

Mémoire de Stage

Validation du Modèle FarmSim pour le calcul des flux en azote sous parcelles agricoles dans le Doubs

Kévin GUILLOT

Année de soutenance : 2017

Mémoire de Stage

Evaluation du Modèle FarmSim pour le calcul des flux en azote et du drainage sous parcelles agricoles du bassin versant de la Loue

Kévin GUILLOT

Année de soutenance : 2017

Mémoire préparé sous la direction de :

Marjorie UBERTOSI

Présenté le : 21/09/2017

Membre du jury :

Philippe AMIOTTE-SUCHET

Marjorie UBERTOSI

**Chambre Interdépartementale du
Doubs et du Territoire de Belfort**

Maître de stage : Didier TOURENNE

Validation of FarmSim Model to quantify nitrogen fluxes lost by leaching in agricultural plots in Doubs department

Abstract:

The Loue River, famous for fishing, has had a high rate of fish mortality mainly in 2010 and 2011 despite its classification as “good biologic state “category by the French Framework Directive on water. Recent studies have shown that the Loue water quality has been decreasing for several decades (Onema & Bioemco, 2012; Conseil scientifique, 2012). This decrease of water quality is due to anthropic pressures on the river watershed, and the agriculture was one of the main pressures which have been cited as significantly contributing to the river eutrophication. In this context, the Chambre d’Agriculture du Doubs et du Territoire de Belfort initiated actions to limit agriculture contribution to eutrophication of the river and to get references for the local context. The will of quantifying nitrogen fluxes due to nitrates leaching in agricultural plots led to use modeling namely FarmSim, a model developed by the INRA (French National Institute for Agricultural Research) of Clermont Ferrand but also to use data from the lysimeters installed by the University of Besançon on Lods watershed

The objective of this report is to evaluate FarmSim capacities in simulating drainage and leaching in soils on agricultural plots of a studied watershed. FarmSim performances appeared to be globally poor on Plaisir Fontaine watershed. This model underestimates the quantities of mineral nitrogen in the form of nitrates and ammonium observed in the soils at the beginning and the end of winter. However, the model performance on four spots equipped with lysimeters, revealed that the simulated nitrate concentrations were consistent with the observed data. At least, a subjective estimate of nitrogen losses was calculated.

Key words:

FarmSim, PaSim, CERES-EGC, lysimeters, modelling, nitrates leaching, drainage, agricultural practices

Remerciements :

Dans un premier temps, mes remerciements vont à mon maître de stage, Didier Tourenne, conseiller en Agronomie et Environnement à la Chambre Interdépartementale d'Agriculture du Doubs et Territoire de Belfort, que je remercie pour son aide, son accompagnement et par le partage de ses connaissances tout au long du stage.

Pauline Thouvenin, Marine Vieille et Julien Zanatta, qui ont travaillé avant moi sur cette thématique, pour leur aide et leur disponibilité.

Je tiens également à remercier tout particulièrement Gilles Schellenberger , responsable du Service Espace et Territoire, de m'avoir accepté au sein de son équipe. Je remercie l'ensemble du personnel de la CIA 25/90 pour leur accueil chaleureux, leur aide et leur disponibilité en cas de besoin.

Raphaël Martin, Ingénieur de recherche à l'INRA de Clermont Ferrand, pour sa collaboration, son travail important et son aide tout au long de ce stage pour me permettre d'utiliser le modèle FarmSim.

Eric Lucot et Etienne Chanez du Laboratoire Chronoenvironnement de l'Université de Franche Comté, pour leurs échanges de données lysimétriques capitales à la thématique de mon stage.

Majorie Ubertosi, ma tutrice pédagogique d'AgroSup Dijon, pour son soutien, ses conseils et son implication dans ce stage.

Sigles et acronymes :

AOP : Appellation d'Origine Protégée

CERES-EGC : Crop Environment REsource Synthesis - Environnement et Grandes Cultures

CO₂ : Dioxyde de carbone

CIA 25/90 : Chambre Interdépartementale d'Agriculture du Doubs et du Territoire de Belfort

CIPAN : Culture Intermédiaire Piège à Nitrates

C/N : Rapport carbone sur azote

DREAL : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement

FarmSim : Farm Simulation model

ha : hectare

ICPE : Installations Classées pour la Protection de l'Environnement

INRA : Institut National de Recherche Agronomique

MS : Matière Sèche

N₂ : Diazote

N₂O : Protoxyde d'azote

NH₄⁺ : Ion ammonium

NO₂⁻ : Ion nitrite

NO₃⁻ : Ion nitrate

NH₃ : Ammoniac (gazeux) ou ammoniacque (solution aqueuse)

ONEMA : Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques, devenu l'agence pour la biodiversité

PaSim : Pasture Simulation model

PBIAS : Pourcentage de biais

PRO ; Produits Résiduaire Organiques

UGB : Unité Gros Bétail

UGB.JPE : Equivalent journées de présence d'unités de gros bovins

RMSE : Relative Mean Square Error

RSD : Règlement Sanitaire Départemental

REH : Reliquat entrée d'hiver

RSH : Reliquat sortie d'hiver

SSW : Soil Surface Water

Tables des matières :

Abstract:.....	
Remerciements :	
Sigles et acronymes :.....	
Tables des matières :.....	
Introduction :	1
I. Présentation des Chambres d'Agriculture	2
A. Création des Chambres départementale d'Agriculture	2
B. La Chambre interdépartementale d'Agriculture du Doubs et Territoire de Belfort	3
1. Ses missions.....	3
2. Son rayon d'action.....	3
C. Le sujet de stage	4
II. La problématique	4
III. Bibliographie.....	6
A. Le cycle de l'azote.....	6
1. Facteurs influençant la lixiviation.....	7
2. Pédologie et climat.....	7
3. Les pratiques agricoles	8
B. La modélisation du cycle de l'azote à l'échelle du bassin versant de la Loue	9
1. Les différents modèles aux différentes échelles	10
2. Les modèles choisis par la CIA 25/90	10
3. Limites des modèles et précautions.....	14
IV. Matériel et méthodes.....	15
A. Les modèles Syst'N et FarmSim.....	15
1. Paramètres d'entrée	15
2. Paramètres de sortie	19
3. Méthodologie de validation des simulations	20
4. Choix des parcelles simulées	21
B. Le territoire choisi pour la validation de la démarche	22
1. Le sous bassin versant de Plaisir Fontaine	22
2. Les pratiques agricoles	24
3. Caractérisation du cycle de l'azote.....	25
V. Résultats	29
A. Les enquêtes.....	29
B. Evaluation des performances de FarmSim sur le bassin versant de Plaisir Fontaine ...	31

1.	L'azote dans le sol.....	31
2.	Les processus du cycle de l'azote (rendements, absorption racinaire et minéralisation)	34
3.	Le drainage	35
C.	Evaluation des performances de FarmSim avec des données lysimétriques.....	37
1.	Le drainage	37
2.	La concentration en nitrate et lixiviation	41
VI.	Discussion	43
A.	Performances de FarmSim sur le bassin versant de Plaisir Fontaine	43
1.	Les enquêtes.....	44
2.	Les données pédoclimatiques	44
3.	Les mesures effectuées	44
4.	Le modèle utilisé.....	44
B.	Les performances du modèle pour les situations de Chasnans	45
1.	Le drainage	45
2.	La lixiviation	46
3.	Estimation subjective des pertes en azote pour les quatre situations de Chasnans	46
C.	Les sensibilités du modèle FarmSim.....	47
1.	Les propriétés physiques du sol	47
2.	La dose d'apport.....	48
D.	Pistes d'amélioration.....	48
	Conclusion	49
	Bibliographie	50
	Webographie.....	53

Introduction :

L'Europe a voté l'adoption de la directive 91/676/CEE plus connue sous le nom de « Directive Nitrates » le 12 décembre 1991. Cette directive s'emploie à la protection de la qualité de l'eau et des milieux aquatiques en prévenant la pollution des eaux souterraines et superficielles par les nitrates issus des activités agricoles. Chaque Etat membre se doit d'identifier des « zones vulnérables » ainsi que de s'engager à la mise en place de programmes d'actions (Graux *et al.*, 2013).

La Franche-Comté bien connue du milieu de la pêche a néanmoins vu sa réputation diminuer au fil des ans suite à des périodes de mortalités piscicoles. Mais ce sont les années 2010 et 2011 qui ont marqué un tournant suite à des mortalités précoces et massives de salmonidés sur une grande partie de la Loue et ce sur une longue période (Onema & Bioemco, 2012). Les études menées suite à ce phénomène révèlent que d'importants épisodes de proliférations des cyanobactéries ont eu lieu au même moment mais aussi que la qualité des milieux et de l'eau se dégrade depuis plusieurs décennies. Ceci s'est alors traduit par une plus forte vulnérabilité des populations piscicoles aux changements de paramètres du milieu ainsi qu'aux parasites.

L'agriculture franc-comtoise s'est alors vue pointer du doigt par les associations de protection de l'environnement, les acteurs du monde agricole ont été accusés d'être les principaux artisans de l'eutrophisation de la rivière par les nitrates. A la suite de ces événements, la problématique des mortalités piscicoles sur la Loue a été classée au premier rang des actions à engager sur le territoire (Onema & Bioemco, 2012 ; Conseil scientifique, 2012).

C'est dans ce contexte d'accusation des pratiques agricoles que la Chambre Interdépartementale d'Agriculture du Doubs et du Territoire de Belfort (CIA25/90) s'est engagée à mener à bien diverses actions pour limiter la part de l'agriculture dans l'eutrophisation des rivières du Doubs et ainsi des mortalités piscicoles.

Dans cette optique, la CIA 25/90 s'emploie à la mise aux normes des bâtiments de stockage des effluents, mais aussi à l'expérimentation et à l'optimisation des pratiques agricoles. Sur le modèle de la méthode Territ'Eau (Vertès *et al.*, 2012), une méthode adaptée au contexte du Département du Doubs a été développée afin d'évaluer qualitativement les risques de lixiviation de nitrates sous les parcelles agricoles. De plus, la volonté de quantifier les flux d'azote quittant les parcelles agricoles sous forme d'ions nitrates a par la suite mené à l'utilisation du modèle Syst'N, développé par le Réseau Mixte Thématique Fertilisation et Environnement dans le cadre du projet AZOSYSTEM et regroupant l'INRA de Rennes et huit instituts techniques agricoles. Cependant, ce modèle est inadapté à la région du fait de la particularité singulière des sols à accumuler de l'azote sous forme d'ions ammonium, compartiment qui n'est pas pris en compte dans le modèle (Veille, 2016). La piste d'un second modèle permettant la modélisation de ces flux en nitrate a donc été étudiée. Le modèle FarmSim en cours de développement par l'INRA de Clermont Ferrand a été adopté par la CIA 25/90 et testé par Marine Vieille, précédente stagiaire, en 2016. Les premières performances obtenues semblent mauvaises et des pistes d'amélioration des paramètres ont été retournées à l'INRA de Clermont-Ferrand (Veille, 2016). L'objectif de mon stage est donc de réaliser un protocole permettant de vérifier les performances de FarmSim dans la modélisation des processus de lixiviation sous parcelles agricoles d'un sous bassin versant de la Loue. Ceci passera par la confrontation des valeurs de drainage et de lixiviation simulées avec les valeurs mesurées par des lysimètres installés récemment sur le bassin versant de la Loue.

Une présentation des chambres d'agriculture et plus précisément de la Chambre Interdépartementale d'Agriculture du Doubs et Territoire de Belfort débute ce rapport. Ce préambule permet au lecteur de comprendre la position des chambres par rapport à l'agriculture et l'environnement. Suit alors la présentation du contexte et de la zone d'étude permettant de cerner la problématique à laquelle répond mon stage. Une troisième partie présente la méthode mise en place pour cette étude ainsi que le matériel à disposition. Elle aboutit sur une quatrième partie annonçant les premiers résultats découlant de la méthodologie. Suivent ensuite une discussion des résultats et pour terminer une conclusion.

I. Présentation des Chambres d'Agriculture

A. Création des Chambres départementale d'Agriculture

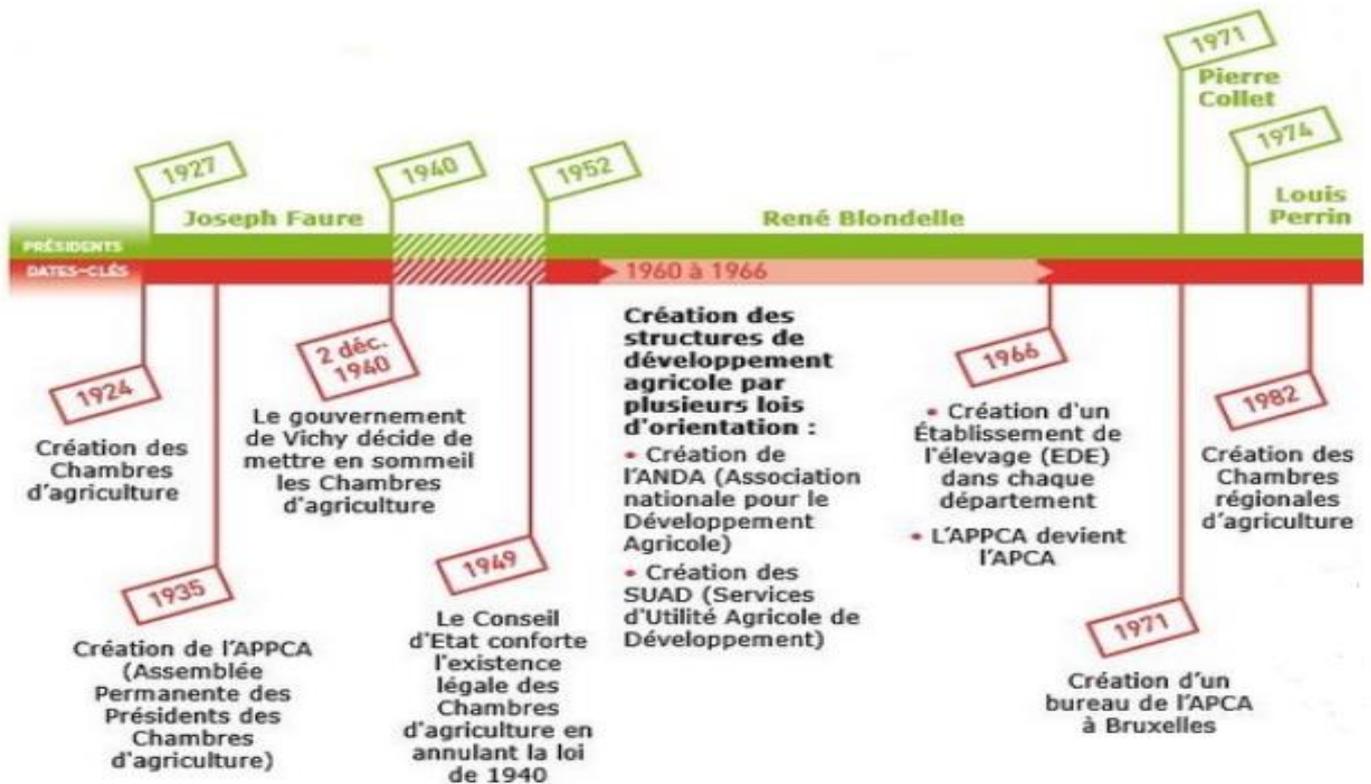


Figure 1 : Frise chronologique de la création des Chambres d'Agriculture (source : <http://www.chambres-agriculture.fr>)

La première apparition des Chambres départementale d'Agriculture remonte au 8 avril 1840 où Defitte et de Baumont déposent la première proposition de loi : « il s'agissait de créer dans chaque département une chambre d'agriculture, élue par les membres des comices agricoles et qui soit ainsi en mesure de jouer le rôle de corps consultatif local ; ses conseils devaient éclairer l'action des pouvoirs publics touchant les questions agricoles, statistiques, économiques et législatives » (MORA C, 1967). Repoussée par les parlementaires de la Monarchie de Juillet, cette proposition de loi sera finalement votée le 20 mars 1851.

La Figure 1 montre que le 3 janvier 1924, le vote d'une nouvelle loi crée une Chambre dans chaque département qui se compose de membres élus au suffrage universel par tous les agriculteurs du département. Selon ce texte, « les chambres d'agriculture sont, auprès des pouvoirs publics, les organes consultatifs et professionnels des intérêts agricoles de leur circonscription [et elles] peuvent, dans leur circonscription, créer ou subventionner tous établissements, institutions ou services d'utilité agricole, toutes entreprises collectives d'intérêt agricole » (loi du 3 janvier 1924 relative aux chambres d'agriculture).

Le 24 octobre 1927, les présidents de chaque chambre se réunissent à Paris et se baptisent Assemblée des Présidents des Chambres d'Agriculture (APCA) et le décret-loi du 30 octobre 1935 institue une Assemblée Permanente des Présidents des Chambres d'Agriculture (APPCA).

Cependant, une loi sur l'organisation corporative de l'agriculture votée le 2 décembre 1940, prévoit la suppression des chambres d'agriculture, et l'arrêté du 29 janvier 1944 annoncera la fin de celles-ci.

Ce n'est qu'après la Seconde Guerre Mondiale, le 17 mai 1949 suite à la volonté des présidents et par un avis du Conseil d'Etat que l'accord est donné aux Chambres d'Agriculture de reprendre leur activités (ATRUX M, 2006).

B. La Chambre interdépartementale d'Agriculture du Doubs et Territoire de Belfort



Figure 2 : Logotype CIA 25/90

Les Chambres départementales du Doubs et du Territoire de Belfort ont fusionné le 1^{er} janvier 2013 pour former la Chambre Interdépartementale d'Agriculture du Doubs et Territoire de Belfort (CIA 25/90) (Figure 2). A ce titre, tout comme les chambres départementales et régionales, il s'agit d'un établissement public économique professionnel (établissement consulaire). Actuellement, le réseau des Chambres d'Agriculture se compose de 89 Chambres départementales ou interdépartementales et 13 Chambres régionales (contre 20 en 2013, suite à la fusion des régions le 1^{er} janvier 2016). L'APCA est chargée de représenter au niveau national les Chambres d'Agriculture en jouant un rôle consultatif auprès des pouvoirs publics nationaux et européens. Cette assemblée contribue notamment à la

définition des orientations et des conditions de mises en œuvre des politiques agricoles, du développement rural et de l'environnement. De plus, l'APCA apporte un appui technique, juridique économique et financier aux Chambres d'Agriculture.

1. Ses missions

La CIA 25/90 constitue l'organisme consultatif, représentatif et professionnel des intérêts agricoles et forestiers de son territoire auprès de l'Etat, des collectivités territoriales ainsi que des établissements publics qui leur sont rattachés. Ainsi la Chambre est un acteur pour le développement des deux départements (Doubs et Territoire de Belfort) à travers deux missions :

- représenter et défendre les intérêts de l'ensemble des différents agents économiques de l'agriculture auprès des Pouvoirs Publics, de toutes autres instances nationales et internationales, des organisations professionnelles et des acteurs publics et privés.

C'est-à-dire qu'elle contribue au dynamisme de son département et de sa région dans une logique de développement durable et coopère en permanence à la réalisation de projets en matière de politique agricole, de gestions des ressources naturelles, de développement économique et d'environnement.

- Porter des projets pour le monde agricole. Elle propose des activités de conseil et de formation : accompagnement des projets des agriculteurs, conception de projets locaux en collaboration avec les collectivités territoriales, prestations de conseils, expertises, références technico-économiques.

La Chambre accompagne également les agriculteurs dans leurs projets d'installation ou de développement de leur exploitation par l'apport de son aide sur les aspects techniques, économiques, administratifs et juridiques (Chambres d'Agriculture n°1023, Mai 2013).

2. Son rayon d'action

La Chambre Interdépartementale d'Agriculture du Doubs et Territoire de Belfort dispose de 5 antennes réparties sur le territoire (Besançon, Houtaud, Maîche, Méroux et Valdahon). Actuellement, 65 personnes sont salariées de la CIA 25/90 et sont réparties en trois services ayant chacun des missions spécifiques. Le Service Espace et Territoire (SET), au sein duquel j'effectue mon stage, vise à aider et accompagner les agriculteurs dans la mise en œuvre de projets d'aménagement, de développements territoriaux et d'actions forestières et environnementales. Le SET assure la diffusion de l'information et donne l'appui nécessaire aux agriculteurs dans le cadre de dispositifs volontaires ou réglementaires, mais aussi développe et pérennise des partenariats avec les acteurs du monde agricole et représente les intérêts des agriculteurs dans les débats. Les autres services correspondent au Service Innovation et Qualité et au Service Economie de l'Entreprise (Rapport d'activités, 2016).

C. Le sujet de stage

La CIA 25/90 a choisi de s'impliquer dans l'une des problématiques touchant le département : la pollution des eaux et les mortalités piscicoles répétitives affectant plusieurs de ses rivières (Loue, Dessoubre, Haut Doubs,...). C'est donc suite à cette volonté de la Chambre d'Agriculture à intervenir dans une problématique d'ordre environnementale qu'une proposition de sujet de stage a vu le jour dans le Service Espace et Territoire. L'objectif est de valider un modèle informatique, FarmSim, permettant la simulation des pertes en nitrates sur des parcelles en le testant dans le sous bassin versant test de Plaisir Fontaine, situé dans le bassin versant de la Loue.

II. La problématique

Considérée comme l'un des emblèmes de la Franche-Comté, la rivière de la Loue, dont la source se situe à Ouhans, correspond à la résurgence karstique de pertes du Doubs, du Dugeon et du Val d'Usiers. Longue de 130 km, elle finit par se jeter dans le Doubs à hauteur de Parcey dans le Jura. Le bassin versant de la Loue occupe 173 300 ha (2 450 km²), dont 47,8 % sont constitués de terres agricoles (Eaux de France, 2006) et regroupe 121 communes du Doubs et 78 du Jura. Réputée pour la pêche à la mouche ainsi que pour le tourisme de par son attrait paysager, la Loue fait l'objet d'une attention particulière depuis d'importantes mortalités piscicoles.

Les calcaires du jurassique imposent à une partie du département sa géologie karstique si particulière. La dissolution des roches calcaires sous l'effet des pluies riche en CO₂ (pluies acides) va créer un important réseau de fissures et galeries influant sur les vitesses d'écoulements (Bassin Rhône Méditerranée Corse, Juin 1999).

Les eaux souterraines sont sujettes aux activités anthropiques en raison d'une couche de sol trop superficielle en surface qui ne permet pas une rétention des polluants. Le karst possède un faible pouvoir filtrant et diluant n'apportant pas d'amélioration de la qualité des eaux (Bakalowicz, 1999). Les eaux percolant dans les sols peuvent être ainsi très chargées en polluants. De plus, l'infiltration rapide de l'eau (pouvant atteindre plusieurs km/jour) accroît la vulnérabilité des aquifères karstiques aux pollutions. En contrepartie, la dépollution des milieux karstiques s'avère être aussi plus rapide.

Un diagnostic effectué par la DREAL et l'Agence de l'Eau en 2010, dans le cadre des normes de la Directive Cadre sur l'Eau, sur l'analyse des peuplements de macro-invertébrés (macrophytes et diatomées) et sur l'analyse physico-chimique de l'eau atteste d'un bon état biologique et d'une bonne qualité physico-chimique des eaux. Ce diagnostic fut remis en cause, par la population locale et les associations de protection de l'environnement, suite à des mortalités massives en 2010 et 2011 de salmonidés, accompagnés d'importants pics de prolifération de cyanobactéries.

Des études ont alors été menées pour déterminer l'origine de ces phénomènes et leurs conclusions aboutissent à une dégradation globale de la qualité des eaux depuis plusieurs décennies. Ceci accroît la vulnérabilité des populations fauniques et végétales de la rivière par rapport aux changements de paramètres du milieu (température de l'eau, concentration en éléments,...). De plus, une souche hautement pathogène de champignon, auquel les populations de salmonidés ne disposent pas de moyens de défense, aurait été introduite dans la Loue alourdissant le bilan des mortalités (Onema & Bioemco, 2012 ; Conseil scientifique, 2012 ; Paul & Lassaad, 2012).

La dégradation du milieu n'est autre que la résultante des pressions anthropiques exercées par les différents acteurs du bassin versant : pollutions d'origine agricole, agroalimentaire, industrielle, forestière et domestique. Des analyses d'auto-surveillance réalisées au niveau de la station d'eau potable de Chenecey-Buillon entre 1971 et 2012 révèlent des concentrations en nitrates dans le cours d'eau globalement inférieures à 10 mg/l. Toutefois, la fréquence irrégulière des analyses (certaines années disposent de peu d'analyses) présente un risque de biais dans l'interprétation de ces données. Les conditions de prélèvements entrent en compte dans la concentration en nitrates qui ne sera pas la même selon la période de l'année et les conditions climatiques précédant la mesure. Les années avec peu d'analyses de concentration en nitrates ne peuvent pas avoir la même représentativité que les années avec de nombreuses analyses (CIA 25/90, 2012).

La volonté de la Chambre d'Agriculture du Doubs et du Territoire de Belfort est d'accompagner les agriculteurs dans l'adoption de meilleures pratiques agricoles afin de réduire leurs contributions dans l'eutrophisation des cours d'eau. Cela passe par une quantification provisoire des flux d'azote sur des parcelles agricoles. Plusieurs outils ont déjà été utilisés afin d'estimer ces flux (Bilans entrées/sorties; reliquats entrée et sortie d'hiver; utilisation du modèle Syst'N).

La modélisation semble une piste prometteuse permettant en plus de la quantification des flux d'azote de modéliser des scénarii de changements de pratiques agricoles sans avoir à mettre en place des essais prenant et coûteux. Un premier modèle, Syst'N, développé par le Réseau Mixte Thématique Fertilisation et Environnement et utilisé par de nombreux organismes semblait prometteur pour simuler les flux azotés sous les parcelles agricoles du Doubs. Cependant, les particularités pédoclimatiques de la région, la dominance des prairies, les sols riches en matière organique et le climat pluvieux permettent la présence de fortes quantités d'azote ammoniacale (NH_4^+) dans les sols. Or, ces quantités en NH_4^+ ne sont pas compatibles avec le modèle car il ne prend pas en compte le compartiment « azote ammoniacale » dans les sols. L'évaluation de Syst'N fut donc un échec sur le territoire du Doubs (Thouvenin, 2014 et Zanatta, 2015).

Un second modèle, FarmSim, développé par l'INRA de Clermont Ferrand et regroupant deux modèles préexistants (PaSim pour les prairies et CERES-EGC pour les cultures) a attiré l'attention de la CIA 25/90. Ce modèle semble prometteur de par sa prise en compte du NH_4^+ , sa capacité à simuler l'ensemble des émissions d'azote dans l'atmosphère et les eaux mais aussi la production végétale à l'échelle d'une parcelle et ce à pas de temps journalier. Une première évaluation des performances de ce modèle dans la simulation des flux d'azote a été réalisée en 2016. Les résultats issus de ces premières simulations ne furent pas concluants et relèvent un travail à effectuer sur le paramétrage du modèle (Vieille, 2016).

L'objectif de ce stage est donc de créer une méthodologie pour vérifier les performances du modèle agronomique FarmSim en matière de modélisation des flux d'azote sous des parcelles agricoles du Doubs. Son but est d'énoncer les premiers résultats issus de l'évaluation de l'outil et de dégager des pistes de travail pour optimiser le modèle.

III. Bibliographie

A. Le cycle de l'azote

L'étude des flux d'azote sous des parcelles agricoles du Doubs nécessite de définir correctement les processus intervenant au sein du cycle de l'azote dans le système sol/plante (Figure 3). Trois formes d'azote se dégagent du système sol/plante, l'azote atmosphérique, minéral et organique (qui représente à lui seul 95% de l'azote dans le sol). D'après Nicolardo *et al.*, 1996, l'horizon labouré contient 3 à 5 tN/ha. Cet azote est présent dans la biomasse microbienne (100-400 kg N/ha), dans les résidus de récoltes (20-100 kg N/ha) ainsi que de fractions d'azote organique stable difficilement décomposable (2000-3000 kg N/ha) et labiles (1000-2000 kg N/ha) (Turpin *et al.*, 1997).

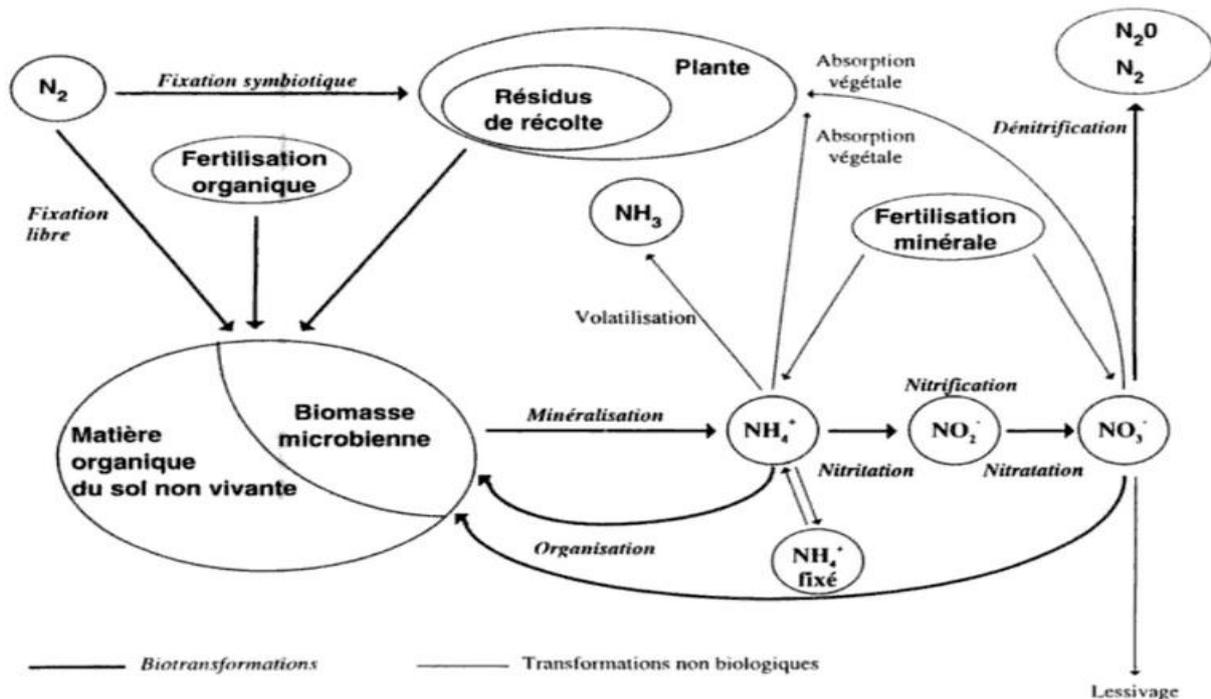


Figure 3 : Schéma représentant le cycle de l'azote

Les entrées d'azote :

Sur des sols agricoles, l'entrée de l'azote s'effectue majoritairement par fertilisation organique et minérale (Beaujouan, 2001). Les fertilisants organiques vont apporter de l'azote sous forme de matière organique dans le sol (qui va être minéralisé par la biomasse microbienne sous forme d'ion ammonium (NH₄⁺)) ou directement sous la forme NH₄⁺ minéral (dont la concentration varie en fonction du type d'effluent). La minéralisation de l'azote se fait sur plusieurs mois voire plusieurs années après l'épandage, pour que l'azote organique des effluents soit transformé sous une forme minérale (Schvartz *et al.*, 2005). Les résidus de récolte suivent le même chemin. La fertilisation minérale correspond aux engrais chimiques de synthèse où l'azote est sous forme uréique, d'azote ammoniacal (NH₄⁺) et de nitrates (NO₃⁻). La fixation de l'azote atmosphérique réalisée par des micro-organismes procaryotes spécifiques intervient comme une seconde source d'entrée de l'azote dans le système. Ces micro-organismes, qu'ils soient libres dans le sol ou bien en symbiose avec des légumineuses vont fixer l'azote atmosphérique (N₂) et ainsi le faire entrer dans le sol où il prendra la forme d'azote ammoniacal. De plus, des phénomènes de déposition atmosphérique d'azote vont s'opérer et incorporer de l'azote gazeux dans le sol ou la plante (Schvartz *et al.*, 2005).

L'azote dans le sol :

L'azote minéral est présent sous trois formes, l'ion ammonium (NH_4^+), l'ion nitrite (NO_2^-) et l'ion nitrate (NO_3^-) qui ne représentent que quelques dizaines de kg/ha (hors périodes d'apports en fertilisants) et dont la teneur varie selon la période de l'année (Nicolardot *et al.*, 1996). De nombreuses transformations physico-chimiques ainsi que biologiques (organisation, minéralisation, nitrification, volatilisation ...) vont faire varier les quantités d'azote présentes dans ces compartiments. Suivant le rapport C/N de la matière organique, les micro-organismes vont soit libérer de l'azote soit en consommer.

Un C/N faible signifie que le sol contient beaucoup d'azote (minéralisé), plus que ce que la biomasse microbienne peu consommer (organisation). Par conséquent, il y aura minéralisation de l'excédent en azote. A contrario, un C/N fort est du à de faibles concentrations en azote qui va donc être un facteur limitant de l'activité microbienne qui va consommer l'azote minéral du sol. Il s'agit alors d'organisation.

Le NH_4^+ produit par minéralisation ou issu de fertilisants peut donc être organisé si l'azote vient à manquer dans le sol, être fixé ou bien être transformé en ions nitrates. Cette transformation se nomme la nitrification, elle est composée de deux sous processus : la nitrification (le passage de NH_4^+ en NO_2^-) et la nitrification (NO_2^- vers NO_3^-), processus biologique dépendant des conditions pédoclimatiques.

Les sorties d'azote :

Les plantes sont des consommatrices d'azote. Grâce à leurs racines, elles peuvent prélever l'azote sous ses formes d'ions nitrates et dans une moindre mesure ammonium. Il s'agit de l'absorption racinaire.

La dénitrification est un processus lié à la respiration anaérobie qui va transformer les ions nitrates en nitrites et qui par la suite redeviennent du diazote (N_2).

Le lessivage des nitrates, ou plus communément appelé la lixiviation correspond au transport des ions nitrates par la percolation de l'eau dans le sol. En effet, les ions nitrates représentent la forme la plus soluble de l'azote et sont ainsi facilement transportables par les mouvements de l'eau les entraînant ainsi hors de la zone d'absorption racinaire, il y a alors lixiviation.

Les ions ammoniums du sol peuvent se volatiliser dans l'atmosphère, ces pertes très variables puisqu'étroitement liées aux conditions pédoclimatiques, correspondent à la volatilisation d'ammoniac (Schvartz *et al.*, 2005).

1. Facteurs influençant la lixiviation

Le cycle de l'azote se compose donc de différents processus physico-chimiques et biologiques qui dans un contexte agricole vont avoir des répercussions sur l'environnement. L'entraînement des nitrates par la percolation de l'eau dans les sols constitue la perte en azote la plus importante (Cameron & Haynes, 1986). Plusieurs facteurs vont influencer la lixiviation des nitrates.

2. Pédologie et climat

Le type de sol influe sur sa réserve utile et donc sur le cycle de l'azote. Il s'agit de la quantité maximale d'eau qu'un sol peut retenir et qui est utilisable par les plantes. Selon sa texture, la réserve utile va être plus ou moins grande en fonction de la proportion en argile, limons, sables et la charge en cailloux. Ceci a un impact sur le drainage et la concentration en nitrate de l'eau de drainage. En fonction de sa qualité (concentration en matière organique, capacité d'échange cationique, pH), le sol dispose de qualités physico-chimiques et biologiques qui vont contrôler la minéralisation, l'organisation, l'absorption racinaire et donc la lixiviation (Vertès *et al.*, 2009 ; Jégo, 2008 ; Benoit, 2014 ; Cameron & Haynes, 1986).

Les variations climatiques influent également le cycle de l'azote de façon indirecte. En effet, le climat, par le biais de la température et des précipitations, opère sur l'activité biologique du sol. Or cette dernière joue un rôle essentiel dans la minéralisation et l'organisation de l'azote dans le sol. Il en

va de même pour la croissance des végétaux, en cas de chaleur, d'ensoleillement et d'humidité propice au bon développement des plantes l'absorption racinaire sera plus importante.

La quantité d'eau drainée entre en compte dans la lixiviation des nitrates. Lorsque les précipitations sont supérieures à l'évapotranspiration et que la réserve utile du sol est saturée cela engendre du drainage. Ces mouvements multidirectionnels (ruissellement et percolation) de l'eau dans le sol, vont emporter la forme soluble de l'azote, les nitrates, hors de la zone d'absorption racinaire (Jego, 2008).

3. Les pratiques agricoles

Prairie :

Les terres agricoles du département du Doubs sont principalement occupées par des prairies (>50% des terres cultivables). Contrairement aux cultures annuelles, les systèmes prairiaux occupent le sol tout au long de l'année. Un avantage à cette occupation permanente des sols est une meilleure valorisation de l'azote produit par minéralisation en période de drainage ainsi qu'un meilleur stockage de l'azote par accumulation de matières organiques (Vertès *et al.*, 2009 ; Vertès *et al.*, 2009 ; Recous *et al.*, 1997 ; Vertes et Decau, 1992). Les prairies ne sont pas exploitées de la même manière, certaines sont uniquement pâturées ou fauchées et d'autres sont mixtes (fauches + pâtures). Le raisonnement de la fertilisation azotée est donc complexe vis-à-vis des modes d'exploitation et de la composition en graminées et légumineuses (Simon, 1999 ; Laurent *et al.*, 2000).

Sous prairies fauchées, les pertes par lixiviation sont faibles à modérées pour des apports inférieurs à 400 kg N/ha/an et donc importantes au-delà de cette valeur. Sous un Ray-grass anglais et pour une fertilisation inférieure à 200 kg N/ha/an les pertes en azote sont en moyenne de moins de 20 kg N/ha/an (Simon et al, 1997). Dans le cas du Doubs, les pratiques de fertilisation sont nettement inférieures aux valeurs seuil présentées dans ces études.

Sous prairies pâturées, Simon (1999) a observé des pertes supérieures aux prairies fauchées. La présence des animaux sur la parcelle va restituer de l'azote à hauteur de 80 % sous formes de déjections et pissats (Laurent *et al.*, 2000) et plus le chargement (UGB JPE/ha/an) est important, plus les risques de pertes en nitrates sont élevés. Quand le chargement est supérieur à 1.8 UGB/ha (système intensif) la lixiviation devient importante (Gall et Cabaret, 2002). La lixiviation des nitrates reste faible pour un chargement égal ou inférieur à 1.5 UGB/ha (Vertès *et al.*, 2007). Sous prairie pâturée de graminées pures et pour une fertilisation inférieure à 200 kg N/ha/an, les pertes en azote sont généralement de moins de 40kg N/ha/an (Simon *et al.*, 1997).

Cultures annuelles :

Une gestion responsable de la fertilisation azotée permet de satisfaire les besoins de la plante en azote et d'éviter les pertes vers l'environnement. (Shepherd *et al.*, 2007). Une dose optimale peut alors être définie, cette valeur correspond à la plus petite quantité d'azote à apporter pour obtenir un rendement maximal. Un apport d'azote supérieur à la valeur optimale conduit à des risques de lixiviation des nitrates plus importants (Simon & Lecorre, 1992 ; Jego, 2008). Cependant, même avec un apport égal ou inférieur à la dose optimale, la lixiviation reste présente sous culture annuelle mais à des niveaux faibles à modérés. L'apport de fertilisants azotés s'emploie avec l'intention d'obtenir un rendement maximum, or, plus les résultats s'écartent de cet objectif, plus la lixiviation est importante (Simon & Lecorre, 1992).

Outre la quantité d'apport de fertilisants, la période à laquelle ils sont effectués influence la lixiviation. En effet, au printemps les plantes ont besoin d'azote pour assurer leur croissance, par conséquent, l'azote apporté sera en grande partie consommé d'autant plus que l'évapotranspiration est supérieure aux précipitations. En marquant des engrais azotés avec l'isotope N¹⁵ Adiscot (2005) et Recous (1997) ont démontré que les pertes d'azote, provenant des engrais, par lixiviation sont très faibles pendant la culture. L'interculture et la période hivernale correspondent à des périodes de hauts risques de lixiviation. Afin de palier à cette problématique, l'implantation de cultures intermédiaires piège à nitrates (CIPAN) apparaît comme une solution adaptée et efficace. La croissance de ces cultures ne nécessite pas d'apports. Cela aura pour conséquence de piéger l'azote minéral du sol en période de drainage (Beaudoin, 2010). Les effets sur la production de la culture

suivante sont également variables. Une bonne gestion de son raisonnement en fertilisation est nécessaire pour éviter des effets dépressifs sur la culture suivante (ACO & CEVA, 2006). La minéralisation des CIPAN est en générale assez lente et se réalise sur plusieurs années. Ces cultures peuvent donc limiter les fuites azotées sur une année mais les augmenter ensuite si elles ne sont pas prises en compte dans le calcul de la fertilisation (Benoit, 2014). La gestion des repousses et des résidus de récoltes permet également de réduire les pertes par lixiviation, leur efficacité est dépendante de l'espèce considérée (Beaudoin, 2010)

Gestion des effluents :

La gestion des effluents d'élevage impact directement la lixiviation des nitrates sous parcelles agricoles. Les épandages de fumiers de bovins avec un rapport C/N faible présentent des pertes d'azote constantes modérées et sans dépendance de la date d'apport. Ce qui n'est pas le cas des lisiers avec un C/N faible, la lixiviation est plus importante et varie selon la date d'apport. La lixiviation dépend de l'état physique des effluents (solide/liquide) et des conditions pédoclimatiques (Graux *et al.*, 2013). L'épandage d'effluents participe à la croissance directe de la plante mais contribue aussi à la minéralisation de l'azote. Cet aspect doit être pris en compte dans les pratiques de fertilisation (Tourenne, 2012). Suivant la forme de l'effluent, le mode et les conditions d'épandage, des risques de volatilisation interviennent et sont difficilement estimables compliquant le raisonnement de la fertilisation (Schvartz *et al.*, 2005). Pour finir, le mode de stockage des effluents influe sur les teneurs en azote de l'effluent et de manière indirecte sur la lixiviation.

Travail du sol :

Le type de travail du sol a un impact sur le cycle de l'azote, la structure et les propriétés hydriques du sol. Il favorise par exemple la minéralisation par une meilleure oxygénation du sol (Schvartz *et al.*, 2005). Cependant, il n'existe pas de nos jours de consensus concernant l'impact de pratiques telles que le non labour sur le drainage et les flux de nitrates (ACO & CEVA, 2006). En effet, les résultats disponibles sur le sujet peuvent être contradictoires. En cas de retournement de prairie, une minéralisation (300 à 700 kg N/ha/2 ans) est observable sous la culture suivante. Cet effet de fertilisation naturelle est profitable du point de vue agronomique mais provoque un risque important de lixiviation (CIVAM Bretagne, 2010). Le retournement d'une prairie non pâturée et préalablement fauchée permet de réduire les risques, mais le couplage avec un apport organique avant retournement les augmentent. La culture implantée après un retournement a également son importance. Les successions culturales permettant de prélever l'azote disponible en grande quantité et sur une longue période réduisent en effet les risques de lixiviation (De Toffoli *et al.*, 2013 ; CIVAM Bretagne, 2010).

B. La modélisation du cycle de l'azote à l'échelle du bassin versant de la Loue

La volonté de la Chambre Interdépartementale d'Agriculture du Doubs et Territoire de Belfort de quantifier les flux d'azote sous parcelles agricoles du bassin versant de la Loue est une entreprise complexe. Cela nécessite d'effectuer une enquête exhaustive des pratiques agricoles du bassin versant pour l'année précédente. Cette campagne nécessite plusieurs semaines afin de récolter puis compléter la base de données. Une évaluation qualitative des risques de lixiviation sous les parcelles agricoles sur le modèle de la méthode Territ'Eau a déjà vu le jour (Vertès *et al.*, 2012). Mais la quantification des flux n'a pas encore pu être acquise. Pour pallier à ce problème, plusieurs méthodes existent. Les méthodes directes, avec l'utilisation d'instruments tels que les bougies poreuses, les réseaux de drainage et les lysimètres permettent l'obtention de données réelles de lixiviation des nitrates. Et des méthodes indirectes, avec la réalisation de bilans d'azote, les mesures de reliquats d'azote minéral, le suivi d'un isotope lourd et stable de l'azote, le ^{15}N (méthodes isotopiques) et la modélisation de ces flux via des modèles agronomiques. Cependant l'utilisation de modèles nécessite un travail d'évaluation et de validation des performances de simulations et ce grâce à des données réelles observées. Une familiarisation est nécessaire avec le ou les modèles utilisés pour parvenir à comprendre leur fonctionnement technique et mécaniste. Il faut aussi vérifier les simulations produites avant de pouvoir travailler à leur analyse et ainsi évaluer les performances du modèle.

1. Les différents modèles aux différentes échelles

De très nombreux modèles existent déjà (Cannavo *et al.*, 2008) et permettent des modélisations à différentes échelles. Le modèle SWAT (Soil and Water Assessment Tool) est un outil d'évaluation d'un bassin versant qui a été développé par des chercheurs du Département de l'Agriculture des Etats-Unis (USDA) (Arnold *et al.*, 1993 ; Arnold *et al.*, 1998). Il permet de manipuler et d'analyser de nombreuses données hydrologiques et agronomiques en vue de prédire les effets de la gestion des terres sur la ressource hydrique. Il simule les transferts de nutriments, de sédiments et pesticides vers le réseau de drainage et vers les aquifères. SWAT simule également les rendements des cultures en place, en fonction des conditions environnementales et des techniques de culture. Le modèle est surtout utilisé en Amérique du Nord et en Europe dans la production de flux diffus de sédiments, de nutriments et de pesticides (Beaudin, 2006). Il est utilisé en France par Irstea (anciennement Cemagref) pour évaluer les risques de pollutions diffuses par l'azote d'origine agricole dans deux bassins versants des pays de la Loire (INRA, 2004).

STICS (Simulateur multidisciplinaire pour les cultures standard), développé à l'Inra depuis 1996, modélise le développement d'une culture, voire de cultures associées ou encore d'une succession culturale, en fonction de tous les paramètres agronomiques (climat, sol, et pratiques agricoles) à l'échelle de la parcelle (Brisson *et al.*, 2009). Bon nombre de modèles existent et permettent en plus d'autres éléments de simuler les flux d'azotes à l'échelle d'une parcelle, comme DAISY (Hansen *et al.*, 1990) et PASTIS (Lafolie, 1991).

2. Les modèles choisis par la CIA 25/90

La CIA 25/90 utilise les modèles Syst'N et FarmSim. Dans cette étude des résultats provenant de ces deux modèles sont présentés. Il convient donc de présenter ces deux outils.

a) Syst'N

Le modèle dynamique de simulation Syst'N, créé par le Réseau Mixte Thématique Fertilisation et Environnement, résulte de la collaboration entre l'INRA et huit instituts techniques agricoles dans le cadre du projet AZOSYSTEM. L'outil a pour objectif principal de permettre l'établissement d'un diagnostic environnemental qui puisse contribuer *in fine* à améliorer la gestion de l'azote (Parnaudeau *et al.*, 2012). Syst'N fonctionne à l'échelle de la parcelle et à l'échelle temporelle de la rotation culturale et est utilisable dans les principaux systèmes de culture en France. Cette conception a pour but de répondre à la demande d'agents, d'avoir un outil d'évaluation des flux d'azote et d'estimation des impacts environnementaux, prenant en compte les spécificités de chaque contexte. Ceci permet alors une comparaison entre plusieurs parcelles, scénarii climatiques et modes de conduite.

L'outil Syst'N est constitué d'un simulateur basé sur un modèle dynamique de simulation des flux d'azote, dans le système sol-plante-atmosphère, fonctionnant au pas de temps journalier et permettant l'enchaînement de plusieurs années culturales. Mais il est aussi composé d'une base de données permettant de répertorier les différentes simulations des utilisateurs et de les consulter.

Le modèle Syst'N (Figure 4) se veut être un regroupement des différents modèles spécifiques développés auparavant par l'INRA, conservant un niveau de complexité cohérent entre les différents modules et intégrant les connaissances récentes sur les flux d'azote (Parnaudeau *et al.*, 2012). L'outil Syst'N intègre les modules suivants :

- AZOFERT pour la représentation de la minéralisation, de la matière organique et des résidus de récolte
- AZODYN calculant l'absorption d'azote par les cultures
- NOE pour la simulation des flux de N₂O par dénitrification
- Volt'air intégrant la volatilisation d'ammoniac aux champs
- STICS et LIXIM pour le bilan hydrique et la perte par lixiviation des nitrates

Ce modèle prend donc en compte tous les processus du cycle de l'azote et intègre les connaissances les plus récentes sur les flux d'azote (Parnaudeau *et al.*, 2012).

Volt'air (Genermont et al) : en v2 !
 AZOFERT (Machet et al), Morvan et

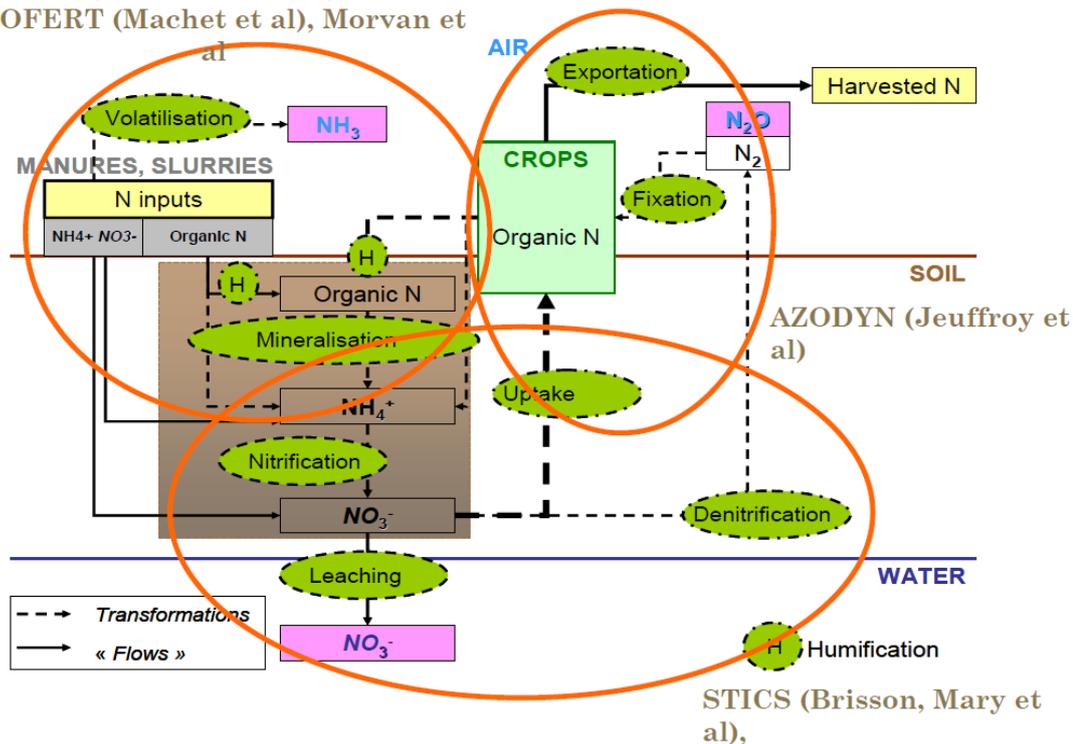


Figure 4 : Assemblage des différents formalismes du modèle Syst'N

En ce qui concerne la lixiviation, le modèle Syst'N combine les modèles LIXIM et STICS pour effectuer les calculs nécessaires correspondant aux processus intervenant dans le module transport de l'eau et des solutés. L'outil simule l'évolution de l'humidité du sol et de la quantité de nitrates dans un profil de sol composé en deux ou trois horizons de 30 cm d'épaisseurs suivant les renseignements apportés par l'utilisateur. Chaque horizon est découpé en tranches de 1 cm d'épaisseur (couches élémentaires) ce qui correspond à la limite de convergence spatiale du modèle. Le module transport de l'eau et des solutés est alors considéré comme un modèle multicouches (« mixing cells model », selon Van der Ploeg *et al.*, 1995). Pour chacune des couches élémentaires, le drainage a lieu quand l'humidité calculée est supérieure à l'humidité à la capacité au champ et que le prélèvement des cultures s'arrête lorsque la réserve utile (RU) est épuisée. Le transfert d'eau et de soluté (ici le nitrate) entre couches est décrit selon l'algorithme de I.G. Burns (1976) (ANNEXE V). L'eau et le nitrate se déplaçant de la couche c-1 à la couche c sont supposés se mélanger d'une manière homogène dans la couche c. Si la teneur en eau de la couche c excède l'humidité à la capacité au champ, l'eau excédentaire passe dans la couche c+1 immédiatement inférieure. Si la teneur en eau résultante reste inférieure à l'humidité à la capacité au champ, le mouvement d'eau et de soluté s'arrête.

b) FarmSim

FarmSim (Farm Simulation model) est élaboré par l'Unité de Recherche sur l'Ecosystème Prairial (UREP) de l'INRA de Clermont-Ferrand et permet de modéliser une ferme dans son intégralité. Initialement développé afin de standardiser les calculs des émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) des exploitations agricoles européennes, il permet désormais d'estimer les rendements, les pertes en azote et bien d'autres éléments. Cet outil est composé de trois modules : le module bâtiments d'élevage (HOUSING-IPCC), le module grandes cultures (CERES-EGC) et le module prairie (PaSim).

PaSim (Pasture Simulation model) a été adapté du modèle HPM (Hurley Pasture Model) de Thornley par Riedo *et al.* (1998).

Le modèle CERES-EGC (Crop Environment REsource Synthesis - Environnement et Grandes Cultures) est développé depuis 1993 à l'UMR Environnement et Grandes Cultures (devenue UMR EcoSys en 2015) de l'INRA de Paris/Grignon.

PaSim

La principale application de cet outil est l'étude des impacts et conséquences des changements climatiques sur les services des écosystèmes prairiaux et sur les émissions de gaz à effet de serre. Son domaine de validité correspond aux conditions de sols et de climats européens, à des prairies permanentes ou semées, à des systèmes d'élevage allaitant ou laitier et pour des races bovines françaises (Graux *et al.*, 2012).

PaSim modélise le fonctionnement d'un écosystème prairial (sol, végétation, pâturage) à l'échelle spatiale d'une parcelle et l'échelle temporelle d'une journée. La végétation est simulée à l'échelle de la communauté sous la forme d'une « plante moyenne », sans considération de l'hétérogénéité qui existe au sein de la parcelle.

Modèle mécaniste et déterministe (Martin *et al.*, 2011) PaSim s'articule de plusieurs modules représentant les différents processus existant au sein des compartiments suivant :

- la végétation : photosynthèse, allocation de biomasse, stades de développement et turnover de la matière végétale, effets de différents stress.
- le microclimat : interception des radiations et bilan énergétique du couvert, bilan énergétique du sol.
- le troupeau : production de lait ou de viande.
- la biologie du sol : processus biologiques dans le sol.
- la physique du sol : cycle de l'eau et température dans les différents horizons du sol (Graux *et al.*, 2011).

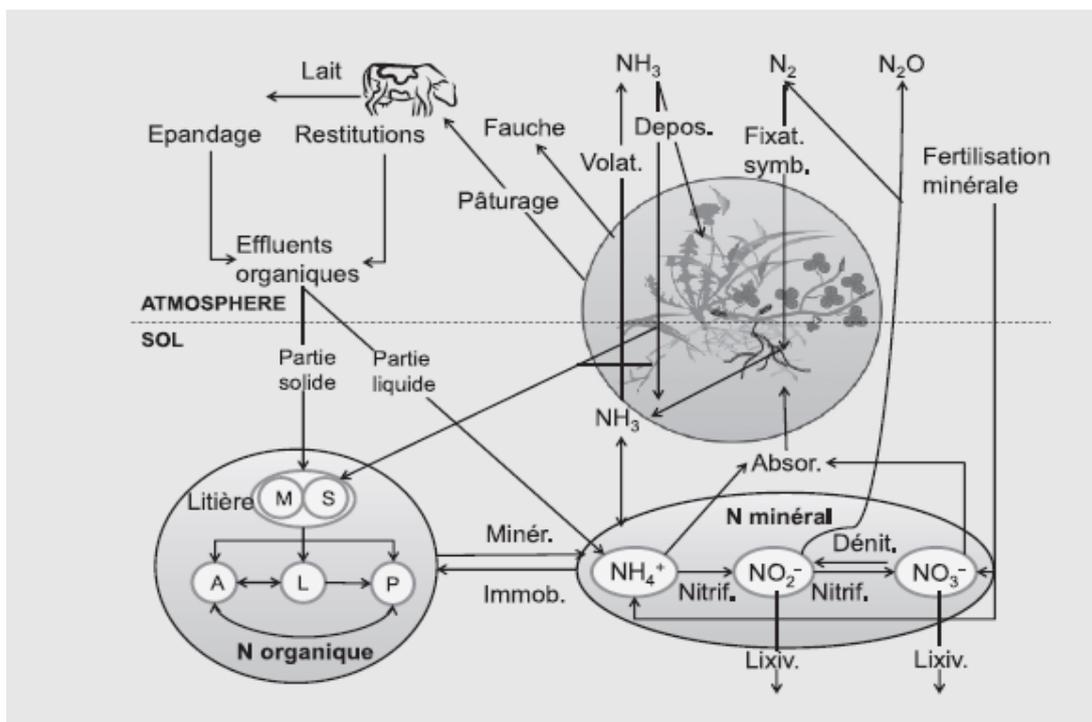


Figure 5 : Processus impliqués dans le cycle de l'azote modélisés dans PaSim (Graux *et al.*, 2013).

PaSim modélise le cycle de l'azote et les différents processus intervenant dans ce dernier via différents procédés (Figure 5). L'azote dans le sol est séparé en deux parties, l'azote organique représenté par cinq compartiments : Métabolique (M), Structural (S), Actif (A), Lent (L) et Passif (P) et l'azote minéral (ions nitrates et ammonium). Le module biologie du sol calcule les concentrations en azote minéral en prenant en compte les apports d'engrais, la minéralisation, l'absorption racinaire et la lixiviation. L'eau présente dans les horizons du sol est calculée en fonction des précipitations (pluie et neige), de l'évaporation, de la transpiration, de l'absorption racinaire, de la ruissellement, de l'infiltration d'eau et des remontées capillaires (Riedo *et al.*, 2000).

CERES-EGC

Adapté de la famille de modèles de culture CERES-EGC développés aux Etats-Unis dans les années 1980 par Jones et Kiniry (Inès *et al.*, 2001). CERES-EGC était à l'origine d'un modèle d'aide à la décision. Désormais, cet outil simule la lixiviation des nitrates et les émissions de gaz à effet de serre. Le modèle comporte un certain nombre de cultures et est capable de simuler les rotations entre ces cultures ainsi que les périodes de jachère et les cultures dérobées (Gabrielle, 2006). CERES-EGC a été utilisé et évalué pour la simulation de la lixiviation dans des contextes différents (Gabrielle & Kengni, 1996 ; Gabrielle *et al.*, 1999 ; Popova & Kercheva, 2004) ainsi que pour la simulation des teneurs en azote minéral du sol (Gabrielle & Kengni, 1996 ; Gabrielle *et al.*, 2002).

Modèle mécaniste, CERES-EGC s'articule avec différents modules :

- biologique : photosynthèse, allocation de biomasse et croissance, développement de la plante, turnover de la matière végétale, confrontation de la demande de la plante à la disponibilité des éléments dans le sol.
- physique : transferts de chaleur, d'eau et de solutés dans le sol et bilan hydrique.
- microbiologique : processus biologiques du sol (Lehuger, 2009).

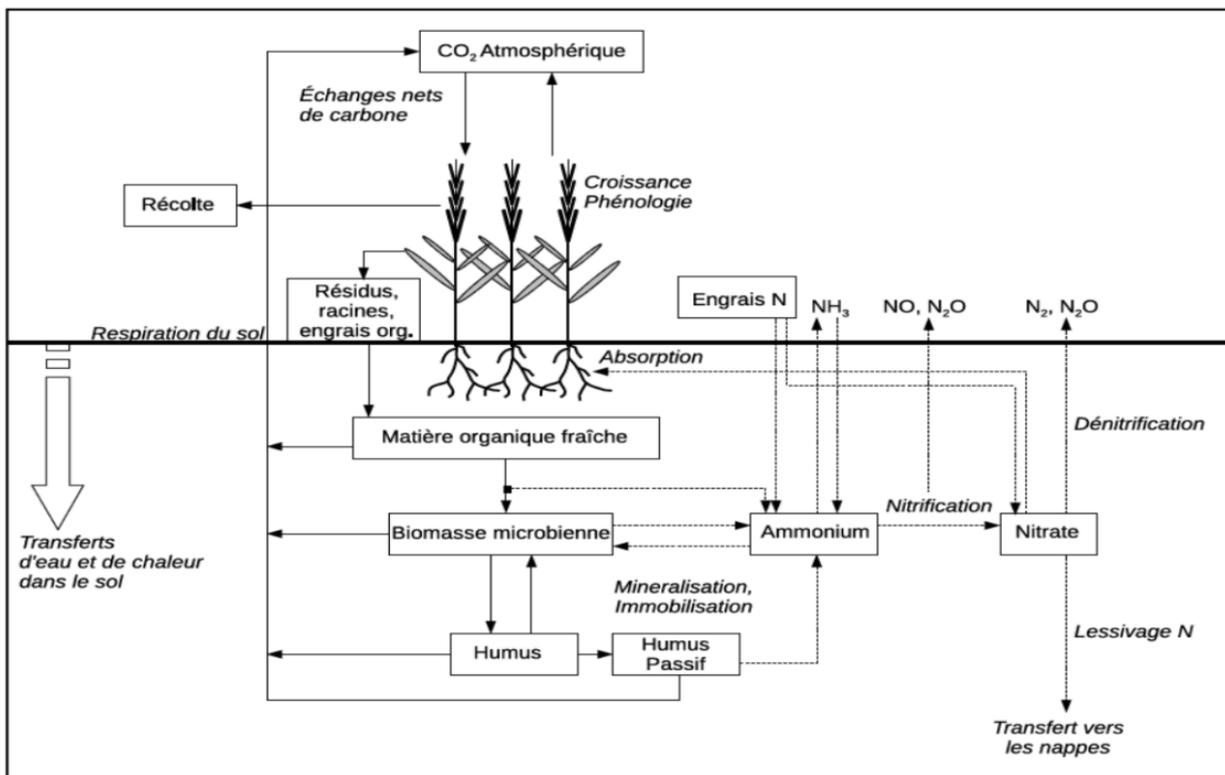


Figure 6 : Schéma conceptuel du modèle CERES-EGC (Lehuger, 2009)

Le module biologique est spécifique à chaque type de cultures gérées par CERES-EGC. A contrario, les modules du sol sont communs à toutes les cultures (Gabrielle, 2006). Le schéma conceptuel de CERES-EGC, présenté en Figure 6, résume les différents processus pris en compte et les flux entre les différents compartiments. L'azote organique du sol est tout comme PaSim réparti en cinq pools et l'azote minéral est présent sous forme d'ions nitrates et ammonium. Les valeurs en azote des différents pools sont calculées en fonction des apports en engrais et des processus intervenant dans le cycle de l'azote (nitrification, dénitrification, minéralisation et immobilisation, prélèvements par la plante) (Gabrielle *et al.*, 2006). Le bilan hydrique est calculé dans chaque horizon de sol en fonction des précipitations, de l'irrigation, de la transpiration, de l'évaporation du sol, du prélèvement d'eau par les plantes, du ruissellement et du drainage (Ritchie, 1998).

A partir des sorties fournies par ces trois modules à pas de temps journalier, FarmSim réalise un bilan en agrégeant les données. Seuls les modules PaSim et CERES-EGC seront utilisés dans cette étude.

Le module d'eau du sol de FarmSim utilise une loi de Darcy généralisée et semi empirique pour simuler les mouvements de l'eau dans le profil de sol en conditions saturées et insaturées (Lehuger, 2009). Le contenu en eau d'un horizon de sol est calculé en fonction des précipitations (pluie et neige), de l'évaporation, de la transpiration, de l'absorption racinaire, du ruissellement, de l'infiltration d'eau et des remontées capillaires (Riedo *et al.*, 2000). Les pools d'eau du sol modélisés sont SSW (eau liquide présente à la surface du sol), l'eau contenue dans la neige et la glace, et le contenu en eau des différents horizons de sol. Le calcul des changements de contenu en eau dans les différents pools à chaque pas de temps se produisent dans un ordre déterminé.

La quantité d'eau évaporée est soustraite à SSW. Si l'évaporation est supérieure à SSW, le reste est soustrait à l'eau provenant de la neige. Si l'évaporation est supérieure à ces deux quantités, le reste est soustrait à l'eau du premier horizon de sol.

Les précipitations sont distribuées soit dans SSW soit dans la neige si la température est négative. La fonte de la neige et le gel sont alors ajoutés ou soustraits à SSW et à l'eau présente dans la couverture neigeuse.

Les flux d'eau entre horizons (infiltration, drainage, remontées capillaires) dépendent du contenu en eau du sol dans les différents horizons, du potentiel de matrice, de la conductivité hydraulique, des contenus en eau à la capacité au champ et à saturation ainsi que la profondeur des horizons. Le flux d'eau drainée est instantanément transmis de l'horizon drainé à l'horizon inférieur qui peut à son tour perdre de l'eau par drainage. De la même manière que le drainage est calculé en commençant de l'horizon de sol le plus proche de la surface au plus profond, les remontées capillaires sont calculées du bas vers le haut. Si l'eau présente dans SSW et la neige est supérieure à zéro après soustraction des infiltrations à SSW, l'eau liquide de SSW est considérée comme perdue par ruissellement (Riedo *et al.*, 2000).

Le contenu en eau des différents horizons de sol est calculé en distribuant l'eau infiltrée dans le profil par un principe de cascade. Le modèle utilise une limite inférieure (point de flétrissement permanent) et une limite supérieure d'humidité (humidité à la capacité aux champs) pour calculer ces infiltrations (Nain & Kersebaum, 2004). Le calcul des transferts d'eau repose sur une équation pour la courbe de conductivité de l'eau (qui dépend de la conductivité hydraulique et de la différence entre les contenus en eau du sol, de la texture et de la classe hydrologique du sol) et une autre pour la courbe de rétention de l'eau (qui dépend du contenu en eau du sol et de celui à saturation ainsi que de la texture) (Popova & Kercheva, 2004).

En cas de précipitations, le ruissellement est calculé et l'eau en excès qui reste après ruissellement est déplacée dans le premier horizon du profil. La quantité d'eau qu'un horizon de sol peut contenir se situe entre le contenu en eau réelle et celui à saturation. Si l'eau qui reste après ruissellement est inférieure ou égale à la capacité de rétention, le nouveau contenu en eau du sol est calculé avant le calcul du drainage. Si ce nouveau contenu en eau de l'horizon de sol est inférieur à la limite supérieure d'humidité au drainage (capacité au champ), il n'y a pas de drainage dans l'horizon inférieur. Si elle y est supérieure, du drainage a lieu jusqu'à l'horizon inférieure d'après une vitesse constante (Nain & Kersebaum, 2004).

3. Limites des modèles et précautions

Le modèle Syst'N est très utilisé en France, cependant il dispose de certaines limites. L'utilisation de cet outil par la CIA 25/90 fut un échec, en effet la particularité des sols du Doubs est de contenir beaucoup de NH_4^+ de par la dominance des prairies, des fortes quantités de matières organiques et de la pluviométrie abondante. Or le modèle ne possède pas de module prenant en compte ce type d'azote dans le sol. Par conséquent, lors du drainage tout l'azote est lessivé. Concernant la modélisation du drainage, le module permettant le calcul du bilan hydrique ne prend pas en compte la neige lorsque les températures sont négatives. Et le module de transport de l'eau ne permet pas de prendre en compte les mouvements préférentiels de l'eau dans le sol. Syst'N a été conçu pour être utilisé sur des exploitations de grande culture, polyculture-élevage et légumes de plein champ, il n'est donc pas adapté aux exploitations laitières du Doubs.

Le modèle FarmSim est en cours de construction, les premiers tests effectués sur le territoire du Doubs ont montré de mauvais résultats dans la simulation de l'azote minéral dans le sol, de la minéralisation et du lessivage des nitrates. La modélisation des quantités de N-NH_4^+ du sol n'est

fournie par le modèle CERES-EGC que sur le premier horizon de sol, ce qui peut impacter la simulation des quantités de N-NO₃- du sol, ces deux formes étant liées à travers les processus du sol. Le travail du sol n'a pas pu être renseigné par l'utilisateur pour des raisons de conversion des données du format Syst'N au format FarmSim. Les résidus de récolte des cultures étaient donc par défaut systématiquement enfouis à la date d'arrêt de la culture, ce qui ne correspond pas toujours à la réalité des pratiques. Si le modèle CERES-EGC demande à l'utilisateur de choisir le type d'engrais apporté, ce n'est pas le cas de la version utilisée du modèle PaSim (Vieille, 2016).

IV. Matériel et méthodes

Depuis 2010, le bassin versant de Plaisir Fontaine est étudié par la CIA 25/90. Depuis septembre 2015, le bassin versant voisin, Lods, a été équipé de plaques lysimétriques pour quatre situations. Ce sont donc ces deux sites d'étude qui sont utilisés dans cette étude.

A. Les modèles Syst'N et FarmSim

1. Paramètres d'entrée

a) Syst'N

L'outil Syst'N nécessite des données climatiques, agronomiques et pédologiques pour fonctionner (ANNEXE I). Chaque système de culture (situation) est représenté à travers le modèle par la description générale de la parcelle, sa pédologie, son historique, la succession des cultures et son itinéraire technique (fertilisation organique et minérale, irrigation, travail du sol, pâture, fauche, culture piège à nitrate).

- Description de la situation :

Ce premier onglet permet de nommer la parcelle et de définir la période de simulation désirée. Les données climatiques doivent être préparées et disposées dans un fichier climatique qui sera alors renseigné dans cette partie. Pour chaque année les données climatiques sont les suivantes : température moyenne (°C), précipitation (mm), évapotranspiration (mm) et rayonnement global (MJ/m²).

Les données disponibles correspondent aux campagnes de 2010/2011 jusqu'à 2016/2017 pour le bassin versant de Plaisir Fontaine et 2014/2015 à 2016/2017 pour le bassin versant de Lods. Les bassins versant n'étant pas équipés de stations météo propres, un travail d'interpolation de certaines variables météorologiques a été réalisé pour la zone. Le calcul des variables météorologiques pour la zone d'étude a été simplifié par l'élaboration d'une équation effectuée au sein de la CIA 25-90 grâce au logiciel Matlab et de la fonction « inverse distance weight » (Broadhurst & Dussouillez, 2013). Les différentes variables météorologiques nécessaires au modèle ne sont néanmoins pas disponibles dans toutes les stations. La provenance des données météorologiques utilisées est la suivante :

Plaisir Fontaine :

Variables	Stations météorologiques utilisées	Distance avec le bassin étudié (en km à vol d'oiseau)	Altitude (m)
Pluie, Température Moyenne	20% Station Météo France de Besançon	16	307
	20% Station Météo France d'Epenoy	15	752
	60% Station Météo France de Pontarlier	30	800
Rayonnement Global/Evapotranspiration	50% Station Météo France de Besançon	16	307
	50% Station Météo France de Sancey-Le-Grand	36	490

Lods :

Variables	Stations météorologiques utilisées	Distance avec le bassin étudié (en km à vol d'oiseau)	Altitude (m)
Pluie, Température Moyenne	100% Station Météo France d'Epenoy	8	752
Rayonnement Global/Evapo-transpiration	50% Station Météo France de Besançon	29	307
	50% Station Météo France de Sancey-Le-Grand	31	490

Les données 2010 n'étant pas toutes disponibles, une extrapolation a été réalisée pour les valeurs du début d'année (Thouvenin, 2014), 2010 ne sera donc pas pris en compte dans l'interprétation des résultats. Les campagnes agricoles disponibles (2011-2016) ont été simulées en double par Syst'N qui reporte les données de 2010-2016 sur la période 2003-2009 afin d'amorcer le modèle.

- Historique cultural

Cet onglet, subdivisé en six petits onglets, renseigne de manière générale le type de conduite et la gestion de la parcelle.

Le système de travail du sol : le labour, le semis direct ainsi que le travail superficiel sont proposés. (Obligatoire)

La gestion des résidus : selon l'onglet, les résidus peuvent être enfouis 1 fois sur 2, enlevés ou brûlés ou toujours enfouis. (Non obligatoire)

La nature des Produits Résiduaires Organiques (PRO) et leur fréquence d'apport : donne la tendance générale d'amendement organique s'il y en a sur la parcelle. Différents PRO sont proposés avec des fréquences d'apports (1 à 3 ans, 3 à 5 ans, 5 à 10 ans et pas d'apports). (Non obligatoire)

La date de retournement et durée de la prairie précédente : pour la date du retournement de la prairie, il est proposé 2 ans, 3 ans et plus et moins d'un an. Pour l'âge, 2 à 3 ans, 4 à 6 ans, 7 à 10 ans et plus de 10 ans. (Non obligatoire)

- Précédent de rotation

Ce paramètre permet d'apporter des informations sur la culture précédente (date de récolte, % de paille exportée, rendement) et le début de la simulation. La date de récolte correspond au début de la simulation du modèle. Cette dernière n'étant pas toujours connue, elle a été établie et validée par un conseiller d'entreprise de la Chambre d'Agriculture. Concernant le pourcentage de paille exportée, il a été choisi 80 % pour les céréales d'hiver (blé, orge, triticale) et le maïs et 70 % pour le colza (Thouvenin, 2014).

- Rotation

Dans cet onglet sont à indiquer les différentes cultures qui se sont succédées ainsi que l'itinéraire technique de chacune :

La description de la culture : date d'implantation et de récolte ainsi que le rendement de la culture. Bien que le rendement observé sur le terrain est à rentrer, il n'existe pas encore de calage avec le rendement estimé par le modèle

Les cultures intermédiaires et repousses : type de culture intermédiaire entre deux successions.

La fertilisation organique : type d'apport organique réalisé, sa date, la dose et le mode d'épandage ainsi que les caractéristiques du produit : taux d'azote total du produit, taux de N-NH₄ (fraction minérale) et taux de matière sèche. Syst'N propose pour chaque PRO des valeurs prédéfinies. Dans cette étude, les valeurs utilisées pour les agriculteurs ne disposant pas d'analyse de leur PRO sont issues des valeurs moyennes départementales et régionales.

La fertilisation minérale : même approche que pour l'organique. Les caractéristiques sont synthétisées par les unités d'azote apportées (kg N/ha)

Les apports étant souvent renseignés par décade dans les enquêtes agricoles, une attention plus particulière a été apportée afin de ne pas placer un apport lors d'un épisode pluvieux et d'éviter ainsi le processus de lessivage par ruissellement. L'hypothèse retenue est que les agriculteurs étaient conscients et sensibles à ce phénomène et n'apportaient donc aucun produit fertilisant en période de pluie (Thouvenin, 2014).

Le travail du sol : la date, le type et la profondeur de l'intervention réalisée.

L'irrigation et la fertigation : la date, le nombre de passage, le volume ainsi que la teneur en azote.

Pour le cas des prairies, deux autres onglets sont à renseigner :

La fauche : la date et la hauteur restante.

Le pâturage : la date de début et de fin de pâturage, la hauteur restante et le type d'animal. Seule la date de fin est prise en compte, la date de début est facultative.

- **Sol**

L'onglet sol permet pour chaque situation de renseigner un type de sol correspondant. Tout d'abord, il faut renseigner le libellé du sol, la description des horizons du sol, les caractéristiques du premier horizon du sol et l'état des horizons en début de simulation (humidité et richesse en azote). La profondeur d'obstacle à l'enracinement et le pourcentage d'argiles décarbonatées peuvent être renseignés mais ne sont pas obligatoires. Des sols pré enregistrés (39) dans le modèle peuvent être choisis. Dans cette étude, les sols ont été caractérisés selon les documents pédologiques du département et selon plusieurs échanges avec un pédologue qui a validé les types de sols. Ces grands types de sol ont été décrits et créés dans Syst'N sous forme de sol personnalisé. Cinq types de sols ont ainsi été déterminés avec une modulation de la matière organique et de la densité apparente selon l'historique cultural des parcelles (prairie ou culture). Les sols hydromorphes étant peu représentés sur le bassin versant, ils n'ont pas été intégrés dans les types de sols (Zanatta, 2015). Toutefois, les caractéristiques locales du terrain (dolines, zone d'affleurement karstique, ...) n'ont pas été prises en compte, tout comme les minorités de type de sol (sols hydromorphes). Durant les simulations du modèle, et après discussion avec les responsables du modèle il a été établi de renseigner pour la profondeur d'obstacle à l'enracinement la profondeur du sol et le pourcentage de N organique a été fixé à 0,1 %.

- **Données mesurées**

Les données mesurées (NO₃ lixivié, NH₃ volatilisé, N₂O et mesures d'azote minéral) sur le terrain peuvent être renseignées dans le modèle. Il est ainsi de comparer les simulations de Syst'N avec les observations. Dans cette étude, la teneur en azote minéral du sol a été renseignée pour les parcelles disposant de reliquats azotés.

b) FarmSim

Comme son homologue Syst'N, le modèle FarmSim nécessite des données d'entrées pour pouvoir modéliser les parcelles et simuler leur évolution au cours du temps (ANNEXE II). Le modèle Syst'N ayant précédemment été utilisé pour la modélisation des parcelles de la zone étudiée, un certain nombre de données d'entrée sont déjà définies. Un programme créé lors des précédents stages permet d'extraire, de convertir et de transférer une partie des données de Syst'N dans le modèle FarmSim. Néanmoins, des correspondances ont dû être réalisées (conversion des unités, correspondances entre les types d'engrais utilisés par les modèles, ...). De plus, les variétés semées, les densités et profondeurs de semis n'étant pas nécessaires à Syst'N, elles n'ont pas été demandées aux agriculteurs lors des enquêtes. Un choix standard a donc dû être fait pour chaque type de culture. Un mode expert a donc été conçu. Sept onglets principaux apparaissent sur l'interface de démarrage de l'outil.

- **Général**

Comporte un court descriptif de la parcelle (nom), la pluviométrie annuelle et la température annuelle moyenne. La localisation de la ferme est aussi renseignée ainsi que les sous modèles utilisés par FarmSim (PaSim, CERES-EGC et IPCC).

- **Sols**

L'onglet sol (Figure 7) permet de rentrer dans le tableau suivant les différents paramètres nécessaires au bon fonctionnement du modèle.

Nom	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
pH du Sol (-)	7.0									
Profondeur des couches du sol (mm)	20.0	40.0	60.0	100.0	200.0	300.0				
Profondeur de la dernière couche du sol (mm)	450.0									
Masse volumique (g/cm-3)	1.519325139312...	1.519...	1.519...	1.519...	1.519...	1.519...				
Teneur en carbone organique (%)	3.64	3.64	3.64	3.64	3.64	3.64				
Teneur en gravier (%)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1				
Fraction d'argile de la texture (-)	0.156	0.181	0.252	0.292	0.347	0.366				
Fraction limoneuse de la texture (-)	0.05	0.045	0.034	0.024	0.036	0.039				

Figure 7 : Tableau sol à renseigner dans FarmSim

La typologie des sols utilisée dans FarmSim est la même que celle de Syst’N. La description des sols du bassin versant étudié est donc réalisée à partir de la carte pédologique de Besançon (Gaiffe *et al.*, 2002), puis affinée et validée à partir de données issues de relevés de terrain, d’analyses effectuées par la CIA 25/90 et à dire d’experts. Les paramètres non décrits sont estimés par un programme interne à FarmSim prévu à cet effet.

- **Bâtiment**

Cet onglet est essentiellement utilisé lorsque l'utilisateur souhaite faire un diagnostic des émissions de gaz à effet de serre. L'étude portant sur les pertes en nitrates, cet onglet a donc été pré-rempli avec un ingénieur de l'INRA de Clermont-Ferrand et est similaire pour toutes les parcelles simulées. Les paramètres présents dans cet onglet n'impactent pas les résultats des simulations du drainage et de la lixiviation.

- **Parcelles**

Cet onglet permet d'ajouter une parcelle dans FarmSim, en cliquant sur **Ajouter**, de nouvelles fonctionnalités apparaissent pour pouvoir renseigner le nom de la parcelle, sa description, sa surface, sa pente, son exposition, son altitude ainsi que le sol associé (si déjà rentré dans le modèle)

- **Gestion par année**

Cet onglet contient toutes les informations concernant la gestion de la parcelle, il est subdivisé en neuf sous onglets :

Gestion des parcelles : permet de sélectionner une parcelle en cliquant sur son nom puis sur **Afficher**. La sélection effectuée, il devient alors possible d'ajouter le nombre d'années souhaité. Il faut alors cliquer sur une année puis sur **Afficher** pour pouvoir compléter les sous onglets suivants.

Météo : la concentration de CO₂ dans l'air est prédéfini, ainsi que la quantité de NH₃ il faut alors chercher le dossier météo qui aura été créé par avance sous la forme d'un dossier contenant chaque année sous format .csv et présentée sous la forme suivante :

Jour	Température maximum	Température minimum	Précipitation	Rayonnement global	Humidité relative	Vent
------	---------------------	---------------------	---------------	--------------------	-------------------	------

Puis, le fichier doit être placé dans le dossier « meteo » du modèle. Tout comme Syst’N les données météo ne sont pas disponibles sur le site d'étude, par conséquent, leur provenance est la suivante :

Variables	Stations météorologiques utilisées	Distance avec le bassin étudié (en km à vol d'oiseau)	Altitude (m)
Pluie, Température maximale et minimale	20% Station Météo France de Besançon	16	307
	20% Station Météo France d'Epenoy	15	752
	60% Station Météo France de Pontarlier	30	800
Rayonnement Global	50% Station Météo France de Besançon	16	307
	50% Station Météo France de Sancey-Le-Grand	36	490
Vent	Données issues de la plateforme INRA CLIMATIK, Bretenièrre	156	211
Humidité relative	Station Météo France de Sancey-Le-Grand	36	490

La vitesse du vent à deux mètres de hauteur n'étant disponible dans aucune des stations Météo-France proches, les données utilisées ont été fournies par l'INRA de Clermont Ferrand pour une station météorologique située à Dijon. L'hypothèse peut néanmoins être émise que cette approximation a un faible impact sur la lixiviation, malgré un impact direct sur la volatilisation d'ammoniac.

Prairies : les dates de semis, travail du sol, les apports d'engrais azotés minéraux et organiques, les dates de fauches.

Cultures : les dates de semis, densité de semis, travail du sol, les apports d'engrais azotés minéraux et organiques, les dates de récolte, rendement.

Jachère : permet de signifier que la parcelle est laissée en jachère si c'est le cas.

Troupeaux : type de troupeau, nombre d'animaux, dates de pâture, chargement.

Alimentation : données prédéfinies par le mode expert

Etable : données prédéfinies par le mode expert

Intrants : données prédéfinies par le mode expert

- Paramètre de Pasim

Onglet prédéfinis par le mode expert.

- Résultats

Permet de visualiser les résultats des modélisations, pas utilisé dans cette étude car le travail est directement effectué sur le fichier de sortie .csv résultant de la simulation.

2. Paramètres de sortie

a) Syst'N

Les variables de sortie de l'outil Syst'N sont données à une échelle de temporalité d'une journée mais aussi cumulées sur toute la période de simulation (ANNEXE III). Ces variables de sortie sont multiples et sont classées en 6 parties majeures :

- Les pertes d'azote dues à la lixiviation des nitrates, les pertes par ruissellement mais aussi les pertes en N_2O et NH_3 .
- Les quantités d'eau drainées et ruisselées.
- La minéralisation de la matière organique du sol, des résidus de culture ainsi que les produits résiduels organiques.
- Des données liées à la culture, tel que l'indice foliaire, la quantité de matière sèche produite, l'azote absorbé par la culture et l'azote fixé par la culture.
- L'évapotranspiration réelle totale, la quantité d'eau dans le sol sur l'ensemble du profil exploré par les racines et l'humidité du sol pour chaque horizon.
- La quantité totale d'azote dans le sol et sa répartition dans chacun des horizons.

b) FarmSim

Les variables de sortie de l'outil FarmSim sont similaires à celles données par le modèle Syst'N (ANNEXE IV). Les données sont présentées dans un fichier .csv, à l'échelle de la journée. Ces variables de sortie sont multiples et sont classées en 6 parties majeures :

- Les données d'ordre général, comportant le nom de la parcelle, sa surface, la culture en place, la date, le rendement, la production de lait journalière et la matière sèche journalière intégrée.
- Les quantités de carbone dans les cinq pools de la matière organique du sol (Fraction active, lente passive, métabolique, structurelle).
- La production primaire (brute et nette), la quantité de biomasse produite, les échanges avec l'écosystème, la respiration (du sol et de l'écosystème) et l'indice de surface foliaire.
- Les flux d'oxyde nitreux, de méthane et d'ammoniac, les pertes en nitrates et la quantité d'eau drainée
- La minéralisation de l'azote dans le sol et le prélèvement en azote ammoniacal et en nitrates par les racines des plantes.
- Les quantités en NH_4 et NO_3 dans le sol et leur répartition dans chacun des horizons.

3. Méthodologie de validation des simulations

L'évaluation des performances de simulation du modèle FarmSim s'effectue en plusieurs parties permettant de vérifier plusieurs points essentiels de l'outil.

Dans un premier temps, la validation du modèle se fera sur les parcelles retenues pour l'étude du sous bassin versant de Plaisir Fontaine. Des mesures de reliquats effectuées dans certaines parcelles de Plaisir Fontaine donnent accès à la quantité d'azote sous forme de nitrates (N-NO_3^-) dans le sol à un instant donné. La comparaison de ces valeurs mesurées aux valeurs simulées par le modèle à la même date permet ainsi de déterminer si le modèle simule correctement ce premier aspect du processus de lixiviation. Des recherches bibliographiques ont permis l'obtention de valeurs de référence en matière de rendement et la minéralisation. La confrontation de ces valeurs issues de la bibliographie et les valeurs simulées par le modèle détermine la capacité du modèle à simuler des processus intervenant dans la lixiviation des nitrates. Une méthodologie de validation des simulations est alors mise en place pour chaque comparaison entre valeurs simulées et valeurs observées. Un graphique présentant les valeurs simulées en fonction des valeurs observées permet de détecter des schémas systématiques dans les erreurs (Wallach et al, 2006). Pour appuyer l'analyse de ces schémas, des indicateurs quantitatifs sont calculés. Utiliser un seul indicateur renseigne uniquement sur les performances du modèle. Les indicateurs de performances sont ainsi complémentaires et doivent donc être utilisés en combinaison (Bellocchi *et al.*, 2010). Le pourcentage de biais (PBIAS) (équation 1) mesure la tendance moyenne des valeurs simulées à être supérieures ou inférieures aux valeurs observées correspondantes. La valeur optimale est de zéro et des faibles valeurs indiquent des simulations fidèles aux mesures. Les valeurs positives indiquent une surestimation et les valeurs négatives une sous-estimation des valeurs simulées par rapport aux mesures (Moriassi *et al.*, 2007). La relative Mean Square Error (RMSE) est la racine carrée de la moyenne des erreurs élevées au carré. La Relative RMSE (RRMSE), ou RMSE divisée par la moyenne des valeurs mesurées, exprime l'erreur comme une proportion d'erreur par rapport à la moyenne et donne donc une rapide idée du niveau d'erreur (Wallach et al, 2006). Des RRMSE comprises inférieures à 20% peuvent être considérées comme acceptables (Lichtfouse *et al.*, 2011).

Le calcul du pourcentage de biais permet ainsi de déterminer si le modèle sur ou sous-estime les simulations et dans quelle proportion. La RRMSE permettra quant à elle d'accéder à une estimation de l'erreur commise par le modèle lors des simulations. La fonction « gof » du package R « Hydrogof » (Zambrano-Bigiarini M, 2014) a été utilisée afin de calculer ces indicateurs.

$$\text{(Equation 1) Pourcentage de biais : PBIAS} = 100 \times \frac{\sum_{i=1}^n (Si - Oi)}{\sum_{i=1}^n Oi}$$

$$\text{(Equation 2): RRMSE} = \frac{RMSE}{\bar{O}} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Si - Oi)^2}{n}}}{\bar{O}}$$

Avec : Si : les valeurs simulées, Oi : les valeurs mesurées, n : le nombre total de couples mesurée/observée, \bar{O} : la moyenne des valeurs mesurées.

Dans second et dernier temps, la validation du modèle s'effectuera grâce à des données lysimétriques. D'autres lysimètres ont été installés plus récemment sur le bassin de Plaisir Fontaine, le jeu de donnée disponible est plus récent et pas encore utilisable. Depuis l'automne 2015 des lysimètres ont été installés par l'université de Besançon sur le bassin versant de Lods situé à 10 km de Plaisir Fontaine. Bien qu'ils ne soient pas situés sur le bassin d'étude, il s'agit des seules données réelles observées de drainage et de lixiviation des nitrates sur le territoire de la Loue. Il est donc intéressant de simuler ces parcelles avec le modèle FarmSim, ce qui permet de faire une première évaluation des performances de simulation de l'outil avec des données mesurées de drainage et des concentrations en nitrates. La comparaison du drainage sera aussi effectuée par rapport au calcul du bilan hydrique théorique sur les parcelles avec lysimètres. L'évaluation de la lixiviation des nitrates se fera indirectement par l'étude du drainage par mois et par année hydrologique et des concentrations en nitrates par périodes de prélèvements. Les valeurs de drainage issues des modèles FarmSim et Syst'N seront comparées aux valeurs théoriques et observées. Ces outils présentant des sous modèles internes différents pour la simulation du drainage, cela permettra de comparer leurs performances dans la simulation des quantités et des périodes de drainage. Une comparaison des concentrations de nitrates lixiviés par période de prélèvement des lysimètres permet de constater si les modèles sont en accord avec les lysimètres et de regarder les réponses observées et simulées suite à l'apport de fertilisants.

4. Choix des parcelles simulées

Plaisir Fontaine :

Le bassin versant de Plaisir Fontaine est composé de 200 parcelles, cependant la simulation de la totalité de ces parcelles n'est pas nécessaire pour l'évaluation de toutes les performances du modèle FarmSim. Le choix doit se porter sur des parcelles sur lesquelles les renseignements donnés par l'exploitant sont jugés (personnellement) comme fiable. Par ailleurs, une campagne est organisée chaque année par la Chambre d'Agriculture du Doubs et du Territoire de Belfort pour réaliser des reliquats azotés en entrée et en sortie d'hiver sur différentes parcelles. Le choix des parcelles à modéliser pour l'évaluation du modèle va donc se porter sur les parcelles ayant eu un suivi régulier (un minimum de 4 années de reliquats azoté) Après la réalisation du tri, seules 9 parcelles ont été retenues pour l'évaluation de FarmSim. Elles peuvent être regroupées sous 3 catégories : 3 parcelles en prairie permanente, 2 parcelles en culture et 4 parcelles en rotation prairie temporaire/culture annuelle.

Tableau 1 : Données générales des parcelles retenues du bassin versant de plaisir fontaine pour être simulées.

Parcelle	Surface (ha)	Occupation	Type de sol (ANNEXE VI)
AHC5H	1,8	Rotation prairie temporaire / colza / orge d'hiver	D/P
AHC8A	4,52	Rotation orge d'hiver/colza/blé tendre d'hiver	E/C/1
DB22	1,9	Prairie permanente (fauche + pâture)	A/P/1
GBJD2	2,14	Rotation maïs ensilage / orge d'hiver	B/C
GC10	2,78	Rotation prairie temporaire / orge d'hiver (2 ans)/ blé tendre d'hiver	A/P
GPL1D	2,76	Prairie permanente pâturée	B/P/1
GPL18F	9,92	Rotation avoin/blé tendre d'hiver/orge d'hiver/prairie temporaire	A/C/3
GPL20D	5	Rotation prairie temporaire/blé tendre d'hiver/ orge d'hiver (2 ans)	C/C
GPS15	1,39	Prarie permanente pâturée	E/P

Lods :

Le bassin versant de Lods a été équipé, au mois de septembre 2015, de douze lysimètres installés par l'Université de Bourgogne Franche-Comté située à Besançon. Ces dispositifs ont été installés à proximité de la commune de Chasnans sur quatre situations (Tableau 2) représentatives de l'ensemble du bassin versant. Ainsi, trois lysimètres ont été installés dans une prairie sur sol superficiel, trois autres dans une prairie sur sol profond. La même chose a été réalisée pour des parcelles en culture implantées juste après le retournement de la prairie. Ces quatre parcelles bénéficient donc des seules mesures du drainage et de la lixiviation des nitrates du territoire. La simulation de ces parcelles devient donc intéressante pour bénéficier de valeurs observées et permettre une évaluation plus complète du modèle FarmSim.

Tableau 2 : Propriétés physiques du sol pour les 4 situations de Chasnans

	Prairie sol superficiel	Prairie sol profond	Culture sol superficiel	Culture sol profond
Profondeur de sol (cm)	33	90	34	83
Nombre d'horizon	2	3	2	3
Densité apparente	0,9	1,2	1	1,3
C/N premier horizon	10,1	9,96	10	10,5
Texture du premier horizon %Argiles, %Limons, %Sables	31,6 % A, 51,5 %L et 16,9 %S	42,5 % A, 52,2 % L et 5,3 % S	47,7 % A, 47,2 % L et 5,1 % S	43,3 % A, 50,7 % L et 6 % S
Porosité moyenne (%)	65	56	61	52
RU Jamagne (mm)	25	137	25	100

B. Le territoire choisi pour la validation de la démarche

Afin de faciliter cette étude, l'application d'une méthodologie solide est primordiale. Cette dernière doit permettre de réduire l'ampleur du travail tout en conservant une validité correcte pour le territoire.

Cela commence par la délimitation d'un sous bassin versant de la Loue, le bassin versant de Plaisir Fontaine dont l'échelle et les caractéristiques permettent une étude simplifiée et représentative du bassin versant de la Loue. Une fois le sous bassin versant bien défini, une phase d'enquête permet la récolte de données clés dans la description des activités agricoles. Une instrumentalisation et l'application d'actions sur des parcelles cibles permettent l'obtention de mesures servant à l'évaluation des modèles de simulation.

Des études bibliographiques doivent être engagées afin de pouvoir obtenir une méthode d'extrapolation des résultats obtenus sur les parcelles cibles à l'ensemble des parcelles du sous bassin versant puis à l'échelle du territoire de la Loue.

Les performances des simulations par les modèles seront donc évaluées vis-à-vis des mesures observées sur le sous bassin versant et devront faire l'objet de tests de sensibilité.

1. Le sous bassin versant de Plaisir Fontaine

Le site d'étude de la source de Plaisir Fontaine se situe dans le Département du Doubs (région Bourgogne Franche-Comté) et s'étend sur les communes de Bonnevaux le Prieuré, Charbonnière les Sapins, l'Hôpital du Grosbois et Trépot. Localisé sur le Plateau de Valdahon, l'altitude moyenne sur ce bassin versant est de 540 m. Ses limites exactes sont néanmoins incertaines en raison du caractère karstique du milieu. Ainsi son bassin hydrogéologique tronqué comporte de nombreuses inconnues et sa superficie est d'environ 9 à 10 km². Son exutoire est la Source de Plaisir Fontaine située sur la commune de Bonnevaux-le-Prieuré (Cuinet *et al.*, 2012). Peu d'interférences avec d'autres sources d'apports de minéraux d'origine agricole sont à dénombrer et ce bassin versant est surtout de taille réduite (environ 500 ha, 20 agriculteurs).

Une tendance à l'augmentation des teneurs en nitrates dans la Loue apparaît. Au début des années 70, la concentration de nitrates dans la Loue à Chenecey-Buillon (situé à quelques kilomètres après le bassin de Plaisir Fontaine) était de l'ordre de 2 mg/l. En 2002, les teneurs en nitrates avoisinent 8 mg/l (soit une augmentation de 0,07 mg/l/an) (ONEMA, 2012). D'après Chanez *et al.*, 2014, une tendance à la baisse des concentrations moyennes journalières passant de 8 à 6 mg/l en nitrates semble se profiler entre 2003 et 2012. Une variation cyclique est aussi observable avec des maximas mesurés en automne, période à laquelle le drainage reprend et des minimas en été, période pendant laquelle le drainage est interrompu. Récemment, les mesures en nitrates réalisées en différents points du linéaire de la Loue présentent majoritairement des concentrations comprises entre 4 et 6 mg/l tout au long de l'année. Des dépassements fréquents et saisonniers de la limite du très bon état écologique (10 mg/l) surgissent dans les relevés mais ne dépassent en aucun cas la limite du bon état écologique (50 mg/l) (Chronoenvironnement, 2015).

a) Pédologie et Climatologie

Le département du Doubs s'avère être l'un des départements français les plus arrosés avec une moyenne de 1200 mm/an ou 100 mm/mois. Cette pluviométrie importante est due au massif jurassien et au climat montagnard qui l'accompagne. Sous l'effet du changement de gradient thermique, les masses d'air, en s'élevant pour passer les montagnes vont engendrer de la condensation et donc des précipitations.

L'association d'un milieu karstique, d'une pluviométrie généreuse et de sols souvent superficiels (53 % des sols du bassin versant de la Loue, (Tourenne, 2011)) sur le département du Doubs entraîne un risque élevé de lixiviation des nitrates, issu des pratiques agricoles. Lessivés par les eaux de percolation, les nitrates présents dans les sols vont alors emprunter les réseaux de fissures dans le karst avant d'atteindre les rivières.

Le sous bassin versant de Plaisir Fontaine se situant sur les premiers plateaux du massif jurassien, celui-ci présente un bon compromis d'un point de vue climatique. Les températures se situent entre les valeurs maximales souvent observées dans la plaine du Doubs et les valeurs minimales des hauts plateaux.

BASSIN VERSANT	Plaisir Fontaine	Loue
Sol aéré profond	37,1 %	24,5 %
Sol aéré superficiel	40,3 %	52,7 %
Sol aéré très superficiel	22,5 %	8,8 %
Sol mod. hydromorphe	0,1 %	11,1 %
Sol très hydromorphe	0,0 %	3,0 %

D'un point de vue pédologique, le tableau ci-contre donne le pourcentage par type de sol sur le bassin de Plaisir Fontaine et celui de la Loue. Plaisir Fontaine dénombre 37 % de sols profonds contre 24.5 % sur la Loue. Une équivalence entre les deux

en terme de sols superficiels à très superficiels (62.8 % et 61.5 %) bien que les proportions entre les deux soient très différentes. Et une absence de représentation des sols hydromorphes sur le bassin versant de Plaisir Fontaine. Par conséquent, le site d'étude de Plaisir Fontaine ne semble pas représenter parfaitement le bassin versant de la Loue (ANNEXE VI).

b) L'occupation des sols

	Plaisir Fontaine	Loue
Prairies	73,5 %	90,0 %
Cultures	26,5 %	10,0 %
dont maïs	2,4 %	1,6 %

En termes de surface, la part de l'agriculture franc-comtoise représente 44 % de la surface totale de la région. Le milieu agricole franc-comtois est largement dominé par des exploitations d'élevages bovins pour la filière laitière. L'occupation des sols de la Loue avec 90 % de prairies et 10 % de cultures reflète parfaitement

cette domination de l'élevage bovin. L'occupation des sols sur le bassin versant de Plaisir Fontaine correspond à 73.5 % de prairies et 26.5 % de cultures. L'altitude modérée du bassin versant et la présence de sols plus profonds expliquent cette proportion plus importante de cultures. Des cultures qui comme vu précédemment présentent plus de risque de lixiviation des nitrates.

Pour conclure, le site d'étude assure un suivi agricole simple, il est représentatif de la qualité de l'eau et du climat moyen du bassin versant de la Loue. Et le fait que les cultures occupent plus de surface et que le pourcentage de sols profonds soit plus important, sur le site d'étude, permet de disposer d'une proportion de parcelles à risque plus élevée.

2. Les pratiques agricoles

a) Les exploitations

L'agriculture constitue 5 % des emplois directs ou indirects régionaux. La plupart des exploitations laitières de Franche-Comté (ancienne région) sont placées sous signes de qualité (AOP) notamment grâce à la production des fromages régionaux : Comté, Morbier et Mont d'Or.

Les élevages bovins lait représentent ainsi 83,5 % de la surface agricole utile (SAU) dont 87 % constituent des surfaces fourragères (prairies) destinées à l'alimentation du bétail (prairies pâturées ou de fauches). Parmi ces surfaces en fourrage, les prairies permanentes sont dominantes avec près de trois quart de la surface. Le chargement des exploitations bovines est de l'ordre de 0,9 UGB/ha soit inférieure à celle de l'échelle nationale avec 1,31 UGB/ha. Pour les cultures de céréales, la sole ne représente que 11 % de la SAU du territoire. L'agriculture de la région Franc-Comtoise peut ainsi être qualifiée d'extensive avec moins de produits phytosanitaires et moins d'engrais de synthèse que dans les régions de polyculture élevage ou céréalière.

Un caractère extensif qui découle du cahier des charges à respecter pour la production des AOP fromagers (Agreste, 2013). Pour produire un lait destiné à la production des AOP fromagers, les exploitations doivent se soumettre à une réglementation stricte, édictée dans le cahier des charges.

Ainsi, la superficie herbagère effective exploitée d'une exploitation doit être au minimum de 1 ha par vache laitière. La productivité laitière des surfaces consacrées à l'affouragement du troupeau laitier est plafonnée pour chaque exploitation (3600l/ha). Les systèmes d'affouragement basés sur le zéro pâturage intégral sont interdits et le chargement du cheptel laitier de l'exploitation ne peut être supérieur à 1,3 UGB/ha de surface fourragère. Des limites sont également fixées en matière de fertilisation azotée. La fumure minérale ne doit pas dépasser 50 unités d'azote en moyenne par hectare de surface fourragère. Le nombre annuel d'épandages de matière organique sur une même parcelle est plafonné à 3 et la dose totale d'azote apportée (minéral + organique) ne doit pas excéder 120 unités/ha/an (Ministère de l'agriculture, 2015).

Les exploitations agricoles sont en outre soumises au règlement sanitaire départemental (RSD) ou à la législation des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) selon la taille du cheptel. Le RSD du Doubs a été modifié le 11 avril 2014 (Arrêté préfectoral n°2014101-0024, 11 Avril 2014 lors d'une conférence Loue et rivières Comtoises, il reprend les mêmes règles d'épandage que celles définies dans l'arrêté ICPE du 27 décembre 2013. Les exploitations de moins de 50 vaches laitières ou 100 vaches allaitantes sont soumises au RSD. Les exploitations dépassant ce seuil sont soumises au régime des ICPE (Installations Classées pour la Protection de l'Environnement) dont il existe différents niveaux selon la taille du cheptel (enregistrement, déclaration et autorisation). Le RSD fixe notamment les conditions d'implantation des bâtiments et les capacités minimales de stockages des effluents et définit les conditions de stockage du fumier au champ ainsi que les règles d'épandage des effluents. Ces derniers doivent respecter des règles de distances avec les activités humaines (habitations, lieux de baignades), les forages et les lieux de captages pour l'alimentation humaine. Les épandages sont également interdits dans un certain nombre de situations), toutefois des dérogations restent possibles.

	Plaisir Fontaine	BV Loue
Surface/exploit ha (min-max)	107,4 (37 à 260)	87,30
Nombre UGB/exploit (min-max)	84,1 (9 à 200)	73,20
UGB/ha (min-max)	0,75 (0,25 à 1)	0,82

Sur le bassin de Plaisir Fontaine, la surface moyenne par exploitation est de 107 ha contre 87 ha pour la Loue. Le nombre d'UGB par exploitation sur le site d'étude est lui aussi supérieur aux valeurs du bassin versant de la Loue. Cependant

lorsque ces valeurs sont retranscrites en UBG/ha, les deux bassins versant semblent très proches. Une grande variabilité parmi les exploitations du bassin versant de Plaisir Fontaine du point de vue de la surface, du nombre d'animaux détenus, de la forme juridique ou de l'âge du chef d'exploitation est à noter. Néanmoins, les exploitations restent représentatives du bassin versant de la Loue, avec des surface et un cheptel par exploitation légèrement supérieur mais qui exprimé en UGB/ha est similaire.

	Plaisir Fontaine	BV Loue
Fumier en % exploit	69 %	77 %
Fumier en % UGB	68 %	69 %
Mixte en % exploit	31 %	23 %
Mixte en % UGB	32 %	31 %

Les types d'effluents d'élevage produits par les exploitations du bassin versant de Plaisir Fontaine correspondent en majeure partie à du fumier (69 %). Un pourcentage légèrement inférieur par rapport au

bassin versant de la Loue (77 %). Les types d'effluents produits sur le site d'étude sont représentatifs du bassin versant de la Loue. Cependant, les sièges d'exploitation et bâtiments d'élevage sont pour la plupart situés à l'extérieur du bassin versant. Les agriculteurs ne possèdent qu'une partie de leur surface agricole utile à l'intérieur du bassin versant. Par conséquent, le bassin versant de Plaisir Fontaine ne reçoit qu'une partie des effluents produits dans les exploitations présentes sur bassin versant de Plaisir Fontaine.

b) La phase d'enquêtes

Une phase d'enquête est obligatoire pour récolter toutes les données nécessaires aux entrées des modèles. En 2016, le sous bassin versant de Plaisir Fontaine comprend 20 exploitants agricoles. L'enquête auprès des agriculteurs a pour objectif l'obtention de toutes les données nécessaires pour le bon fonctionnement des modèles. Elaboré au cours des précédents stages, l'enquête a été reprise et modifiée pour répondre au plus juste à la demande.

Elle permet de caractériser l'exploitation agricole en elle-même pour disposer d'un suivi régulier des changements de statuts de l'exploitation, des coordonnées, du système de production et si l'exploitation est rattachée aux labels Comté et Morbier.

La production végétale, la surface agricole utile totale sont demandées ainsi que les successions culturales types mises en place par l'exploitant.

La production animale, les effectifs par types de troupeaux et leur âge ainsi que le taux de renouvellement et le total en lait produit par an par l'exploitation sont à renseigner.

Le bilan fourrager de l'exploitation. Les questions identifient les stocks de fourrage, l'utilisation des prairies et les rendements de fauches.

Les bâtiments d'élevage font aussi partie des informations à demander. La gestion de la fertilisation et les effluents d'élevage permettent de connaître les pratiques générales en matière de fertilisation minérale et organiques sur les prairies et les cultures.

Les pratiques agricoles, parcelle par parcelle, sont à renseigner. Il faut regarder avec l'exploitant ses parcelles pour connaître l'itinéraire associé précis que l'agriculteur a adopté.

Une enquête auprès d'un agriculteur dure entre 30 min et 2 h selon le nombre de parcelles présentes sur le bassin versant. Pour les agriculteurs exploitant une à cinq parcelles, l'enquête pouvait se présenter sous la forme d'une conversation téléphonique, envoyée directement par mail ou par courrier.

3. Caractérisation du cycle de l'azote

a) Les reliquats azotés

Effectuer des reliquats azotés sur une parcelle agricole permet d'obtenir la concentration en azote minéral dans le sol. La réalisation de reliquats azotés en sortie d'hiver (avant une reprise de la minéralisation) permet, aux conseillers agronomes, de déterminer les stocks d'azote minéral disponible pour la culture puis d'ajuster avec l'agriculteur son raisonnement en matière de fertilisation. Le niveau de reliquats azotés dépend de l'efficacité d'absorption du précédent cultural, de la culture en place, de la présence d'une interculture et des quantités d'azote lixiviées durant la période hivernale. En cas de reliquats élevés, les apports en azote pourront être réduits. La comparaison entre les reliquats en entrée et sortie d'hiver permet d'estimer l'ordre de grandeur de la quantité de nitrate lixiviée entre les deux prélèvements.

Selon la méthode la plus couramment utilisée, réaliser un reliquat azoté nécessite de faire une vingtaine de prélèvements dans un cercle de 20 m de diamètre, dans la plus grande zone homogène de la parcelle agricole (Figure 8) pour obtenir un échantillon représentatif du reliquat moyen de la parcelle (Roebroek H, 2009). Il est également possible d'effectuer des prélèvements le long des diagonales de la parcelle.

Repérer la zone de prélèvement :

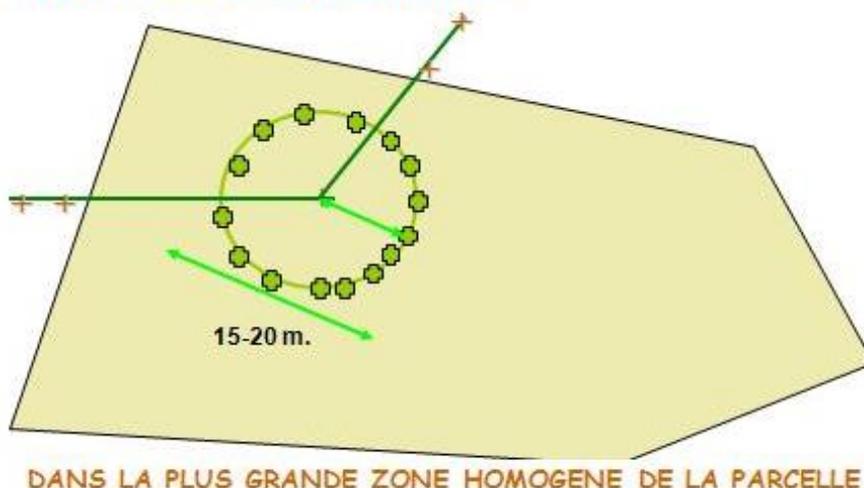


Figure 8 : Schéma représentant la méthode de prélèvement des reliquats azotés sur une parcelle agricole (source : arvalis-info.fr)

Les prélèvements doivent être effectués sur toute la profondeur du sol puis placés dans un sceau puis mélangés et placés dans un sachet plastique et ce pour chaque horizon. Les reliquats doivent être conservés au frais (4°C) jusqu'à 2 jours ou bien être placés au congélateur (-18°C) en cas de stockage plus long avant l'envoi au laboratoire d'analyse.

Depuis 2010, la Chambre d'Agriculture du Doubs et Territoire de Belfort effectue une campagne de mesure de l'azote dans le sol sur le bassin versant de Plaisir Fontaine. Les prélèvements sont généralement effectués directement par la CIA 25/90, mais sont lors de certaines campagnes délégués à un autre organisme préleveur. Les échantillons prélevés sont ensuite envoyés à la SADEF, un laboratoire, pour analyses. Pour les campagnes de 2010-2011 à 2015-2016, les reliquats azotés ont été réalisés en entrée d'hiver ainsi qu'en sortie d'hiver. Pour la campagne 2016-2017, seuls les prélèvements en sortie d'hiver ont été effectués. Les parcelles sujettes à des mesures de reliquats azotés diffèrent selon les campagnes. En moyenne, une vingtaine de parcelles font l'objet d'un reliquat azoté par campagne.

b) Instrumentalisation du bassin versant Les lysimètres

L'étymologie du terme lysimètre se trouve dans les deux racines grecques, « lysis » qui signifie dissolution, destruction d'éléments organiques et « metron » signifiant mesure. À l'origine, le lysimètre est une cuve étanche dans laquelle un sol est mis à l'étude. La face supérieure de cette cuve est exposée à l'action des agents atmosphériques, alors que les faces latérales empêchent tout échange avec l'extérieur. La face inférieure, drainée, permet à l'expérimentateur de déterminer les caractéristiques de la solution évacuée par drainage. Les études lysimétriques se rattachent soit à l'hydrologie soit à l'hydraulique pour ce qui est de la dynamique de l'eau. (Muller, 1996)

La méthode lysimétrique a pour objet de réaliser un bilan entrées-sorties des composés minéraux ou organiques sur une colonne verticale de sol. En conséquence, les transferts verticaux de la solution évacuée seront seuls pris en considération et son champ d'action sera limité à la couche meuble de l'espace naturel où poussent les plantes.

Ce modèle réduit de la réalité est caractérisé par la nature du sol qui l'emplit, le régime climatique auquel il est soumis, l'occupation de sa surface et les traitements qui sont appliqués. Les phénomènes de lixiviation mettent en cause simultanément les propriétés du sol, la nature de la couverture végétale, les apports d'éléments fertilisants et le travail du sol.

Actuellement, les dispositifs lysimétriques réalisables peuvent être répartis en deux types. Les lysimètres fermés dont le sol a été reconstitué et les lysimètres ouverts dont le sol n'a pas été remanié.

L'Université de Besançon, en partenariat avec la Chambre d'agriculture du Doubs et du Territoire de Belfort, a installé les premiers lysimètres dans le Doubs. Douze premiers lysimètres ouverts ont été installés dans le bassin versant de Lods en automne 2015 et douze autres dispositifs sur le bassin versant de Plaisir Fontaine en automne 2016. Les critères pris en compte pour l'installation des dispositifs sont le type de sol, l'occupation du sol et la pratique de fertilisation. Cette sélection des parcelles fut assurée par la CIA 25/90. Les lysimètres ont été installés sur deux types de sols, les sols superficiels (moins de 25 cm) et les sols profonds (50 à 60 cm) non hydromorphes avec une texture de surface limono-argileuse, une abondance de matière humifiée moyenne et des éléments grossiers. Pour chacun des types de sol, deux modes d'occupation du sol et de pratiques culturale ont été retenus. Les prairies permanentes de fauche et les cultures de céréales d'hiver après retournement de la prairie et une poursuite de la culture pendant 3 ans. La fertilisation des parcelles peut combiner les apports de fumier, de lisier et d'engrais minéraux. Cependant, les dates et doses d'apports varient d'une parcelle à une autre, ceci ne permet donc pas d'avoir des parcelles avec des situations strictement identiques. Sur quatre sites choisis dans chacun des deux bassins versants, trois plaques lysimétriques ont été installées dans le but de disposer de répétitions.



Figure 11 : Photo d'une plaque lysimétrique + géotextile (source: UFC)

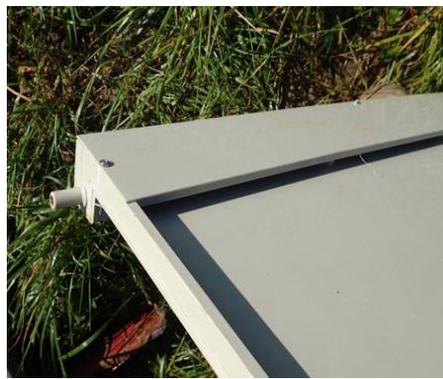


Figure 10 : Photo de la gouttière d'une plaque lysimétrique (source: UFC)

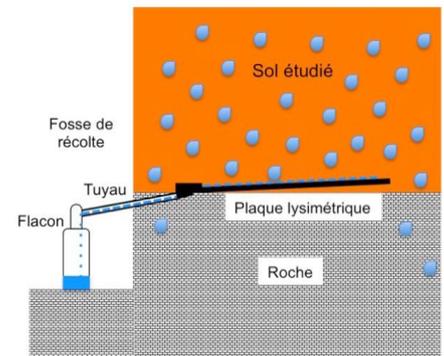


Figure 9 : Schéma d'un dispositif lysimétrique installé sur le site d'étude (source: UFC)

Les lysimètres ouverts sont de conception plus récente que les lysimètres fermés (Figure 12). Ce type de dispositif ne dispose pas de paroi latérale ce qui permet une meilleure conservation de la structure du sol lors de la mise en place. En condition favorable, la plaque drainante est enfoncée latéralement dans le sol à partir d'une fosse creusée préalablement et qui sera utilisée par la suite pour accueillir les bidons de récupération de l'eau drainée. Or dans le cas de cette étude, la présence de cailloux et de sol superficiel n'a pas permis cette mise en place, l'Université fut contrainte d'enlever le sol pour insérer la plaque lysimétrique puis de reconstituer le sol horizon par horizon.

Les plaques lysimétriques (Figure 9) utilisées dans cette étude ont été fabriquées en polypropylène homopolymère (PPH), un matériau stable et rigide. La surface totale de collecte de la plaque est de 0.26m². Placées de manière à créer une légère pente, les plaques lysimétriques se terminent sur le côté inférieur par une gouttière raccordée à un tuyau de collecte. Grâce à cette inclinaison, elles collectent l'eau de percolation qui est dirigée par gravité dans un bidon de récupération situé en contrebas dans une fosse maintenue ouverte pour assurer la collecte des bidons et leur envoi au laboratoire d'analyse. Afin d'améliorer la continuité de l'écoulement entre le sol et la plaque mais aussi de limiter le colmatage de la gouttière (Figure 10), des géotextiles inerte recouvrent les plaques lysimétriques (Figure 11).

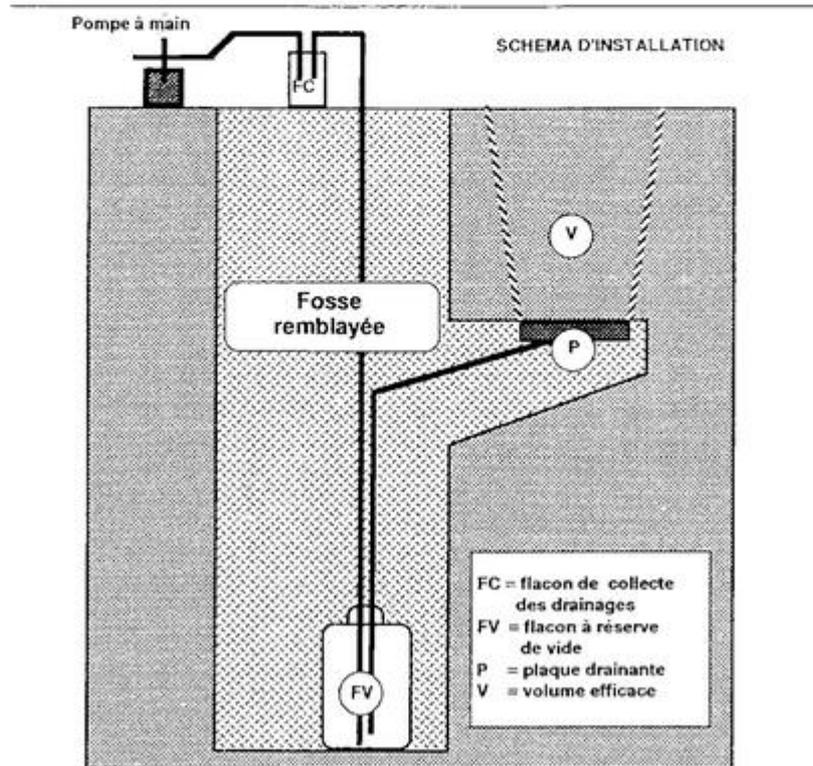
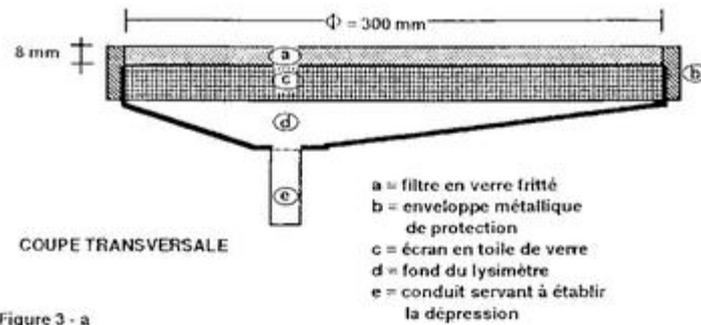


Figure 12 : Schéma représentant un lysimètre ouvert et la plaque lysimétrique (source: Trente ans de lysimétrie en France 1960-1990, 1996)

Bilans hydriques

Des bilans hydriques à pas de temps journalier ont été calculés pour les parcelles de Chasnans équipées de plaques lysimétriques. Le drainage théorique résultant de ces bilans permet d'obtenir les ordres de grandeur des flux d'eau sous chaque situation.

Lors de l'installation des lysimètres, les parcelles ont fait l'objet d'une analyse de sol par l'Université de Besançon. Les données ont été transmises à la chambre d'agriculture et ont pu être utilisées pour déterminer la réserve utile (RU) pour chaque situation. Dans cette étude, le choix du calcul de la RU s'est porté sur la formule de Jamagne (ANNEXE VIII). Ce choix a été fait pour deux raisons. Premièrement, le calcul de Jamagne ne prend pas en compte la proportion de matière organique dans le sol. En effet, que la proportion soit de 0 % ou de 80 % la réserve utile calculée n'est pas changée. Deuxièmement, la réserve utile calculée avec la méthode Jamagne est toujours inférieure à celle déterminée par le calcul de Walter. Le fait que la réserve utile soit plus petite signifie que les drainages calculés seront légèrement plus importants évitant ainsi une possible sous-évaluation du drainage.

Les données des précipitations et des températures ont été obtenues par la station météorologique d'Epenoy située à proximité du bassin versant de Lods. Les valeurs d'évapotranspirations correspondent à celles utilisées pour le modèle Syst'N. Puis le calcul :

Précipitations – évapotranspiration*coefficient cultural a été réalisé pour déterminé la part d'eau sujette au drainage. Lorsque la réserve est saturée, toute l'eau est drainée. Le drainage a lieu qu'une fois la réserve utile saturée. Lorsque l'évapotranspiration est supérieure aux précipitations, la réserve utile se vide. Les coefficients culturaux utilisés sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau 3 : Coefficient culturaux utilisés pour les bilans hydriques de Chasnans (Source : Conseiller de la CIA 25/90)

		Tallage	Montaison	Epiaison	Maturation
Orge d'hiver	Date	Semis au 1er Mars	2 Mars au 1er Juin	2 Juin au 1er Juillet	2 Juillet à la récolte
	Coefficient cultural	1	1	1,2	1
Prairie	Date	1er janvier au 31 décembre			
	Coefficient cultural	1			

V. Résultats

A. Les enquêtes

Tableau 4 : Présentation des exploitations de Plaisir Fontaine en 2016

Type d'exploitations	Nombre d'agriculteur	Surface concernée (ha)	% de surface
Bovins lait Comté	15	358	70
Bovins viande	3	28,36	6
Lait standard	1	98,8	19
Equin	1	27,25	5
Total	20	512,41	100

La phase d'enquête a permis d'identifier 20 exploitants possédant au minimum une parcelle sur le bassin versant de Plaisir Fontaine pour l'année 2016. En 2015, le nombre d'exploitation était de 22, trois agriculteurs sont partis en retraite et ont cédé leurs terres à des exploitants déjà présents sur le bassin versant et à un nouvel exploitant extérieur. Sur les 20 exploitations contactées, 18 ont accepté un rendez-vous pour répondre à l'enquête, 1 exploitation a répondu par conversation téléphonique et 1 seule a refusé de participer. Le tableau ci-dessus reporte les données générales. Sur les 20 exploitations 15 sont sous le label AOP Comté et/ou Morbier et occupent 70 % de la surface du bassin versant (Figure 13). Une exploitation représentant 19 % de l'occupation des sols du bassin versant est en lait standard. La filière laitière n'est pas la seule à être représentée sur le site d'étude, il y a également trois exploitations de bovins viande et une exploitation équine.

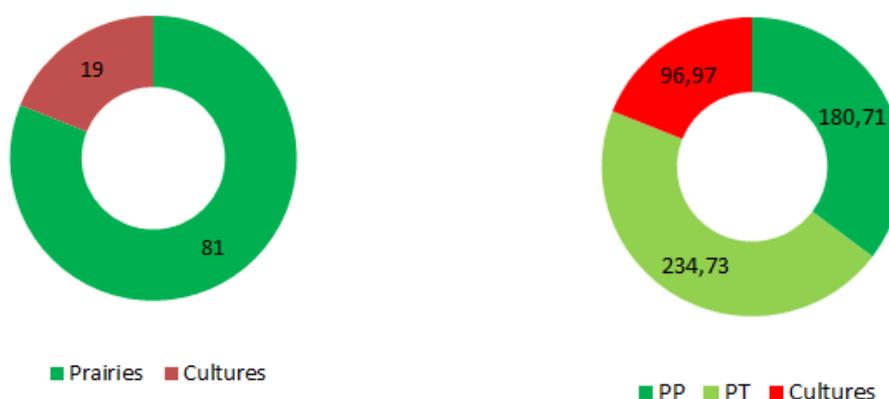


Figure 13 : Occupation du sol (%) (à gauche) et types de cultures, prairies permanentes (PP), temporaires (PT) et cultures (ha) (à droite) des parcelles agricoles du bassin de Plaisir Fontaine enquêtées sur la période 2016 (d'après les données issues des enquêtes)

La SAU du sous bassin versant de Plaisir Fontaine est constituée d'un total de 200 parcelles de surface comprise entre 0,09 et 16,08 ha (moyenne de 2,56 ha). Le site d'étude compte 81 % de sa surface totale en prairies permanentes et temporaires en 2016 et 19 % en cultures. Ces valeurs se rapprochent encore plus de celles observées sur le bassin versant de la Loue (présentées dans la partie B.2 les pratiques agricoles) et attestent de la dominance des prairies. Les cultures rencontrées sur le bassin versant correspondent à des céréales d'hiver telles que le blé, l'orge, le triticale et le colza. Pour l'année 2016, seul le maïs a été observé comme culture de printemps. Parmi les parcelles en culture, la rotation colza/blé/orge est la plus observée, toutefois, certains agriculteurs ne chercheraient pas à respecter une rotation spécifique mais adapteraient plutôt les surfaces cultivées dans le but d'obtenir un niveau de production en accord avec les stocks fourragers disponibles et les besoins du troupeau (Zanatta, 2015).

Les pratiques de fertilisation des agriculteurs recueillies chaque année depuis 2011 ont permis de réaliser le Tableau 5 ci-dessous :

Tableau 5: Apport moyen azote minéral et organique par culture et prairie pour chaque campagne

Prairie	kg N minéral/ha	kg N organique/ha
2011	36	34
2012	33	28
2013	40	28
2014	39	25
2015	38	27
2016	16	34
Moyenne	34	29
Culture	kg N minéral/ha	kg N organique/ha
2011	132	52
2012	134	36
2013	140	66
2014	129	32
2015	110	60
2016	73	38
Moyenne	120	47

En 2016, l'apport moyen en azote minéral pour une parcelle en prairie est de 16 kg N/ha. Il s'agit de la valeur la plus faible observée depuis 2011, la moyenne étant de plus de 30 kg N/ha par prairie. Les faibles valeurs observées pour l'année 2016 pourraient correspondre à une année 2015 mitigée en matière de rendement. Les entrées d'argent plus faible auraient poussé les agriculteurs à pratiquer une fertilisation raisonnée. De plus, l'année 2016 fut très pluvieuse ne permettant pas aux exploitants d'entrer sur leurs parcelles. L'apport d'azote minéral sur la prairie se fait essentiellement après la première fauche pour augmenter le rendement du regain. L'apport d'azote organique est de 34 kg N/ha par prairie, il est légèrement supérieur à la moyenne des différentes campagnes (29 kg N/ha). Cet apport survient principalement au printemps après les 200°C cumulés signifiant la reprise de la végétation pour les prairies. L'azote organique apporté l'est sous forme de fumier, lisier, purin ou boues de stations d'épuration.

L'apport moyen en azote minéral observé sur les cultures du bassin de Plaisir Fontaine est de 73 kg N/ha pour l'année 2016. Cette valeur est nettement inférieure à la moyenne des campagnes qui est de 120 kg N/ha. La Chambre d'Agriculture du Doubs et du Territoire de Belfort généralise la pratique du reliquat sorti d'hiver sur les parcelles en culture et donne un conseil adapté. Une diminution des pratiques semble amorcée sur le bassin versant. Les apports en fertilisants minéraux à lieu principalement en mars-avril sur les cultures lors de la reprise et du développement de la plante. La valeur moyenne en azote organique apportée sur les parcelles en culture en 2016 est de 38 kg N/ha valeur qui est légèrement inférieure à la moyenne observée (47 kg N/ha) au cours des différentes campagnes.

B. Evaluation des performances de FarmSim sur le bassin versant de Plaisir Fontaine

1. L'azote dans le sol

Les 8 parcelles cibles retenues sur le bassin versant de Plaisir Fontaine peuvent être séparées en trois groupes : les prairies permanentes (2 parcelles), les cultures annuelles (2 parcelles) et les rotations prairies/cultures annuelles (4 parcelles). Cette séparation en trois groupes permet une évaluation des performances des sous modèles CERES-EGC et PaSim ainsi que la transition entre les deux.

1. L'azote dans le sol

a) Cas des prairies permanentes :

Un total de 30 mesures réparties sur 4 à 5 hivers et 2 périodes est disponible pour les 3 parcelles en prairie permanente.

La Figure 14 montre que le modèle Pasim sous-estime les quantités de $N-NO_3^-$ du sol aux dates de mesures. La même tendance est observée pour les quantités de $N-NH_4^+$ et l'azote minéral total. Les valeurs simulées s'éloignent de plus en plus des valeurs mesurées quand ces dernières augmentent. Le modèle semble donc avoir tendance à simuler des quantités d'azote minéral faibles quelles que soient les situations.

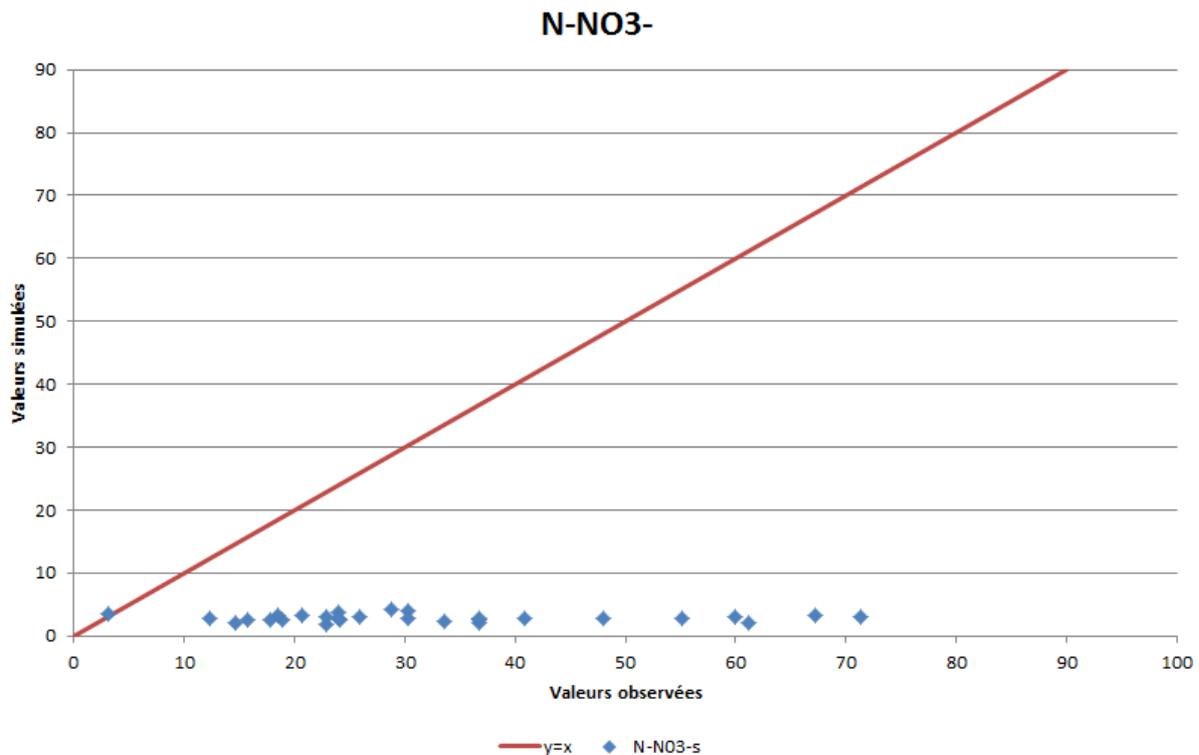


Figure 14 : Valeurs simulées/observées de la quantité de $N-NO_3^-$ sur les 3 parcelles de prairie (30 échantillons).

Les Tableaux 6 et 7 mettent en évidence que le modèle PaSim sous-estime :

- la quantité d'azote minéral totale présent dans le sol. En moyenne, les valeurs simulées sont inférieures de 48 kg N/ha aux valeurs mesurées. Le biais est ainsi très négatif (-88 %) et la RRMSE de 408 %
- la quantité de $N-NO_3^-$ de 28 kg N/ha en moyenne. Le biais sur les simulations est alors de -90.8 % et la RRMSE de 183%.
- la quantité de $N-NH_4^+$ de 20 kg N/ha avec un biais sur les simulations de -83.6 % et une RRMSE de 188 %.

Cependant, la part d'azote sous forme NH_4^+ dans la quantité totale d'azote minéral est surestimée par le modèle, de 9 points en moyenne.

Tableau 6 : Valeurs observées et simulées d'azote sous forme de N-NO₃⁻, de N-NH₄⁺ et d'azote minéral total (N-total) sur les 3 parcelles de prairie (30 échantillons).

	Valeurs mesurées (kg N/ha)				Valeurs simulées (kg N/ha)			
	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₄ ⁺	N-total	%NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₄ ⁺	N-total	%NH ₄ ⁺
Moyenne	31	24	55	46	3	4	7	55
Ecart-type	17	13	12	24	1	2	2	10
Min	3	2	32	3	2	1	3	27
Max	71	48	82	90	4	12	15	80

Tableau 7 : Indicateurs de performance calculés pour les 3 parcelles de prairie (30 échantillons). PBIAS : pourcentage de biais. RMSE : relative mean square error. RRMSE : RMSE divisée par la moyenne des valeurs mesurées.

Indicateur de performance	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₄ ⁺	N-total	Pourcentage de NH ₄ ⁺
PBIAS (%)	-90.80	-83.60	-87.70	20.90
RMSE (Kg N/ha)	33.30	23.61	50.06	25.81
RRMSE	1,88	1,83	4,08	1,04

Les performances du modèle pour la simulation des quantités d'azote minéral du sol aux dates de mesures sont donc globalement mauvaises.

b) Cas des parcelles en cultures :

Un total de 20 mesures réparties sur 5 hivers et 2 périodes est disponible pour les 2 parcelles avec des rotations de cultures annuelles.

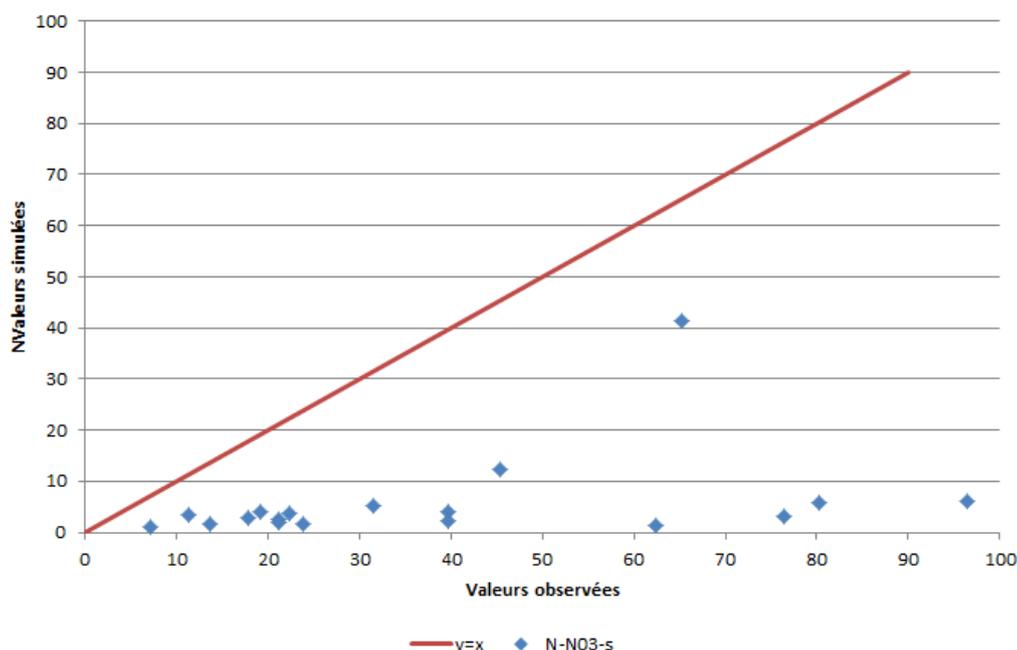


Figure 15 : Valeurs simulées/observées de la quantité de N-NO₃⁻ sur les 2 parcelles de culture (20 échantillons).

La Figure 15 montre que le modèle CERES-EGC sous-estime les quantités de N-NO₃⁻ du sol aux dates des mesures. Une grande partie des valeurs simulées s'éloignent de plus en plus des valeurs mesurées quand ces dernières augmentent. Le modèle semble donc avoir tendance à simuler des quantités de N-NO₃⁻ équivalentes qu'elle que soit les situations.

En raison d'un problème informatique dans le modèle CERES-EGC, la quantité de N-NH₄⁺ n'est fournie dans les sorties du modèle que sur le premier horizon de sol. Il n'est donc pas possible de comparer les quantités simulées et mesurées d'azote minéral total du sol.

Tableau 8 : Valeurs observées et simulées de N-NO3- (profondeur totale du sol) et de N-NH4+ (premier horizon de sol uniquement) pour les 2 parcelles de cultures (20 échantillons).

	Valeurs mesurées			Valeurs simulées		
	N-NO3-	N-NH4+	N-total	N-NO3-	N-NH4+	N-total
Moyenne	37	5	49	6	1	6
Ecart-type	26	7	26	9	3	12
Min	7	1	20	1	0	1
Max	96	25	100	41	13	55

Tableau 9 : Indicateurs de performance calculés pour les 6 parcelles de cultures annuelles (24 échantillons). PBIAS : pourcentage de biais. RMSE : relative mean square error. RRMSE : RMSE divisée par la moyenne des valeurs mesurées.

Indicateur de performance	N-NO3 ⁻	N-NH4 ⁺
PBIAS (%)	-84.90	-82.1
RMSE (Kg N/ha)	39.62	8.85
RRMSE	1.51	1.23

Les Tableaux 8 et 9 montrent que le modèle CERES-EGC sous-estime :

- la quantité de N-NO3⁻ en moyenne de 31 kg N/ha. Le biais sur les simulations est alors de -84.9 % et la RRMSE de 151 %.

- la quantité de N-NH4⁺ sur le premier horizon de sol en moyenne de 4 kg N/ha. Le biais sur les simulations est de -82.1 % et la RRMSE de 123 %.

Les performances du modèle pour la simulation des quantités de N-NO3⁻ et N-NH4⁺ du sol aux dates de mesures sont donc globalement mauvaises.

c) Cas des parcelles en rotations prairie/culture :

Un total de 38 mesures réparties sur 5 à 6 hivers et 2 périodes est disponible pour les 4 parcelles avec des rotations prairies/cultures. En raison du problème lié à la simulation des quantités de N-NH4⁺ dans le modèle CERES-EGC, seules les simulations des quantités de N-NO3⁻ seront étudiées.

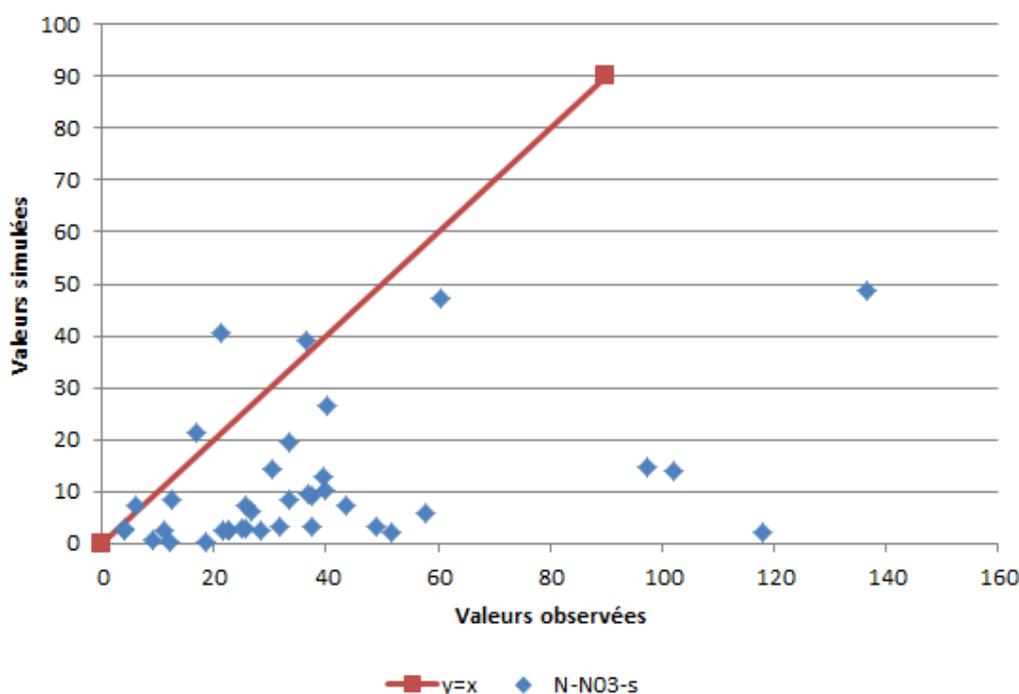


Figure 16 : Valeurs simulées/observées de la quantité de N-NO3⁻ sur les 4 parcelles avec rotation entre prairies et cultures annuelles (38 échantillons).

La

Figure

16 montre une grande variabilité de relations entre valeurs simulées et mesurées de la quantité de N-NO₃⁻, avec à la fois des valeurs simulées surestimées et d'autres sous estimées. Les Tableaux 9 et 10 montrent que le modèle FarmSim sous-estime la quantité de N-NO₃⁻ de 26 kg N/ha. Le biais sur les simulations est de -70,8 % et la RRMSE de 126 % (Tableau 10 et Tableau 11).

Tableau 10 : Valeurs observées et simulées de N-NO₃⁻ pour les 4 parcelles en rotation prairies/cultures annuelles (38 échantillons).

	Valeurs mesurées (Kg N/ha)	Valeurs simulées (Kg N/ha)
	N-NO ₃ ⁻	N-NO ₃ ⁻
Moyenne	37	11
Ecart-type	30	13
Min	4	0
Max	136	49

Tableau 11 : Indicateurs de performance calculés pour les 4 parcelles en rotation prairies/cultures annuelles (38 échantillons). PBIAS : pourcentage de biais. RMSE : relative mean square error. RRMSE : RMSE divisée par la moyenne des valeurs mesurées.

Indicateur de performance	N-NO ₃ ⁻
PBIAS (%)	-70.8
RMSE (Kg N/ha)	38.25
RRMSE	1,26

Les performances du modèle FarmSim pour la simulation des quantités de N-NO₃⁻ aux dates de mesures sont donc globalement mauvaises.

2. Les processus du cycle de l'azote (rendements, absorption racinaire et minéralisation)

Les rendements, l'absorption racinaire et la minéralisation sont liés au cycle de l'azote. Leurs analyses, pour les situations en prairie permanente fauchée (1 parcelle) et les deux parcelles en culture annuelle, permettent une meilleure compréhension des mauvais résultats précédents.

a) Cas de la parcelle en prairie fauchée : Rendements et absorption racinaire :

Tableau 12 : Rendements et absorptions racinaires d'azote simulés pour une prairie sur la période de 2010 à 2016.

	Fauche (1ère coupe)		Regain (2 et 3ème coupe)	
	Absorption racinaire (kg N/ha)	Rendement (t MS/ha)	Absorption racinaire (kg N/ha)	Rendement (t MS/ha)
Moyenne	100	3	96	2
Ecart-type	12	1	40	1
Min	89	2	19	1
Max	126	4	133	3

Le Tableau 12 présente un rendement moyen pour la première coupe de 3 t MS/ha puis de 2 t MS/ha pour les regains. Le Groupe Régional d'Expertise Nitrates (GREN) de Franche Comté fournit pour références des rendements régionaux de 3 à 4.5 t MS/ha pour la première coupe puis de 1.5 à 2.5 t MS/ha pour les coupes suivantes. Les rendements simulés par le modèle FarmSim pour une prairie permanente fauchée sont donc cohérent avec les valeurs régionales.

Lemaire & Salette, 1984, ont observé dans l'ouest de la France et sur un peuplement de graminées fourragères une absorption racine de l'ordre de 120 kg N/ha pour une production de biomasse de 4 t MS/ha. Les valeurs obtenues par FarmSim sont de 100 kg N/ha pour la première coupe et 96 kg N/ha pour les regains. Les quantités d'azote absorbé simulées par l'outil sont relativement cohérentes avec les valeurs bibliographiques.

Minéralisation :

Tableau 13 : Minéralisation simulée du sol (kg N/ha) pour une prairie fauchée entre le 15 Mars et la dernière coupe de chaque année sur la période 2010-2016.

Prairie fauchée	Minéralisation (kg N/ha)
Moyenne	199
Ecart-type	54
Min	96
Max	239

Pour rendre la comparaison avec les références possibles, les effets directs et indirects liés aux apports organiques calculés selon la méthode Comifer ont été soustraits à la minéralisation simulée. Les valeurs de références fournies par le GREN pour la quantité d'humus minéralisé entre l'ouverture du bilan en sortie hiver (15 Mars) et la dernière coupe sont comprises entre 50 et 100 kg N/ha (selon la profondeur de sol). La minéralisation moyenne simulée par FarmSim pour une situation de prairie permanente fauchée est en moyenne de 200 kg N/ha (Tableau 13). Le modèle PaSim semble surestimer la minéralisation.

b) Cas de deux parcelles en culture annuelle : Rendements et absorption racinaire :

Tableau 14 : Rendements et quantités d'azote minéral prélevé par unité de rendement (besoin unitaire) simulés pour les cultures de deux parcelles de 2011 à 2016. Références : [1] : (François et al, 2003).

	Blé tendre d'hiver (3 récoltes)	Orge d'hiver (4 récoltes)
	Rendement	Rendement
Références	60 [1]	60 [1]
Moyenne simulée	53	34
Ecart-type simulé	21	16
	Colza (2 récoltes)	Maïs ensilage (2 récoltes)
	Rendement	Rendement
Références	25 [1]	13 [1]
Moyenne simulée	17	0
Ecart-type simulé	10	47

Lors des enquêtes, les rendements n'ont pas toujours été renseignés par les agriculteurs par conséquent le choix a été fait de comparer le rendement simulé à des données de référence. La simulation des rendements pour l'orge d'hiver apparaît comme cohérente avec la bibliographie. Néanmoins, l'écart-type est de 21 ce qui signifie que les valeurs de rendements varient énormément. La simulation des rendements pour les autres cultures semble mauvaise et ce particulièrement pour la culture de maïs ensilage.

Minéralisation :

Le calcul de la quantité d'azote minéralisé de la sortie d'hiver à la récolte dans deux parcelles avec des rotations différentes sur la période de 2010 à 2016 a montré des simulations incohérentes. La minéralisation simulée est ainsi comprise entre 29 203 et 117 074 kg N/ha avec une moyenne de 76 755 kg N/ha pour les deux situations. Il semblerait qu'il y ait un facteur 1000 pour obtenir des valeurs probables. L'hypothèse d'une erreur de conversion des unités est à envisager.

3. Le drainage

a) Cas des prairies permanentes :

Trois parcelles de prairies permanentes ont été simulées avec le modèle FarmSim. Parmi les résultats obtenus il y a le drainage journalier. Le total annuel du drainage par rapport aux précipitations annuelles donne une vision de la proportion des précipitations qui vont donner lieu au

drainage. Les parcelles 1 et 2 correspondent à des prairies pâturées. La parcelle 3 est une prairie fauchée.

Tableau 15 : Sommes annuelles de la lixiviation et du drainage simulés pour trois prairies pour les années de 2010 à 2016.

	Lixiviation (kg N/m ²)	Drainage (mm)	Précipitations (mm)	Drainage/précipitations (%)
Parcelle 1 (GPS15)				
Moyenne	3	401	1311	30
Ecart-type	1	107	209	5
Min	2	286	1062	25
Max	5	541	1581	36
Parcelle 2 (GPL1D)				
Moyenne	37	576	1311	41
Ecart-type	16	403	209	24
Min	19	173	1062	15
Max	61	1058	1581	69
Parcelle 3 (DB22)				
Moyenne	1	318	1311	24
Ecart-type	0	87	209	4
Min	0	226	1062	20
Max	2	431	1581	29

Le drainage d'une parcelle est de 12 à 53 % des précipitations annuelles (Simon & Lecorre, 1992). Les trois parcelles en prairie donnent respectivement un drainage issu de 30 %, 41 % et 24 % en moyenne depuis 2010 (Tableau 15). Le modèle Farmsim simule donc un drainage cohérent. Néanmoins, la parcelle 2 présente une année exceptionnelle avec une valeur de 69 % des précipitations qui ont donné lieu au drainage. Pour année, le modèle FarmSim surestime le drainage.

b) Cas des cultures annuelles :

Seul parcelles de cultures ont été retenues pour être simulées avec le modèle FarmSim. Elles présentent chacune une rotation différente. La parcelle 1 correspond à une rotation de type colza/blé tendre d'hiver/orge d'hiver. La parcelle 2 correspond a une rotation orge d'hiver/maïs ensilage.

Tableau 16 : Sommes de la lixiviation et du drainage par campagne pour deux parcelles de culture pour les années de 2010 à 2016

	Lixiviation (kg N/m ²)	Drainage (mm)	Précipitations (mm)	Drainage/précipitations (%)
Parcelle 1 (AHC8A)				
Moyenne	28	915	1405	65
Ecart-type	9	198	208	5
Min	15	642	1085	57
Max	37	1155	1624	71
Parcelle 2 (GBJD2)				
Moyenne	17	754	1384	56
Ecart-type	10	414	431	25
Min	9	199	722	13
Max	34	1377	1781	81

Le Tableau 16 donne la part du drainage par rapport aux précipitations. Les valeurs varient entre 57 et 71 % pour la première parcelle en culture. La moyenne observée pour la première parcelle étant de 65 %, il apparaît une surestimation du drainage de la part du modèle FarmSim.

Les valeurs simulées pour la seconde parcelle oscillent entre 13 et 81 % avec une moyenne de 56 %. Les simulations de drainage du modèle semblent une nouvelle fois supérieures aux valeurs provenant de la bibliographie.

C. Evaluation des performances de FarmSim avec des données lysimétriques

Les lysimètres installés par l'Université de Besançon sur le bassin versant de Chasnans comprennent quatre situations (prairie superficielle et profonde ; culture superficielle et profonde)(ANNEXE ??). Chacune des situations a été équipée de 3 plaques lysimétriques permettant de tripler les données. Pour chaque prélèvement les quantités d'eau récoltées sont mesurées puis l'eau drainée est analysée par un laboratoire pour déterminer les concentrations de certains éléments. Dans cette étude les concentrations en nitrates et les volumes d'eau récoltés sont utilisés. Le modèle Syst'N ayant montré ses limites dans la simulation de l'azote lixivié (Thouvenin, 2014), l'étude porte sur l'évaluation des performances de FarmSim. Néanmoins, Syst'N et FarmSim reposent sur deux modèles différents de calcul du drainage, FarmSim utilise la loi de Darcy alors que Syst'N simule ses valeurs de drainage grâce au modèle de Burns. La comparaison du drainage de FarmSim et de Syst'N est intéressante pour comprendre les différences dans la simulation du drainage.

1. Le drainage

L'étude des capacités de simulation du drainage est effectuée par comparaison entre le drainage obtenu par la réalisation du bilan hydrique et le drainage simulé par les modèles Syst'N et FarmSim. Ces comparaisons s'effectueront pour les quatre situations de Chasnans et sur deux années hydrologiques (septembre 2015 à août 2016 et septembre 2016 à juin 2017). La deuxième année hydrologique est incomplète car les données climatiques n'étaient connues lors de la réalisation de l'étude. Pour compléter ces comparaisons, les résultats obtenus seront aussi confrontés à des données bibliographiques.

Les années hydrologiques 2015-2016 et 2016-2017 présentent de fortes disparités en matière de précipitations comme le montre les Figures 17 et 18 ci-dessous :

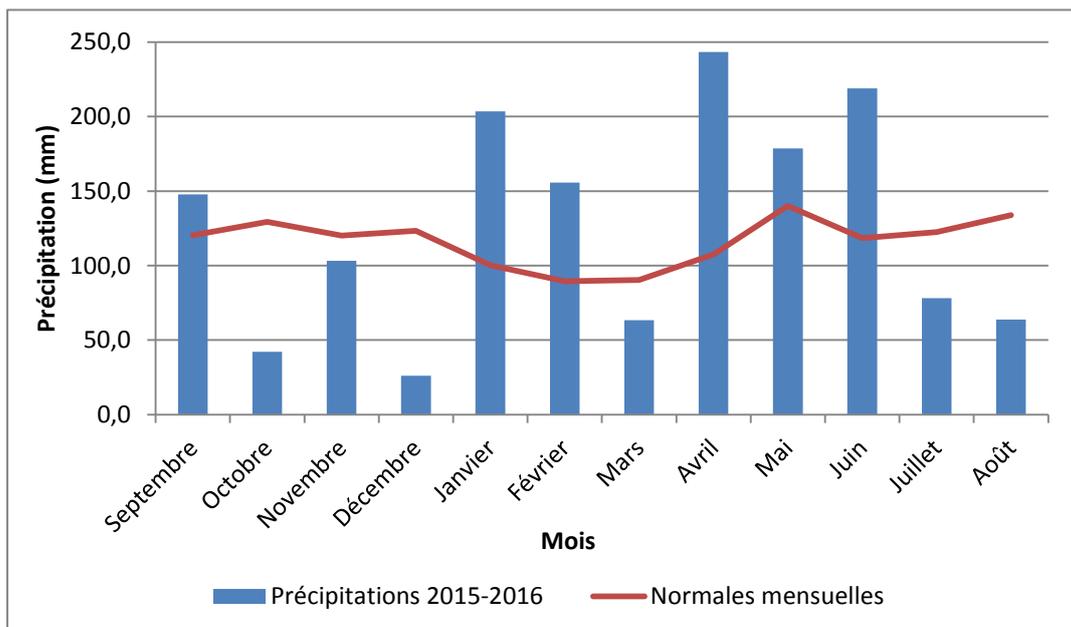


Figure 17 : Précipitations mensuelles de l'année hydrologique 2015-2016 (source: station météo France d'Epenoy)

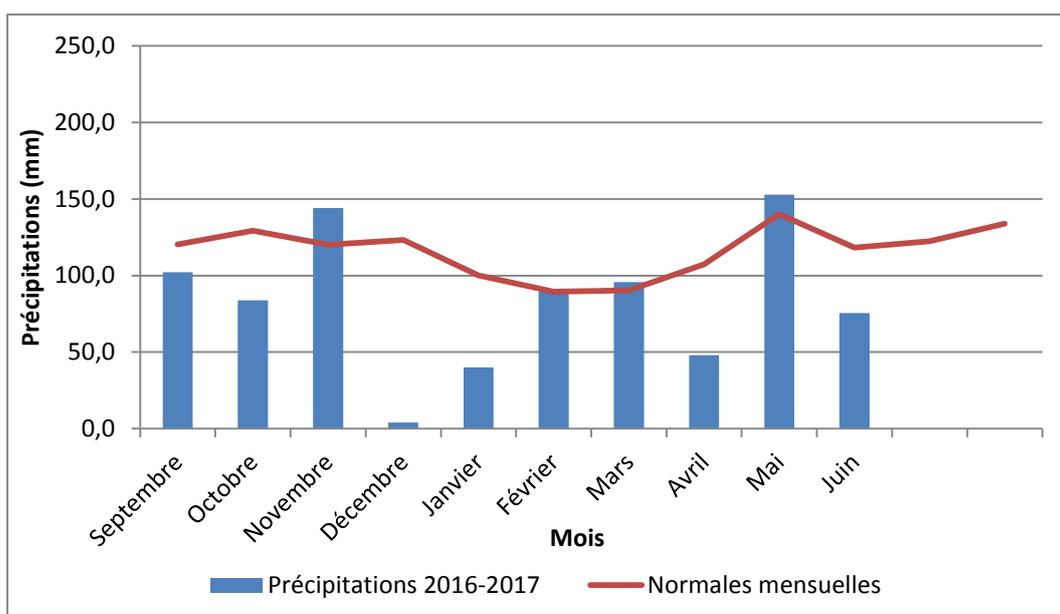


Figure 18 : Précipitation mensuelles de l'année hydrologique 2016-2017 (source : station météo France d'Epenoy)

L'année hydrologique 2015-2016 apparaît comme très pluvieuse avec six mois où les précipitations sont supérieures aux valeurs normales (moyenne des précipitations mensuelles depuis 1986 à aujourd'hui). Après une pluviométrie élevée pour les six premiers mois de l'année 2016, les précipitations mensuelles jusqu'à juin 2017 sont globalement inférieures aux normales. L'année hydrologique 2016-2017 apparaît donc comme une année déficitaire en pluviométrie.

a) Situations sous prairie pour 2 années hydriques

Les données de la station météorologique d'Epenoy permettent d'avoir connaissance de la pluviométrie du bassin versant de Lods. Un rapport drainage (calculé et simulé) sur précipitations pour chaque année hydrologique et les deux situations en prairie de Chasnans permet de se rendre compte de la part des précipitations qui va être évacuée de la parcelle sous forme de drainage.

Tableau 17 : Proportion des drainages théorique et simulés par les modèles Syst'N et FarmSim par rapport aux précipitations enregistrées sur le bassin versant.

	Année hydrique	2015-2016		2016-2017	
	Précipitations	1524 mm		835 mm	
	Situations	Prairie superficielle RU = 25 mm	Prairie profonde RU = 139 mm	Prairie superficielle RU = 25 mm	Prairie profonde RU = 139 mm
Drainage cumulé / Précipitations (%)	Théorique	81 %	53 %	73 %	34 %
	FarmSim	33 %	33 %	21 %	22 %
	Syst'N	63 %	22 %	57 %	13 %

Le drainage obtenu par la réalisation du bilan hydrique théorique des deux prairies s'avère présenter les valeurs les plus élevées en pourcentage des précipitations (81 % et 73 % pour la prairie superficielle ; 53 % et 34 % pour la prairie profonde) (Tableau 17).

Le modèle FarmSim semble être indépendant de la profondeur du sol car il obtient les mêmes valeurs pour chaque situation d'une même année hydrologique. FarmSim simule que le drainage représente 33 % des précipitations pour l'année 2015-2016 et 22 % pour l'année 2016-2017.

Les drainages obtenus avec l'outil Syst'N correspondent aux valeurs les plus variables allant de 13 % à 63 %. Le drainage est plus élevé pour les sols superficiels, il apparaît donc une dépendance du modèle à la profondeur du sol.

D'après Simon & Lecorre, 1992, le drainage d'une parcelle est de 12 à 53 % des précipitations annuelles. Le drainage théorique apparaît donc comme trop important par rapport aux précipitations. Syst'N est supérieur à ces valeurs pour la prairie sur sol superficiel pour les deux années hydrologiques mais concorde pour la prairie sur sol profond. Le modèle FarmSim coïncide sur chacune des situations et pour chaque année hydrique.

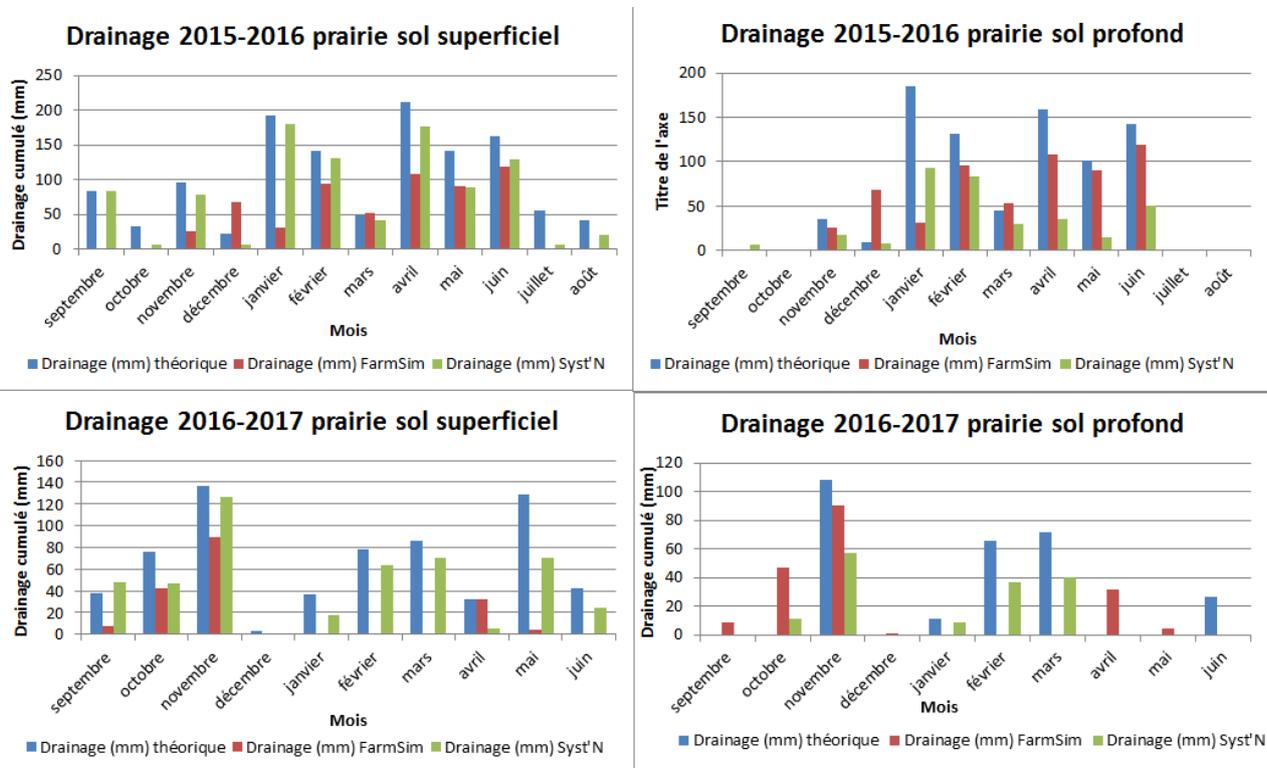


Figure 19 : Comparaison des drainages mensuels pour chaque année hydrologique

Les graphiques ci-dessus représentent la répartition des drainages mensuels pour les deux parcelles en prairie pour chacune des deux années hydriques.

Le drainage mensuel produit par le modèle Syst'N et le drainage théorique apparaissent comme très proches l'un de l'autre pour les deux années hydrologiques de la parcelle en prairie sur sol superficiel. Ils semblent plus éloignés pour la prairie sur sol profond mais produisent globalement du drainage aux mêmes périodes.

Le drainage simulé par FarmSim est différent des deux autres et apparaît comme nettement inférieur pour la prairie sur sol superficiel. Pour la situation sur sol profond, les simulations concordent parfois avec le drainage théorique et simulé par Syst'N et d'autres fois semble totalement différent. Le modèle FarmSim ne simule pas de perte en eau pendant la saison estivale (juin-septembre) ni pour la période de décembre à mars 2017 pour les deux situations.

b) Situations sous cultures pour 2 années hydriques

Le rapport drainage (calculé et simulé) sur précipitations pour chaque année hydrologique est aussi réalisé sur les deux parcelles en cultures (sur sol superficiel et sur sol profond) et équipées de lysimètres du bassin versant de Lods.

Tableau 18 : Proportion du drainage calculé par les modèle et calculé par le bilan hydrique par rapport aux précipitations sur deux années hydrologiques.

	Année hydrique	2015-2016		2016-2017	
	Précipitations	1524		835	
	Situations	Culture superficielle RU = 25 mm	Culture profonde RU = 100 mm	Culture superficielle RU = 25 mm	Culture profonde RU = 100 mm
Drainage cumulé / Précipitations (%)	Théorique	80 %	54 %	79 %	39 %
	FarmSim	60 %	60 %	43 %	43 %
	Syst'N	40 %	28 %	40 %	32 %

Le drainage obtenu par la réalisation du bilan hydrique théorique de la situation de culture sur sol superficiel présente les valeurs les plus importantes, 80 % pour les deux années (Tableau 18). En revanche les valeurs obtenues pour la culture sur sol profond concordent avec les valeurs de FarmSim pour chaque année hydrique.

Le modèle FarmSim semble aussi être indépendant de la profondeur du sol pour les parcelles en culture car il obtient les mêmes valeurs pour chaque situation d'une même année hydrologique. FarmSim simule que le drainage représente 60 % des précipitations pour l'année 2015-2016 et 43 % pour l'année 2016-2017.

Les drainages obtenus avec l'outil Syst'N sont similaire d'une année à l'autre et par situation. Ainsi, le drainage correspond à 40 % des précipitations pour la culture sur sol superficiel et environ 30 % (28 et 32 %) pour la parcelle sur sol profond.

Le drainage théorique apparaît donc comme trop important par rapport aux valeurs issues de la bibliographie à l'exception de la culture sur sol profond en 2016-2017. Syst'N simule des valeurs comprises entre 13 et 53 % pour chaque situation et chaque année. Le modèle FarmSim présente un drainage excessif par rapport aux valeurs bibliographique pour la première année hydrologique et cohérente pour 2016-2017.

Les graphiques ci-dessous représentent la répartition des drainages mensuels pour les deux parcelles en prairie pour chacune des deux années hydriques.

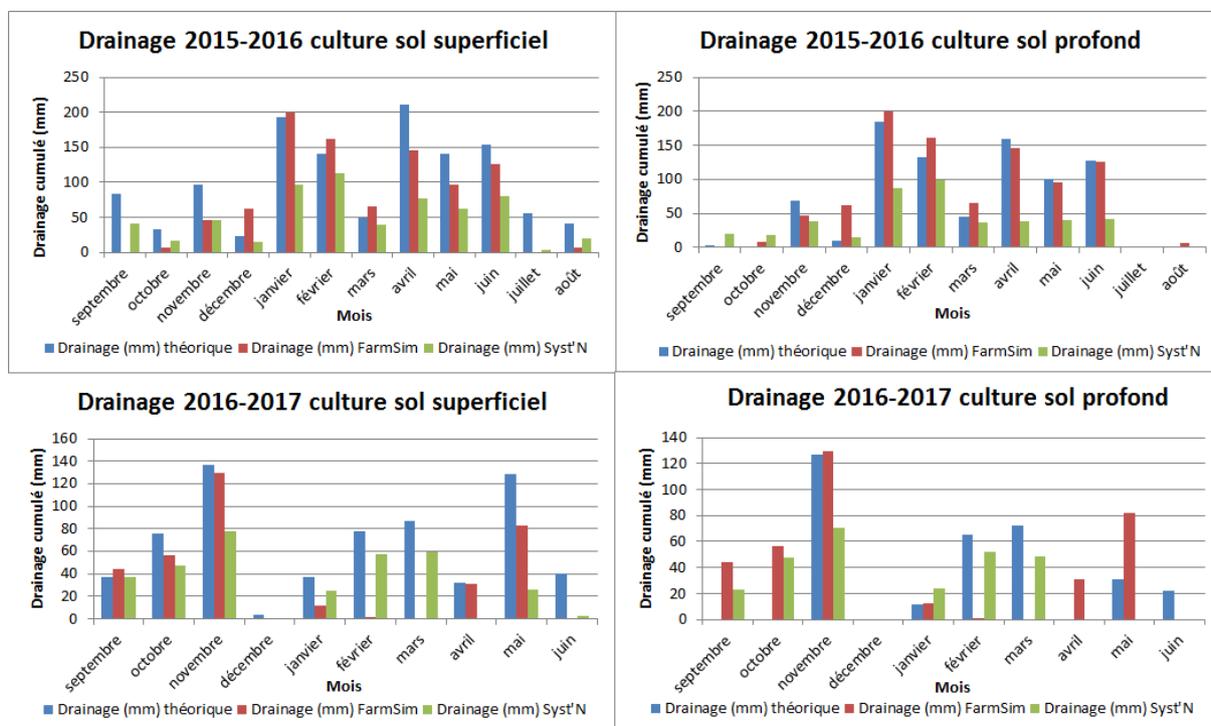


Figure 20 : Comparaison des drainages mensuels pour chaque année hydrologique

Lors de la première année hydrologique 2015-2016, le modèle FarmSim apparaît comme très proche du drainage théorique. Cette similitude disparaît lors de la seconde année hydrologique notamment parce que le modèle ne simule pas de drainage pendant la période estivale ainsi que les mois de février et mars 2017.

Le modèle Syst’N est toujours inférieur au drainage produit par l’outil FarmSim ainsi que celui calculé lors du bilan hydrique. Cependant, contrairement à FarmSim ce dernier produit un drainage pour les mêmes périodes que le drainage théorique.

Les Lysimètres présents sur les quatre situations de Chasnans collectent l’eau drainée dans des bidons de 4 l. Suite à des précipitations significatives, l’université de Besançon se rend sur les parcelles pour collecter et remplacer les bidons. Il est important de souligner que les bidons n’ont jamais été remplis au maximum de leur contenance, il n’y a donc pas eu de perte d’information. Cependant, tous les lysimètres n’ont pas récolté de l’eau drainée à chaque prélèvement (ANNEXE X). Pour éviter de créer des biais, le choix a été fait de ne retenir que la plaque lysimétrique coulant le plus fréquemment pour les comparaisons de drainage (la plaque utilisée est identifiée par son numéro allant de 1 à 3). La quantité d’eau drainée (mm) est obtenue en ramenant la quantité d’eau présente dans le bidon à la surface de la plaque lysimétrique (0.26 m²).

Tableau 19 : Comparaison des quantités d’eau drainée aux dates de prélèvement des bidons entre les lysimètres, bilan hydrique théorique et des modèles FarmSim et Syst’N. Les cellules grisées correspondent à la valeur la plus faible par situation et par période.

	Drainage (mm)	2015-2016			2016-2017		
		Décembre	Janv-avril	Mai-Août	Sept-dec	Janv-avril	Mai-Juin
Prairie sol superficiel (PS)	PS1	13,1	132,2	87,9	38,2	51,4	12,0
	Théorique	14,9	521,8	266,7	202,2	149,3	104,0
	FarmSim	16,8	336,6	222,6	137,3	1,8	36,5
	Syst’N	14,5	518,4	264,6	221,2	150,8	100,6
Prairie sol profond (PP)	PP1	---	43,8	29,6	17,4	38,2	5,2
	Théorique	---	531,5	255,8	108,2	149,2	26,4
	FarmSim	---	354,1	222,3	145,0	33,0	5,7
	Syst’N	---	259,1	71,8	69,1	85,3	0,0
Culture sol superficiel (CS)	CS2	7,3	69,8	41,3	22,0	38,2	10,0
	Théorique	15,7	598,2	414,1	319,1	205,0	204,5
	FarmSim	18,8	617,8	234,2	235,5	13,7	83,4
	Syst’N	29,2	328,3	173,4	168,3	141,3	28,4
Culture sol profond (CP)	CP3	2,1	87,1	33,9	27,6	37,1	18,7
	Théorique	15,7	598,2	414,1	319,1	205,0	205,0
	FarmSim	18,8	620,1	234,1	235,7	13,7	113,3
	Syst’N	27,5	264,8	90,5	140,9	124,1	0,0

Le Tableau 19 met en évidence que les lysimètres mesurent des quantités d’eau drainée nettement inférieures à celles simulées par les modèles et calculées avec le bilan hydrique théorique. FarmSim simule les valeurs les plus faibles pour les mois de janvier à avril 2017 car comme vu précédemment, il n’émet pas de drainage pour les mois de février et mars 2017. Syst’N n’a pas simulé de drainage sur les situations en sol profond pour les mois de mai et juin 2017. Les lysimètres ne semblent pas enregistrer un drainage correct et pourraient être défectueux ou il est encore nécessaire d’attendre que le contact entre le sol et le lysimètre se soit amélioré.

2. La concentration en nitrate et lixiviation

La possibilité que les lysimètres soient défectueux et ne collectent pas la totalité de l’eau drainée ne permet pas une validation concrète du modèle FarmSim. Néanmoins, lors de l’analyse des eaux collectées, le laboratoire détermine la concentration en nitrate des eaux. L’hypothèse suivante peut alors être émise : les lysimètres ne collectent pas toute l’eau drainée, mais les concentrations en nitrates de l’eau récupérée peuvent être correctes et correspondre aux concentrations moyennes de l’eau drainée pour la période concernée.

Tableau 20 : Comparaison entre l'azote lixivié annuel par les modèles FarmSim et Syst'N avec l'azote lixivié enregistré par les lysimètres dans les 4 situations et pour les 2 années hydrologiques

Année 2015-2016	Lysimètres				FarmSim			Syst'N		
	Plaque	Drainage (mm)	Lixiviation (kg N-NO ₃ ⁻ /ha)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	Drainage (mm)	Lixiviation (kg N-NO ₃ ⁻ /ha)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	Drainage (mm)	Lixiviation (kg N-NO ₃ ⁻ /ha)	NO ₃ ⁻ (mg/l)
Prairie sol superficiel	PS1	245,2	3,3	6,0	591,7	5	3,7	953,5	107,5	49,9
Prairie sol profond	PP1	76,5	2,4	13,9	592,1	5	3,7	339	26,4	34,5
Culture sol superficiel	CS2	85,3	12,9	66,9	916,5	113	54,6	612,5	61	44,1
Culture sol profond	CP3	127,3	3,3	11,5	916,5	113	54,6	432	38,8	39,8
Année 2016-2017										
Prairie sol superficiel	PS1	101,7	0,3	1,3	175,6	2	5,0	472,6	65,5	61,4
Prairie sol profond	PP1	69,1	0,2	1,3	183,5	2	4,8	154,5	9,6	27,5
Culture sol superficiel	CS2	70,3	4,9	30,9	356,6	82	101,8	332	58	77,3
Culture sol profond	CP3	85,3	6,4	33,2	356,6	83	103,0	264,9	66	110,3

Le Tableau 20 met en évidence que le modèle FarmSim n'est pas dépendant de la profondeur de sol en simulant des pertes identiques en azote pour les deux parcelles de prairie (5 kg N/ha pour la première année et 2 kg N/ha pour la seconde) et les deux situations en culture (113 kg N/ha en 2015-2016 et 83 kg N/ha en 2016-2017). Les pertes simulées par FarmSim sont nettement supérieures sous cultures que sous prairies.

Le modèle Syst'N (qui ne prend pas en compte la forme N-NH₄⁺ dans le sol) simule une lixiviation de l'azote variable avec toutefois une dépendance à la profondeur du sol pour les situations en prairies. Syst'N simule une perte de 50 kg N/ha pour la prairie sur sol superficiel la première année hydrologique contre 35 kg N/ha pour la parcelle sur sol profond. Les pertes simulées pour la seconde sont respectivement de 61 kg N/ha et 28 kg N/ha. Cette dépendance de la profondeur du sol n'est pas observable pour les situations en culture.

L'analyse des données enregistrées par les lysimètres montre des pertes en azote plus élevées sous les cultures. Pour la première année hydrologique les pertes sous prairies sont de 3 kg N/ha puis de 0,3 kg N/ha pour la seconde année. La lixiviation en 2015-2016 sous les situations en culture est de 13 kg N/ha pour la parcelle sur sol superficiel et 3 kg N/ha pour un sol profond. Lors de la seconde année hydrologique les pertes sont respectivement de 5 et 6 kg N/ha.

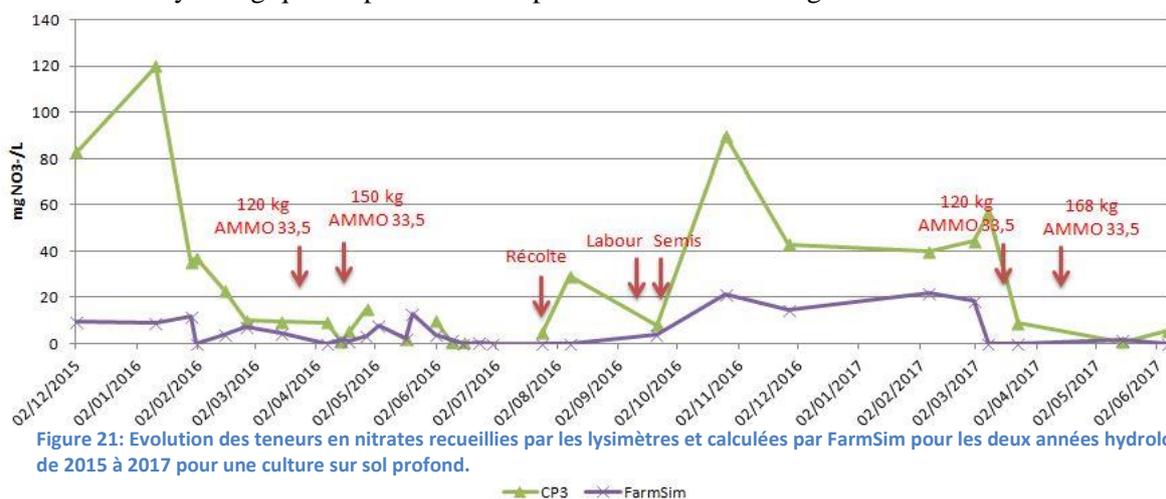


Figure 21: Evolution des teneurs en nitrates recueillies par les lysimètres et calculées par FarmSim pour les deux années hydrologiques de 2015 à 2017 pour une culture sur sol profond.

— CP3 — FarmSim

La Figure 21 permet de visualiser les variations de teneurs en nitrates dans les eaux récoltées par les lysimètres et les valeurs simulées par FarmSim. La concentration en nitrates lixiviés a été calcul pour chaque date de prélèvement en faisant la somme de l'azote lixivié entre deux prélèvements ainsi que la somme du drainage. L'azote total lixivié obtenu pour une date de prélèvement a ensuite été converti en nitrates (en multipliant par 4.427) puis divisé par le drainage total.

Les lysimètres présentent des valeurs de concentration en nitrates plus élevées que le modèle FarmSim. Or dans le tableau précédent, les données lysimétriques montraient des flux d'azote inférieurs aux simulations de FarmSim. Ceci est dû aux très faibles valeurs de drainage enregistrées par les lysimètres.

La plaque lysimétrique CP3 montre une réaction lors de la récolte de la culture avec une nette augmentation des concentrations en nitrates des eaux récoltées. Elle réagit tout comme FarmSim après le labour et le semis d'une nouvelle culture sur la parcelle par cette fois encore une forte augmentation des teneurs. Les apports de fertilisants au printemps ne semblent pas produire de réaction de la part du modèle et de la plaque lysimétrique.

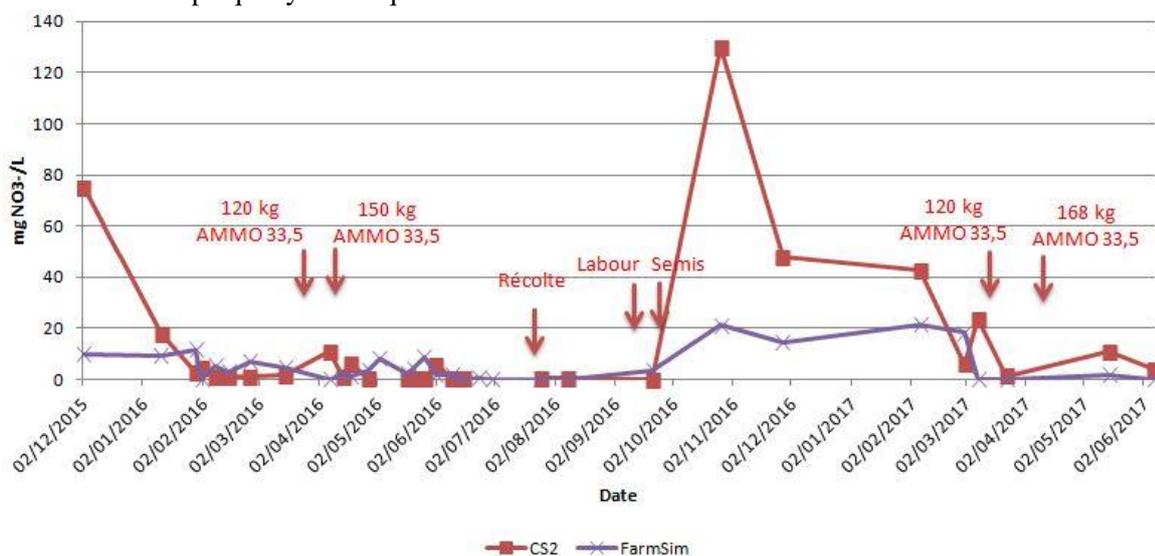


Figure 22 : Evolution des teneurs en nitrates recueillies par les lysimètres et calculées par FarmSim pour les deux années hydrologiques de 2015 à 2017 pour une culture sur sol superficiel.

La Figure 22 montre que pour une prairie sur sol superficiel les réactions obtenues dans la situation précédente suite au labour et semis sont les mêmes. Cette fois ci, le lysimètre CS2 semble avoir enregistré des concentrations en nitrates dans les eaux récoltées plus élevées suite de fertilisants minéral. C'est le cas pour le premier apport de fin mars 2016 et du dernier apport mi-avril. Les premières teneurs observées au cours de l'hiver 2015-2016 sont à prendre avec réserve étant donné qu'elles sont issues d'un sol récemment remonté lors de l'installation des lysimètres en septembre 2015.

VI. Discussion

A. Performances de FarmSim sur le bassin versant de Plaisir Fontaine

L'évaluation de la nouvelle version de FarmSim a démontré que les performances de simulation des quantités d'azote minéral du sol sur le bassin versant de Plaisir Fontaine sont mauvaises. Néanmoins il est nécessaire de rappeler que les paramètres nécessaires au modèle FarmSim sont caractérisés par leur incertitude.

1. Les enquêtes

Au cours des enquêtes, certains exploitants n'enregistraient pas de façon systématique leur pratiques agricoles, par conséquent les informations données ne sont pas précises. Dans certains cas, ils regroupaient plusieurs parcelles sur lesquelles ils estimaient avoir appliqué le même itinéraire technique. Cela représente un risque de perte d'information. L'incertitude de leurs pratiques sur l'année précédente et les regroupements de parcelles occasionnent des décalages sur les dates d'apport de fertilisants. Ce biais affecte les processus simulés par le modèle. Les dates de pâturages sont quant à elles presque impossibles à renseigner avec précision. Les agriculteurs ne les enregistrent que très rarement car il s'agit là d'une gestion de leur pâturage au jour le jour.

L'enquêteur lui-même est une source d'erreur. Depuis 2010, un enquêteur différent a été nommé pour chaque campagne. Des erreurs d'interprétation dans l'enquête auprès de l'agriculteur de prise de notes, de saisie informatique sont toujours possibles malgré la vigilance qui s'impose.

2. Les données pédoclimatiques

FarmSim et Syst'N n'ont pas besoin des mêmes données pour fonctionner. Un choix a été fait de standardiser certaines entrées du modèle FarmSim avec le mode expert et ce dans le but de ne pas alourdir les enquêtes (Vieille, 2016).

Les paramètres du sol pour les parcelles du bassin versant de Plaisir Fontaine reposent sur des informations tirées de la carte pédologique de la France pour Besançon ou sont issus de l'avis d'experts. L'échelle utilisée pour cette carte ne permet pas la prise en compte de l'hétérogénéité locale.

La zone d'étude ne dispose pas d'une station météorologique. Ces données ont été déterminées à partir de trois stations environnantes en leur appliquant un coefficient de corrélation afin de leur donner plus de poids ou non. Les variations très locales (orages) ne sont pas prises en compte.

3. Les mesures effectuées

Le bassin versant de Plaisir Fontaine est équipé de dispositifs permettant l'enregistrement de la quantité d'azote lixivié sous les parcelles agricoles. Cependant, l'installation récente de ces dispositifs ne permet pas l'utilisation des données observées. Les campagnes de reliquats azotés réalisées sur le bassin versant n'ont pas pour objectif de faire un suivi de certaines parcelles et ainsi alimenter la base de données. Ces campagnes visent à aider le conseiller de la Chambre d'Agriculture du Doubs et du Territoire de Belfort à prodiguer des conseils de fertilisation. Les mesures effectuées sont donc indépendantes des types de sols et de l'occupation de la parcelle. Les quantités d'azote minéral sont déterminées par un laboratoire d'analyse qui présente une incertitude de leur résultats de 3 à 5 % (AGRO-Système / SAS Laboratoire, 2009). Cette incertitude sur les mesures est néanmoins bien inférieure aux biais constatés dans les simulations.

4. Le modèle utilisé

FarmSim est un modèle toujours en construction. Les remarques apportées par Vieille, 2016, sur le modèle n'avaient pas été étudiées par les concepteurs. Ainsi, au commencement de cette étude, le modèle n'avait pas été modifié depuis septembre 2016. Par la suite un regard a été porté sur ces remarques mais il n'a pas permis de détecter de problème majeur dans le fonctionnement du modèle. D'autres organismes d'études ont demandé aux concepteurs la réalisation de simulations. Et ce n'est qu'en effectuant ces simulations que des modifications ont été apportées au modèle FarmSim.

Les résultats montrent que ces modifications n'ont pas eu d'impact sur les performances du modèle. L'unique différence observable se situe au niveau de la minéralisation. Auparavant les valeurs étaient fortement variables (48 à 43 000 kg N/ha pour une culture) (Vieille, 2016). Désormais elles présentent toutes le même ordre de grandeur. Cependant la minéralisation est supérieure aux valeurs attendues d'un facteur mille.

Le fait que le modèle soit toujours en construction constitue un véritable problème dans son utilisation quotidienne. L'interface d'entrée des données ne fonctionne pas. Ainsi pour entrer une nouvelle parcelle, il existe deux possibilités. Passer par le modèle Syst'N, puis utiliser un programme informatique dédié pour transférer les données au modèle FarmSim. Soit utiliser l'outil **Notepad++** pour modifier directement les données une à une dans les lignes de code. Ces deux méthodes donnent souvent naissance à des erreurs parfois difficiles à repérer. Elles peuvent occasionner des pertes de temps de plusieurs heures si l'intervention de l'ingénieur en charge du modèle est nécessaire.

B. Les performances du modèle pour les situations de Chasnans

1. Le drainage

La simulation des quatre situations de Chasnans a démontré que le drainage déterminé par FarmSim est cohérent avec les références littéraires. Le drainage théorique apparaît supérieur aux valeurs bibliographiques.

L'un des objectifs de cette étude était de comparer les simulations de drainage du modèle FarmSim avec le modèle Syst'N. Tous deux utilisent des sous modèles (Darcy pour FarmSim ; Burns pour Syst'N) afin de calculer leur drainage respectif. Il a été observé que les résultats produits étaient bien différents les uns des autres.

Le modèle de Burns utilise en réalité un calcul très proche de celui effectué pour déterminer le bilan théorique (Annexe XX). Le modèle va d'abord déterminer la réserve utile affectée à la parcelle à partir des données du sol renseignées. Puis un bilan hydrique est calculé avec la même formule que celle utilisée pour faire les bilans hydrique théoriques de cette étude. Les différences visibles entre le drainage théorique et le drainage simulé par Syst'N proviennent donc de la caractérisation du sol comme étant un assemblage d'une multitude de couche de 1 cm. Dans lesquelles sont définis des points précis à partir desquels l'eau passe dans la couche suivante ou non. Mais aussi parce que les coefficients culturaux utilisés par le modèle Syst'N sont plus précis que ceux utilisés dans cette étude.

Le modèle FarmSim qui utilise la loi de Darcy va prendre en compte beaucoup plus d'éléments pour réaliser ses calculs de drainage. La première grande différence correspond à la création d'un compartiment « neige ». Lorsque des précipitations ont lieu à des températures négatives, le modèle va alimenter ce compartiment et ne pas créer de drainage. Lorsque les températures atteignent de nouveau des valeurs positives, le compartiment neige se vide et entraîne un drainage qui sera plus important que celui simulé par le modèle Syst'N pour le même jour. Cette différence peut expliquer les différences observées entre les modèles pour la saison hivernale. Des phénomènes de ruissellement sont intégrés dans le modèle FarmSim alors qu'ils ne semblent pas l'être dans le sous modèle utilisé par Syst'N. Enfin, le sous modèle de Darcy intègre la notion de capillarité à l'intérieure du sol. Lorsque les couches supérieures s'assèchent, ce phénomène permet de remonter de l'eau des couches inférieures. En outre, le modèle FarmSim ne simule pas de drainage pendant la période estivale et au moment de la pousse des végétaux si les pluies ne sont pas trop importantes.

Une comparaison des valeurs de ruissellement produites par le modèle Syst'N et le modèle FarmSim permettrait de constater si le ruissellement ne constitue pas l'un des éléments à l'origine de la différence de drainage entre les deux.

Un second objectif de l'étude est de valider les performances de simulation du drainage par le modèle FarmSim en comparant les valeurs produites avec des données observées sur le terrain. Les lysimètres installés par l'Université de Besançon sur les quatre situations de Chasnans en trois exemplaires ont fourni ces données. La comparaison des valeurs simulées et observées montre que les lysimètres sous-estiment largement la quantité d'eau drainée. Au regard des données bibliographiques, les lysimètres enregistrent un drainage inférieur à ce qu'il devrait être. Le modèle FarmSim quant à lui concorde avec la bibliographie.

Cette mauvaise performance de la part des lysimètres peut avoir plusieurs causes. Bien que les plaques lysimètres soient triplées pour chacune des situations les valeurs enregistrées varient fortement d'une plaque à l'autre. Certaines plaques ne coulent que très rarement. Pour ces dernières, il est probable que le tuyau d'alimentation du bidon ou la gouttière soient obstrués par de la terre ou bien des animaux mort piégés à l'intérieur. Lors de l'installation des lysimètres, la reconstruction des horizons a pu provoquer des écoulements préférentiels de l'eau. Des mouvements horizontaux peuvent entraîner l'eau hors de la zone de collecte de la plaque. D'après les références bibliographiques, un sol met jusqu'à deux jours pour se reconstituer suite à l'installation des lysimètres. En effet, le contact entre le sol et la plaque lysimétrique prend un certain temps avant de se faire. Si le contact est mauvais alors les mouvements préférentiels de l'eau peuvent éviter la plaque.

2. La lixiviation

Les limites du modèle Syst’N sont apparues lors de l’étude de la lixiviation des nitrates. Les concentrations en nitrates simulés pour les périodes de prélèvements sont nettement supérieures aux valeurs observées par les lysimètres et celles simulées par FarmSim.

En revanche, le modèle FarmSim simule des valeurs présentant le même ordre de grandeur que les lysimètres. Dans l’ensemble, le modèle FarmSim semble performant dans la simulation des pertes en azote sous les parcelles agricoles de Chasnans par rapport aux données enregistrées par les lysimètres.

3. Estimation des pertes en azote pour les quatre situations de Chasnans

Les plaques lysimétriques installées sur les quatre situations de Chasnans enregistrent des valeurs de drainage moindres que celles données dans la bibliographie ainsi que les valeurs simulées par les modèles. Cependant, les concentrations en nitrates analysées dans les eaux des bidons s’avèrent être du même ordre de grandeur que les valeurs simulées par le modèle FarmSim.

Suite à ces résultats, la décision de faire une estimation des pertes en azote sous les quatre situations de Chasnans a été prise. Les lysimètres apparaissent comme défectueux sur l’enregistrement des eaux de drainage mais correctes pour les concentrations en nitrates des eaux drainées. Les calculs utilisés par FarmSim sont issus de la réflexion de nombreux scientifiques, et le drainage produit concorde avec les données bibliographiques. Le choix de combiner les concentrations en nitrates enregistrées par les lysimètres et les valeurs de drainage simulées par FarmSim a été fait pour réaliser l’estimation de la lixiviation. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 21 : Estimation subjective des pertes en azote pour les quatre situations de Chasnans sur 2 années hydrologiques.

Année 2015-2016	Drainage FarmSim (mm)	Lixiviation estimée (kg N/ha)	NO ₃ -lysimètres (mg/l)
Prairie sol superficiel	591,7	2,9	2,2
Prairie sol profond	592,1	11,3	8,4
Culture sol superficiel	916,5	13,8	6,7
Culture sol profond	916,5	73,1	35,3
Année 2016-2017			
Prairie sol superficiel	175,6	2	5,0
Prairie sol profond	183,5	1,3	3,1
Culture sol superficiel	356,6	32	39,7
Culture sol profond	356,6	28,8	35,8

D’après Vertès et al, 1997, les pertes par lixiviation sous prairies varient de 0 (prairies de fauche correctement fertilisées) à plus de 100 kg N/ha/an lorsque les prairies sont fortement fertilisées et pâturées de façon intensive. Sous une prairie de ray gras anglais fauchée et sous climat océanique (1 040 mm de précipitations annuelles et drainage de 570 mm), Simon et al, 1989, ont de plus constaté une lixiviation moyenne de 7 kg N/ha/an pour une fertilisation de 200 kg N/ha/an. La lixiviation annuelle simulée est en moyenne de 2 kg N/ha/an pour les situations en prairie de Chasnans (Tableau 21). Une exception est à noter pour la première année de la situation en prairie sur sol profond, la première valeur de concentration en nitrate enregistrée par les lysimètres ayant été extrêmement élevée. Les situations du bassin versant de Lods reçoivent une fertilisation inférieure à 200 kg N/ha/an. Les ordres de grandeurs des simulations de la lixiviation obtenus sont donc cohérents avec ces observations.

La lixiviation obtenue pour les deux situations en culture montre des valeurs bien plus élevées comparé aux prairies. Elles présentent une grande variation en 2015-2016 avec une lixiviation de 13.8 kg N/ha (sol superficiel) et 73.1 kg N/ha (sol profond). Ces valeurs varient moins en 2016-2017 avec une moyenne de 30 kg N/ha perdu par lixiviation. Ces quantités sont supérieures à celles simulées sous prairie, ce qui est cohérent avec les affirmations de Simon & LeCorre, 1989, indiquant que les pertes par lixiviation sous prairies sont plus faibles par rapport aux cultures annuelles.

C. Les sensibilités du modèle FarmSim

Pour compléter cette étude, quelques tests de sensibilité ont été réalisés sur les quatre situations de Chasnans. De nombreux tests de sensibilité peuvent être effectués. Lors de l'analyse des résultats de simulation des quatre parcelles du bassin versant de Lods, une première indépendance du modèle à un paramètre a été observée. Il s'agit de la profondeur du sol. En effet, les valeurs de drainage et lixiviation pour les prairies sont identiques et il en va de même pour les cultures.

1. Les propriétés physiques du sol

Deux tests de sensibilité sur les propriétés physiques du sol sont réalisés pour deux situations (prairie et culture). Le premier test consiste à simuler chaque situation avec un sol très riche en argile (95 %) et le second test simule les situations avec un sol pauvre en argile (5 %). Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 22 : Drainage simulé pour différentes proportions en argile des sols et pour 2 situations par année hydrologique

Mois	Parcelle en prairie			Parcelle en culture		
	Sol réel	Sol 95% argile	Sol 5% argile	Sol réel	Sol 95% argile	Sol 5% argile
	Drainage (mm) FarmSim	Drainage (mm)	Drainage (mm)	Drainage (mm) FarmSim	Drainage (mm)	Drainage (mm)
	2015-2016			2015-2016		
Septembre	0	0	0	0	0	
Octobre	0	0	0	7,5	6.5	6.5
Novembre	25,8	22,1	22,1	46,6	47.6	47.6
décembre	68,5	69,6	69,6	61,9	61.9	61.9
Janvier	31,1	32,3	32,3	199,8	199	199
Février	95,2	95,4	95,3	161,4	162	162.1
Mars	53	53,8	53,8	65,6	65.7	65.7
Avril	108	104,1	104,1	145,13	142.7	142.7
Mai	90,5	89,7	89,7	96,2	87.9	87.9
Juin	119,6	124,6	124,6	126,3	137	137
Juillet	0	0	0	0	0	0
Août	0	0	0	6,1	6.1	6.1
Total	591,7	591,6	591,5	916,53	916.4	916.5
	2016-2017			2016-2017		
Septembre	7,5	7,5	7,5	44,3	44.3	44.3
Octobre	41,9	41,5	41,5	56,2	52.5	52.5
Novembre	89,4	89,4	89,4	129,5	133.2	133.2
Décembre	0,3	0,7	0,7	0	0	0
Janvier	0	0	0	12	12	12
Février	0	0	0	1,3	1.3	1.3
Mars	0	0	0	0	0	0
Avril	32	32,4	36,5	30,9	29.7	29.7
Mai	4,5	4,4	4,5	82,4	83.6	83.6
Juin	0	0	0	0	0	0
Total	175,6	175,9	180,1	356,6	356.6	356.6

Les résultats obtenus pour un sol comportant 95 % sont sensiblement identiques aux valeurs obtenues avec les pourcentages en argile-limons-sables analysés sur la parcelle. Lorsque que les deux situations sont simulées avec des sols comportant 5 % d'argile, le drainage calculé reste inchangé. Le drainage simulé par FarmSim apparaît comme indépendant de la proportion en argile des sols.

2. La dose d'apport

Il paraît important de regarder si les doses d'apports en fertilisants organiques et minéraux ont un impact sur les quantités d'azote lixivié et les concentrations en nitrates. Le choix a été fait de tripler les quantités d'apports puis de simuler de nouveau une situation en prairie et une situation en culture. Les résultats obtenus sont comparés aux résultats initiaux dans le tableau suivant :

Tableau 23 : Azote lixivié et concentrations en nitrates pour deux situations et par année hydrologique suite à l'augmentation manuelle des quantités de fertilisants apportés. Le drainage a été vérifié et est resté identique.

Année 2015-2016	FarmSim (apports réels)			FarmSim apports triplés	
	Drainage (mm)	Lixiviation (kgN/ha)	NO ₃ - (mg/l)	Lixiviation (kgN/ha)	NO ₃ - (mg/l)
Prairie	591,7	5	3,7	9	6,7
Culture	916,5	113	54,6	149	72
Année 2016-2017					
Prairie	175,6	2	5,0	5	12,6
Culture	356,6	82	101,8	97	120,4

Lorsque les doses d'apports sont multipliées par trois, les résultats simulés présentent des valeurs de lixiviation supérieures à celles produites pour les apports réels. Il y a donc une dépendance de la part de la lixiviation par rapport à la quantité d'azote apporté.

D. Pistes d'amélioration

Le travail effectué dans cette étude a mis en avant plusieurs possibilités d'optimisation. Le modèle FarmSim est toujours en cours de construction, il est important de continuer le dialogue entre la Chambre d'Agriculture du Doubs et du Territoire de Belfort avec l'INRA de Clermont Ferrand. Les échanges entre les deux organismes permettront par la suite de corriger les défauts existant dans le modèle. Pour le modèle CERES-EGC, la modélisation de la minéralisation et des quantités de N-NH₄⁺ du sol s'effectue uniquement sur le premier horizon. Dans la nouvelle version utilisée, les dates de labour ont été ajoutées au modèle, mais d'autres points restent à être paramétrés. Un travail est à effectuer sur les apports d'engrais azotés et plus précisément sur leur composition en N-NO₃⁻ et N-NH₄⁺. Une courbe de minéralisation des effluents organiques permettrait une meilleure simulation de ce type d'apport sur une parcelle. Les tests de sensibilités ont révélé que le modèle FarmSim n'était pas dépendant de l'épaisseur du sol. Cette indépendance est à étudier par les ingénieurs travaillant sur le modèle FarmSim pour en déterminer la cause.

Des lysimètres ont été installés par l'Université de Besançon en septembre 2016. Leurs données trop récentes ne pourront être utilisées qu'à partir de 2018. Cependant le bassin versant n'est pas équipé d'une station météorologique. Un instrument qui permettrait d'augmenter la précision des quantités de précipitations de température et d'évapotranspiration. Cette précision permettrait au modèle une meilleure simulation des drainages notamment avec l'enregistrement de phénomène locaux tel un orage. Les parcelles de Plaisir Fontaine qui sont équipées d'un lysimètre n'ont pas encore été étudiées d'un point de vue pédologique. Or pour la simulation de ces parcelles, il est nécessaire de connaître les propriétés du sol.

Les lysimètres présents sur le bassin versant de Lods semblent enregistrer des quantités de drainage trop faibles. Pour les lysimètres ne fonctionnant pas du tout ou qu'à de très rares occasions il serait nécessaire de les déterrer afin d'en comprendre les raisons. Pour les autres, un test pourrait être effectué pour déterminer si les quantités de drainage sont bien enregistrées ou non par les lysimètres. Il s'agit alors d'amener la parcelle à saturation en eau puis d'apporter des quantités définies et relever les quantités récoltées par les lysimètres afin de voir quelle proportion de l'eau apportée a été drainée.

Conclusion

La nouvelle version de FarmSim utilisée, sur les parcelles retenues du bassin versant de Plaisir Fontaine, pour évaluer ses performances pour la simulation des quantités d'azote minéral du sol donne de mauvais résultats. Les quantités d'azote sous forme d'ions nitrates et ammonium simulées sont différentes de celles mesurées par la méthode des reliquats azotés.

Les simulations des processus liés à la lixiviation ont été mitigées. Les rendements calculés par le modèle FarmSim ne correspondent globalement pas avec les valeurs bibliographiques pour les cultures mais apparaissent cohérentes pour les prairies. La simulation de la minéralisation du sol est mauvaise, un facteur mille semble être à l'origine du problème.

Le travail de simulation réalisé sur les quatre situations de Chasnans a démontré que le modèle FarmSim calcule des valeurs de drainage inférieures à celles observées grâce aux dispositifs lysimétriques. Néanmoins, une comparaison avec des références bibliographique a mis en évidence un mauvais enregistrement du drainage de la part des lysimètres et des valeurs simulées correctes. De plus, les valeurs de concentration en nitrates des eaux simulées par FarmSim pour les dates de prélèvement présentent un même ordre de grandeur que les teneurs observées dans les lysimètres.

L'estimation subjective des pertes en azote sur les quatre situations de Chasnans sont de l'ordre de 2 kg N/ha/an pour les parcelles en prairie. Des quantités faibles qui correspondent avec les références bibliographie et qui relèvent bien du caractère extensif de l'agriculture du Doubs. Les pertes en azote des cultures sont de l'ordre de 30 kg N/ha pour la deuxième année hydrologique. Une lixiviation plus importante par rapport aux prairies mais qui ne paraît pas très élevée.

Les tests de sensibilité réalisés sur le modèle FarmSim démontrent d'une indépendance du modèle dans les propriétés physiques du sol (proportion en argile et profondeur de sol) pour la simulation du drainage. En revanche, la lixiviation simulée par le modèle est bien dépendante de la quantité d'azote apporté sur la parcelle.

Bibliographie

- Agreste Franche-Comté, (2013). L'agriculture Franc-Comtoise en 2010. Agreste Franche-Comté n° 184 - Septembre 2013
- Agrocampus Ouest (ACO) & Centre d'étude et de valorisation des algues (CEVA), (2006). Pratiques agricoles, fuites de nitrates et qualité de l'eau dans les bassins versants : synthèse des références applicables au contexte Breton.
- Beaudoin N, Constantin J, Barataud F, Burel E, Foissy D & Aubrion G, (2010). Impacts à long terme de changements de pratiques culturales sur le lessivage du nitrate. PIREN-Seine, Phase V – Rapport de synthèse 2007-2010
- Bakalowicz M, (1999). Bassin Rhône-Méditerranée-Corse, guide technique n°3 : Connaissance et gestion des ressources en eaux souterraines dans les régions karstiques, juin 1999.
- Beaujouan V, (2001). Modélisation des transferts d'eau et d'azote dans les sols et les nappes. Développement d'un modèle conceptuel distribué. Applications à de petits bassins versants agricoles.
- Bellocchi G, Rivington M, Donatelli M & Matthews K, (2010). Validation of biophysical models: issues and methodologies. A review. *Agronomy for sustainable development*, (March 2010), volume 30, issue 1, p 109-130.
- Benoit M, (2014). Les fuites d'azote en grandes cultures céréalières. Lixiviation et émissions atmosphériques dans des systèmes biologiques et conventionnels du bassin de la Seine (France).
- Broadhurst M & Dussouillez C, (2013). Evaluation des flux d'azote à l'échelle du bassin versant de la Loue et modélisation des transferts.
- François M, Glasson R, Baud A, Chopard P, Brevet S, Fourel M, Mangin JM, Franck-Grandidier I & Chaumartin C, (2003). Guide de la fertilisation en Franche Comté, mars 2003. Guide réalisé par les Chambres d'agriculture de Franche Comté, avec l'appui scientifique de l'ITCF, du centre technique interprofessionnel des oléagineux métropolitains (CETOM), de l'AGPM, de l'institut technique de la betterave, de l'institut de l'élevage, de l'INRA, d'INTERVAL et du COMIFER.
- Cameron KC & Haynes RJ, (1986). Chapter 4: Retention and Movement of Nitrogen in Soils, in Haynes RJ, (1986). Mineral nitrogen in the plant-soil system. Ed. Kozlowsky T.T. Madison (USA), 483 p.
- Chanez E, Degiorgi F, Lucot E & Badot PM, (2014). Les flux d'azote et de phosphore dans le bassin versant de la haute et moyenne Loue, approche à partir des données institutionnelles.
- Laboratoire Chronoenvironnement, (2015). Étude de l'état de santé des rivières karstiques en relation avec les pressions anthropiques sur leurs bassins versants. Rapport des tranches 1 et 2 A Volet qualité physique et chimique Rapport qualité physique et chimique
- CIVAM Bretagne, (2010). Pourquoi – Comment réduire les risques « azote » liés au retournement des prairies ? Synthèse bibliographique réalisée en 2010
- Conseil scientifique du comité de bassin Rhône Méditerranée, (2012). Avis sur l'état de la rivière Loue, octobre 2012.
- Cuinet A, Daudey T, Rahon J & Daud JB, (2012). Suivi de la qualité des eaux des sources du Maine et de Plaisir Fontaine.
- De Toffoli M, Oost JF & Lambert R, (2013). Impact de la destruction de prairie sur reliquat d'azote et la gestion de la fertilisation azotée.
- Gabrielle B & Kengni L, (1996). Analysis and field evaluation of the CERES Models' Soil components: Nitrogen transfer and transformation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60:142-149 (1996).
- Gabrielle B, Roche R & Gosse G, (1999). CERES-Rape, a model for the production and environmental impact of rapeseed.

- Gabrielle B, Roche R, Angas P, Cantero-Martinez C, Cosentino L, Mantineo M, Langensiepen M, Hénault C, Laville P, Nicoullaud B & Gosse G, (2002). A priori parameterisation of the CERES soil-crop models and tests against several European data sets. *Agronomie* 22 (2002) 119–132 DOI : 10.1051/agro : 2002003.
- Gabrielle B, (2006). CERES-EGC documentation. INRA Environnement et Grandes Cultures, F-78850 Thiverval-Grignon, France.
- Gabrielle B, Laville P, Duval O, Nicoullaud B, Germon JC & Hénault C, (2006). Process-based modeling of nitrous oxide emissions from wheat-cropped soils at the subregional scale
- Gaiffe M, Bruckert S & Eimberck M (2012). Notice explicative de la carte des sols de Besançon au 1/100 000. Orleans, FRA: INRA, 250.
- Graux AI, (2011). Modélisation des impacts du changement climatique sur les écosystèmes prairiaux. Voies d'adaptation des systèmes fourragers. *Agricultural sciences. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2011. French*. <NNT: 2011CLF22104>. <Tel-00653360>
- Graux AI, Lardy R, Gaurut M, Duclos E & Klump K, (2012). PaSim User's guide. Grassland Ecosystem Research Unit, French National Institute for Agricultural Research, PaSim v5.3. *IDDN.FR.001.220024.000. R.P.2012.000.10000*.
- Graux AI, Lardy R, Manneville V, & Carrère P, (2013). Peut-on limiter les pollutions azotées en prairie permanente en jouant sur la période d'épandage des effluents d'élevage ? *Fourrages* (2013) 214, 149-158
- Haynes RJ, (1986). Mineral nitrogen in the plant-soil system. Ed. Kozlowsky T.T. Madison (USA), 483p.
- Hénault C, Bizouard F, Laville P, Gabrielle B, Nicoullaud B, Germon JC & Cellier P, (2005). Predicting in situ soil N₂O emission using NOE algorithm and soil database. *Global Change Biology* (2005) 11, 115–127, DOI: 10.1111/j.1365-2486.2004. 00879. X
- Ines AVM, Droogers P, W Makin I & Das Gupta A, (2001). Crop growth and soil water balance modeling to explore water management options. *IWMI Working Paper 22*. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute.
- Institut de l'élevage, (2014). Evolution de la réglementation portant sur les ICPE en élevage d'herbivore – Situation au 1^{er} janvier 2014.
- Jego G, (2008). Influence des activités agricole sur la pollution nitrique des eaux souterraines. Analyse par modélisation des impacts des systèmes de grande culture sur les fuites de nitrate dans les plaines alluviales.
- Laurent F, (1999). Fertilisation azotée : points de repères en matière d'environnement. *Perspectives agricoles*, 244, p. 85-87.
- Laurent F, Vertes F, Farruggia A & Kerveillant P, (2000). Effets de la conduite de la prairie pâturée sur la lixiviation du nitrate. Propositions pour la maîtrise du risque à l'échelle de la parcelle. *Fourrages* (2000), 164, p.397-420.
- Lemaire G & Salette J, (1984). Relation entre dynamique de croissance et dynamique de prélèvement d'azote pour un peuplement de graminées fourragères. I. — Etude de l'effet du milieu. *Agronomie*, 1984, 4 (5), p. 423-430
- Lehuger S, (2009). Modélisation des bilans de gaz à effet de serre des agro-écosystèmes en Europe. *Sciences de la Terre. AgroParisTech, 2009. Français*. <NNT : 2009AGPT0022>. <Tel-00438077>
- Lehuger S, Gabrielle B, Van Oijen M, Makowski D, Germon JC, Morvan T & Hénault C, (2009). Bayesian calibration of the nitrous oxide emission module of an agro-ecosystem model. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 133 (2009) 208–222
- Lichtfouse E, Hamelin M, Navarette M & Debaeke P, (2011). Sustainable Agriculture, volume 2. Springer Science & Business Media, 992 P.

- Martin R, Gaurut M, Lardy R, Carrère P, Graux AI, Drouet JL, Fiorelli JL, Blanfort V, Capitaine M, Duret S, Gabrielle B, Cellier P & Soussana JF, (2011). Des modèles pour comprendre la réponse des écosystèmes prairiaux au changement climatique, *Innovations Agronomiques 12* (2011), p. 97-108
- Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt, Bulletin officiel n° 11 – 2015 : Cahier des charges de l'appellation d'origine « Comté », associé à l'avis AGRT1504848V.
- Moriassi DN, Arnold JG, Van Liew MW, Bingner RL, Harme RD & Veith TL, (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE, Vol. 50(3): p.885–900. American Society of Agricultural and Biological Engineers ISSN 0001–2351*
- Muller JC, (1996). Trente ans de lysimétrie en France 1960-1990. Editions INRA, Collection: Un point sur..., 390 pages. ISBN: 2-7380-0657-4
- Nain AS, Kersebaum KC (2004) Calibration and validation of CERES model for simulating. In 'Modelling water and nutrient dynamics in soil-crop systems'. (Eds KC Kersebaum, JM Hecker, W Mirschel, M Wegehenkel) pp. 161–181. (Springer: Dordrecht, The Netherlands)
- Nicolardot B, Mary B, Houot S & Sethecou S, (1996). La dynamique de l'azote dans les sols cultivés. In Maitrise de l'azote dans les agroécosystèmes, Reims (France), 19-20 novembre 1996, Ed. INRA, Paris 1997 (Les Colloques, n°83).
- Onema & Bioemco, (2012). Rapport d'expertise sur les mortalités de poissons et les efflorescences de cyanobactéries de la Loue, Mars 2012.
- Parneaudau V, Reau R & 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. *Innovations Agronomiques 21* (2012), p.59-70
- Paul C & Lassaad B, sous mandat de l'office fédéral de l'environnement (OFEV) (2012). Clonalité de *Saprolegnia parasitica*, le parasite des poissons du Doubs.
- Popova Z & Kercheva M, (2005). CERES model application for increasing preparedness to climate variability in agricultural planning – calibration and validation test. *Physics and Chemistry of the Earth 30* (2005) 125–133
- Riedo M, Grub A, Rosset M & Fuhrer J, (1998). A pasture simulation model for dry matter production, and fluxes of carbon, nitrogen, water and energy, *Ecological Modelling 105*. 141–183, 0304-3800:98: \$19.00 © 1998 Elsevier Science B.V. All rights reserved. PII S0304-3800(97)00110-
- Riedo M, Gyalistras D & Fuhrer J, (2000). Net primary production and carbon stocks in differently managed grasslands: simulation of site-specific sensitivity to an increase in atmospheric CO2 and to climate change. *Ecological Modelling 134* (2000) p.207–227.
- Riedo M, Milford C, Schmid M & Sutton A, (2002), Coupling soil /plant /atmosphere exchange of ammonia with ecosystem functioning in grasslands, *Ecological Modelling 158*, p 83-/110
- Ritchie JT, (1972). Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water resource & research, october 1972, vol. 8 n°5*.
- Ritchie JT, (1998). Soil water balance and plant water stress. In : Understanding Options for Agricultural Production, Edited by Tsuji Gy, Hoogenboom G, & Thornton PK. *Library of Congress Cataloging-in-Publication Data is available. ISBN 978-90-481-4940-7 ISBN 978-94-017-3624-4 (eBook). DOI 10.1007/978-94-017-3624-4*
- Roebroeck H, (2009), Le prélèvement de terre : Quels acquis méthodologiques, Conférence azote SAS Laboratoire / AGRO- Systèmes – ARDON – 1er octobre 2009. Comifer, Gemas avec la participation de l'Afes.
- Schvartz C, Muller JC, & Decroux J, sous l'égide du Comifer, (2005). Guide de la fertilisation raisonnée. *Editions France agricole*
- Simon JC & Lecorre L, (1992). Fertilisation des cultures annuelles et lessivage de l'azote nitrique.

Fourrages (1992) 129, p.3-10.

Simon JC, de Montard F, Lecorre L & Pepin D, (1989). Rôle agronomique de la prairie dans la gestion du drainage des nitrates vers la nappe phréatique. *Fourrages* (1989), 119, p. 227-241.

Simon JC, Peyraud JL, Decau ML, Delaby L, Vertès F & Delagarde R, (1997). Gestion de l'azote dans les systèmes prairiaux pâturés permanents ou de longue durée. In Maitrise de l'azote dans les agroécosystèmes, Reims (France), 19-20 novembre 1996, Ed. INRA, Paris 1997 (Les Colloques, n°83).

Simon JC, (1999). La pollution nitrique des eaux. In : L'eau : usage et polluants, Grosclaude G (cord.), INRA Editions, p 95-115.

Thornley JHM & Verberne ELJ, (1989). A model of nitrogen flows in grassland. *Plant, Cell Environ.* 12, 863–886.

Thouvenin P, (2014). Pratiques agricoles et flux d'azote à l'échelle d'un sous bassin versant en milieu karstique sous Syst'N. Mémoire de stage Université de Picardie Jules Verne. 100 p.

Tourenne D, (2011). Etude agricole dans le bassin versant de plaisir fontaine, campagne aout 2010-juillet 2011.

Tourenne D, (2012). Pratiques agricoles et prévention des pertes en azote. Chambre d'Agriculture du Doubs, Juillet 2012

Turpin N, Vernier F & Joncour F, (1997). Transferts de nutriments des sols vers les eaux – Influence des pratiques agricoles - Synthèse bibliographique. *Ingenieries - E A T, IRSTEA _edition 1997, p. 3 - p. 16. <hal-00461025>*

Vandenbergh C & Marcoen JM, (2011). Stockage des fumiers au champs. Evaluation du reliquat sous le tas et impact sur la qualité de l'eau. Etablissement des aapl de référence 2011. Dossier GRENeRA 11-08 11p. In Vandenbergh C, De Toffoli M, Deneufbourg M, Imbrecht O, Lambert R & Marcoen JM, (2011). Programme de gestion durable de l'azote en agriculture wallonne – Rapport d'activités annuel intermédiaire 2011 des membres scientifiques de la structure d'encadrement Nitrawal. Université de Liège Gembloux Agro-Biotech et université catholique de Louvain, 40P. + annexes

Vertès F, Simon JC, Lecorre L & Decau ML, (1997). Les flux d'azote au pâturage. Etude des flux et de leurs effets sur le lessivage. *Fourrages* 151 263-280

Vertès F, Simon JC, Laurent F & Besnard A, (2007). Prairies et qualité de l'eau. Evaluation des risques de lixiviation d'azote et optimisation des pratiques. *Fourrages* 192, p.423-440

Vertès F, Simon JC, Giovanni R, Gignani C, Corson M, Durand P & Peyraud JL, (2009). Flux de nitrate dans les élevages bovins et qualité de l'eau : variabilité des phénomènes et diversité des conditions. *Académie d'Agriculture de France, 2009. Séance du 14 mai*.

Vertès F, Guiet S, Morvan T, & Gascuel-Oudou C, (2012). De la parcelle à la succession de cultures et au territoire : exemple de l'outil Territ'eau (module azote).

Wallach D, Makowski D, Jones JW, Brun F, (2006), Working with Dynamic Crop Models, Methods, Tools, and Examples for Agriculture and Environment. Chapter 9, Model Evaluation, p. 345-406. *Second Edition, Copyright © 2014, 2006 Elsevier B.V.*

Zanatta J, (2015). Méthodes d'identification des pratiques à risque, vis-à-vis de la lixiviation des nitrates, dans un bassin versant karstique.

Webographie

<https://www.arvalis-infos.fr/view-9102-arvarticle.html?region=> , visité le 07/08/2017

Tables des figures :

Figure 1 : Frise chronologique de la création des Chambres d'Agriculture (source : http://www.chambres-agriculture.fr).....	2
Figure 2 : Logotype CIA 25/90.....	3
Figure 3: Schéma représentant le cycle de l'azote.....	6
Figure 4 : Assemblage des différents formalismes du modèle Syst'N.....	11
Figure 5 : Processus impliqués dans le cycle de l'azote modélisés dans PaSim (Graux et al, 2013).12	
Figure 6 : Schéma conceptuel du modèle CERES-EGC (Lehuger, 2009).....	13
Figure 7 Tableau sol à renseigner dans FarmSim.....	18
Figure 8 Schéma représentant la méthode de prélèvement des reliquats azotés sur une parcelle agricole (source : arvalis-info.fr).....	26
Figure 9 : Schéma d'un dispositif lysimétrique installé sur le site d'étude (source: UFC).....	27
Figure 10 : Photo de la gouttière d'une plaque lysimétrique (source: UFC).....	27
Figure 11 : Photo d'une plaque lysimétrique + géotextile (source: UFC).....	27
Figure 12:Schéma représentant un lysimètre ouvert et la plaque lysimétrique (source: Trente ans de lysimétrie en France 1960-1990, 1996).....	28
Figure 13 : Occupation du sol (%) (à gauche) et types de cultures, prairies permanentes (PP), temporaires (PT) et cultures (ha) (à droite) des parcelles agricoles du bassin de Plaisir Fontaine enquêtées sur la période 2016 (d'après les données issues des enquêtes).....	29
Figure 14 : Valeurs simulées/observées de la quantité de $N-NO_3^-$ sur les 3 parcelles de prairie (30 échantillons).	31
Figure 15 : Valeurs simulées/observées de la quantité de $N-NO_3^-$ sur les 2 parcelles de culture (20 échantillons).	32
Figure 16 : Valeurs simulées/observées de la quantité de $N-NO_3^-$ sur les 4 parcelles avec rotation entre prairies et cultures annuelles (38 échantillons).	33
Figure 17 : Précipitations mensuelles de l'année hydrologique 2015-2016 (source: station météo France d'Epenoy).....	37
Figure 18 : Précipitation mensuelles de l'année hydrologique 2016-2017 (source : station météo France d'Epenoy).....	38
Figure 19 : Comparaison des drainages mensuels pour chaque année hydrologique.....	39
Figure 20 : Comparaison des drainages mensuels pour chaque année hydrologique.....	40
Figure 21: Evolution des teneurs en nitrates recueillies par les lysimètres et calculées par FarmSim pour les deux années hydrologiques de 2015 à 2017 pour une culture sur sol profond.	42
Figure 22 : Evolution des teneurs en nitrates recueillies par les lysimètres et calculées par FarmSim pour les deux années hydrologiques de 2015 à 2017 pour une culture sur sol superficiel.....	43

Tables des tableaux :

Tableau 1 : Données générales des parcelles retenues du bassin versant de plaisir fontaine pour être simulées.	21
Tableau 2 : Propriétés physiques du sol pour les 4 situations de Chasnans.....	22
Tableau 3 : Coefficient culturaux utilisés pour les bilans hydriques de Chasnans (Source : Conseiller de la CIA 25/90)	29
Tableau 4 Présentation des exploitations de Plaisir Fontaine en 2016	29
Tableau 5: Apport moyen azote minéral et organique par culture et prairie pour chaque campagne	30
Tableau 6 : Valeurs observées et simulées d'azote sous forme de $N-NO_3^-$, de $N-NH_4^+$ et d'azote minéral total (N-total) sur les 3 parcelles de prairie (30 échantillons).	32
Tableau 7 : Indicateurs de performance calculés pour les 3 parcelles de prairie (30 échantillons). PBIAS : pourcentage de biais. RMSE : relative mean square error. RRMSE : RMSE divisée par la moyenne des valeurs mesurées.	32
Tableau 8 : Valeurs observées et simulées de $N-NO_3^-$ (profondeur totale du sol) et de $N-NH_4^+$ (premier horizon de sol uniquement) pour les 2 parcelles de cultures (20 échantillons).	33
Tableau 9 : Indicateurs de performance calculés pour les 6 parcelles de cultures annuelles (24 échantillons). PBIAS : pourcentage de biais. RMSE : relative mean square error. RRMSE : RMSE divisée par la moyenne des valeurs mesurées.	33
Tableau 10 : Valeurs observées et simulées de $N-NO_3^-$ pour les 4 parcelles en rotation prairies/cultures annuelles (38 échantillons).	34
Tableau 11 : Indicateurs de performance calculés pour les 4 parcelles en rotation prairies/cultures annuelles (38 échantillons). PBIAS : pourcentage de biais. RMSE : relative mean square error. RRMSE : RMSE divisée par la moyenne des valeurs mesurées.	34
Tableau 12 : Rendements et absorptions racinaires d'azote simulés pour une prairie sur la période de 2010 à 2016.	34
Tableau 13 : Minéralisation simulée du sol (kg N/ha) pour une prairie fauchée entre le 15 Mars et la dernière coupe de chaque année sur la période 2010-2016.	35
Tableau 14 : Rendements et quantités d'azote minéral prélevé par unité de rendement (besoin unitaire) simulés pour les cultures de deux parcelles de 2011 à 2016. Références : [1] : (François et al, 2003).	35
Tableau 15 : Sommes annuelles de la lixiviation et du drainage simulés pour trois prairies pour les années de 2010 à 2016.	36
Tableau 16 : Sommes de la lixiviation et du drainage par campagne pour deux parcelles de culture pour les années de 2010 à 2016.	36
Tableau 17 : Proportion des drainages théorique et simulés par les modèles Syst'N et FarmSim par rapport aux précipitations enregistrées sur le bassin versant.	38
Tableau 18 : Proportion du drainage calculé par les modèle et calculé par le bilan hydrique par rapport aux précipitations sur deux années hydrologiques.	40
Tableau 19 : Comparaison des quantités d'eau drainée aux dates de prélèvement des bidons entre les lysimètres, bilan hydrique théorique et des modèles FarmSim et Syst'N. Les cellules grisées correspondent à la valeur la plus faible par situation et par période.	41
Tableau 20 : Comparaison entre l'azote lixivié annuel par les modèles FarmSim et Syst'N avec l'azote lixivié enregistré par les lysimètres dans les 4 situations et pour les 2 années hydrologiques	42
Tableau 21 : Estimation subjective des pertes en azote pour les quatre situations de Chasnans sur 2 années hydrologiques.	46
Tableau 22 : Drainage simulé pour différentes proportion en argile des sols et pour 2 situations par année hydrologique	47
Tableau 23 : Azote lixivié et concentrations en nitrates pour deux situations et par année hydrologique suite à l'augmentation manuelle des quantités de fertilisants apportés.	48

Annexe I : Données d'entrée du modèle Syst'N

Description de la situation	
Variable	Unité
Nom de la situation	
Année de début de simulation	AA
Nombre d'années de simulations	
Numéro de l'exploitation	
Territoire auquel est liée la situation	
Sous-territoire auquel est liée la situation	
Surface de la situation-parcelle	ha
Classe de pente	Faible/Forte/Moyenne
Région	
Fichiers climatiques locaux	
Historique culturel de la parcelle	
Variable	Unité
Système de travail du sol	Labour/Semis direct/Travail superficiel
Gestion des résidus de culture	Enfouis 1 fois sur 2/Enlevés ou brûlés/Toujours enfouis
Nature des Produits Résiduaire Organiques (PRO) apportés sur la parcelle	Choix multiples
Date de retournement de la prairie précédente	2ans/3ans et plus/moins d'1an
Fréquence d'apport des PRO	1-3ans/3-5ans/5-10ans/Pas d'apport
Durée de la prairie précédente	2-3ans/4-6ans/7-10ans/plus de 10ans
Précédent de la rotation	
Variable	Unité

Nom de la culture qui précède la rotation considérée	betterave/Blé dur d'hiver/Blé tendre d'hiver/choux fleur d'hiver février/choux fleur d'hiver tardif/Colza d'hiver/Féтуque/Maïs ensilage/Maïs grain/Moutarde/Orge de printemps/Orge d'hiver/Pois protéagineux de printemps/Pois protéagineux d'hiver/Prairie permanente/Prairie temporaire graminée pures/Prairie temporaire RGA TB/Ray Grass/Repousse colza/Tournesol/triticales
Date de la récolte du précédent	JJ/MM
Date du travail du sol d'enfouissement des résidus	JJ/MM/n+x
Paille exportée	%
Profondeur du travail du sol d'enfouissement des résidus	cm
Rendement du précédent	t MS/ha
Outil de travail du sol d'enfouissement des résidus	Charrues/Outils à dents ou à disques/Semis combiné outil à dents non animé/Semis combiné herse rotative
Rotation	
Description culture	
Cultures	betterave/Blé dur d'hiver/Blé tendre d'hiver/choux fleur d'hiver février/choux fleur d'hiver tardif/Colza d'hiver/Féтуque/Maïs ensilage/Maïs grain/Moutarde/Orge de printemps/Orge d'hiver/Pois protéagineux de printemps/Pois protéagineux d'hiver/Prairie permanente/Prairie temporaire graminée pures/Prairie temporaire RGA TB/Ray Grass/Repousse colza/Tournesol/triticales
Date d'implantation	JJ/MM/n+x
Date de récolte	JJ/MM/n+x
Rendement	q/ha
Paille exportée	%
Matière fraîche à la plantation	0kg/plant
Densité de plantation	0plants/ha
Culture Intermédiaire et Repousses	
Culture Intermédiaire ou repousses	Moutarde/Ray Grass/Repousse colza
Date de semis	JJ/MM/n+x
Date d'arrêt	JJ/MM/n+x
Modalité d'arrêt de la végétation	Chimique/Chimique-mécanique/Mécanique/Gel
Densité de peuplement	Clairsemé/Dense

Fertilisation Organique	
Type	Choix multiples
Date	JJ/MM/n+x
Dose	t/ha ou m3
Unité d'azote	kg N/ha
N total	%
N-NH4	%
Matière sèche	%
Outils d'application	Choix multiples
Fertilisation Minérale	
Type	Choix multiples
Date	JJ/MM/n+x
Unité d'azote	kg N/ha
Outils d'application	Injecteurs/pulvérisateur engrais liquide/épandeur grain granulé
Travail du sol	
Date	JJ/MM/n+x
Profondeur	cm
Outil	Charrues/Outils à dents ou à disques/Semis combiné outil à dents non animé/Semis combiné herse rotative
Irrigation et Fertigation	
Date de début	JJ/MM/n+x
Date fin	JJ/MM/n+x
Nombre de passages	
Volume total	mm
Teneur en azote	gN/l
Fauche	
Date de la fauche	JJ/MM/n+x
Hauteur restante	cm
Pâturage	
Date de début	JJ/MM/n+x
Date fin	JJ/MM/n+x
Hauteur restante	cm
Animal	Bovins/Caprins/Ovins/Equidés
Sol	
Type de sol	Choix multiples
Horizons	
Epaisseur	cm
Argile	%
Limon	%
Sable	%

Texture	Choix multiples
Densité apparente	
Cailloux	%
Caractéristique du 1er horizon	
Azote organique	%
Matière organique	%
C/N	
CaCO3	%
pH	
CEC	mEq/100g
Profondeur obstacle à l'enracinement	cm
Argile décarbonatée	%
Etats des horizons du sol au début de la simulation	
Epaisseur	cm
Humidité pondérale	% sol sec
Azote minéral	kg N/ha

Annexe II : Données d'entrée du modèle FarmSim (sources : Graux et al, 2012 ; Gabrielle B & Lehuger S, 2009)

Description de la situation

Variable	Unité	Modèle (P : PaSim, C: CERES-EGC)
Latitude	Sec/ Min/Degree	P & C
Surface	ha	P & C
Pente	rad	P
Aspect	rad	P
Altitude	m	P

Données météorologiques

Variable	Unité	Modèle (P : PaSim, C: CERES-EGC)
Max Air Temperature	°C	P & C
Min Air Temperature	°C	P & C
Precipitation	mm.d ⁻¹	P & C
Global Radiation	J.cm ² .d ⁻¹	P & C
Relative Humidity	%	P & C
Wind Speed	m.s ⁻¹	P & C
CO2	ppm	P
NH3	ppm	P

Description du sol et initialisation de ces variables

Variable	Unité	Remarques	Modèle (P : PaSim, C: CERES-EGC)
Time of the highest position of the sun	Hmin ⁻¹	Valeur par défaut = 12.12	P
Micrometric reference height above soil surface	m	Valeur par défaut = 2.0	P
NH3 reference height above soil surface	m	Valeur par défaut = 2.0	P
Cumulated depth of soil layers	mm	Une valeur pour chaque horizon de sol (6 valeurs)	P & C
Cumulated depth of lower soil boundary layer (mm)	mm		P
Maximal Canopy Height	m	Valeur par défaut=0.6	P
Canopy height parameter (leaf area index for which canopy is half the maximum canopy height)	m ² .lami nae.m ⁻²	Valeur par défaut =4.0	P
Relative root dry matter in different soil layers	-	Par défaut : n0="0.226" n1="0.222" n2="0.195" n3="0.158" n4="0.125" n5="0.074	P
Main rooting depth	m	Valeur par défaut=0.3	
Bulk density of each soil layer	kg.l ⁻¹	Une valeur pour chaque horizon de sol (6 valeurs)	P & C
Clay fraction of texture	-	Une valeur pour chaque horizon de sol (6 valeurs)	P & C
Silt fraction of texture	-	Une valeur pour chaque horizon de sol (6 valeurs)	P
Saturated soil water content	m ³ .m ⁻³	Estimé par un programme interne à FarmSim en fonction des autres	P & C

		données	
Saturated soil water content of lower boundary layer	$m^3.m^{-3}$	Estimé par un programme interne à FarmSim en fonction des autres données	P
Saturated hydraulic conductivity	$mm.d^{-1}$	Estimé par un programme interne à FarmSim en fonction des autres données	P & C
Saturated hydraulic conductivity of lower soil boundary layer	$mm.d^{-1}$	Estimé par un programme interne à FarmSim en fonction des autres données	P
pH	-	Une valeur	P & C
InitialConditionOfShootDryMatter	$kgDM.m^{-2}$	Valeur par défaut = 0.12	P
ShootDryMatterafterCutting	$kgDM.m^{-2}$	Autant de valeurs qu'il n'y a de fauches	P
InitialConditionOfRootDryMatter	$kgDM.m^{-2}$	Valeur par défaut = 0.12	P
InitialLeafAreaIndexBeforeCutting	$m^2.lamin.ae.m^{-2}$	Valeur par défaut = 0.9	P
LeafAreaIndexAfterCutting	$m^2.lamin.ae.m^{-2}$	Autant de valeurs qu'il n'y a de fauches	P
Initial cond. for plant C substrate concentration	$kgC.kgDM^{-1}$	Valeur par défaut = 0.04	P
Initial cond. for plant N substrate concentration	$kgN.kgDM^{-1}$	Valeur par défaut = 0.002	P
Initial cond. for N conc. of structural plant dry matter	$kgN.kgDM^{-1}$	Valeur par défaut = 0.022	P
Initial cond. for C in structural dead plant material	$KgC.m^{-2}$	Valeur par défaut = 0.001	P
Initial cond. for C in metabolic dead plant material	$KgC.m^{-2}$	Valeur par défaut = 0.814	P
Initial cond. for C in active soil organic matter	$KgC.m^{-2}$	Valeur par défaut = 0.052	P
Initial cond. for C in slow soil organic matter	$KgC.m^{-2}$	Valeur par défaut = 0.001	P
Initial cond. for C in passive soil organic matter	$kgC.m^{-2}$	Valeur par défaut = 0.001	P
Initial cond. for N in metabolic dead plant material	$kgN.m^{-2}$	Valeur par défaut = 0.001	P
Initial cond. for N in active soil organic matter	$kgN.m^{-2}$	Valeur par défaut = 0.001	P
Initial cond. for N in slow soil organic matter	$kgN.m^{-2}$	Valeur par défaut = 0.001	P
Initial cond. for N in passive soil organic matter	$kgN.m^{-2}$	Valeur par défaut = 0.001	P
Initial condition for soil water content	$m^3.m^{-3}$	Une valeur pour chaque horizon de sol (6 valeurs)	P & C
Capillary rise from lower boundary layer, yes (1.0) or no (0.0)	-	Boolean : 0 ou 1	P
NH4+ deposition other than gaseous NH3	$kgN.m^{-2}.d^{-1}$	Valeur par défaut = 1.45E-6	P

NO3- deposition	kg N.m ⁻² .d ⁻¹	Valeur par défaut = 1.51E-6	P
Albedo	-	Valeur par défaut = 0.08	C
VPD	-	Valeur par défaut = 9.36	C
Rapport C/N du sol	-		P & C
Contenu en CaCO3	-		P & C
Initial cond. soil nitrate	kg N m ⁻²	Une valeur pour chaque horizon de sol (6 valeurs). Valeur par défaut = 0.00035	P & C
Initial cond. for soil ammonium	kg N m ⁻²	Une valeur pour chaque horizon de sol (6 valeurs). Valeur par défaut = 0.00025	P & C
Root penetration factor	Entre 0 et 1	Une valeur pour chaque horizon de sol (6 valeurs)	C
Gravel content	%	Une valeur pour chaque horizon de sol (6 valeurs)	C
Drain upper limit (~Field capacity)	m ³ .m ⁻³	Estimé par programme interne de FarmSim en fonction des autres données	P & C
lower limit of plant water availability (~Permanent wilting point)	m ³ .m ⁻³	Estimé par programme interne de FarmSim en fonction des autres données	P & C
organic carbon content	%	Une valeur pour chaque horizon de sol (6 valeurs)	C

Cultures : (Modèle CERES-EGC)

Variable	Unité	Remarque
Espèce		
Variété		
Date de début de la simulation	JJ/MM/AAAA	
Date de fin de la simulation	JJ/MM/AAAA	
Date de semis	Jours julien	
Profondeur de semis	cm	
Densité de semis	Plants.m ⁻²	
Date de fertilisation	JJ/MM/AAAA	
Type d'engrais		A choisir dans la liste : urée/nitrate d'ammonium/ammoniac anhydre/nitrate d'ammonium de calcium/sel de nitrate/mélange 50 :50 urée nitrate d'ammonium/fumier solide élevage laitier/ fumier liquide élevage laitier/fumier solide élevage volaille/ fumier liquide élevage volaille/ fumier liquide élevage porc/ fumier liquide composté porc/ fumier solide composté porc/ fumier liquide composté volaille
Quantité d'azote apportée	Kg N/ha	
Profondeur de l'apport	cm	
Amount of below-ground material returned to the soil at harvest		Valeur par défaut = 1100.0
C:N ratio of below-	-	Valeur par défaut = 20.0

ground material		
Amount of above-ground material returned to the soil after harvest (includes straw and chaff)		Valeur par défaut = 3520.0
C:N ratio of above-ground material	-	Valeur par défaut = 60.0

Prairies : (Modèle PaSim)

Variable	Unité	Remarque
Fraction de légumineuses	-	Valeur par défaut ="0.12"
Date de début de la prairie	JJ/MM/AAAA	
Date de fin de la prairie	JJ/MM/AAAA	
Durée de la période de pâturage	d	Au maximum 10 périodes par année
Stocking rate	animal.m ²	Autant de valeurs que de période de pâturage
Date de début de la période de pâturage	JJ/MM/AAAA	Autant de valeurs que de période de pâturage
Date de fauche	JJ/MM/AAAA	Au maximum 10 par année
Date d'apport engrais minéral	JJ/MM/AAAA	Au maximum 10 par année
Date d'apport organique solide	JJ/MM/AAAA	Au maximum 10 par année
Date d'apport organique liquide	JJ/MM/AAAA	Au maximum 10 par année
Quantité totale d'azote apportée lors de l'apport minéral ou organique	kg N.ha ⁻¹	Autant de valeurs que d'apport

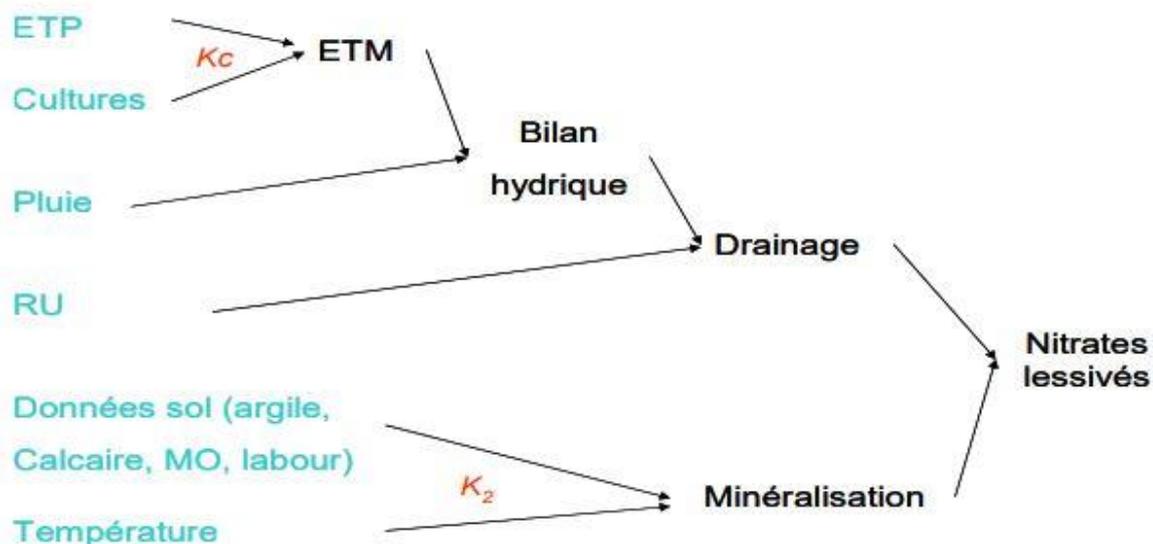
Annexe III : Données de sortie du modèle Syst'N (Source : Macro-exploitation, 2012)

Variables de sortie	indications	unités
J	Jour (J1=jour de récolte du précédent de la rotation)	
DATE	Date	
CULTURE	Culture en place pour chaque jour	
N_LIXIV	Quantité d'azote lixiviée pour chaque jour	Kg d'azote par ha
N_LIXIV_CML	Quantité d'azote lixiviée cumulée depuis J1	Kg d'azote par ha
N_RUIS	Quantité d'azote ruisselée pour chaque jour	Kg d'azote par ha
N_RUIS_CML	Quantité d'azote ruisselée cumulée depuis J1	Kg d'azote par ha
Conc_NO3_SOUS_PROF	Concentration en nitrate sous le profil chaque jour	mg de NO3 par litre
H2O_DRAINEE	Quantité d'eau drainée pour chaque jour	millimètre
H2O_DRAINEE_CML	Quantité d'azote drainée cumulée depuis J1	millimètre
H2O_RUIS	Quantité d'eau ruisselée pour chaque jour	millimètre
H2O_RUIS_CML	Quantité d'azote ruisselée cumulée depuis J1	millimètre
N-N2O	Quantité de N2O perdue chaque jour	Kg d'azote par ha
N-N2O_CML	Quantité de N2O perdue cumulée depuis J1	Kg d'azote par ha
N-N2	Quantité de N2 perdue chaque jour	Kg d'azote par ha
N-N2_CML	Quantité de N2 perdue cumulée depuis J1	Kg d'azote par ha
N-NH3	Quantité de NH3 perdue chaque jour	Kg d'azote par ha
N-NH3_CML	Quantité de NH3 perdue cumulée depuis J1	Kg d'azote par ha
JN_MOS	Jours normalisés pour la minéralisation de la Matière Organique du Sol (MOS)	
QMINMOS_TOTJ	Quantité d'azote produite par la minéralisation de la MOS pour chaque jour	Kg d'azote par ha
QMINMOS_CML	Quantité d'azote produite par la minéralisation de la MOS cumulée	Kg d'azote par ha
QMINMOS_CML_AN	Quantité d'azote produite par la minéralisation de la MOS cumulée par an	Kg d'azote par ha
JN_RES	Jours normalisés pour la minéralisation des résidus de culture	
Q_NORG_RES	Quantité d'azote oragnique des résidus <i>qté res*teneur N</i> (pour calculer leur minéralisation)	Kg d'azote par ha
QMINRES_TOTJ	Quantité d'azote minéralisée par les résidus de culture pour chaque jour	Kg d'azote par ha
QMINRES_CML	Quantité d'azote minéralisée par les résidus de culture cumulée	Kg d'azote par ha
JN_PRO	Jours normalisés pour la minéralisation des Produits Résiduaire Organiques	
QMINPRO_TOTJ	Quantité d'azote minéralisée des PRO pour chaque jour	Kg d'azote par ha
QMINPRO_CML	Quantité d'azote minéralisée des PRO cumulée	Kg d'azote par ha
ZRAC	profondeur du front d'enracinement	cm
LAI	Indice foliaire (Leaf Area Index)	m ² /m ²
MS_AER	Quantité journalière de Matière Sèche aérienne produite	Kg de MS par ha
MS_PRODUITE_CML_CULT	Quantité de MS totale produite par la culture (à la fin de son cycle)	Kg de MS par ha
N_ABS	Quantité d'azote absorbée par la culture chaque jour	Kg d'azote par ha
N_ABS_CML_CULT	Quantité d'azote absorbée par la culture cumulée (à la fin de son cycle)	Kg d'azote par ha
N_ABS_CML	Quantité d'azote absorbée cumulée (sur toute la succession)	Kg d'azote par ha
N_FIX	Quantité d'azote fixée par la culture par jour	Kg d'azote par ha
N_FIX_CML_CULT	Quantité d'azote fixée par la culture (à la fin de son cycle)	Kg d'azote par ha
N_FIX_CML	Quantité d'azote fixée cumulée (sur toute la succession)	Kg d'azote par ha
N_PLANTE	Quantité d'azote fixée + quantité d'azote absorbée par la culture chaque jour	Kg d'azote par ha
ETR_TOT	Evapotranspiration Réelle Totale	millimètre
ETR_CML	Evapotranspiration Réelle Totale cumulée	millimètre
EAU_TOT	Quantité d'eau dans le sol sur l'ensemble du profil exploré par les racines (jusqu'à obstacle)	% ?
EP_HS	épaisseur horizons de sortie	?
HUM_H1(0-30cm)	Humidité du sol sur la profondeur de l'horizon 1	%
HUM_H2(30-60cm)	Humidité du sol sur la profondeur de l'horizon 2	%
HUM_H3(60-90cm)	Humidité du sol sur la profondeur de l'horizon 3	%
HUM_H4(90-120cm)	Humidité du sol sur la profondeur de l'horizon 4	%
HUM_H5(120-150cm)	Humidité du sol sur la profondeur de l'horizon 5	%
NMIN_TOT	Quantité totale d'azote dans le sol	Kg d'azote par ha
NMIN_H1(0-30cm)	répartition de cette quantité dans l'horizon 1	Kg d'azote par ha
NMIN_H2(30-60cm)	répartition de cette quantité dans l'horizon 2	Kg d'azote par ha
NMIN_H3(60-90cm)	répartition de cette quantité dans l'horizon 3	Kg d'azote par ha
NMIN_H4(90-120cm)	répartition de cette quantité dans l'horizon 4	Kg d'azote par ha
NMIN_H5(120-150cm)	répartition de cette quantité dans l'horizon 5	Kg d'azote par ha
RENDEMENT_C	rendement	
SOMTEMP	somme de température	degrés
GH	fonction humidité ("STRESS EAU")	?
HINN	Indice de Nutrition Azotée ("STRESS AZOTE")	indice

Annexe IV : Données de sortie du modèle FarmSim

Variables de sortie	indications	unités
Plot	Nom de la parcelle	-
Surface	Surface de la parcelle	ha
Crop	Culture en place pour chaque jour	type
Year	Année	-
Doy	Jour	-
Yield	Rendement au moment de la récolte	kg DM/m ² /d
Milk	Production de lait journalière	kg/m ² /d
Intake	Matière sèche journalière ingérée	kgDM/m ² /d
Soil C active pool	quantité de carbone dans la fraction active de la matière organique du sol	kgC/m ²
Soil C slow pool	quantité de carbone dans la fraction lente de la matière organique du sol	kgC/m ²
Soil C passive pool	quantité de carbone dans la fraction passive de la matière organique du sol	kgC/m ²
Soil C metabolic pool	quantité de carbone dans la fraction métabolique de la matière organique du sol	kgC/m ²
Soil C structural pool	quantité de carbone dans la fraction structurelle de la matière organique du sol	kgC/m ²
NPP	Production nette primaire (Net Primary Productivity)	kgC/m ² /d
NEE	Echange avec l'écosystème net (Net Ecosystem Exchange)	kgC/m ² /d
GPP	Production primaire brute (Gross Primary Productivity)	kgC/m ² /d
RECO	Respiration de l'écosystème (Respiration ECOsystem)	kgC/m ² /d
Soil respiration	Respiration du sol	kgC/m ² /d
Total biomass	Quantité de biomasse totale produite	kgDM/m ²
LAI	Indice de surface foliaire (Leaf Area Index)	m ² /m ²
N ₂ O	Flux d'oxyde nitreux	mg N/m ² /d
CH ₄	Flux de méthane	kgC/m ² /d
NH ₃	Flux d'ammoniac	kgN/m ² /d
Leach N	Quantité de nitrate lixiviée par jour	kgN/m ² /d
Drainage	Quantité d'eau drainée par jour	mm/d
N soil mineralization	Quantité d'azote minéralisé dans le sol	kgN/m ² /d
N ammonium uptake rate of the root	Quantité d'azote ammoniacal prélevée par les racines	kgN/m ² /d
N nitrate uptake rate of the root	Quantité de nitrates prélevée par les racines	kgN/m ² /d
swc_1	Humidité du sol dans l'horizon 1 (Soil Water Content)	-
swc_2	Humidité du sol dans l'horizon 2 (Soil Water Content)	-
swc_3	Humidité du sol dans l'horizon 3 (Soil Water Content)	-
swc_4	Humidité du sol dans l'horizon 4 (Soil Water Content)	-
swc_5	Humidité du sol dans l'horizon 5 (Soil Water Content)	-
NH ₄ _1	Quantité de NH ₄ dans l'horizon 1	kgN/m ²
NH ₄ _2	Quantité de NH ₄ dans l'horizon 2	kgN/m ²
NH ₄ _3	Quantité de NH ₄ dans l'horizon 3	kgN/m ²
NH ₄ _4	Quantité de NH ₄ dans l'horizon 4	kgN/m ²
NH ₄ _5	Quantité de NH ₄ dans l'horizon 5	kgN/m ²
NO ₃ _1	Quantité de NO ₃ dans l'horizon 1	kgN/m ²
NO ₃ _2	Quantité de NO ₃ dans l'horizon 2	kgN/m ²
NO ₃ _3	Quantité de NO ₃ dans l'horizon 3	kgN/m ²
NO ₃ _4	Quantité de NO ₃ dans l'horizon 4	kgN/m ²
NO ₃ _5	Quantité de NO ₃ dans l'horizon 5	kgN/m ²
Nitrogen in structural dry matter	Azote dans la matière sèche de la plante	kgN/m ² /d

Annexe V : Schéma représentation la conceptualisation du drainage et du lessivage des nitrates par le sous modèle de Burns. Tableau regroupant les différentes formules utilisées dans le sous modèle de Burns.

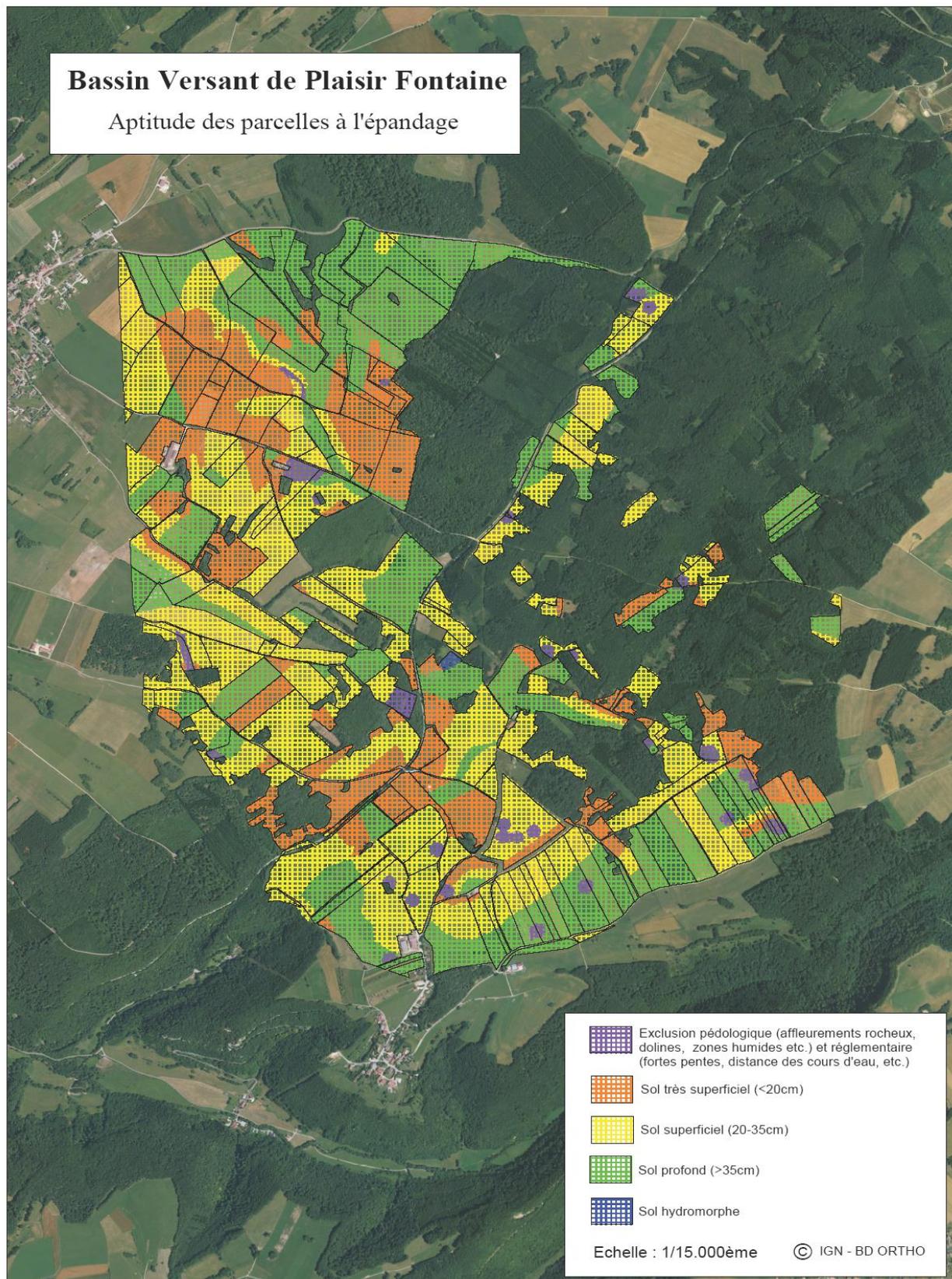


$RU = \sum_{i=1,n} [(Q_i(pF_{2,0}) - Q_i(pF_{4,2})) * E_i * (1 - (\%EG_i/100))]$ <p>Avec $Q_i(pF_{2,0})$: humidité à la capacité au champ de la couche i $Q_i(pF_{4,2})$: humidité au point de flétrissement de la couche i E_i : épaisseur de la couche i $\%EG_i$: teneur en élément grossier de la couche i</p>	Formule (1)
<p>Bilan hydrique = $RU_{n-1} + \text{Pluie} - K_c * \text{ETP}$</p> <p>Avec RU_{n-1} : niveau de la réserve utile du sol juste avant la pluie (mm) Pluie (mm) K_c : coefficient cultural (sans unité) ETP : évapo-transpiration potentielle (mm)</p>	Formule (2)
<p>Minéralisation décadaire = $K_2 * \text{Masse de terre (horizon 0-30 cm)}(\text{kg/ha}) * \text{Teneur en azote} * 1,3 * 10$</p> <p>Avec le coefficient de minéralisation K_2 $K_2 = 3,287 / [(\text{argile} + 200) * (0,3 * \text{Calcaire total} + 20)] \exp(0,115 * (\text{T}_{\text{moy}} - 10))$</p>	Formule (3)
<p>N absorbée = Minéralisation cumulée * coefficient d'absorption moyen</p>	formule (4)
<p>N restant = Minéralisation cumulée - N absorbé.</p>	formule (5)
<p>N lessivé = $(\text{lame d'eau drainante en mm} / 10 * (\text{lame d'eau drainante} / 10 + V_m / 100)) ^ (\text{profondeur du sol} / 2)$</p> <p>Avec V_m = humidité volumique = 35 % (sol argilo - limoneux)</p>	formule (6)
<p>Nitrates drainés en kg/ha = Azote restant * fraction d'azote lessivé * 62/14</p>	formule (7)

Annexe VI : Description des types de sols identifiés sur le bassin versant de Plaisir Fontaine

Catégorie de sol	code	Profondeur horizon (mm)	épaisseur (mm)	% argile	% limon	% sable	Densité apparente	% N organique (% sol sec)	% C organique (% sol sec)	% MO (% sol sec)	C/N	CaCO3 (% sol sec)	pH
Sol limon argileux profond colluviosol > 60cm sous prairie	A/P	200	200	25,9	68,7	5,4	1,2	0,2	2	4	10	0	6,4
		400	200	30,1	66,4	3,5	1,25						
		600	200	33,4	62,1	4,5	1,35						
		700	Roche mère										
Sol limon argileux profond colluviosol > 60 cm sous culture	A/C	200	200	25,9	68,7	5,4	1,35	0,15	1,5	3	10	0	6,4
		400	200	30,1	66,4	3,5	1,35						
		600	200	33,4	62,1	4,5	1,35						
		700	Roche mère										
Sol limon argileux superficiel calcaire rendosol 25 cm sous prairie	B/P	80	80	28,5	58,4	13,1	1,2	0,35	3,5	7	10	0	7,6
		250	170	28,8	57,7	13,5	1,25						
		300	Roche mère										
Sol limon argileux superficiel calcaire rendosol 25 cm sous culture	B/C	80	80	28,5	58,4	13,1	1,35	0,25	2,5	5	10	0	7,6
		250	220	28,8	57,7	13,5	1,35						
		300	Roche mère										
Sol argilo limoneux superficiel brunisol non calcaire 30 cm sous prairie	C/P	200	200	34,9	59	6,1	1,2	0,3	3	6	10	0	6,3
		300	100	37,6	57,5	4,9	1,25						
		400	Roche mère										
Sol argilo limoneux superficiel brunisol non calcaire 30 cm sous culture	C/C	200	200	34,9	59	6,1	1,35	0,2	2	4	10	0	6,3
		300	100	37,6	57,5	4,9	1,35						
		400	Roche mère										
Sol limon argimeux très superficiel brunisol non calcaire 20 cm sous prairie	D/P	80	80	28,5	58,4	13,1	1,2	0,35	3,5	7	10	0	7,6
		200	120	28,8	57,7	13,5	1,25						
		250	Roche mère										
Sol limon argimeux très superficiel brunisol non calcaire 20 cm sous culture	D/C	80	80	28,5	58,4	13,1	1,35	0,25	2,5	5	10	0	7,6
		200	120	28,8	57,7	13,5	1,35						
		250	Roche mère										
Sol argilo limoneux très superficiel brunisol non calcaire 20 cm sous prairie	E/P	200	200	34,9	59	6,1	1,2	0,35	3,5	7	10	0	6,3
		250	Roche mère										
Sol argilo limoneux très superficiel brunisol non calcaire 20 cm sous culture	E/C	200	200	34,9	59	6,1	1,35	0,25	2,5	5	10	0	6,3
		250	Roche mère										

Annexe VII : Caractéristiques des sols du bassin de Plaisir Fontaine (source : plans d'épandage des exploitations)



Annexe VIII : Réserve utile calculée pour les parcelles de Chasnans équipées de lysimètres.

Prairie sol superficiel										
Horizons	% argile	% MO	% Limons fins	% Limons grossiers	épaisseur Horizon cm	% sables fins	% sables grossiers	% cailloux	RU sol (mm)	RU sol (mm) Jamagne
1	31,6		36,9	14,6	9	2,7	14,2	5		
2	30,7		40,8	13,4	24	2,4	12,4	70		
2										
3									42	26

Prairie sol profond										
Horizons	% argile	% MO	% Limons fins	% Limons grossiers	épaisseur Horizon cm	% sables fins	% sables grossiers	% cailloux	RU sol (mm)	RU sol (mm) Jamagne
1	42,5		40,1	12,1	20	3	2,3	10		
2	40,7		41,8	11,8	25	3,1	2,6	40		
2	49,2		34,6	11,8	45	2,7	1,7	0		
3									213	137

Culture sol superficiel										
Horizons	% argile	% MO	% Limons fins	% Limons grossiers	épaisseur Horizon cm	% sables fins	% sables grossiers	% cailloux	RU sol (mm)	RU sol (mm) Jamagne
1	47,7		34,3	12,9	14	3	2,1	5		
2	50,1		32,9	11,6	10	2,8	2,6	90		
2										
3									37	25

Culture sol profond										
Horizons	% argile	% MO	% Limons fins	% Limons grossiers	épaisseur Horizon cm	% sables fins	% sables grossiers	% cailloux	RU sol (mm)	RU sol (mm) Jamagne
1	43,3		35,9	14,8	10	3,9	2,41	5		
2	43,3		35,8	15,3	28	3,6	2	90		
2	47,8		33,7	13,3	45	3,3	1,9			
3									147	100

Annexe IX : Guide d'entretien utilisé pour l'enquête auprès des agriculteurs

Nom de l'exploitation :

Nom, Prénom :

Date de l'enquête :

Commune de l'exploitation :

Téléphone :

Ateliers de production :

Cultures

Bovin lait

Bovin viande

Equin

Porcin

Volaille

Autre :

Nombre d'UTH travaillant sur l'exploitation (équivalent temps plein) :

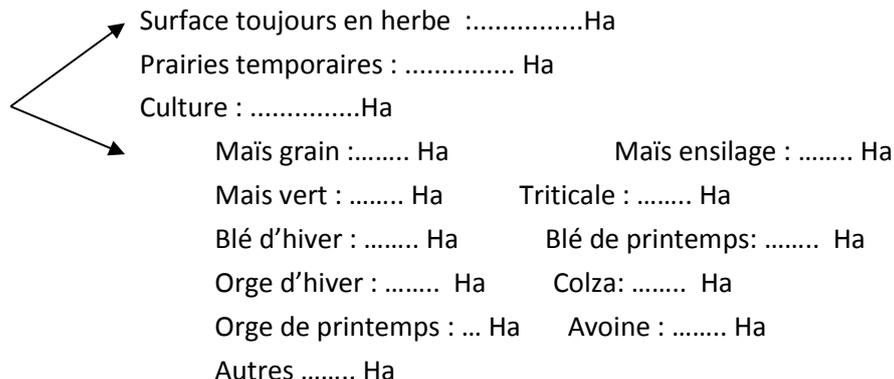
Labels (production : AB, produits : AOP Comté, Morbier ...) :

I. Production végétale

1) Assolement :

S.A.U totale :

.....Ha



2) Successions culturales types de l'exploitation

Type 1:

C1	C2	C3	C4	C5	C6

Parcelles concernées :

Type 2 :

C1	C2	C3	C4	C5	C6

Parcelles concernées :

Type 3 :

C1	C2	C3	C4	C5	C6

Parcelles concernées :

II) Production(s) Animale(s)

Troupeau	Type	Effectifs	Surface fourragère réservée
Laitier	Vaches laitières		
	Génisses – 1an		
	Génisses 1 à 2 ans		
	Génisses + 2 ans		
Allaitant	Vaches allaitantes		
Autre			

Taux de renouvellement: %

Saisonnalité des vêlages : Etalés dominante automne ; Etalés dominante hiver ; Etalés dominante printemps ; Etalés toute l'année ; Groupés automne ; Groupés fin d'hiver - début printemps.

Total lait produit :/an, quota laitier :L/an,L/an (veaux)

IV) Bilan fourrager

Achetez-vous du fourrage ?

Situation habituelle de l'exploitation vis-à-vis des fourrages :

Il arrive de manquer de fourrages..... années sur 10

Type d'année/ raisons pour lesquelles cela arrive : (ex : année sèche : peu de fourrage, année humide : mauvaise qualité, campagnols...)

Il y a des stocks disponibles..... années sur 10

Il y a vente années sur 10

Utilisation des prairies : Ha uniquement pâturées

..... Ha mixtes (2 Fauches, 1Pâture)

..... Ha mixtes (1 Fauche, 2 Pâtures)

..... Ha uniquement fauchées

Fourrages récoltés	SAU fauchée (ha)	Rendement (en tonne de MS)
Foin (première coupe)		
Regain (deuxième coupe)		
Regain 2 (troisième coupe)		
Maïs ensilage/vert		
Autre		

III) Bâtiments d'élevage, gestion de la fertilisation des prairies et des effluents d'élevage

Etes-vous en système : fumier/lisier/mixte. Si mixte, quel pourcentage de chaque effluent ?

Epandez-vous des effluents d'élevage d'une autre exploitation ou des boues de station d'épuration ?

Avez-vous réalisé des travaux dans le cadre de mise aux normes « PMBE » ? (à poser que si non l'année dernière) Oui Non

- Si oui :

Depuis quand ?

Quelle est votre capacité de stockage pour les effluents liquides (en m³ et en mois) ?

- Si non :

Avez-vous répondu à l'enquête sur les bâtiments réalisée par la DDT ?

Quelles est votre capacité de stockage pour les effluents liquides (en m³) ? (Quand videz-vous la fosse pour la dernière et la première fois dans l'année ?)

De quand datent vos derniers travaux de mise aux normes pour le stockage des effluents ?

Avez-vous des projets de mise aux normes à court ou moyen terme ?

Avez-vous un plan d'épandage ?

Avez-vous réalisé des analyses de vos effluents avec un autre organisme que la Chambre Interdépartementale d'Agriculture du Doubs et du Territoire de Belfort ?

Non

Oui :

Type d'effluents analysé	Date/Période d'analyse	% MS	C/N	N total	N-NH4	N min	P2O5	K2O

1) Fertilisation organique :

Comment gérez-vous vos épandages d'effluents d'élevage ? (Dates/période d'épandage, parcelles épandues...).

Fumier :

Lisier :

Purin :

Fréquence d'épandage sur une même parcelle :

Fumier :

Lisier :

Purin :

Quel matériel utilisez-vous pour épandre vos effluents d'élevage ?

Fumier :

Lisier :

Purin :

Comment estimez-vous la quantité épandue par hectare ?

2) Fertilisation minérale des prairies :

Faites-vous des apports minéraux sur des parcelles de prairie ?

Si oui, sur quel type de parcelles ?

Comment déterminez-vous la dose d'engrais minéral à apporter ?

Pour N : (RSH, méthode bilan, potentiel, matières organiques et amendements/PRO, précédent,)

Pour P, K : (Effluents, précédent, analyse terre)

Quel matériel utilisez-vous pour réaliser vos apports d'engrais minéraux ?

3) Fertilisation minérale des cultures :

Comment déterminez-vous la dose et à apporter et les dates des apports ?

Pour N :

Pour P, K :

FICHE PRATIQUES du 01/08/2014 au 31/07/2015 : PRAIRIE

Identifiant parcelle :

Surface :

Epandez-vous de la même manière sur toute la surface de la parcelle ?

Fertilisation			
Date/décade	Surface éendue	Type d'engrais/effluent	Dose kg/ha

Fauches	Première coupe	Deuxième coupe	Troisième coupe
Date de fauche			
Rdt obtenu			
Rdt visé			
Pâturage			
Type d'animaux			
Nombre d'animaux			
Surface dédiée			
Date de début du pâturage			
Date de sortie			
Durée			

Annexe X : Tableaux récapitulatif des eaux récoltées par les lysimètres de Chasnans sur les quatre situations : Prairie sur sol superficiel (PS); Prairie sur sol profond (PP); Culture sur sol superficiel (CS) et Culture sur sol profond (CP)

	PS1		PS2		PS3		Date	PP1		PP2		PP3	
Date	Volume en l/m ² = mm	Volume (ml)	Volume en l/m ² = mm	Volume (ml)	Volume en l/m ² = mm	Volume (ml)	Date	Volume en l/m ² = mm	Volume (ml)	Volume en l/m ² = mm	Volume (ml)	Volume en l/m ² = mm	Volume (ml)
23/11/2015	12,0	3100,0	13,5	3500,0	7,3	1900,0	23/11/2015	3,1	800,0				
02/12/2015	13,1	3400,0	12,4	3200,0			11/01/2016	2,5	650,0				
11/01/2016	14,7	3800,0	12,7	3300,0			01/02/2016	8,5	2200,0				
29/01/2016	12,0	3100,0	2,1	550,0			15/02/2016	2,3	600,0				
01/02/2016	12,4	3200,0	14,3	3700,0	8,5	2200,0	26/02/2016	4,4	1150,0				
08/02/2016	13,5	3500,0	7,3	1900,0			15/03/2016	1,5	400,0				
15/02/2016	9,7	2500,0	11,6	3000,0			07/04/2016	5,4	1400,0				
26/02/2016	12,9	3350,0	11,0	2850,0			18/04/2016	10,4	2700,0	12,0	3100,0		
15/03/2016	12,4	3200,0	11,6	3000,0			27/04/2016	8,6	2230,0	10,8	2800,0	7,7	2000,0
07/04/2016	11,2	2900,0	10,8	2800,0			17/05/2016	3,9	1000,0				
14/04/2016	11,1	2880,0	1,9	500,0			01/06/2016	9,8	2550,0	9,1	2350,0	8,7	2250,0
18/04/2016	11,6	3000,0	12,2	3150,0			09/06/2016	8,9	2300,0	10,6	2750,0		
27/04/2016	10,8	2800,0	13,4	3460,0			23/06/2016	0,2	50,0				
03/05/2016	10,8	2800,0	6,8	1750,0			30/06/2016	6,9	1775,0	11,0	2850,0	7,7	2000,0
17/05/2016	10,2	2650,0	10,4	2700,0			08/08/2016					0,6	150,0
20/05/2016	6,6	1700,0	4,6	1200,0			21/09/2016	1,9	500,0	0,8	200,0		
26/05/2016	9,8	2550,0	1,7	450,0			26/10/2016	4,2	1100,0	4,2	1100,0	0,4	100,0
01/06/2016	8,9	2300,0	11,0	2850,0			27/11/2016	11,2	2900,0	3,9	1000,0		
09/06/2016	9,7	2500,0	6,9	1800,0			06/02/2017	9,3	2400,0	11,2	2900,0		
15/06/2016	11,6	3000,0	4,1	1050,0			01/03/2017	11,2	2900,0	1,2	300,0		
23/06/2016	7,0	1825,0	1,9	500,0			08/03/2017	7,5	1950,0	6,8	1750,0		
30/06/2016	10,0	2600,0	11,0	2850,0	6,6	1700,0	23/03/2017	10,2	2650,0	3,3	850,0		

25/07/2016	1,9	500,0	3,2	825,0			15/05/2017	3,1	800,0				
08/08/2016	1,4	350,0	1,9	500,0			07/06/2017	10,4	2700,0	2,1	550,0	0,0	0,0
21/09/2016	11,4	2950,0	8,5	2200,0			27/04/2017			1,0	250,0		
26/10/2016	13,7	3550,0	10,4	2700,0									
27/11/2016	13,1	3400,0	12,7	3300,0									
06/02/2017	13,1	3400,0	12,2	3150,0									
01/03/2017	13,5	3500,0	11,0	2850,0									
08/03/2017	13,9	3600,0	11,8	3050,0									
23/03/2017	10,8	2800,0	12,4	3200,0	1,0	250,0							
15/05/2017	0,8	200,0	9,5	2450,0	12,7	3300,0							
07/06/2017	11,3	2920,0	11,2	2900,0	7,7	2000,0							
Total	346,8	89825,0	298,0	77185,0	43,8	11350,0		145,6	37705,0	87,8	22750,0	25,1	6500,0

	CS1		CS2		CS3			CP1		CP2		CP3	
Date	Volume en l/m ² = mm	Volume (ml)	Volume en l/m ² = mm	Volume (ml)	Volume en l/m ² = mm	Volume (ml)	Date	Volume en l/m ² = mm	Volume (ml)	Volume en l/m ² = mm	Volume (ml)	Volume en l/m ² = mm	Volume (ml)
23/11/2015	12,4	3200,0	12,0	3100,0	10,8	2800,0	23/11/2015	7,7	2000,0	12,0	3100,0	4,2	1100,0
02/12/2015	6,6	1700,0	7,3	1900,0	7,7	2000,0	11/01/2016	12,4	3200,0	9,3	2400,0	1,5	400,0
11/01/2016	7,7	2000,0	7,3	1900,0	7,7	2000,0	01/02/2016	4,4	1150,0	5,0	1300,0	11,6	3000,0
29/01/2016			4,6	1200,0	5,0	1300,0	15/02/2016			2,9	750,0	2,9	750,0
01/02/2016	6,4	1650,0	6,2	1600,0	5,0	1300,0	26/02/2016			7,7	2000,0	12,5	3250,0
08/02/2016	4,2	1100,0	6,9	1800,0	9,7	2500,0	15/03/2016	5,4	1400,0	6,2	1600,0	11,0	2850,0
15/02/2016	8,3	2150,0	8,7	2250,0	10,2	2650,0	07/04/2016	1,6	420,0	6,3	1620,0	12,7	3300,0
26/02/2016	7,7	2000,0	8,1	2100,0	11,0	2850,0	18/04/2016	5,2	1350,0	6,8	1750,0	12,0	3100,0
15/03/2016	9,7	2500,0	6,4	1650,0	9,7	2500,0	27/04/2016			5,4	1400,0	14,7	3800,0
07/04/2016	8,5	2200,0	8,1	2100,0	10,9	2820,0	17/05/2016	7,3	1900,0	7,7	2000,0	12,4	3200,0
14/04/2016	0,6	150,0	1,6	410,0	3,5	910,0	01/06/2016			12,4	3200,0	1,9	500,0

18/04/2016	8,1	2100,0	7,3	1900,0	7,7	2000,0	09/06/2016					1,7	450,0
27/04/2016	2,4	610,0	4,5	1160,0	7,7	2000,0	23/06/2016					1,0	250,0
03/05/2016	2,3	600,0	2,9	750,0	8,9	2300,0	30/06/2016	2,9	750,0	6,2	1600,0		
17/05/2016	8,1	2100,0	6,6	1700,0	7,3	1900,0	08/08/2016			0,4	100,0	3,9	1000,0
20/05/2016	4,2	1100,0	3,1	800,0	7,3	1900,0	21/09/2016			7,5	1950,0	10,2	2650,0
26/05/2016	3,9	1000,0	3,9	1000,0	7,7	2000,0	26/10/2016	6,2	1600,0	6,9	1800,0	8,1	2100,0
01/06/2016	8,5	2200,0	4,6	1200,0	8,5	2200,0	27/11/2016	6,4	1650,0	10,4	2700,0	9,3	2400,0
09/06/2016	4,4	1150,0	2,7	700,0	6,8	1750,0	06/02/2017	2,5	650,0	9,7	2500,0	10,8	2800,0
15/06/2016			5,4	1400,0	15,4	4000,0	01/03/2017			9,3	2400,0	12,7	3300,0
23/06/2016	3,5	900,0	2,3	600,0	6,7	1725,0	08/03/2017	1,4	350,0	10,4	2700,0	8,9	2300,0
30/06/2016	8,5	2200,0	5,7	1475,0	10,6	2750,0	23/03/2017	6,1	1570,0	9,1	2350,0	4,6	1200,0
25/07/2016	2,6	675,0	2,6	680,0	4,6	1200,0	15/05/2017	0,6	150,0	8,3	2150,0	10,2	2650,0
08/08/2016	2,7	700,0	2,5	650,0	5,4	1400,0	07/06/2017	1,1	290,0	11,2	2900,0	10,4	2700,0
21/09/2016	2,5	650,0	7,3	1900,0	7,3	1900,0	02/12/2015					2,1	550,0
26/10/2016	5,6	1450,0	6,9	1800,0	9,5	2450,0	29/01/2016					7,3	1900,0
27/11/2016	6,9	1800,0	7,7	2000,0	8,5	2200,0	14/04/2016					0,8	200,0
06/02/2017	12,5	3250,0	13,1	3400,0	12,7	3300,0	03/05/2016			0,4	100,0	1,5	400,0
01/03/2017	7,5	1950,0	11,4	2950,0	1,9	500,0	20/05/2016			0,8	220,0	0,8	220,0
08/03/2017	7,1	1850,0	7,1	1850,0	4,4	1150,0	15/06/2016			0,8	200,0	10,0	2600,0
23/03/2017	6,6	1700,0	6,6	1700,0	7,5	1950,0	25/07/2016					0,6	150,0
15/05/2017	4,6	1200,0	5,4	1400,0									
07/06/2017	8,3	2150,0	4,6	1200,0	8,9	2300,0							
Total	193,0	49985,0	201,6	52225,0	256,8	66505,0	Total	71,2	18430,0	172,9	44790,0	212,6	55070,0

Annexe XI : Pratiques agricoles des quatre parcelles de Chasnans de 2015-2017. Les teneurs du fumier sont : 0,05 % NH4 et 0,53 % N-total. Les teneurs du lisier sont : 0,03 % NH4 et 0,07 % N-total

Parcelles en prairie (sol superficiel et profond)	Parcelle en culture (sol superficiel et profond)
2015	2015
19/03/2015 : apport de lisier (15m ³ /ha) 28/05/2015 : fauche (2.2 t MS/ha) Juillet puis septembre-octobre : pâture 30 vaches laitières. 15/12/2015, apport de fumier parcelle en prairie (15t/ha)	12.06/2015 : fauche (2.2 t MS/ha) 05/09/2015 : apport de lisier sur parcelle en culture (15 m ³ /ha) 15/09/2015 : labour sur 15-20 cm 17/09/2015 : semis orge d'hiver (GOODYE, 3 doses/ha)
2016	2016
10/03/2016, apport de lisier (20m ³ /ha) Début Juillet 2016 : fauche (4.3 t MS/ha) Fin Août : regain (0.75 t/ha) Mi-septembre 2016 : pâture (10 jours) 01/12/2016 : apport fumier (15 t/ha)	20/03/2016 : apport de 120 kg AMMO 33.5 11/04/2016 : Désherbage anti graminée (Alkera) 12/04/2016 : 150 kg/ha d'AMMO 33.5 16/05/2016 : régulateur de croissance (étherverse, 1 l/ha) + fongicide (Skyway, 1 l/ha) 14-20/07/2016 : récolte OH (40 qtx) 15/09/2016 : labour 15-20 cm 25/09/2016 : semis orge d'hiver
2017	2017
14/03/2017, apport de lisier (20 m ³ /ha) 15/05/2017, fauche → 5.1 t MS/ha 30/06/2017-9/07/2017 pâturage	11/03/2017, apport 120 kg/ha AMMO 33.5 20/03/2017, Désherbage (Aliexpress, 30 g) 24/04/2017, apport 168 kg/ha AMMO 33.5 14/05/2017, fongicide (Skyway, 1 l/ha)

Résumé :

La Loue, rivière reconnue pour la pratique de la pêche, connaît d'importantes mortalités piscicoles dont les plus sévères ont eu lieu en 2010 et 2011. Ce malgré sa classification comme étant en « bon état biologique » d'après la directive cadre sur l'eau. De récentes études ont montré que la qualité de l'eau diminuait depuis plusieurs décennies (Onema & Bioemco, 2012; Conseil scientifique, 2012). Cette diminution de la qualité de l'eau est causée par des pressions anthropiques sur le bassin versant. L'agriculture fut l'une des principales raisons citée comme ayant un impact significatif dans l'eutrophisation de la rivière. Dans ce contexte, la Chambre d'Agriculture du Doubs et du Territoire de Belfort a initié des actions pour limiter la contribution de l'agriculture à l'eutrophisation des rivières. Ceci passe par une quantification des flux d'azote causés par la lixiviation. Pour cela, la CIA 25/90 utilise la modélisation et en particulier les modèles Syst'N et FarmSim ainsi que l'étude de données lysimétriques provenant de l'installation en 2015 de lysimètres sur le territoire par l'université de Besançon.

L'objectif de cette étude est d'évaluer les performances de FarmSim dans la simulation du drainage et de la lixiviation sous les parcelles agricoles des sous bassins versants de Plaisir Fontaine et Lods. Les résultats des simulations de l'azote dans le sol par FarmSim sont globalement mauvais. Néanmoins, les performances de simulation du drainage semblent cohérentes avec des données bibliographiques et les concentrations en nitrates du même ordre de grandeur que les valeurs observées à partir des lysimètres.

Mots clés : Lixiviation, drainage, modélisation, FarmSim, PaSim, CERES-EGC, Syst'N