

Suivi lysimétrique de l'azote nitrique dans le cadre du Programme de Gestion Durable de l'Azote (PGDA) en agriculture



Ce document doit être cité de la manière suivante :

Vandenberghé C., Lefébure K., Colinet G., 2024 *Suivi lysimétrique de l'azote nitrique dans le cadre du Programme de Gestion Durable de l'Azote (PGDA) en agriculture*. Dossier GRENeRA **24-05**, 36 p. In Bergiers G.^[1], De Toffoli M.^[2], Vandenberghé C.^[3], Bachelart F.³, Houtart A.³, Imbrecht O.², Lefébure K.³, Durenne B.¹, Huyghebaert B.¹, Lambert R.², Colinet G.³, 2025. *Programme de gestion durable de l'azote en agriculture wallonne et volet eau du programme wallon de réduction des pesticides – Rapport d'activités final 2024 des membres scientifiques de la Structure d'encadrement PROTECT'eau*. Centre wallon de Recherches agronomiques, Université catholique de Louvain et Université de Liège - Gembloux Agro-Bio Tech.

Table des matières

1. INTRODUCTION.....	2
2. CONTEXTE	3
3. DESCRIPTION DES SITES D'ÉTUDE.....	5
3.1. HESBAYE	5
3.2. GEMBLOUX AGRO-BIO TECH.....	7
3.2.1. <i>Cultures annuelles</i>	7
3.2.2. <i>Couvert prairial</i>	8
4. CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES.....	9
5. SUIVI LYSIMÉTRIQUE EN CULTURE ANNUELLE.....	10
5.1. INTRODUCTION.....	10
5.2. GROSSE PIERRE CHEMIN DE FER.....	12
5.3. GROS THIER BOVENISTIER.....	14
5.4. SOLE 4	17
5.5. HAUTE BOVA	20
5.6. RETROSPECTIVE SUR LES QUATRE PARCELLES DE HESBAYE.....	22
5.7. EXPERIMENTATION SOL RESIDUS	25
6. SUIVI LYSIMETRIQUE EN PRAIRIE.....	29
6.1. INTRODUCTION.....	29
6.2. RESULTATS.....	30
6.3. CONCLUSION	31

^[1] Centre wallon de Recherches agronomiques

^[2] Earth and Life Institute (UCLouvain)

^[3] Gembloux Agro-Bio Tech (ULiège) - GRENeRA

1. Introduction

Depuis le milieu des années 1970, la concentration en nitrate dans les eaux souterraines a significativement augmenté en Wallonie (Vandenbergh, 2010). Cette dégradation de la qualité de l'eau est partiellement liée à l'évolution de l'agriculture (augmentation du cheptel, augmentation des superficies dévolues à la culture du maïs et de la pomme de terre, diminution des superficies de prairie, augmentation de l'utilisation d'azote minéral et organique), les secteurs « industriel » et « domestique » ayant également eu un impact sur celle-ci.

La surveillance de la qualité des eaux en Wallonie est organisée au travers du « Survey Nitrate » (Cellule Etat de l'Environnement Wallon, 2007) qui est constitué de près d'un millier de points d'observation dans les eaux souterraines. Le Survey Nitrate, tel qu'il est réalisé, présente une vue d'ensemble de l'état (en termes de concentration en nitrate) des eaux souterraines, mais ne permet pas de distinguer l'impact d'une politique environnementale mise en place pour tel ou tel secteur d'activités (agricole, industriel ou domestique).

Par ailleurs, le transit du nitrate dans la zone insaturée n'est pas encore complètement connu à l'heure actuelle. L'utilisation de lysimètres s'est révélée être un moyen efficace pour lever partiellement et dans un délai raisonnable ces inconnues. L'outil lysimétrique permet ainsi l'étude de la migration en profondeur d'éléments dans le but de réaliser des bilans entrées – sorties.

Depuis plusieurs décennies, l'utilisation de lysimètres a en effet permis d'importantes avancées dans la compréhension des processus impliqués dans la contamination des ressources en eaux souterraines par les produits phytosanitaires, le nitrate ou les micro-organismes notamment (Muller J-C., 1996 ; Goss et al, 2010).

2. Contexte

En 2003, six lysimètres ont été mis en place sur des parcelles agricoles en Hesbaye, région à vocation principalement légumière. Ces lysimètres permettent le suivi de la lixiviation du nitrate au-delà de la zone racinaire. Ce suivi a pour objectifs de :

- fournir rapidement, par rapport au temps de réponse d'un aquifère, et de manière ciblée au secteur agricole, une assurance quant à la pertinence des normes d'épandage et des références APL¹ (Dossier GRENeRA 19-03) définies dans le cadre du PGDA (Programme de Gestion Durable de l'Azote) pour évaluer la bonne gestion de l'azote ;
- vérifier l'adéquation entre ces valeurs de référence, les conseils de fumure et l'objectif de préservation de la qualité de l'eau ;
- apporter un éclairage et des conseils sur les pratiques et rotations culturales adéquates en termes de respect de la qualité de l'eau et celles qui sont à revoir ou à éviter.

Cette étude a fait l'objet de quatre conventions de recherche entre 2003 et 2013, exécutées par GRENeRA (Axe Echanges Eau-Sol-Plante – Université de Liège, Gembloux Agro-Bio Tech) en collaboration avec l'asbl Epuvaleau et l'asbl Centre Provincial Liégeois des Productions Végétales et Maraîchères (CPL Végémar)². La dernière convention (2010-2013) s'intitulait « Suivi lysimétrique de la lixiviation de l'azote nitrique et expérimentation en matière de fertilisation azotée et de successions culturales en cultures industrielles légumières » (Deneufbourg *et al.*, 2013) et a été financée par le Service Public de Wallonie (DGO3).

Plusieurs expérimentations ont ainsi été menées à l'aplomb des lysimètres afin de tester l'impact d'une réduction des niveaux de fertilisation et de l'introduction de Cultures Intermédiaires Piège à Nitrate (CIPAN) dans la rotation sur les rendements des cultures, le reliquat azoté du sol et la concentration en nitrate dans l'eau qui percolé sous la zone racinaire.

Les lysimètres exploités depuis 2003 ont montré leur efficacité pour assurer le suivi de la lixiviation de l'azote nitrique en relation avec les pratiques agricoles (Deneufbourg *et al.*, 2013). Ils récoltent une fraction de la pluviométrie représentative de la quantité d'eau en voie de migration vers les eaux souterraines et permettent d'en faire un suivi qualitatif et quantitatif. Les lysimètres ont également apporté un éclairage sur la relation existant entre l'APL et la qualité de l'eau de percolation qui en résulte ; ils ont ainsi montré que l'indicateur environnemental APL donne une tendance correcte sur la quantité de nitrate qui sera présente l'année suivante dans les eaux de percolation à une profondeur où il ne sera pas récupérable par la culture suivante. Les valeurs mesurées en termes de lixiviation d'azote nitrique montrent la nécessité et la pertinence des normes d'épandage et du code de bonnes pratiques agricoles. Par ailleurs, l'outil lysimétrique a clairement mis en évidence que la qualité des eaux de percolation sous les terres agricoles doit être appréhendée selon une approche globale et intégrée des rotations et successions culturales complètes, en ce compris la fertilisation raisonnée et les CIPAN adaptées à chaque culture présente dans la rotation.

*Nous renvoyons au rapport d'activité final (Deneufbourg *et al.*, 2013) des études précédentes pour l'ensemble des résultats, interprétations et conclusions.*

¹ Azote Potentiellement Lessivable.

² Rapports disponibles sur www.gembloux.ulg.ac.be/gp/grenera/grenera_rapports_activites_lysimetres.htm.

En 2017, des bilans pluriannuels ont été réalisés sur une période de plus de dix ans pour quantifier à cette échelle temporelle, les pertes d'azote (organique et minéral) par lixiviation du nitrate (Dossier GRENeRA 17-04).

Depuis avril 2018, GRENeRA suit également les flux de nitrate des quatre lysimètres installés sur la plateforme d'essais « Sol Résidus » dans les parcelles expérimentales de Gembloux Agro-Bio Tech.

En 2021, une synthèse réalisée à travers les quatre questions suivantes a été réalisée par Vandenberghe et al. (2021) :

1. l'APL est-il un bon indicateur de la concentration en nitrate de l'eau à la base de la zone racinaire ?
2. quel est l'impact du climat annuel (température, pluviométrie) sur cette relation ?
3. quelles sont les limites de cet indicateur ?
4. La culture et la gestion de l'azote ont-elles bien un impact sur la qualité de l'eau ?

Avec l'appui d'autres financements du Service Public de Wallonie, GRENeRA suit depuis 2013 les flux ainsi que la concentration en produits phytopharmaceutiques de l'eau de percolation dans ces lysimètres (Vandenberghe *et al.*, 2019 ; Vandenberghe *et al.*, 2020).

En 2018, 10 lysimètres expérimentaux ont été restaurés. En 2019, un couvert prairial a été semée sur ces derniers.

La saison de drainage s'étale généralement sur deux années civiles, entre le mois de novembre d'une année jusqu'au mois de mai de l'année suivante. Des exceptions ont déjà été observées, notamment des reprises de drainage en juin suite à d'importants épisodes de précipitations au printemps.

Durant les saisons de drainage 2017-2018, 2018-2019, les flux d'eau à l'exutoire des lysimètres ont été limités. Une quantité potentiellement importante d'azote s'est donc accumulée sous la zone racinaire mais au-dessus de l'exutoire du lysimètre. Une attention particulière a été portée sur le devenir de cette éventuelle accumulation d'azote dans la zone sous racinaire.

3. Description des sites d'étude

3.1. Hesbaye

Les lysimètres de Hesbaye sont installés dans quatre parcelles situées à proximité de Waremme au sein de trois exploitations agricoles faisant partie du « Survey Surfaces Agricoles ». Les parcelles équipées de lysimètres sont également suivies par le CPL Végémar³ qui contribue notamment à la gestion du périmètre irrigué à partir des eaux usées de l'usine de surgélation et de conditionnement de légumes Hesbaye Frost s.a.

Trois lysimètres ont été placés dans des parcelles irrigables intégrant des cultures légumières industrielles en rotation avec les grandes cultures classiques. Le quatrième lysimètre est situé dans une parcelle non irrigable (Haute Bova) cultivée uniquement de grandes cultures classiques (céréales, betterave, chicorée, pois) avec apport régulier de matière organique.

Les parcelles (figure 2) dans lesquelles sont installés les lysimètres sont dénommées selon les noms utilisés par les agriculteurs, soit :

- Grosse Pierre Chemin de Fer,
- Gros Thier Bovenistier,
- Haute Bova et
- Sole 4.

Les sols caractéristiques des parcelles dans lesquelles sont installés les lysimètres sont des limons profonds à drainage favorable. Chaque site a été caractérisé d'un point de vue pédologique par un sondage à la tarière, jusqu'à la profondeur de 2m (Fonder *et al.*, 2005).

Les lysimètres sont des cylindres métalliques d'une hauteur de 150 cm et de 113 cm de diamètre (1 m² de surface). Une fois remplis de terre, ils sont placés à 2 mètres de profondeur, laissant ainsi 50 cm entre le sommet du lysimètre et le niveau du sol pour travailler le sol (labour...) (figure 1).

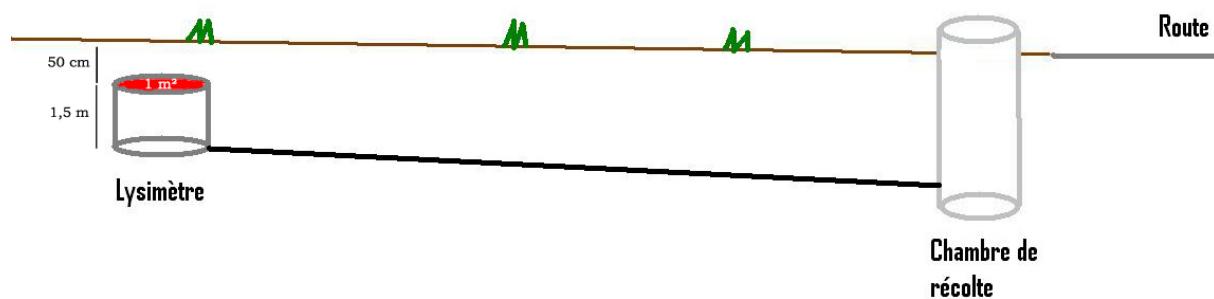


Figure 1. Coupe d'un dispositif lysimétrique (Vandenbergh et al., 2021).

³ Centre Provincial Liégeois de productions VEGEtales et MARaîchères

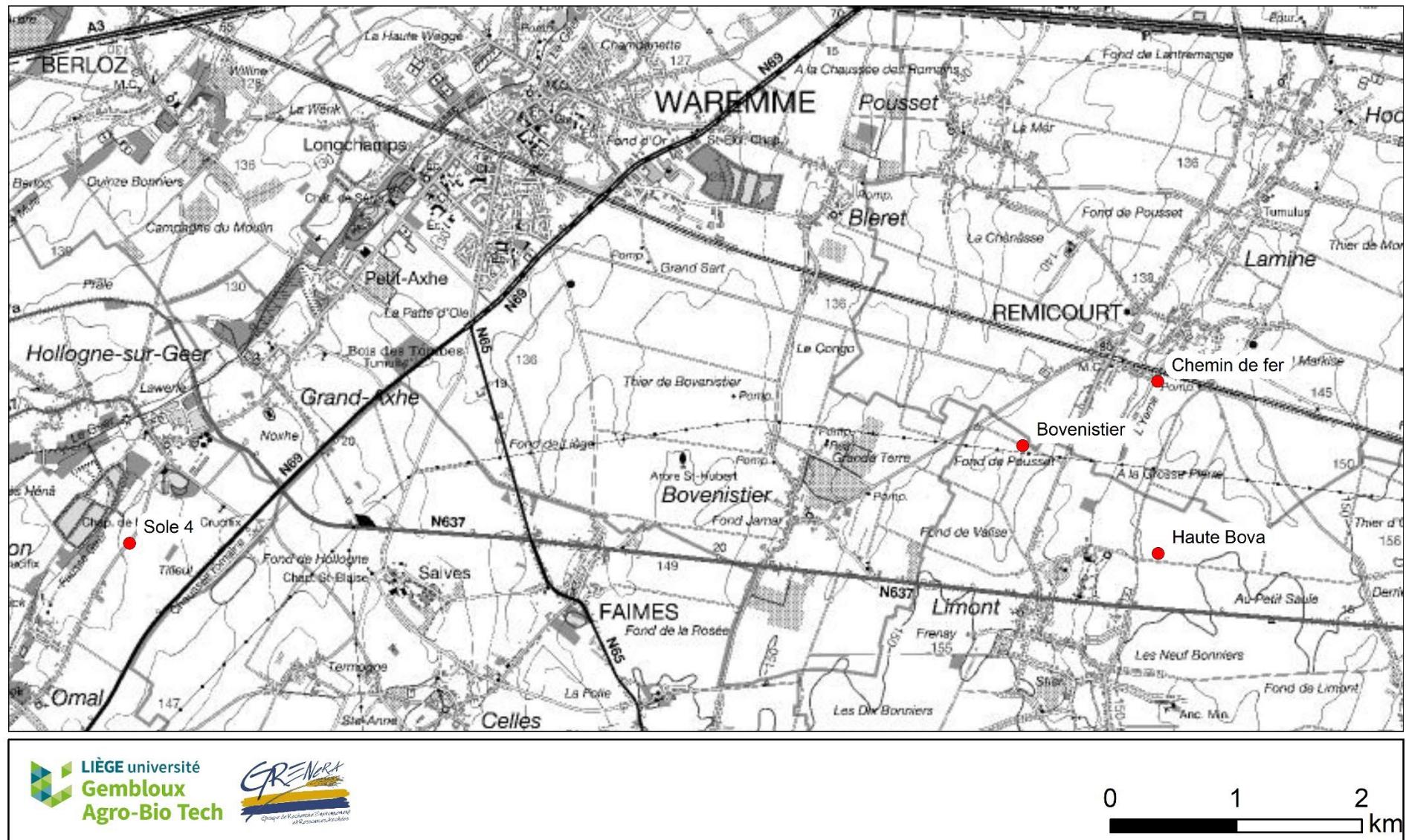


Figure 2. Carte de localisation des lysimètres Grosse Pierre Chemin de Fer, Gros Thier Bovenistier, Haute Bova et Sole 4.

3.2. Gembloux Agro-Bio Tech

3.2.1. *Cultures annuelles*

Les lysimètres ‘Sol Résidus (SR)’ ont été installés en 2008 lors de la mise en place de l’expérimentation Sol Résidus – sol couvert. Cette expérimentation vise à étudier l’impact de la gestion des résidus de cultures et de la gestion du travail du sol sur différents paramètres.

Les sols des quatre parcelles de l’expérimentation Sol Résidus équipées de lysimètres sont des sols limoneux profonds à drainage naturel favorable et à horizon B textural (figure 3).



Figure 3. Contexte pédologique à proximité des parcelles de l’expérimentation Sol Résidus.

Le dispositif croise deux facteurs expérimentaux :

1. gestion des résidus⁴ (exportés ou laissés sur place)
2. gestion du travail du sol (labour à 25 cm ou travail superficiel).

Ces quatre lysimètres sont suivis depuis 2018 par GRENeRA.

⁴ Paille de céréale

3.2.2. Couvert prairial

En 2019, un couvert prairial a été semé sur les dix lysimètres ‘prairie’ (photo ci-dessous). Les itinéraires culturaux mis en œuvre sur ces lysimètres devront permettre d’évaluer l’impact des dates d’apports de fertilisants organiques, notamment en entrée et en sortie d’hiver, sur la concentration en nitrate de l’eau de percolation.

Les modalités de fertilisations sont reprises dans le tableau 1.

Tableau 1. Phasage de l’expérimentation. Fertilisation 1 : 80 kg N ha⁻¹ (organique). Fertilisation 2 : 60 kg N ha⁻¹. Fertilisation 3 : 40 kg N ha⁻¹. Fertilisation 4 : 80 kg N ha⁻¹ (organique).

Fertilisation Modalité	1	2	3	4
A	15 janvier	± 15 mai	Fin juin	-
B	1 ^{er} mars	± 15 mai	Fin juin	± 30 août
C	1 ^{er} mars	± 15 mai	Fin juin	± 30 septembre
D	1 ^{er} mars	± 15 mai	Fin juin	± 30 octobre
E	1 ^{er} mars	± 15 mai	Fin juin	-



4. Conditions météorologiques

Les conditions météorologiques, principalement la température et les précipitations, conditionnent les flux d'eau à travers la zone racinaire.

Depuis plusieurs années, les conditions météorologiques observées en Belgique présentent une variabilité interannuelle importante (tableau 2).

L'IRM qualifie l'hiver 2021-2022 comme « plutôt chaud et humide », le printemps 2022 comme « sec, chaud et ensoleillé » et l'été comme « extrêmement sec, chaud et ensoleillé ».

L'automne 2022 est qualifié de chaud (parmi les trois plus chaud depuis 1991 et normalement humide. L'hiver 2022-2023 est globalement dans la normale tant en température qu'en pluviométrie ‘totale’ (ce qui n'exclut pas des périodes de pluie et de sécheresse au cours de cette saison).

L'année 2023 a globalement été assez chaude (parmi les trois plus chaudes depuis 1991) et plus humide que la normale avec trois mois (mars, juillet et novembre) très pluvieux.

L'année 2024 est l'année la plus pluvieuse depuis 1991 (1171 mm observés à Uccle en comparaison à une normale de 837 mm) alors que la température moyenne est, elle, conforme « aux attentes ».

Tableau 2. Synthèse mensuelle des données météorologiques de la station IRM à Uccle (IRM, 2024).

	Température [°C]				Précipitation [mm]			
	2024	2023	2022	Normale	2024	2023	2022	Normale
Janvier	3,7	5,2	4,3	3,7	82	91	67	75,5
Février	8,3	5,9	6,6	4,2	127	13	94	65,1
Mars	9,1	7,5	8,6	7,1	79	127	2	59,3
Avril	10,9	9,0	10,1	10,4	81	66	37	46,7
Mai	14,9	14,0	15,1	13,9	125	49	69	59,7
Juin	16,0	20,3	17,7	16,7	74	41	88	70,8
Juillet	18,9	18,4	19,6	18,7	97	131	5	76,9
Août	19,8	18,1	21,4	18,4	153	108	18	86,5
Septembre	15,4	18,8	15,1	15,2	124	65	105	65,3
Octobre	12,6	13,6	14,4	11,3	68	87	41	67,8
Novembre	7,3	7,8	9,1	7,2	84	132	65	76,2
Décembre	5,3	7,0	4,2	4,3	77	102	111	87,4

(en gras, valeurs parmi les trois plus élevées/plus faibles depuis 1991)

5. Suivi lysimétrique en culture annuelle

5.1. Introduction

Les résultats du suivi lysimétrique sont présentés sur base des graphiques dont un exemple est repris sur la figure 4.

Le graphique A présente l'évolution des APL au cours du temps. Les mesures de la teneur en azote réalisées en dehors de la période s'étalant entre le 15 octobre et le 15 décembre ne sont pas présentées. Ces valeurs correspondent à l'indicateur du risque contamination de la ressource en eau. Lorsqu'aucune mesure APL n'a été réalisée (cas des lysimètres 'prairie'), ce graphique n'est pas présenté.

Le graphique B illustre l'évolution du cumul de la lixiviation de l'azote nitrique. Les valeurs (négatives) correspondent au produit du volume d'eau récolté à l'exutoire du lysimètre et de sa concentration en azote nitrique.

Le graphique C met en évidence le suivi de la concentration en nitrate dans les échantillons récoltés à l'exutoire du lysimètre.

Le graphique D présente le cumul des flux d'eau récoltés durant la période de drainage. Ces périodes de drainage s'étalent généralement l'hiver mais des précipitations printanières ou estivales conséquentes peuvent également induire une reprise de drainage.

Enfin, le graphique E permet d'appréhender la concentration moyenne en nitrate observée durant chaque épisode de drainage.

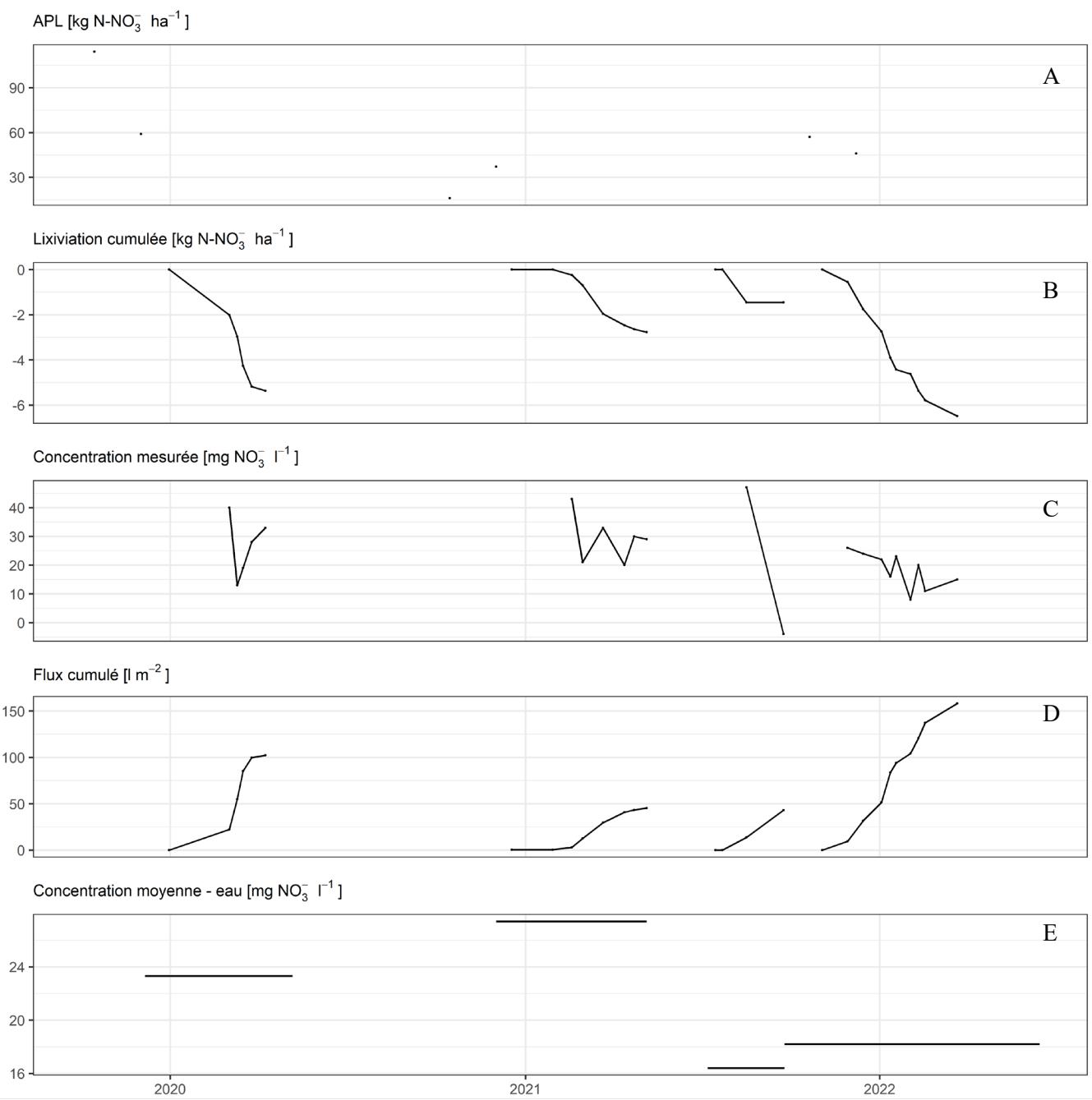


Figure 4. Suivi lysimétrique (exemple).

5.2. Grosse Pierre Chemin de fer

La parcelle Grosse Pierre Chemin de fer est suivie depuis 20 ans. L’itinéraire culturale des cinq dernières années peut être décrit comme suit.

En 2020, le froment a été fertilisé avec deux traitements pour un total de 132 kg N ha⁻¹. Après la récolte, du compost a été apporté sur la parcelle (169 kg N ha⁻¹) avant le semis d’une CIPAN.

En 2021, une culture de carottes a été installée sur la parcelle. Elle a été fertilisée avec 40 kg N ha⁻¹.

En 2022, la parcelle a été emblavée d’une double culture de légumes : des fèves (fertilisées avec 50 kg N.ha⁻¹) et des épinards (fertilisés avec 120 kg N.ha⁻¹).

En 2023, la parcelle a été successivement emblavée de pois, de haricot et d’une CIPAN.

En 2024, des betteraves ont été semées au printemps.

Les APL mesurés depuis 2020 sont repris dans le tableau 3.

Tableau 3. APL mesurés sur la parcelle Grosse Pierre Chemin de fer depuis 2020.

Année	Culture	APL octobre	Détails par couche	APL décembre	Détails par couche
2020	Froment	55	14	26	9
	CIPAN		28		8
			13		9
2021	Carotte	13	6	20	6
			3		8
			4		6
2022	Fève	18	3	71	30
	Epinard		6		33
			9		8
2023	Pois	116	34	95	14
	Haricot		45		36
	CIPAN		37		45
2024	Betterave	11	4	19	7
			4		7
			3		5

La diminution de l’APL entre octobre et décembre 2020 est principalement imputable au développement végétatif de la CIPAN. Le cumul de précipitation mesurée à la station météorologique de Geer (réseau Agromet) n’est que d’environ 60 mm.

La culture de carottes de 2021 a laissé des APL faibles. Entre les deux mesures, on constate une légère augmentation de la teneur en azote nitrique dans les couches 30-60 et 60-90 cm ainsi qu’une augmentation de l’APL, résultat des processus de minéralisation.

En octobre 2022, le faible reliquat est dû à la présence de repousses d’épinard qui, après le labour de la parcelle, se sont décomposées dans le sol pour augmenter le reliquat en décembre.

En 2023, la CIPAN a très partiellement résorbé le reliquat azoté induit par deux cultures de légumineuse.

En 2024, la betterave a laissé un reliquat azoté très réduit en automne.

La figure 5 présente les résultats du suivi lysimétrique récent.

Suite aux conditions météorologiques particulièrement pluvieuses observées en été 2021, des flux d’eau (environ 10 l) ont été mesurés à l’exutoire du lysimètre fin d’été. La concentration en nitrate était

d'environ 10 mg $\text{NO}_3^- \text{ l}^{-1}$. La concentration en nitrate observée durant la reprise de drainage est du même ordre de grandeur que celle observée à la fin de la période précédente.

Au cours de l'hiver 2021-2022, les flux d'eau ont été moindres que pour une année « normale » (environ 200 litres par an). L'hiver 2022-2023, plus pluvieux que le précédent, a été plus « normal » en termes de flux d'eau. Au cours de cet hiver, 8 kg $\text{N-NO}_3^- \text{ ha}^{-1}$ ont été lixivierés.

Dans les conditions de ce lysimètre, on observe au cours de ces deux périodes de percolation (hivers 2021-2022 et 2022-2023) que la concentration moyenne en nitrate est inférieure à la moitié de l'APL.

L'hiver 2023-2024 très pluvieux a occasionné une lixiviation de plus de 100 kg $\text{N-NO}_3^- \text{ ha}^{-1}$; bien plus que la simple différence de reliquat azoté entre décembre 2024 et février 2025 (54 kg $\text{N-NO}_3^- \text{ ha}^{-1}$). Conséquence de cette pluviométrie, plus de 400 l.m^{-2} ont été collectés à l'exutoire de ce lysimètre ; la concentration moyenne en nitrate au cours de la saison de percolation a été de 130 mg.l⁻¹.

L'examen de cette figure illustre qu'une concentration élevée est la combinaison d'un flux d'eau important et d'un niveau élevé d'APL. Ainsi, au cours de l'hiver 2022-2023, un APL moyen (71 kg $\text{N-NO}_3^- \text{ ha}^{-1}$ en décembre) n'a induit qu'une concentration moyenne en nitrate de 16 mg.l⁻¹.

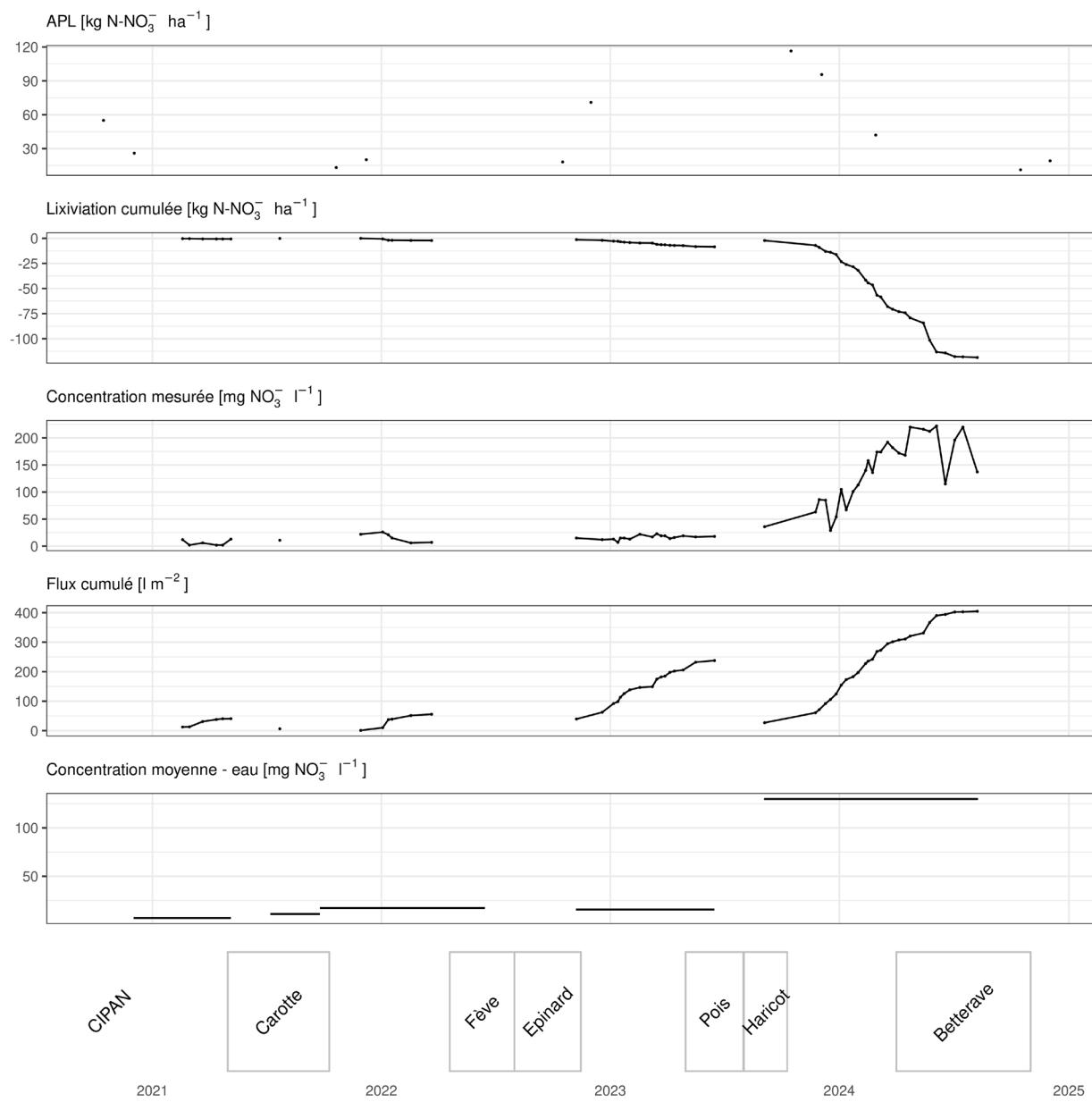


Figure 5. Suivi lysimétrique de la parcelle Grosse Pierre Chemin de fer.

5.3. Gros Thier Bovenistier

La parcelle Gros Thier Bovenistier est suivie depuis 20 ans. L'itinéraire culturelle des cinq dernières années peut être décrit comme suit.

En 2020, la parcelle a été emblavée d'une culture de carotte. Elle a été fertilisée en mai 2020 avec 60 kg N ha⁻¹. Cette parcelle a été irriguée.

Une culture de pomme de terre a été installée en 2021. La culture a été fertilisée en deux fois pour un total de 139 kg N ha⁻¹.

Une culture de froment a été semée à l'automne 2021. Elle a été fertilisée en deux applications pour un total de 140 kg N.ha⁻¹. Après la récolte, un apport de compost (équivalent à 204 kg N.ha⁻¹) a été réalisé en aout 2022.

En 2023, 41 kg N.ha⁻¹ ont été apporté pour la culture des fèves et 175 kg N.ha⁻¹ pour les épinards.

En 2024, le lin n'a pas été fertilisé et une CIPAN a été semée après la récolte du lin.

Les APL mesurés depuis 2020 sont repris dans le tableau 4.

Les mesures APL réalisées à deux reprises en 2020 ne montrent pas de lixiviation importante dans le 0-90 cm. Un reliquat 'sortie d'hiver' a été réalisé en mars 2021. La teneur en azote nitrique y était alors de 39 kg N-NO₃⁻ ha⁻¹.

Les APL mesurés après la culture de pomme de terre de 2021 sont respectivement de 51 et 79 kg N-NO₃⁻ ha⁻¹ en octobre et en décembre. Un reliquat 'sortie d'hiver' a été réalisé en janvier 2022 ; un mois environ après la dernière mesure APL. La teneur en azote nitrique n'y était plus que de 40 kg N-NO₃⁻ ha⁻¹. On peut donc raisonnablement penser qu'au moins 40 kg N-NO₃⁻ ha⁻¹ ont été lixivierés.

En 2022, la CIPAN semée après la récolte du froment a permis des niveaux d'APL très bas.

En 2023, une diminution de l'APL a été observée entre octobre et décembre due à la présence d'une CIPAN et à l'importante pluviométrie observée.

En 2024, l'APL après récolte de lin est passé de 79 à 29 kg N-NO₃⁻ ha⁻¹ ; combinaison de l'impact de la CIPAN et de la pluviométrie.

Tableau 4. APL mesurés sur la parcelle Gros Thier Bovenistier depuis 2020.

Année	Culture	APL octobre	Détails par couche	APL décembre	Détails par couche
2020	Carotte	32	10	37	10
			14		15
			8		12
2021	Pomme de terre	51	23	79	23
			14		31
			14		25
2022	Froment	23	5	6	1
			13		1
			5		4
2023	Fève	187	91	76	8
			56		27
			40		41
2024	Lin	79	9	29	7
			33		9
			37		13

La figure 6 présente les résultats du suivi lysimétrique récent.

Après la culture de carotte, environ 55 litres ont été récoltés à l'exutoire du lysimètre. Au total, la perte d'azote nitrique par lixiviation est inférieure à 1 kg N-NO₃⁻ ha⁻¹. Ces observations sont en adéquation avec les mesures APL et de reliquat 'sortie d'hiver' réalisées entre octobre 2020 et mars 2021.

En 2021, les conditions météorologiques ont conduit à une reprise de drainage durant l'été ; favorisée le faible enracinement de la culture de pomme de terre. Environ 70 litres ont été collectés avec une concentration moyenne de 14 mg NO₃⁻ l⁻¹. Le flux d'eau a lixivié environ 2 kg N-NO₃⁻ ha⁻¹.

Durant la saison de drainage qui suit la culture de pomme de terre (2021-2022), environ 80 litres ont percolé jusqu'à l'exutoire du lysimètre avec une concentration moyenne de 21 mg NO₃⁻ l⁻¹. Les mesures APL et de reliquat 'sortie d'hiver' ont mis en évidence une lixiviation d'au moins 40 kg N-NO₃⁻ ha⁻¹. Cependant, à l'exutoire du lysimètre, le flux mesuré n'a été que de 4 kg N-NO₃⁻ ha⁻¹. En absence de sécheresse, le suivi lysimétrique permettra d'évaluer la capacité de la culture de froment à valoriser l'azote nitrique lixivié au-delà des 90 cm de profondeur.

Au cours de l'hiver 2022-2023, la présence d'une CIPAN après la culture de froment a permis de limiter le flux de nitrate avec une concentration moyenne au cours de cette période de 12 mg NO₃⁻ l⁻¹.

Au cours de l'hiver 2023-2024, la présence d'une CIPAN après la récolte des épinards a permis de limiter le flux d'azote nitrique bien que la percolation ait été importante (323 l.m⁻²). La concentration moyenne au cours de cette période a été de 22 mg NO₃⁻ l⁻¹.

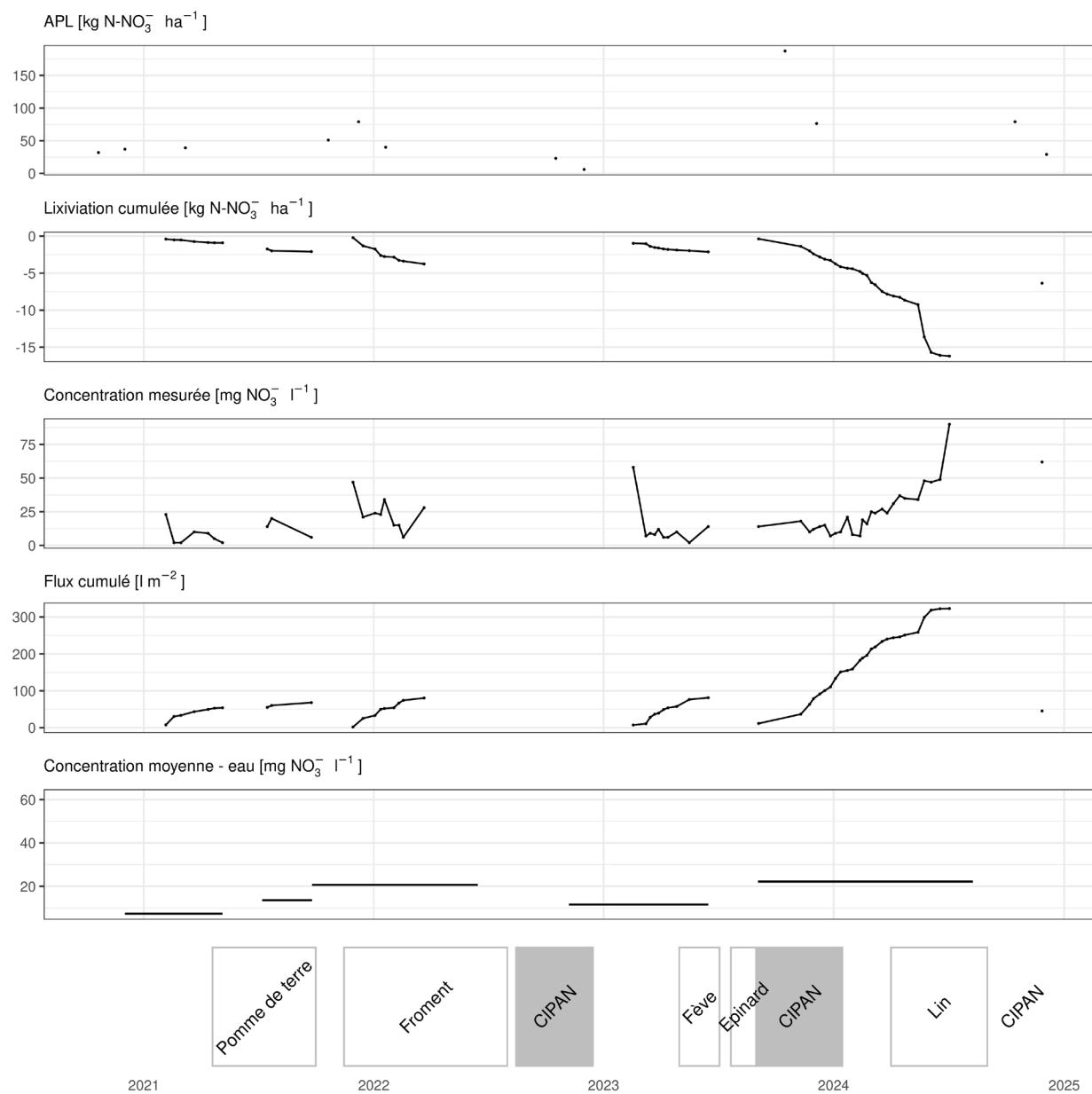


Figure 6. Suivi lysimétrique de la parcelle Gros Thier Bovenistier.

5.4. Sole 4

La parcelle Sole 4 est suivie depuis 20 ans. L’itinéraire culturelle des cinq dernières années peut être décrit comme suit.

La culture de pomme de terre de 2020 a été fertilisée par trois applications entre avril et juin pour un total de 94 kg N ha⁻¹. La parcelle a vraisemblablement été irriguée.

Après la récolte de pomme de terre une culture de froment a été semée. Elle a été fertilisée à trois reprises entre mars et juin pour un total de 193 kg N ha⁻¹.

Après la récolte du froment, une culture d’épinard a été semée avant l’hiver et fertilisée en deux applications pour un total de 214 kg N.ha⁻¹. Cette culture a été suivie au cours de l’été 2022 d’une culture de haricot qui a été fertilisée avec 59 kg N.ha⁻¹.

Un froment a ensuite été semé début d’automne 2022. Le froment a été suivi d’une CIPAN en automne 2023.

Les APL mesurés depuis 2020 sont repris dans le tableau 5.

Tableau 5. APL mesurés sur la parcelle Sole 4 depuis 2020.

Année	Culture	APL octobre	Détails par couche	APL décembre	Détails par couche
2020	Pomme de terre	137	44	111	28
			55		45
			38		38
2021	Froment	53	27	66	9
			18		43
			8		14
2022	Epinard	162	70	145	43
			76		68
			16		34
2023	Froment	32	9	12	6
			16		4
			7		2
2024	Carotte	5	2	8	3
			2		3
			1		2

Les valeurs APL mesurées en 2020 après la culture de pomme de terre sont assez élevées et diminuent entre les deux dates de mesure. La diminution de l’APL entre les deux dates n’est pas imputable au développement végétatif du froment car durant cette période, le système racinaire de la culture ne lui permet d’explorer la couche 30-60 cm.

Bien que l’année 2020 ait été particulièrement chaude et sèche, le déficit hydrique a vraisemblablement été compensé par l’irrigation. La diminution de la teneur en azote nitrique (30 kg N-NO₃ ha⁻¹) dans les couches 0-30 et 30-60 cm est donc vraisemblablement imputable à la lixiviation.

Des mesures de reliquats ‘sortie d’hiver’ ont été réalisés le 3 janvier et le 17 février 2021. Lors de la première mesure, les teneurs en azote nitrique étaient 6, 23 et 41 kg N-NO₃ ha⁻¹ dans les trois couches, soit un total de 70 kg N-NO₃ ha⁻¹. Lors de la seconde mesure, les teneurs n’étaient plus que de 6, 4 et 6 kg N-NO₃ ha⁻¹ dans les trois couches ; soit un total de 16 kg N-NO₃ ha⁻¹. Entre ces deux dates de prélèvement, la station météorologiques de Geer a enregistré une pluviométrie de 116 mm.

Entre la première mesure APL (137 kg N-NO₃⁻ ha⁻¹) et la dernière mesure de reliquat (16 kg N-NO₃⁻ ha⁻¹), au moins 110 kg N-NO₃⁻ ha⁻¹ ont été lixivierés. Au cours de cette période, la station de Geer a enregistré 223 mm de pluie.

Les dernières mesures APL réalisées en 2021 mettent également en évidence le couplage des processus (lixiviation, minéralisation et prélèvement) entre les mois d'octobre et de décembre. La teneur en azote nitrique est plus importante en décembre qu'en octobre. Cependant, on constate une diminution la teneur dans la couche 0-30 cm. Une partie de ce stock a été valorisé par la culture d'épinard. Une autre a été lixivierée car la teneur en azote nitrique dans les couches 30-60 et 60-90 cm augmente.

En 2022, la succession épinard-haricot laisse logiquement un reliquat azoté élevé dans le sol en début de période de lixiviation.

En 2023, la présence d'une CIPAN semée après la récolte du froment permet de maintenir un niveau APL assez bas.

En 2024, la culture de la carotte a laissé, comme généralement, un niveau d'APL également assez bas.

La figure 7 présente les résultats du suivi lysimétrique récent.

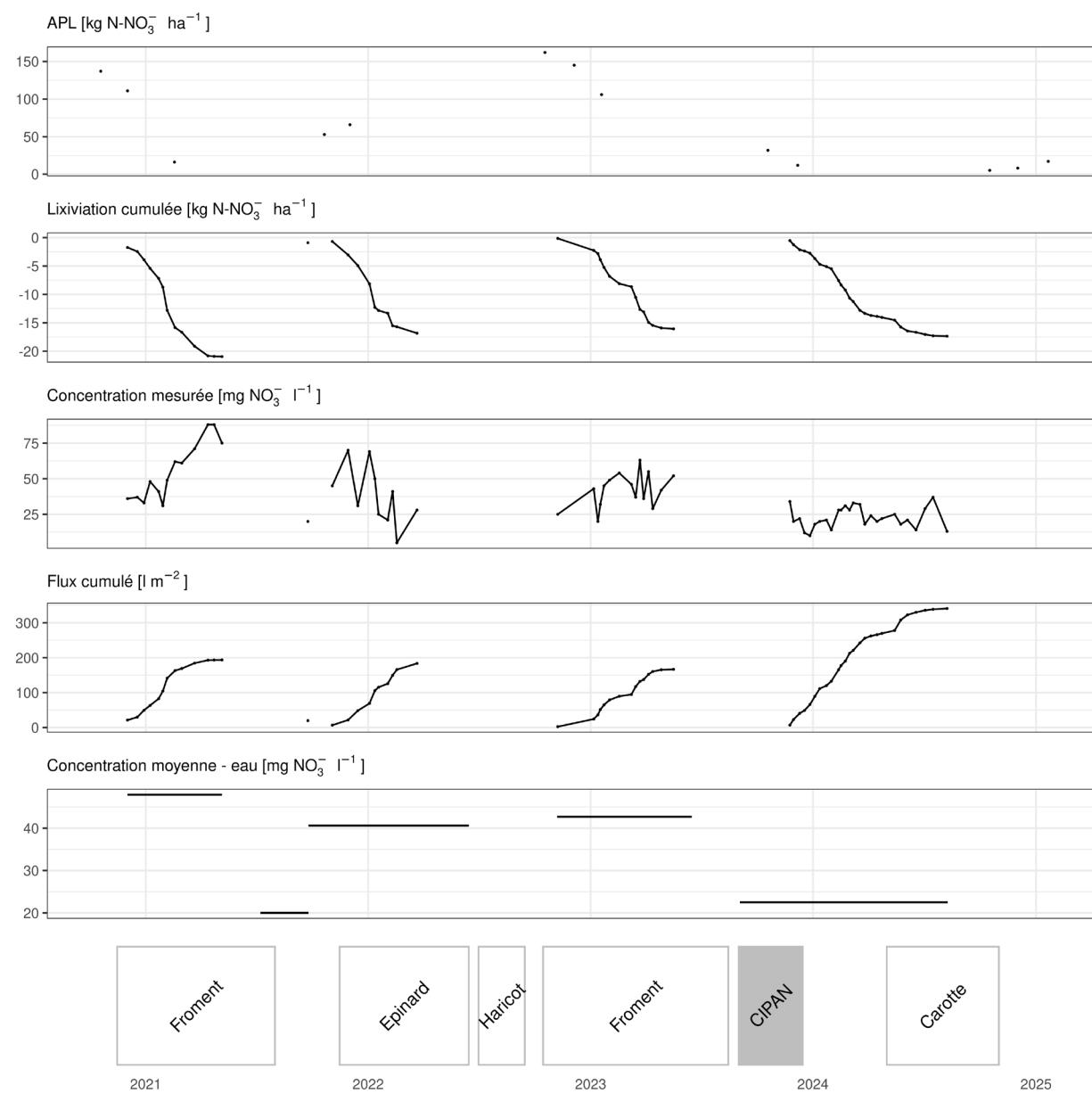


Figure 7. Suivi lysimétrique de la parcelle Sole 4.

Durant la période de drainage 2020-2021, la concentration en nitrate augmente jusqu'à 88 mg $\text{NO}_3^- \text{ l}^{-1}$ avant de légèrement diminuer. Durant cette période, 21 kg $\text{N-NO}_3^- \text{ ha}^{-1}$ ont été lixivieré jusqu'à l'exutoire du lysimètre.

Suite à l'été pluvieux, une reprise de drainage a été observée en septembre 2021 durant laquelle une vingtaine de litres ont été récoltés. La concentration en nitrate était alors de 20 mg $\text{NO}_3^- \text{ l}^{-1}$.

La concentration en nitrate observée durant la période de drainage 2021-2022 est largement supérieure à celle observée lors de la reprise de drainage. Il semblerait donc lors de la reprise de drainage, le transfert rapide, potentiellement lié à des flux préférentiels n'ait pas mobilisé l'ensemble du nitrate compris entre 90 cm et la base de lysimètre (200 cm).

Le pic de pollution lié à la lixiviation de minimum de 110 kg $\text{N-NO}_3^- \text{ ha}^{-1}$ dans le 0-90 cm a donc été atteint durant la période de lixiviation 2020-2021. Par la suite environ l'équivalent de 40 kg $\text{N-NO}_3^- \text{ ha}^{-1}$ a été récolté à l'exutoire du lysimètre. La culture de froment a donc valorisé environ 70 kg $\text{N-NO}_3^- \text{ ha}^{-1}$ situé entre 90 et 200 cm.

Les APL laissés après la culture de froment (2021) contribuent à la diminution de concentration en nitrate à l'exutoire du lysimètre.

Fin 2022, bien que ce reliquat soit élevé après la récolte des haricots, la présence de froment (avec son enracinement profond) a permis de limiter le flux d'azote à la base du lysimètre à 15 kg $\text{N-NO}_3^- \text{ ha}^{-1}$. La concentration moyenne de nitrate au cours de cette période à la base du lysimètre s'établit néanmoins à 45 mg $\text{NO}_3^- \text{ l}^{-1}$.

Au cours de l'hiver 2023-2024, le flux d'eau a été important (341 l.⁻²) mais vu le niveau bas d'APL, la concentration moyenne au cours de cette période a été de 23 mg $\text{NO}_3^- \text{ l}^{-1}$.

Au cours des quatre dernières périodes de lixiviation, l'APL a évolué entre 53 et 162 kg $\text{N-NO}_3^- \text{ ha}^{-1}$. La concentration en nitrate n'a cependant jamais, en moyenne de période de lixiviation, excédé 50 mg $\text{NO}_3^- \text{ l}^{-1}$.

5.5. Haute Bova

La parcelle Haute Bova est suivie depuis plus de 15 ans. L’itinéraire culturelle des cinq dernières années peut être décrit comme suit.

En 2020, la parcelle a été emblavée de chicorées. La culture n’a pas été fertilisée.

En 2021, la parcelle a été emblavée de froment. La culture a été fertilisée par trois apports totalisant 180 kg N ha⁻¹. Du fumier de bovin a été apporté sur la parcelle avant le semis d’une CIPAN.

En 2022, la parcelle a été emblavée de betterave. Cette culture a été fertilisée avec 60 kg N.ha⁻¹.

En 2023, la parcelle a été emblavée d’une culture de pois (fertilisé avec 65 kg N.ha⁻¹) qui a été suivi d’un froment d’hiver.

Les APL mesurés depuis 2020 sont repris dans le tableau 6.

Tableau 6. APL mesurés sur la parcelle Haute Bova depuis 2020.

Année	Culture	APL octobre	Détails par couche	APL décembre	Détails par couche
2020	Chicorée	18	11	37	14
			5		15
			2		8
2021	Froment + CIPAN	57	37	46	14
			13		17
			7		15
2022	Betterave	15	8	41	27
			4		5
			3		9
2023	Pois + CIPAN	124	62	128	15
			39		51
			23		62
2024	Froment + CIPAN	145	48	81	11
			65		31
			32		39

En 2020, les APL mesurés après l’arrachage des chicorées sont faibles. La minéralisation de la matière organique du sol et des résidus de culture et la lixiviation augmentent l’APL dans les trois couches entre octobre et décembre.

Une analyse du reliquat ‘sortie d’hiver’ a été réalisée le 19 janvier 2021. Le reliquat total était de 37 kg N-NO₃⁻ ha⁻¹, respectivement 12, 15 et 10 kg N-NO₃⁻ ha⁻¹ dans les couches 0-30, 30-60 et 60-90 cm.

La distribution du stock d’azote nitrique dans le sol est donc sensiblement comparable entre la mi-décembre et le 19 janvier. Ce constat ne permet cependant pas d’affirmer qu’aucune perte par lixiviation n’a eu lieu entre ces deux dates.

En 2021, une CIPAN a été semée. Sous l’action combinée de son prélèvement du nitrate et de la lixiviation (légère augmentation du stock dans la couche 30-90 cm), l’APL de décembre est inférieur à celui d’octobre.

Une analyse du reliquat ‘sortie d’hiver’ a été réalisée le 24 février 2022. Le reliquat total était de 86 kg N-NO₃⁻ ha⁻¹, respectivement 31, 29 et 26 kg N-NO₃⁻ ha⁻¹ dans les couches 0-30, 30-60 et 60-90 cm.

Cette dernière analyse met en évidence la minéralisation d'au moins 40 kg N-NO₃⁻ ha⁻¹ ainsi que la lixiviation du nitrate au moins vers les couches 30-60 et 60-90 cm.

Cet azote a logiquement bien été capté par la betterave, en témoigne le faible reliquat en début d'automne 2022 (15 kg N-NO₃⁻ ha⁻¹).

En 2023 et 2024, l'effet CIPAN a été peu marqué. Celle de 2023 a été assez vite détruite pour semer du froment et celle de 2024 est peu marqué suite à une faible levée de la CIPAN.

La figure 8 présente les résultats du suivi lysimétrique récent.

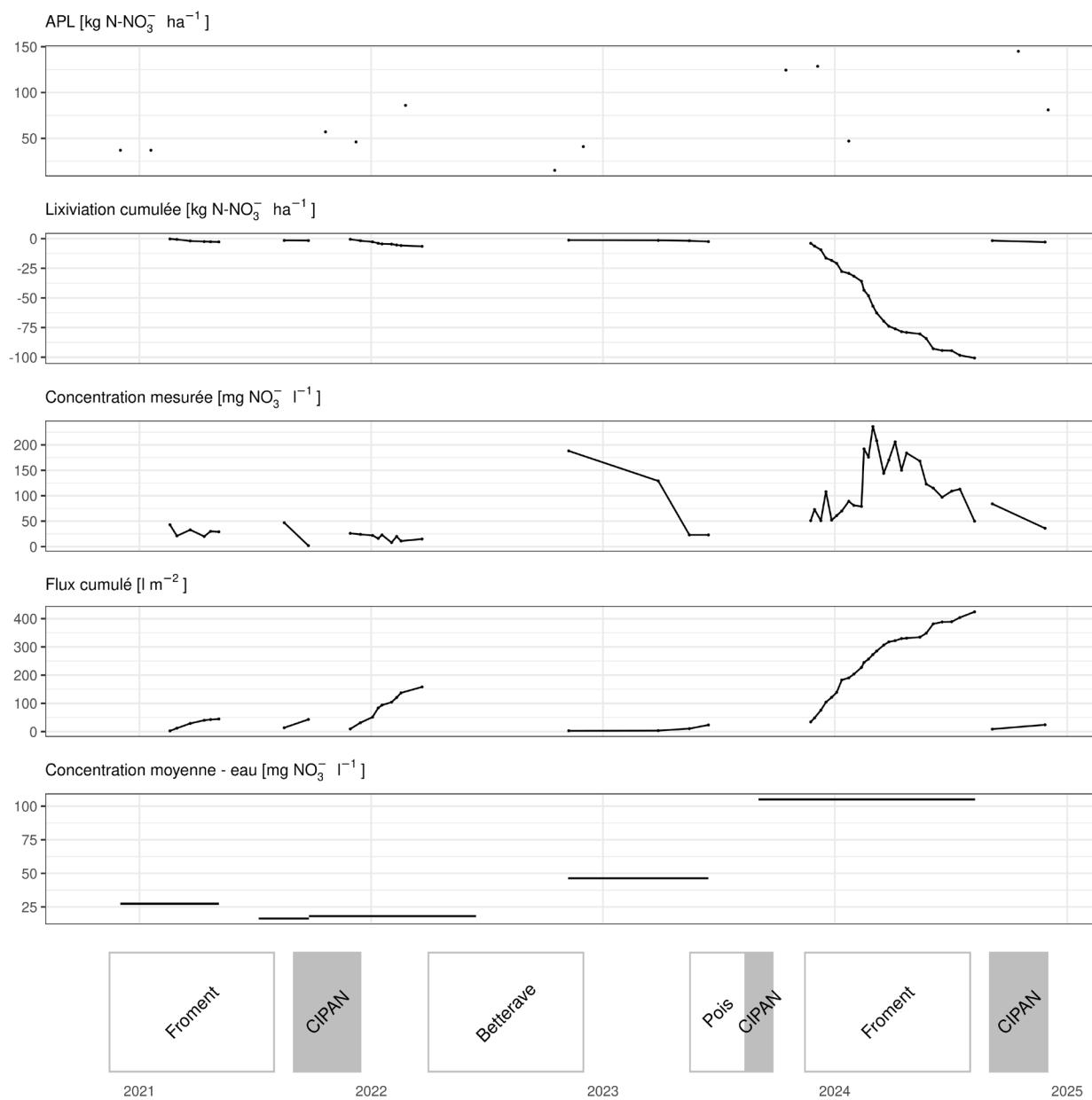


Figure 8. Suivi lysimétrique de la parcelle Haute Bova.

Au cours de la saison de percolation 2020-21, la concentration moyenne en nitrate dans l'eau de percolation est de l'ordre de 30 mg NO₃⁻ l⁻¹.

Une reprise de drainage a également été observée durant l'été 2021 suite à l'important épisode de pluie. Deux échantillons ont été prélevés. Dans les 14 litres du premier échantillon, la concentration était 47 mg $\text{NO}_3^- \text{ l}^{-1}$. Dans le second (29 litres), la concentration était inférieure à 4 mg $\text{NO}_3^- \text{ l}^{-1}$.

Au cours de l'hiver 2021-2022, les flux d'eau importants (plus de 150 l.m⁻²) ont limité la concentration en nitrate à l'exutoire du lysimètre (de l'ordre de 20 mg $\text{NO}_3^- \text{ l}^{-1}$).

A l'inverse, au cours de l'hiver 2022-2023, les flux d'eau ont été assez faibles (environ 20 l/m²) en raison de l'enracinement profond de la betterave et de sa période végétative assez longue qui laisse un sol sec en profondeur en fin d'automne. Bien que l'APL soit assez bas, la petitesse des flux a occasionné, au cours de cet hiver 2022-2023, une concentration en nitrate proche des 50 mg $\text{NO}_3^- \text{ l}^{-1}$.

Au cours de l'hiver 2023-2024, la pluviométrie a entraîné l'équivalent d'environ 100 kg N- $\text{NO}_3^- \text{ ha}^{-1}$ à l'exutoire du lysimètre. Ce flux est assez cohérent avec la diminution du reliquat d'azote nitrique dans le sol observé entre début décembre 2023 et fin janvier 2024. Conséquence de ce flux, la concentration moyenne de l'eau au cours de la période de lixiviation s'élève à 105 mg $\text{NO}_3^- \text{ l}^{-1}$.

5.6. Rétrospective sur les quatre parcelles de Hesbaye

Au cours de ces dernières années (2018-2022), la région wallonne a connu, à l'exception de 2021, quatre années climatiques plus sèches et plus chaude que la normale (années encerclées de vert - figure 9). Plus récemment, 2023 et 2024 peuvent être qualifiées d'humide et chaudes.

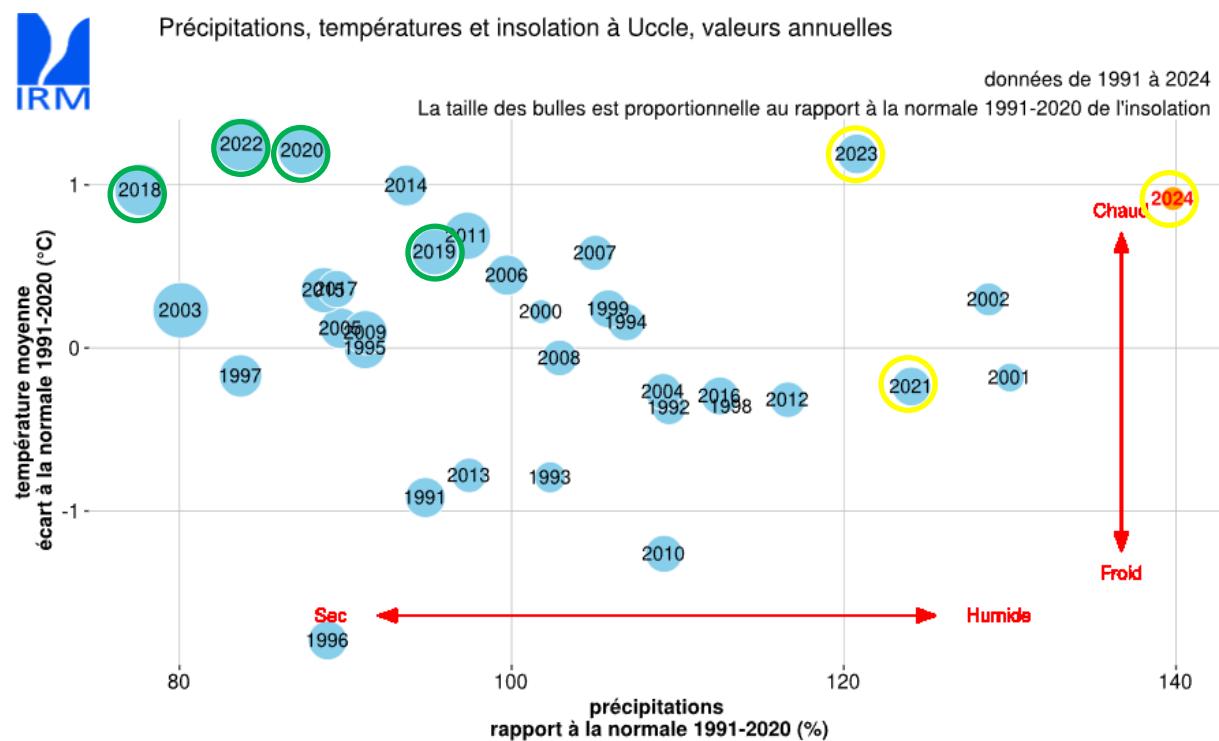


Figure 9. Bilan climatique annuel (Source : IRM⁵).

La figure 10 illustre l'APL moyen des quatre parcelles équipées d'un lysimètre en Hesbaye. Par « moyen », il faut entendre la moyenne annuelle des deux observations (seconde quinzaine d'octobre et première quinzaine de décembre) réalisées dans chaque parcelle.

⁵ <https://www.meteo.be/fr/climat/climat-de-la-belgique/bilans-climatologiques/2024/annee>

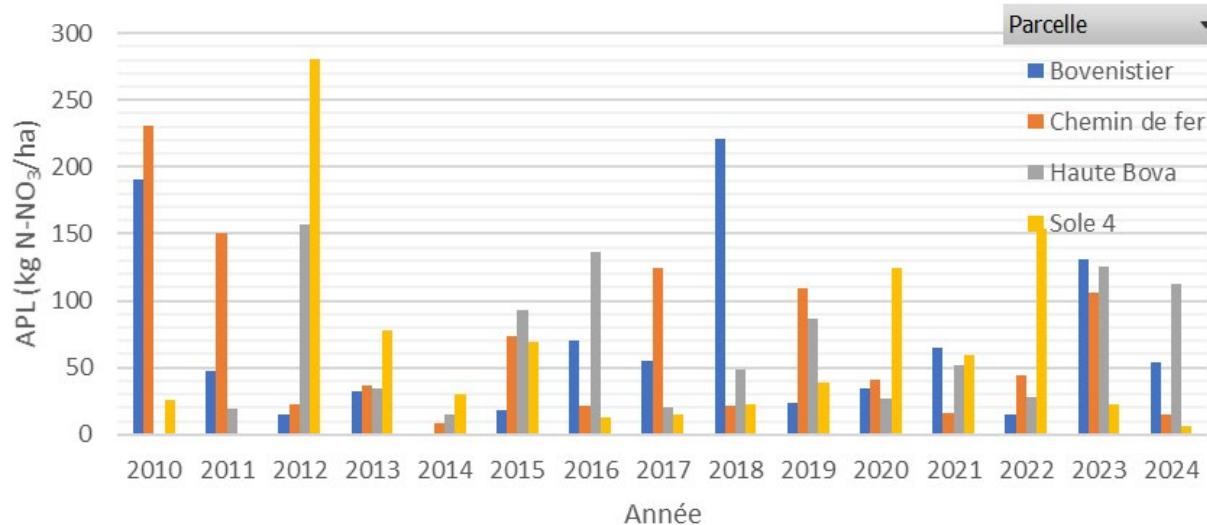


Figure 10. APL moyen dans les parcelles équipées d'un lysimètre en Hesbaye (période 2010-2024).

L'observation de cette figure ne permet pas de mettre en évidence une tendance globale claire, en gardant à l'esprit que les successions culturales de chaque parcelle ont peu évolué au cours de ces treize années. Il n'est pas opportun de pousser plus loin l'analyse par une comparaison d'une année avec une autre car celle-ci sera affectée par le climat et l'occupation du sol. L'APL moyen de ces quatre parcelles depuis 2010 est de $66 \text{ kg N-NO}_3 \text{ ha}^{-1}$. Quelques valeurs élevées tirent la moyenne vers le haut puisque la médiane des observations est de $39 \text{ kg N-NO}_3 \text{ ha}^{-1}$. Ce constat illustre l'impact de ces valeurs élevées sur la pression nitrate globale.

La figure 11 illustre la concentration en nitrate à l'exutoire des quatre lysimètre. Chaque valeur est une moyenne (pondérée par le volume d'eau écoulé entre deux analyses d'eau) des observations réalisées lors d'un épisode de percolation. Une séquence de deux années (par exemple 2009-2010) signifie une percolation hivernale. Une seule année indique une reprise de percolation (souvent estivale ou automnale) entre deux périodes hivernales.

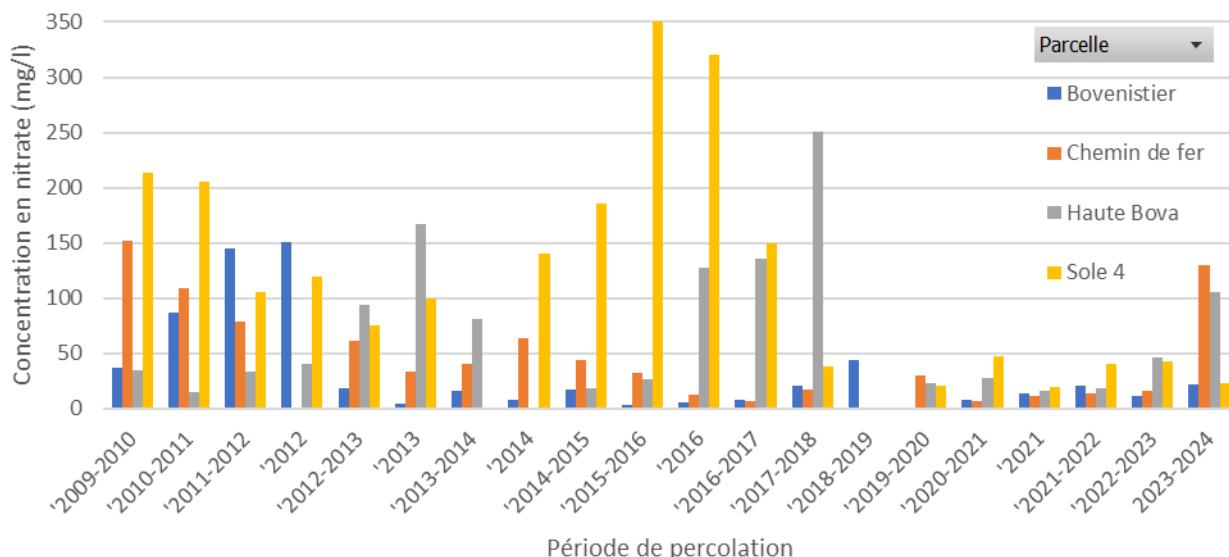


Figure 11. Concentration moyenne (par épisode de percolation) en nitrate de l'eau à l'exutoire des lysimètres (période 2009-2024).

L'observation de cette figure indique que depuis l'hiver 2018-2019, la concentration en nitrate de l'eau récoltée à l'exutoire des lysimètre n'excède, en moyenne, plus le seuil de non-potabilité (50 mg.l^{-1}).

Un retour sur les observations APL, en gardant cet « avant-après » 2018-2019, indique une pression nitrate comparable ; c'est-à-dire une absence de différence significative (p-value = 0.65) des moyennes avant et après 2018 (une moyenne⁶ de 70 kg N-NO₃⁻ ha⁻¹ jusque fin 2017 et moyenne de 62 kg N-NO₃⁻ ha⁻¹ à partir de 2018).

Cependant, l'importante pluviométrie observée depuis 2023 a provoqué une franche remontée de la concentration en nitrate dans l'eau récoltée à la base de deux des trois lysimètres qui ont affiché un APL élevé en 2023. Un constat similaire peut être fait en 2016.

Une vue globale sur les quatre lysimètres depuis 2009 renseigne une concentration moyenne en nitrate de 70 mg NO₃⁻ l⁻¹ avec, comme dans le cadre des observations APL, un impact important des valeurs élevées puisque la médiane des observations est de 37 mg NO₃⁻ l⁻¹.

Le constat suivant peut schématiquement être fait :

1. en année sèche, la concentration reste faible même si l'APL est moyen à élevé ;
2. en année humide, la concentration est élevée en cas d'APL moyen à élevé.

⁶ 4 lysimètres x 2 mesures/an x 8 années

5.7. Expérimentation Sol Résidus

Comme mentionné précédemment, les quatre parcelles de la plateforme Sol Résidus croisent deux facteurs :

- labour *versus* non-labour
- incorporation *versus* exportation des pailles de froment (semé tous les deux ans).

Les différentes modalités de l'essai sont répétées quatre fois. Seules les parcelles situées au droit de lysimètres font l'objet d'un suivi ; soit une des quatre répétitions.

La correspondance entre les deux facteurs et les parcelles est reprise au tableau 7.

Tableau 7. Identification des modalités factorielles appliquées sur les parcelles 'Sol Résidus'.

	Labour	Non-labour
Exportation de la paille	SR 8 (lab-out)	SR 4 (nlab-out)
Incorporation de la paille	SR 16 (lab-in)	SR 12 (nlab-in)

Aucune fertilisation organique n'est apportée sur la parcelle.

Entre 2020 et 2024, les parcelles Sol Résidus ont été couvertes de :

- froment,
- betterave,
- froment,
- maïs
- froment.

Les mesures APL sont réalisées une à deux fois par an (tableau 8) :

- en 2020, les APL des modalités en labour sont plus faibles que les modalités en non labour.
- en 2021, les APL des quatre parcelles sont comparables,
- en 2022, les APL des quatre parcelles sont également comparables,
- en 2023, les APL des parcelles SR4 et SR8 sont comparables,
- en 2024, les APL des modalités en labour sont plus élevés que les modalités en non labour.

Les observations de ces quatre dernières années ne laissent plus voir de différence récurrente entre les modalités.

Tableau 8. Mesures APL [kg N-NO₃ ha⁻¹] réalisées dans l'expérimentation Sol Résidus.

Culture	échantillonnage	APL SR4	APL SR8	APL SR12	APL SR16
Maïs	2 décembre 2019	36	49	45	52
Froment	20 octobre 2020	79	68	78	66
Betterave	25 octobre 2021	12	13	12	15
Froment	19 octobre 2022	48	44	50	47
	6 décembre 2022	4	6	6	3
Maïs	18 octobre 2023	43	46	26	65
	12 décembre 2023	19	29	24	26
Froment	23 octobre 2024	45	69	56	71
	3 décembre 2024	14	20	20	24

Les figures 12 et 13 présentent les résultats du suivi lysimétrique récent dans les quatre parcelles Sol Résidus.

Les flux d'eau observés à l'exutoire du lysimètre SR 4 sont en adéquation avec les flux mesurés à l'exutoire des trois autres lysimètres. Environ 50 litres ont été récupérés durant la reprise de drainage de l'été 2021 et un flux d'une centaine de litres a été mesuré durant l'hiver 2021-2022.

Les concentrations moyennes en nitrate observées présentent des variations importantes entre les lysimètres :

- les moyennes des concentrations en nitrate du lysimètre SR 8 (lab-out) sont restées supérieures à $50 \text{ mg NO}_3^- \text{ l}^{-1}$ entre 2019 et 2022 ;
- à l'exutoire du lysimètre SR 12 (nlab-in), les concentrations moyennes étaient proches de $40 \text{ mg NO}_3^- \text{ l}^{-1}$ entre 2019 et 2021. A la reprise de drainage de l'été 2021, la concentration moyenne était de $85 \text{ mg NO}_3^- \text{ l}^{-1}$. Depuis lors, la concentration a diminué pour s'établir, au cours des deux périodes de lixiviation suivantes, en-dessous de $20 \text{ mg NO}_3^- \text{ l}^{-1}$;
- les concentrations moyennes à l'exutoire du lysimètre SR 16 (lab-in) restent inférieures à $30 \text{ mg NO}_3^- \text{ l}^{-1}$;
- les concentrations mesurées dans le SR4 sont pour l'instant peu exploitables. Ce lysimètre a fait l'objet d'une réparation en 2020. Les flux d'eau observés depuis lors et jusqu'en 2022 n'ont pas encore atteint les flux observés aux exutoires des trois autres lysimètres. En 2023, la chambre de visite a été plusieurs fois inondée. Vu l'impossibilité de mesurer un volume d'eau et une concentration au cours de ces épisodes, une observation sur l'ensemble de la période de percolation n'a pas été possible.

La reprise de drainage de l'été 2021 a occasionné une lixiviation d'environ $10 \text{ kg N-NO}_3^- \text{ ha}^{-1}$ dans les parcelles SR 8 et SR 12. Dans les parcelles SR 4 et SR 16, la lixiviation du nitrate a été négligeable durant cette période.

Après la culture de betterave et indépendamment de la reprise de drainage de l'été 2021, les concentrations moyennes ont diminué. Elles étaient comprises entre 4 et $6 \text{ mg NO}_3^- \text{ l}^{-1}$ durant la saison de drainage 2021-2022.

Au cours de l'hiver 2022-2023, la présence d'une CIPAN a permis de contenir la concentration en nitrate entre 6 et $35 \text{ mg NO}_3^- \text{ l}^{-1}$.

Sur les quatre hivers observés, le lysimètre SR16 présente la concentration moyenne la plus faible. Ce lysimètre est en modalité 'labour & enfouissement des pailles'. Sur base des observations menées, l'enfouissement des pailles (assimilable à un maintien du taux de carbone dans le sol) a impact positif sur la lixiviation du nitrate (SR16 *versus* SR8).

Le labour a également un effet positif sur la lixiviation du nitrate puisque, dans le cas d'un enfouissement de résidus, la concentration moyenne en nitrate est inférieure à celle observée dans la modalité 'non-labour' (SR16 *versus* SR12).

Au cours de l'hiver 2023-2024, les chambres de visite des lysimètres SR4 et SR16 ont été régulièrement inondées de sorte que les volumes d'eau mesurés et analysés ont été plus faibles que dans les lysimètres SR8 et SR12. Pour ces deux premiers lysimètres, les observations sont donc biaisées pour les flux et partiellement biaisées pour les concentrations.

Au cours de cette période, l'APL assez bas observé après le maïs (tableau 8) a permis d'observer une concentration en nitrate dans l'eau comprise entre 15 et $29 \text{ mg NO}_3^- \text{ l}^{-1}$.

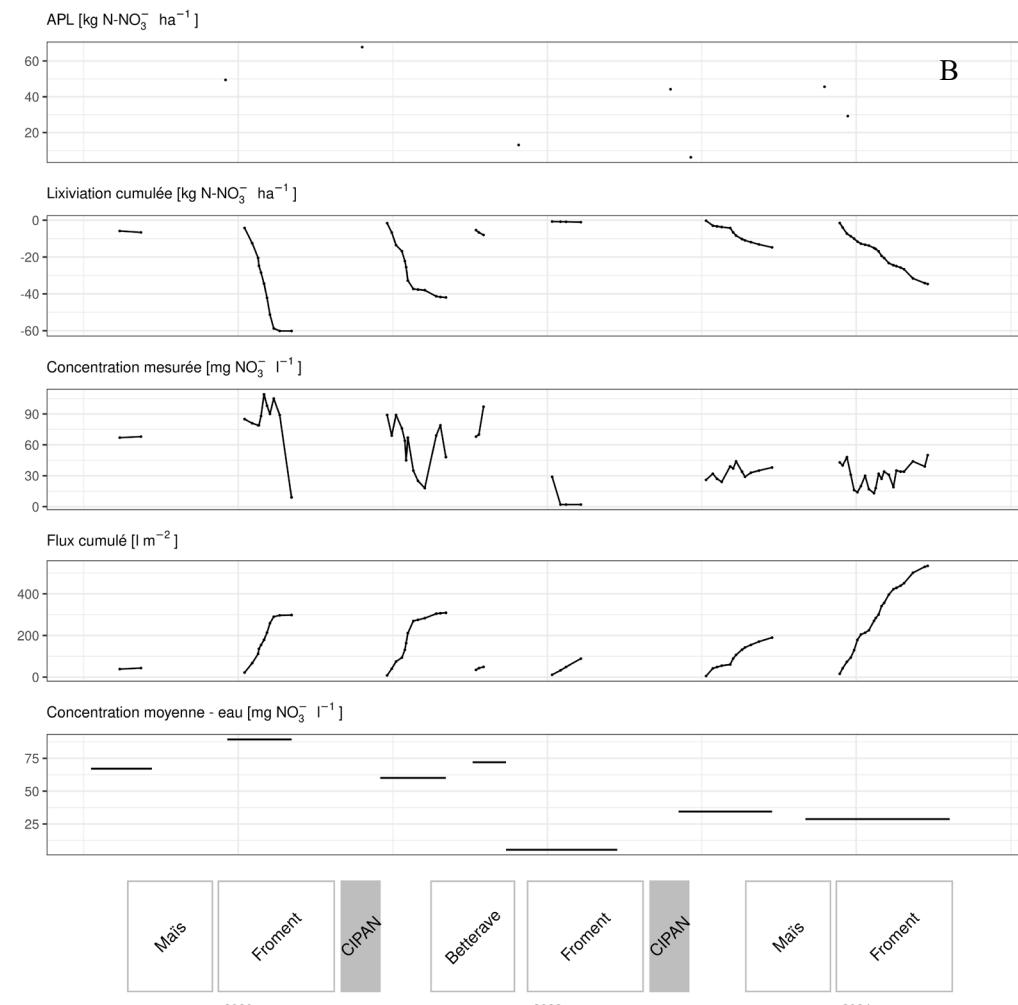
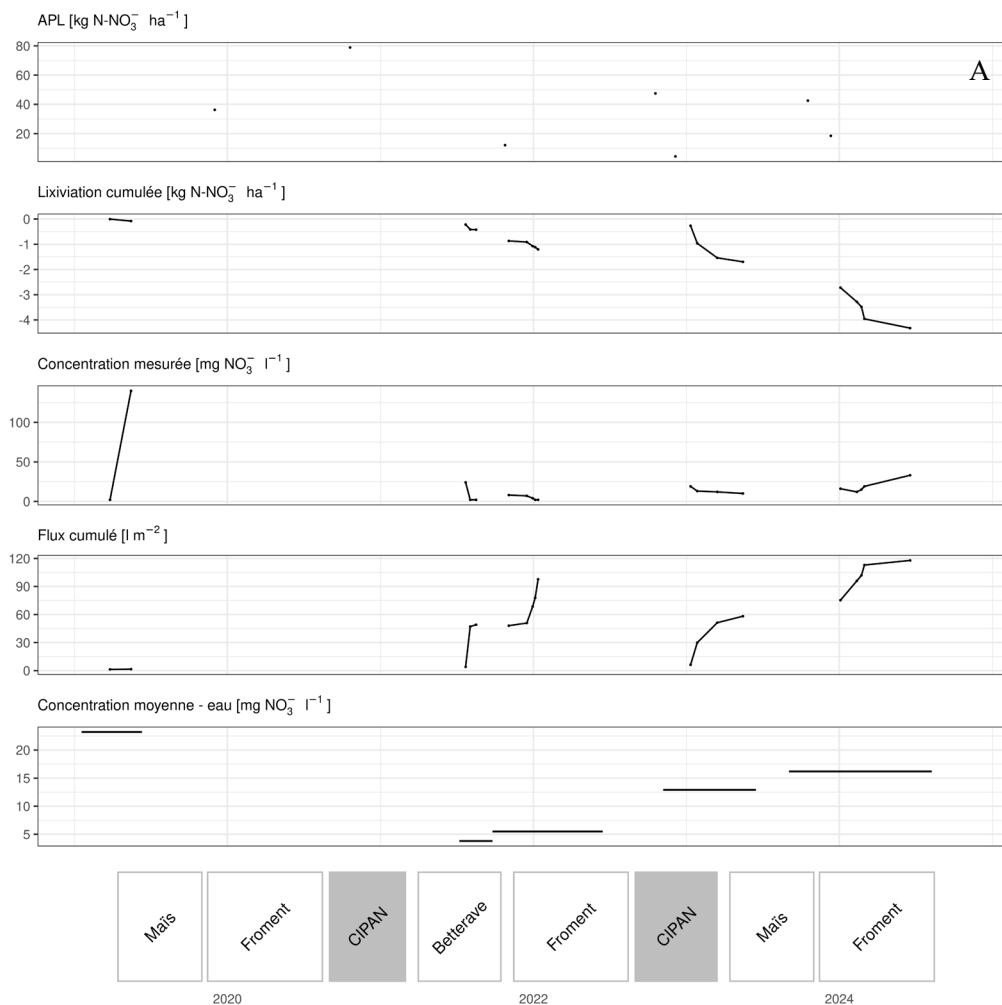


Figure 12. Suivi lysimétrique dans les lysimètres SR 4 (A) et SR 8 (B).

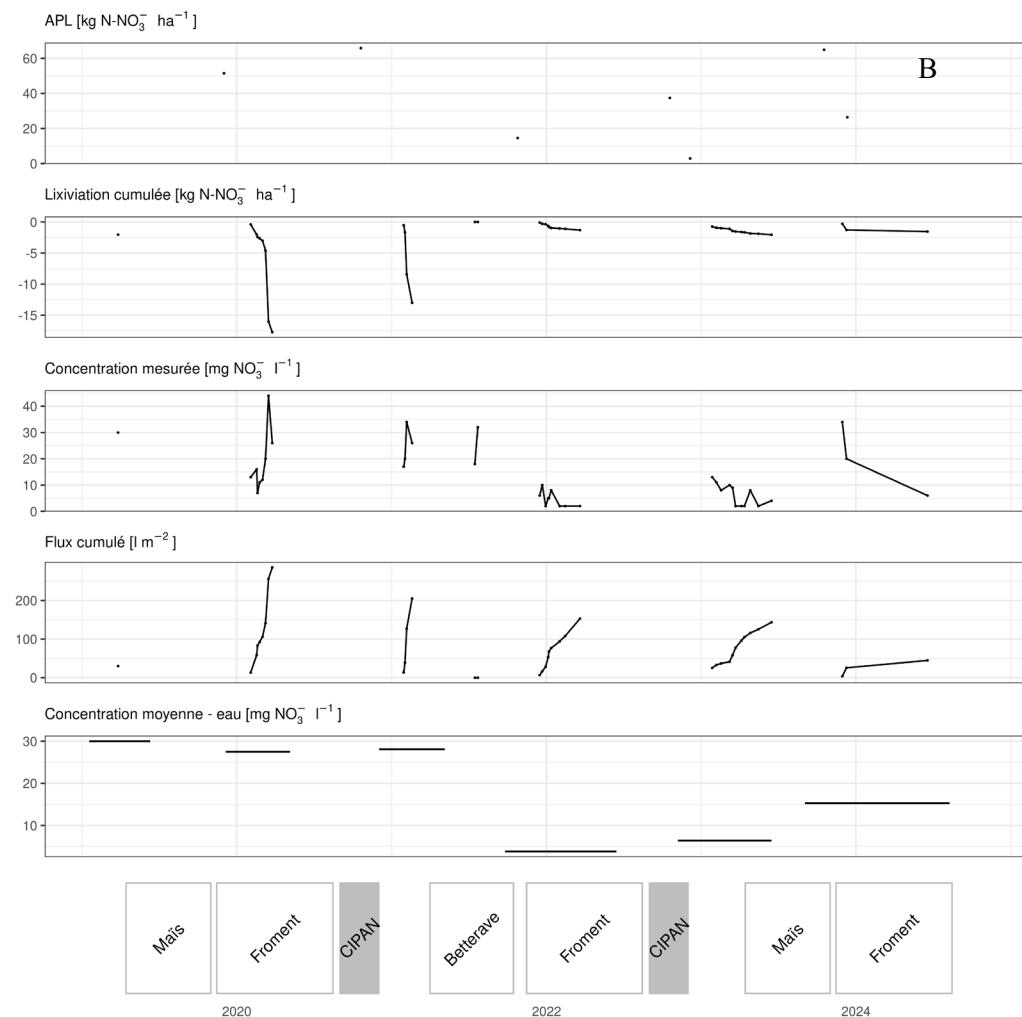
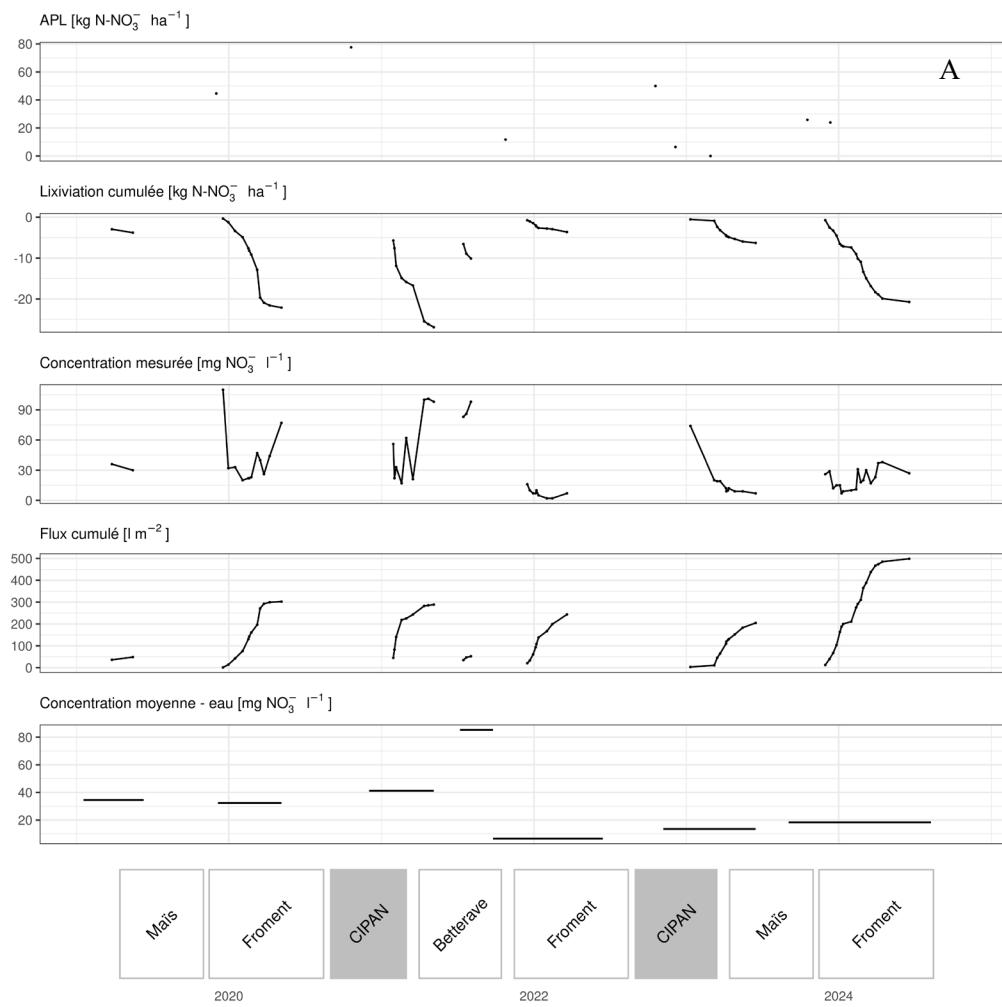


Figure 13. Suivi lysimétrique dans les lysimètres SR 12 (A) et SR 16 (B)

6. Suivi lysimétrique en prairie

6.1. Introduction

Les lysimètres ont été mis en place (semis d'un couvert prairial) en septembre 2019. Le suivi de ces lysimètres a débuté en septembre 2020.

Pour rappel, l'objectif de ces lysimètres est de mettre en évidence l'impact environnemental des apports hâtifs de fertilisant à la fin de l'hiver et des apports tardifs en fin d'automne. Pour ce faire, les dix lysimètres ont été répartis en cinq modalités (tableau 1).

Le tableau 9209 détaille l'historique précis des fertilisations réalisées.

Les fertilisations apportées aux lysimètres avant le 19 janvier 2022 ne respectent pas forcément le protocole initial. Au lieu des 80 kg N ha^{-1} prévus :

- l'équivalent de 450 kg N ha^{-1} ont été apportés sur les deux lysimètres de la modalité B le 4 septembre 2020 ;
- l'équivalent de 320 kg N ha^{-1} ont été apportés sur les deux lysimètres entre le 30 septembre 2020 et le 3 novembre 2021.
- 80 kg N ha^{-1} ont été apportés sous forme d'engrais minéral plutôt que sous forme d'engrais organique.

Toutes les anomalies sont marquées d'une étoile dans le tableau 9209.

En l'absence de remontée capillaire profonde, les lysimètres sont irrigués, au besoin, pour assurer le maintien de la prairie pendant de longs épisodes de sécheresse. Ainsi, les irrigations suivantes ont été réalisées sur chaque lysimètre :

- en 2021, 160 litres d'eau soit l'équivalent de 320 mm ;
- en 2022, 160 litres d'eau soit l'équivalent de 320 mm ;
- en 2023, 40 litres d'eau, soit l'équivalent de 80 mm ;
- en 2024, 10 litres d'eau, soit l'équivalent de 20 mm.

Tableau 9. Fertilisations minérale (noir) et organique (gris) apportées sur les lysimètres.

Date	Modalité A	Modalité B	Modalité C	Modalité D	Modalité E
08/06/20	80	80	80	80	80
03/08/20	40	40	40	40	40
04/09/20		450*			
30/09/20			320*		
30/10/20				320*	
19/01/21	320*				
02/03/21		80*	80*	80*	80*
12/05/21	60	60	60	60	60
29/07/21	40	40	40	40	40
03/09/21		320*			
04/10/21			320*		
03/11/21				320*	
19/01/22	80				
08/03/22		80	80	80	80
11/05/22	80*	80*	80*	80*	80*
15/07/22	40	40	40	40	40
02/09/22		80			
5/10/22			80		
4/11/22				80	
16/01/23	80				
6/03/23		80	80	80	80
8/05/23	80*	80*	80*	80*	80*
19/07/23	40	40	40	40	40
15/09/23		80			
18/10/23			80		
7/11/23				80	
22/01/24	80				
19/03/24		80	80	80	80
14/05/24	60	60	60	60	60
09/07/24	40	40	40	40	40
24/09/24		80			
14/10/24			80		
05/11/24				80	

6.2. Résultats

Les flux d'eau enregistrés à l'exutoire des dix lysimètres sont généralement assez comparables ; ce qui indique un bon fonctionnement de ceux-ci. Par ailleurs, ces flux sont d'un ordre de grandeur double (généralement entre 200 et 300 litres/m²) de celui observé pour les lysimètres placés en plein champ. L'explication principale réside certainement dans l'épaisseur de sol : les lysimètres 'prairie' n'ont que 50 cm de sol alors que les lysimètres 'culture' ont 200 cm de sol, ce qui confère à ces derniers une réserve utile en eau quatre fois plus importante pour 'tamponner' les épisodes pluviométriques importants.

En termes de concentration en nitrate, les constats suivants peuvent être faits au cours des quatre derniers hivers (2020/21 à 2023/24) :

- la modalité E (assimilable au témoin, c'est à dire sans apport précoce ni tardif de lisier) présente une concentration en nitrate de l'ordre de quelques milligrammes par litre lors des périodes de percolation hivernales (on peut négliger l'épisode de l'été 2022 qui ne s'appuie que sur un seul résultat analytique élevé avec un volume d'eau assez faible) ;

- la modalité D (apport de lisier à la fin octobre) présente un risque élevé : au cours du premier, du troisième et du quatrième hiver, la concentration a été faible mais au cours du second hiver, la concentration en nitrate y a été la plus élevée (de l'ordre de 60 mg l^{-1}). Il est important de noter qu'à l'automne 2021, l'équivalent de 320 kg N/ha a été erronément apporté ;
- la modalité A (apport de lisier vers le 15 janvier) ainsi que les modalités B et C (apport de lisier fin aout ou fin septembre) présentent généralement des concentrations hivernales comprises entre 5 et 20 mg l^{-1} . Il est important de noter que comme pour la modalité D, l'équivalent de 320 kg N/ha a été erronément apporté fin d'été (modalité B) et début d'automne (modalité C) sans pour autant observer une élévation importante de la concentration au cours de l'hiver 2021-2022 ;
- des concentrations élevées (de l'ordre de 60 mg l^{-1}) ont été observées au cours des reprises de percolation observée en été 2021 et 2022 dans la modalité E (témoin). Des concentrations élevées ont également été observées dans les autres modalités. Il est bon de rappeler que toutes les modalités fait l'objet d'un apport de 40 kg N ha^{-1} sous forme d'engrais de synthèse fin juin;

En termes de flux d'azote, généralement, chaque épisode de percolation entraîne de l'ordre de quelques kilogrammes d'azote nitrique ; ce qui en comparaison avec les apports azotés (tableau 1), ne représente que quelques pourcents des 260 kg N ha^{-1} apportés annuellement. Seule la modalité D (apport de lisier à la fin octobre) dénote : au cours de l'hiver 2021-22, entre 20 et $30 \text{ kg N-NO}_3^- \text{ ha}^{-1}$ ont été emportés avec l'eau de percolation (figure 17).

6.3. Conclusion

Trois hivers de percolation ne représentent pas une observation suffisamment longue que pour que des conclusions robustes puissent être d'ores et déjà tirées. Provisoirement, il apparaît cependant que les fertilisations à base de lisier appliquées tardivement dans l'année (fin octobre) engendrent un risque de flux et concentration de nitrate plus important (modalité D *versus* B et C). A l'inverse, un apport précoce de lisier (mi-janvier) n'a pas occasionné de pertes importantes par lixiviation (modalité A *versus* E), dans les conditions climatiques de ces quatre hivers.

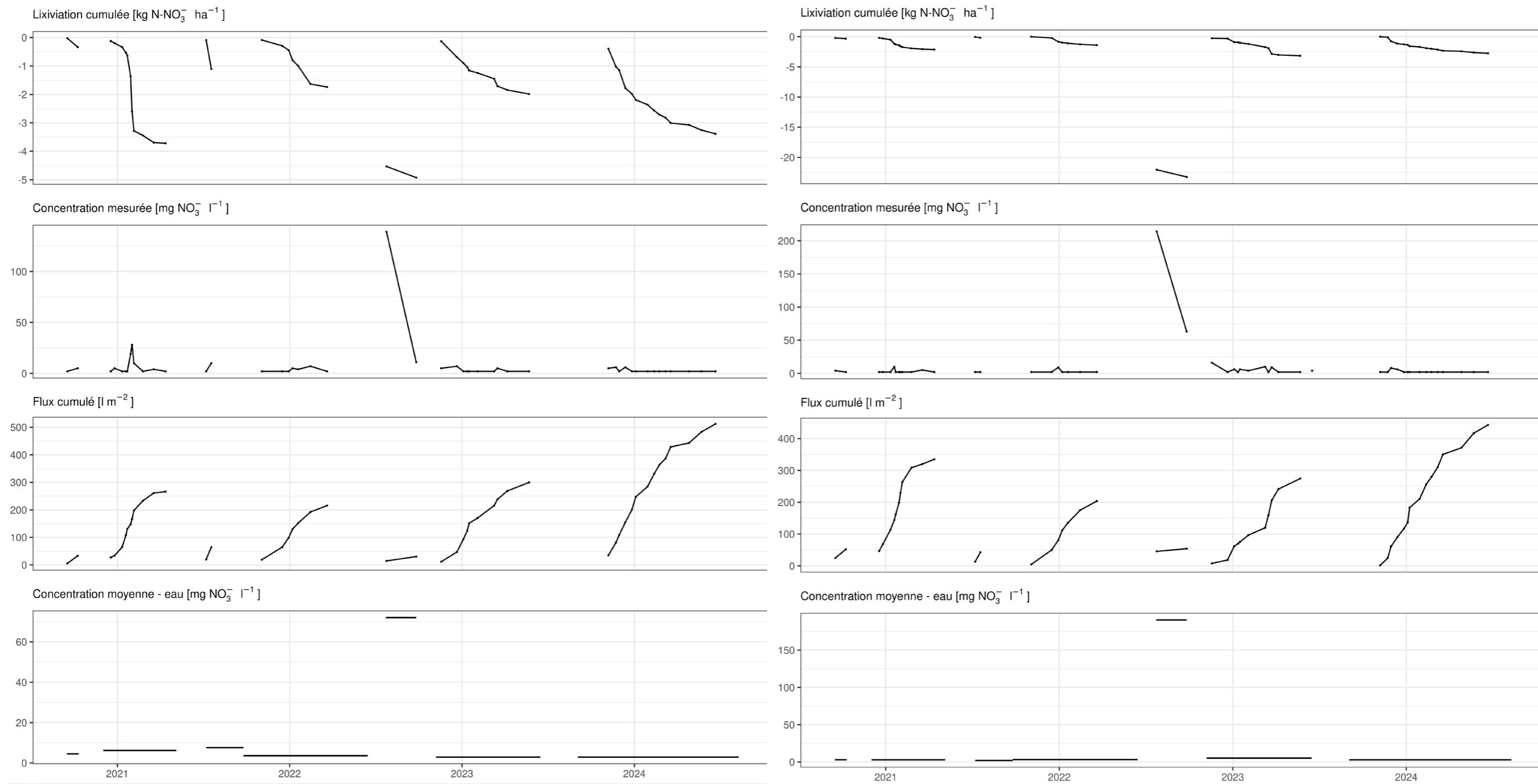


Figure 14. Suivi lysimétrique dans les lysimètres 'prairie' de la modalité A.

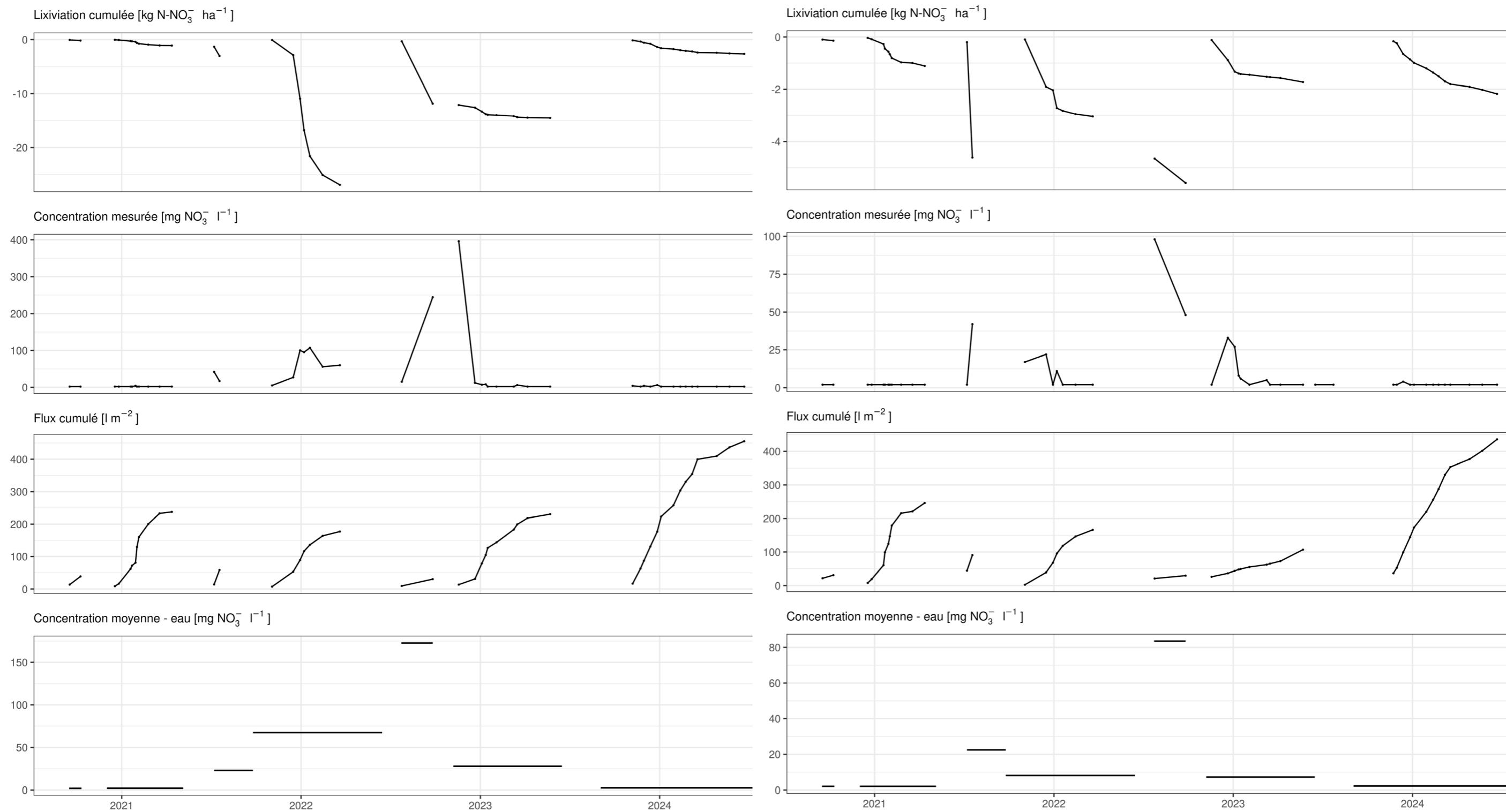


Figure 15. Suivi lysimétrique dans les lysimètres 'prairie' de la modalité B.

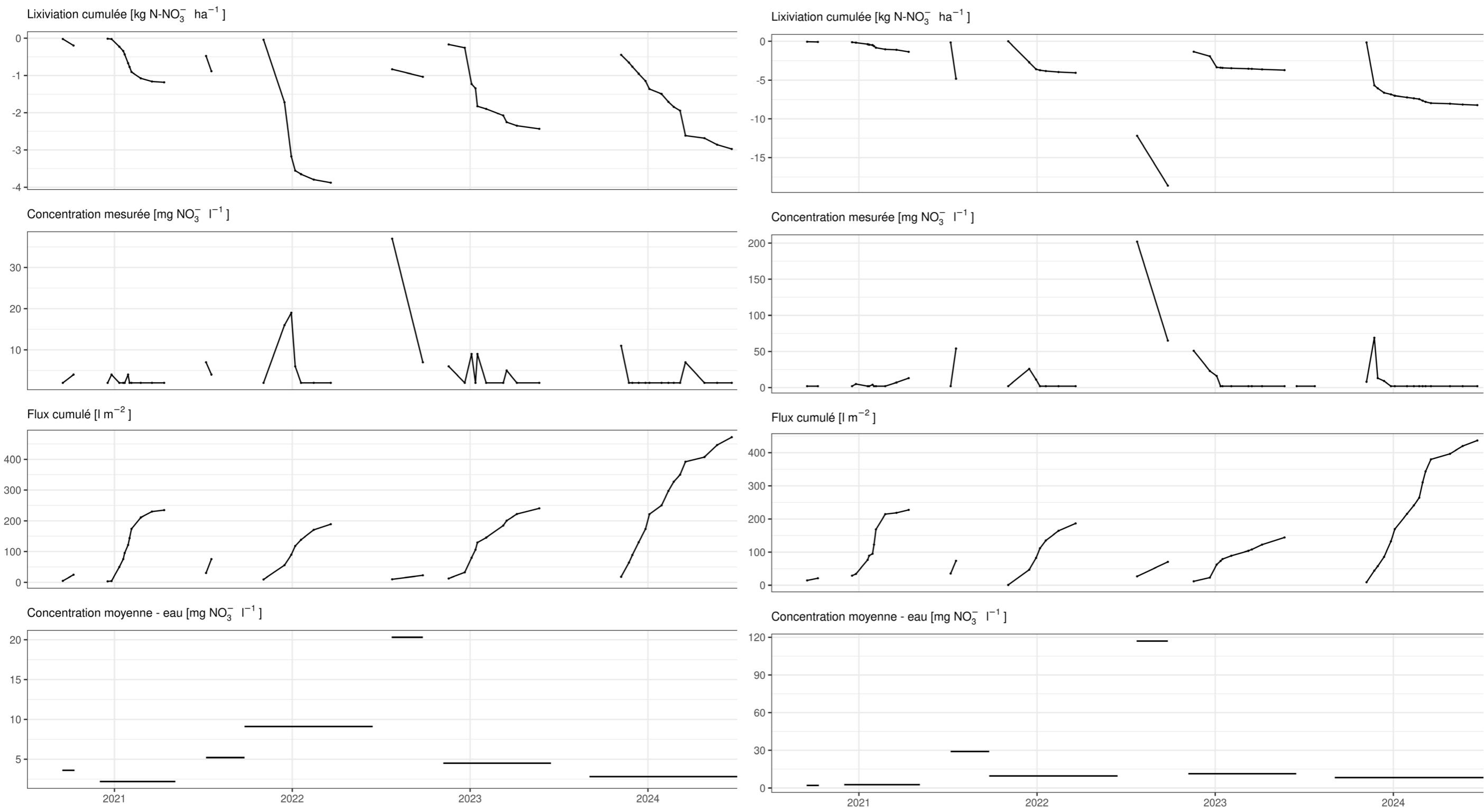


Figure 16. Suivi lysimétrique dans les lysimètres 'prairie' de la modalité C.

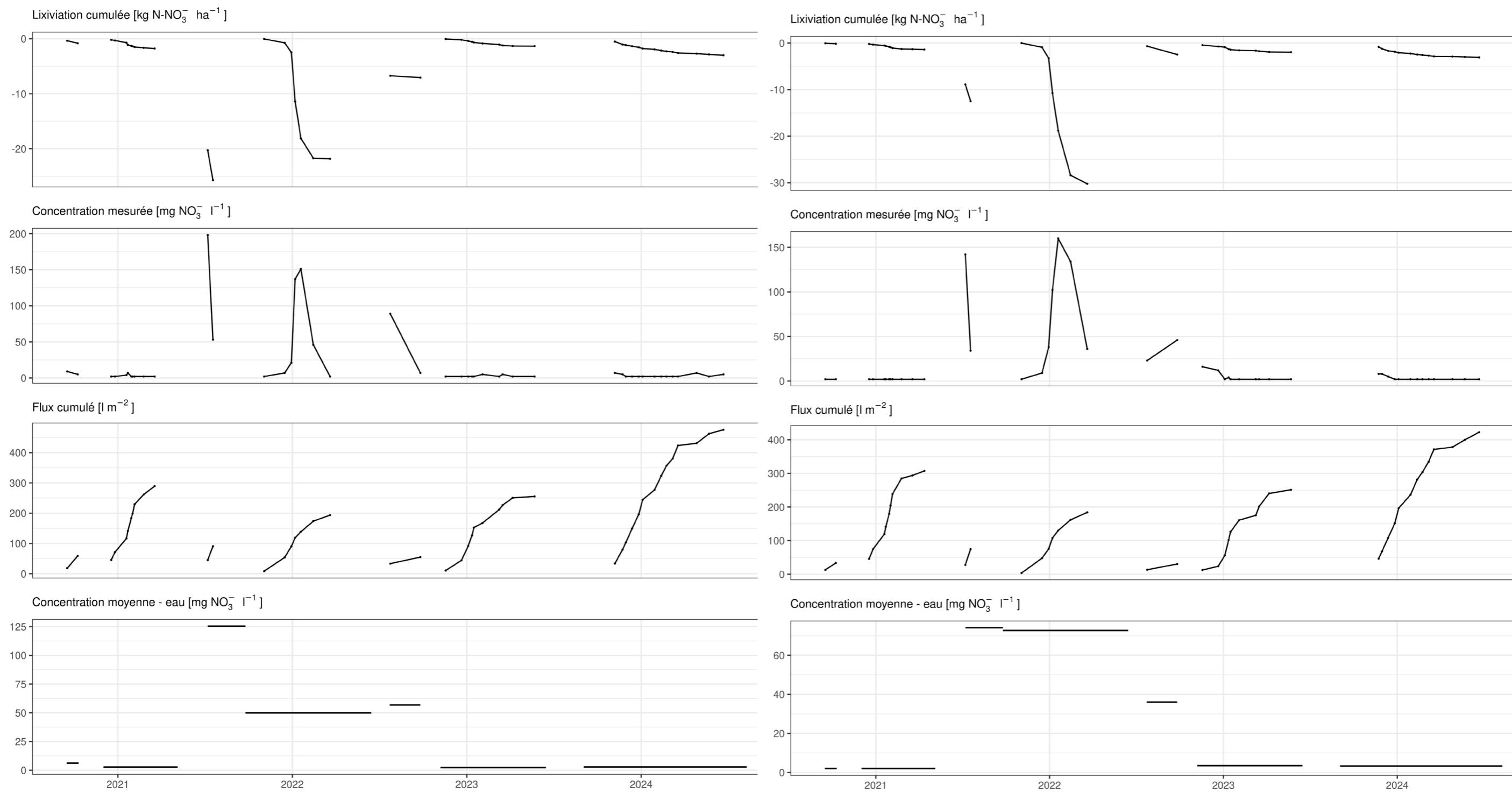


Figure 17. Suivi lysimétrique dans les lysimètres 'prairie' de la modalité D.

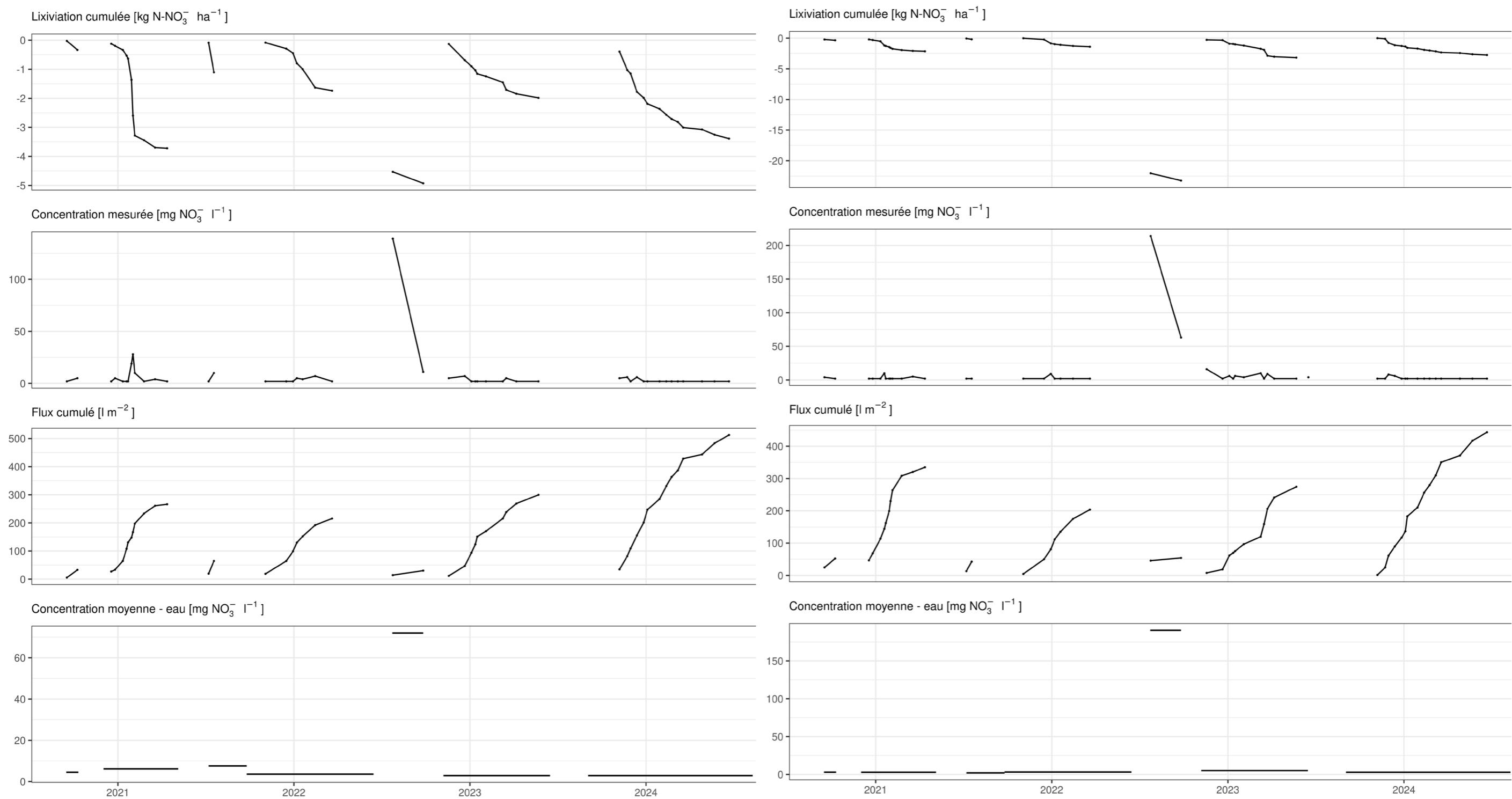


Figure 18. Suivi lysimétrique dans les lysimètres 'prairie' de la modalité E