

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 :

Lefébure K., Vandenberghe C., Colinet G., 2023 *Suivi lysimétrique de l'azote nitrique dans le cadre du Programme de Gestion Durable de l'Azote (PGDA) en agriculture*. Dossier GRENeRA **23-05**, 35 p. In Vandenberghe C.¹, De Toffoli M.², Durenne B.³, Bachelart F.¹, Houtart A.¹, Imbrecht O.², Lefébure K.¹, Bergiers G.³, Huyghebaert B.³, Lambert R.², Colinet G.¹, 2024. *Programme de gestion durable de l'azote en agriculture wallonne et volet eau du programme wallon de réduction des pesticides – Rapport d'activités final 2023 des membres scientifiques de la Structure d'encadrement PROTECT'eau*. Université catholique de Louvain, Centre wallon de Recherches agronomiques et Université de Liège - Gembloux Agro-Bio Tech.

¹ Gembloux Agro-Bio Tech (ULiège) - GRENeRA

² Earth and Life Institute (UCLouvain)

³ Centre wallon de Recherches Agronomiques

Table des matières

1. INTRODUCTION.....	3
2. CONTEXTE	4
3. DESCRIPTION DES SITES D'ÉTUDE.....	6
3.1. HESBAYE	6
3.2. GEMBLoux AGRO-BIO TECH.....	8
3.2.1. Cultures annuelles.....	8
3.2.2. Couvert prairial	9
4. CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES.....	10
5. SUIVI LYSIMÉTRIQUE.....	11
5.1. INTRODUCTION.....	11
5.2. GROSSE PIERRE CHEMIN DE FER.....	13
5.3. GROS THIER BOVENISTIER.....	15
5.4. SOLE 4	18
5.5. HAUTE BOVA	21
5.6. EXPERIMENTATION SOL RESIDUS	25
6. PRAIRIES	29

1. Introduction

Depuis le milieu des années 1970, la concentration en nitrate dans les eaux souterraines a significativement augmenté en Wallonie (Vandenberghe, 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 APL⁴ (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)⁵. 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 percole 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.*

⁴ Azote Potentiellement Lessivable.

⁵ 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. Dans ce dossier, la saison de drainage 2019-2020 des lysimètres de Hesbaya sera analysée. Une attention particulière sera 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 Végémar⁶ 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 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 (figure 2).

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 (Vandenberghe et al., 2021).

⁶ Centre Provincial Liégeois de productions VEGÉtales et MARaichères

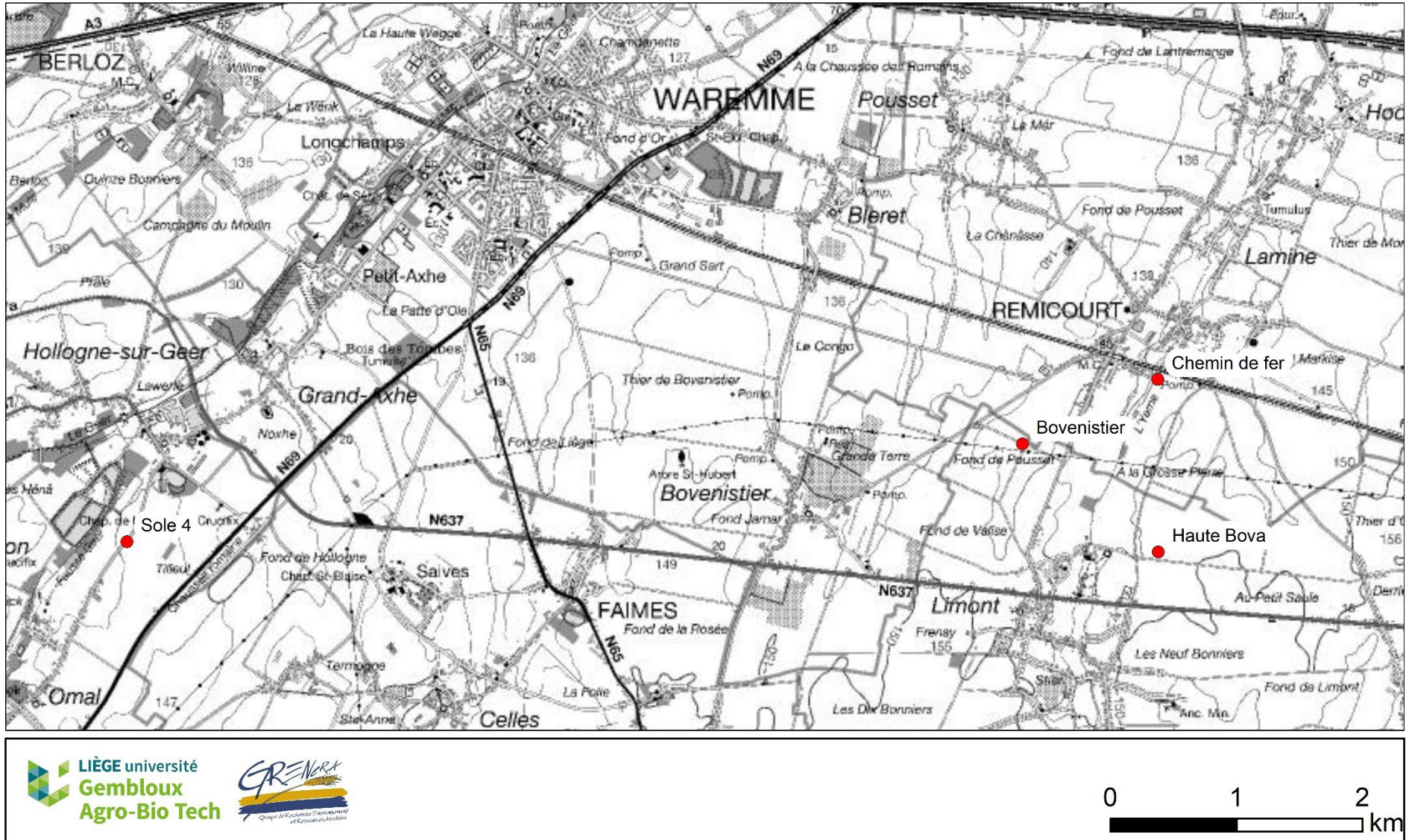


Figure 2. Carte de localisation des lysimètres Grosse Pierre Chemin de Fer, Gros Thier Bovenistier, Haute Bova et Sole 4.

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).

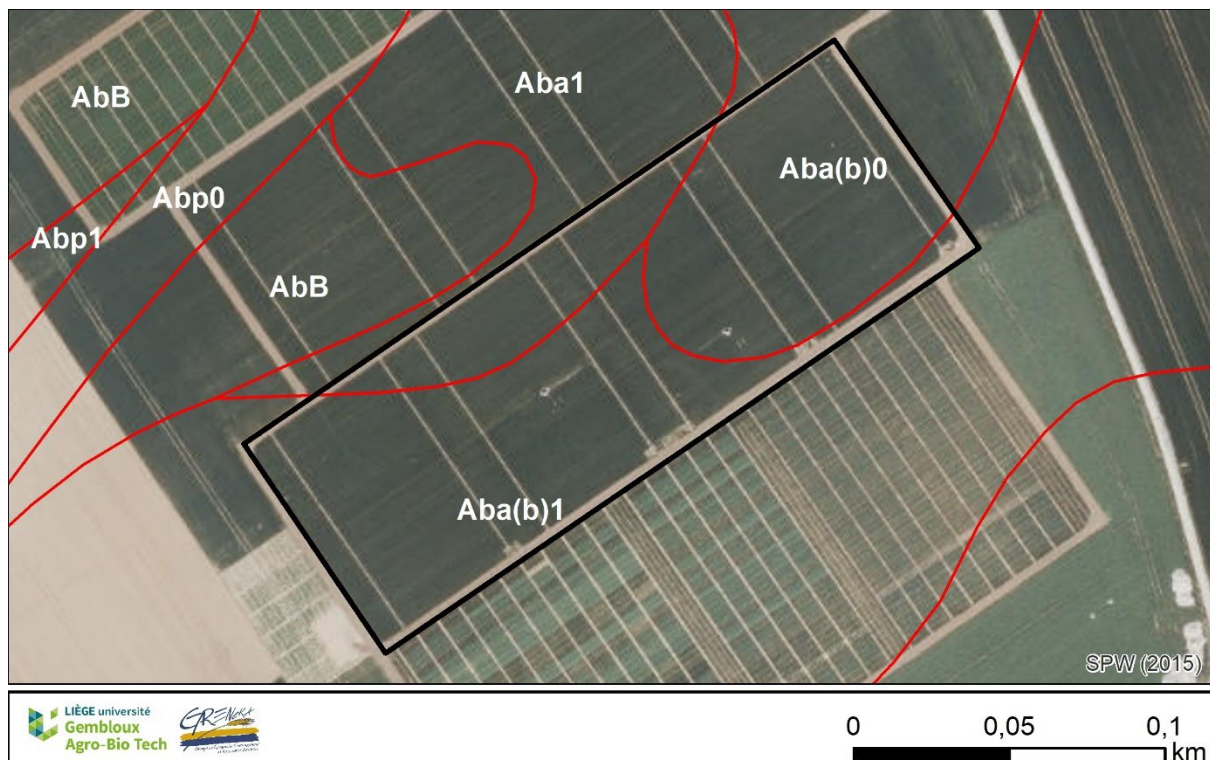


Figure 3. Contexte pédologique à proximité des parcelles de l’expérimentation Sol Résidus.

Le dispositif croise deux facteurs expérimentaux :

1. gestion des résidus⁷ (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.

⁷ 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'année 2021 est caractérisée par l'IRM comme « très humide » (IRM, 2021)⁸. D'après l'IRM, l'hiver est « variable ». Le début de l'hiver (décembre 2020) était chaud. La fin du mois de décembre a été très pluvieuse. Alors que le mois de janvier était plutôt humide, celui de février était plus sec. Bien que la fin du mois de mars ait été « très chaude », le printemps est globalement qualifié de « froid ». L'été est le « plus humide jamais enregistré » à la station météorologique de Uccle. L'IRM qualifie l'automne comme « plutôt sec et très calme ». Les précipitations observées en octobre sont toutefois largement supérieures à la normale mensuelle.

L'IRM qualifie l'hiver 2021-2022 est 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).

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

	Température [°C]				Précipitation [mm]			
	2023	2022	2021	Normale	2023	2022	2021	Normale
Janvier	5,2	4,3	3	3,7	91	67	131	75,5
Février	5,9	6,6	5,3	4,2	13	94	53	65,1
Mars	7,5	8,6	7,4	7,1	127	2	44	59,3
Avril	9,0	10,1	7,3	10,4	66	37	36	46,7
Mai	14,0	15,1	11,6	13,9	49	69	86	59,7
Juin	20,3	17,7	18,6	16,7	41	88	121	70,8
Juillet	18,4	19,6	17,9	18,7	131	5	167	76,9
Août	18,1	21,4	16,9	18,4	108	18	123	86,5
Septembre	18,8	15,1	16,6	15,2	65	105	26	65,3
Octobre	13,6	14,4	11,5	11,3	87	41	121	67,8
Novembre	7,8	9,1	6,4	7,2	132	65	34	76,2
Décembre	7,0	4,2	5,6	4,3	102	111	98	87,4

⁸ <https://www.meteo.be/fr/climat/climat-de-la-belgique/bilans-climatologiques/2021/annee>

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.

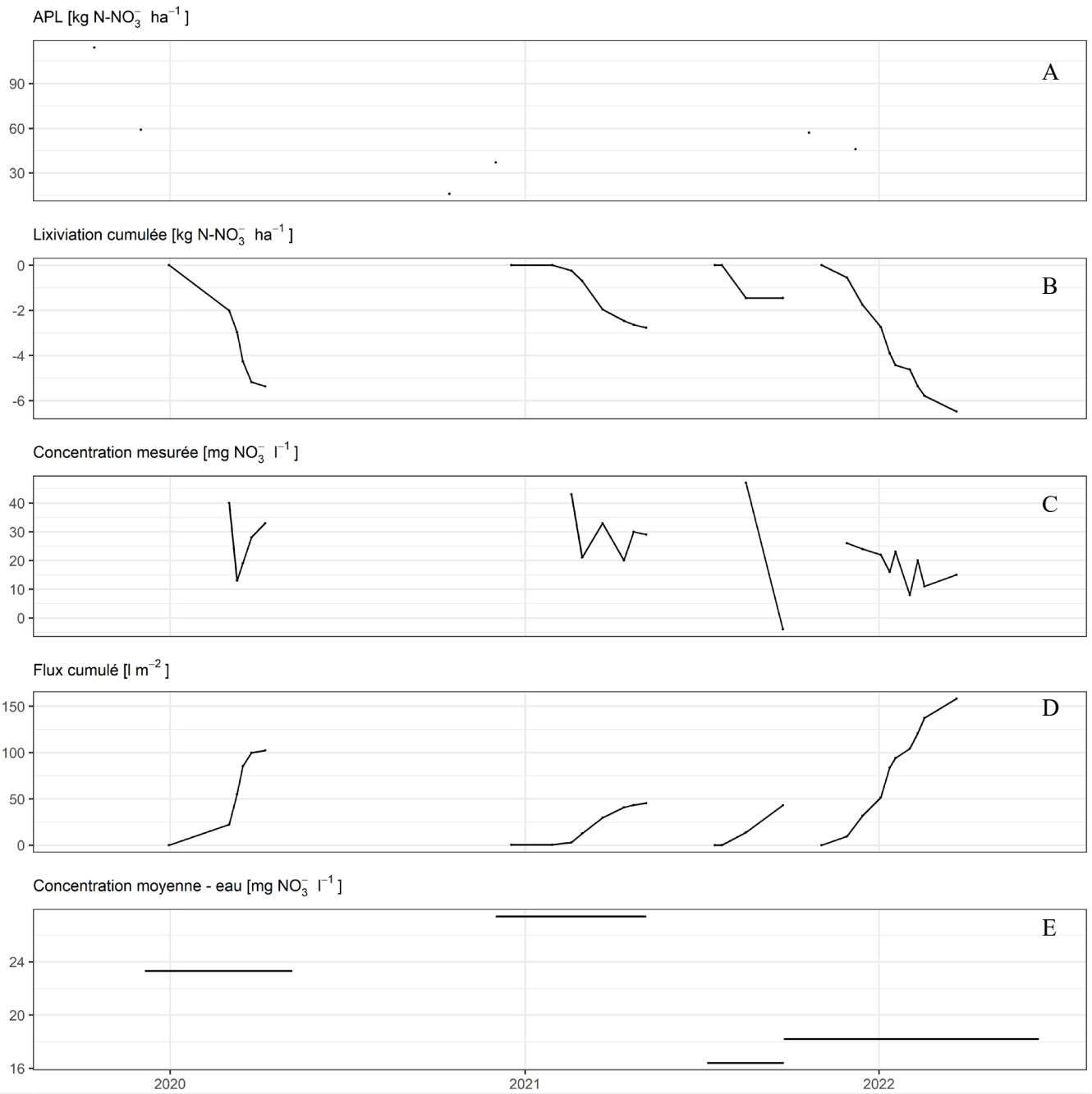


Figure 4. Suivi lysimétrique (exemple).

5.2. Grosse Pierre Chemin de fer

La parcelle Grosse Pierre Chemin de fer est suivie depuis 20 ans. L'itinéraire culturale récent peut être décrit comme suit.

Après la récolte, du froment a été semé. La céréale a été fertilisée par deux traitements respectivement en avril et en mai 2020 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.

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

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.

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 NO₃ 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 N-NO₃⁻ ha⁻¹ ont été lixiviés.

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.

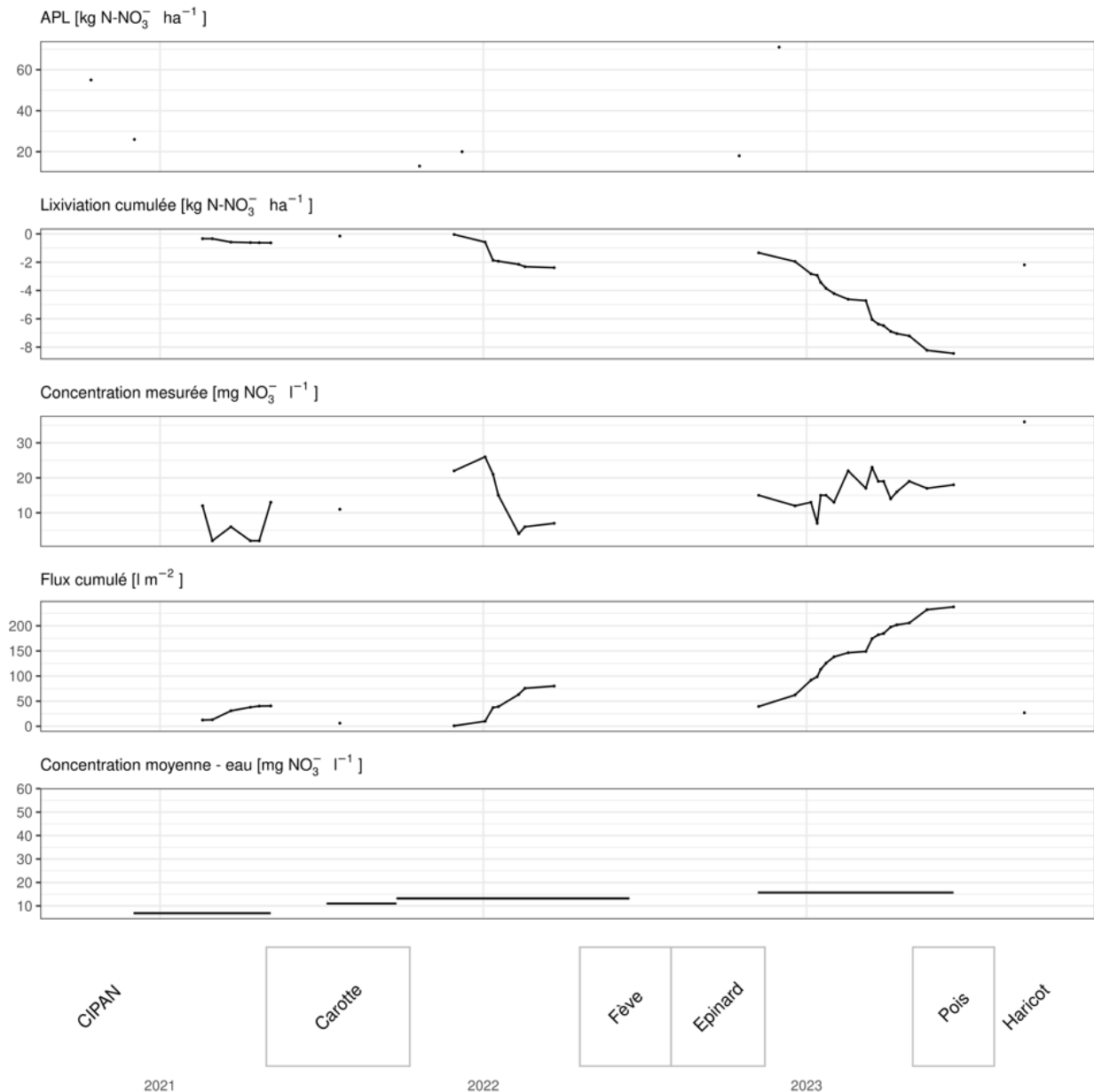


Figure 5. Suivi lysimétrique de la parcelle Grosse Pierre Chemin de fer.

5.3. Gros Thier Bovenistier

La parcelle Gros Thier Bovenistier est suivie depuis 20 ans. L'itinéraire culturale récent 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 vraisemblablement 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.

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 ; repartis en 15, 12 et 12 kg N-NO₃⁻ ha⁻¹ respectivement dans les couches 0-30, 30-60 et 60-90 cm. L'enrichissement de la première couche met en évidence une légère minéralisation de la matière organique du sol. La lixiviation au-delà de la zone racinaire a vraisemblablement été négligeable durant cette période.

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. Contrairement au couche 30-60 et 60-90 cm, la teneur en azote nitrique de la première couche est restée stable entre les deux mesures. L'augmentation de la teneur en azote nitrique met en évidence le processus de lixiviation du nitrate.

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 ; répartis en 7, 15 et 18 kg N-NO₃⁻ ha⁻¹ respectivement dans les couches 0-30, 30-60 et 60-90 cm.

On peut donc raisonnablement penser qu'au moins 40 kg N-NO₃⁻ ha⁻¹ ont été lixiviés.

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	
			CIPAN		13	1
					5	4
2023	Fève	187	91	76	8	
			Epinard		56	27
			CIPAN		40	41

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 $1 \text{ kg N-NO}_3^- \text{ ha}^{-1}$. 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 $14 \text{ mg NO}_3^- \text{ l}^{-1}$. On peut calculer que le flux d'eau a lixivié environ $2,1 \text{ kg N-NO}_3^- \text{ ha}^{-1}$.

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. La concentration moyenne était d'environ $20 \text{ mg NO}_3^- \text{ l}^{-1}$. Les mesures APL et de reliquat 'sorti d'hiver' ont mis en évidence une lixiviation d'au moins $40 \text{ kg N-NO}_3^- \text{ ha}^{-1}$. Cependant, à l'exutoire du lysimètre, le flux mesuré n'a été que de $4 \text{ kg N-NO}_3^- \text{ ha}^{-1}$. 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 l'ordre de $11 \text{ mg NO}_3^- \text{ l}^{-1}$.

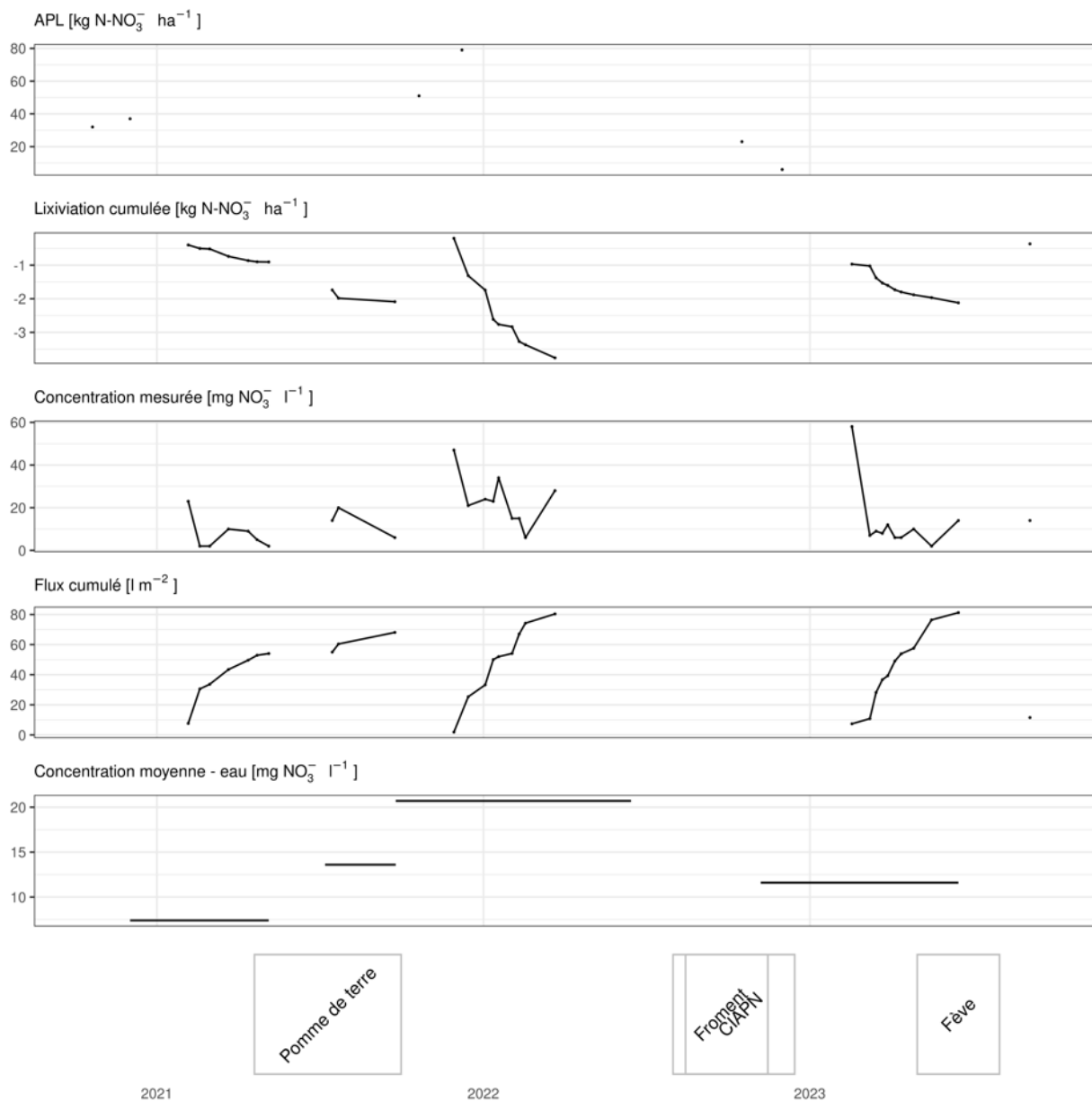


Figure 6. Suivi lysimétrique de la parcelle Gros Thier Bovenistier.

5.4. Sole 4

La parcelle Sole 4 est suivie depuis 20 ans. L'itinéraire culturale récent 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	Epinaud	162	70	145	43
	Haricot		76		68
			16		34
2023	Froment	32	9	12	6
	CIPAN		16		4
			7		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 (semé en automne 2020). 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.

La teneur en azote nitrique de la couche 60-90 cm n'augmente pas entre les deux dates de mesures. Le nitrate a donc été lixiviation à une profondeur plus importante.

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 lixiviés. 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 lixiviée 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.

La figure 7 présente les résultats du suivi lysimétrique récent.

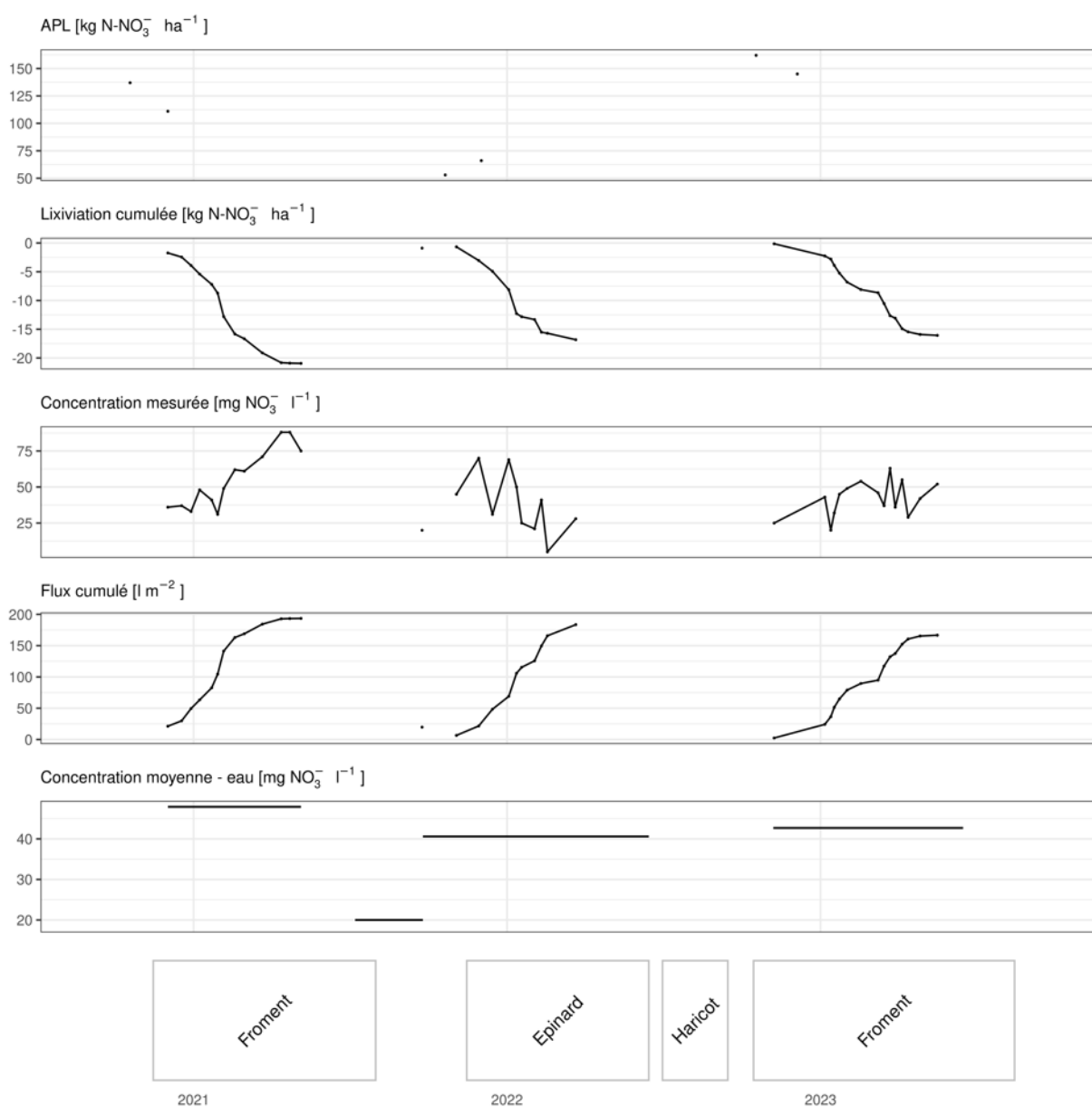


Figure 7. Suivi lysimétrique de la parcelle Sole 4.

Durant la période de drainage 2020-2021, la concentration en nitrate augmente jusqu'à $88 \text{ mg NO}_3^- \text{ l}^{-1}$ avant de légèrement diminuer. Durant cette période, $21 \text{ kg N-NO}_3^- \text{ ha}^{-1}$ ont été lixiviés 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 $20 \text{ mg NO}_3^- \text{ l}^{-1}$.

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 $110 \text{ kg N-NO}_3^- \text{ ha}^{-1}$ dans le 0-90 cm a donc été atteint durant la période de lixiviation 2020-2021. Par la suite environ l'équivalent de $40 \text{ kg N-NO}_3^- \text{ ha}^{-1}$ a été récolté à l'exutoire du lysimètre. La culture de froment a donc valorisé environ $70 \text{ kg N-NO}_3^- \text{ ha}^{-1}$ 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 $15 \text{ kg N-NO}_3^- \text{ ha}^{-1}$. La concentration moyenne de nitrate au cours de cette période à la base du lysimètre s'établit néanmoins à $45 \text{ mg NO}_3^- \text{ l}^{-1}$.

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

5.5. Haute Bova

La parcelle Haute Bova est suivie depuis plus de 15 ans. L'itinéraire culturale récent 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	57	37	46	14
			13		17
			7		15
2022	Betterave	15	8	41	27
			4		5
			3		9
2023	Pois	124	62	128	15
			39		51
			23		62

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).

La figure 8 présente les résultats du suivi lysimétrique récent.

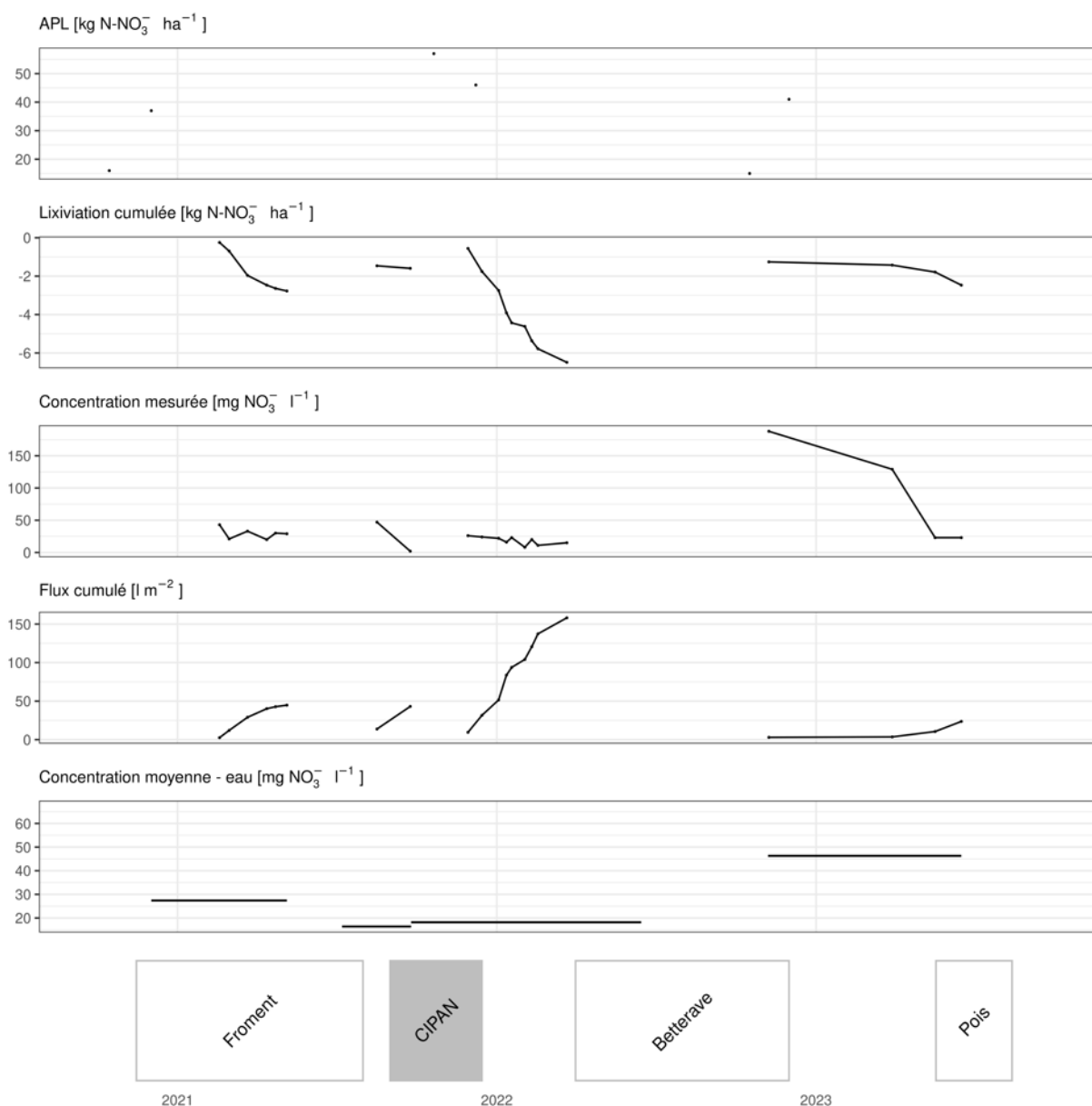


Figure 8. Suivi lysimétrique de la parcelle Haute Bova.

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 de 47 mg NO₃⁻ l⁻¹. Dans le second (29 litres), la concentration était inférieure à 4 mg NO₃⁻ 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 NO₃⁻ 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 NO₃⁻ l⁻¹.

5.6. Rétrospective sur les quatre parcelles de Hesbaye

Au cours de ces dernières années (2018-2022), la région wallonne a connu quatre années climatiques plus sèches et plus chaude que la normale (années encadrées de vert - figure 9).

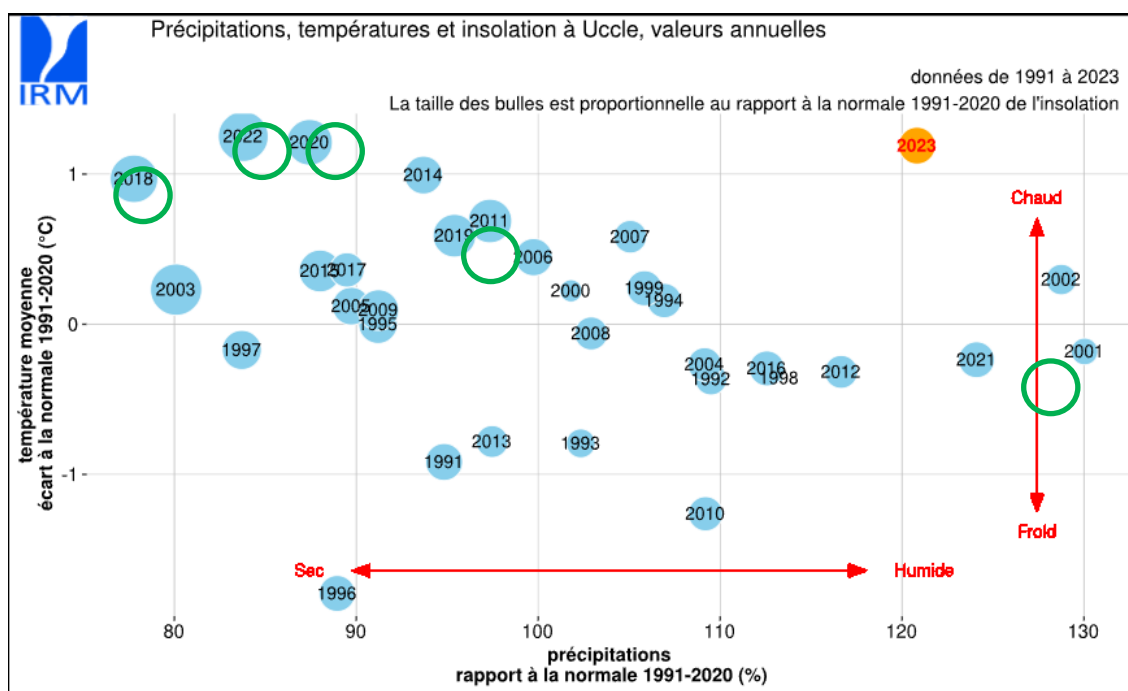


Figure 9. Bilan climatique annuel (Source : IRM).

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.

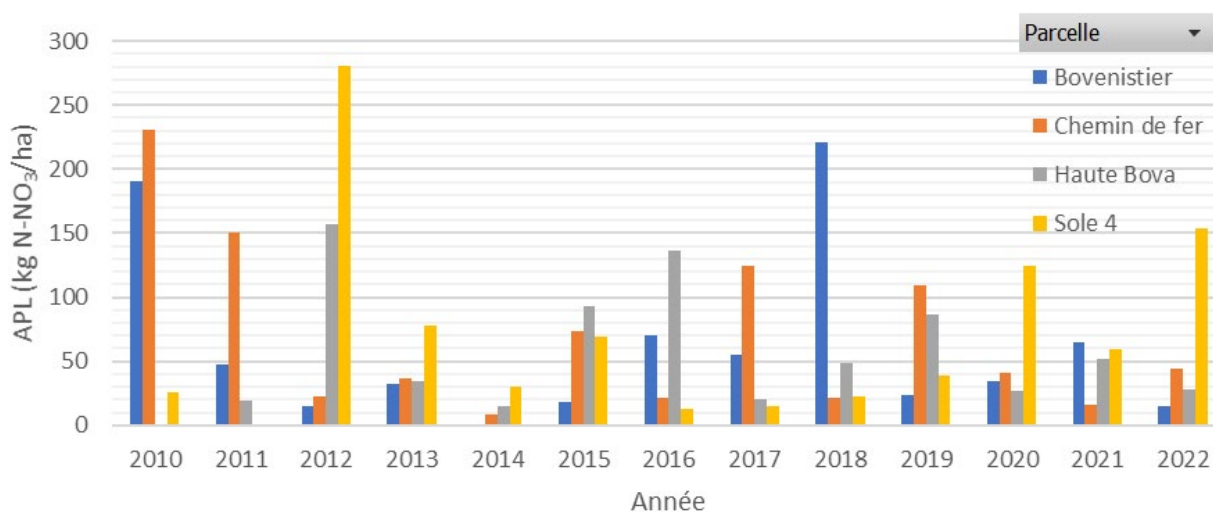


Figure 10. APL moyen dans les parcelles équipées d'un lysimètre en Hesbaye (période 2010-2022).

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.

La figure 11 illustre la concentration en nitrate à l'exutoire des quatre lysimètres. 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.

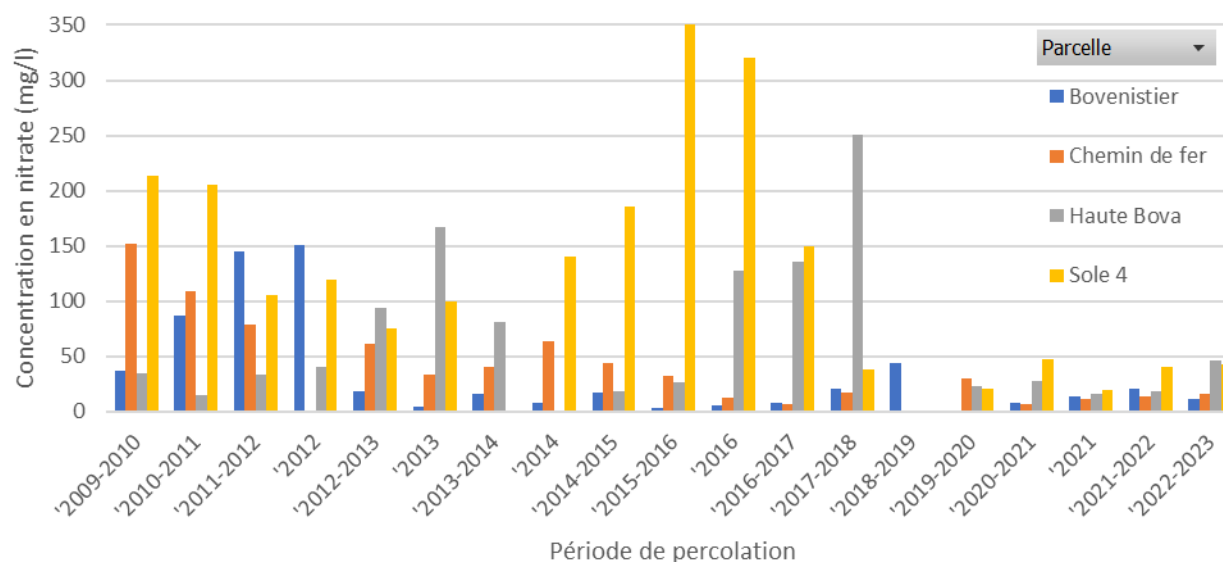


Figure 11. Concentration moyenne (par épisode de percolation) en nitrate de l'eau à l'exutoire des lysimètres (période 2009-2023).

L'observation de cette figure indique que depuis l'hiver 2018-2019, la concentration en nitrate de l'eau récoltée à l'exutoire des lysimètres n'excède 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 ($p\text{-value} = 0.65$) des moyennes avant et après 2018 (une moyenne⁹ de $70 \text{ kg N-NO}_3 \text{ ha}^{-1}$ jusque fin 2017 et moyenne de $62 \text{ kg N-NO}_3 \text{ ha}^{-1}$ à partir de 2018).

⁹ 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 2023, les parcelles Sol Résidus ont été couvertes de :

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

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

- en 2020, les APL des parcelles SR 4 et 12 étaient plus élevés que ceux des parcelles SR 8 et 16.
- 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.

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

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 2023 ;
- 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 n'ont pas encore atteint les flux observés aux exutoires des trois autres lysimètres.

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.

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.

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).

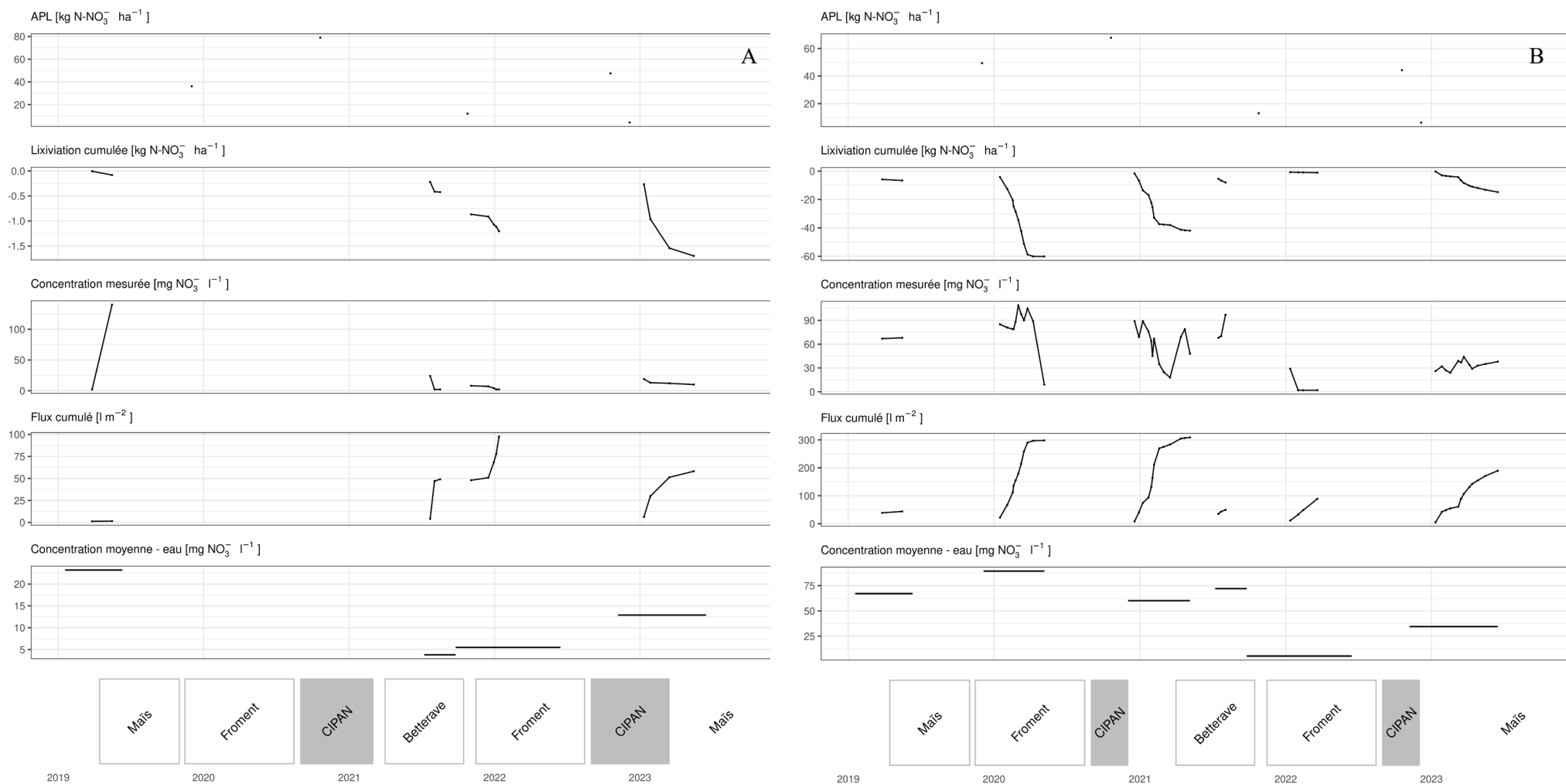


Figure 12. Suivi lysimétrique dans les lysimètres SR 4 (A) et SR 8 (B).

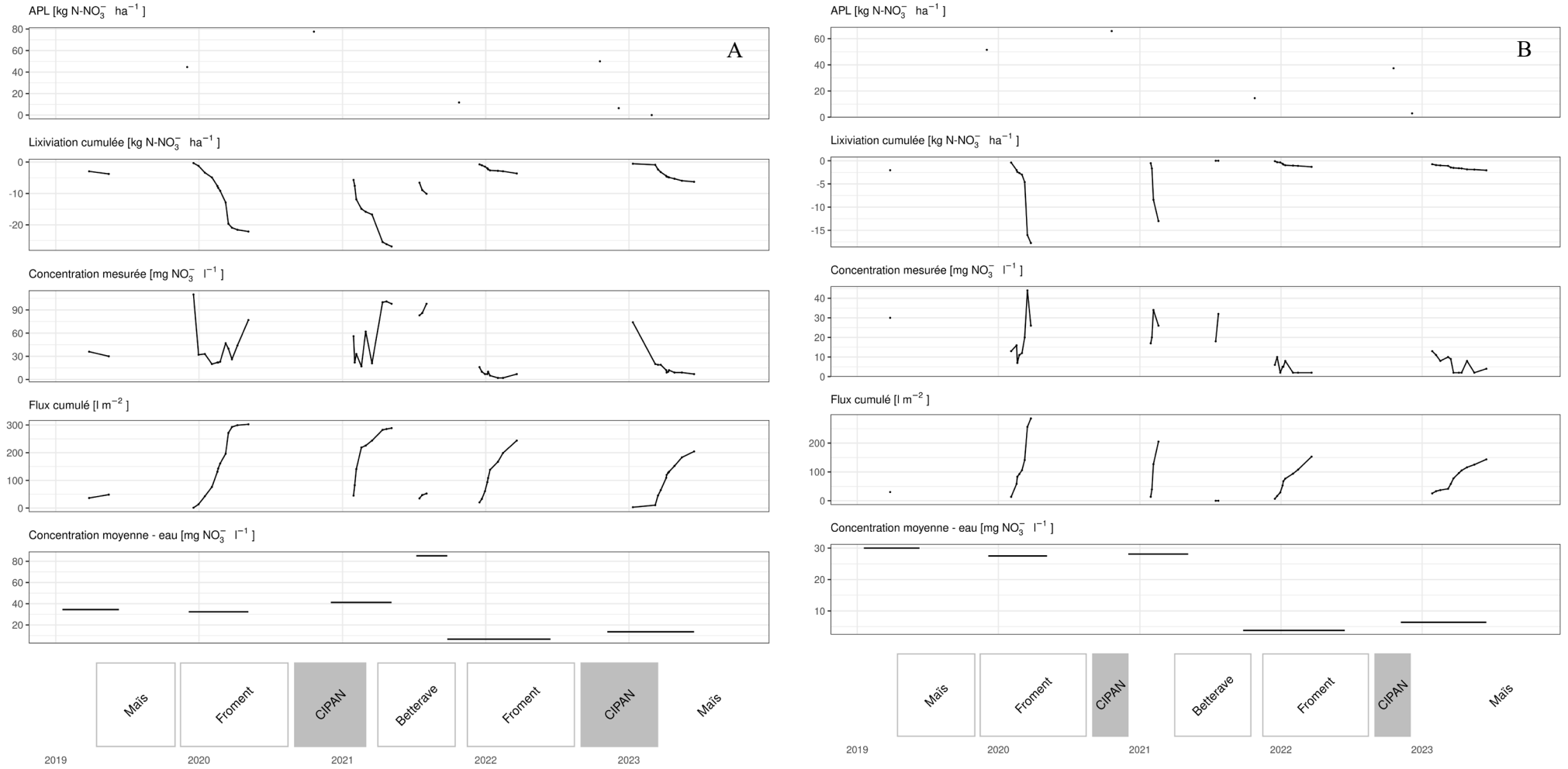


Figure 13. Suivi lysimétrique dans les lysimètres SR 12 (A) et SR 16 (B)

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 9 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 9.

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	

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. En 2021, chaque lysimètre a reçu 160 litres d'eau soit l'équivalent de 320 mm.

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 trois derniers hivers (2020/21 à 2022/23) :

- 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 ;
- la modalité D (apport de lisier à la fin octobre) présente un risque élevé : au cours du premier et troisième 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) ;
- la modalité A (apport de lisier vers le 15 janvier) ainsi que les modalités B et C (apport de lisier fin août ou fin septembre) présentent généralement des concentrations hivernales comprises entre 5 et 20 mg l⁻¹ ;
- 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 font 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 kg N-NO₃⁻ 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. A l'inverse, un apport précoce de lisier (mi-janvier) n'a pas occasionné de pertes importantes par lixiviation, dans les conditions climatiques de ces trois hivers.

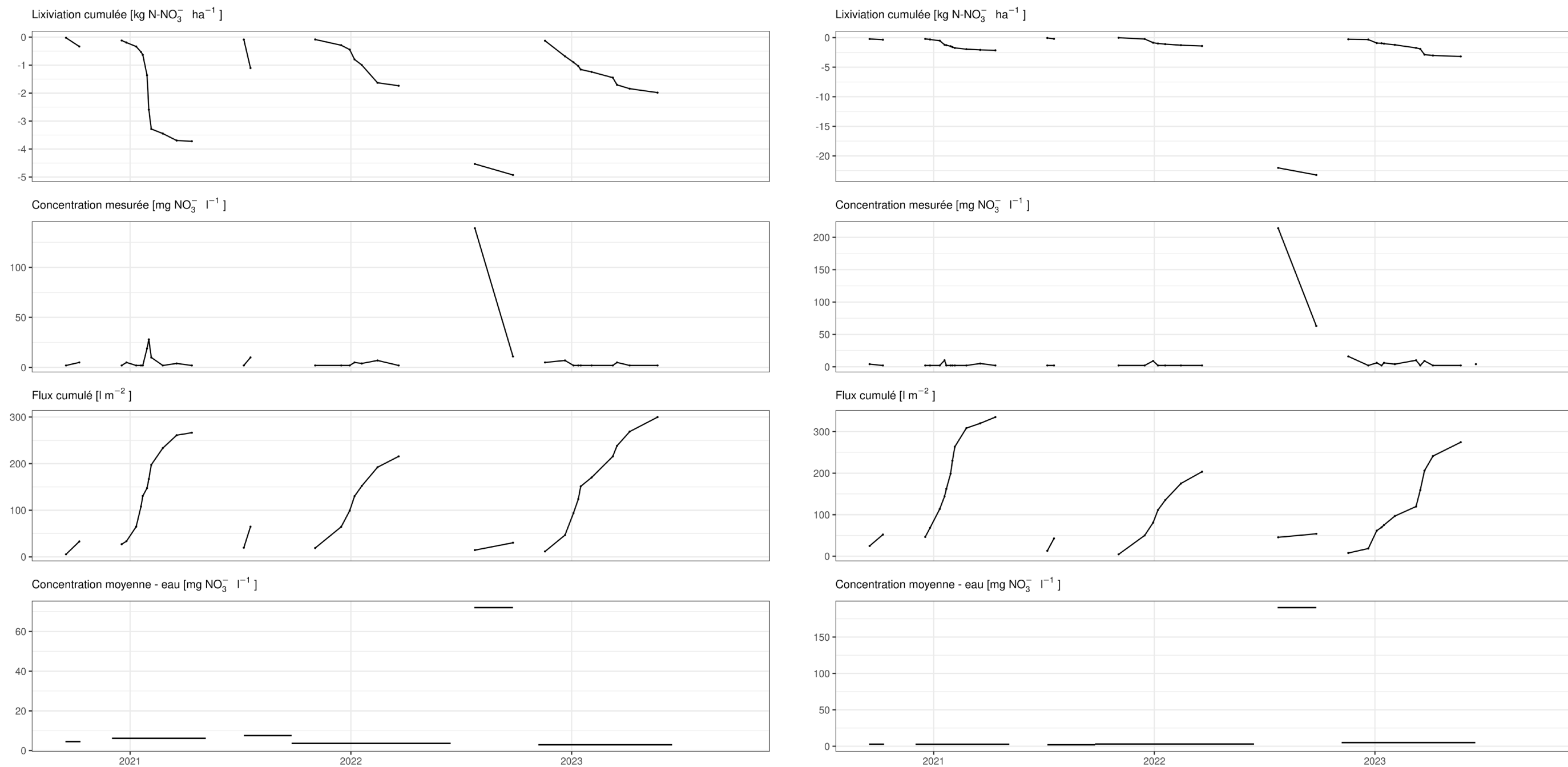


Figure 14. Suivi lysimétrique dans les lysimètres 'prairie' de la modalité A.

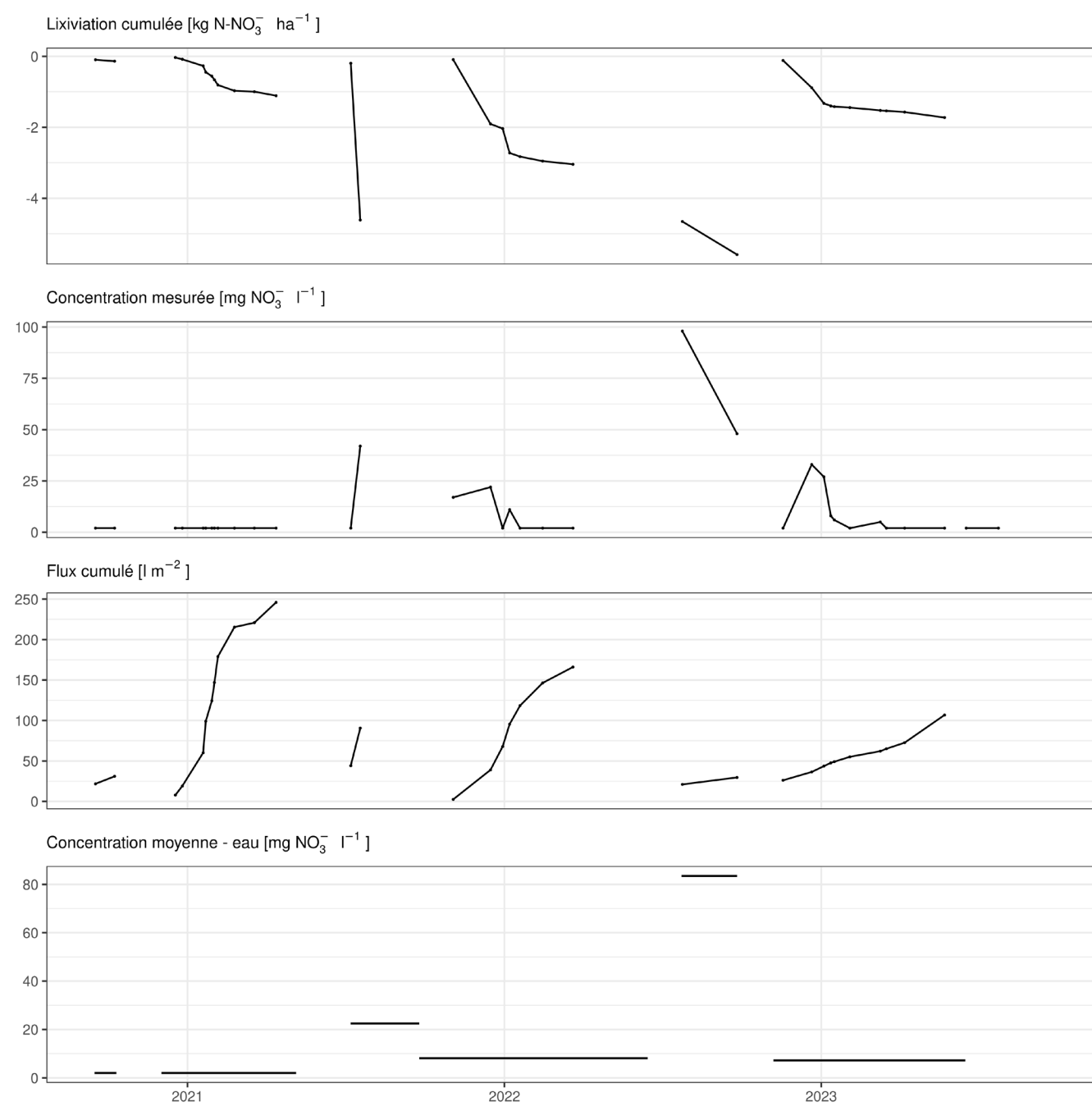
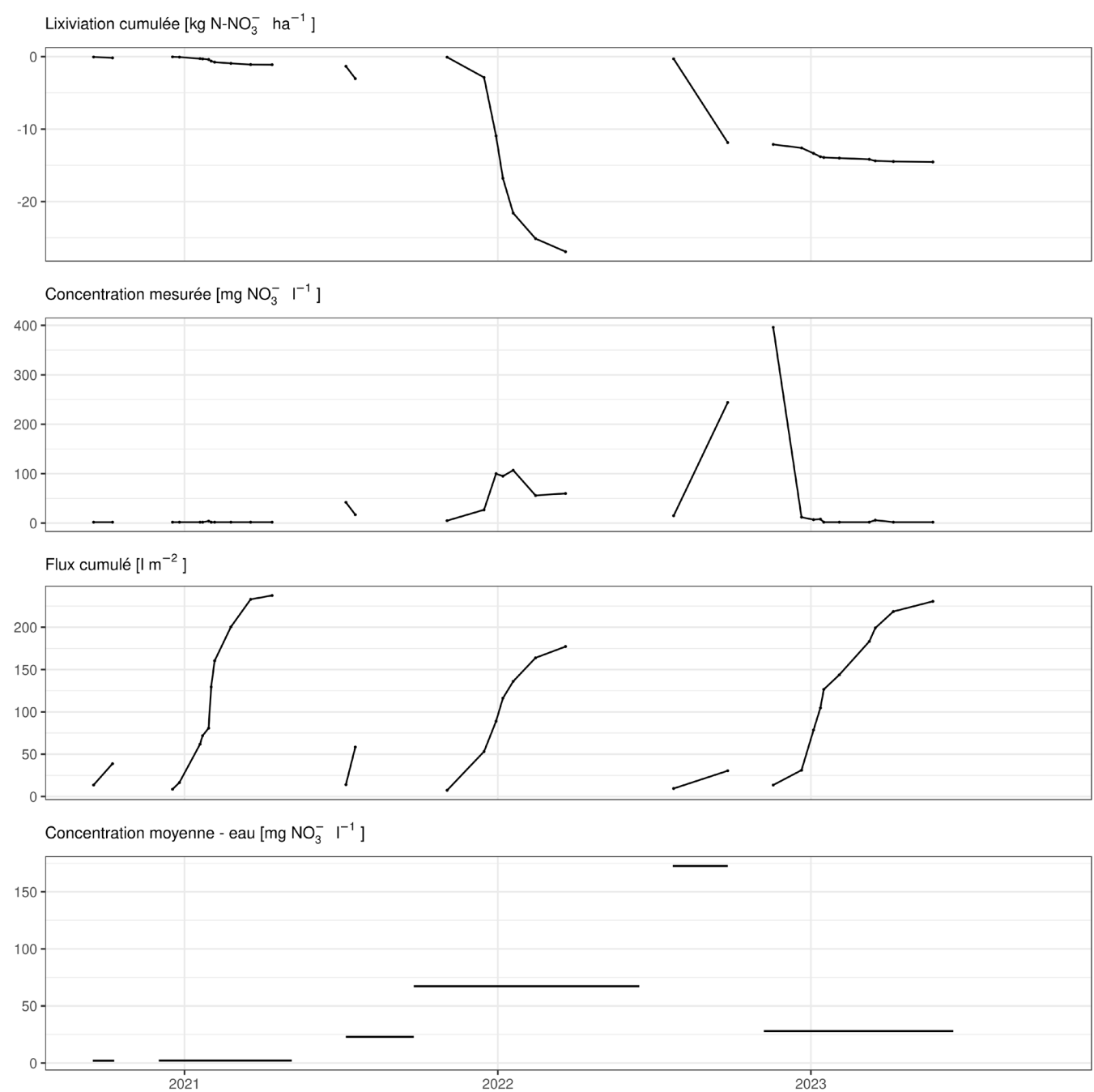


Figure 15. Suivi lysimétrique dans les lysimètres 'prairie' de la modalité B.

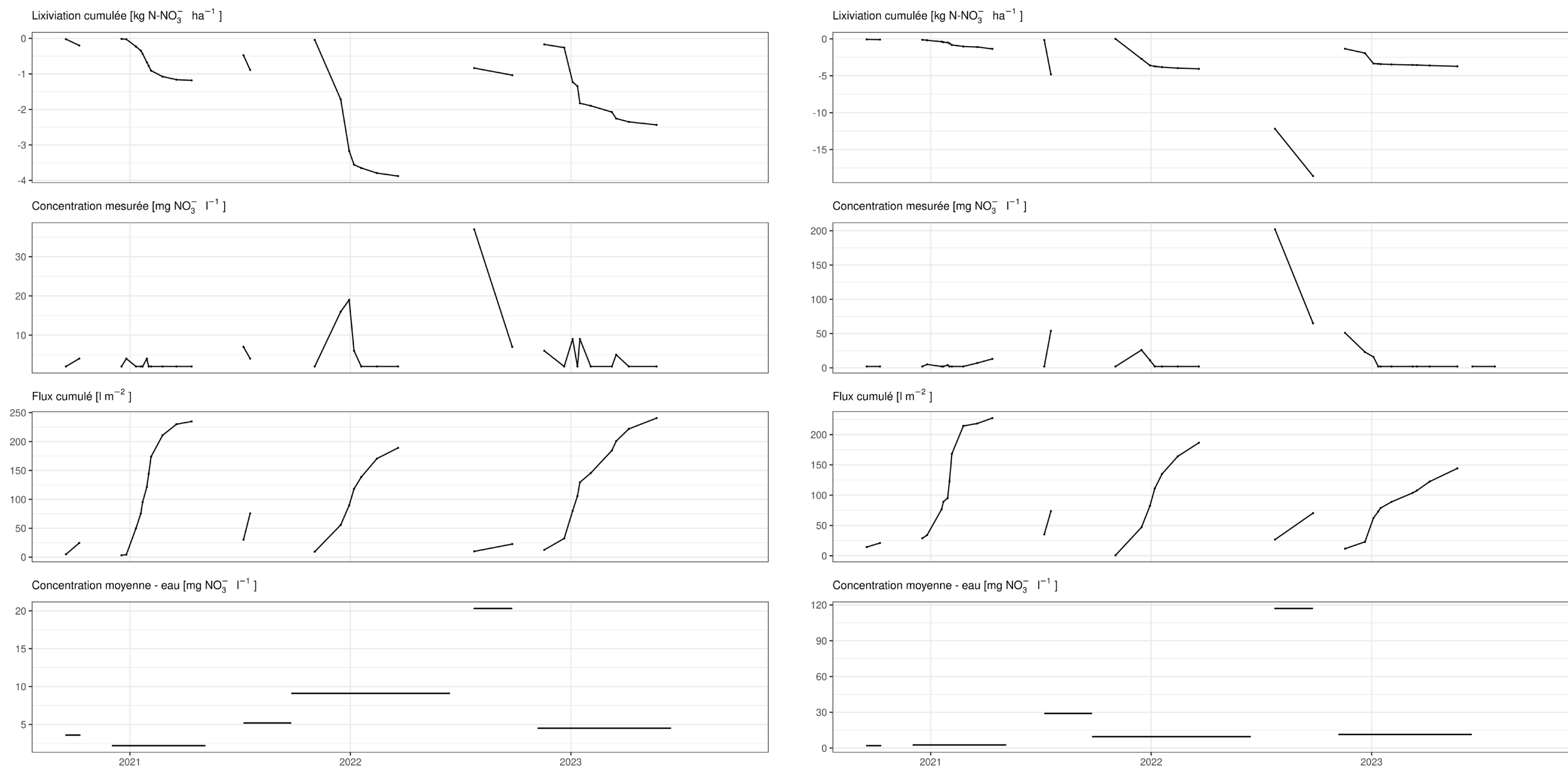


Figure 16. Suivi lysimétrique dans les lysimètres 'prairie' de la modalité C.

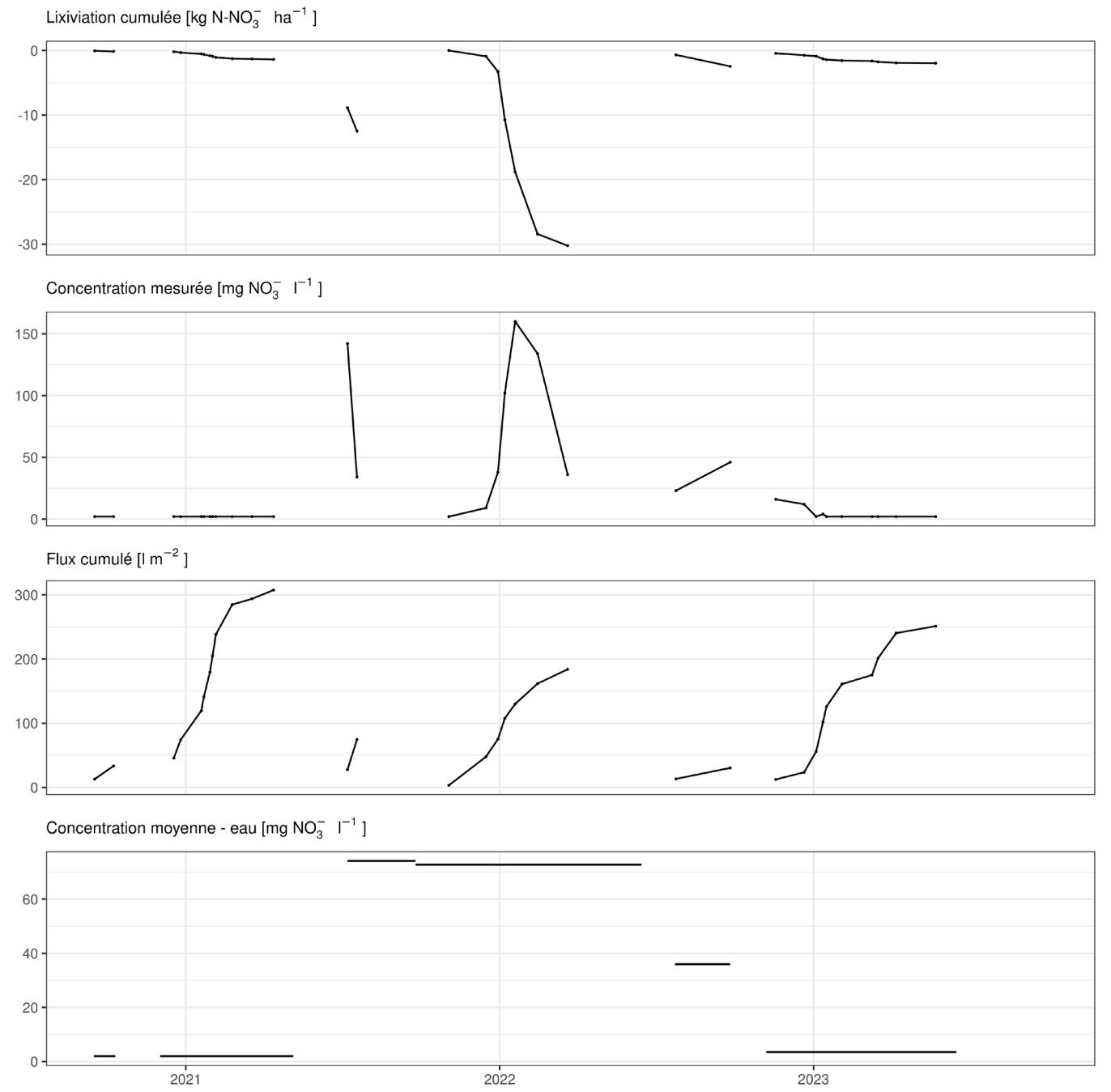
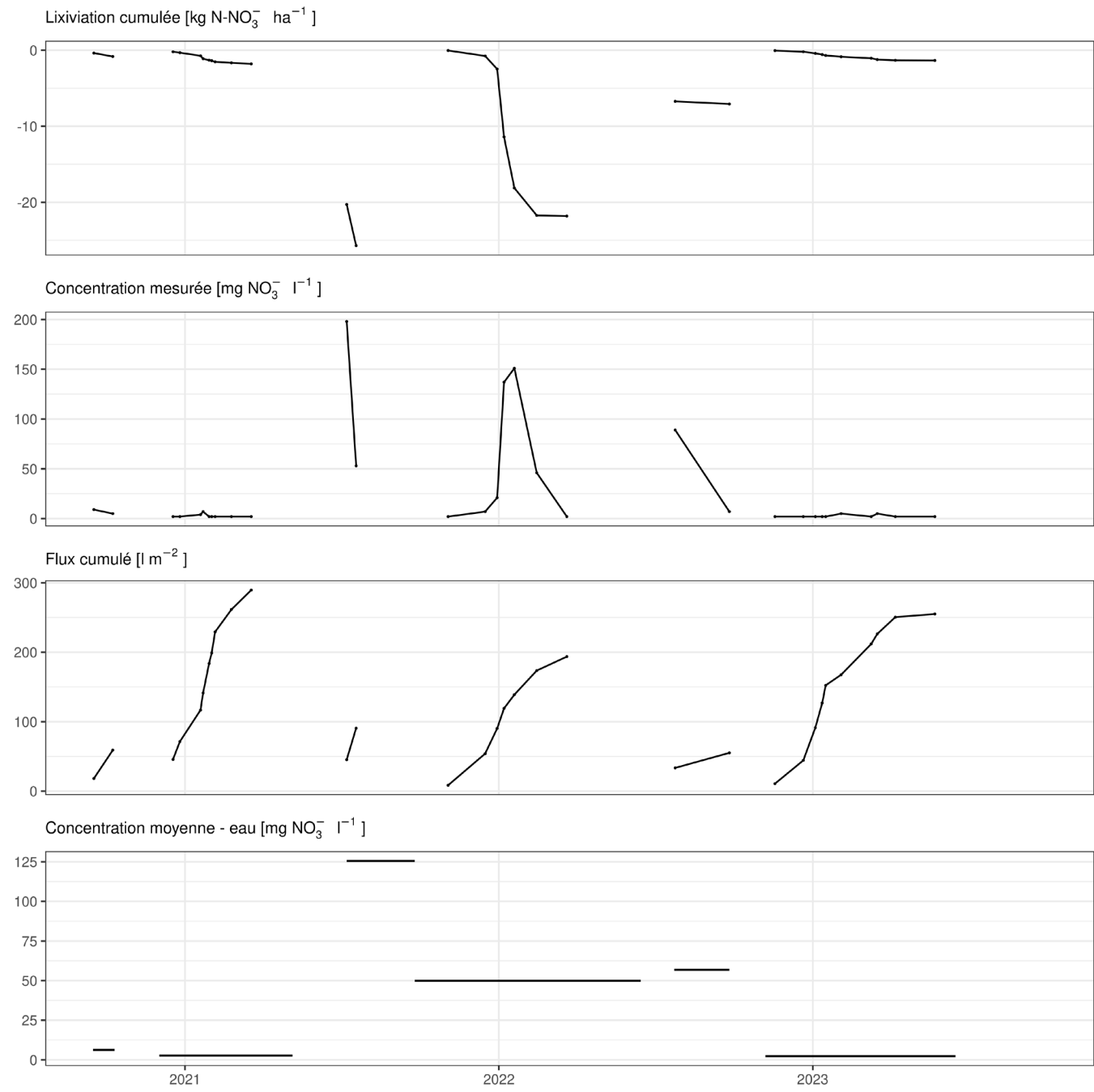


Figure 17. Suivi lysimétrique dans les lysimètres 'prairie' de la modalité D.

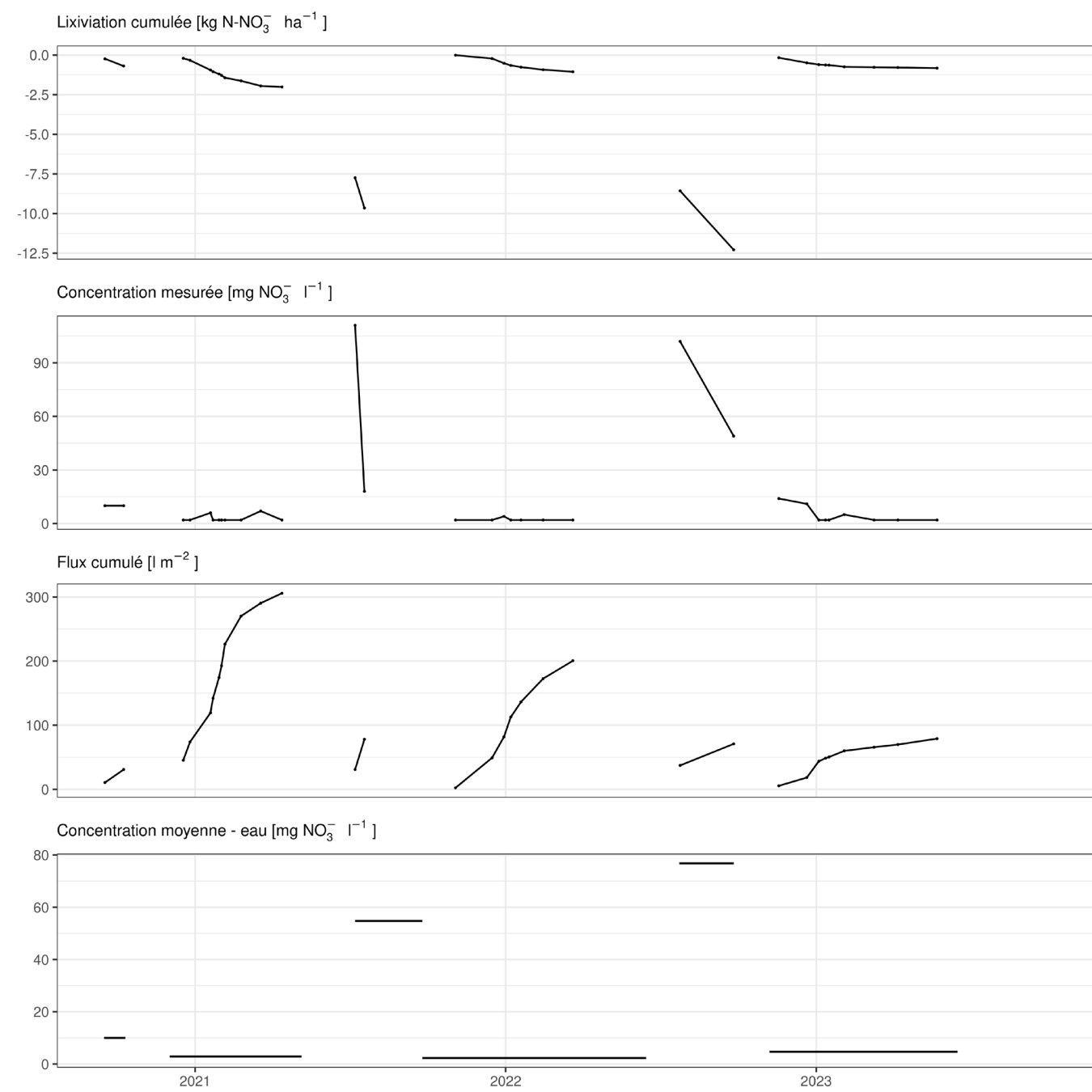
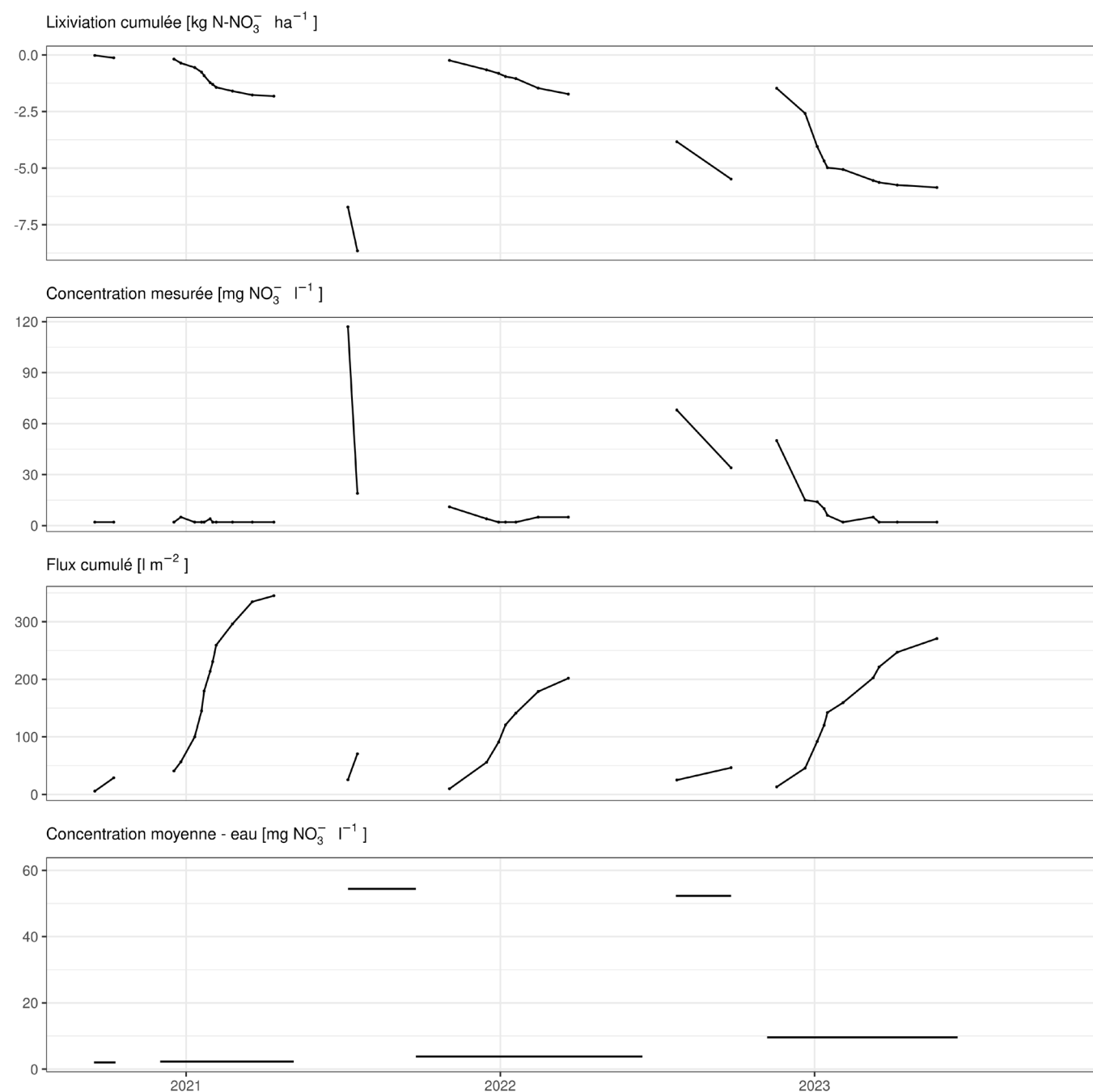


Figure 18. Suivi lysimétrique dans les lysimètres 'prairie' de la modalité E