



**MISE EN PLACE D'UN RESEAU DE REFERENCE SUR
LES BASSINS VERSANTS DES 8 CAPTAGES
PRIORITAIRES DE L'EST MAYENNAIS**

**Rapport d'étude et analyse des
résultats**



Date : juin 2022
Rédaction : Céline Baudet

Table des matières

1	Présentation de l'étude.....	9
1.1	Contexte	9
1.2	Objectifs.....	11
1.3	Rappel des mécanismes de lixiviation de l'azote	12
1.4	Mise en œuvre.....	14
2	Méthodologie	15
2.1	Les exploitations et les parcelles du réseau	15
2.1.1	Choix des agriculteurs et des parcelles	15
2.1.2	Présentation des exploitations et des parcelles.....	16
2.2	Données climatiques	19
2.3	Recueil des informations sur les parcelles et les méthodes culturales.....	22
2.4	Mise en place et analyse des bougies poreuses.....	23
2.5	Prélèvement des reliquats azotés	26
2.6	Calcul des indicateurs.....	26
2.6.1	Bilan azoté simplifié (BAS).....	27
2.6.2	Chargement	28
2.6.3	Lixiviation hivernale calculée (LHC).....	28
2.6.4	Résultats économiques	29
3	Analyse des résultats.....	30
3.1	Analyse des pratiques agronomiques	30
3.1.1	Rotations	30
3.1.2	Travail du sol et semis	31
3.1.3	Rendements	32
3.1.4	Fertilisation azotée	32
3.1.5	Protection sanitaire des cultures.....	34
3.1.6	Couverture hivernale du sol et gestion des intercultures	34
3.1.7	Pratiques sur les prairies	35
3.2	Résultats et analyse des bougies poreuses	35
3.2.1	Analyse des bougies poreuses sur prairies.....	36
3.2.2	Analyse des bougies poreuses sur cultures.....	37
3.3	Résultats et analyses des reliquats azotés	40
3.4	Résultats et analyses de la lixiviation hivernale calculée pour les parcelles en cultures..	42
3.4.1	Validation de l'indicateur LHC	42
3.4.2	Lixiviation précoce.....	43
3.4.3	Comparaison des bassins d'alimentation.....	44
3.4.4	Influence du RPR sur la LHC.....	44

3.4.5	Influence de la profondeur de sol et de sa texture sur la LHC	46
3.4.6	Influence des pratiques de travail du sol sur la LHC.....	47
3.4.7	Influence des pratiques de fertilisation azotée sur la LHC	50
3.4.8	Influence de l'occupation du sol sur la LHC.....	53
3.4.9	Analyse par groupes	57
4	Conclusion	61
	Remerciements	63
	Abréviations	65
	Bibliographie.....	67
	Annexes.....	69
	_Toc106121488	
	_Toc106121489	

Table des illustrations

Figure 1 – Localisation des huit captages prioritaires de l'Est Mayennais	9
Figure 2 - Evolution de la concentration en nitrate de l'eau souterraine entre 2010 et 2016, secteur de St Pierre et Torcé (source ARS).....	10
Figure 3 - Evolution de la concentration en nitrate de l'eau souterraine entre 2010 et 2017, secteur de Chémeré le Roi (source ARS)	11
Figure 4 – Schéma de l'articulation des actions autour du réseau de référence	12
Figure 5 - Représentation temporelle de la minéralisation de la matière organique (a), de l'assimilation de l'azote par une culture semée au printemps (b) et par une prairie (c) au Royaume-Uni (Addiscott et al. 1991).....	13
Figure 6 – Etapes méthodologiques pour le choix des parcelles.....	15
Figure 7 – Répartition des parcelles du réseau par OTEX pour l'année 2020	19
Figure 8 – Répartition de l'occupation du sol des parcelles du réseau pour l'année de récolte 2020.....	19
Figure 9 – Données climatiques de la station météorologique d'Ecrille – Vaiges.....	19
Figure 10 – Données climatiques de la station météorologique du Moulin de Rousson - Saulges	20
Figure 11 – Données climatiques de la station météorologique de Torcé – La Houlberdière	20
Figure 12 – Données climatiques de la station météorologique de La Garde – St Martin de Connée	21
Figure 13 – Comparaison de la pluviométrie des 4 stations météorologiques	21
Figure 14 – Comparaison des cumuls de pluie entre les 4 stations sur 2018, 2019 et 2020	22
Figure 15 – Schéma de circulation de l'eau dans une parcelle (C. Baudet – 2021).....	24
Figure 16 – Triangle des textures du GEPPA (1963)	25
Figure 17 – Répartition du nombre de parcelles selon la rotation et l'occupation du sol	30
Figure 18 – Répartition des parcelles selon la fréquence de labour sur 3 ans	31
Figure 19 – Répartition des parcelles selon la fréquence de passage d'une herse rotative sur 3 ans	31
Figure 20 – Répartition des parcelles selon le nombre moyen d'outils de travail du sol par ans..	31
Figure 21 - Répartition des parcelles selon le nombre moyen de passages par an pour l'implantation d'une culture.....	31
Figure 22 – Répartition de la couverture hivernale des sols	34
Figure 23 – Diagrammes des concentrations en nitrate des bougies poreuse pour la prairie P45 sur les hivers 2019/2020 et 2020/2021	37
Figure 24 – Comportement de la parcelle P10 par rapport à la lixiviation de nitrate pendant l'hiver.....	40
Figure 25 – Résultats des analyses de reliquats azotés pour les prairies, parcs à volailles et forêt	41
Figure 26 – Résultats des analyses de reliquats azotés pour les parcelles cultivées.....	41
Figure 27 et Figure 28– comparaison entre la lixiviation d'azote mesurée par les bougies poreuses et la lixiviation hivernale calculée (LHC).....	42
Figure 29 – Comparaison de la LHC entre la récolte et l'entrée de l'hiver (LHC PRP-REH) avec la LHC totale (LHCRPR-RSH)	43
Figure 30 – Lixiviation hivernale calculée (LHC) et Concentration en nitrate sous racinaire estimée pour les huit captages, moyennes sur 3 hivers	44
Figure 31 – Comparaison entre le RPR et la LHC hiver 2018/2019.....	45
Figure 32 - Comparaison entre le RPR et la LHC hiver 2019/2020	45
Figure 33 - Comparaison entre le RPR et la LHC hiver 2020/2021	45
Figure 34 - Comparaison entre le RPR et la LHC pour les 3 hivers	45
Figure 35 – Influence de la profondeur du sol sur la LHC pour 3 hivers.....	46
Figure 36 – Influence de la texture du sol sur la LHC pour 3 hivers	47
Figure 37 – Influence du nombre de labour dans la rotation sur la LHC pour 3 hivers.....	48

Figure 38 – Influence de l’utilisation d’une herse rotative dans la rotation sur la LHC.....	48
Figure 39 - Influence du nombre d’outils de travail du sol dans la rotation sur la LHC.....	49
Figure 40 - Influence du nombre de passages d’outils de travail dans la rotation sur la LHC.....	49
Figure 41 – Influence des apports totaux d’azote pour la fertilisation de la culture sur la LHC.....	51
Figure 42 – Influence du bilan azoté simplifié sur la LHC	51
Figure 43 – Influence de la quantité d’azote fournie par les matières organiques sur la LHC.....	51
Figure 44 – Influence de la nature des matières organiques sur la LHC.....	52
Figure 45 – Influence de la période d’apport de la matière organique sur la LHC.....	53
Figure 46 – Influence de la succession culturale sur la LHC.....	54
Figure 47 – Influence de l’occupation hivernale du sol sur la LHC	56
Figure 48 – RPR des différents groupes	57
Figure 49 – LHC des différents groupes	57
Figure 50 – Apports azotés totaux sur la culture n-1 selon les groupes (3 ans).....	57
Figure 51 – Apports azotés par les matières organiques sur la culture n-1 selon les groupes	57
Figure 52 – Nombre d’années dans la rotation avec une fertilisation azotée organique complétée par une fertilisation minérale.....	58
Figure 53 – Répartition des successions culturales dans les groupes	58
Figure 54 – Résultats économiques des groupes par l’analyse du pourcentage de charges opérationnelles par rapport au chiffre d’affaire	59
Image 1 -Bougie poreuse de 90 cm	24
Image 2 -Pose de bougies poreuses dans une prairie permanente	24
Image 3 - Bougie poreuse posée.....	24
Image 4 - Mise en dépression de la bougie	24

Table des tableaux

Tableau 1 – Présentation des huit captages de l'Est Mayennais.....	9
Tableau 2 – Présentation des types d'actions menées sur le territoire de l'étude depuis 2011 ...	10
Tableau 3 – Réunions du réseau de référence	14
Tableau 4 – Répartition des exploitations et des parcelles par Aire d'Alimentation de Captage ..	18
Tableau 5 : Répartition des parcelles du réseau par OTEX pour l'année 2020	19
Tableau 6 – Evolution de l'occupation du sol des parcelles du réseau pour les trois années de suivi	19
Tableau 7 – Nature des données demandées sur les pratiques agronomiques.....	22
Tableau 8 – Tableau des réservoirs en eau selon les textures	25
Tableau 9 – Dates des prélèvements des reliquats azotés.....	26
Tableau 10 – Entrées et sorties d'azote prises en compte dans le Bilan Azoté Simplifié (BAS) pour les parcelles en culture.....	27
Tableau 11 – Entrées et sorties d'azote prises en compte dans le Bilan Azoté Simplifié (BAS) pour les parcelles en prairies et les parcs à volailles	28
Tableau 12 – Référentiel de pression de pâturage en nombre de jours UGB par ha et par an	28
Tableau 13 – Charges prises en compte dans le calcul de l'efficacité économique	29
Tableau 14 – Rendements moyens des parcelles du réseau en fonction des années pour les principales cultures	32
Tableau 15 – Synthèse des apports sur culture d'azote pour les trois cultures principales	33
Tableau 16 – Comparaison des rendements des trois principales cultures en dose d'apport d'azote minimale et maximale	33
Tableau 17 – Moyennes des IFT sur trois ans par culture (hors AB)	34
Tableau 18 – Gestion des intercultures hivernales.....	35
Tableau 19 – Résultats des bougies poreuses sous prairies permanentes et parc à volailles.....	36
Tableau 20 – Résultats des bougies poreuses sous parcelles cultivées	38
Tableau 21 – Analyse des résultats des bougies poreuses pour les parcelles en culture aux regards de l'occupation du sol et de la fertilisation azotée	39
Tableau 22 – Répartition des parcelles en groupe par rapport à leur RPR et leur LHC.....	57
Tableau 23 – tableau de synthèse de l'analyse par groupes	59

Table des équations

Équation 1 – Equation du Bilan Azoté Simplifié (BAS) pour les cultures	27
Équation 2 – Equation du Bilan Azoté Simplifié (BAS) pour les prairies.....	27
Équation 3 – Equation de la Lixiviation Hivernale Calculée	28

1 Présentation de l'étude

1.1 Contexte

La politique publique de l'eau s'inscrit dans un cadre européen depuis les années 1970, depuis 2000 elle est régie par la DCE¹ qui fixe des objectifs pour la préservation et la restauration de l'état des eaux superficielles et souterraines. L'objectif étant d'atteindre le bon état des différents milieux d'ici 2027 sur tout le territoire européen. Pour atteindre ces objectifs, l'état Français a, entre autres, défini des captages prioritaires (Grenelle de l'Environnement) qui présentent des taux de pollution au nitrate ou aux produits chimiques qui, soit dépassent la norme autorisée, soit présentent un risque de dépassement. En 2019 en Mayenne, 10 captages ont été retenus comme prioritaires dont 8 dans l'Est Mayennais qui font l'objet de l'étude (Tableau 1 et Figure 1).

Captages	Surf AAC (ha)	Prélèvements annuels	SAGE	[NO3] moyennes en mg/l (2016)	Principales productions agricoles
Vaubourgueil	2300	560 000	Sarthe amont	48	Bovin lait, hors sol, prairies, maïs, céréales
Tertre-Suhard		280 000	Sarthe amont	30	
Les Ormeaux		820 000	Sarthe amont	43	
Houlberdière	2828	550 000	Sarthe aval	45	Bovin allaitant, bovin lait, hors sol, prairies, maïs, céréales
Grand Rousson	701	139 400	Sarthe aval	58	Polyculture-élevage, prairies, maïs, céréales
Moulin de Rousson	338	173 600	Sarthe aval	40	
Ecrille	261	223 600	Sarthe aval	35	
Fortinière	251	218 000	Sarthe aval	53	

Tableau 1 – Présentation des huit captages de l'Est Mayennais
Surface des AAC, prélèvements annuels, concentration en nitrate et principales productions agricoles – (Aasivik, 2016)

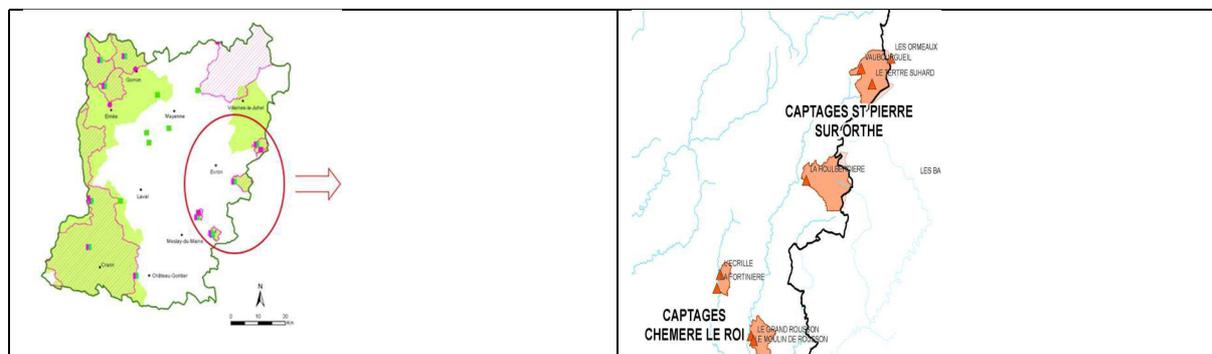


Figure 1 – Localisation des huit captages prioritaires de l'Est Mayennais

Les sols sont posés sur le Massif Armoricain recouvert de formations tertiaires très diverses ce qui explique la grande hétérogénéité des sols rencontrés. Néanmoins ils présentent la caractéristique d'être filtrants et séchants ce qui favorise le transfert des pollutions diffuses vers la ressource en eau. Transferts accentués, selon les situations, par un sous-sol fissuré, des pentes plus ou moins accentuées et des sols peu profonds.

L'occupation du sol est essentiellement agricole avec une vocation d'élevage (bovin lait, bovin viande et volaille) qui est peu à peu délaissée au profit de la céréaliculture.

¹ DCE : Directive Cadre sur l'Eau

La présence localement de fortes densités d'animaux, les techniques de production développées dans les années 90 ainsi que la vulnérabilité intrinsèque des sols permettent d'expliquer les teneurs élevées en polluants d'origine agricole dans les eaux des captages.

Pour y remédier, un diagnostic territorial a été réalisé en 2010 qui a abouti à la définition de plans d'actions pour la période 2011-2015.

Les contrats territoriaux précisent pour chaque captage les objectifs de qualité fixés à l'échéance 2015, qui peuvent globalement être synthétisés comme suit :

- Pour les eaux souterraines : ne pas avoir de dépassement de la limite de 50 mg/l pour les captages sensibles et infléchir les teneurs en nitrate.
- Pour les eaux de surface : amorcer une baisse durable de la teneur en nitrate.

Les grands types d'actions mis en place sont présentés dans le Tableau 2.

Leviers transversaux	Leviers de l'ingénierie agronomique ou agro-environnementale	Leviers complémentaires
<ul style="list-style-type: none"> ● Communication informative et de sensibilisation, ● Rappel des règles de bonnes pratiques et respect des périmètres de protection 	<ul style="list-style-type: none"> ● Conseils collectifs (fertilisation azotée, intercultures) ● Expérimentations, démonstrations ● Conseils individuels (diagnostics et suivis) ● Dispositif MAE ● Dispositifs innovants et approche filière (peu) 	<ul style="list-style-type: none"> ● Investissement, travaux ● Veille et gestion foncière ● Divers

Tableau 2 – Présentation des types d'actions menées sur le territoire de l'étude depuis 2011

En 2015, le Syndicat Intercommunal d'Alimentation en Eau Potable des Coëvrons a mandaté les bureaux d'étude Aasivick et Idea pour évaluer le programme de reconquête de la qualité de l'eau des captages prioritaires de l'Est Mayennais (Aasivik, 2016).

Dans le rapport d'étude, les BE² constatent que les objectifs sont atteints pour 2 des 8 captages (Figure 2 et Figure 3), pour 5 captages le bilan est mitigé car la situation est plutôt au maintien des teneurs en nitrate avec toutefois une tendance à la baisse mais la situation reste préoccupante. Pour un captage la situation reste critique avec de dépassements fréquents de la limite des 50 mg/l.

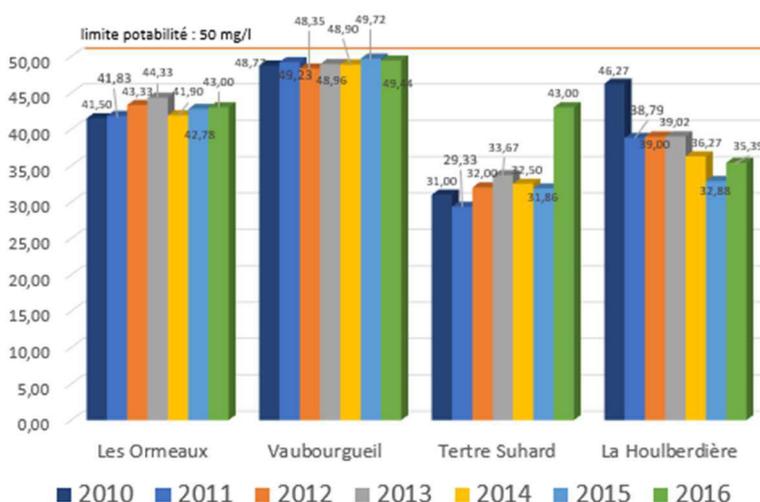


Figure 2 - Evolution de la concentration en nitrate de l'eau souterraine entre 2010 et 2016, secteur de St Pierre et Torcé (source ARS)

² BE : Bureau d'étude

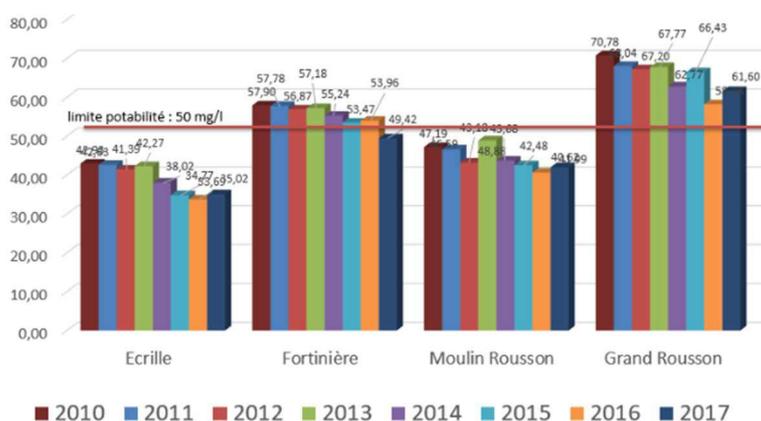


Figure 3 - Evolution de la concentration en nitrate de l'eau souterraine entre 2010 et 2017, secteur de Chémeré le Roi (source ARS)

De nombreuses actions ont été réalisées et la mobilisation des agriculteurs a été suffisamment importante pour ne pas activer la procédure ZSCE³, les programmes d'actions continuent de reposer sur le volontariat. Cependant, la mobilisation est hétérogène et s'essouffle. Si les actions ont permis, au mieux d'infléchir légèrement la tendance, au pire de maintenir les niveaux de pollution en nitrate, il n'y a pas eu d'effet fort quant aux changements de pratiques notamment en ce qui concerne le raisonnement de la fertilisation azotée.

C'est pourquoi le SIAEP a décidé d'engager dans le cadre du Contrat territorial 2017-2021 des mesures cibles pour infléchir plus nettement et plus durablement les teneurs en nitrate.

Les freins relevés sont d'ordres sociologiques et économiques avec :

- Une peur des contraintes qui freineraient le maintien économique et le développement des exploitations agricoles,
- Une réticence aux changements,
- Une défiance face à des mesures complexes et non adaptés au territoire.

Les leviers d'actions sont : l'intérêt des agriculteurs pour les analyses de reliquats azotés, la vie du sol et les intercultures pour lesquels les actions déjà menées ont mobilisé les agriculteurs sur certains territoires.

C'est pourquoi La Régie des Eaux des Coëvrons a souhaité poursuivre dans cette voie et construire un réseau de référence pour entraîner l'adhésion d'un maximum d'acteurs. Ce réseau étant le pivot du Contrat Territorial.

1.2 Objectifs

L'enjeu est d'établir un programme global, cohérent et concret pouvant associer le maximum d'agriculteurs des bassins en s'appuyant sur les agriculteurs référents élus en 2016.

La constitution du réseau de référence est le cœur du contrat territorial ; c'est l'élément central qui permettra de piloter les actions agricoles, d'entraîner l'adhésion et la reconnaissance de tous.

La mise en place du réseau de référence portée par la Régie des eaux des Coëvrons vise plusieurs objectifs :

- Constituer et suivre un réseau de référence sur l'ensemble des bassins d'alimentation de captage afin de mobiliser les acteurs,
- Déterminer sur le territoire, suivant les conditions de sol et de climat, les pratiques permettant d'atteindre un repère de qualité de l'eau drainée en entrée d'hiver permettant de répondre à l'objectif de qualité de l'eau au captage,
- Partager les résultats et tenir un tableau de bord sur l'évolution des pressions au regard de la qualité de la ressource avec l'ensemble des exploitants et partenaires techniques,

³ ZSCE : Zones Soumises à Contraintes Environnementales

- Utiliser les résultats obtenus pour ébaucher la trame d'un cahier des charges de pratiques agricoles spécifiques au territoire et respectueuses de la ressource en eau.

Ainsi, le réseau de référence constitue la colonne vertébrale qui permettra la mise en place de plusieurs actions sur les territoires (Figure 4).

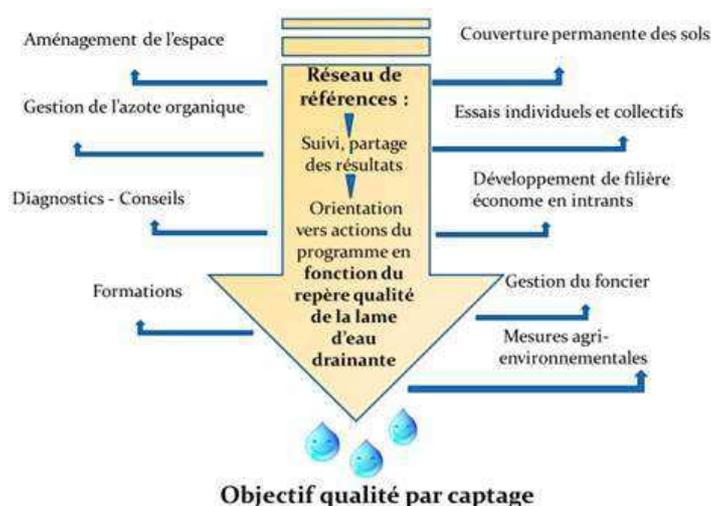


Figure 4 – Schéma de l'articulation des actions autour du réseau de référence

1.3 Rappel des mécanismes de lixiviation de l'azote

L'azote est à 78% sous forme gazeuse inerte dans l'atmosphère (N_2). Au niveau terrestre on le retrouve sous forme organique et minérale dans le sol et les hydrosystèmes. Dans le cycle naturel, l'azote de la biosphère est réparti entre les micro-organismes, la solution du sol et les plantes, de telle manière que les surplus d'azote sont faibles. Toutefois les activités humaines modifient la circulation de l'azote au sein des bassins versants. Les rejets ponctuels sont majoritairement le fait des habitations et les pollutions diffuses produites par les activités agricoles avec des intensités variables. Les rejets ponctuels liés à l'assainissement ont pu être réduits à partir des années 1990 grâce à l'amélioration des traitements en stations d'épuration. Les pollutions diffuses, par contre, ne peuvent pas être traitées *a posteriori*.

Cette contamination nitrique génère des impacts sanitaires aux niveaux des aquifères qui dépassent fréquemment la norme de potabilité de 11 mg N l^{-1} (ou $50 \text{ mg NO}_3 \text{ l}^{-1}$), mais elle est également nocive pour la biodiversité des eaux de surface, dès lors qu'elle dépasse 2 mg N l^{-1} (ou $10 \text{ mg NO}_3 \text{ l}^{-1}$). (BENOIT, 2014)

Les mécanismes de la lixiviation

La lixiviation, aussi appelée par abus de langage lessivage, dans le sol correspond au mouvement vertical de l'eau mobile et de ses solutés à travers le profil du sol hors de portée des racines, jusqu'à la nappe phréatique ou les drains. La majorité de l'azote lixivié est sous la forme de NO_3^- , très mobile et soluble dans l'eau (357 g/l à 25°C) alors que l'ammonium (NH_4^+) reste fixé par adsorption sur les fractions argileuses du sol et que le nitrite (NO_2^-) est peu abondant.

L'intensité de la lixiviation est due à la conjonction de plusieurs facteurs :

- La présence d'un reliquat d'azote minéral dans le sol,
- L'absence ou la faible absorption par le système racinaire,
- L'intensité de la lame drainante,
- L'absence de réduction de NO_3^-

L'absorption de l'azote par les plantes et la minéralisation du sol est variable au cours de l'année et selon les types des cultures (Figure 5).

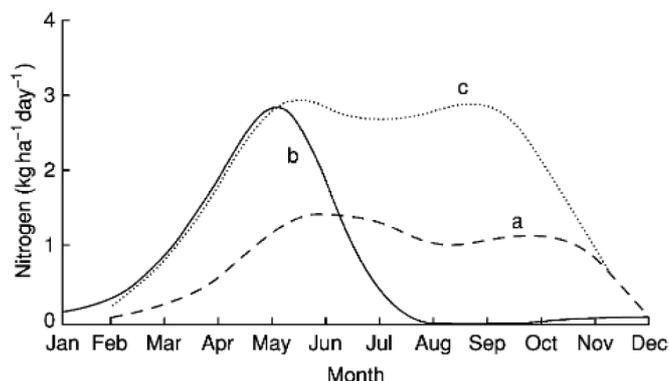


Figure 5 - Représentation temporelle de la minéralisation de la matière organique (a), de l'assimilation de l'azote par une culture semée au printemps (b) et par une prairie (c) au Royaume-Uni (Addiscott et al. 1991).

D'une manière générale, la lixiviation se réalise à l'automne lorsque la pluviométrie est importante, la minéralisation active et que le prélèvement par les plantes est faible (Macdonald et al. 1989 ; Machet et Mary 1990 ; Powelson et Addiscott 2005). Le cas des prairies est un peu différent, du fait qu'elles sont pérennes et qu'elles puisent l'azote tout au long de l'année, toutefois en cas de retournement, de coupes ou de pâturage excessif par les animaux, des risques de lixiviation existent également (Hennart et al. 2010).

Les facteurs de régulation

Le climat

Les variations saisonnières des précipitations et de la température sont des facteurs de contrôles des bilans d'eau et par conséquent des fuites d'azote par lixiviation du fait de la quantité d'eau drainée (lame drainante qui est fonction des précipitations, de la réserve utile des sols et de l'évapotranspiration). Ces facteurs climatiques impactent également le processus de minéralisation et de réorganisation au cours de l'année.

Les conditions pédologiques

Les caractéristiques physique, chimiques et biologiques d'un sol déterminent son système poreux et par conséquent ses mouvements d'eau, d'air et de nutriments. Les propriétés de rétention en eau des sols varient en fonction de la profondeur du sol, de sa texture, de sa teneur en matière organique, de sa structuration et de la capacité d'échange cationique.

De nombreux auteurs s'accordent sur le fait que la texture des sols joue un rôle important dans les quantités d'azote lixiviées. En conditions contrôlées, une étude a montré que 63% de l'ajout de NO_3^- était lixivié dans un sol sableux, contre 58% dans un sol limoneux sableux et 37% dans un limon sableux argileux (Gaines et Gaines 1994).

Les apports d'engrais

Les apports d'engrais azotés minéraux sont connus pour augmenter les risques de lixiviation, surtout lorsqu'ils dépassent le seuil des 160 kgN/ha. En revanche les engrais organiques réagissent au processus de lixiviation de manière très différente selon leur ratio carbone/azote (C/N).

Plus le C/N est élevé, plus les quantités d'azote immobilisées par organisation sous forme de biomasse de microorganismes seront importantes.

Les apports peuvent aussi provenir des légumineuses. La fixation d'azote biologique est réalisée par une symbiose dans les nodosités des légumineuses et les bactéries du genre *Rhizobium* capables de réduire l'azote atmosphérique (N_2) en azote ammoniacal.

Dans le cas des prairies, en plus de la fourniture d'azote par les légumineuses, la fertilisation naturelle se fait par les excréments des animaux qui y pâturent.

La couverture du sol

La couverture du sol par des végétaux intervient en réalité sur quatre facteurs : la stabilité de la structure du sol (physique et biologique) et donc de sa capacité de rétention de l'eau, le maintien en vie du microbiote qui réorganise l'azote, la captation d'azote par les plantes et l'augmentation de l'évapotranspiration et par conséquent la diminution de la quantité d'eau drainée. Toutefois cette influence est variable selon les conditions climatiques et le développement des plantes de couverture.

1.4 Mise en œuvre

Pour analyser les pratiques aux regards de la qualité de l'eau, le réseau de références a besoin d'acquérir des données sur les parcelles agricoles et les pratiques des agriculteurs. Ces relevés seront réalisés pendant les 3 ans de l'étude, elles concernent :

- Les pratiques agricoles techniques culturales, pâturage...)
- Les données météorologiques (4 stations)
- Les données sur les sols (analyses)
- Les reliquats azotés (3 prélèvements par an)
- Les mesures de concentration en nitrate des flux par des bougies poreuses

Les agriculteurs participants bénéficieront d'avantages :

- Gratuité des analyses
- Invitation aux réunions thématiques et de restitution des résultats
- Echanges entre les agriculteurs et les intervenants
- Priorité pour le financement d'actions
- Fiche parcellaire d'analyse et de conseil

Pour animer le réseau, 3 réunions par an étaient prévues : deux réunions « bout de champ » (mars et octobre) et une réunion de présentation des résultats en décembre. La crise sanitaire de la COVID19 a perturbé la tenue des réunions « bout de champ » en 2020 et 2021. Les réunions réalisées sont présentées dans le Tableau 3.

Le réseau de référence a permis l'émergence d'un essai réalisé par le CER (suivi par Guillaume TANT) chez 12 agriculteurs.

Dates	Thématiques	Intervenants
01/02/2018	Présentation de lancement	REC – Agristem LARCA72
24/05/2018	Présentation du réseau Couverts végétaux	REC – Agristem Agriduo
09/10/2019	Bout de champ : structuration des sols par les couverts végétaux	REC - Agristem
17/12/2018	Présentation des résultats de l'année 2018 La valorisation des déjections animales	REC – Agristem Seenovia
21/03/2019	Bout de champ : fonctionnement et analyse des bougies poreuses	REC – Agristem
08/10/2019	Bout de champ Présentation essai CER	REC – Agristem CER
12/12/2019	Présentation des résultats de l'année 2019	REC – Agristem
04/06/2020	Bout de champ : état floristique des prairies pâturées	REC – Agristem
18/02/2021	Présentation des résultats de l'année 2020 Présentation des résultats de l'essai CER	REC – Agristem CER
09/03/2021	Conférence-débat en visio : gestion du sol et transfert du nitrate dans l'eau	Konrad Schreiber
07/12/2021	Présentation finale des résultats de l'étude	REC – Agristem CER

Tableau 3 – Réunions du réseau de référence

2 Méthodologie

2.1 Les exploitations et les parcelles du réseau

2.1.1 Choix des agriculteurs et des parcelles

Les parcelles observées sont exploitées par des agriculteurs volontaires pour faire partie du réseau de référence. Ils peuvent entrer et sortir du réseau quand ils le souhaitent. Une première étape a été de présenter la démarche aux agriculteurs et aux partenaires lors d'une réunion préliminaire qui s'est tenue le 25 janvier 2018.

Lors de cette réunions les animateurs de la Régie des eaux des Coëvrons ont pris note des agriculteurs qui souhaitaient s'investir dans la démarche. La liste a été complétée par un démarchage téléphonique et sur le terrain.

Initialement, il était prévu 100 parcelles maximum, un agriculteur pouvant avoir 2 parcelles dans le réseau. Pour le choix des agriculteurs certaines règles ont été émises :

- Être répartis équitablement sur les différents AAC,
- Être représentatif des activités agricoles des territoires,
- Intégrer les agriculteurs de l'ancien réseau, du réseau « couverts multi spécifique » et MAETC,
- Avoir des pratiques culturales différentes,
- Avoir des répétitions pour plus de puissance dans l'analyse et maîtriser les facteurs de variation.

Ces deux derniers points n'ont pas pu servir de critère de choix ; d'une part parce que les pratiques des agriculteurs n'étaient pas caractérisées en amont et d'autre part car les volontaires étaient moins nombreux que prévu. Tous les agriculteurs volontaires sont donc entrés dans le réseau avec une bonne répartition géographique sur les territoires et une bonne représentativité des activités (2.1.2 p16).

Afin de s'assurer le bon déroulement de l'étude, il a été demandé aux agriculteurs du réseau de s'engager à :

- Autoriser les prélèvements de sol pour les reliquats azotés (post-récolte, entré-hiver, sortie-hiver)
- Autoriser la pose de bougies poreuses (11 parcelles)
- Autoriser le suivi de la parcelle
- Fournir les informations historiques et les pratiques sur la parcelle (travaux culturaux, amendement, fertilisation, chargement, rendements...)

Les différentes étapes pour le choix des parcelles sont décrites dans la Figure 6. Les animateurs de la Régie ont réalisé la plupart des visites sur site, Agristem est intervenu sur deux journées de terrain pour compléter l'analyse des parcelles qui reçoivent un dispositif de mesures par bougies poreuses.

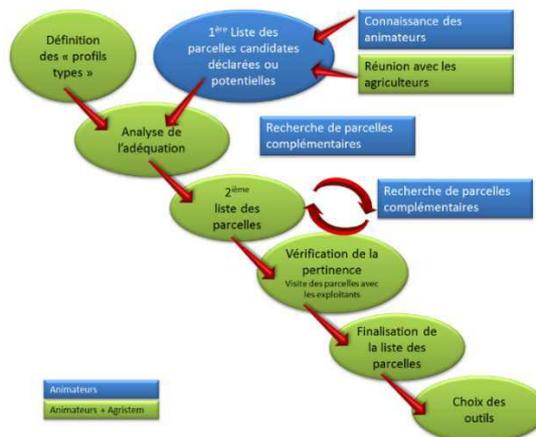
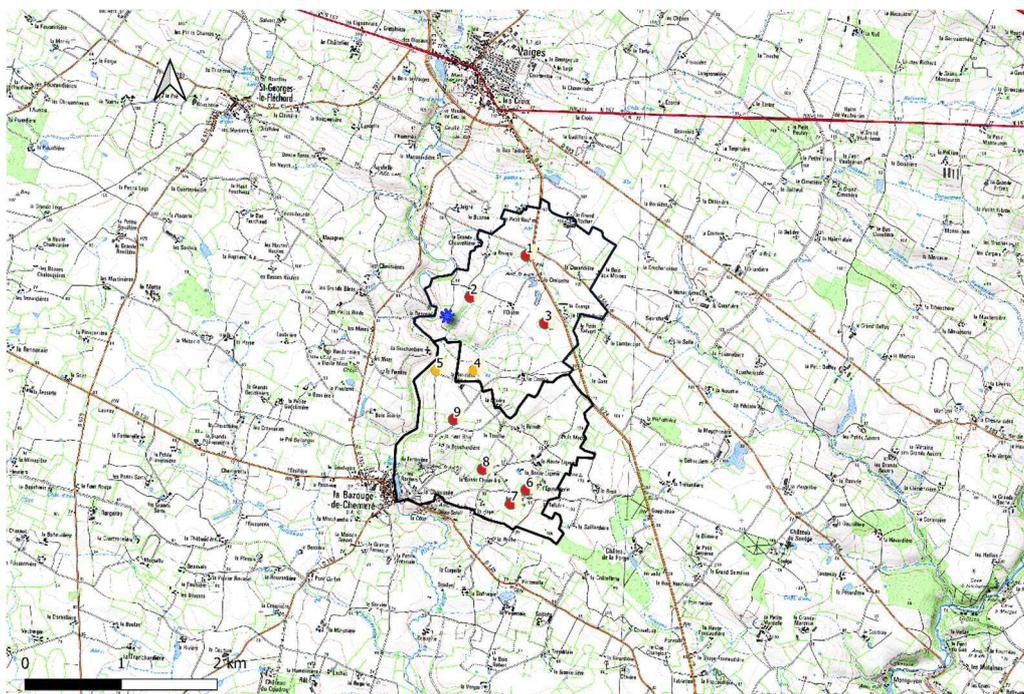


Figure 6 – Etapes méthodologiques pour le choix des parcelles

2.1.2 Présentation des exploitations et des parcelles

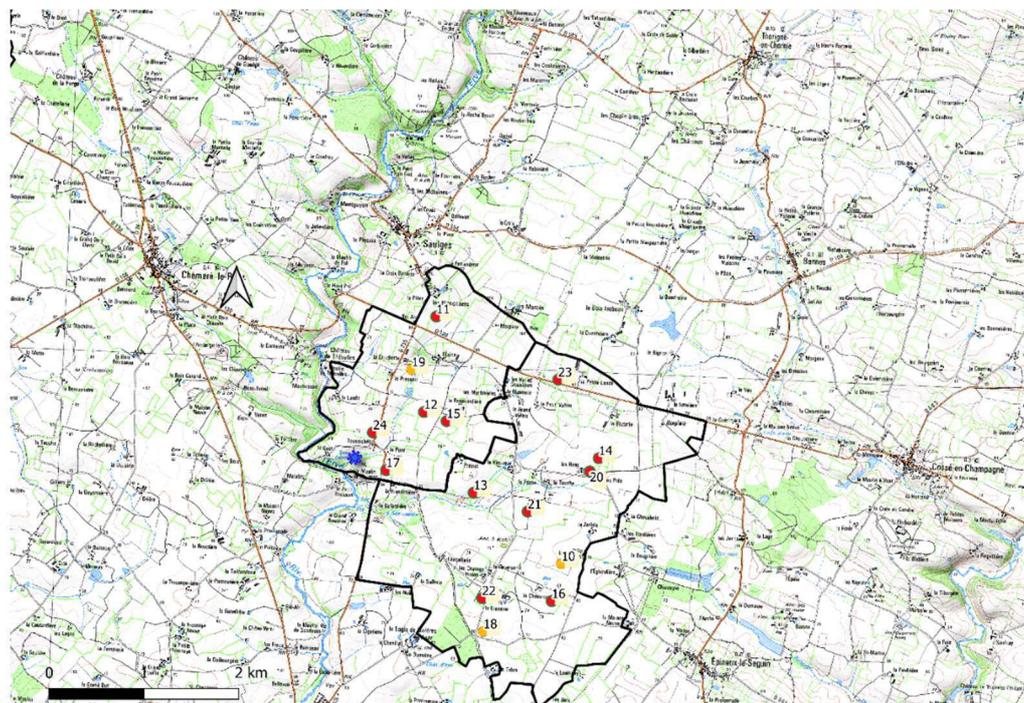
Le souhait de répartition géographique des parcelles a été respecté comme en atteste la cartographie des points de prélèvement (1 point par parcelle du réseau) présentée ci-dessous. Tous les points de prélèvement sont géolocalisés par leurs données GPS.



Légendes cartes

● Point de prélèvement reliquats azotés ● Point de prélèvement reliquats azotés + bougies poreuses N° Numéro de parcelle ★ Station météorologique

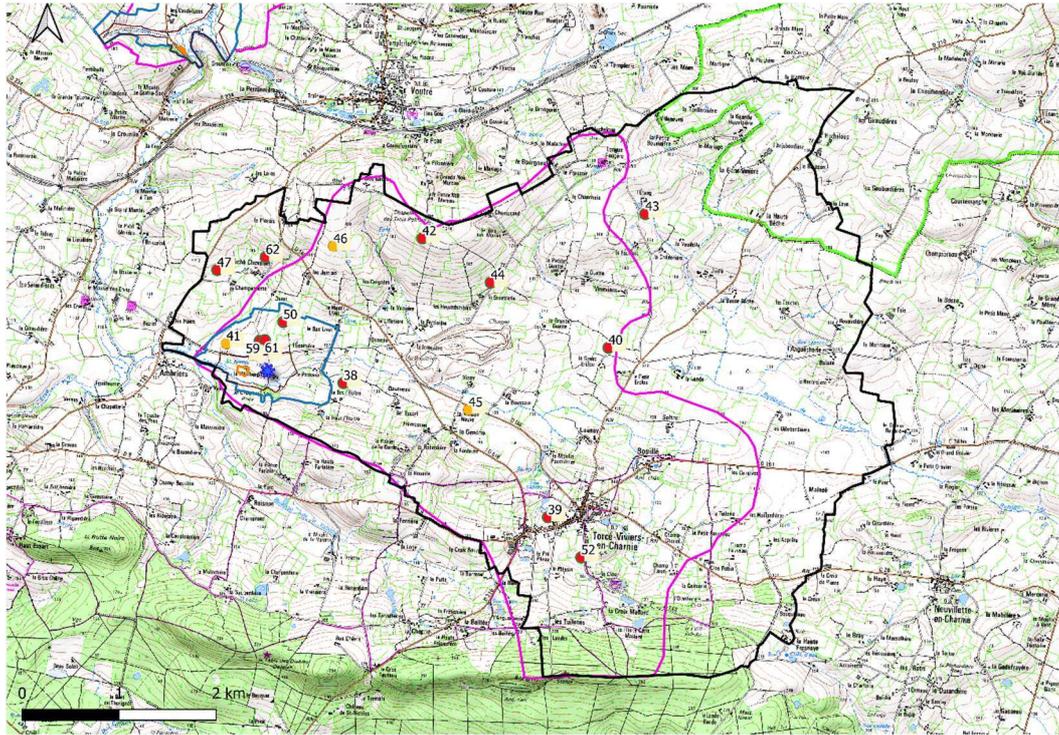
Carte 1- Cadre de localisation des points de prélèvements des bassins d'Ecrille et de Fortinière



Légendes cartes

● Point de prélèvement reliquats azotés ● Point de prélèvement reliquats azotés + bougies poreuses N° Numéro de parcelle ★ Station météorologique

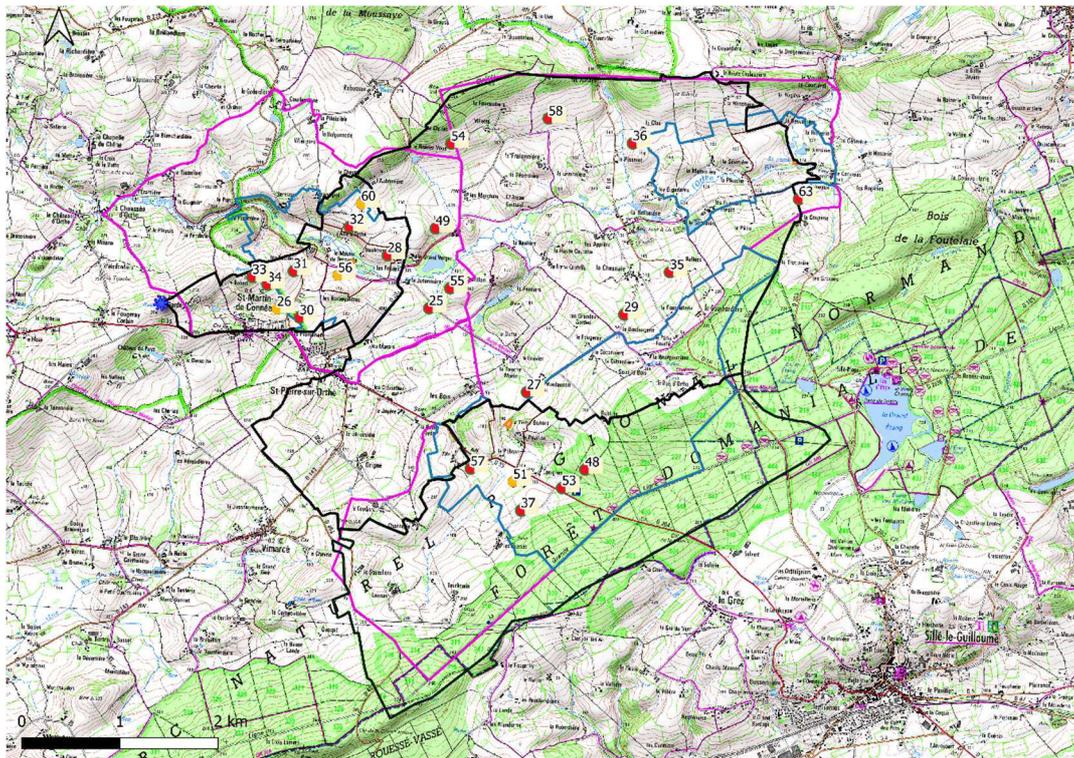
Carte 2 - Cadre de localisation des points de prélèvements des bassins du Moulin de Rousson et du Grand Rousson



Légendes cartes

- Point de prélèvement reliquats azotés
- Point de prélèvement reliquats azotés + bougies poreuses
- N° Numéro de parcelle
- ★ Station météorologique

Carte 3 - Cadre de localisation des points de prélèvements du bassin de la Houlberdière



Légendes cartes

- Point de prélèvement reliquats azotés
- Point de prélèvement reliquats azotés + bougies poreuses
- N° Numéro de parcelle
- ★ Station météorologique

Carte 4 – Cadre de localisation des points de prélèvements des bassins de Vaubourgueil et Tertre-Suhard

		Ecrille	Fortinière	Gd Rousson	MI de Rousson	Les Ormeaux	Vaubourgueil	Tertre-Suhard	Houlberdière		
AAC	Surface AAC (ha)	261	251	701	338	2300			2828		
	Nb d'exploitations concernées	7	9	19	10	48			30		
	SAU (ha)	235	203	636	310	1520			1325		
Réseau	Exploitations	Nb d'exploitations	4	5	6	7	6	10	5	14	
		% exploitations concernées	57%	56%	32%	70%	44%			47%	
		Nb exploitations en AB	1	1	1	1				1	
		OTEX	Céréales et oléagineux			1				3	
			Elevages			3	1	0	1	1	5
			Polycultures élevages	4	2	5	7	6	9	4	5
		SAU (ha)	910	423	659	694	1162	955	533	1379	
		ETP	9,1	6,7	11,25	11	16,4	16	9	16,7	
		Ateliers de production animales	Bovins viande	4	4	1	4	4	8	2	6
			Bovins lait	3			2	1	3	8	3
	Porcins				1			1	0	0	1
	Volailles				2	4	2	3	1	3	
	Ovins				1					1	
	Parcelles	Nb de parcelles	4	5	7	8	6	12	6	15	
		Cultures et PT	3	3	5	7	6	10	5	12	
		Prairies permanentes et apparentées	1	2	2	1	0	2	1	3	
		SAU (ha)	39,51	14,7	51,89	76,24	55,9	77,08	33,15	101,26	
% SAU		16,81%	7,24%	8,16%	24,55%	11%			7,64%		

Tableau 4 – Répartition des exploitations et des parcelles par Aire d’Alimentation de Captage

La SAU des exploitations est donnée par rapport à la localisation de la parcelle du réseau, mais cette SAU peut être répartie sur d’autres territoires.

La plupart des OTEX⁴ du territoire sont présents dans l’étude et la répartition du nombre d’exploitations concernées par rapport à la surface agricole des bassins est cohérente. La représentativité des exploitations va de 30 à 70% et les parcelles du réseau représentent en moyenne 12 % de la SAU des bassins.

Pour l’année 2018, 54 agriculteurs participaient au réseau de références. A cela, il faut ajouter 1 particulier ainsi que l’ONF⁵ pour la parcelle forestière. Ces deux dernières parcelles ont permis d’avoir des références sur des parcelles non agricoles.

En 2019, une parcelle a été rachetée par la REC⁶, trois agriculteurs ont rejoint le réseau et un agriculteur à choisi de le quitter.

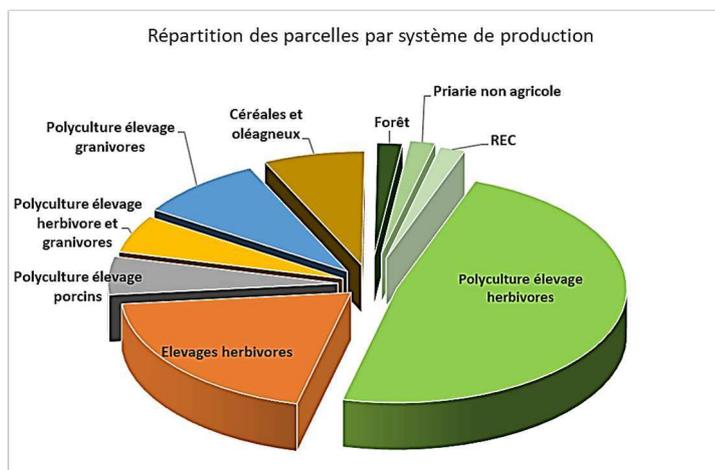
En 2020, cinq agriculteurs ont quitté le réseau.

En 2019, 12 agriculteurs se sont engagés à conduire des essais menés par le CER. Les 12 parcelles choisies font partie du réseau de référence.

87% des parcelles du réseau appartiennent à des structures ayant au moins un atelier d’élevage (Tableau 5 et Figure 7). Les élevages d’herbivores sont les plus nombreux dans le panel (73%). Seules 4 exploitations sont en cultures céréalières pures. Cela offre une bonne représentativité des orientations des exploitations du territoire.

Quatre structures sont en Agriculture Biologique (1 céréalier, 1 élevage granivore et 2 en polycultures élevage), et représentent 5 parcelles (3 en culture, une en prairie pâturée et 1 en parc à volailles).

OTEX	Nb	%
Polycultures élevage herbivores	27	48,2%
Elevage herbivores	11	19,6%
Polycultures élevage porcin	3	5,4%
Polycultures élevage herbivores et granivores	3	5,4%
Polycultures élevage granivores	5	8,9%
Céréales et oléagineux	4	7,1%
Forêt	1	1,8%
Particulier	1	1,8%
REC	1	1,8%
Total	56	



⁴ OTEX : Orientation Technico-Economique des Exploitations

⁵ ONF : Office National des Forêts

⁶ REC : Régie des eaux des Coëvrons

Tableau 5 : Répartition des parcelles du réseau par OTEX pour l'année 2020

L'occupation des sols pendant la durée de l'étude est présentée dans le Tableau 6 et la Figure 8. La majeure partie des parcelles en culture est occupée par des céréales à paille ou du maïs. Viennent ensuite le colza et les méteils. Les cultures de légumineuses en pure ajoutés aux méteils représentent 12 % de la SAU de l'étude en 2020. Il est à noter que le nombre de prairies temporaires a progressé entre le début et la fin de l'étude.

Occupation du sol des parcelles du réseau	Récolte 2018	Récolte 2019	Récolte 2020
Céréales à paille	27	22	14
Méteil	3	3	4
Maïs	11	10	12
Colza	4	4	6
Tournesol	0	1	1
Fèverole	1	2	1
Luzerne	1	1	2
Pois / Lupin	0	1	0
Betterave F	0	1	0
Prairies Temporaires	1	4	5
Prairies Permanentes	9	10	8
Parc volailles	2	2	2
Forêt	1	1	1
Total	60	62	56

Tableau 6 – Evolution de l'occupation du sol des parcelles du réseau pour les trois années de suivi

Figure 7 – Répartition des parcelles du réseau par OTEX pour l'année 2020

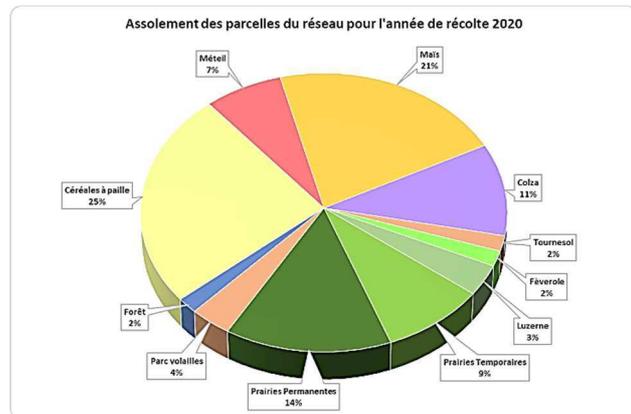


Figure 8 – Répartition de l'occupation du sol des parcelles du réseau pour l'année de récolte 2020

2.2 Données climatiques

Afin d'avoir des données territoriales fines, la Régie des eaux des Coëvrons a implanté quatre stations météorologiques, une par grand bassin de captage. Les stations mesurent en continu la pluviométrie, la température et l'hygrométrie. Leur position est indiquée sur les cartes de localisation des points de prélèvement.

Les relevés de pluviométrie et de température sont présentés par station ci-dessous.

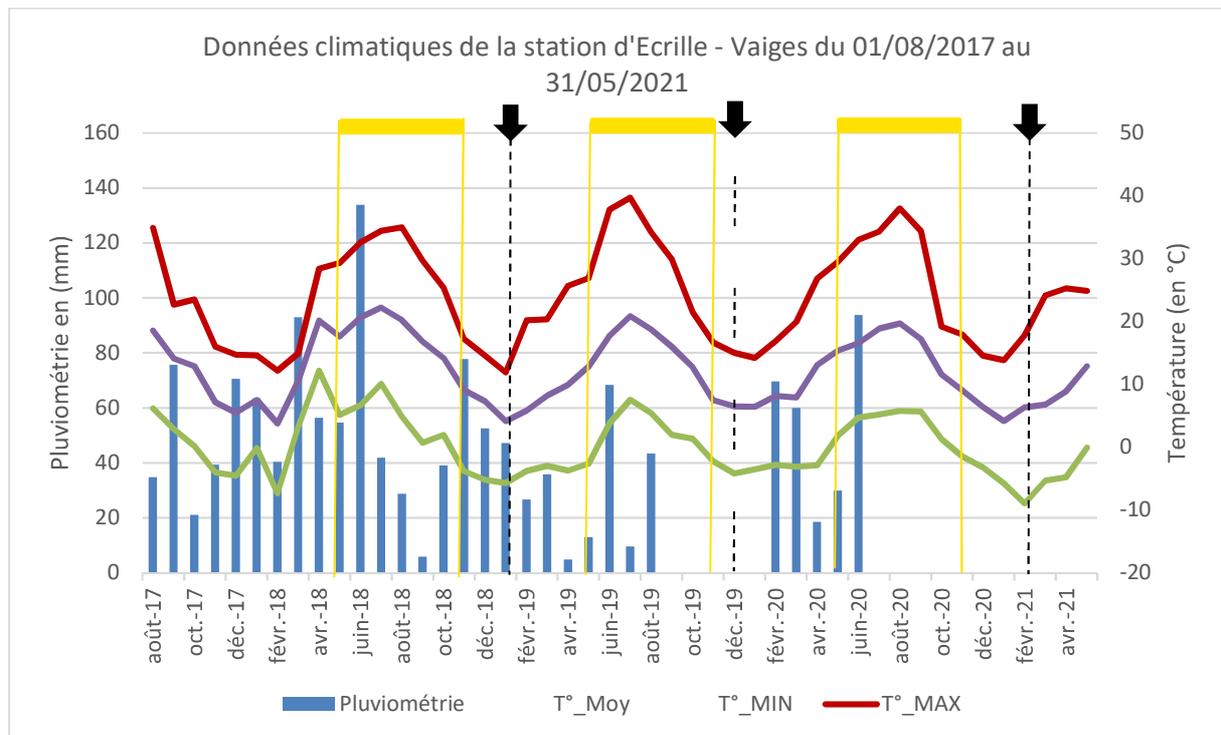


Figure 9 – Données climatiques de la station météorologique d'Ecrille – Vaiges du 01/08/2017 au 31/05/2021 (en jaune la période de végétation, flèche noire : début de drainage)

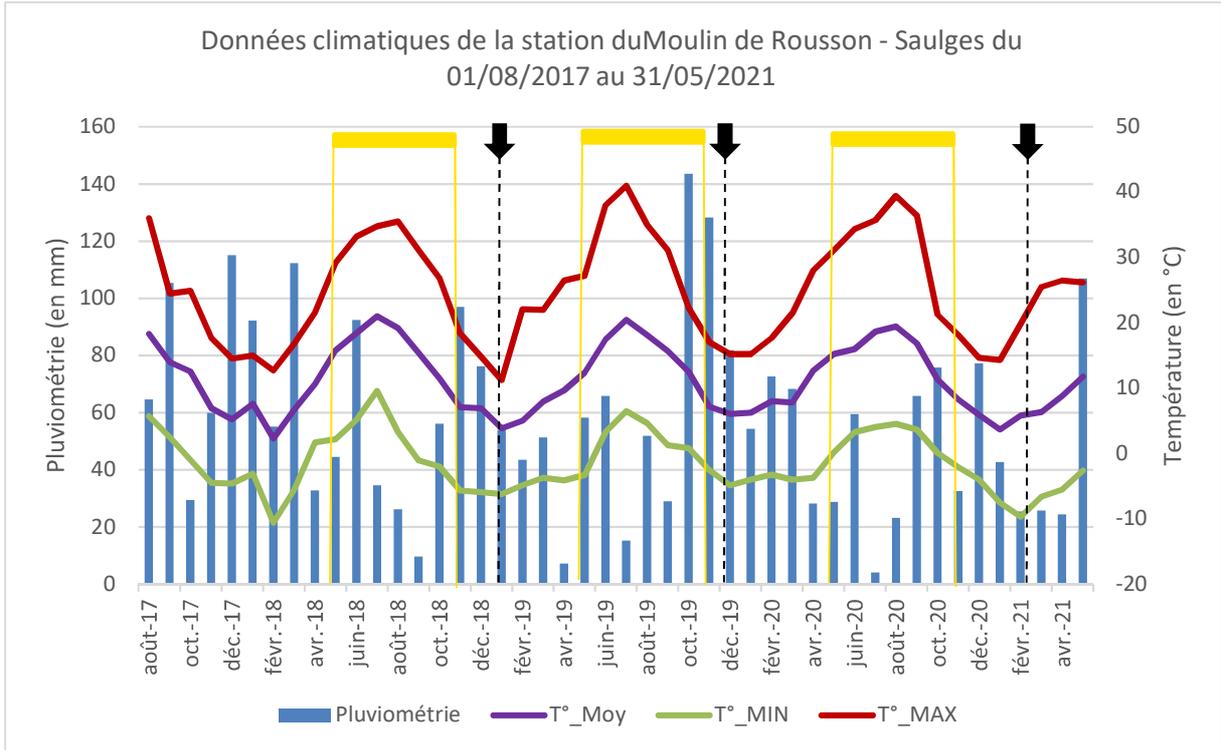


Figure 10 – Données climatiques de la station météorologique du Moulin de Rousson - Sauges du 01/08/2017 au 31/05/2021 (en jaune la période de végétation, flèche noire : début de drainage)

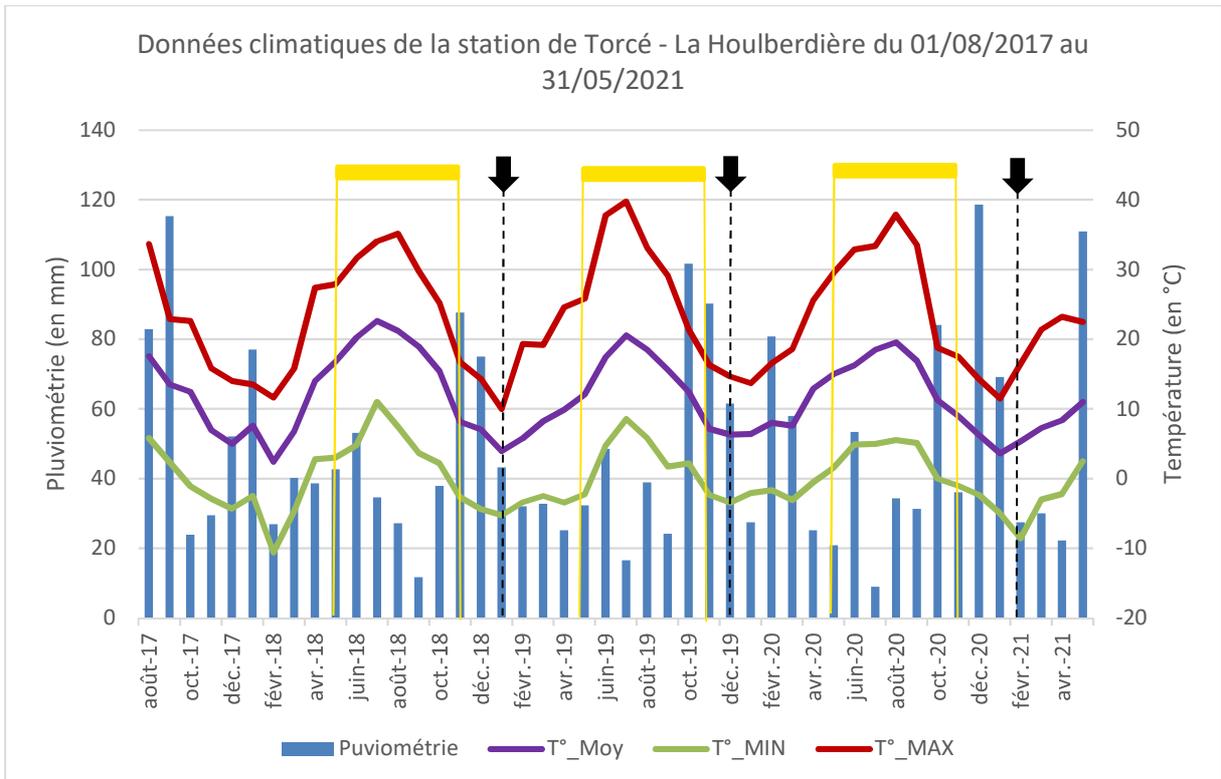


Figure 11 – Données climatiques de la station météorologique de Torcé – La Houberdière du 01/08/2017 au 31/05/2021 (en jaune la période de végétation, flèche noire : début de drainage)

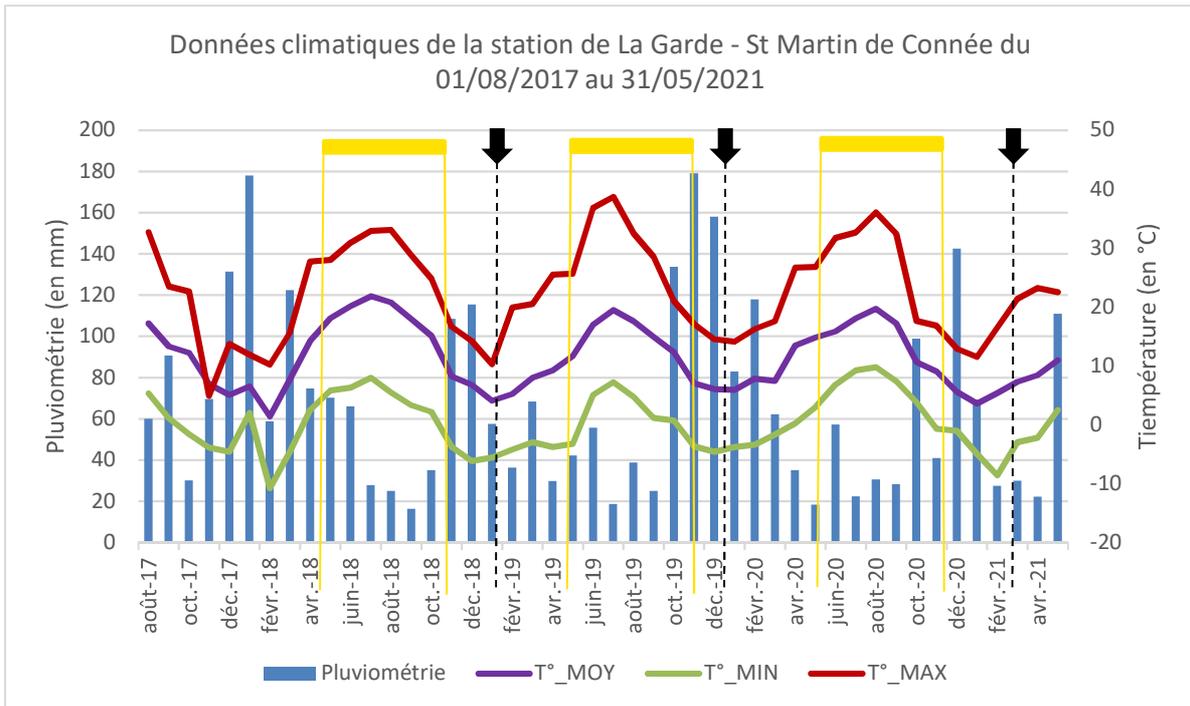


Figure 12 – Données climatiques de la station météorologique de La Garde – St Martin de Connée du 01/08/2017 au 31/05/2021 (en jaune la période de végétation, flèche noire : début de drainage)

D'un point de vue climatologique, les années couvertes par l'étude ont été marquées par :

- Un printemps 2018 plus chaud et plus humide que la moyenne,
- Un été 2019 particulièrement sec et chaud qui a impacté les rendements des cultures,
- L'automne 2019 globalement plus arrosé que la moyenne,
- Une année 2020 qui présente un déficit hydrique.

Les dates de début de drainage sont variables d'une année à l'autre, ainsi pour l'hiver 2018/2019, le drainage a commencé fin novembre, l'année suivante le drainage a débuté plus précocement en octobre alors que pour l'hiver 2020/2021 les pluies efficaces ont été plus tardives avec un début de drainage au mois de décembre.

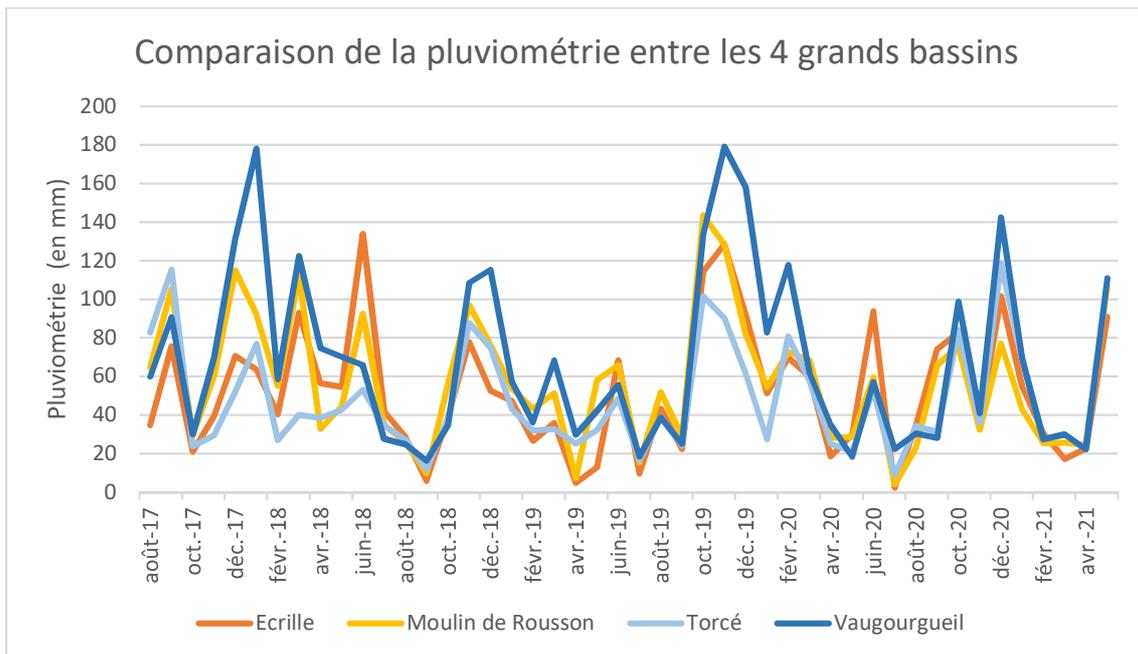


Figure 13 – Comparaison de la pluviométrie des 4 stations météorologiques entre le 1^{er} juillet 2017 et le 31 mai 2021

Les stations ne sont séparées qu'au maximum d'une trentaine de kilomètres. Néanmoins on constate une différence importante de climat, le plus frappant étant les écarts de pluviométrie entre le bassin de la Houberdière (Station de Torcé) et les bassins de Vaubourgueil distant d'une quinzaine de kilomètres. Ainsi sur l'année 2018, on relève un différentiel de 345 mm, Vaubourgueil étant le bassin le plus arrosé ; de même en 2019 avec une différence de 300 mm. La tendance est identique en 2020 mais avec une différence moindre pour cette année plus sèche (156 mm). (Figure 14)

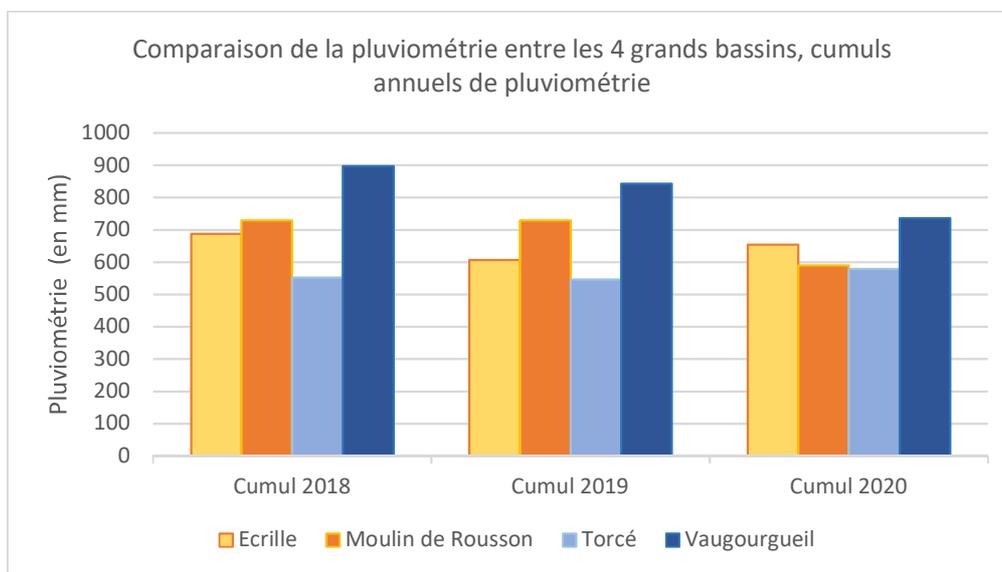


Figure 14 – Comparaison des cumuls de pluie entre les 4 stations sur 2018, 2019 et 2020

2.3 Recueil des informations sur les parcelles et les méthodes culturales

Les animateurs de la Régie ont recueilli les informations sur les exploitations et les parcelles à l'aide de guides réalisés par Agristem :

- 1 questionnaire pour la connaissance de l'exploitation agricole,
- 1 questionnaire sur la parcelle,
- 1 questionnaire annuel sur les pratiques pendant la saison de culture et la saison hivernale.

Ces guides sont disponibles en annexe 1.

Les données ont été demandées à partir de 2015 jusqu'au printemps 2021. La nature des données est présentée dans le Tableau 7. Afin de garantir la confidentialité des données, les parcelles ont été numérotées.

Parcelles en culture	Parcelles en prairie
Interculture (date de semis, nature, date et mode de destruction)	Chargement (date de mise à l'herbe, animaux, date de retrait)
Travail du sol (dates, outils)	Sur semis
Semis (date et dose)	
Fertilisation et amendement (nature, date, dose)	Fertilisation et amendement (nature, date, dose)
Protection sanitaire	Fenaïson (dates, rendements)
Récolte (date, rendement)	

Tableau 7 – Nature des données demandées sur les pratiques agronomiques

Pour les années 2015 à 2017, la quantité et la qualité des informations recueillies sont très hétérogènes d'une parcelle à l'autre. Pour 2018 la plupart de informations ont été obtenues mais avec parfois un manque de détail. Pour les années 2019 et 2020 la plupart des retours sont de bonne qualité. Malgré tout, il subsiste dans le jeu de données des manques qui rendent les analyses malaisées. Toutes les données ont été saisies par Agristem dans un tableur Excel unique (fourni en format numérique avec ce rapport).

2.4 Mise en place et analyse des bougies poreuses

Les bougies poreuses permettent de prélever *in situ* des concentrations de façon non destructrice et répétée au cours du temps dans des parcelles agricoles. Le choix s'est porté sur la pose de bougies verticales de 30, 60 et 90 cm de profondeur. Selon la profondeur de sol des parcelles, une, deux ou trois tailles ont été implantées. On considère que 90 cm est en limite de zone racinaire. Plus facile à mettre en place que les bougies horizontales qui n'ont pas montré de différences significatives de concentrations pour des sols sans fissure par rapport à des bougies verticales (Bowman et al. 2002). De plus, les bougies poreuses horizontales dont l'installation provoque une perturbation importante du sol, impose une année de stabilisation avant le début des mesures, ce qui était incompatible avec la durée de l'étude.

Une bougie poreuse est formée d'une cupule cylindrique creuse, collée à un tube de PVC fermée hermétiquement par un bouchon par lequel passent un tube. La cupule est composée d'un matériau poreux en céramique supposé inerte chimiquement. L'extraction de la solution du sol s'effectue par application d'une sous-pression à l'intérieur de la bougie, qui permet l'aspiration à travers la céramique de l'eau libre du sol. Même si la quantité d'eau dépend de la sous-pression appliquée, Poss et al. (1995) montrent que les concentrations ne sont pas significativement différentes pour des sous-pressions comprises entre -0.4 et -0.6 bar.

Avantages de la méthode	Limites de la méthode
<ul style="list-style-type: none"> - Faible destruction de la structure du sol - Faible perturbation du système racinaire des plantes en place - Faible modification de la composition chimique des eaux du sol - Extraction des eaux plus ou moins liées au sol (provenant de pores de tailles différentes) en fonction de la dépression exercée - Peu coûteux 	<ul style="list-style-type: none"> - Installation à l'avance (1 semaine, ici 2). - Ne prélève que l'eau déplacée par la dépression exercée - Nécessite un sol filtrant, ni trop argileux, ni trop caillouteux. - Idéalement doit être associé à des mesures complémentaires de type destructif (prélèvement in situ, ici reliquats). - Le volume restitué est inégal et dépend de plusieurs facteurs (humidité du sol, dépression, colmatage des bougies, profondeur...).

Dans les prairies, les bougies restent en place à l'année. En revanche, dans les cultures elles sont enlevées pour faciliter le travail du sol et le semis. Les relevés des bougies poreuses est assurée tous les 15 jours. Les bougies sont remises en dépression le jour même. La mesure de concentration de l'eau en nitrate est réalisée à l'aide d'un nitromètre. Un relevé du volume d'eau dans la bougie est réalisé pour chaque prélèvement.

Il était prévu que les bougies soient gérées par un prestataire qui n'a pas pu mettre en place le matériel avant le début drainage en 2018. Les animateurs de la REC ont pris le relai avec une implantation tardive pour le premier hiver (mi-janvier 2019).

Image 1 -Bougie poreuse de 90 cm



Image 2 -Pose de bougies poreuses dans une prairie permanente



Image 3 - Bougie poreuse posée



Image 4 - Mise en dépression de la bougie



Méthodologie de calcul

Pour estimer la lixiviation d'azote à partir des concentrations mesurées dans les bougies poreuses, il est nécessaire d'estimer les flux d'eau (lame drainante pour chaque parcelle), c'est-à-dire la quantité d'eau qui sort par gravité de l'horizon observé. C'est cette eau qui entraîne les ions nitrate. Ainsi **la concentration en NO_3^- multipliée par le volume d'eau drainé** permet d'avoir une approche de la quantité d'azote lixiviée. Dans cette étude, les flux sont estimés par le calcul du bilan hydrique à partir de l'estimation des termes du bilan suivant :

$$\text{Lame drainante} = \text{Précipitations} - \text{Réserve utile} - \text{Evapotranspiration}$$

Dans le cas des parcelles en pente, au niveau de la bougie poreuse on considère que le flux d'entrée amont est égal au flux de sortie aval. Alors les deux s'annulent, ils ne sont donc pas pris en compte (Figure 15).

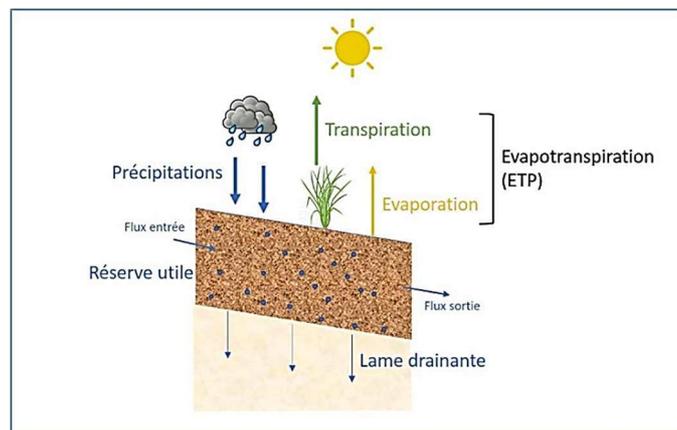


Figure 15 – Schéma de circulation de l'eau dans une parcelle (C. Baudet – 2021)

Les données de précipitations et de températures proviennent des stations météorologiques locales implantées par la Régie des eaux des Coëvrons (§2.2). Ces données servent pour le calcul de la lame drainante et de l'ETP. La réserve utile des sols est calculée à partir des analyses de sol. Les détails de la méthodologie est développée ci-après.

Calcul de la Réserve Utile (RU)

Une analyse granulométrique de chaque horizon (profondeur en cm : 0-30 / 30-60 / 60-90) des parcelles faisant l'objet d'un suivi par bougie poreuse a été réalisée. Cette analyse permet de déterminer la texture de chaque horizon grâce au triangle des texture (Figure 16). Une fois la texture déterminée, une approche de la réserve utile du sol est définie à l'aide de l'abaque de Jamagne (Tableau 8) : Réservoir utilisable = mm d'eau par cm de sol X 30 cm.

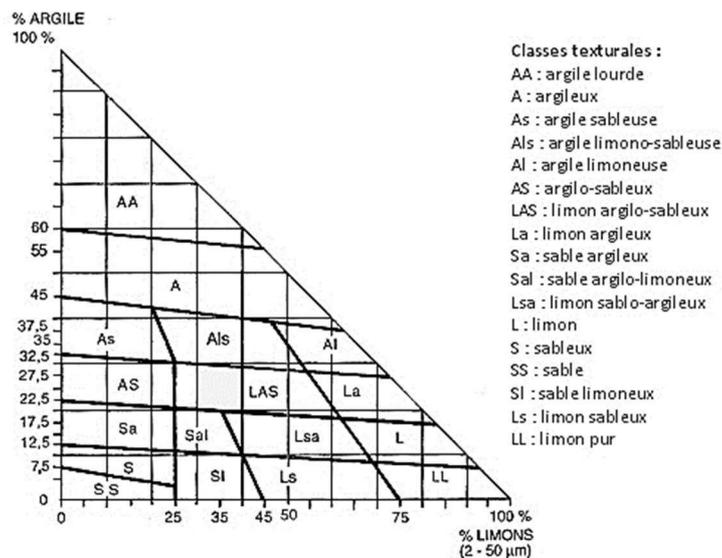


Figure 16 – Triangle des textures du GEPPA (1963)
GEPPA : Groupe d'Etude pour les Problèmes de Pédologie Appliquée.

Classe de texture (selon le triangle de Jamagne)	Humidité % à la capacité au champ (pF=2.5)	Humidité % au point de rétrissement permanent (pF=4.2)	Eau utile (g d'eau pour 100 g de sol)	Densité apparente (sans dimension)	Réservoir utilisable (mm d'eau par cm de sol)
S	8	3	5	1.35	0.7
SL	12	5	7	1.40	1.0
SA	19	10	9	1.50	1.35
LIS	15	7	8	1.50	1.20
LS	19	9	10	1.45	1.45
LmS	20	9	11	1.45	1.60
LSA	22	11	11	1.50	1.65
LAS	24	12	12	1.45	1.75
LI	17	8	9	1.45	1.30
Lm	23	10	13	1.35	1.75
LA	27	13	14	1.40	1.95
AS	33	22	11	1.55	1.70
A	37	25	12	1.45	1.75
AL	32	19	13	1.40	1.80
A lourde	29	18	11	1.50	1.65

Tableau 8 – Tableau des réservoirs en eau selon les textures
Source : Service de cartographie des sols de l'Aisne (Jamagne et al., in Baize et Jabiol, 1995)

Ainsi, avec les données de pluviométrie territoriale, il est possible de déterminer la date de début de drainage pour chaque horizon.

Calcul de l'évapotranspiration (ETP)

L'estimation de l'ETP a été réalisée grâce à la feuille de calcul issue des recherches de Ludovic OUDIN (OUDIN L, 2005) et téléchargeable sur le site de l'INRAE (Université Paris Sarclay, pôle HYDRO). Le modèle utilise le calcul de la radiation terrestre (Morton 1983), les données variables sont la latitude et la température moyenne journalière. Ainsi l'ETP pendant la période de drainage varie entre 0,1 et 3 mm par jour.

Le calcul a été fait pour chaque bassin avec les températures moyennes journalières provenant des stations météorologiques de la Régie.

2.5 Prélèvement des reliquats azotés

La mesure des reliquats azotés est une méthode très utilisée en agriculture pour ajuster la fertilisation azotée. Il s'agit d'un prélèvement et d'une analyse de terre afin de déterminer la quantité d'azote totale contenu dans la **solution liquide** du sol. Les résultats sont faciles à lire et la méthode est maintenant bien connue des agriculteurs mais elle ne donne pas la quantité totale d'azote présent dans le sol. En outre, c'est une méthode qui est très sensible à la qualité du prélèvement et à la préparation des échantillons. Lorsque le protocole est respecté, il est considéré que l'incertitude des résultats se situe entre 6 et 10% (CARRIERE, 2012).

Pour cette étude, les prélèvements et les analyses ont été réalisés par le laboratoire LARCA 72. Les différents sous-échantillons ont été prélevés en rond autour du point GPS fourni par la REC. Trois horizons sont prélevés selon la profondeur de sol de la parcelle (0-30 / 30-60 / 60-90 cm).

Pour chaque parcelle, trois analyses de reliquats azotés sont réalisées par an (dates dans le Tableau 9) :

- Un reliquat sortie hiver (RSH)
- Un reliquat post-récolte (RPR)
- Un reliquat entrée hiver (REH)

Années	RSH	RPR	REH
2018		06/08/18 ou 31/10/18	03, 04 et 05/12/18
2019	06 et 07/02/19	29 et 30/07/18 ou 31/10/19	18/11/19
2020	03/02/20	27 et 28/07/20 ou 15/10/20	16/11/20
2021	07/02/21		

Tableau 9 – Dates des prélèvements des reliquats azotés

2.6 Calcul des indicateurs

La méthode des bilans a été utilisée pour le calcul des indicateurs sur de fertilisation et de lixiviation. Ce concept a été développé par Hébert dans les années 1970. Elle prend en compte les flux d'azote dans les sols cultivés avec d'une part les entrées et d'autre part les sorties. De nombreux travaux ont été réalisés pour affiner le paramétrage des différents postes. Initialement utilisé pour ajuster la fertilisation des cultures, le bilan azoté permet également d'estimer les fuites d'azote par le solde des apports d'azote au sol et des exportations d'azote par la récolte et le pâturage. Billen a montré que 75 à 100% du surplus calculé était perdu sous formes de NO_3^- dans les zones sous-racinaires des parcelles conventionnelles, ce qui en fait un bon indicateur du potentiel des fuites environnementales des terres arables (Billen G, 2013).

Pour obtenir la valeur des différents postes du bilan azoté, comme il n'est pas possible d'avoir des mesures précises, il est nécessaire de passer par des approximations à l'aide de référentiels. Les référentiels CORPEN ont été utilisés en priorité dans cette étude. Parfois ils font appel à des détails dont nous n'avons pas connaissance, par exemple, la consistance du fumier ou son mode de stockage. C'est pourquoi des valeurs moyennes ont été appliquées pour les calculs, elles sont présentées en annexe 2.

Lorsque les données d'analyse des effluents étaient disponibles, elles ont été utilisées. De même, certaines parcelles ont bénéficié d'une campagne de pesées de biomasse suivant la méthode MERCI⁷, ces données remplacent alors les valeurs du référentiel.

L'équation complète du bilan est également disponible dans cette même annexe. Pour le calcul des indicateurs présentés ci-après, nous avons opté pour une simplification du bilan avec la non prise en compte de certains postes comme la fixation non symbiotique de l'azote atmosphérique ou encore les pertes du sol par voie gazeuse.

2.6.1 Bilan azoté simplifié (BAS)

Pour les cultures

Le bilan azoté simplifié (BAS) sert d'indicateur d'ajustement de la fertilisation azotée par rapport aux besoins de la culture.

Équation 1 – Equation du Bilan Azoté Simplifié (BAS) pour les cultures

$$BAS_{culture} = [Mh + Fs + Mhp + Mr + MrCi + Mpro(n) + Mpro(n-1) + Mpro(n-2) + X] - [Pf]$$

Date d'ouverture : récolte n-1

Date de fermeture : récolte n

Aucune parcelle du réseau n'est irriguée, c'est pourquoi *Nirr*, l'azote apportée par l'eau d'irrigation ne figure pas dans l'équation. Les entrées et les sorties du système sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Entrées	
Mr	Minéralisation nette de résidus de récolte (n-1)
MrCi	Minéralisation nette de résidus de culture intermédiaire
Mhp (jusqu'à n-2)	Minéralisation nette due à un retournement de prairie
MPro (n)	Minéralisation nette de l'azote organique d'un produit organique apporté en année n (année de récolte)
MPro(n-1)	Minéralisation nette de l'azote organique d'un produit organique apporté en année n-1
MPro (n-2)	Minéralisation nette de l'azote organique d'un produit organique apporté en année n-2
X	Apport d'azote sous forme d'engrais minéral de synthèse
Fs	Fixation symbiotique d'azote atmosphérique par la culture
Sorties	
Pf	Quantité d'azote absorbé par la culture à la fermeture du bilan (récolte)

Tableau 10 – Entrées et sorties d'azote prises en compte dans le Bilan Azoté Simplifié (BAS) pour les parcelles en culture

Pour les prairies et parcs

Le bilan azoté simplifié (BAS) sert d'indicateur de pression azotée sur la prairie.

Équation 2 – Equation du Bilan Azoté Simplifié (BAS) pour les prairies

$$BAS_{prairie} = [Fs + Mpro(n) + Mpro(n-1) + Mpro(n-2) + X + Nrest] - [Pf + Nexp]$$

Date d'ouverture : 1^{er} janvier

Date de fermeture : 31 décembre

⁷ MERCI : Méthode d'Estimation des éléments Restitués par les Cultures Intermédiaires

Entrées	
MPro (n)	Minéralisation nette de l'azote organique d'un produit organique apporté en année n (année de récolte)
MPro(n-1)	Minéralisation nette de l'azote organique d'un produit organique apporté en année n-1
MPro (n-2)	Minéralisation nette de l'azote organique d'un produit organique apporté en année n-2
X	Apport d'azote sous forme d'engrais minéral de synthèse
Fs	Fixation symbiotique d'azote atmosphérique par la culture
Nrest	Effet direct des restitutions animales
Sorties	
Pf	Quantité d'azote absorbé par la culture à la fermeture du bilan (récolte)
Nexp	Exportations par le pâturage

Tableau 11 – Entrées et sorties d'azote prises en compte dans le Bilan Azoté Simplifié (BAS) pour les parcelles en prairies et les parcs à volailles

2.6.2 Chargement

Pour les prairies et les parcs à volailles l'indicateur de chargement retenu est le nombre de jours UGB par ha et par an (NbJUGB/ha/an). C'est un indicateur de pression de pâturage dont une interprétation est donnée dans le Tableau 12, néanmoins il mériterait d'être adapté à la productivité de la parcelle. Sur le territoire, les prairies sur « argillette »⁸ ont généralement un faible potentiel du fait de leur forte sensibilité à la sécheresse, le surpâturage arrivera plus rapidement. A contrario, les parcelles de bas de vallons avec de forts potentiels pourront supporter un chargement beaucoup plus important.

NbJUGB/ha/an	Pression de pâturage
< 300	Pression faible
Entre 300 et 600	Pâturage adapté
Entre 600 et 900	Surpâturage
> 900	Parcelle « parking »

Tableau 12 – Référentiel de pression de pâturage en nombre de jours UGB par ha et par an

2.6.3 Lixiviation hivernale calculée (LHC)

La lixiviation Hivernale Calculée (LHC) est un indicateur construit à partir de l'équation générale des flux d'entrée et de sortie de l'azote en appliquant les mêmes simplifications que pour le Bilan Azoté Simplifié décrites aux paragraphes précédents. Il utilise également les mesures de reliquats azotés. Pour cet indicateur, la période retenue est le temps entre le reliquat post-récolte (RPR) et le reliquat sortie hiver (RSH). Les dates de prélèvement du RPR n'étant pas les mêmes pour toutes les parcelles (récolte tardive du maïs par exemple) le calcul se fait en deux temps : période entre le RPR et le REH (Reliquat Entrée Hiver) puis la période entre le REH et le RSH.

Équation 3 – Equation de la Lixiviation Hivernale Calculée

$$LHC = [RPR-REH] + [Mpro(n) + Mpro(n-1) + Mpro(n-2)] - [Pi] + [REH-RSH] + [Mpro(n) + Mpro(n-1) + Mpro(n-2)] - [Pi]$$

Date d'ouverture : RPR

Date de fermeture : RSH

Dans cette étude, la LHC n'est pas calculable pour les prairies. En effet, le fonctionnement des prairies est beaucoup plus complexe pour les postes de réorganisation de l'azote, ainsi que pour l'estimation de l'absorption d'azote par l'herbe (très variable d'une prairie à l'autre et d'une année à l'autre). Les données recueillies ne sont pas suffisamment précises pour appréhender ces postes.

⁸ Argillette : nom local donné au schiste incliné très dégradé

2.6.4 Résultats économiques

Afin de comparer la rentabilité des pratiques sur les parcelles en culture, nous utiliserons comme indicateur le pourcentage de charges opérationnelles par rapport au chiffre d'affaires. Comme pour les autres indicateurs, la totalité des charges et le prix de vente ne sont pas connus. Aussi des valeurs moyennes ont été utilisées, elles sont précisées en annexe 2. Les postes de charges pris en compte dans le calcul des indicateurs sont présentés dans le Tableau 13.

Postes de charges	Détails
Frais de mécanisation	Travail du sol
	Semis
	Epandage protection phytosanitaire
	Epandage fertilisation
	Récolte
Protection sanitaire	Herbicides + insecticides + fongicides+ autres
Coût fertilisation azotée	UN produit organique + UN produit minéral

Tableau 13 – Charges prises en compte dans le calcul de l'efficacité économique

3 Analyse des résultats

Un des objectifs de l'étude était la meilleure connaissance des pratiques des agriculteurs sur les AAC. Les données recueillies permettent d'en avoir une idée plus précise, elles sont présentées dans un premier temps. Dans un deuxième temps, nous présentons l'analyse du dispositif avec les bougies poreuses ce qui permettra de valider l'indicateur de lixiviation LHC. Enfin, les pratiques qui influencent la lixiviation du nitrate seront analysées.

3.1 Analyse des pratiques agronomiques

Le réseau de référence présente une grande diversité des pratiques culturales. C'est à la fois ce qui était recherché lors de la constitution du réseau, mais également une surprise tant les différences sont importantes. Les analyses portent sur les données ayant été le mieux renseigné par les agriculteurs, à savoir :

- Les rotations,
- Le travail du sol et le semis,
- La fertilisation azotée,
- La protection sanitaire,
- La couverture hivernale du sol et la gestion des intercultures,
- Les pratiques sur prairies.

3.1.1 Rotations

L'analyse des rotations prend en compte les données entre 2016 et 2020, les résultats sont présentés dans la Figure 17. Sur les 50 parcelles en culture du réseau, 45 sont assez bien renseignées ; pour les autres certaines données sont manquantes, une extrapolation à partir des données existantes a été réalisée.

On constate que, pour la grande majorité des parcelles, la rotation est courte. Ainsi, 26% des parcelles en culture ont une rotation de 2 ans (blé-maïs) que l'on retrouve classiquement dans les zones d'élevage. 20% des parcelles cultivées ont une rotation à 3 cultures réellement différentes (Maïs-Céréale à paille-Colza). C'est au total 76% des parcelles en cultures qui ont une rotation présentant 3 cultures ou moins. Seules 12 parcelles du réseau ont une rotation avec 4 cultures ou plus.

Figure 17 – Répartition du nombre de parcelles selon la rotation et l'occupation du sol

Parmi les céréales à paille, les deux espèces prédominantes sont le blé tendre d'hiver et l'orge d'hiver, le triticale est également présent. Les céréales à paille sont presque toujours des implantations d'automne. Le nombre de cultures de printemps dans la rotation est en moyenne de 1,4 pour 5 ans. 16 parcelles ont au minimum 1 culture avec des légumineuses (en pure ou associées), dans leur rotation à 5 ans ; ce qui représente seulement 35% des parcelles en culture.

Ces rotations courtes avec peu de légumineuses et de culture de printemps sont des systèmes gourmands en intrants pour la protection phytosanitaire et la fertilisation.

A noter :

- Des rotations assez différentes d'une parcelle à l'autre,
- Une majorité de parcelles avec une rotation courte à 2 ou 3 ans,
- Peu de cultures de printemps,
- Peu de légumineuses pour une zone d'élevage (autonomie protéique faible et dépendance à l'azote minérale).

3.1.2 Travail du sol et semis

Les pratiques concernant le travail du sol sont analysées sur 3 ans (2018,2019 et 2020), ainsi que sur les 39 parcelles en culture dont les données sont complètes. Les profondeurs de travail du sol n'ont pas pu être analysées car beaucoup de données étaient manquantes.

Là encore, les pratiques sont très différentes selon les agriculteurs. Une quinzaine de parcelles est conduite sans labour tous les ans (Figure 18), pour autant elles ne sont pas forcément toutes conduites en TCS (Technique de Culture Simplifiée), les autres parcelles suivent la tendance actuelle à l'abandon progressif du labour, notamment pour le semis d'automne des céréales à paille. Le labour avant maïs est encore bien présent. Pour autant, les parcelles labourées tous les ans représentent encore 20% du panel. Le passage d'une herse rotative avant l'implantation de la culture principale est systématique pour 60% des parcelles, sur les deux parcelles sans passage de herse rotative, une est en luzerne implantée avant le début de l'étude, l'autre est conduite en travail très simplifié du sol (dont semis directe).

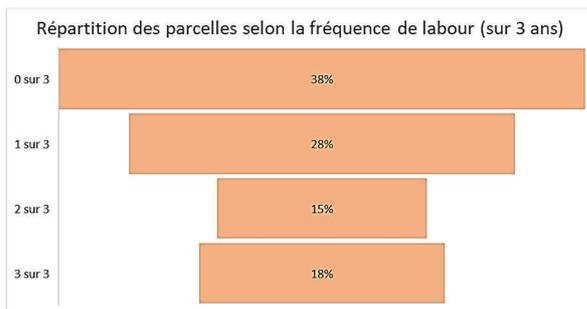


Figure 18 – Répartition des parcelles selon la fréquence de labour sur 3 ans

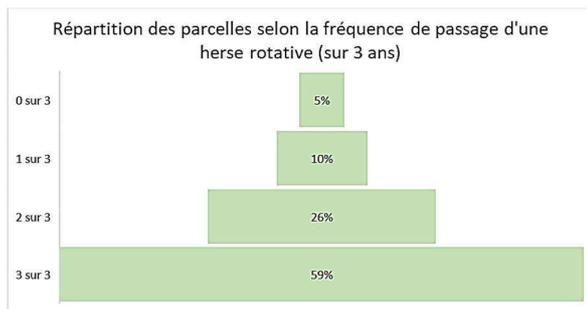


Figure 19 – Répartition des parcelles selon la fréquence de passage d'une herse rotative sur 3 ans

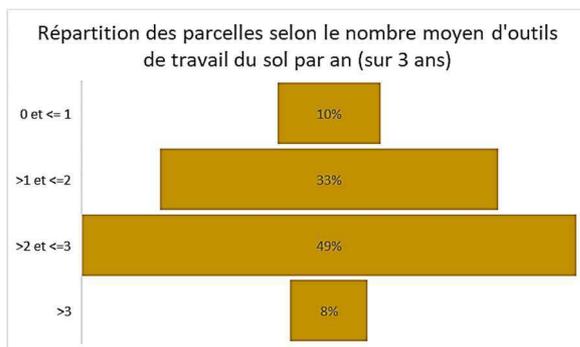


Figure 20 – Répartition des parcelles selon le nombre moyen d'outils de travail du sol par an (moyenne sur 3 ans)

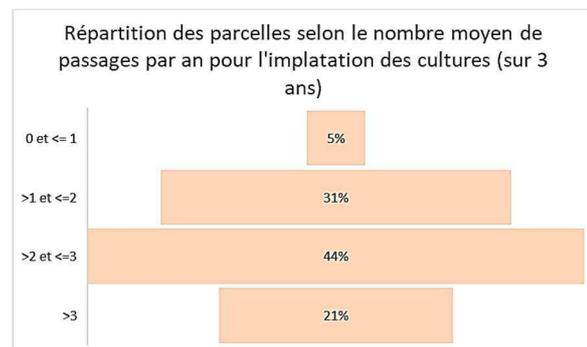


Figure 21 - Répartition des parcelles selon le nombre moyen de passages par an pour l'implantation d'une culture (moyenne sur 3 ans- dont gestion de l'interculture et semis)

Le nombre de passage moyen par an pour l'implantation des cultures ainsi que de la gestion de l'interculture (semis et destruction) se situe entre 2 et 3 passages. Seules 21% des parcelles sont concernées par 3 passages et plus. Cela reflète la tendance à l'utilisation de plusieurs outils en un seul passage (outils combinés). Lorsque l'on regarde le nombre d'outils de travail du sol utilisés par an, seules 10% des parcelles voient 1 outil au maximum. Un tiers des parcelles sont entre 1 et 2 outils par an et la moitié voient 2 à 3 outils de travail du sol.

A noter :

- Des pratiques variées, dont une parcelle en travail très simplifié,
- Une tendance à l'abandon du labour et à une simplification du travail du sol,
- Un usage important d'outils en combinés avec herse rotative.

3.1.3 Rendements

Rendement des parcelles en culture

L'analyse des rendements des parcelles du réseau pour les trois cultures principales (blé tendre d'hiver, maïs ensilage et colza d'hiver ; Tableau 14) montre une forte influence de l'année sur les rendements. En effet, les parcelles ont une profondeur de sol assez faible (50 cm en moyenne), ces sols sont posés sur une roche filtrante et les parcelles sont pour la plupart en pente ; toutes ces caractéristiques les rendent particulièrement sensibles à la sécheresse. Les trois années de l'étude ont été particulièrement chaudes à l'échelle nationale et régionale avec une sécheresse marquée en 2018 et 2020. En 2019, les cultures d'hiver n'ont pas souffert du manque d'eau et des deux vagues de canicule du fait d'une météorologie favorable au printemps. En revanche les cultures de printemps comme le maïs ont souffert du manque d'eau pour finir leur cycle.

Cultures	Nb P	Rdt moyen	Rdt France	Rdt mini	Rdt maxi
Blé TH 2020	11	53	68	40	67
Blé TH 2019	16	78	79	64	91
Blé TH 2018	19	63	70	42	80
Maïs ensilage 2020	10	8	12	5	12
Maïs ensilage 2019	9	9,22	11	7	12
Maïs ensilage 2018	3	11	12	9	15
Colza 2020	6	29	30	23	41
Colza 2019	2	38,5	31	38	39
Colza 2018	3	27	31	25	30

Tableau 14 – Rendements moyens des parcelles du réseau en fonction des années pour les principales cultures (blé tendre d'hiver (en qx), de maïs ensilage (en tMS) et de colza d'hiver (en qx))

Lors des années particulièrement sèches les chutes de rendement sont plus importantes sur le territoire d'étude qu'à l'échelle nationale.

Rendement des parcelles en prairies

Les parcelles fauchées ont des rendements assez faibles sur les 3 années de l'étude avec 4 tMS en 2018, 3,6 tMS en 2019 et 2,7 tMS en 2020. Cela est dû principalement à la conjonction de 2 facteurs. Le premier résulte du choix des agriculteurs de mettre en prairies les parcelles le moins productives pour garder les plus productives en culture. Ce sont des parcelles aux sols superficiels avec très peu de rétention d'eau. Cela conjugué au facteur de sécheresse sur les trois années est responsable du manque de production d'herbe. Sur les données on remarque une baisse progressive avec le temps qui confirme les constats de terrain d'un épuisement progressif des prairies.

A noter :

- Impact fort de la sécheresse sur les rendements
- Rendements légèrement inférieurs à la moyenne nationale

3.1.4 Fertilisation azotée

Pour cette étude, la fertilisation n'est étudiée que pour les apports d'azote car il impacte très fortement les risques de lixiviation du nitrate. Les apports d'autres éléments nutritifs (P, K, S...) n'ont pas été étudiés.

Sont présentés ci-après les chiffres pour les trois cultures principales (Tableau 15).

En termes de quantité d'azote, les pratiques présentent des différences notables, surtout lorsque l'on regarde les apports en matières organiques. Le blé (et autres céréales à paille) sont principalement

fertilisées par des apports minéraux. Les apports organiques sont utilisés pour la fertilisation du maïs et du colza. Néanmoins dans la majorité des cas, ces deux cultures bénéficient également d'apports minéraux en complément.

Les écarts entre les quantités minimum et les quantités maximum sont très importants, ce qui démontre des stratégies de fertilisation distinctes d'un agriculteur à l'autre. Il est à noter que certains agriculteurs ne respectent pas les quantités imposées par la directive nitrates.

Cultures	Nb P	Rdt moyen	Apport N tot moyen	Apport mini	Apport maxi	MO / culture	Nb apport moyen	min nb	maxi nb	Org + min	Balance moyenne
Blé TH 2020	9	53	118	0	214	1	2,1	0	4	1	4
Blé TH 2019	16	78	167	85	245	1	3	1	5	0	-27
Blé TH 2018	20	63	163	120	320	0	3	2	4	0	-7
Cultures	Nb P	Rdt moyen	Apport N tot moyen	Apport mini	Apport maxi	MO / culture	Nb apport moyen	min nb	maxi nb	Org + min	Balance moyenne
Maïs 2020	10	8	209	100	367	10	2,2	1	4	8	92
Maïs 2019	9	9,2	162	50	285	8	1,9	1	3	5	47
Maïs 2018	11	11	276	155	685	11	2,4	2	3	11	162
Cultures	Nb P	Rdt moyen	Apport N tot moyen	Apport mini	Apport maxi	MO / culture	Nb apport moyen	min nb	maxi nb	Org + min	Balance moyenne
Colza 2020	6	29	154	20	297	5	2,5	1	3	4	66
Colza 2019	2	38,5	122	58,5	186	1	1,5	1	2	1	-12
Colza 2018	5	27	263	180	350	5	2	1	3	4	150

Tableau 15 – Synthèse des apports sur culture d'azote pour les trois cultures principales

blé tendre d'hiver (q), maïs (tMS) et colza d'hiver (q) - Nb de P : nombre de parcelles, MO : Matières Organiques, Org + min : nombre de parcelles recevant la même année des apports sous formes organiques et minérales

La balance azotée moyenne (apports-exports) montre une tendance à la sur fertilisation du maïs et du colza alors que la fertilisation azotée du blé (et les autres céréales à paille) est bien ajustée.

Avec les données de cette étude, nous pouvons également regarder l'impact de la dose de fertilisation sur le rendement selon l'année (Tableau 16). Ainsi, en 2019, il n'y a pas de différence de rendement entre la parcelle qui reçoit le moins d'azote et celle qui en reçoit le plus, et ce pour les 3 cultures principales. C'est également le cas en 2018, sauf pour le blé. En revanche, en 2020 où les cultures ont été fortement impactées par le climat, les rendements sont légèrement inférieurs avec les doses d'azote minimum pour le maïs et le colza. En 2020 la dose minimum d'azote étant de zéro pour le blé l'effet de manque est très marqué sur cette parcelle.

Culture année de récolte	UN mini	Rdt N mini	UN maxi	Rdt N maxi
Blé TH 2020	0	15	214	66
Maïs 2020	100	8,5	367	9,5
Colza H 2020	20	23	297	29
Blé TH 2019	85	80	245	80
Maïs 2019	50	7	285	7
Colza H 2019	58	39	186	38
Blé TH 2018	120	53	320	65
Maïs 2018	155	7	685	7
Colza H 2018	180	35	350	35

Tableau 16 – Comparaison des rendements des trois principales cultures en dose d'apport d'azote minimale et maximale (blé tendre d'hiver (q), maïs (tMS) et colza d'hiver (q))

La conclusion de cette comparaison est que des doses importantes d'azote ne sont pas gages d'une amélioration notable des rendements, surtout dans des terres à faible potentiel de rétention hydrique. Il faut néanmoins être prudent quant à l'interprétation de ces données brutes puisqu'elles ne concernent que les doses d'azote apportées sur la culture et ne tiennent pas compte des arrière effets.

A noter :

- Des pratiques de fertilisation azotée disparates
- Des blés et des céréales à paille fertilisées principalement avec des apports azotés d'origine minérale
- Des apports parfois massifs de matières organiques avant maïs et colza

3.1.5 Protection sanitaire des cultures

Les IFT⁹ ont été calculés pour chaque parcelle sur la base des données de traitements des agriculteurs. Les IFT moyens des parcelles du réseau sont inférieurs aux moyennes des IFT régionaux (Tableau 17), quel que soit la culture. Blé, orge et colza ont des IFT autour de 3,3 dont presque la moitié sont des applications d'herbicides. Le maïs est à peine à 2 IFT, principalement des herbicides.

Cultures	IFT total	IFT PDL	IFT mini	IFT maxi	IFT H
Blé TH	3,3	4,9	1,2	5,2	1,5
Orge H	3,2	4,3	2,1	4,4	1,5
Maïs (ensilage et grain)	1,9	2,5	0,9	3,4	1,8
Colza	3,3	5,7	2,1	5,2	1,3
Prairie temporaire	0,44		0	1,8	0,44
Méteil	0		0	0	0

Tableau 17 – Moyennes des IFT sur trois ans par culture (hors AB)

IFT : Indicateur des Fréquence de Traitements, IFT PDL : moyenne des IFT en région Pays de la Loire pour l'année 2017 (source Statista), IFT H : IFT Herbicides

L'étude des IFT minimums et maximums montrent, là encore une grande disparité de stratégie de protection des cultures entre les agriculteurs.

A noter :

- Des IFT inférieurs à la moyenne régionale
- Une grande disparité des pratiques de protection des cultures entre les agriculteurs

3.1.6 Couverture hivernale du sol et gestion des intercultures

Aucune parcelle du réseau n'est laissée nue pendant l'hiver. La Régie des eaux des Coëvrons a mis en place depuis de nombreuses années une sensibilisation sur la couverture des sols auprès des agriculteurs avec un accompagnement pour le semis d'intercultures multi-spécifiques.

L'occupation hivernale précédant une culture de printemps se fait soit par des repousses de la culture (rare), soit par l'implantation d'intercultures (le plus souvent multi spécifiques) récoltées en fourrage ou non.

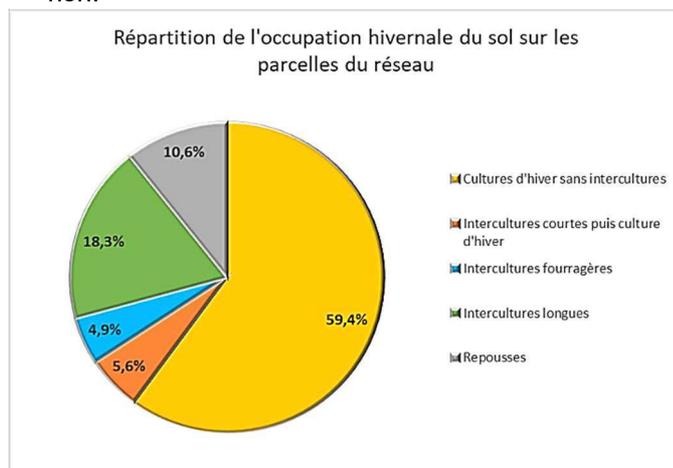


Figure 22 – Répartition de la couverture hivernale des sols (moyennes sur 3 hivers)

La répartition de ces différents modes est présentée dans la Figure 22.

La répartition est assez similaire d'une année à l'autre, de même que les dates d'implantation et les dates de destruction au printemps (Tableau 18). Si le nombre de parcelles avec des repousses est le même chaque année il ne s'agit pas pour autant des mêmes agriculteurs. La destruction des intercultures est essentiellement mécanique, généralement par des déchaumeurs à disques ou à dents. Certains agriculteurs essayent de nouvelles pratiques en semant 2 intercultures ou en essayant la mise en place d'intercultures courtes.

⁹ IFT : Indicateur de Fréquence de Traitements phytosanitaire

Hivers	Cultures d'hiver	Repousses	Intercultures semées	Date moyenne de semis	Date moyenne de destruction	Mode de destruction
2018/2019	25	5	17	15/08/2018	24/03/2019	Mécanique
	53,2%	10,6%	36,2%			
2019/2020	24	5	16	29/08/2019	28/03/2020	Mécanique
	53,3%	11,1%	35,6%			
2020/2021	33	5	8	26/08/2020	22/03/2021	Mécanique + 1 chimique
	71,7%	10,9%	17,4%			

Tableau 18 – Gestion des intercultures hivernales

A noter :

- Des sols couverts l'hiver
- Environ 1/3 des parcelles ont des intercultures multi-spécifiques semées
- Bonne dynamique de recherche sur les intercultures (double interculture et intercultures courtes)

3.1.7 Pratiques sur les prairies

Les 11 prairies du réseau se répartissent comme suit :

- 3 sont en parcelles de fauche uniquement et une seule est fertilisé (50 UN/ha),
- 2 sont des parcs à volailles utilisées par des élevages de poulets de chair selon le cahier des charge « poulets de Loué », un en agriculture biologique, l'autre en agriculture conventionnel. Les chargements peuvent paraître importants avec 22 UGB¹⁰/ha, mais d'une part les volailles sont conduites en bandes pendant des périodes d'1 mois et ½ à 2 mois avec un vide sanitaire de 2 mois (soit une présence la moitié de l'année seulement) ; et d'autre part une présence des volailles beaucoup importante au pied du poulailler qu'au fond des prairies.
- 1 parcelle pâturée dont les données ne sont pas assez fournies,
- 1 parcelle pâturée que l'on peut qualifier de « parking » pour les animaux : les vaches allaitantes sont présentes toute l'année avec un chargement très important (8 UGB/ha)
- 2 parcelles sont pâturées 7 à 8 mois de l'année (dont une est parfois fauchée en plus du pâturage)
- 2 parcelles sont menées en pâturage tournant (dont une est fauchée en plus du pâturage certaines années).

Les conduites sont donc assez variables ce qui permet d'étudier la plupart des cas présents sur le territoire.

3.2 Résultats et analyse des bougies poreuses

Pour toutes les parcelles ayant reçu un dispositif de bougies poreuses, le premier hiver manque de données à cause de la pose tardive du matériel. Néanmoins, l'automne n'ayant pas été très arrosé, il a été possible d'extrapoler certains résultats. L'extrapolation n'a pas été faite si les données ne permettaient pas d'avoir au moins 45% de la lame drainante. C'est le cas également pour d'autres parcelles les années suivantes. Pour les sols peu profonds et très filtrants, les bougies perdent en dépression et sont vides lors du relevé ; c'est pourquoi en dernière années certaines parcelles ont été abandonnées dans le dispositif. La quantité d'azote drainée de la parcelle est calculée par : la concentration en NO₃⁻ multipliée par le volume d'eau drainé.

¹⁰ UGB : Unité Gros Bétail

3.2.1 Analyse des bougies poreuses sur prairies

Sur les quatre prairies permanentes du dispositif « bougies poreuses », trois sont pâturées par des bovins (vaches allaitantes) dont une en pâturage tournant (P5) ; une est en parc à volailles. Sur cette dernière deux dispositifs sont installés : un en pied de poulailler et l'autre en milieu de prairie (partie plus basse en milieu de pente). Pour la parcelle P5, un essai BRF (Bois Raméal Fragmenté) a été réalisé en dernière année avec un apport de 5 cm de BRF sur une partie de la prairie et une bougie poreuse a été positionnée sur cet essai. Les résultats de la lixiviation du nitrate en fond de profil sont présentés dans le tableau ci-après.

Parcelles	P5-BRF	P5	P45	P56	P19-fond	P19-pied
Profondeur (cm)	30	30	90	90	90	30
Bassin	Ecrille	Ecrille	Houlberdière	Vaubourgueil	Moulin de Rousson	Moulin de Rousson
Hiver 2018/2019						
Occupation du sol		PP	PP	PP	Parc volailles	Parc volailles
Chargement (nbUGB/ha/an)		907	1178	nc	4840	4840
Début drainage estimé		27/11/18	04/02/19	15/12/18	19/12/18	11/11/18
Date de fin de drainage hivernal		15/03/19	20/03/19	18/03/19	15/03/19	15/03/19
Lame drainante totale (mm)		105	75	125	118	166
Nombre de mesure		5	4	4	8	4
% lame drainante mesurée		67%	100%	46%	97%	0%
Concentration moyenne NO3 (mg/l)		163	21	7	3	185
Lixiviation NO3 kg/ha		96	16	3	5	0
Lixiviation N kg/ha		22	4	1	1	0
EXTRAPOLATION Lixiviation N kg/ha		34	4	2	1	NE
Hiver 2109/2020						
Occupation du sol		PP	PP	PP	Parc volailles	Parc volailles
Chargement		470	1178	nc	1948	1948
Début drainage estimé		27/10/19	19/12/19	07/11/19	09/11/19	01/11/19
Date de fin de drainage hivernal		11/03/20	15/03/20	25/02/20	20/03/20	20/03/20
Lame drainante totale (mm)		339	185	407	252	294
Nombre de mesure		1	8	7	9	9
% lame drainante mesurée		34%	96%	89%	96%	96%
Concentration moyenne NO3 (mg/l)		19	2	4	6	159
Lixiviation NO3 kg/ha		NE	4	16	10	452
Lixiviation N kg/ha		14	1	4	2	102
EXTRAPOLATION Lixiviation N kg/ha		NE	1	4	2	102
Hiver 2020/2021						
Occupation du sol	PP (BRF)	PP	PP	PP	Parc volailles	Parc volailles
Chargement	185	185	1003	nc	4840	4840
Début drainage estimé	25/10/20	25/10/20	27/12/20	21/12/20	03/02/21	28/12/20
Date de fin de drainage hivernal	15/02/21	15/02/21	25/02/21	25/02/21	20/02/21	20/02/21
Lame drainante totale (mm)	198	198	80	89	94	94
Nombre de mesure	9	9	4	3	4	4
% lame drainante mesurée	97%	97%	100%	100%	100%	100%
Concentration moyenne NO3 (mg/l)	100	41	5	14	6	366
Lixiviation NO3 kg/ha	233	89	6	13	7	357
Lixiviation N kg/ha	53	20	1	3	1	81
EXTRAPOLATION Lixiviation N kg/ha	54	21	1	3	1	81

Tableau 19 – Résultats des bougies poreuses sous prairies permanentes et parc à volailles
NE : Non Exploitable – PP : Prairie Permanente

Une approche globale des résultats montre des pertes d'azote hétérogènes sur les prairies permanentes pâturées par les bovins. La parcelle P45 qui a le chargement le plus important a très peu de pertes. Cela peut s'expliquer par la nature du sol qui est un sol profond où la pousse de l'herbe est

abondante, même en période de sécheresse. La pression de pâturage est donc bien adaptée à la production d'herbe. En revanche, la prairie P5 est une prairie en pente forte posée sur un sol très peu profond et filtrant ; cela explique qu'avec un chargement faible la présence des animaux génère quelques fuites d'azote non négligeables (concentration moyenne de 163 mg/l de nitrate sur l'hiver 2018/2019). La diminution du chargement a permis de diminuer ces fuites sur l'hiver 2020/2021.

Pour l'essai BRF, il semble que la quantité épandue a été trop importante ce qui a entraîné la destruction de la flore et par le fait généré de la lixiviation.

En ce qui concerne le parc à volailles, les pertes d'azote sont quasi négligeables sur le milieu de la prairie, là où l'herbe est abondante. En revanche, les fuites sont, sans surprise, beaucoup plus importantes en pied de poulailler où l'herbe est inexistante. Néanmoins les valeurs restent inférieures à certaines parcelles cultivées, comme nous le verrons par la suite.

Les relevés des concentrations du nitrate dans les bougies poreuses permettent d'établir des diagrammes et de suivre ainsi l'évolution dans le temps. Tous les diagrammes ne sont pas explicites du fait du manque de données. Sont présentés en Figure 23 les diagrammes pour les deux derniers hivers de la prairie P45.

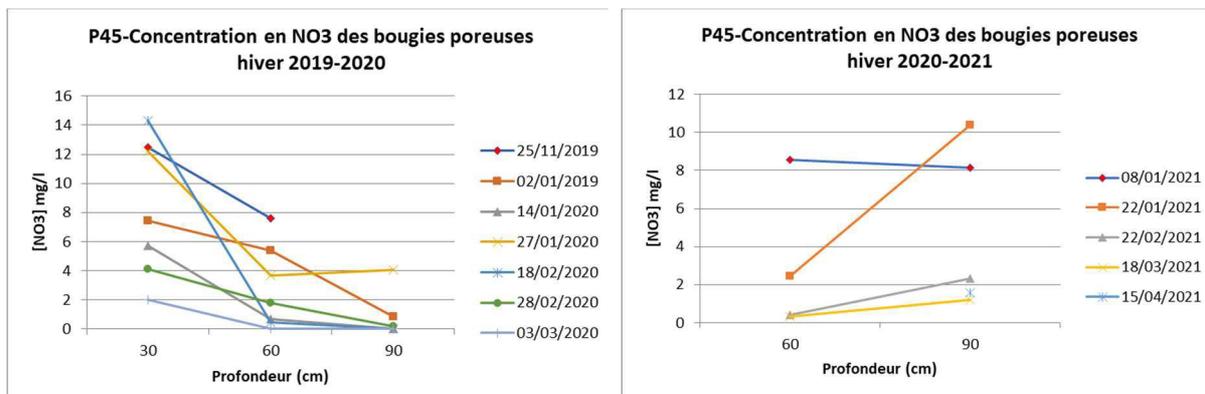


Figure 23 – Diagrammes des concentrations en nitrate des bougies poreuses pour la prairie P45 sur les hivers 2019/2020 et 2020/2021

Il s'avère tout d'abord que les concentrations sont faibles (maximum 15 mg/l de NO₃). Pour l'hiver 2019/2020, on voit nettement la diminution progressive des teneurs en nitrate au fil du temps avec toutefois une concentration qui reste plus élevée en haut de profil qu'en fond de profil. On peut même noter une remontée de la concentration en nitrate fin janvier en haut de profil qui pourrait s'expliquer par un pic de minéralisation (légère remontée des températures). Pour l'hiver 2020/2021, la mesure du 22 janvier montre une chute de concentration en haut de profil et une hausse en fond de profil qui permettent de visualiser la migration du nitrate par lixiviation du fait des fortes pluies de fin décembre-début janvier.

A noter :

- Très peu de fuite d'azote lorsqu'il n'y a pas de surpâturage
- La prairie sur sol peu profond et filtrant est beaucoup plus sensible au surpâturage et à la lixiviation du nitrate, la diminution du chargement permet de réduire les fuites
- Le parc à volailles n'a généré des fuites d'azote qu'en pied de poulailler

3.2.2 Analyse des bougies poreuses sur cultures

Au total sur les trois hivers, huit parcelles en cultures ont bénéficié du dispositif des bougies poreuses. Pour trois parcelles les résultats ne sont pas exploitables (P41, P46 et P60). Trois parcelles ont pu être

suivies sur les trois hivers. P4 et P51 font parties des parcelles avec des essais menés par Cerfrance¹¹ et la REC. Des bougies ont été posé sur les trois bandes :

- BT = bande témoin (itinéraire technique habituel de l'agriculteur)
- R = bande avec le protocole « Régénération »
- R+ = bande avec le protocole « Régénération + »

Les protocoles des bandes R et R+ sont ajustés en fonction des besoins des parcelles relevés par des analyses (cf. Compte rendu de l'essai – document à part de ce rapport).

Les parcelles P4 et P18 sont conduites en agriculture biologique.

La synthèse des résultats est présentée dans le Tableau 20. Le Tableau 21 présente une synthèse avec les données d'occupation du sol et de fertilisation à des fins d'analyse.

	P4-BT (AB)	P4-R (AB)	P4-R+ (AB)	P10	P18 (AB)	P51-BT	P51-R	P26
Profondeur (cm)	60	90	90	90	60	60	60	90
Bassin	Ecrille	Ecrille	Ecrille	Grand Rousson	Grand Rousson	Tertre-Suhard	Tertre-Suhard	Vaubourgu eil
Hiver 2018/2019								
Occupation du sol				Blé TH - Orge H	Méteil - IC courte - Orge Pt			Triticale - PT1
Début drainage estimé				03/12/18	01/12/18			19/12/18
Date de fin de drainage hivernal				15/03/19	15/03/19			18/03/19
Lame drainante totale (mm)				149	166			124
Nombre de mesure				9	6			5
% lame drainante mesurée				100%	69%			53%
Concentration moyenne NO3 (mg/l)				59	42			95
Lixiviation NO3 kg/ha				145	38			96
Lixiviation N kg/ha				33	9			22
EXTRAPOLATION Lixiviation N kg/ha				33	14			34
Hiver 2109/2020								
Occupation du sol	Méteil - PT	Méteil - PT	Méteil - PT	Orge H - IC longue	Feverolle - IC courte - Orge Pt	Blé Th - IC longue	Blé Th - IC longue	PT2
Début drainage estimé	03/11/19	15/11/19	15/11/19	01/11/19	01/11/19	01/11/19	01/11/19	08/11/19
Date de fin de drainage hivernal	11/03/20	11/03/20	11/03/20	20/03/20	20/03/20	25/02/20	25/02/20	25/02/20
Lame drainante totale (mm)	288	236	236	294	294	436	436	402
Nombre de mesure	3	6	8	7	8	6	6	5
% lame drainante mesurée	58%	98%	100%	80%	80%	83%	83%	87%
Concentration moyenne NO3 (mg/l)	61	79	90	10	48	13	8	34
Lixiviation NO3 kg/ha	108	204	208	22	113	60	37	143
Lixiviation N kg/ha	24	46	47	5	26	13	8	32
EXTRAPOLATION Lixiviation N kg/ha	41	47	47	6	32	16	10	36
Hiver 2020/2021								
Occupation du sol				Maïs - Blé TH	PT1	Maïs - Blé TH	Maïs - Blé TH	PT3
Début drainage estimé				01/12/20	18/11/20	10/12/20	01/12/20	21/12/20
Date de fin de drainage hivernal				20/02/21	20/02/21	25/02/21	25/02/21	25/02/21
Lame drainante totale (mm)				107	126		222	
Nombre de mesure				5	6	1	5	1
% lame drainante mesurée				100%	100%		100%	80%
Concentration moyenne NO3 (mg/l)				540	33		129	144
Lixiviation NO3 kg/ha				619	49		285	92
Lixiviation N kg/ha				140	11		64	21
EXTRAPOLATION Lixiviation N kg/ha				140	11		64	26

Tableau 20 – Résultats des bougies poreuses sous parcelles cultivées

En gras l'occupation du sol lors des prélèvements – IC : Interculture – PT : Prairie Temporaire

¹¹ Cerfrance est un organisme de conseil et d'expertise comptable qui mène également des actions de conseils techniques.

		Récolte 2018	Hiver	Récolte 2019	Hiver	Récolte 2020	Hiver	
P4	Occupation du sol	Orge P		Méteil		Méteil		
		N total (UN)	28		62		87	
	Fertilisation azotée	Norg (UN)	28	IC courte	62	Méteil	87	PT1
		Nmin (UN)	0		0		0	
		Bilan azoté (UN)	-7,5		0		-107	
	Pertes N	[NO3-] moyenne en mg/l				61		
N en kg/ha					41			
P10	Occupation du sol	Blé TH		Orge H		Mais ens		
		N total (UN)	186		130		128	
	Fertilisation azotée	Norg (UN)	50	Orge H	80	IC longue	128	Blé TH
		Nmin (UN)	136		50		0	
		Bilan azoté (UN)	-1,5		-64		98,75	
	Pertes N	[NO3-] moyenne en mg/l		59		10		540
N en kg/ha			33		6		140	
P18	Occupation du sol	Méteil		Féverole		Orge p		
		N total (UN)	0		56		0	
	Fertilisation azotée	Norg (UN)	0	IC courte féverole	56	IC courte	0	PT1
		Nmin (UN)	0		0		0	
		Bilan azoté (UN)	25,8		118		3,6	
	Pertes N	[NO3-] moyenne en mg/l		42		48		33
N en kg/ha			14		32		11	
P26	Occupation du sol	Triticale		PT1		PT2		
		N total (UN)	111		120		128	
	Fertilisation azotée	Norg (UN)	0	PT1	120	PT2	128	PT3
		Nmin (UN)	111		0		0	
		Bilan azoté (UN)	37		-67		-52	
	Pertes N	[NO3-] moyenne en mg/l		95		34		144
N en kg/ha			34		36		92	
P51	Occupation du sol	Colza H		Blé TH		Mais ens		
		N total (UN)	314		180		220	
	Fertilisation azotée	Norg (UN)	165	Blé TH	0	IC longue	220	Blé TH
		Nmin (UN)	149		180		0	
		Bilan azoté (UN)	116		4		-69,5	
	Pertes N	[NO3-] moyenne en mg/l				13		129
N en kg/ha					16		64	

Tableau 21 – Analyse des résultats des bougies poreuses pour les parcelles en culture aux regards de l'occupation du sol et de la fertilisation azotée

PT : Prairie temporaire suivi du nombre d'année – [NO3-] : concentration sous racinaire moyenne

Les concentrations de nitrate en fond de profil et les pertes d'azote les plus importantes correspondent aux facteurs suivants :

- Occupation hivernale : blé,
- Précédant cultural : maïs,
- Fertilisation organique sur la culture qui précède l'hiver.

Et ce, quel que soit la valeur du bilan azoté de la culture précédant l'hiver. Cette situation se retrouvera confirmé sur de nombreuses parcelles par les analyses réalisées avec l'indicateur de lixiviation.

Les concentrations de nitrate en fond de profil et les pertes d'azote les plus faibles correspondent aux parcelles occupées pendant l'hiver d'intercultures (longues ou courtes).

La parcelle P10 est un bon exemple de cette situation comme le montre la Figure 24. Cette parcelle a un sol sableux assez profond, elle est travaillée sans labour et les matières organiques épandues sont des lisiers de porc.

Le premier hiver, les concentrations en haut de profil sont assez importants (entre 20 et 40 mg/l) mais beaucoup plus faibles que les concentrations en fond de profil (de 60 à 120 mg/l). Cela indique une migration du nitrate vers le bas car peu retenu par la culture en place (orge) et ce malgré un bon ajustement de la fertilisation azotée du blé en précédent. Lorsque l'on remonte en n-2 on constate qu'il y a eu une sur-fertilisation du colza (+60 UN), fertilisé avec du lisier de porc également. Il est tout à fait possible qu'il y ait eu une accumulation d'azote dans les horizons entre 60 et 90 cm pendant la culture du blé. L'année suivante, on note une sous fertilisation apparente liée au bon rendement de l'orge. Le couvert multi-spécifique a très bien joué son rôle dans la rétention de l'azote excédentaire (RSH de plus de 40UN). Le diagramme des bougies poreuses montre une lixiviation progressive mais faible pendant l'hiver. Par ailleurs il y a peu de différentiel de concentration entre le haut et le fond du profil. Pour la dernière année de l'étude, les apports azotés ont été bien raisonnés pour la fertilisation du maïs ensilage, mais la parcelle étant très sèche et l'année particulièrement aride, le maïs n'a pas fait le rendement escompté. L'hiver la parcelle perd les 100 UN excédentaires + le RSH (40 UN), soit 140 UN.

A l'hiver 2020/2021, le blé ne capte que très peu d'azote sur la saison hivernale et l'azote excédentaire est lixivié sous forme de nitrate.

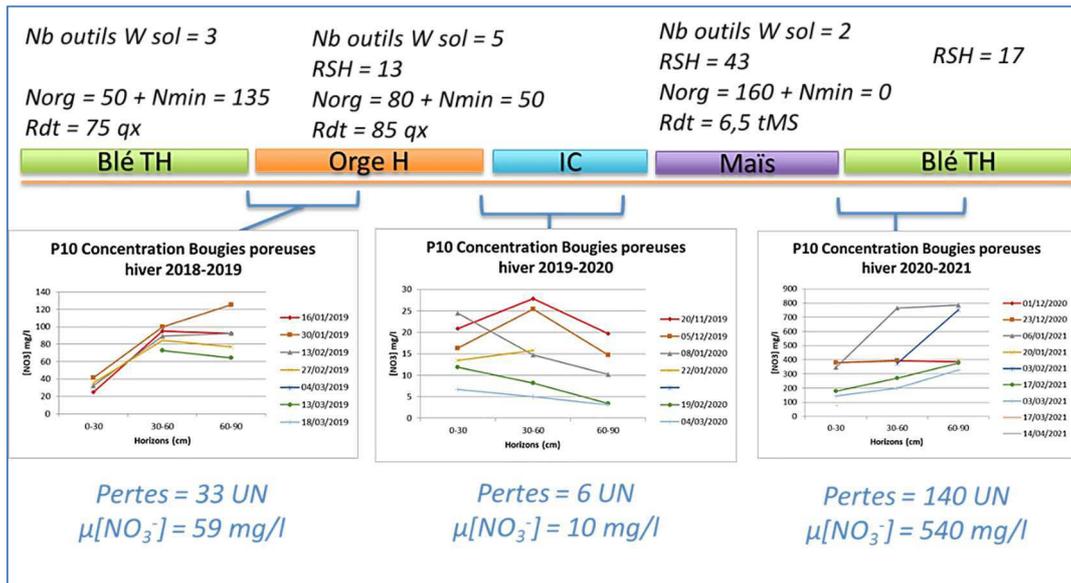


Figure 24 – Comportement de la parcelle P10 par rapport à la lixiviation de nitrate pendant l'hiver

A noter :

- Les intercultures montrent leur efficacité pour la rétention du nitrate
- Les pertes les plus importantes sont liées principalement à deux facteurs : la fertilisation organique de plus de 100 UN sur la culture précédente une céréale à paille d'hiver

3.3 Résultats et analyses des reliquats azotés

Les reliquats sont des « instantanés » de la teneur en azote minéral de la solution du sol à un instant t. Cette technique est un bon indicateur agronomique de la quantité d'azote disponible pour la plante à court terme (ion nitrate, NO₃⁻) ou à moyen terme (ion ammonium, NH₄⁺). Ainsi, les analyses ne donnent pas la quantité totale d'azote de la parcelle. En effet, le cycle de l'azote est complexe et fait entrer des composantes organiques et biologiques (cf. §1.3). Néanmoins, l'évolution dans le temps des reliquats peut donner des informations sur le comportement de la parcelle vis-à-vis de l'azote.

Les résultats ne peuvent pas être présentés parcelle par parcelle dans ce rapport, mais ils sont présentés dans les fiches parcellaires qui ont été remises aux agriculteurs où chaque résultat est interprété au regard des cultures, des pratiques culturales et de l'année. De même, on s'aperçoit que des analyses statistiques simples tels que moyenne, écart type, médiane... ne sont pas interprétables compte tenu de la diversité des situations.

Les graphiques ci-dessous présentent l'intégralité des résultats des analyses de reliquats pour les trois saisons de l'étude.

Concernant le graphique pour les prairies, la parcelle de référence est une parcelle appartenant à un particulier, ne recevant aucune fertilisation ni aucun pâturage, seul une récolte de foin est réalisée. Un deuxième point de référence d'un milieu très peu anthropisé est positionné en forêt.

Une première comparaison entre les parcelles cultivées et les parcelles en prairies montre que les valeurs maximales exceptionnelles sont plus importantes en parcelles cultivées (environ 300 kgN/ha) qu'en milieu de prairie ou de forêt (165 et 135 kgN/ha). De plus, si pour les parcelles cultivées, le pic de reliquats est mesuré en été/automne après la récolte, le pic de reliquats sur les prairies se situe à l'entrée de l'hiver. Cela s'explique par un fonctionnement naturel de minéralisation pendant l'automne sur prairie avec peu de pertes par lixiviation précoce. Pour les parcelles cultivées, en revanche, la minéralisation des produits organiques a bien lieu en automne mais l'azote est entraîné par les pluies a. Au printemps,

il est difficile d'interpréter la baisse des reliquats sur prairie. En effet, soit il y a eu lixiviation pendant l'hiver, soit la pousse de l'herbe, particulièrement précoce pendant les années de l'étude, a permis d'absorber l'azote contenu dans la solution du sol.

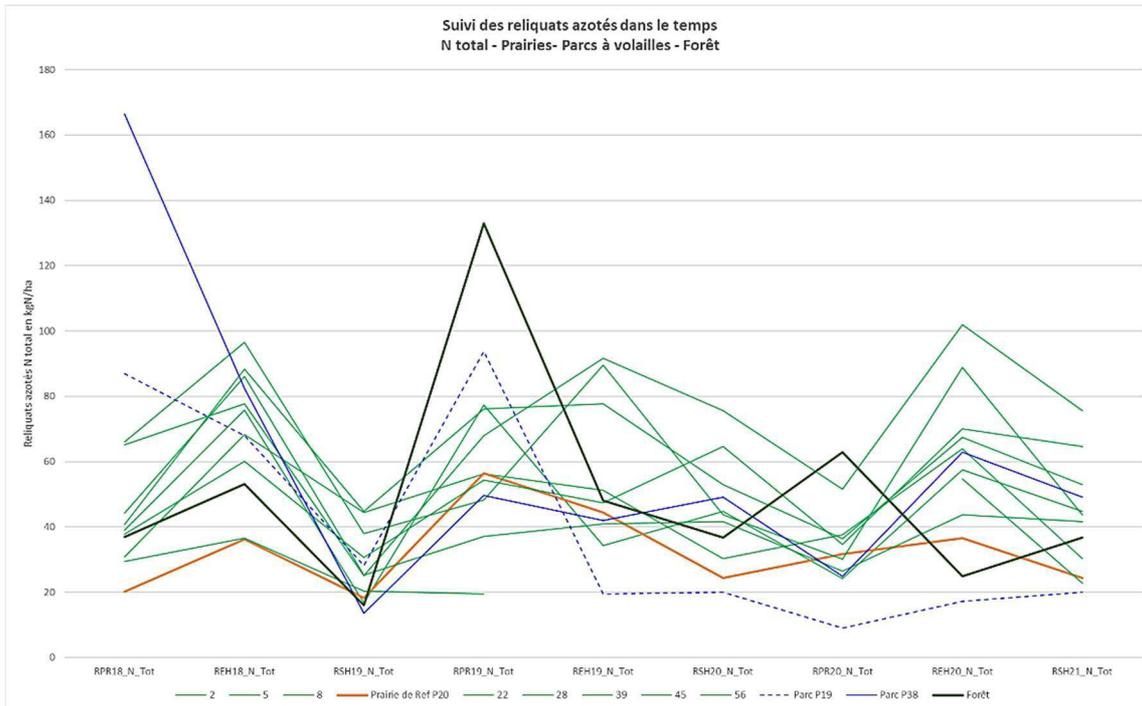


Figure 25 – Résultats des analyses de reliquats azotés pour les prairies, parcs à volailles et forêt

Le comportement des reliquats de la forêt pose question, surtout pour la valeur très élevée du RPR 2019. Mais pour les autres données, il est intéressant de voir une fluctuation beaucoup plus importante en forêt que pour les prairies en herbe. Aux vues de ces résultats, il n'est pas exclu que cette forêt posée sur un sol peu profond et filtrant contribue à l'alimentation de la ressource en eaux en nitrate.

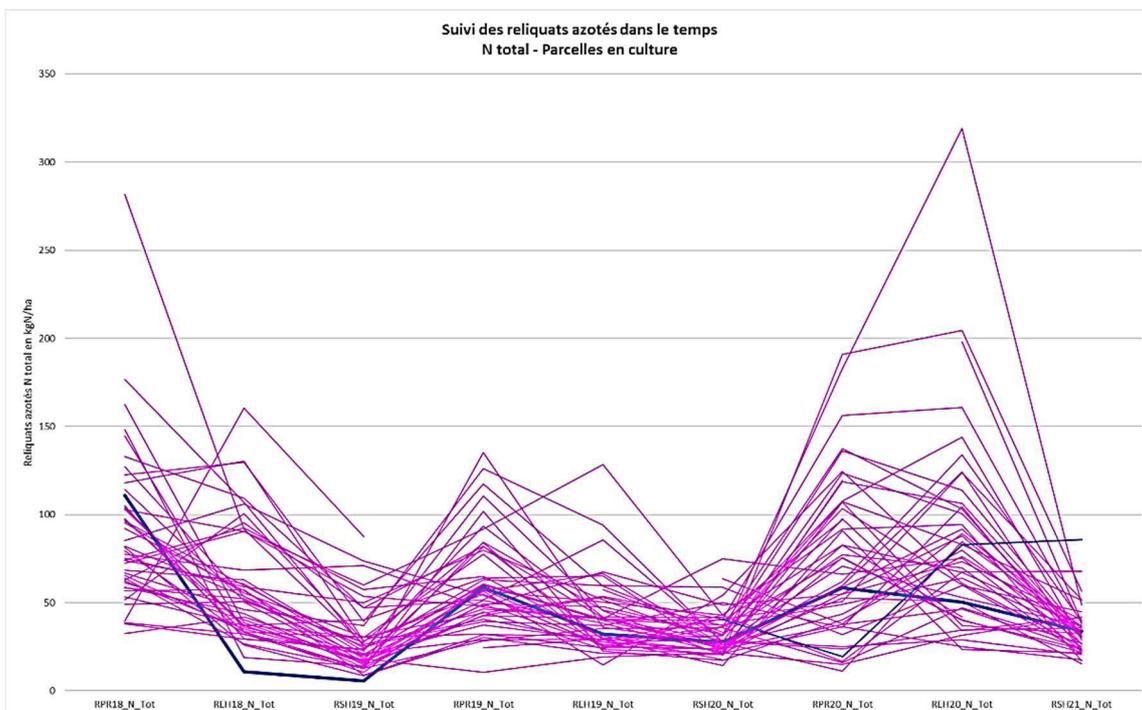


Figure 26 – Résultats des analyses de reliquats azotés pour les parcelles cultivées (en bleu les parcelles ne recevant aucun apport de matières organiques)

Pour les parcelles en cultures on voit qu'une grosse partie des parcelles ont un fonctionnement commun avec des RPR généralement plus élevées que les REH et encore une perte au moment du RSH. Les valeurs par contre sont variables d'une année à l'autre et d'une parcelle à l'autre. En revanche, certaines parcelles ont un comportement plus proche des prairies avec un maximum de reliquats à l'entrée de l'hiver, ce qui témoigne d'une minéralisation des matières organiques à l'automne. Les deux parcelles du réseau fertilisées uniquement avec de l'azote minéral sont conduites avec une bonne adéquation entre les besoins de la culture et les apports. Néanmoins, on constate une variation assez importante des reliquats avec des RPR autour de 60 kgN/ha, voir plus de 100 kgN/ha certaines années.

S'ils sont difficilement interprétables dans leur globalité, les analyses de reliquats permettent de calculer un indicateur de lixiviation, la LHC (Lixiviation Hivernale Calculée) dont les résultats et l'analyse sont présentées dans les paragraphes suivants.

A noter :

- Variabilité des reliquats selon les années et selon les parcelles
- Des REH plus élevés que les RPR pour les prairies du fait de la minéralisation automnale des matières organiques
- Des REH souvent moins élevés que les RPR dans les parcelles cultivées du fait de la lixiviation précoce

3.4 Résultats et analyses de la lixiviation hivernale calculée pour les parcelles en cultures

L'indicateur de lixiviation proposé dans cette étude prend en compte le différentiel de teneur en azote de la solution du sol entre la récolte et la sortie de l'hiver ainsi que l'absorption de l'azote par la couverture du sol (culture ou interculture) et les principaux postes de minéralisation des matières organiques. Les détails de calcul de la LHC (Lixiviation Hivernale Calculée) sont présentés dans le paragraphe 2.6.3. La LHC n'est pas calculable pour les prairies (manque de données et de références).

3.4.1 Validation de l'indicateur LHC

Avant d'analyser à l'aide de la LHC les facteurs qui influencent la lixiviation du nitrate, il convient de vérifier la robustesse de cet indicateur. Pour ce faire, nous comparons la LHC avec les mesures des bougies poreuses, données factuelles de mesures de lixiviation.

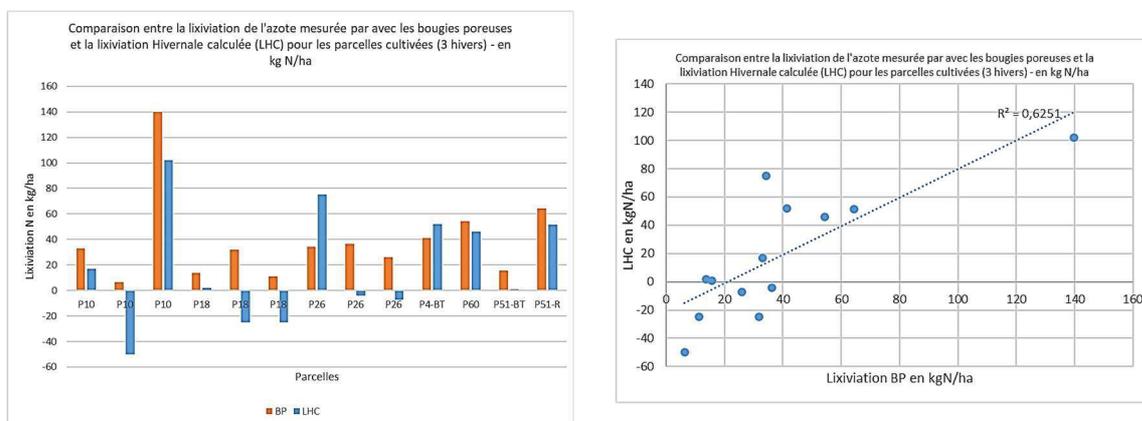


Figure 27 et Figure 28 – comparaison entre la lixiviation d'azote mesurée par les bougies poreuses et la lixiviation hivernale calculée (LHC)

L'indicateur LHC montre une assez bonne fiabilité compte tenu des imprécisions de calcul, les plus importantes étant :

- Pour la LHC
 - o Teneur réelle de effluents en azote
 - o Coefficients de minéralisation des effluents
 - o Absorption de l'azote par les plantes en interculture
- Pour les bougies poreuses
 - o Réserve utile des sols
 - o Evapotranspiration

A noter :

- Validation de l'indicateur de lixiviation (LHC)

3.4.2 Lixiviation précoce

Une des premières analyses que l'on peut faire de cet indicateur est de comparer la lixiviation des 3 hivers de l'étude.

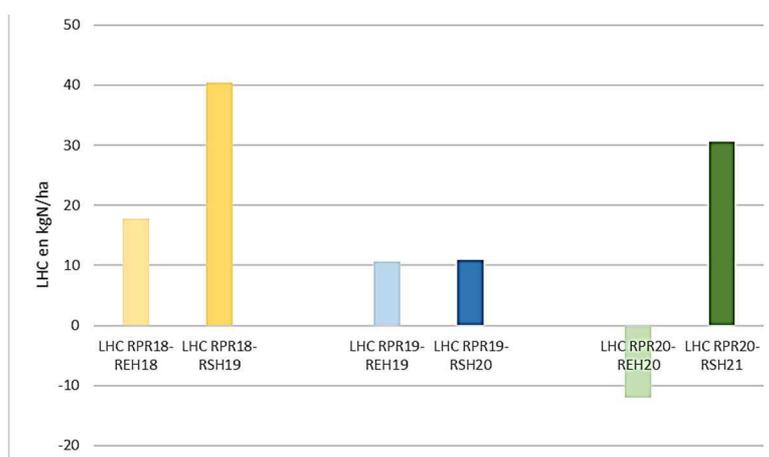


Figure 29 – Comparaison de la LHC entre la récolte et l'entrée de l'hiver (LHC PRP-REH) avec la LHC totale (LHC RPR-RSH)

Hivers	18/19	19/20	20/21
Date de début drainage	Fin novembre	Fin octobre à mi-novembre	Début à mi-décembre

La comparaison entre la lixiviation précoce, période de la récolte au prélèvement d'entrée hiver (début décembre), et la lixiviation sur la période hivernale montre une grande disparité des situations selon les années. Le premier hiver, la lixiviation précoce représente environ la moitié de la lixiviation hivernale. Le deuxième hiver c'est presque la totalité des lixivias qui sont observés entre la récolte et le début du mois de décembre. Enfin, le dernier hiver de l'étude, entre la récolte et le début du mois de décembre, on observe une minéralisation des matières organiques avec peu de lixiviation, la lixiviation intervient plus tardivement. Le facteur explicatif est le climat avec en premier lieu la pluviométrie.

A noter :

- Grande variabilité sur les trois ans de la date de début drainage
- Une lixiviation automnale qui peut aller jusqu'à la totalité de la lixiviation de l'année

3.4.3 Comparaison des bassins d'alimentation

Dans le graphique suivant, sont présentés les résultats de lixiviation et de concentration sous racinaire pour les 8 aires d'alimentation de captages. La concentration sous racinaire théorique est calculée à partir de la LCH et de la pluie efficace (pluviométrie-ETP) sur les quatre grands secteurs.

Figure 30 – Lixiviation hivernale calculée (LHC) et Concentration en nitrate sous racinaire estimée pour les huit captages, moyennes sur 3 hivers

On trouve une différence significative entre les aires d'alimentation de Tertre-Suhard et de Vaubourgueil, aussi bien pour la LHC que pour la concentration sous racinaire, qui va dans le sens opposé de la concentration en nitrate des captages (32 mg/l pour Tertre-Suhard et 49 mg/l pour Vaubourgueil. Aucune différence significative n'apparaît entre les autres captages alors que de différences de concentration dans les eaux existent bel et bien.

Le panel des parcelles du réseau de référence ne permet ni de faire des différences entre les aires d'alimentation des captages, ni de donner des facteurs explicatifs sur les différences de concentration aux captages.

A noter :

- Pas de comparaisons possibles entre les captages pour cette étude

3.4.4 Influence du RPR sur la LHC

Le reliquat post récolte (RPR) est souvent utilisé pour prédire le risque de lixiviation du nitrate. Dans cette étude, la comparaison entre les RPR et la LHC montre une corrélation plus ou moins puissante selon les années. Pour l'hiver 2018/2019, le coefficient de régression R^2 est de 0,57 proche de celui de l'hiver 2019/2020, 0,54 ; la meilleure corrélation étant obtenue pour l'hiver 2020/2021 avec $R^2=0,76$ (Figure 31, Figure 32 et Figure 33). Pour les trois hivers le coefficient de corrélation est de 0,65 (Figure 34).

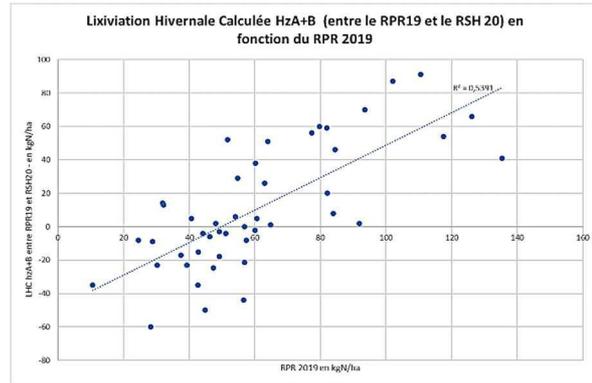


Figure 32 - Comparaison entre le RPR et la LHC hiver 2019/2020

Figure 31 – Comparaison entre le RPR et la LHC hiver 2018/2019

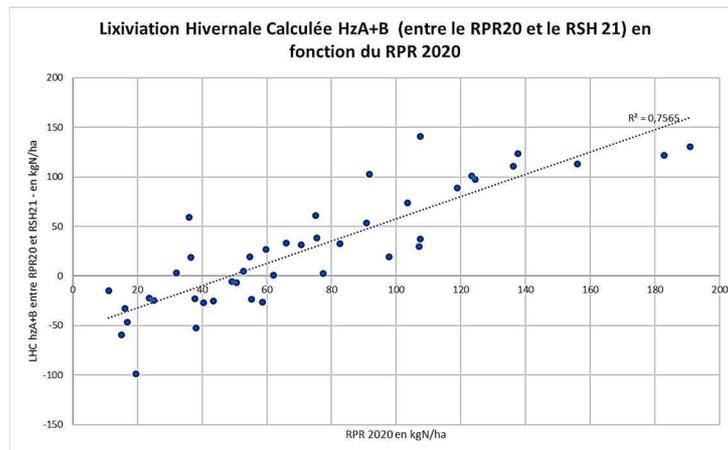


Figure 33 - Comparaison entre le RPR et la LHC hiver 2020/2021

Il existe donc bien un lien assez fort entre le RPR et le risque de lixiviation. D'après la droite de régression pour les 3 hivers, un RPR de 100UN donnerait une lixiviation de 50 UN, soit une concentration sous racinaire allant de 80 à 150 mg/l selon la pluviométrie des secteurs d'étude.

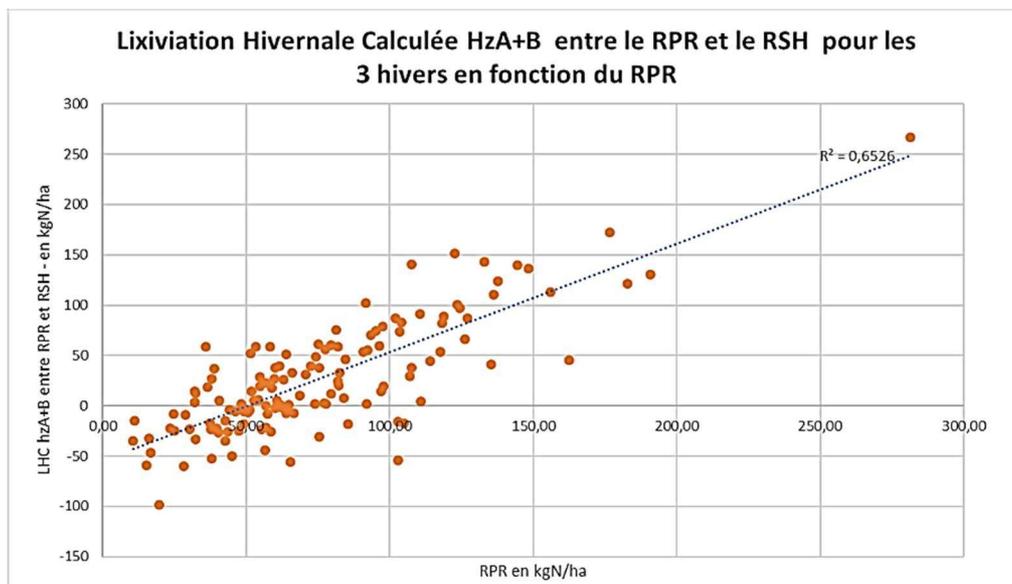


Figure 34 - Comparaison entre le RPR et la LHC pour les 3 hivers

Néanmoins, il est intéressant de noter que certaines parcelles avec de forts RPR (entre 50 et 60 UN) présentent des LHC autour de zéro. De même, des parcelles avec des RPR entre 30 et 40 UN peuvent

avoir une lixiviation autour de 50 UN. Ce qui veut dire que certaines parcelles sont capables de retenir l'azote pendant la période hivernale et d'autre ne retiennent pas du tout l'azote. Les analyses suivantes permettront de voir si l'on peut trouver des explications à ces fonctionnements opposés vis-à-vis de l'azote.

De plus, en regardant dans le détail les parcelles, on s'aperçoit que les parcelles ne sont pas positionnées au même niveau d'une année à l'autre. Schématiquement, les parcelles à fort RPR et forte LHC sont majoritairement des parcelles en précédant maïs ou colza. Les parcelles à l'opposé, c'est-à-dire les parcelles avec de faibles RPR et de faibles LHC sont des parcelles avec un précédant en céréale à paille.

Aux vues des résultats, et dans le contexte de l'étude, il apparait qu'un RPR au-dessus de 60 UN peut être considéré comme un risque fort de fuite d'azote au-delà des 50 mg/l de concentration sous racinaire. De même si la LHC est supérieure à 25 kgN/ha il y a un risque d'avoir une concentration sous racinaire supérieure à 50 mg/l de nitrate.

A noter :

- Corrélation assez forte entre RPR et LHC
- Mise en évidence de parcelles aux profils azote différents
- Des parcelles au profil azote différent d'une année sur l'autre
- Un seuil de RPR à 60UN au-delà duquel les risques de lixiviation sont forts

3.4.5 Influence de la profondeur de sol et de sa texture sur la LHC

Comme nous l'avons vu au § 1.3, les mécanismes en jeu dans la lixiviation de l'azote font intervenir le sol dans toutes ses composantes. La composante biologique n'a pas pu être explorée dans cette étude, néanmoins nous avons pu récupérer des données de profondeur et de texture du sol. La profondeur est donnée par la profondeur moyenne des prélèvements de reliquats pour chaque parcelle. La texture nous est fournie par trois voies : les analyses de sol fournies soit par certains agriculteurs soit par le LARCA (parcelles avec bougies poreuses), les dires des agriculteurs et la cartographie pédologique fournie par Geomayenne. Malgré tout, certaines parcelles ne possèdent pas de données suffisamment fiables pour entrer dans les analyses. C'est pourquoi le nombre de parcelles prises en compte est mentionné dans les tableaux de résultats.

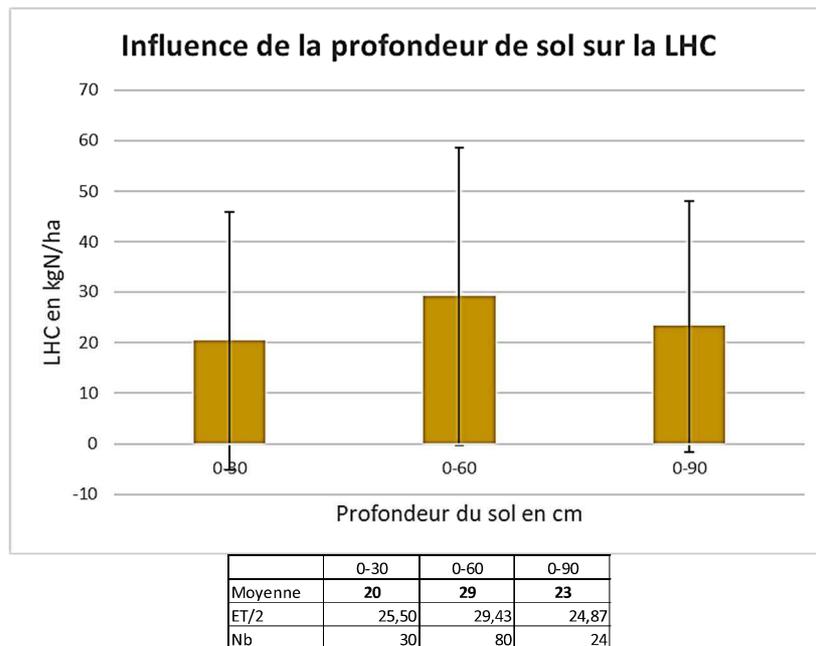


Figure 35 – Influence de la profondeur du sol sur la LHC pour 3 hivers

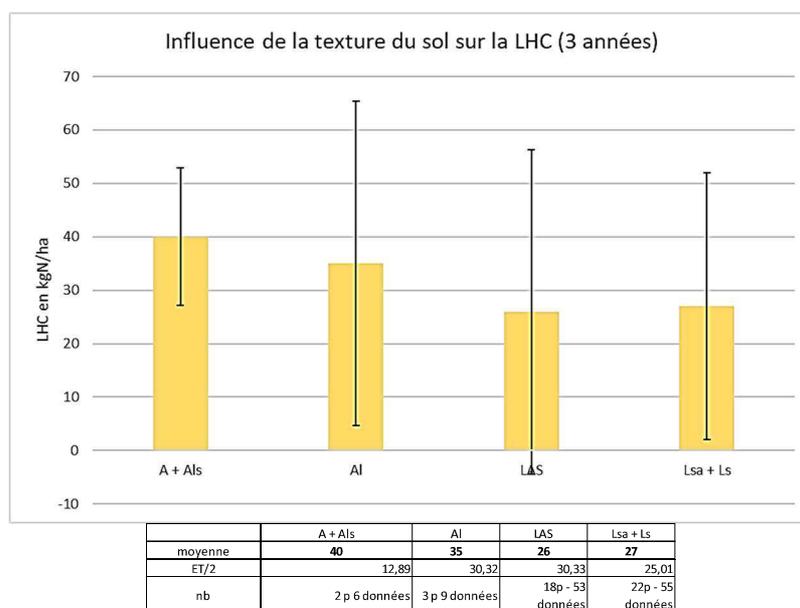


Figure 36 – Influence de la texture du sol sur la LHC pour 3 hivers

Classification GEPA : A argileux, Als argilo-limono-sableux, Al argilo-limoneux, LAS limono-argilo-sableux, Lsa Limono-sablo-argileux, Ls limono-sableux

Pour la profondeur de sol comme pour les textures de sol, les différences observées ne sont pas significatives. Cela ne signifie pas que la profondeur ou la texture n'ont pas d'influence sur la lixiviation du nitrate, mais que dans cette étude, d'autres facteurs pèsent plus lourdement dans les analyses. Ces données ne sont donc pas les éléments explicatifs dominant des pertes de nitrate sur les parcelles du réseau.

A noter :

- Pas d'influence significative de la texture et de la profondeur du sol sur la LHC

3.4.6 Influence des pratiques de travail du sol sur la LHC

Profondeur du sol et texture sont des facteurs intrinsèques à la parcelle. Le travail du sol est, quant à lui, lié aux choix de l'agriculteur, il est donc modifiable. Le travail du sol est abordé ici par le choix des outils, leur nombre et leur fréquence de passage, pour une année et sur plusieurs années. La profondeur de travail du sol est une donnée qui a été demandée aux agriculteurs, malheureusement les données recueillies ne sont pas assez nombreuses pour être analysées.

Influence du labour sur la LHC

Le labour est une pratique qui est de moins en moins utilisée au profit d'un travail du sol plus léger qualifié sous le vocable de Techniques Culturelles Simplifiées (TCS). La charrue est alors remplacée par des outils à dents ou à disque avec un travail plus ou moins profond. Cependant sur les secteurs d'élevage, comme c'est le cas ici, certains agriculteurs restent fidèles au labour tous les ans (7 parcelles). 15 parcelles n'ont pas été labourées sur la période de l'étude. L'analyse ne montre pas de différence entre zéro labour, 1 labour en 3 ans ou 2 labours en 3 ans pour la LHC. Par contre on peut voir une différence avec le labour tous les ans, mais cette différence reste non significative (Figure 37).

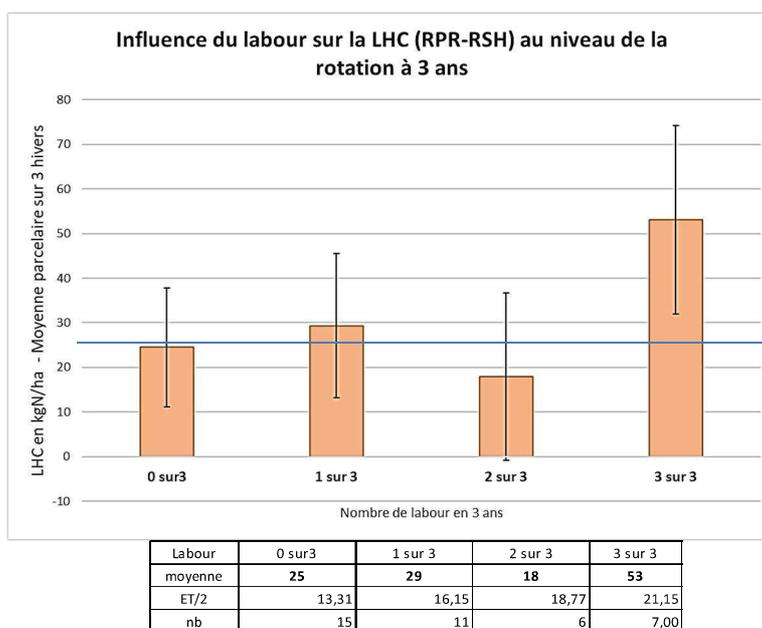


Figure 37 – Influence du nombre de labour dans la rotation sur la LHC pour 3 hivers

Influence de la herse rotative sur la LHC

La herse rotative est utilisée pour détruire les mottes et affiner le lit de semences. Cet outil, dans certaines conditions d'emploi, casse les agrégats du sol et en modifie la structure. La structure du sol, avec la texture, est un facteur de rétention de l'eau dans les sols. C'est pourquoi cet outil est accusé, par certains, de favoriser la lixiviation du nitrate. Dans cette étude, on voit (Figure 38) une certaine différence entre les parcelles où la herse étrille n'est pas ou peu utilisée (0 à 1 fois en 3 ans) et les parcelles sur lesquelles la herse rotative est utilisée 2 ou 3 années sur 3. Dans ce dernier cas, les moyennes de LHC dépassent les 25 kgN/ha. Cette différence n'est cependant pas significative.

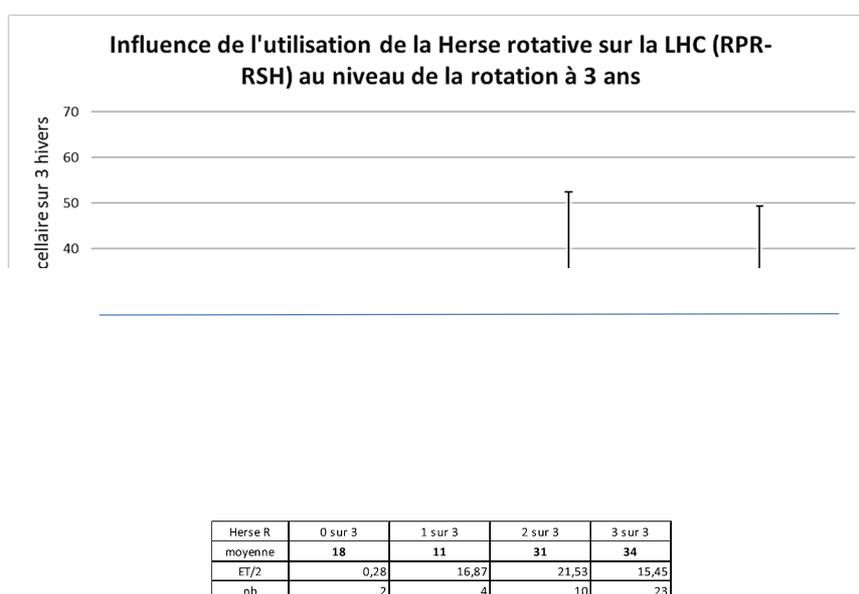


Figure 38 – Influence de l'utilisation d'une herse rotative dans la rotation sur la LHC

Influence du nombre d'outils et du nombre de passages d'outils de travail du sol sur la LHC

La typologie des outils de travail du sol utilisée par les agriculteurs est très variée. Les outils peuvent être passés successivement en plusieurs fois ou être montés en combiné pour réduire le nombre de passages. Cette technique est de plus en plus utilisée par les agriculteurs du réseau, surtout pour le semis des céréales à paille d'automne, les outils de travail du sol sont alors associés au semoir. Le nombre d'outils sur un combiné est variable.

Pour les analyses qui suivent, le nombre d'outils de travail du sol (Figure 39) ne comprend pas le semoir, ainsi un semis direct (ou SD) aura une valeur de zéro. Dans les parcelles dont le nombre moyen d'outils de travail du sol est compris entre 0 et 1 (moyenne sur 3 ans), se trouve une parcelle en SD, les parcelles en prairies temporaires et les parcelles implantées en luzerne.

Dans la Figure 40, qui concerne le nombre de passages, le semis est pris en compte. Ainsi, un semis direct sera comptabilisé comme 1 passage.

Tous les outils et tous les passages qui concernent le sol sont pris en compte : déchaumage du précédent, implantation de la culture intermédiaire, destruction de la culture intermédiaire, travaux pour l'implantation de la culture.

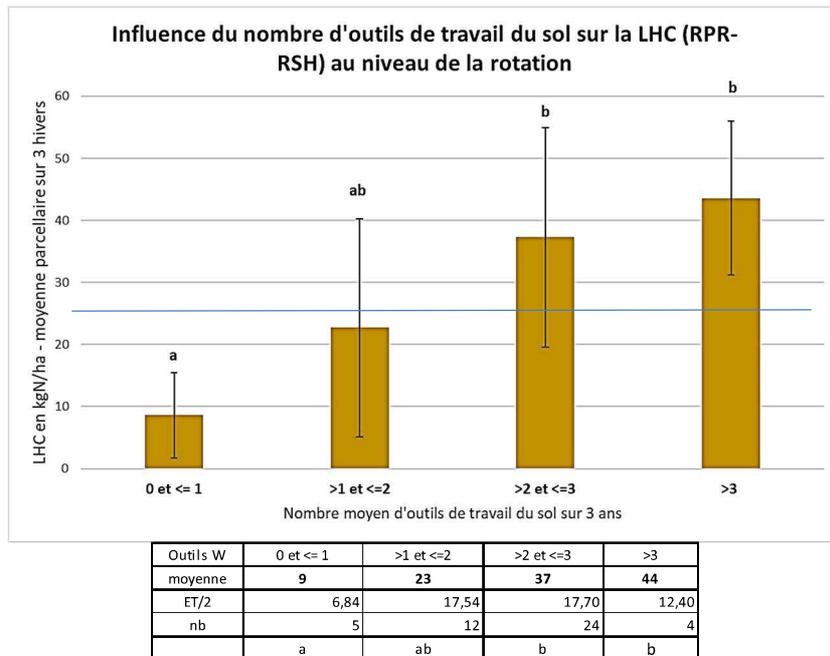


Figure 39 - Influence du nombre d'outils de travail du sol dans la rotation sur la LHC

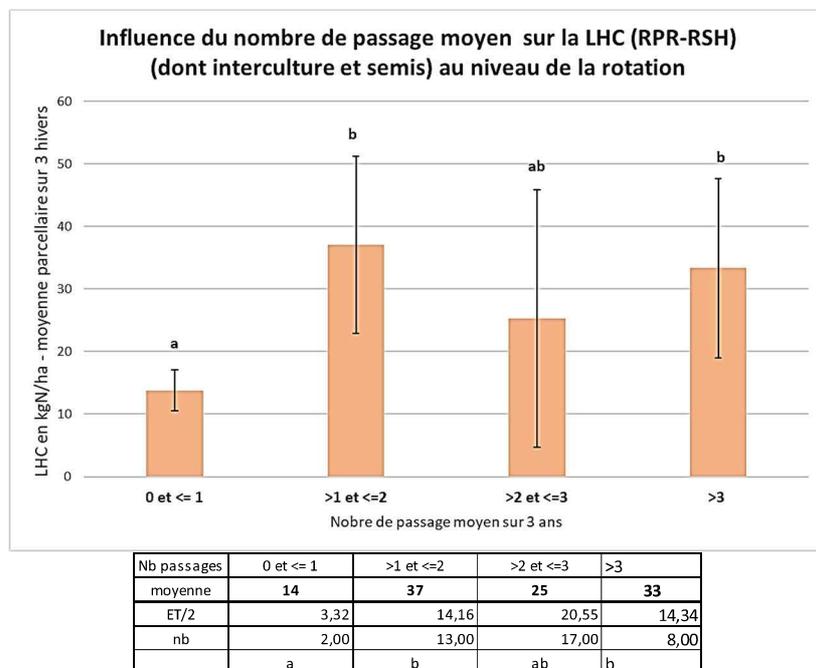


Figure 40 - Influence du nombre de passages d'outils de travail dans la rotation sur la LHC

Malgré une forte variabilité de la LHC, on observe des différences significatives selon le nombre d'outils de travail du sol et selon le nombre de passages.

S'agissant du nombre d'outils de travail du sol, la LHC croit avec le nombre d'outils utilisés, la moyenne maximale de 44 kgN/ha étant atteinte par les parcelles où sont utilisés plus de 3 outils tous les ans et est significativement différente de la LHC moyenne de 9 kgN/ha pour les parcelles dont le nombre d'outils est inférieur ou égal à 1. Avec ces dernières, la différence est significative à partir de plus de deux outils utilisés tous les ans.

En ce qui concerne le nombre de passages, la tendance est la même que pour le nombre d'outils avec une LHC moyenne minimale pour les parcelles avec 1 passage maximum par an sur trois ans. Dans ce cas de figure la moyenne de LCH est significativement inférieure aux autres modalités de nombre de passages.

Ces résultats peuvent s'expliquer par une meilleure stabilité de structure des sols et une meilleure activité biologique lorsqu'il y a peu de travail qui permet de retenir le nitrate. Cependant il faut être prudent dans l'interprétation car dans les parcelles avec peu de travail du sol se trouvent les parcelles en cultures pluri annuelles (prairies temporaires et luzerne) qui, d'une part peuvent avoir une meilleure couverture hivernale, et d'autre part reçoivent une moindre fertilisation azotée. Néanmoins, l'augmentation graduelle de la LHC avec le nombre d'outils de travail du sol montre une influence significative de ce facteur sur la lixiviation du nitrate.

A noter :

- Pas d'influence significative de la fréquence de labour ou de la fréquence du passage de herse étrille
- Une influence significative du nombre d'outils de travail du sol utilisé avec une corrélation positive

3.4.7 Influence des pratiques de fertilisation azotée sur la LHC

Hormis les légumineuses, la fertilisation azotée est la première source d'azote présent dans les sols. Les bactéries fixatrices d'azote ainsi que les apports par l'eau de pluie ne représentent qu'une petite partie de la fertilisation des cultures. Sur le territoire d'étude, essentiellement tourné vers l'élevage, les agriculteurs fertilisent en partie leur cultures avec les effluents. La nature majoritaire des apports de matières organiques est le fumier de bovin. On trouve également des fumiers de volaille, de porc, des composts et du lisier de porc. Ces amendements sont généralement complétés par des apports d'azote sous forme minérale. Seuls deux agriculteurs du réseau ne fertilisent qu'avec des apports minéraux (céréaliers).

Etant la première forme d'apport d'azote dans les agrosystèmes aujourd'hui, la fertilisation azotée est un facteur majeur de la lixiviation du nitrate.

Quantité totale d'azote et bilan azoté simplifié

La quantité totale d'azote apportée sur les parcelles est à mettre en relation avec les besoins de la culture, les exports lors de la récolte et les fournitures d'azote par les restitutions et la minéralisation des apports précédents. Pour se faire, le calcul du BAS (Bilan Azoté Simplifié) reprend les entrées d'azote dans le système (restitution, minéralisation, apports des légumineuses et RSH) desquelles sont soustraits les exports d'azote par la récolte. Le BAS n'est analysé que pour les hivers 2019/2020 et 2020/2021 car nous n'avons pas les données du RSH de 2018.

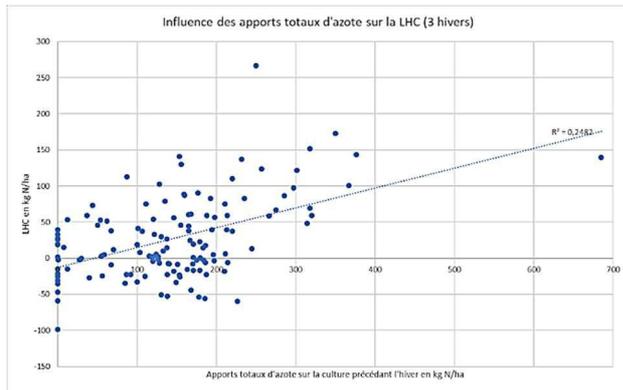


Figure 41 – Influence des apports totaux d'azote pour la fertilisation de la culture sur la LHC
R²=0,25

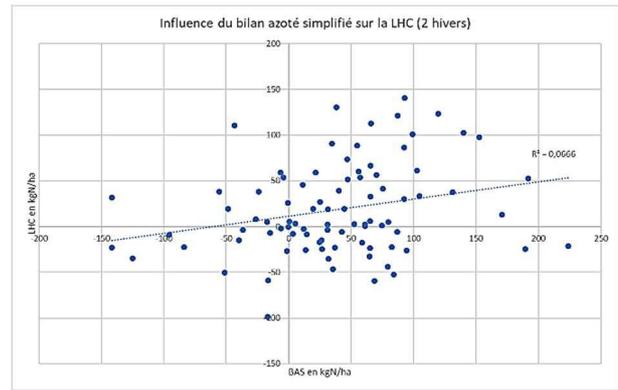


Figure 42 – Influence du bilan azoté simplifié sur la LHC
R²=0,07

L'analyse graphique de l'influence de la quantité totale d'azote apportée aux cultures ainsi que du BAS (Figure 41 et Figure 42) montrent une tendance positive mais l'analyse statistique par la droite de régression souligne la forte dispersion des résultats avec des coefficients de régression respectivement de 0,25 et 0,07 qui ne permettent pas de conclure à une corrélation avec la lixiviation du nitrate. Néanmoins lorsque l'on regarde une par une les pratiques de fertilisation des agriculteurs sur les parcelles du réseau, on note que les parcelles sur lesquelles les agriculteurs prennent en compte le calcul du bilan azoté (restitutions, minéralisation dans le temps) ainsi que le potentiel de la parcelle pour ajuster la fertilisation, les fuites d'azote sont peu importantes. Cela signifie que ces facteurs peuvent avoir une influence sur la lixiviation mais que d'autres facteurs pèsent plus lourds dans la quantité d'azote lixiviée.

Quantités d'azote apportées par les MO

Comme précisé précédemment, les apports de matières organiques provenant principalement des élevages sont très utilisés pour la fertilisation des parcelles du réseau. Bien que règlementé par la directive nitrate, les quantités d'azote apportées de cette manière aux cultures sont extrêmement variables avec des valeurs d'équivalent azote allant jusqu'à plus de 400UN.

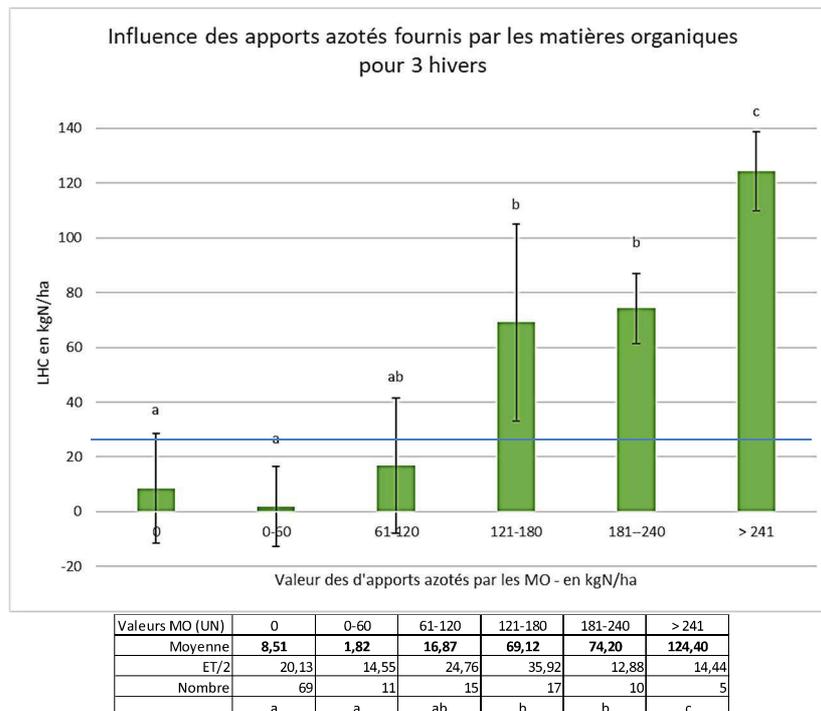


Figure 43 – Influence de la quantité d'azote fournie par les matières organiques sur la LHC (3 hivers)

L'analyse des quantités d'azotes apportés par les matières organiques montre une différence significative sur la quantité d'azote lixivé. Ainsi, des apports jusqu'à 60UN sous cette forme ne génèrent pas de fuites alors que des apports de plus de 120UN génèrent des fuites d'azote importantes. Les années où les apports sont supérieurs à 240UN sous formes organiques contribuent très fortement à la dégradation de la ressource en eau.

L'analyse des données montre que sur le territoire la quantité d'azote « supportable » par les parcelles est aux alentours de 120UN. C'est-à-dire qu'au-delà de ce seuil, le sol et les cultures ne sont pas capables de gérer les excès de matières organiques.

Nature de la MO

Concernant la nature des apports organiques, l'étude montre que les apports de composts sont significativement moins impactant pour la qualité de l'eau que les autres formes d'apports. Les apports de lisiers ont une moyenne de LHC équivalente à ceux des composts mais la dispersion des données ne permet pas de conclure à une différence significative. L'analyse des bougies poreuse et notamment de la parcelle P10 fertilisée avec du lisier de porc apporte une explication : outre la nature de la matière organique, la nature de la culture fertilisée et la nature de la culture suivante (présente pendant l'hiver), ont une influence sur la rétention ou la lixiviation de l'azote.

Les apports de fumiers de volailles semblent générer plus de fuites que les fumiers de bovins, mais là encore la différence n'est pas significative.

	Compost	Fumier (tous)	Fumier Bovin	Fumier Volaille	Lisiers (tous)
moyenne	16	70	64	106	15
ET/2	18,71	29,83	24,98	55,57	36,30
Nb	3	37	26	5	10
	a	b	b	b	ab

Figure 44 – Influence de la nature des matières organiques sur la LHC
Fumiers (ts) : fumiers de bovins + fumiers de volailles

Période d'apport de la MO

Les apports de matières organiques se font à deux périodes :

- à l'automne pour la fertilisation du colza, de céréales à paille, du maïs en apportant les MO sur les intercultures,
- au printemps principalement avant l'implantation du maïs.

Dans notre échantillon de parcelles, sur trois ans, la fréquence des apports de matières organiques à l'automne ou au printemps est quasiment identique.

Les parcelles ne reçoivent généralement pas des matières organiques tous les ans, comme nous l'avons vu dans l'analyse des données agronomiques, les céréales à paille sont fertilisées à l'aide d'engrais minéraux.

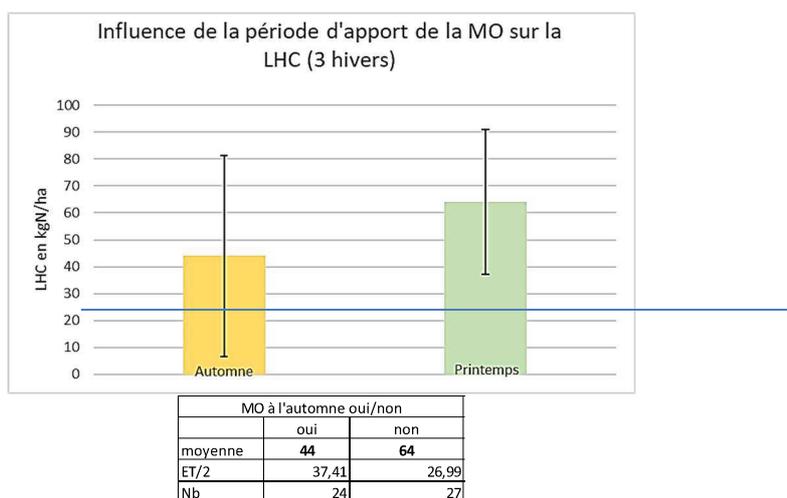


Figure 45 – Influence de la période d'apport de la matière organique sur la LHC
Quantité N apportée : μ automne= 133UN ; μ printemps = 156UN

Avec des valeurs d'apports proches (133 UN et 156UN en moyenne), la période d'apport semble jouer un rôle dans la quantité d'azote lixiviée pendant l'hiver (Figure 45) avec des fuites moins importantes pour les apports d'automne que pour les apports de printemps, mais la différence n'est statistiquement pas significative.

A noter :

- Pas de corrélation entre la quantité totale d'azote apportée et la LHC
- Une augmentation significative de la LHC avec l'augmentation des quantités d'azote apportées par les matières organiques
- Un seuil de 120UN apportées par les matières organiques au-delà duquel les risques de lixiviation sont forts
- Les apports de matières organiques d'automne ne sont pas plus impactants que les apports de printemps
- Les apports sous forme de fumier génèrent beaucoup plus de fuite que les apports sous forme de compost

3.4.8 Influence de l'occupation du sol sur la LHC

Succession culturale

Comme nous l'avons vu dans l'analyse des pratiques agronomiques, les rotations sont très variées d'une parcelle à l'autre. Aussi, les données analysées dans cette partie concernent la succession culturale. C'est-à-dire la culture qui précède la période de lixiviation et la culture en place pendant cette période.

Les moyennes présentent des valeurs de LHC différentes significativement (Figure 46) avec la valeur la plus basse obtenue par une succession prairie temporaire-prairie temporaire et les valeurs les plus hautes avec les successions maïs-céréale à paille et colza-céréale à paille. Cette dernière succession à une telle variabilité qu'elle n'est pas significativement différente des autres moyennes.



Cultures	PT-PT	CP-Co	CP-Ma	Luz-Luz	CP-CP	Met-Met	Ma-CP	Co-CP
Moyenne	-41	-9	-5	19	24	34	81	82
ET/2	18,36	18,02	15,08	5,41	26,97	24,36	19,80	52,82
nombre	6	12	20	4	9	6	24	6
	a	ab	ab	b	abc	abc	c	abc

Figure 46 – Influence de la succession culturale sur la LHC

PT : Prairie temporaire, CP : Céréale à paille, Co : Colza, Ma : maïs, Luz : luzerne, Met : méteil

Aux regards des autres analyses et des pratiques, les explications peuvent être les suivantes :

- PT-PT : lors de l'hiver étudié, la prairie temporaire (qui est en deuxième année au moins) est bien implantée et offre une bonne couverture de sol (rétention de l'eau) avec des plantes qui utilisent correctement l'azote. De plus, les prairies temporaires reçoivent peu de fertilisation azotée et encore moins sous forme organique (compost pour 1 parcelle).
- CP-Co et CP-Ma : les agriculteurs utilisent préférentiellement la fertilisation minérale sur céréales à paille. S'il y a des reliquats post-récolte, ils sont bien absorbés par le colza ou par la couverture de sol avant maïs, généralement une interculture semée. Il est à noter que le colza est majoritairement fertilisé par l'apport de matières organiques à la fin de l'été avant le semis avec un équivalent azote pouvant aller jusqu'à 230UN, mais que ces matières organiques génèrent peu de lixiviation.
- Luz-Luz : la moyenne de LHC est significativement plus importante que celle de la succession PT-PT tout en restant sous le seuil des 25 kgN/ha. Si la luzerne est autonome en azote, une parcelle reçoit néanmoins une fertilisation sous forme de fumier de bovins tous les deux ans (apports qui peuvent se justifier pour satisfaire les besoins en éléments autres que l'azote). Pour un de apports, la valeur azotée était autour de 140UN et ce qui avec cette année-là et l'année suivante une LHC légèrement supérieure à 25 UN.
- CP-CP : bien que la moyenne de LHC soit proche de 25 kgN/ha, il n'y a pas de différence significative avec les autres successions culturales car les valeurs sont très dispersées. Les pratiques de fertilisation sont hétérogènes, aussi bien sur la quantité apportée que sur la nature des apports avec une majorité de parcelles fertilisées sous forme minérale et une minorité recevant des matières organiques. Au sein de cette catégorie, les apports des matières organiques ne visent pas à couvrir intégralement les besoins de la culture et sont complétés par des apports minéraux. Les parcelles ayant les plus fortes LHC présentent, pour la plupart, des RPR importants liés à une sur fertilisation qui peut être conjoncturelle

(années sèche avec faible rendement) ou structurelle avec des sur fertilisations régulières. Dans le cas de cette succession le sol reste nu entre les deux cultures et la couverture hivernale par les céréales est peu dense avec de faibles absorptions d'azote sur la période de drainage. Lorsque le précédent est sur fertilisé et que la parcelle présente de forts reliquats après la récolte, l'azote en surplus est lixivié.

- Met-Met : de même que pour la succession CP-CP, la variabilité des données ne permet pas de voir de différence significative avec les autres successions. Les méteils sont composés d'une association de graminées et de légumineuses, tout comme les PT du réseau. Mais contrairement aux prairies temporaires le sol est travaillé tous les ans et la culture ressemée à l'automne ou au printemps. De plus, deux parcelles sur trois reçoivent des matières organiques, la troisième reçoit une fertilisation azotée minérale. Il est très difficile d'estimer les apports d'azote des légumineuses dans un méteil et il est probable que la fertilisation en plus des apports symbiotiques provoquent une sur fertilisation de la culture ce qui expliquerait cette moyenne de 34 kgN/ha de LHC.
- Ma-CP : la moyenne de LHC de 80 kgN/ha est significativement plus élevée que la moyenne des successions PT-PT, CP-Co, CP-Ma et Luz-Luz. Les maïs sont fertilisés avec des apports de matières organiques au printemps avant le travail du sol pour le semis. Ces matières organiques sont peu minéralisées pendant la culture et ne profitent donc pas à celle-ci. Elles sont minéralisées à l'automne (cf. Figure 5), à une période où les céréales à pailles absorbent peu d'azote, le nitrate issu de cette minéralisation se retrouve donc lixivié.
- Co-CP : tout comme pour le maïs, le colza est principalement fertilisé par des apports de matières organiques avant la mise en place de la culture. Bien que mise à l'automne, une partie de cette MO n'est pas minéralisée pendant le cycle de la culture et minéralise à l'automne suivant lorsque la parcelle est occupée par des céréales à paille. Le phénomène de lixiviation est donc le même que pour la succession Ma-CP. La grande variabilité des données ne permet pas d'avoir une différence significative par rapport aux autres moyennes de LHC.

Occupation hivernale du sol

Les parcelles du réseau sont toutes avec un couvert végétal pendant l'hiver. La capacité d'absorption de l'azote des végétaux en place pendant l'hiver est importante pour réduire les fuites d'azote. Dans le graphique suivant les moyennes de LHC sont comparées selon l'occupation hivernale du sol. Les différences sont nettement significatives avec les colzas, prairies temporaires et les intercultures semées d'un côté avec très peu de fuites et les céréales à paille plus les méteils de l'autre qui présentent des fuites conséquentes. Les légumineuses ont une LHC moyenne assez élevée mais non significativement différente des deux autres groupes. Cela s'explique par la diversité des pratiques de fertilisation ainsi que les espèces et les dates de semis.

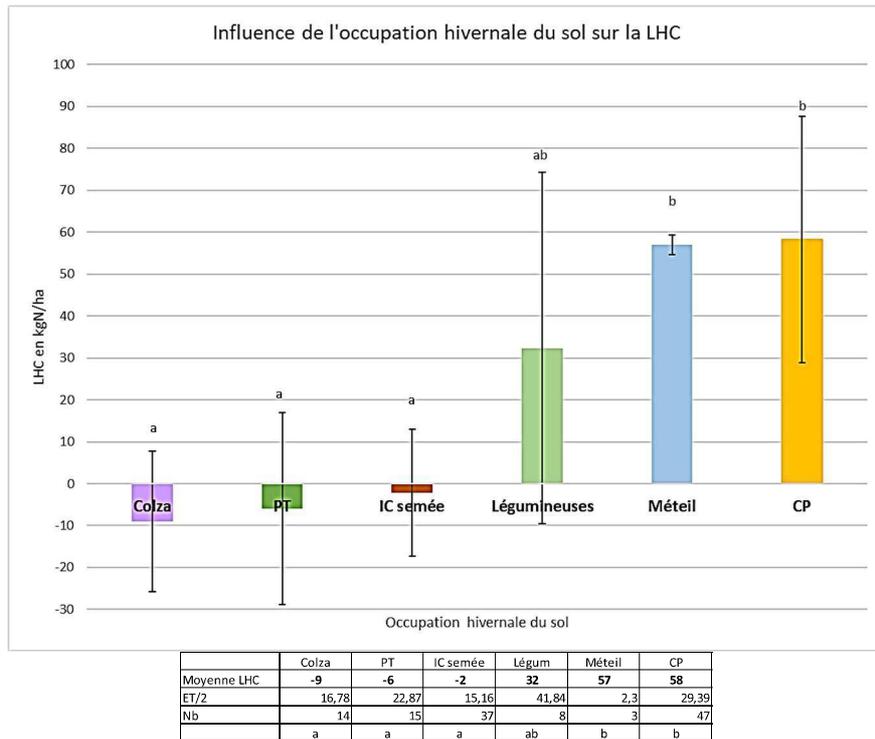


Figure 47 – Influence de l'occupation hivernale du sol sur la LHC
 PT : Prairie temporaire, IC semée : Interculture semée, CP : Céréales à paille

Les céréales à paille d'hiver ont très peu de besoins azotés pendant la phase hivernale et si la culture précédente génère de forts reliquats, elles ne sont pas capables de retenir le surplus. A l'inverse, le colza et les intercultures semées absorbent beaucoup d'azote pendant l'automne et le début de l'hiver, ce qui permet de limiter les fuites de nitrate.

A noter :

- Un risque important de lixiviation si la couverture hivernale est une céréale à paille
- Le risque est accru si le précédent génère de forts reliquats azotés (maïs, colza...)
- Une minéralisation des matières organiques à l'automne suivant leur épandage (n+1)
- Une bonne efficacité de rétention du nitrate par les couverts semés, le colza et les prairies temporaires

3.4.9 Analyse par groupes

Les pratiques culturales étant très diversifiées dans le réseau, nous avons voulu regarder si des groupes de parcelles avec des résultats similaires pouvaient nous permettre d'identifier des pratiques communes.

Pour ce faire, les parcelles (35 très bien renseignées) ont été regroupées selon deux critères, le RPR et la LHC avec des valeurs présentées dans le tableau suivant :

	A	B	C	D
RPR	Faible $\mu < 40$ UN	Fort $\mu \approx 50$ UN	Variable selon l'année	Fort $\mu \approx 100$ UN
LHC	Faible < 0	Faible < 0	Variable selon l'année	Fort $\mu \approx 70$ UN
Nb de parcelles	1	4	28	2

Tableau 22 – Répartition des parcelles en groupe par rapport à leur RPR et leur LHC

Le groupe C a été divisé en deux sous-groupes : C1 et C2, C1 contenant les parcelles qui ont un profil qui correspond au groupe D une années sur trois et C2 au groupe D deux années sur trois.

Tout d'abord, une vérification de la différence significative des valeurs de RPR et LHC est réalisée (Figure 48 et Figure 49).

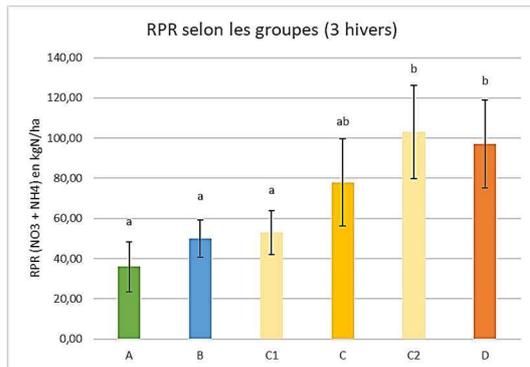


Figure 48 – RPR des différents groupes

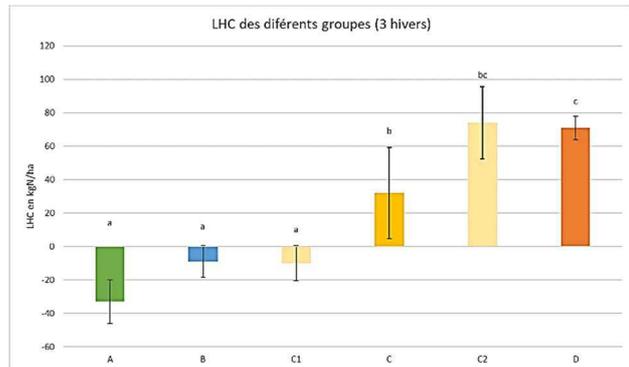


Figure 49 – LHC des différents groupes

Les pratiques de fertilisation azotées sont ensuite analysées. Comme pour l'analyse générale, il n'y a pas de différence significative sur les apports totaux mais une différence significative pour les apports de MO entre les groupes A et C1 et le groupe C2 (Figure 50 et Figure 51). La parcelle qui constitue le groupe A est fertilisée par des apports de lisier de porc raisonnés comme des apports minéraux.

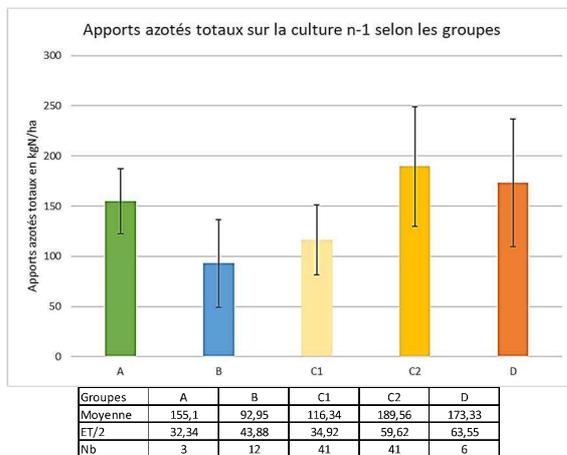


Figure 50 – Apports azotés totaux sur la culture n-1 selon les groupes (3 ans)

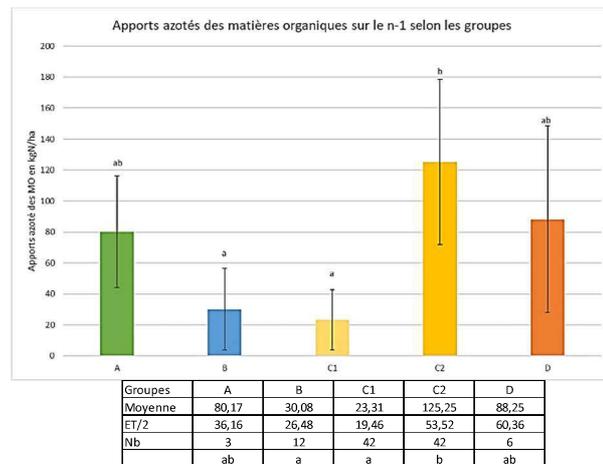


Figure 51 – Apports azotés par les matières organiques sur la culture n-1 selon les groupes (3 ans)

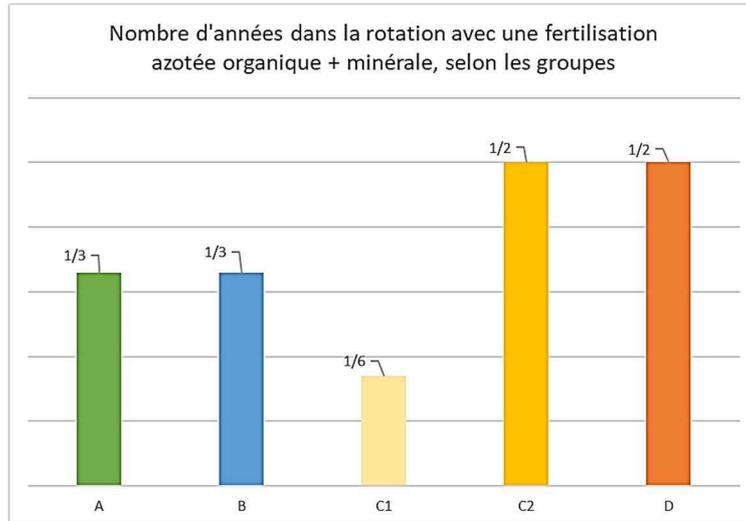


Figure 52 – Nombre d'années dans la rotation avec une fertilisation azotée organique complétée par une fertilisation minérale

De nombreux agriculteurs complètent les apports organiques par des apports minéraux. L'étude de cette pratique à l'échelle des groupes montre une différence entre A/B qui ont cette pratique 1 année sur 3 et les groupes C2/D qui le pratiquent 1 année sur 2.

Sans surprise, on retrouve dans les groupes C2 et D des successions culturales avec au moins la moitié des successions ayant des céréales à paille d'hiver en occupation hivernale des sols et avec plus de 30% de maïs ou colza dans la rotation. Au contraire du groupe B et du groupe C1 où l'on retrouve des prairies temporaires ou des intercultures avant maïs pendant l'hiver (Figure 53).

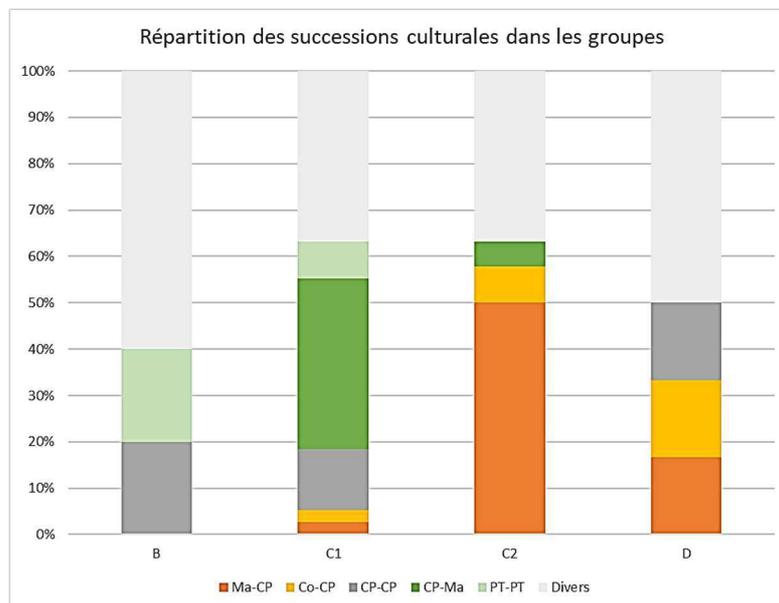


Figure 53 – Répartition des successions culturales dans les groupes

En ce qui concerne la protection sanitaire, le travail du sol et la profondeur du sol, aucune différence significative n'apparaît.

Lorsque l'on regarde les résultats économiques des groupes, il n'y a aucune différence significative sur les charges opérationnelles par rapport au chiffre d'affaire que pour le groupe A qui se retrouve avec une meilleure efficacité que les autres groupes. Mais ce groupe A étant constitué d'une seule parcelle, il est peu représentatif.

En d'autres termes, les parcelles qui ne perdent pas d'azote par lixiviation pendant l'hiver ont une efficacité économique identique à celles qui perdent de l'azote (Figure 54).

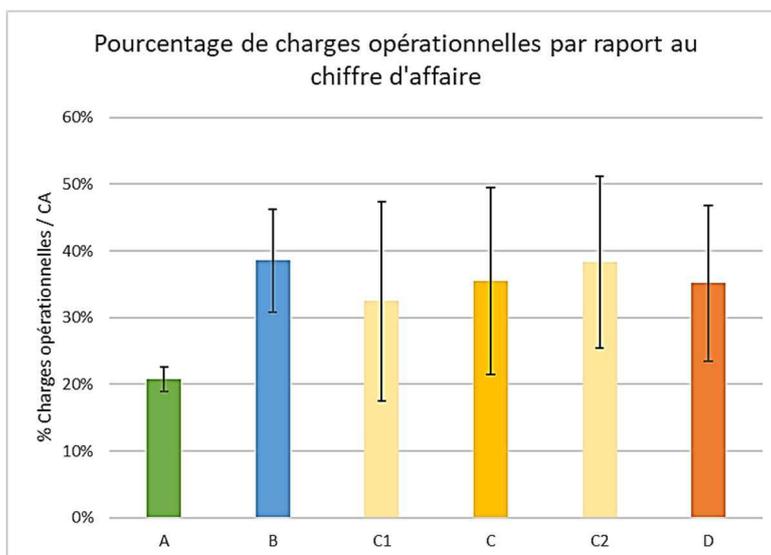


Figure 54 – Résultats économiques des groupes par l'analyse du pourcentage de charges opérationnelles par rapport au chiffre d'affaire

L'analyse par groupes vient confirmer l'analyse générale quant aux facteurs responsables des fuites de nitrates des parcelles cultivées. Le tableau ci-dessous reprend le résultat de l'analyse des pratiques qui étudiées pour les groupes.

Groupes	A	B	C1	C2	D
N MO	++	+	+	++++	++++
N total	= (+++)	= (+)	= (++)	= (++++)	= (+++)
% Ma-CP et Co-CP		0	+	++++	++
Org+Min	= (++)	= (++)	= (+)	= (+++)	= (+++)
Profondeur de sol	+ (++)	= (++)	= (++)	= (++)	= (+++)
Labour		= (++)	= (+)	= (++)	= (+++)
Herse rotative		=	=	=	=
Nb de passage d'outils de W du sol		=	=	=	=
IFT		= (+)	= (++)	= (++)	= (+)
Résultats économiques	=	=	=	=	=

Tableau 23 – tableau de synthèse de l'analyse par groupes
() : différences non significatives, = : pas de différences

Le facteur qui différencie le plus les groupes est la quantité d'azote apportée sous formes organiques sur les cultures précédant l'hiver. Cela rejoint en partie le facteur succession culturale avec le pourcentage de maïs-céréale et de colza-céréale puisque maïs et colza sont principalement fertilisés avec des matières organiques. Le fait d'y ajouter une fertilisation minérale semble également être un facteur prédisposant qui est à mettre en relation avec la fertilisation azotée totale.

A noter :

- Confirmation de l'analyse générale sur les pratiques qui génèrent des fuites notamment sur la fertilisation azotée
- Pas de différence sur les pratiques de protection sanitaire
- Pas de différence sur les résultats économiques

4 Conclusion

Cette étude a permis de mieux connaître les pratiques agronomiques des agriculteurs des aires d'alimentation des huit captages prioritaires de l'Est Mayennais. Elle aura permis également une animation de ces territoires auprès du public agricole autour de la qualité de l'eau et de l'agriculture. Menée sur plus de 60 parcelles et 55 agriculteurs, elle démontre que les pratiques des agriculteurs ont bien une influence sur la lixiviation du nitrate.

Des pratiques vertueuses ressortent de l'analyse du réseau de référence parmi lesquelles on peut citer :

- Une fertilisation azotée équilibrée entre apports et besoins des cultures selon la méthode du bilan pour tenir compte des arrières-effets des effluents,
- Des apports de matières organiques à adapter sur ce territoire à sols filtrants avec un maximum de 120 à 125 UN en valeur azoté,
- Une attention particulière à la fertilisation azotée des cultures qui précèdent une céréale à paille d'hiver afin de ne pas générer trop de reliquats en post-récolte,
- Un travail du sol peu agressif (pas de labour tous les ans et peu d'outils),
- L'implantation de couverts végétaux,
- Le juste équilibre de pâturage sur les prairies permanentes.

De points de vigilance ont également été mis en évidence pour les risques importants de perte d'azote :

- Des reliquats post-récolte supérieurs à 60 UN,
- Des apports de matières organiques dépassant largement les valeurs autorisées par la directive nitrate,
- Des rotations courtes de type blé/maïs,
- Un travail du sol avec labour tous les ans et de nombreux outils sur une même année,
- Un surpâturage des prairies en sol filtrant.

L'analyse permet également de tordre le cou à certaines idées reçues, comme la contribution des élevages de volailles à la pollution par le nitrate. Les mesures effectuées à l'aide des bougies poreuses montrent, certes une lixiviation importante de nitrate en pied de poulailler, mais moins importante que certaines parcelles cultivées et sur une surface bien moins étendue. L'autre point à soulever concerne les reliquats post-récolte, quelques agriculteurs, par leurs pratiques, ont des RPR entre 50 et 60 UN sans pour autant générer de la lixiviation. Ces RPR qui pourraient être qualifiés d'élevés semblent au contraire être le gage d'une bonne activité biologique du sol qui protège la parcelle des pertes d'azote. Il serait intéressant de vérifier cette hypothèse par des mesures d'activité biologique. De même des apports de matières organiques à l'automne ne génèrent pas plus de fuites que des apports au printemps.

Cette étude a également permis aux agriculteurs du réseau d'avoir une analyse personnalisée par l'envoi des fiches parcellaire avec des conseils pour améliorer leurs pratiques tant du point de vue de l'environnement que pour l'amélioration des résultats technico-économiques.

Le réseau de références met en évidence que pour une diminution rapide et durable des concentrations de nitrate aux captages, il est nécessaire de travailler avec les agriculteurs à une meilleure utilisation des effluents d'élevages dans la fertilisation des cultures.

Remerciements

Je remercie la Régie des eaux des Coëvrons ainsi que le Comité de pilotage de l'étude d'avoir confié à Agristem cette mission.

Je remercie également les financeurs qui ont permis que cette étude soit réalisée.

Je remercie les personnes de la Régie des eaux des Coëvrons pour notre collaboration. En premier lieu Anne-Marie Le Coz, Directrice, pour son soutien. Marie Plet et Jean-Luc Delêtre (les animateurs) pour leur travail de terrain : animation du réseau, recueil des données, pose et relevé des bougies poreuses, ainsi que pour nos discussions constructives.

Enfin, je tiens à remercier tous les agriculteurs qui ont participé à cette étude en nous dévoilant leur pratiques, participé aux réunions et apportés leurs analyses.

Abréviations

AAC : Aire d'Alimentation de Captage
AB : Agriculture Biologique
AC : Agriculture Conventiionnelle
BRF : Bois Raméal Fragmenté
C : Carbone
CH₄ : Méthane
CI : Culture Intermédiaire
CIPAN : Culture Intermédiaire de Piège à Nitrate
DCE : Directive Cadre sur l'Eau
ETP : Evapotranspiration Potentielle
ha : hectare
IC : Intercultures
IFT : Indicateur de Fréquence de Traitements phytosanitaires
INRAE : Institut National de Recherche Agronomique et Environnemental
IRSTEA : Institut National de Recherche en Sciences et Technologiques pour l'Environnement et l'Agriculture
ITAB : Institut Technique de l'Agriculture Biologique
K : Potassium
LAS : Laboratoire d'Analyses des Sols
LHC : Lixiviation Hivernale Calculée (de l'azote)
MO : Matières Organiques
N : azote
N₂ : diazote
N₂O : oxyde nitreux ou protoxyde d'azote
NH₃ : Ammoniac
NH₄⁺ : Ammonium
NO₃⁻ : Nitrate
NO₂⁻ : Nitrite
MAE : Mesures Agro-Environnementales
MAECT : Mesures Agro-Environnementales et Climatiques Territorialisées
MERC1 : Méthode d'Estimation des éléments Restitués par les Cultures Intermédiaires
ONF : Office National des Forêts
P : Phosphore
q : quintaux
RU : Réserve Utile
REC : Régie des eaux des Coëvrons
REH : Reliquats Entrée Hiver
RPR : Reliquats Post-Récolte
RSH : Reliquats Sortie Hiver
SAU : Surface Agricole Utile
T°C : température en degré Celsius
t : tonne
tMF : tonne de matière fraîche
tMS : tonne de matière Sèche
TCS : Techniques Culturelles Simplifiées
UGB : Unité Gros Bétail
ZSCE : Zones Soumises à Contraintes Environnementales

Bibliographie

- BEAUDOIN, N. (2012). Réduire les fuites de nitrate au moyen de cultures intermédiaires.
- BENOIT, M. (2014). *Les fuites d'azote en grandes cultures céréalières*. Université Pierre et Marie Curie, Agronomy, Paris.
- Billen G, G. j. (2013). La cascade de l'azote dans les territoires de grande culture du Nord de la France. *Cah Agric*, 22, 272-281.
- CARRIERE, M. (2012). Prélèvement/préparation des échantillons et analyse des reliquats d'azote. *Conférence Azote*. Agro Système.
- COMIFER. (2013). *Calcul de la fertilisation azotée - Guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales*. Groupe Azote.
- DOUILLARD, N. (2015). Flash technique pâturage.
- DRAAF. (2011). Table des équivalences Unité Gros Bétail Tous Aliments.
- ITAVI. (2013). Estimation des rejets par les élevages avicoles.
- LOUDIN L, H. F. (2005, March). Which potential evapotranspiration input for lumped rainfall-runoff model? : Part 2 - Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modeling. *Journal of Hydrology*, 290-306.

Annexes

Annexe 1 : Guides de recueil de données

Questionnaire sur les exploitations

Q_Agri_COEVRON_exploitation_V_2018_06_01.docx
Réseau de références – Questionnaire exploitation

Données générales de l'exploitation

Société (GAEC, SCEA, EALR...)				
Adresse du siège d'exploitation				
Ad 1 :				
Ad 2 :				
CP		Ville :		
Portable :				
Fixe :				
Mail :				
SAU :				
Exploitant(s)				
NOM		Prénoms	Ages	ETP
Salariés, Saisonniers :			ETP :	
Historique de l'exploitation :				

Diriez-vous que vous pratiquez une agriculture :

Conventioneelle Raisonnée Intégrée Biologique Autre :

Etes-vous engagé dans une démarche de qualité (A.O.C. , IGP, Label , AB,...)?

Oui Non

Si Oui, lesquelles?

Etes-vous engagé dans des mesures agro-environnementales?

Oui Non

Si Oui, lesquelles?

Autres :

Données sur les productions de l'exploitation

Cultures	Surf (ha)	Rdt Moy
Blé tendre d'hiver		
Blé tendre de printemps		
Orge d'hiver		
Orge de printemps		
Avoine d'hiver		
Avoine de printemps		
Mais ensilage		
Mais Grain		
Tournesol		
Colza		
Pois		
Autre		
Autre		
Autre		
Gel		
Bois		

Fourrages	Surf (ha)	Pâturage (O/N)	Nombre de coupe	Rdt Moy
Prairies permanentes				
Prairie temporaire				
Luzerne				

Questionnaire sur les pratiques annuelles

Q_Agr_i_COEVRON_Parcelle_annee2019_V_2019_05_07.docx7
Réseau de référence – Questionnaire parcelle – Saison 2018-2019

Données enquête

Interventions sur la parcelle Campagne 2019

Interculture post récolte 2018

Travail du sol :

Dates	Outils

Date semis	Espèces / dose	Date destruction	Mode de destruction

Fertilisation :

Dates	Produits (N,P,K, MO)	Doses

CULTURE 2019

Nature de la production	Rendement prévisionnel

Travail du sol :

Dates	Outils

Désherbage :

Dates	Produits	IFT ou doses

Protection sanitaire (Culture et prairies) :

Dates	Produits	IFT ou doses

Fertilisation (Culture et prairies) :

Dates	Nature du Produits (N,P,K, MO)	Quantités / ha	Doses UN

Récolte (fauches, enrubannage pour prairies)

Dates	Rendements	Export paille oui/non

Pâturage :

	1 ^{er} cycle	2 ^{ème} cycle
Date de mise en pâture		
Chargement		
Date de retrait des animaux		

	3 ^{ème} cycle	4 ^{ème} cycle
Date de mise en pâture		
Chargement		
Date de retrait des animaux		

Interculture post récolte 2019

Travail du sol :

Dates	Outils

Date semis	Espèces / dose	Date destruction	Mode de destruction

Fertilisation :

Dates	Produits (N,P,K, MO)	Doses

Annexe 2 : Calcul des indicateurs

Bilan azoté

(COMIFER, 2013)

Sur une période de temps donnée, le bilan de masse du stock d'azote minéral du sol sur la profondeur explorée par les racines de la culture s'écrit :

État final - État initial = Entrées – Sorties

$$Rf - Ri = [Mh + Fs + Fns + Mhp + Mr + MrCi + Mpro1 + Mpro2 + A + Nirr + X + Xpro] - [Pf - Pi + Ix + Gs + Gx + L]$$

Equation complète du bilan de masse des flux azotés dans une parcelle cultivée

Avec :

État initial et final

Rf : Quantité d'azote minéral dans le sol à la fermeture du bilan

Ri : Quantité d'azote minéral dans le sol à l'ouverture du bilan

En italique, les postes qui n'ont pas été pris en compte dans la simplification du bilan pour cette étude

Entrée d'azote dans le système sol-plante

Mh : Minéralisation nette de l'humus du sol

Fs : Fixation symbiotique d'azote atmosphérique par la culture

Fns : Fixation non symbiotique d'azote atmosphérique

Mhp : Minéralisation nette due à un retournement de prairie

Mr : Minéralisation nette de résidus de récolte

MrCi : Minéralisation nette de résidus de culture intermédiaire

Mpro1 : Minéralisation nette de l'azote organique d'un PRO n°1 apporté avant l'ouverture du bilan

Mpro2 : Minéralisation nette de l'azote organique d'un PRO n°2 apporté après l'ouverture du bilan

A : Apports atmosphériques (apports météoriques = dépôts secs ou humides)

Nirr : Azote apporté par l'eau d'irrigation

X : Apport d'azote sous forme d'engrais minéral de synthèse

Xpro : Azote de la fraction minérale d'un PRO apporté après la date d'ouverture du bilan

Sorties d'azote du système sol-plante

Pf : Quantité d'azote absorbé par la culture à la fermeture du bilan

Pi : Quantité d'azote absorbé par la culture à l'ouverture du bilan

Ix : Organisation par voie microbienne aux dépens de l'azote minéral apporté sous forme d'engrais de synthèse ou de fraction minérale du PRO

Gs : Pertes du sol par voie gazeuse (dénitrification pour l'essentiel)

Gx : Pertes par voie gazeuse (volatilisation, dénitrification) aux dépens de l'engrais minéral (X) et de la fraction minérale du PRO apporté après l'ouverture du bilan (Xpro)

L : Pertes par lixiviation du nitrate pendant l'ouverture du bilan

Entrées du bilan azoté

Mhp : Minéralisation nette supplémentaire due aux retournements de prairies

Valeurs pour le poste : minéralisation due aux retournements de prairie (Mhp) (COMIFER, 2013)

Mr : minéralisation des résidus de culture du précédent

Précédent	Mr (kgN/ha)
Betterave	20
Céréales à paille (pailles enlevées)	0
Céréales à paille (pailles enfouies)	-20
Colza	20
Fèverole	30
Lin fibre	0
Luzerne retournement à l'automne n+1	40
Luzerne retournement à l'automne n+2	20
Maïs ensilage	0
Maïs grain	-10
Pois protéagineux	20
Prairie	0
Tournesol	-10
PT dérobée	-10

Valeurs pour le poste : minéralisation des résidus de la culture précédente (Mr) (COMIFER, 2013)

MrCi : minéralisation des résidus de culture Intermédiaire

	Production de la CI (tMS/ha)	Ouverture du bilan en sortie hiver		Ouverture du bilan en Avril*	
		Destruction Nov/dec	Destruction>Janv	Destruction Nov/dec	Destruction>Janv
CRUCIFERES (moutarde, radis, ...)	<= 1	5	10	0	5
	2 (>1 et <3)	10	15	5	10
	>= 3	15	20	10	15
GRAMINÉES DE TYPE SEIGLE, AVOINE, ...	<= 1	0	5	0	0
	2 (>1 et <3)	5	10	0	5
	>= 3	10	15	5	10
GRAMINÉES DE TYPE RAY-GRASS	<= 1	5	10	0	5
	2 (>1 et <3)	10	15	5	10
	>= 3	15	20	10	15
LÉGUMINEUSES	<= 1	10	20	5	10
	2 (>1 et <3)	20	30	10	20
	>= 3	30	40	20	30
HYDROPHYLLACEES (Phacélie)	<= 1	0	5	0	0
	2 (>1 et <3)	5	10	0	5
	>= 3	10	15	5	10
MÉLANGES GRAMINÉES - LÉGUMINEUSES	<= 1	5	13	3	5
	2 (>1 et <3)	13	20	5	13
	>= 3	20	28	13	20
MÉLANGES CRUCIFÈRES - LÉGUMINEUSES	<= 1	8	15	3	8
	2 (>1 et <3)	15	23	8	15
	>= 3	23	30	15	23

* Date d'ouverture du bilan dans certains cas pour des cultures d'été (Maïs, Pomme de Terre)

Source: Brochure "Cultures Intermédiaires - Impacts et Conduite", ARVALIS/CETIOM/ITB/ITL, août 2011 (chapitre 17)

Valeurs pour le poste minéralisation des résidus de culture intermédiaire (MrCi) en kgN/ha
(Un niveau de croissance élevé se caractérise par une biomasse des parties aériennes supérieure à environ 3,0 t ms/ha.
Sources : ARVALIS – Institut du végétal, INRA).

MPro : Fournitures d'azote par les produits organiques

Produits organiques	Valeurs N Kg / Unité	Date d'apport	Coefficient Année n	Coefficient Année n+1	Coefficient Année n+2	Coefficient Année n+3
Fumier de bovins (t)	5,5	Automne	0,3	0,1	0,1	0
		Printemps	0,2	0,2	0,1	0
Fumier de volailles (t)	22	Automne	0,3	0,1	0,1	0
		Printemps	0,2	0,2	0,1	0
Fumier d'ovins (t)	6,7	Automne	0,3	0,1	0,1	0
		Printemps	0,2	0,2	0,1	0
Compost de fumier de volailles (t)	20	Automne	0,2	0,2	0,1	0
		Printemps	0,2	0,2	0,1	0
Compost de fumier de bovins (t)	8	Automne	0,2	0,2	0,1	0
		Printemps	0,2	0,2	0,1	0
Fientes de volailles (t)	15	Automne	0,8	0	0	0
		Printemps	0,8	0	0	0
Lisier de bovins (m ³)	3,5	Automne	0,8	0	0	0
		Printemps	0,8	0	0	0
Lisier de porcs (m ³)	5	Automne	0,8	0	0	0
		Printemps	0,8	0	0	0
Digestat liquide (m ³)	Sur analyse	Automne	0,8	0	0	0
		Printemps	0,8	0	0	0
Digestat solide (t)	Sur analyse	Automne	0,2	0,2	0,1	0
		Printemps	0,2	0,2	0,1	0
Boues STEP (m ³)	Sur analyse	Automne	0,8	0	0	0
		Printemps	0,8	0	0	0

Valeurs pour le poste : fourniture d'azote par les produits organiques, valeurs azotées et coefficient d'équivalence engrais

Sorties du bilan azoté**Pi : Quantité d'azote absorbé par la culture à l'ouverture du bilan**

Données de la bibliographie

Pour les céréales à paille :

Nombre de talles	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Pi en kg N/ha	10	15	20	25	30	35	40	45	50

Quantité d'azote absorbé par les céréales d'hiver à l'ouverture du bilan (ARVALIS)

Source : ARVALIS - Institut du végétal, Azobil / Azofert, INRA / LDAR, 2012

Pour les intercultures :

Espèces de cultures intermédiaires	Azote absorbé (kg N/ha)	
	Semis précoce	Semis tardif
Radis	57	26
Phacélie	36	17
Moutarde	32	22
Orge	25	14
Seigle	23	23
Sarrazin	19	
Repousses	22	

Quantité d'azote absorbé par les cultures intermédiaires (BEAUDOIN, 2012)

Le développement des cultures à l'ouverture du bilan n'étant pas connu, des valeurs moyennes ont été utilisées pour les analyses. Elles sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Nature de la couverture du sol	N absorbée en kg/ha
Avoine + Colza	50
Céréale à paille en culture (Blé TH, Orge H, Avoine H)	20
Colza d'hiver	50
Interculture longue	50
Interculture courte + céréale à paille	50
Interculture courte	30
Interculture + interculture	50
Légumineuses (Luzerne, Fèverole, ...)	0
Méteil (céréales à paille + légumineuses)	25
Moutarde (pure)	30
Prairie temporaire de moins d'1 an	25
Prairie temporaire de plus d'1 an	30
Ray Gras	20
Ray Gras + légumineuses semis à l'automne n	25
Repousses de céréales à paille	20
Repousses de colza	25
Repousses de méteil	25
Repousses de légumineuses	0

Valeurs du poste : quantités d'azote absorbées par la couverture du sol

Valeurs pour les prairies pâturées et les parcs à volailles

Animaux	Equivalent UGB
Mâle de 2 ans et plus	1
Vache allaitante suitée	1,5
Génisse entre 1 et 2 ans	0,7
Génisse de 2 ans et plus	0,9
Poulet de chair	0,011

Valeurs des équivalences Unité Gros Bétail (UGB) - (DRAAF, 2011)

Type d'animal	Performances	Herbe à produire kg MS/j
Vache laitière l lait/j	15 l ou V. tarries*	13
	20 l (<6000 l/an)*	16
	25 l (6-8000 l/an)*	17
	30 l (8-9000 l/an)*	18
Vache allaitante vêlage hiver vêlage automne	650 kg + veau 150 kg	19
	700kg + veau 250 kg	22
Bovin en croissance	Poids vif	
	200 kg	5 (génisses < 1 an)*
	300 kg	7 (8 kg, gén. 1-2 ans)*
	400 kg	10
	500 kg	12 (génisses 2-3 ans)
	600 kg	13

Quantité d'herbe ingérée en kg MS/animal/j par type d'animal pour le pâturage tournant de printemps - Sources : INRA, 2007 & CA Normandie in (COMIFER, 2013)

Mode d'exploitation	en kg N/t MS
Pâturage à rotation rapide (retour toutes les 3 semaines) ou continu	30
Pâturage à rotation lente (retour toutes les 5 semaines)	25
Ensilage	25
Foin précoce et Foin de repousse	20
Foin tardif de 1 ^{er} cycle	15

Teneur en azote de l'herbe selon le mode d'exploitation. Sources : INRA 2007 in (COMIFER, 2013).

Nrest : Effet direct des restitutions animales bovins

Pour l'étude la valeur retenue est de 9 kg N/ha pour 100 UGB jours de pâturage.

	Kg N pour 100 UGB jours de pâturage	
	Vaches laitières Traite à l'étable (Journées de pâturage de 20h)	Journée complète (Journées de pâturage de 24h)
Arrêt de la croissance de l'herbe inférieur à 1 mois en été	9	10,5
Arrêt de la croissance de l'herbe supérieur à 1 mois en été	8	9,5

Effet direct en kg N/ha des restitutions au pâturage pour 100 UGB jours de pâturage – Source : Fertilisation azotée des prairies dans l'ouest -1999 in (COMIFER, 2013)

Nrest : Effet direct des restitutions animales volailles

Tableau 9 B – Quantités d'éléments excrétés (en g/animal sauf Cu et Zn en mg/animal) : filières biologiques, label et palmipèdes à foie gras

N°	TYPE DE PRODUCTION	CATEGORIE	Dans le bâtiment					Sur le parcours					Total							
			N	P205	K2O	CaO	Cu	Zn	N	P205	K2O	CaO	Cu	Zn	N	P205	K2O	CaO	Cu	Zn
25	Biologique	Poulet (bâtiments fixes)	116	56	54	42	122	452	39	19	18	14	41	151	154	74	72	56	163	
26	Biologique	Poulet (cabanes mobiles)	97	47	44	35	102	376	65	31	29	24	68	251	162	79	73	59	169	
27	Biologique	Pintade (bâtiments fixes)	96	56	47	44	104	459	32	19	16	15	35	153	128	75	63	59	139	
28	Biologique	Pintade (cabanes mobiles)	65	38	32	30	71	314	43	25	21	20	47	209	108	63	54	50	118	
29	Biologique	Dinde à rôti	127	68	82	59	132	560	42	23	27	20	44	187	170	91	110	79	175	
30 M	Label	Dinde de découpe (mâle)	477	254	251	209	463	1989	159	85	84	70	154	663	636	338	335	279	617	
30 F	Label	Dinde de découpe (femelle)	272	143	149	122	259	1117	91	48	50	41	86	372	362	191	189	163	346	
31	Label	Poulet (bâtiments fixes)	93	36	45	29	81	514	81	12	15	10	27	171	124	48	59	39	107	
32	Label	Poulet (cabanes mobiles)	88	34	39	28	72	465	58	23	26	19	48	310	146	57	65	47	121	
33	Label	Pintade	95	54	46	43	102	506	32	18	15	14	34	169	127	73	62	57	136	
34	Label	Dinde à rôti	336	163	146	152	251	1116	112	54	49	51	84	372	448	217	194	202	335	
35	Label	Canette de Barbarie	68	33	39	29	77	370	45	22	26	19	51	247	113	56	64	48	128	
36	Label	Chapon	271	111	118	107	246	1243	90	37	39	36	82	414	362	147	157	143	328	
37	Label	Mini chapon	208	85	92	84	187	943	69	28	31	28	62	314	278	113	123	112	249	
38	Label	Chapon de pintade	173	82	85	78	166	886	58	27	28	26	55	295	231	110	114	104	221	
39	Label	Poularde	210	86	90	78	180	867	70	29	30	26	60	289	280	115	120	104	239	
40	Label	Caille	13	6	8	7	10	59	4	2	3	2	3	20	18	8	10	9	13	
41	Palmipèdes à FG	Canard Mulard PAG ext	55	23	26	27	61	283	219	94	103	106	244	1133	273	117	129	133	305	
42	Palmipèdes à FG	Canard Mulard PAG int	151	60	71	68	146	643	151	60	71	68	146	643	301	120	143	135	292	
43	Palmipèdes à FG	Canard Mulard gras	97	47	31	102	148	541	0	0	0	0	0	97	47	31	102	148		
44	Palmipèdes à FG	Oie PAG	181	83	90	93	136	367	181	83	90	93	136	367	361	166	180	187	271	
45	Palmipèdes à FG	Oie Grasse	177	76	61	11	215	609	0	0	0	0	0	177	76	61	11	215		

Effet direct en kg N/ha des restitutions pour les volailles - Référence CORPEN - juin 2013 (ITAVI, 2013)

Nexp : Export par le pâturage

Les valeurs moyennes utilisées pour les calculs de cette étude sont :

- Export d'herbe par les bovins : 15kg MS/jour/UGB
- Valeur de l'herbe : 25UN/tMS

Approche économique

Sources : Réseau Entraid - Chambre d'agriculture

Travaux agricoles

Charges de culture	Coûts estimés pour 1 passage en €/ha
Travail du sol	35 €
Semis	35 €
Pulvérisation produit phytopharmaceutique	7 €
Epannage minéral	7 €
Epannage organique	45 €
Récolte céréale / oléagineux / légumineuses	100 €
Récolte d'herbe	120 €

Intrants

Produits phytopharmaceutiques	20 €/IFT
Azote	1 €/UN

Prix de vente

Productions	Prix de vente moyen
Blé	25 €/q
Orge	24 €/q
Orge AB	28 €/q
Maïs ensilage	100 €/tMS
Maïs grain	175 €/t
Colza	60 €/q
Betterave fourragère	32 €/tMS
Méteil AB	25 €/q
Pois	30 €/q
Lupin	60 €/q
Fèverole AB	40 €/q
Foin de luzerne	140 €/tMS
Foin de prairie temporaire	170 €/tMS