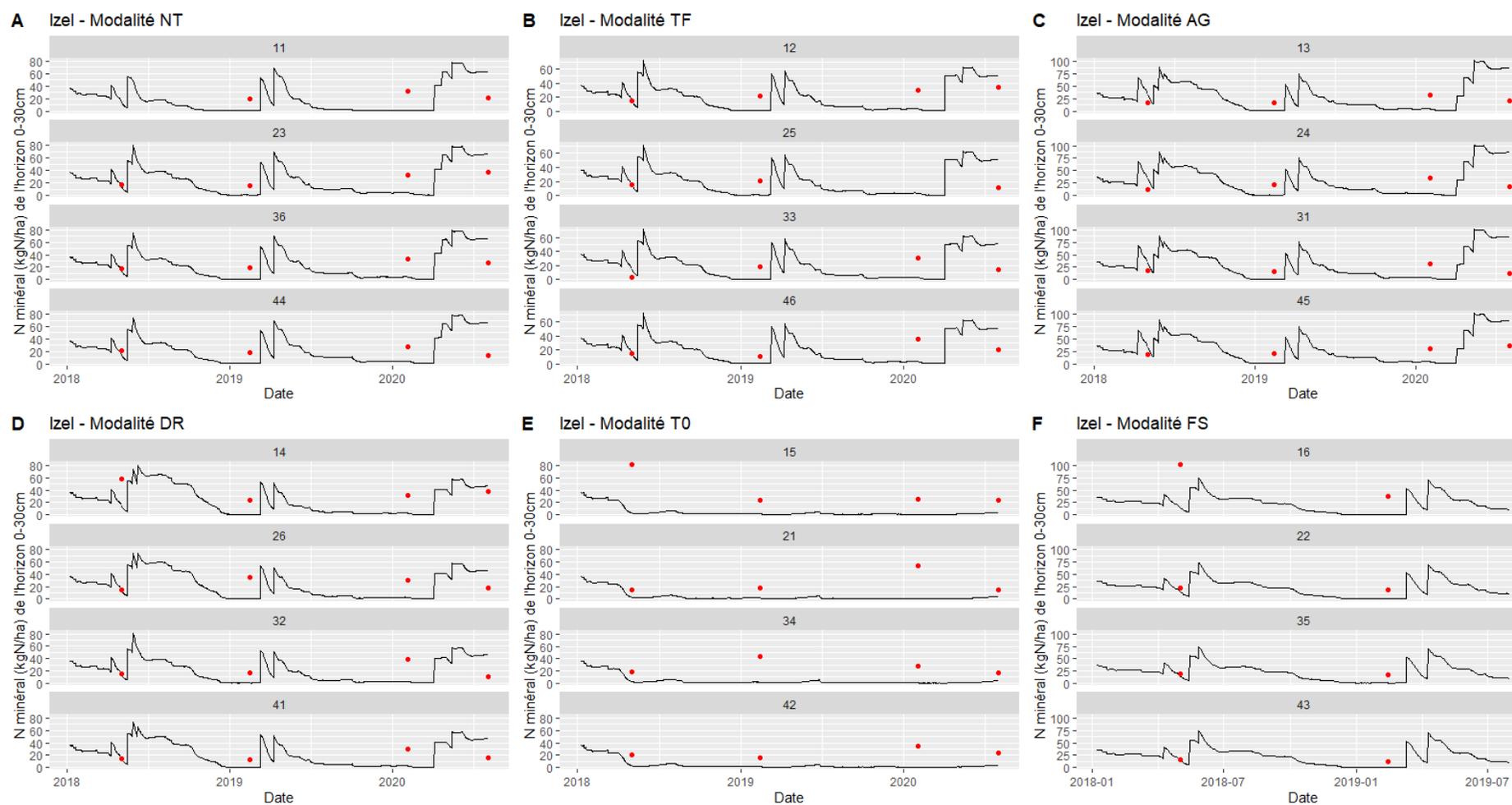
Annexe 7 : Quantité d'azote minéral (kg/ha) de l'horizon 0 – 30 cm des 24 micro-parcelles du site de Genech au cours du temps
 (A : modalité N-tester, B : témoin fertilisé, C : modalité Agro-Conseil, D : modalité drone, E : témoin non fertilisé, F : modalité Farmstar)
 (ligne noire : simulation par STICS, points rouges : valeurs observées)



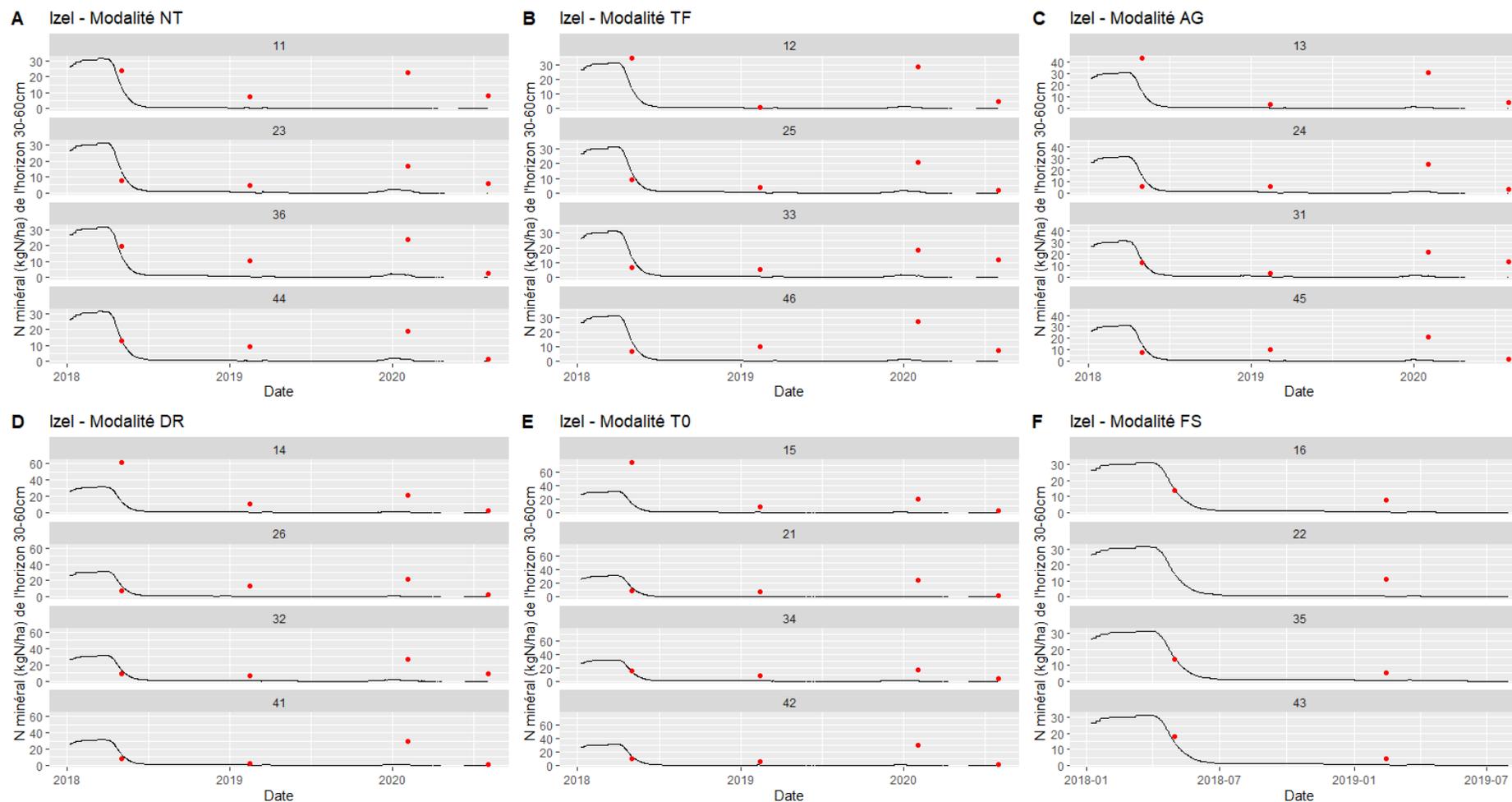
Annexe 8 : Quantité d'azote minéral (kg/ha) de l'horizon 30 – 60 cm des 24 micro-parcelles du site de Genech au cours du temps
(A : modalité N-tester, B : témoin fertilisé, C : modalité Agro-Conseil, D : modalité drone, E : témoin non fertilisé, F : modalité Farmstar)
(ligne noire : simulation par STICS, points rouges : valeurs observées)



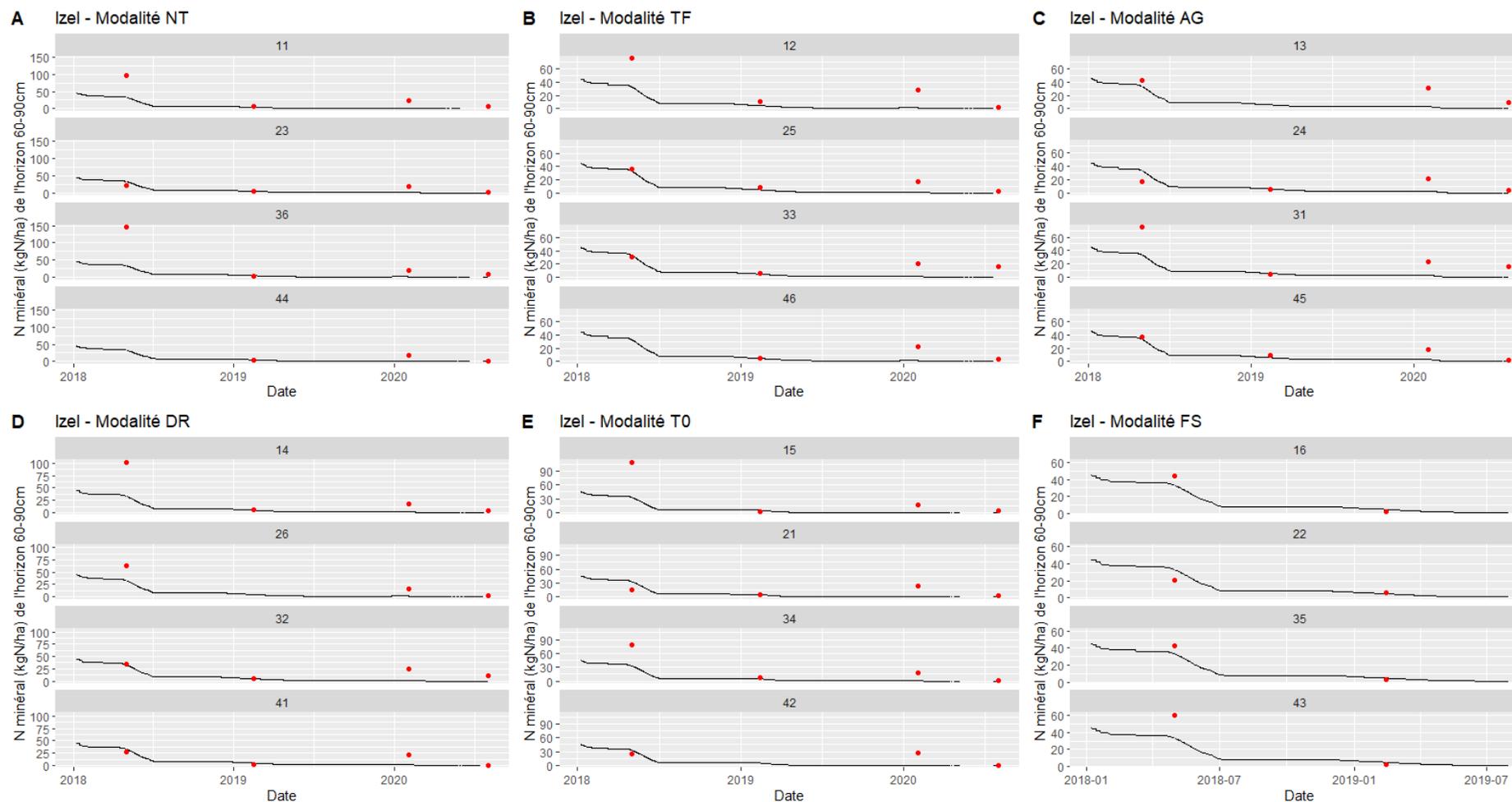
Annexe 9 : Quantité d'azote minéral (kg/ha) de l'horizon 60 – 90 cm des 24 micro-parcelles du site de Genech au cours du temps
 (A : modalité N-tester, B : témoin fertilisé, C : modalité Agro-Conseil, D : modalité drone, E : témoin non fertilisé, F : modalité Farmstar)
 (ligne noire : simulation par STICS, points rouges : valeurs observées)



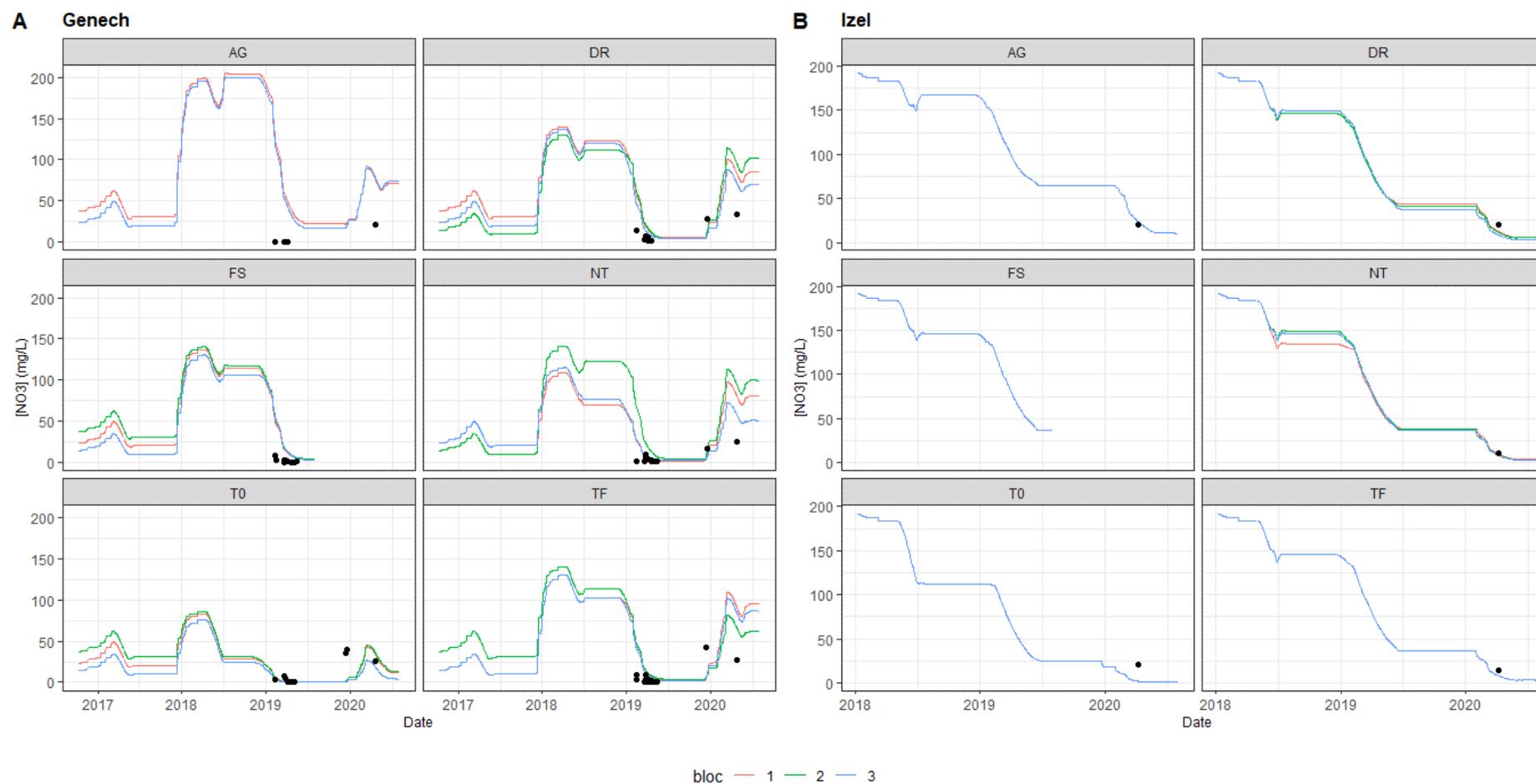
Annexe 10 : Quantité d'azote minéral (kg/ha) de l'horizon 0 – 30 cm des 24 micro-parcelles du site d'Izel au cours du temps (A : modalité N-tester, B : témoin fertilisé, C : modalité Agro-Conseil, D : modalité drone, E : témoin non fertilisé, F : modalité Farmstar) (ligne noire : simulation par STICS, points rouges : valeurs observées)



Annexe 11 : Quantité d'azote minéral (kg/ha) de l'horizon 30 – 60 cm des 24 micro-parcelles du site d'Izel au cours du temps
(A : modalité N-tester, B : témoin fertilisé, C : modalité Agro-Conseil, D : modalité drone, E : témoin non fertilisé, F : modalité Farmstar)
(ligne noire : simulation par STICS, points rouges : valeurs observées)

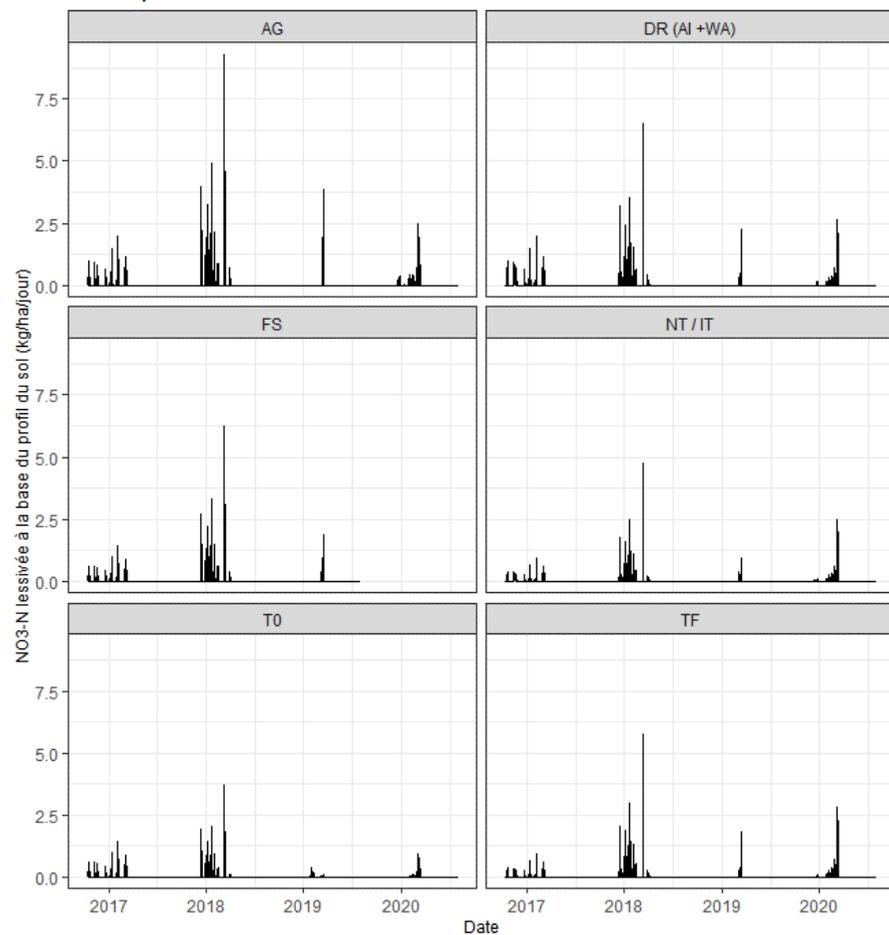


Annexe 12 : Quantité d'azote minéral (kg/ha) de l'horizon 60 – 90 cm des 24 micro-parcelles du site d'Izel au cours du temps
(A : modalité N-tester, B : témoin fertilisé, C : modalité Agro-Conseil, D : modalité drone, E : témoin non fertilisé, F : modalité Farmstar)
(ligne noire : simulation par STICS, points rouges : valeurs observées)

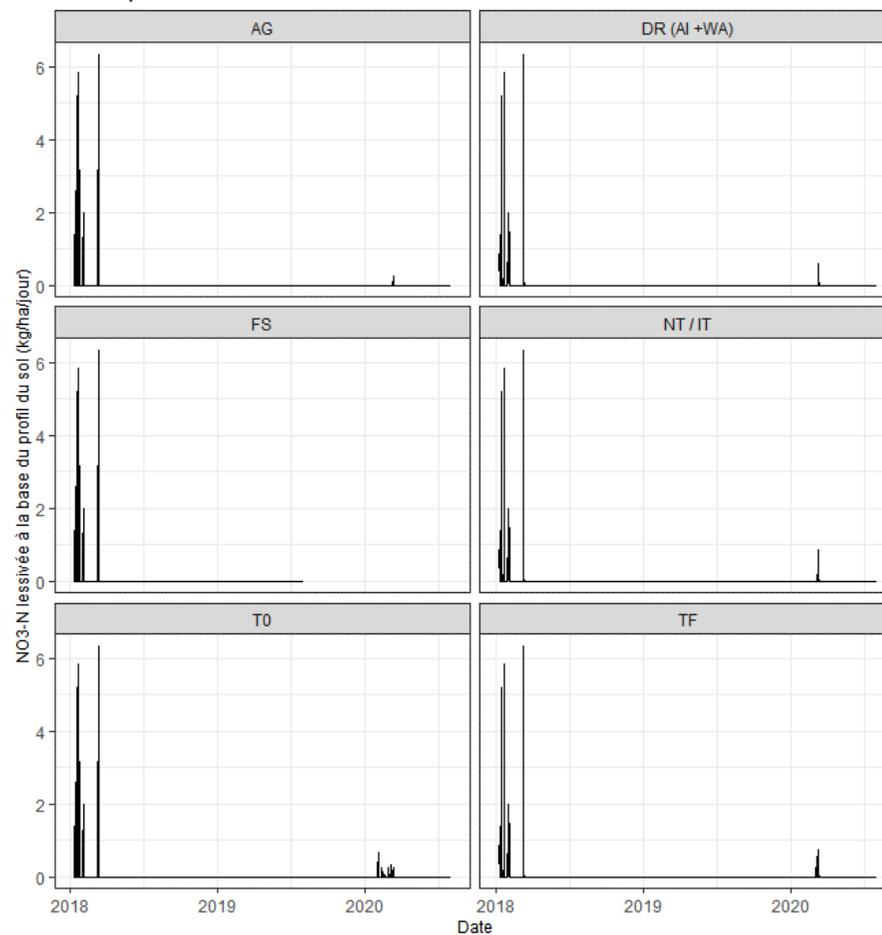


Annexe 13 : Concentration en nitrate (mg/L) de la solution du sol à un mètre de profondeur de la parcelle expérimentale de Genech (**A**) et d'Izel (**B**) au cours du temps
 (**AG** : modalité Agro-conseil, **DR** : drone, **FS** : modalité Farmstar, **NT** : modalité N-tester, **T0** : témoin non fertilisé, **TF** : témoin fertilisé à la dose bilan)
 (**points noirs** : valeurs observées)

A Site expérimental de Genech



B Site expérimental d'Izel



Annexe 14 : Quantité de NO₃-N lessivée à la base du profil de sol (kg/ha/jour), sur le site expérimental de Genech (**A**) et d'Izel (**B**)
(**AG** : modalité Agro-conseil, **DR** : drone, **FS** : modalité Farmstar, **NT** : modalité N-tester, **T0** : témoin non fertilisé, **TF** : témoin fertilisé à la dose bilan)

 agriculture • alimentation • environnement	Diplôme : Master Biologie Agrosociétés Spécialité : Amélioration, Production et Valorisation du Végétal Spécialisation / option : Fonctionnement et Gestion des Agrosystèmes Enseignant référent : Matthieu CAROF
Auteur(s) : Manon LEBOURG Date de naissance : 04/11/1998	Organisme d'accueil : JUNIA ISA
Nb pages : 39 Annexe(s) : 14	TDR Agriculture and Landscape Science (ALS) UMRT Terra-Violette BioEcoAgro
Année de soutenance : 2021	Adresse : 48 boulevard Vauban, 59800 Lille Maître de stage : Herinaina A. L. ANDRIAMANDROSO
<p>Titre français : Évaluation par la modélisation des performances agro-environnementales d'outils d'aide à la décision en fertilisation azotée</p> <p>Titre anglais: Modeling the agronomic and environmental performance of decision support tools for nitrogen fertilization</p>	
<p>Résumé :</p> <p>Le raisonnement de la fertilisation repose sur la méthode du bilan, qui permet le calcul de la dose optimale d'azote à apporter aux cultures. Le calcul de la dose se base sur l'estimation de différents termes en rapport avec la fourniture du sol et les besoins en azote de la plante. L'estimation de certains termes du bilan étant dépendante des conditions pédoclimatiques locales, la méthode souffre de quelques biais. Un des moyens d'améliorer la précision de la dose est de compléter la méthode du bilan par l'utilisation d'OAD. L'objectif de ce projet consiste en l'évaluation par la modélisation des performances agro-environnementales de systèmes de culture dont la fertilisation azotée a été pilotée par des OAD, sur une rotation de type céréales à paille – oléagineux et sur deux types de sol différents (brunisol et rendosol). Les OAD Farmstar, Airinov, Wanaka, Agro-Conseil, N-tester et Image IT ont été comparés à deux témoins (non fertilisés et fertilisés à la dose bilan) sur les performances agronomiques et sur les performances environnementales. Pour la plupart des OAD, un décalage de la dose bilan a été observé. Les différences de rendement et de qualité des récoltes sont très souvent non significatives, le surplus étant très souvent stocké dans le sol. Le modèle de culture STICS a révélé que plus le décalage est grand, plus les pertes en azote sous forme gazeuse sont importantes. Cela est également observable pour le phénomène de lixiviation : le surplus d'azote en alimentant le stock d'azote minéral post-récolte, augmente la quantité d'azote potentiellement lessivable pendant l'hiver suivant.</p>	
<p>Abstract:</p> <p>The reasoning of fertilization is based on the balance method, which allows the calculation of the optimal dose of nitrogen to be given to the crops. The calculation of the dose is based on the estimation of different terms related to the soil supply and the plant's nitrogen needs. Since the estimation of some of the balance terms is dependent on local soil and climatic conditions, the method suffers from some bias. One of the ways to improve the accuracy of the dose is to complement the balance method with the use of DSS. The objective of this project is to evaluate agronomic and environmental performance of cropping systems whose nitrogen fertilization was controlled by DSS, on a straw cereal-oilseed rotation and on two different soil types (brunisol and rendosol). The DSS Farmstar, Airinov, Wanaka, Agro-conseil, N-tester and Image IT were compared to two controls (unfertilized and fertilized at the balance dose) on agronomic and environmental performances. For most of the DSS, an increase in the balance dose was observed. The differences in yield and crop quality are very often insignificant, the surplus being very often stored in the soil. The STICS crop models revealed that the greater the increase in fertilizer rate, the greater the loss of nitrogen in gaseous form. This can also be observed from the leaching phenomenon: the surplus of nitrogen by feeding the post-harvest mineral nitrogen stock, increases the quantity of nitrogen potentially leachable during the following winter.</p>	
<p>Mots-clés : fertilisation azotée, outils d'aide à la décision, modélisation agronomique, bilan azoté, STICS</p> <p>Key Words: nitrogen fertilization, decision support tools, agronomic modeling, nitrogen balance, STICS</p>	