Réseau Mixte Technologique Fertilisation & Environnement

Avec la contribution financière du compte d'affectation spéciale développement agricole et rural CASDAR

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE ET DE L'ALIMENTATION
Liberté
Égalité
Fraternité

Juin 2021

GUIDE D'UTILISATION DES CAS-TYPES

Réalisé dans le cadre du projet **Agro-éco-Syst'N**
financé par le CASDAR et les organismes partenaires

Agro-éco-Syst'N
Guide d'utilisation des cas-types

Table des matières

Préambule **2**

1. Introduction **3**

2. Qu'est-ce qu'un cas-type ? **3**

2.1. Contenu général 3

2.2. Structure et contenu des cas types 4

3. Comment utiliser les cas-types en formation ou animation de groupe ? **6**

3.1. Objectif 1 : Comprendre les dynamiques de fourniture de l'azote minéral 7

3.2. Objectif 2 : Evaluer les pertes d'azote 9

3.3. Objectif 3 : Diagnostiquer les pertes d'azote 13

3.4. Objectif 4 : Concevoir des systèmes de culture à faibles pertes d'azote 14

ANNEXE : Liste des cas-types étudiés et proposés **15**

Avec la contribution financière du compte d'affectation spéciale développement agricole et rural CASDAR

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE ET DE L'ALIMENTATION
Liberté Égalité Fraternité

Préambule

Ce guide a été élaboré dans le cadre du projet collaboratif **« Agro-éco-Syst'N : identification de systèmes agroécologiques à hautes performances azotées par le diagnostic avec l'outil Syst'N® »**. Ce projet, affilié au Réseau Mixte Technologique « Fertilisation & Environnement », a été lauréat de l'appel à projets « Innovation et Partenariat 2016 » et a bénéficié d'un soutien financier du ministère français en charge de l'Agriculture via le Compte d'affectation spéciale « Développement Agricole et rural » (CASDAR) sous le numéro 5611. Il s'est déroulé de 2016 à 2020.

Le projet Agro-éco-Syst'N a contribué à produire des références sur les performances azotées de divers systèmes de culture, afin d'identifier les systèmes capables d'émettre peu d'azote vers l'environnement tout en produisant en quantité comme en qualité. **L'adaptation de l'outil Syst'N® et son utilisation pour réaliser des diagnostics pluriannuels** de systèmes de culture variés, visait à donner aux acteurs la possibilité d'identifier des systèmes de culture à hautes performances azotées (HPN), utiles pour construire l'agriculture de demain.

Ce projet a également permis, *via* une **méthode formalisée de diagnostic des pertes d'azote** basée sur cet outil, d'évaluer des systèmes de culture divers et d'identifier les plus performants du point de vue de l'azote.

Des « cas-types » ont ainsi été élaborés sur chacun de ces systèmes de culture dans le cadre de ce projet. Nous proposons que ces « cas-types » soient exploitables pour concevoir des ressources pour la formation et l'animation auprès d'étudiants et de professionnels.

Ce guide est destiné aux enseignants, formateurs et conseillers animateurs de groupes d'agriculteurs qui souhaitent élaborer, à partir de ces cas-types, des ressources pédagogiques visant à expliquer clairement, sur la base d'exemples bien choisis et éventuellement de comparaisons, les mécanismes des pertes d'azote dans l'environnement (air et eaux) et les leviers pour les réduire, à l'échelle pluriannuelle du système de culture.

Sa rédaction a mobilisé des enseignants, chercheurs, ingénieurs et techniciens des organismes suivants :

- Organismes de recherche et d'enseignement supérieur : INRAE, Isara, UniLaSalle
- Instituts techniques agricoles : Acta, Terres Inovia, ITB et CTIFL (associé à la station du Caté et à Terre d'Essais)
- Chambre régionale d'agriculture de Bretagne
- Lycées agricoles : EPLEFPA de Chartres-La Saussaye, EPLEFPA de Toulouse-Auzeville, LPA La Ricarde de l'Isle sur la Sorgue.

Coordinateurs de la rédaction : M. Heurtaux[1] et J-F. Vian[2]

Co-auteurs : A. Gautier[3], A. Guézengar[4], C. Le Gall[5], D. Le Hir[4], Ch. Leclercq[6], V. Parnaudeau[7], R. Perrineau[8], R. Reau[7], A. Schneider[5], P. Tauvel[9], M. Thirard[8], E. Vaud[3]

[1]Acta, [2]Isara, [3]CTIFL, [4]CRAB, [5]Terres Inovia, [6]UniLaSalle, [7]INRAE, [8]EPLEFPA Chartres-La Saussaye, [9]ITB

Modalités de citation de cet ouvrage :

Vian J-F., Heurtaux M. et al., 2021. Guide d'utilisation des cas-types. Projet CASDAR Agro-éco-Syst'N N° 5611. http://www.rmt-fertilisationetenvironnement.org/moodle/course/view.php?id=146

Licence d'utilisation :

Creative Commons CC-BY-NC (possibilité de copier, partager, modifier ce document et créer de nouvelles ressources à partir de ses éléments, sous réserve de citer les auteurs et de n'en faire aucun usage commercial sans autorisation de l'auteur)

Avertissement : par souci de facilité de lecture, nous n'avons pas opté pour l'écriture inclusive ; tous les termes écrits au masculin incluent donc également les agricultrices, apprenantes, étudiantes, animatrices, formatrices, conseillères, enseignantes, ingénieures, chercheuses, etc.

1. Introduction

Ce guide est destiné aux enseignants (lycées agricoles, BTS, IUT, écoles d'ingénieur et Universités), aux formateurs au sein des instituts techniques, des CFPPA et aux conseillers agricoles ou animateurs de groupes d'agriculteurs au sein des Chambres d'agriculture ou de coopératives/négoces.

Il a pour objectif de les aider à utiliser des « cas-types » élaborés par les partenaires du projet pour construire leurs propres ressources pédagogiques utilisables en support lors de séances d'enseignement, de formation ou d'animation collective (formations professionnelles, réflexion sur un territoire à enjeu eau ou sur la conception de systèmes de culture…) visant un des objectifs pédagogiques suivants, à chaque fois **à l'échelle pluriannuelle du système de culture** :

- Comprendre les dynamiques de fourniture de l'azote minéral.
- Evaluer (quantifier) les pertes d'azote et sensibiliser les apprenants aux risques environnementaux de la gestion de l'azote en agriculture.
- Réaliser un diagnostic des pertes d'azote.
- Concevoir (si nécessaire) des systèmes de culture à faibles pertes d'azote.

Pour chacun de ces objectifs, ce guide présente quelques recommandations ainsi que des « trucs et astuces » issues d'expériences vécues, pour créer des ressources pédagogiques à partir des cas-types. Il pourra s'agir par exemple de supports de cours ou d'animation de groupe d'agriculteurs, de travaux dirigés, ou d'illustrations pour argumenter le conseil auprès d'agriculteurs. Ce guide présente préalablement ce qu'est un cas-type et comment ceux-ci ont été élaborés dans le cadre du projet Agro-éco-Syst'N.

2. Qu'est-ce qu'un cas-type ?

Définitions préalables :

- *Un **système de culture** désigne une succession culturale donnée assortie d'un itinéraire technique donné ;*
- *Une **situation** désigne un système de culture dans un pédoclimat donné ;*
- *Un **cas-type** présente une situation donnée, étudiée dans une série climatique donnée.*

2.1. Contenu général

Un cas-type est le descriptif d'**un système de culture** dans **un contexte pédoclimatique et météorologique donné** et de ses **performances azotées**. Les performances azotées d'un système de culture sont qualifiées au regard de leurs pertes d'azote dans l'environnement par lixiviation (du nitrate dans l'eau de percolation) et par volatilisation (d'ammoniac dans l'air). Ces cas-types ont été élaborés dans le cadre du projet CASDAR Agro-éco-Syst'N par les partenaires du projet mentionnés en préambule. Il existe à ce jour 21 cas-types (cf. Annexe) produits dans différentes régions françaises (Berry, Bretagne, Centre, Champagne, Landes, Lauragais, Picardie, Rhône-Alpes…) pour des systèmes de culture couramment rencontrés ou expérimentés dans ces régions (systèmes céréaliers spécialisés, polyculture-élevage, légumiers). Ainsi, nous espérons que des formateurs trouveront un ou des cas-types correspondant ou se rapprochant de leur contexte afin que leur public soit plus réceptif.

Les pertes d'azote dans l'environnement de ces cas-types ont été simulées grâce à l'outil de simulation Syst'N® fondé sur la modélisation des pertes d'azote par lixiviation, volatilisation et dénitrification à l'échelle pluriannuelle du système de culture. Les sorties proposées par cet outil sont visuelles et permettent de mieux comprendre la dynamique de l'azote dans les parcelles cultivées.

Les cas-types présentent donc des simulations produites par l'outil Syst'N® mais leur utilisation en formation s'adresse à un public qui peut n'avoir jamais vu ni manipulé cet outil. Ce guide indique comment analyser les sorties graphiques et les courbes issues de la simulation des flux d'azote avec l'outil Syst'N® et comment les utiliser en formation, sans entrer dans les détails de la modélisation.

Un cas-type est élaboré dans l'objectif de bien faire comprendre le contexte, non seulement pédoclimatique, technique et agronomique, mais aussi règlementaire, et d'expliquer ainsi les choix techniques effectués sur toute la durée de la succession culturale et leurs conséquences sur les performances du système de culture en termes de pertes d'azote par lixiviation et volatilisation.

Chaque cas-type constitue ainsi une **source de support(s) pédagogique(s)** et peut être utilisé par les formateurs en entier ou en partie (extraction de figures, tableaux, données quantitatives…) selon leurs publics et objectifs pédagogiques.

2.2. Structure et contenu des cas types

Les cas-types sont construits sur la base d'une structure commune, selon le plan présenté ci-après.

NB : « SdC » désigne ci-après « système de culture »

- **Contexte**
  - Localisation et présentation des principaux enjeux et objectifs du SdC
    - Contexte agricole et enjeux de l'azote (et autres) dans cette situation
    - Le système de culture
  - Climat (pluviométrie, température, ETP – Figure 1)
  - Sol (par horizon : profondeur, texture, matière organique – Tableau 1)
- **Le système de culture** (rotation et itinéraires techniques des cultures de la rotation – Tableau 2)
  - Succession de cultures
  - Fertilisation
  - Travail du sol, gestion des résidus
  - Irrigation
  - Stratégie mise en œuvre pour atteindre les objectifs visés, difficultés rencontrées

Ces éléments descriptifs visent à faire comprendre le contexte pédoclimatique, agricole et réglementaire de chaque système de culture et sa logique de construction. Les grands leviers de gestion de l'azote et leur combinaison sont également présentés et discutés.

- **Résultats attendus en termes de pertes d'azote** par lixiviation et par volatilisation (Tableau 3)

Les performances des systèmes de culture sont évaluées au regard des quantités d'azote perdues par lixiviation et volatilisation. Trois niveaux de performance ont été déterminés : haute performance azotée, performance azotée partielle et basse performance azotée. Les seuils permettant de qualifier la performance azotée sont explicités plus loin (cf. section 3.2).

N.B. : Les pertes d'azote sous forme de N_2O par dénitrification ne sont pas prises en compte dans ces cas-types. Bien qu'importantes vis-à-vis du changement climatique, elles représentent en général de faibles quantités par rapport aux pertes par lixiviation et volatilisation. Par ailleurs, les paramétrages de l'outil Syst'N® pour l'estimation des pertes par dénitrification doivent encore faire l'objet d'améliorations pour une évaluation plus fiable.

- Présentation des simulations réalisées avec Syst'N®
- Evaluation des pertes d'azote
  - Présentation des résultats moyens du système de culture (Tableaux 4 et 5)
  - Dynamiques et pertes azote : sorties graphiques Syst'N® (Figure 2 et suivantes)

Ces parties présentent les sorties issues de la modélisation. Sont ainsi présentés des indices globaux calculés à l'échelle pluriannuelle du système de culture permettant de

qualifier le niveau de performance du système mais aussi les grands flux d'azote et leurs origines (fixation biologique, minéralisation de l'azote organique du sol, quantités issues des apports d'engrais minéraux et de matières organiques). Les sorties graphiques permettent de visualiser les dynamiques pluriannuelles de l'azote.

- Diagnostic des performances azotées et discussion des résultats

Les dernières parties des cas-types sont dédiées au diagnostic des performances azotées (comprendre l'origine des pertes d'azote, repérer les périodes principales de pertes et identifier a priori les facteurs à l'origine de ces pertes) et à la discussion des résultats obtenus par simulation (limites de la modélisation, impact du climat local, du type de sol…). Ces parties permettront aux utilisateurs des cas-types d'avoir les explications sur l'origine et les niveaux de pertes d'azote : facteurs d'aggravation de ces pertes ou leviers agronomiques mobilisés permettant d'expliquer la haute performance azotée du système étudié. Ces parties donnent également des pistes pour, si besoin, améliorer les performances azotées du système et renvoient à des cas-types comparables qui mobilisent ces leviers agronomiques.

- Conclusion (quelques lignes permettant de synthétiser les faits marquants de ce cas-type).

3. Comment utiliser les cas-types en formation ou animation de groupe ?

Ce guide a pour objectif de faciliter l'élaboration, à partir des cas-types, de ressources/supports pédagogiques et didactiques qui visent à favoriser ou améliorer la compréhension des mécanismes des pertes d'azote et l'identification des leviers efficaces pour les réduire.

On propose de distinguer **4 grands objectifs pédagogiques** selon le public-cible, imbriqués les uns dans les autres selon une logique de complexité croissante (Figure 1). Pour chaque objectif pédagogique nous vous présentons les parties mobilisables dans les cas-types ainsi que des conseils pour construire vos ressources pédagogiques.

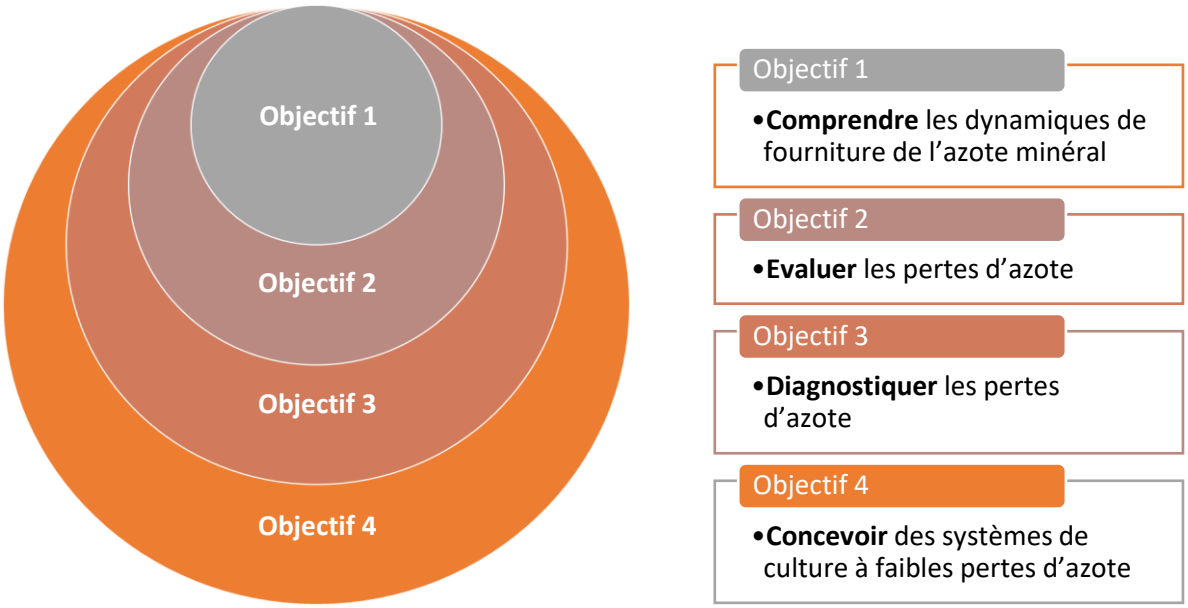

Figure 1 : Schéma de l'articulation des 4 objectifs entre eux

L'atteinte des 4 objectifs pédagogiques n'est en général pas linéaire. L'entrée dans l'apprentissage par l'un des objectifs permet de mobiliser/d'aborder tout ou partie des trois autres. Pédagogiquement, les connaissances acquises pour l'objectif « n » sont nécessaires pour l'objectif « n+1 », mais le formateur ou l'animateur a toute latitude pour organiser l'acquisition des connaissances de base en fonction de son public.

3.1. Objectif 1 : Comprendre les dynamiques de fourniture de l'azote minéral

Ce premier objectif se décline en deux sous objectifs :

- Connaître **les différentes formes** de l'azote et leurs importances relatives à l'échelle d'un système de culture (SdC) : N venant de la fixation atmosphérique, N issu de la minéralisation des matières organiques (sol et engrais/amendements), N provenant des engrais minéraux ;
- Savoir repérer **la synchronisation ou désynchronisation** entre la disponibilité de l'azote dans le sol et les prélèvements par les cultures.

Public cible : Élèves de différents niveaux (de bac pro aux élèves ingénieurs) pour qu'ils acquièrent des connaissances de base sur les origines de l'azote pour la nutrition azotée des cultures et les dynamiques de l'azote.

Dans ce but, on peut mobiliser les éléments suivants du cas-type, en précisant chacun d'eux (comment on le lit, ce que l'on peut en tirer et les précautions d'usage et d'interprétation), étant entendu que chaque formateur/animateur peut choisir le(s) type(s) de représentation graphique qui lui convien(nen)t le mieux en fonction de son public.

- ***A partir du Tableau 2 du cas-type*** qui décrit l'itinéraire technique, vous pouvez réaliser **un schéma de la rotation**, qui permettra d'identifier :
  - les périodes de culture de légumineuses ;
  - les pratiques de couverture végétale des sols en période d'interculture ;
  - les périodes et les formes d'apports de matières fertilisantes ;
  - d'autres éléments de l'itinéraire technique qui vous sembleraient importants à présenter.

  Ces schémas peuvent se faire sous forme d'arêtes de poisson ou sous forme circulaire par exemple.

- ***A partir du Tableau 4 du cas-type***, les résultats présentés dans la partie haute du tableau peuvent être facilement extraits pour être commentés. Voir **parties a, b et c** du tableau 4 reproduit ci-dessous. Ces éléments permettent :
  - d'identifier les formes et quantités moyennes d'azote entrantes et sortantes à l'échelle pluriannuelle du système de culture (hors pertes d'azote). Ces flux sont des moyennes annuelles et par ha (moyennes calculées sur l'ensemble de la rotation) ;
  - de discuter de ces quantités en fonction de la part de légumineuses dans la rotation, de la fréquence des apports de matières organiques etc. ;
  - de discuter des valeurs moyennes des fournitures du sol ;
  - de comparer différents systèmes de culture en compilant les résultats présentés dans différents cas-types afin de faire ressortir l'importance des légumineuses, des pratiques de couverts végétaux d'interculture etc.

a	**Entrées d'azote (kgN/ha/an)**	**a1**	Apport : fertilisation minérale	105
		a2	Apport : fertilisation organique	0
		a3	Fixation biologique d'azote	55
b	**Sorties d'azote par exportation (kgN/ha/an)**	**b1**	Exportation par les récoltes	109
		b2	N contenu dans les résidus de cultures exportés de la parcelle	35
c	**Minéralisation de l'azote du sol et des résidus de culture (kgN/ha/an)**			162

La Figure 2 ci-dessous montre les liens entre les entrées « a », les exportations « b » et le flux de minéralisation « c ».

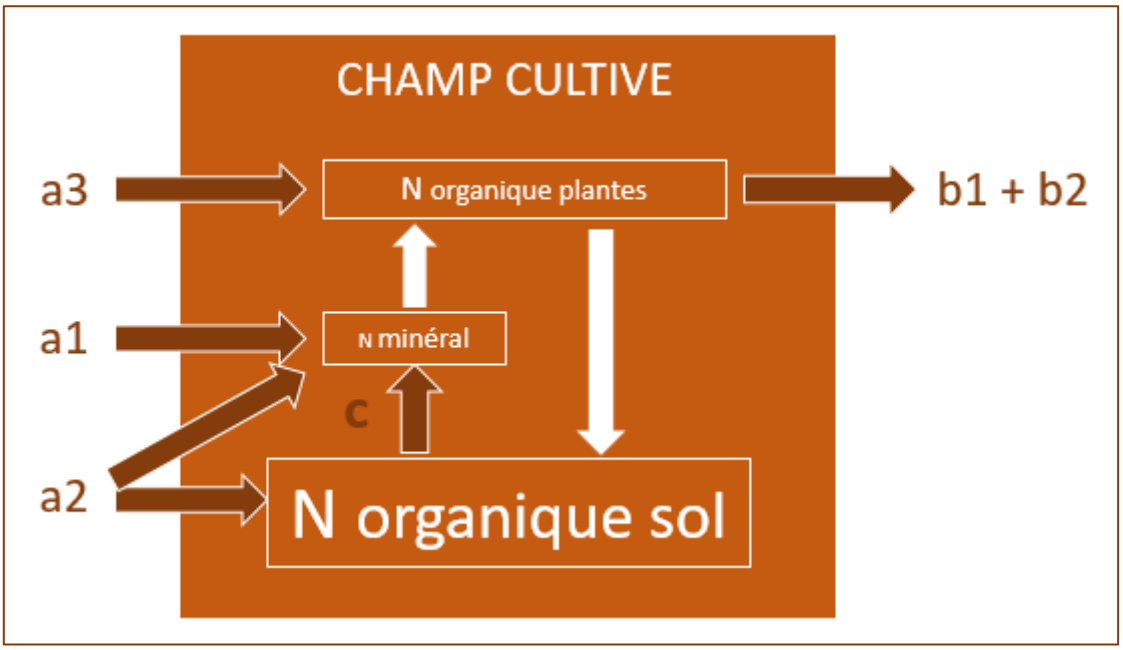

Figure 2 : Liens entre les entrées « a », les exportations « b » et le flux de minéralisation « c ».

A noter :

- Le poste « a » concerne les différentes formes d'entrée de l'azote sur la parcelle. Ces entrées sont données en kgN/ha/an et sont donc des moyennes annuelles calculées à l'échelle du système de culture. On distingue l'azote minéral apporté par les engrais minéraux, l'azote organique total apporté par les effluents d'élevage et autres sources organiques et les entrées d'azote *via* la fixation biologique de l'azote par les légumineuses.
- Le poste « b » comptabilise les sorties d'azote organique de la parcelle. Ces sorties sont données en kgN/ha/an et sont donc des moyennes annuelles calculées à l'échelle du système de culture. On distingue l'azote organique contenu dans les parties récoltées (le plus souvent le grain ; si fourrage alors plante entière) de l'azote organique contenu dans les résidus de récolte (feuilles, pailles…). Si le poste « b2 » est égal à 0 cela signifie que tous les résidus de culture sont restitués au sol de la parcelle. La quantité d'azote organique contenu dans les résidus de récolte et restituée au sol est la plupart du temps indiquée dans le texte sous ce tableau.
- Le poste « c » représente un flux d'azote qui correspond à la minéralisation de l'azote organique du sol ET de la minéralisation de l'azote organique des résidus de culture. Ce flux est donné en kgN/ha/an, c'est donc une moyenne annuelle calculée à l'échelle du système de culture. Le flux issu de la minéralisation de l'azote organique du sol est majoritaire sur celui des résidus de culture.
- Dans ce schéma, l'épaisseur des flèches n'est pas proportionnelle aux quantités d'azote mobilisées.

- ***A partir des Figures 2 et suivantes des cas-types***, vous pouvez extraire des figures qui représentent les **dynamiques de l'azote minéral dans le sol et les dynamiques d'absorption de l'azote minéral par les cultures**. La Figure 3 présente un exemple de représentation graphique des dynamiques de l'azote issue de la simulation avec Syst'N®. Plusieurs parties sont à analyser pour bien comprendre ces dynamiques :
    - Partie haute : courbe d'accumulation de l'azote minéral au sein de la biomasse de la culture (kgN/ha).
    - Partie centrale : rotation et principales interventions techniques. Repérer ici les apports d'azote (sous forme minérale et/ou organique), les périodes de travail du sol, d'irrigation et les périodes de sol nu.

- Partie basse : quantité d'azote minéral dans le sol (voir la profondeur spécifique à chaque cas-type). Cet azote minéral est issu de la minéralisation des matières organiques du sol, des résidus de cultures et cultures intermédiaires et des apports de matières organiques ainsi que des apports d'engrais minéraux (kgN/ha).

A partir de ce type de figure, vous pouvez pointer avec des flèches, encadrés ou autre, les périodes où les besoins instantanés des cultures sont importants ou faibles et les mettre en parallèle des quantités d'azote minéral dans le sol. Ceci permet de discuter de la synchronisation entre besoins des cultures et offre du sol.

N.B. : Syst'N® est un outil de simulation dynamique des flux d'azote. Il est donc normal de retrouver des quantités d'azote minéral faibles dans le sol pendant des périodes de prélèvement important d'azote par les cultures. Les prélèvements élevés de la culture « vident » en quelque sorte le « réservoir sol » lors de ces phases (voir flèche bleue dans la figure 3). En revanche, il est facile de repérer à l'inverse des périodes pendant lesquelles les besoins instantanés de la culture sont faibles et l'azote minéral du sol s'accumule (flèche rouge dans la figure 3).

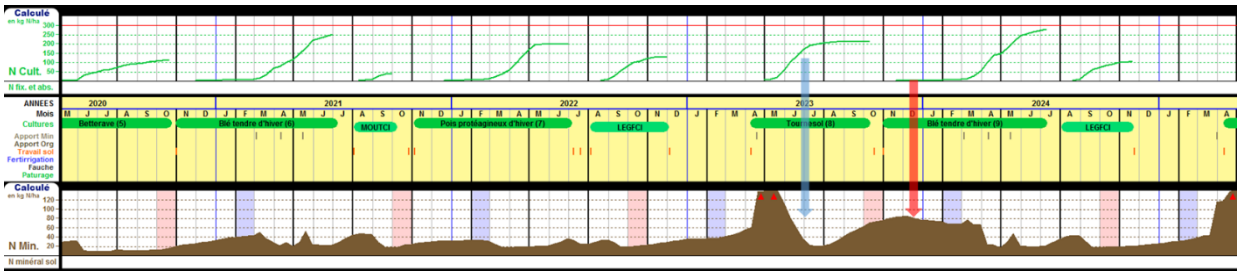

Figure 3 : Exemple de représentation graphique issue de la simulation avec Syst'N®.

3.2. Objectif 2 : Evaluer les pertes d'azote

L'objectif principal ici est de sensibiliser les apprenants aux risques environnementaux de la gestion de l'azote en agriculture (vis-à-vis de la ressource en eau et de la qualité de l'air). Pour cela, il est possible d'extraire des cas-types des indicateurs moyens de pression à l'échelle pluriannuelle du système de culture, de discuter de la pertinence et du mode de calcul de ces indicateurs, et de donner aux apprenants des ordres de grandeur des pertes en azote par lixiviation et volatilisation à l'échelle d'un système de culture.

Ainsi, les sous-objectifs pour les apprenants sont ici de :

- savoir repérer **les voies de pertes** principales et leur importance relative : volatilisation / lixiviation ;
- savoir mobiliser et utiliser **des indicateurs** d'évaluation des pertes moyennes à l'échelle du SdC ;
- savoir repérer **les principales périodes** de pertes d'azote du système de culture pour commencer à formuler des hypothèses sur les causes probables de ces pertes (en anticipation de l'objectif 3).

Public cible : Élèves de différents niveaux (de bac pro aux élèves ingénieurs). Peut également servir pour des formations avec des agriculteurs qui s'intéressent aux dynamiques de l'azote à l'échelle pluriannuelle du système de culture.

La réponse aux 2 premiers sous-objectifs est basée sur l'analyse des Tableaux 4 et 5 des cas-types.

Pour donner aux apprenants des indications sur les voies principales de pertes d'azote et leur importance relative, le formateur ou l'animateur pourra extraire la partie basse du tableau 4 des cas-

types, reproduite ci-dessous. Les quantités d'azote perdues par dénitrification, volatilisation et lixiviation peuvent être commentées au regard des seuils fixés dans les cas-types.

d	**Pertes d'azote moyennes annuelles (kgN/ha/an)**	**d1**	Protoxyde d'azote émis (N_2O)	0.1
		d2	Ammoniac volatilisé (NH_3)	16
		d3	Nitrate lixivié (NO_3^-)	14
		d4	Nitrate ruisselé (NO_3^-)	0
e	Lame d'eau drainante annuelle (mm d'eau/an)			104

Ces données sont issues des simulations réalisées avec l'outil Syst'N® et sont des moyennes annuelles, calculées à l'échelle du système de culture sur un ou plusieurs scénario(s) climatique(s). Dans chaque cas-type, des commentaires permettent d'interpréter ces quantités en fonction des conditions pédoclimatiques (type de sol, pluviométrie) et de l'itinéraire technique.

De façon générale, pour évaluer les pertes d'azote, il faut pourvoir comparer plusieurs systèmes entre eux. Un cas-type est un système de culture considéré dans un contexte pédoclimatique et un scénario météorologique donnés. Il faut donc être vigilant lorsque l'on compare différents SdC car ces pertes sont très dépendantes du type de sol et des conditions climatiques (générales) voir météorologiques (et notamment de la pluviométrie). La lame d'eau drainante est une première indication de l'effet de cette situation (1 SdC x 1 pédoclimat) décrite dans le cas-type.

Afin de former les apprenants à l'utilisation de différents indicateurs relatifs aux pertes d'azote à l'échelle pluriannuelle, les formateurs et animateurs pourront extraire les données issues du Tableau 5 des cas-types dont un exemple est reproduit ci-dessous.

a - b	Bilan apparent : Entrées – Sorties par exportation (kgN/ha/an)	**16**
a - (b+d)	Variation du stock d'azote total dans le sol (kgN/ha/an)	**-14**
(d3*100)/e	Pertes d'azote par lixiviation pour 100 mm de lame d'eau drainante (kgN/100 mm)	**13**
(d3*100*4.43)/e	Pertes de nitrate par lixiviation pour 100 mm de lame d'eau drainante ($kgNO_3^-$/100 mm) ou concentration moyenne en nitrate (NO_3^-) sous le profil ($mgNO_3^-$/L)	**59**
d2/(a1+a2)	Pertes d'azote N sous forme d'ammoniac (NH_3) en % des apports N totaux	**15**

C'est l'occasion d'aborder chaque indicateur : comment l'interpréter, comment il est calculé et comment le relier à la dynamique décrite plus tôt (objectif 1)… Ici nous détaillons chacun de ces indicateurs, calculés à partir des flux mentionnés dans le Tableau 5.

- <u>Le bilan apparent, calculé ici à l'échelle spatiale de la parcelle,</u> prend en compte :
    - les entrées d'azote à l'échelle pluriannuelle du système de culture (N minéral apporté + N organique apporté + fixation symbiotique d'N par les légumineuses cultivées ou présentes dans les couverts d'interculture) ;
    - les sorties d'azote organique de la parcelle par exportation des parties récoltées des cultures et, si c'est le cas, par les résidus de cultures (en général pailles des céréales).

  Cet indicateur révèle le **potentiel** d'enrichissement ou d'appauvrissement du milieu en azote : plus cet indicateur est élevé, plus les **risques** de pertes d'azote sont *a priori* importants.

Toutefois, cet indicateur n'est pas corrélé directement aux pertes, notamment car une partie de l'azote restant peut être :

- contenu dans les résidus de récolte non exportés (voir alors les quantités immobilisées dans les résidus de récolte indiquées dans les commentaires du cas-type) ;
- immobilisé au sein de la biomasse microbienne du sol ;
- organisé au sein des matières organiques du sol. Cette fraction peut être importante notamment dans le cas d'apports sous forme organique (fraction de la matière organique non encore minéralisée).
- Réorganisé au sein des matières organiques

Le bilan apparent doit donc être interprété en fonction des formes d'apport et de la gestion des résidus de culture.

- La variation du stock d'azote total dans le profil de sol déduit du bilan apparent les pertes par dénitrification, volatilisation et lixiviation. Cette variation traduit l'enrichissement ou l'appauvrissement du sol en azote total.
- Les pertes d'azote par lixiviation ont été rapportées à 100 mm d'eau drainée afin de pouvoir comparer les performances de différentes situations. Relativiser les pertes selon l'importance du flux d'eau permet de s'extraire du contexte météorologique qui a eu lieu dans un contexte pédologique donné : on évalue ainsi une **situation,** c'est-à-dire le SdC dans un pédoclimat, et non pas le SdC isolé dans une situation météorologique particulière. Avec cet indicateur, on peut comparer un même SdC dans des contextes climatiques différents, ou différents SdC dans un même contexte climatique.
- La concentration moyenne en nitrate pour 100 mm d'eau drainée permet d'estimer la contribution du système de culture étudié à la recharge en nitrate des nappes phréatiques et peut être comparée à la norme de potabilité des eaux (50 mgNO_3^-/L). Le facteur 4,43 convertit la masse d'azote (N) en masse de nitrate (NO_3^-).
- Les pertes d'ammoniac ont été rapportées aux apports totaux d'azote sous forme minéral et organique.

C'est sur la base des 3 derniers indicateurs présentés que les performances azotées de chaque cas-type sont évaluées.

Le système de culture présenté dans chaque cas-type peut répondre à des objectifs stratégiques propres liés au contexte et aux enjeux locaux. Ainsi, les critères de performance azotée peuvent varier d'un système à l'autre, et sont expliqués dans les cas-types.

Dans un souci d'homogénéité des cas-types et pour pouvoir effectuer des comparaisons à visée didactique, les partenaires du projet Agro-éco-Syst'N ont convenu de critères communs de performances azotées, assortis de seuils de satisfaction (tableau 3).

Les critères et seuils de performances vis-à-vis de la qualité de l'eau et de la qualité de l'air ont été retenus selon la logique suivante :

Nous visons un « système à hautes performances azotées (HPN) » présentant les performances suivantes :

- vis-à-vis de la qualité de l'eau pour les pertes en nitrate : moins de 10 kg N pour 100 mm d'eau drainée, pour parvenir au seuil de potabilité 50 mg/l de nitrate ;
- vis-à-vis de la qualité de l'air pour les pertes en ammoniac : moins de 10 % de pertes par volatilisation pour 100 kg N/ha apportés, conformément aux valeurs couramment mesurées au champ.

Il est important de noter que les cas-types qui présentent une « performance azotée partielle » sont à haute performance pour l'une des deux formes de perte (lixiviation ou volatilisation). Il est donc toujours intéressant de voir les explications données dans le cas-type sur l'origine de la « haute performance » pour l'un des critères et inversement.

Tableau 3 des cas-types : Seuils de satisfaction des pertes en nitrate et en ammoniac du cas-type.

Seuils de pertes	Volatilisation d'ammoniac : > 10 % des apports (kg N pour 100 kg N apportés)	Volatilisation d'ammoniac : 5 % à 10 % des apports (kg N pour 100 kg N apportés)	Volatilisation d'ammoniac : < 5 % des apports (kg N pour 100 kg N apportés)
Lixiviation de nitrate : < 5 kgN/100 mm de lame d'eau drainante		Haute performance azotée (HPN)	Haute performance azotée (HPN)
Lixiviation de nitrate : 5 à 10 kgN/100 mm de lame d'eau drainante			Haute performance azotée (HPN)
Lixiviation de nitrate : > 10 kgN/100 mm de lame d'eau drainante			

Légende :

- **Haute performance azotée (HPN)**
- Performance azotée partielle
- Basse performance azotée

La réponse au 3ème sous-objectif (« savoir repérer **les principales périodes** de pertes d'azote du système de culture (…) »), est basée sur l'analyse des Figures 2 et suivantes des cas-types.

L'ensemble des sorties de Syst'N® mobilisées jusqu'ici sont des données moyennes calculées à l'échelle pluriannuelle du système de culture (kgN/ha/an). Afin de rendre compte du caractère dynamique de l'azote et de pouvoir repérer les périodes de pertes d'azote du système de culture, le formateur ou animateur pourra utiliser les Figures 2 et suivantes se trouvant dans les cas-types, qui représentent la dynamique de l'azote et les pertes simulées pour un scénario météorologique donné.

A partir de ces figures, vous pouvez par exemple faire repérer aux apprenants les périodes de synchronisation / désynchronisation entre disponibilités de l'azote minéral du sol et besoins instantanés des cultures (objectif 1), auxquels vous pouvez ajouter les pertes d'azote par volatilisation et lixiviation (objectif 2). Il est ainsi plus aisé pour les apprenants de relier ces éléments entre eux et de commencer à réfléchir aux causes de ces pertes. La Figure 4 de ce document présente une illustration de ce qu'il est possible de montrer aux apprenants.

Sur ces sorties Syst'N®, les pertes d'azote par volatilisation et lixiviation sont données par trimestre et exprimées en kgN/ha. La lame d'eau drainante (exprimée en mm) est également donnée par trimestre. Il est important de relier toujours les pertes d'azote par lixiviation à :

- la lame d'eau drainante qui dépend du type de sol, du climat de l'année et de l'absorption d'eau par la culture ou le couvert végétal en place ;
- la quantité d'N minéral présent dans le sol, qui à la fois **conditionne (à très court terme) ET dépend (à court terme)** des pertes par lixiviation.

Ces éléments sont présentés et commentés dans chaque cas-type, vous pourrez vous appuyer sur ces commentaires et analyses.

Pour pointer les périodes de lixiviation ou de pertes gazeuses, on peut ajouter des bulles sur des périodes importantes de pertes et demander aux apprenants de réfléchir (en vue de l'objectif n 3) aux facteurs qui peuvent expliquer ces pertes (itinéraire technique, climat, forme des apports, quantités…). Le formateur/animateur peut aussi choisir de les mettre sur la voie progressivement. Il faut qu'ils

regardent le climat, l'itinéraire technique, la réussite des cultures (courbe d'absorption voire rendements obtenus…) pour commencer à interpréter pic par pic ce qui explique ces pertes (ou ces non-pertes !).

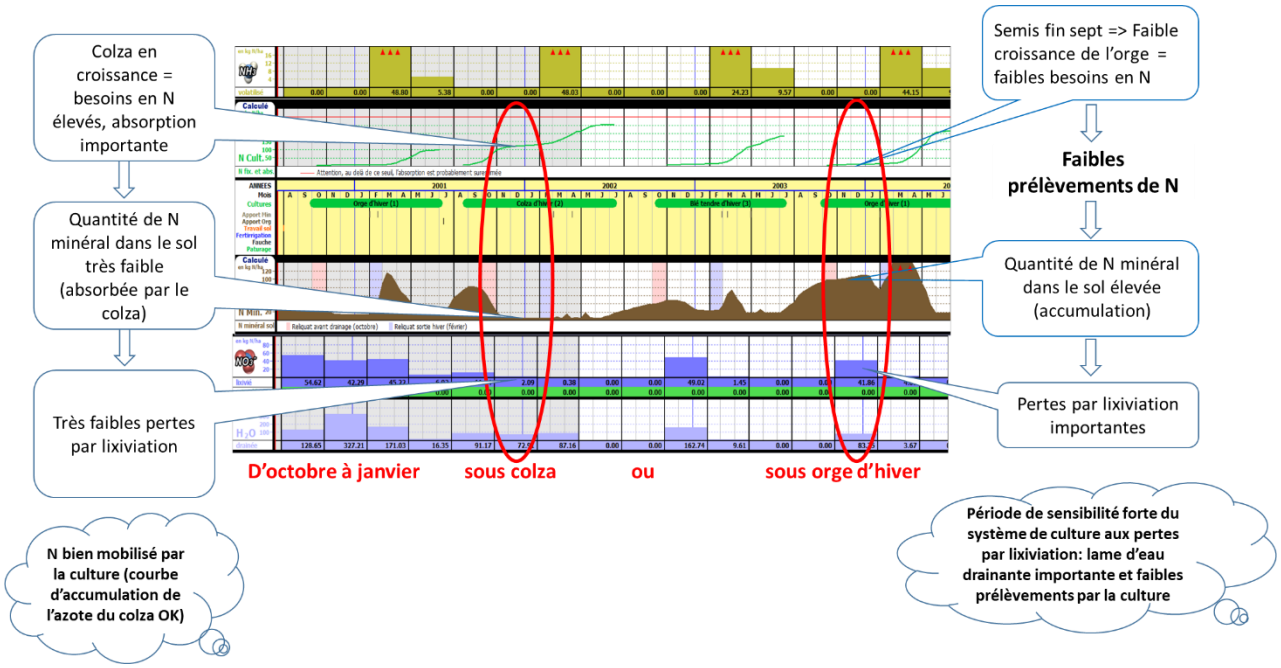

Figure 4 : Exemple de figure permettant d'atteindre l'objectif n°2 à partir des sorties de Syst'N®.

Si vous souhaitez réaliser des exercices à partir de ces figures, vous pouvez laisser des bulles vierges sur ces schémas, que les personnes en formation devront compléter. Une session destinée à des Bac Pro a été réalisée sur ce modèle et a permis aux élèves de bien relier l'itinéraire technique (périodes et quantités d'azote apporté) à la disponibilité de l'azote dans le sol et à son assimilation par la culture en place. Ils en déduisent ainsi les périodes à risque vis-à-vis des pertes d'azote par lixiviation ainsi que les facteurs aggravants. Cette première étape permet par la suite d'envisager des changements techniques afin de diminuer ces pertes sur les périodes identifiées.

Il est également conseillé de revenir aux pertes moyennes à l'échelle du système de culture. En effet, il est possible que l'on identifie une ou plusieurs périodes de pertes ponctuelles « importantes », mais que, ramenées à l'échelle du système, ces pertes ne représentent finalement pas un risque vis-à-vis de la qualité de l'eau et de l'air. Cet aller-retour doit être bien géré par le formateur/animateur afin d'amener les apprenants aux compromis souvent nécessaires qui sont faits à l'échelle d'un système de culture : on accepte une perte ponctuelle d'azote si, compte tenu de sa fréquence faible à une échelle pluriannuelle, cette perte devient négligeable du point de vue des conséquences environnementales.

3.3. Objectif 3 : Diagnostiquer les pertes d'azote

Cet objectif vise, au-delà du « simple » repérage des pertes d'azote, de leurs formes et des quantités en jeu, à comprendre l'origine des pertes (reliquats post-récolte, entrée drainage, effet précédent, présence d'un couvert végétal d'interculture, forme des apports d'azote…) en mettant en relation les formes et quantités des pertes à l'itinéraire technique, au climat et au type de sol. Cet objectif doit permettre aux apprenants de proposer des pistes pour la réduction de ces pertes.

Public cible : Élèves (BAC pro) et BTS, élèves ingénieurs, agriculteurs/conseillers.

Pour atteindre cet objectif, les formateurs et animateurs doivent mobiliser l'ensemble des tableaux et graphiques des cas-types (expliqués plus haut). La partie « Diagnostic des performances azotées et discussion des résultats » de chaque cas-type fournit les éléments de réponse quant aux facteurs à

l'origine des pertes azotées (ou des facteurs à l'origine de la haute performance azotée du système) ainsi que des pistes (testées ou non) de réduction de ces pertes.

En formation ou animation de groupe d'agriculteurs, la comparaison de plusieurs systèmes (cas-types) pour étudier diverses pistes d'amélioration des performances peut être utile (l'effort peut être considéré comme « rentable »). Dans chaque cas-type, sont fournies les références des cas-types qui mobilisent les leviers évoqués, souvent dans le même contexte pédoclimatique.

N.B. : Dans chaque cas-type, la performance azotée du système de culture étudié est discutée au regard des conditions locales et également au regard des paramétrages utilisés pour la simulation des pertes d'azote. Ainsi, chaque rédacteur des cas-types discute la validité des résultats obtenus en fonction de références locales ou à « dire d'expert ». Les formateurs et animateurs doivent donc se référer à la partie « Diagnostic des performances azotées et discussion des résultats » des cas-types afin de nuancer certaines pertes (faibles ou élevées) selon la fiabilité des simulations réalisées.

3.4. Objectif 4 : Concevoir des systèmes de culture à faibles pertes d'azote

Cet objectif, à la différence des trois précédents qui sont basés sur des systèmes de culture rencontrés dans les territoires, s'intéresse à la conception de SdC « HPN » ou à la reconception de SdC afin d'en améliorer les performances azotées. Il s'agit ici d'amener le public cible (une fois qu'il a compris l'origine de pertes azotées dans un contexte pédoclimatique donné) à :

- identifier et proposer des leviers agronomiques adaptés au contexte étudié et réduisant *a priori* ces pertes ;
- évaluer les pertes des leviers agronomiques testés (évaluation *a priori* de SdC nouvellement conçus).

Public cible : Etudiants BTS ou ingénieurs dans certains projets où ils sont amenés à diagnostiquer des exploitations agricoles et à proposer de nouvelles pratiques, ingénieurs / groupes d'agriculteurs collaborant sur une problématique spécifique dans un territoire.

L'atteinte de cet objectif implique de procéder à des modélisations avec l'outil Syst'N® et de présenter les résultats et étapes de ces simulations dans une logique de boucle de progrès qui mobilise les leviers agronomiques identifiés. L'utilisation des seuls cas-types ne suffit donc pas à atteindre ce dernier objectif, qui sort donc du cadre strict de ce guide. Cependant, ces cas-types peuvent être utilisés pour former au préalable les apprenants aux dynamiques d'azote à l'échelle d'un système de culture et aux facteurs de variation des pertes d'azote par lixiviation ou volatilisation. Cela permettra aux étudiants, agriculteurs… de choisir et hiérarchiser des leviers de gestion de systèmes à hautes performances azotées (dans le sens retenu dans ce projet).

Par ailleurs, l'étude de cas-types qualifiés de « HPN » peut apporter des idées de combinaisons de pratiques à mobiliser dans les SdC à concevoir ou reconcevoir. La partie « Diagnostic des performances azotées et discussion des résultats » de chaque cas-type fournit également des pistes pour améliorer les performances azotées du SdC étudié. Ces pistes constituent autant d'idées à utiliser dans des ateliers de conception de SdC ou des ateliers réflexifs avec des agriculteurs ou des étudiants autour d'enjeux environnementaux liés à l'azote.

ANNEXE : Liste des cas-types étudiés et proposés

N°	Intitulé du cas-type	Localisation	ROTATION	Type de sol	Pratiqué ou prototype	Organisme
BR1	Système céréalier en élevage de volailles en Bretagne	Bretagne	Maïs-Blé-Féverole- Blé-Colza-Triticale	Limon sablo-argileux	Pratiqué	Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne (CRAB)
BR2	Système céréalier en élevage de porcs sur caillebotis et paille en Bretagne	Bretagne	Maïs-Blé-Colza-Triticale	Limon sablo-argileux	Pratiqué	CRAB
BR3	Système céréalier en élevage de porcs sur paille en Bretagne	Bretagne	Maïs-Blé-Colza-Triticale	Limon sablo-argileux	Pratiqué	CRAB
BR4	Système céréalier en élevage de porcs sur caillebotis en Bretagne	Bretagne	Maïs-Blé-Colza-Triticale	Limon sablo-argileux	Pratiqué	CRAB
CF1	Système légumier de monoculture de chou-fleur en Bretagne	Zone légumière du Nord-Finistère	Chou-fleur hâtif – Chou-fleur tardif	Sable limoneux	Prototype	CRAB
CF2	Système légumier de monoculture de chou-fleur en Bretagne avec leviers de réduction des pertes azotées	Zone légumière du Nord-Finistère	Chou-fleur hâtif – Chou-fleur tardif	Limon	Prototype	CRAB
CA1	Système de culture de carotte en Aquitaine	Aquitaine	Carotte - maïs grain*3 - maïs doux - carotte primeur - carotte saison	Sableux	Prototype	Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes (CTIFL)
CB1	Systèmes céréaliers en Champagne berrichonne : système de référence (colza-blé-blé-tournesol-blé) sur limon sableux profonds	Champagne berrichonne	Colza-Blé-Blé-Tournesol-blé	Limons sableux profonds	Pratiqué	Terres Inovia
CH1	Système céréalier en craie de Champagne : système de référence	Champagne (Reims)	Colza-Blé-Orge de printemps-Betterave-Blé	Calcosol	Pratiqué	Institut Technique de la Betterave (ITB)
CH2	Système céréalier en craie de Champagne : système innovant	Champagne (Reims)	Colza-Blé-Orge de printemps-Betterave-Blé-Pois d'hiver-Tournesol-Blé tendre-Betterave-Pois de printemps	Calcosol	Pratiqué	ITB
CVL1	Système céréalier raisonné non irrigué en région Centre-Val-de-Loire (Beauce)	Département d'Eure-et-Loir	Colza – blé tendre – Orge de printemps – Pois de printemps – Blé dur	Limon argileux profond sur calcaire	Pratiqué	Ferme de la Saussaye
CVL2	Système céréalier sans élevage conduit en agriculture biologique, non irrigué, en région Centre-Val de Loire (Beauce)	Département d'Eure-et-Loir	Luzerne – Blé d'hiver – Culture Intermédiaire – Orge de printemps – Pois d'hiver – Blé d'hiver	Limon argileux moyennement profond à profond sur calcaire de Beauce	Pratiqué	Ferme de la Saussaye

N°	Intitulé du cas-type	Localisation	ROTATION	Type de sol	Pratiqué ou prototype	Organisme
PI1	Rotation courte sur sol superficiel en Picardie	Département de l'Oise	Colza -Blé -Orge d'hiver	Cranette sur craie	Pratiqué	UniLaSalle Beauvais
PI2	Rotation maïs ensilage-blé-colza-blé sur limon en Picardie	Département de l'Oise	Maïs ensilage- Blé-Colza -Blé	Limon battant moyennement profond	Pratiqué	UniLaSalle Beauvais
PI3	Rotation maïs grain-blé-colza-blé sur limon battant en Picardie	Département de l'Oise	Maïs grain- Blé-Colza -Blé	Limon battant moyennement profond	Pratiqué	UniLaSalle Beauvais
PI4	Rotation maïs ensilage/ blé/pois de printemps/ colza/ blé sur limon en Picardie	Département de l'Oise	Maïs ensilage- Blé-Pois de printemps-Colza-Blé	Limon battant moyennement profond	Prototype	UniLaSalle Beauvais
PI5	Rotation betterave/ blé/ colza/ blé sur limon en Picardie	Département de l'Oise	Betterave sucrière- Blé-Colza -Blé	Limon battant moyennement profond	Pratiqué	UniLaSalle Beauvais
PI6	Rotation maïs ensilage-blé-colza-blé sur argile à silex en Picardie	Département de l'Oise	Maïs ensilage- Blé-Colza -Blé	Argile à silex	Pratiqué	UniLaSalle Beauvais
PI7	Rotation sur limon argileux à silex en Picardie	Département de l'Oise	Maïs ensilage- Blé-Colza -Blé	Limon argileux à silex sur argile à silex	Pratiqué	UniLaSalle Beauvais
RA1	Système céréalier sans élevage conduit en Agriculture Biologique (AB) : système de référence	Rhône-Alpes	Orge d'hiver-Maïs grain-Soja-Blé tendre d'hiver	Limono-argilo-sableux	Pratiqué	Isara
RA2	Système céréalier sans élevage conduit en Agriculture Biologique (AB): système innovant	Rhône-Alpes	Maïs grain – Soja – Blé tendre d'hiver + féverole – Orge d'hiver – Maïs grain – Pois chiche – Blé tendre d'hiver – Colza associé	Limono-argilo-sableux	Pratiqué	Isara