



Analyse statistique de la distribution du pourcentage de conformité des mesures APL évaluée en fonction de différentes marges de tolérance



Ce document doit être cité de la manière suivante :

Lefébure K., Vandenberghe C., 2024. *Analyse statistique de la distribution du pourcentage de conformité des mesures APL évaluée en fonction de différentes marges de tolérance*. Dossier GRENeRA **24-09**, 24 p. In Bergiers G.^[1], De Toffoli M.^[2], Vandenberghe 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.

^[1] Centre wallon de Recherches agronomiques

^[2] Earth and Life Institute (UCLouvain)

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

Table des matières

1. INTRODUCTION.....	2
2. MATERIELS ET METHODES	3
3. RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	6
3.1. INTRODUCTION.....	6
3.2. RESULTATS GLOBAUX (0 – 60 CM).....	8
3.2.1. Optimisation 1 ($x = 10 \text{ kg N-NO}_3^- \text{ ha}^{-1}$) ; équation 2.....	9
3.2.2. Optimisation 2 ($x = 12 \text{ kg N-NO}_3^- \text{ ha}^{-1}$) ; équation 3.....	10
3.3. RESULTATS GLOBAUX (0 – 30 CM).....	11
3.3.1. Optimisation 1 ($x = 5 \text{ kg N-NO}_3^- \text{ ha}^{-1}$) ; équation 2.....	11
3.3.2. Optimisation 2 ($x = 7 \text{ kg N-NO}_3^- \text{ ha}^{-1}$) ; équation 3.....	12
3.4. ANALYSES DE MATRICES DE CONFUSION.....	13
3.4.1. Classe A3 en 2019 pour un échantillonnage réalisé sur 60 cm.....	13
3.4.2. Classe A4 en 2021 pour un échantillonnage réalisé sur 30 cm.....	14
4. CONCLUSIONS	17
5. ANNEXES	18
5.1. MATRICE DE CONFUSION, ANNEE 2019.....	18
5.2. MATRICE DE CONFUSION, ANNEE 2020.....	19
5.3. MATRICE DE CONFUSION, ANNEE 2021.....	20
5.4. MATRICE DE CONFUSION, ANNEE 2022.....	21
5.5. CONCLUSIONS	22

1. Introduction

Le Programme de Gestion De l'Azote (PGDA) prévoit qu'un contrôle de l'Azote Potentiellement Lessivable (APL) soit réalisé annuellement sur 3 parcelles dans 5 % des exploitations situées en zone vulnérable.

Ce contrôle est réalisé par couche de 30 cm jusqu'à 90 cm. Dans certains cas, les parcelles ne sont échantillonnées que jusqu'à 30 ou 60 cm.

Les résultats APL des parcelles contrôlées sont comparées à des valeurs de référence établies annuellement par deux équipes universitaires (UCL et Gembloux Agro-Bio Tech) membres de la Structure PROTECT'eau. Ces références sont établies pour huit classes de culture. Pour chacune de ces classes de cultures, des échantillonnages de sol sont réalisés entre le 15 et le 30 octobre et entre le 1^{er} et le 15 décembre. La médiane et le percentile 66 des observations sont interpolées sur l'ensemble de la période de contrôle s'étalant du 15 octobre au 20 décembre.

Des seuils de non-conformité sont calculés dans les cas de figure où les parcelles sont échantillonnées jusqu'à 30, 60 ou 90 cm pour chaque jour entre ces deux dates.

Le seuil de non-conformité est calculé en ajoutant une tolérance au percentile 66. Dans la législation actuelle, la tolérance est la valeur maximale entre 15 kg N-NO₃⁻ ha⁻¹ et 19,8 % de la médiane.

Pour plus d'informations, le lecteur est renvoyé au document suivant :

Vandenberghe C., De Toffoli M., Bachelart F., Imbrecht O., Lambert R., Colinet G., 2022. Survey Surfaces Agricoles. Etablissement des références APL 2022. Dossier GRENeRA 22-03, *In* De Toffoli M., Vandenberghe C., Durenne B., Imbrecht O., Bourmanne C., Bachelart F., Lefébure K., Williscombe F., Bergiers G., Weickmans B., Huyghebaert B., Colinet G., Lambert R., 2022. Programme de gestion durable de l'azote en agriculture wallonne et volet eau du programme wallon de réduction des pesticides – Rapport d'activités final 2022 des membres scientifiques de la Structure d'encadrement PROTECT'eau. Centre wallon de Recherches agronomiques, Université de Liège - Gembloux Agro-Bio Tech et Université catholique de Louvain.

Disponible à l'adresse suivante :

https://www.gembloux.ulg.ac.be/gp/grenera/Bibliotheque/PROTECTeau/2022/DG_22-03_APL.pdf

Il a été montré par le passé (Lefébure et al., 2018)¹ que cette manière de calculer la tolérance conduisait à une augmentation du taux de conformité des parcelles non échantillonnées jusqu'à 90 cm (tableau 1).

Tableau 1. Nombre de parcelles échantillonnées par profondeur et pourcentage de non-conformité par type d'échantillonnage (extrait du rapport DG 18-06).

Profondeur atteinte [cm]	N _{Observations}	N _{Non-Conformité}	Non-conformité [%]
30	25	2	8
60	199	39	19.6
90	1600	484	30.3

A la demande du SPW (16/11/2023), une étude de réévaluation du calcul de la tolérance a été mise en œuvre.

¹ <https://www.gembloux.ulg.ac.be/gp/grenera/Bibliotheque/PROTECTeau/2018/DG%2018-06%20EvaluationContrôleAPL.pdf>

2. Matériels et méthodes

La conformité d'une parcelle est évaluée en comparant sa valeur APL au seuil d'intervention (ou limite de non-conformité) établi pour le jour de l'échantillonnage par année et par classe de culture. Plus précisément, un pourcentage de conformité est calculé comme le rapport entre l'APL mesuré et le seuil d'intervention. Si cette valeur est supérieure à l'unité, la parcelle est considérée comme non conforme et inversement, si la valeur est inférieure à l'unité, la parcelle est considérée comme conforme.

Afin de ne pas biaiser le contrôle APL, il faudrait que la conformité des parcelles établie sur des échantillonnages réalisés jusqu'à 90 cm soit globalement la même que celle établie sur des profondeurs d'échantillonnage plus faibles. Il a en effet été montré que des contrôles APL réalisés jusqu'à 30 ou 60 cm sont généralement plus favorables pour les agriculteurs concernés (tableau 1). Selon les années, la tendance générale n'est pas forcément vérifiée.

Afin de proposer une nouvelle procédure de calcul de la tolérance à appliquer au percentile 66 pour établir le seuil d'intervention, la base de données du contrôle APL (SPW) a été exploitée. Dans celle-ci, seules les parcelles ayant été échantillonnées entre 2013 et 2022 et jusqu'à 90 cm de profondeur ont été conservées.

Le pourcentage de conformité de chaque parcelle a été évalué en considérant que la parcelle a été échantillonnée jusqu'à 30, 60 ou 90 cm. La comparaison des distributions du pourcentage de conformité se base sur le test statistique de Wilcoxon, un test non paramétrique d'identité des distributions. Ce test se justifie par rapport au test t-Student de comparaison des moyennes vu la non-normalité des distributions. Si l'on considère deux populations X et Z caractérisées par n_x et n_z individus, on peut définir une nouvelle distribution W basée sur l'ensemble des individus, composée donc de n_w ($= n_x + n_z$) individus. Ces n_w individus sont classés d'après leur rang. Le score attribué à la distribution X (X_s) est calculé comme la somme des rangs des n_x individus dans la distribution W.

On doit rejeter l'hypothèse d'identité des distributions si

$$u_{obs} \geq u_{1-\frac{\alpha}{2}}$$

avec

$$u_{obs} = \frac{\left| X_s - \frac{n_x(n_x + n_z + 1)}{2} \right|}{\sqrt{\frac{n_x n_z (n_x + n_z + 1)}{12}}}$$

Dans ce document, la distribution X correspond donc à la distribution du pourcentage de conformité des parcelles évalués en tenant compte de l'APL mesuré sur 90 cm et la distribution Z à la distribution du pourcentage de conformité des parcelles évalués en tenant compte de l'APL mesuré sur 30 ou 60 cm.

En pratique, les conclusions du test de Wilcoxon sont exprimées par la p-valeur. Lorsque celle-ci est inférieure à 0,05, l'hypothèse d'identité des distributions est rejetée.

Ces comparaisons de distributions sont le point de départ du travail.

Comme il a été expliqué précédemment, la tolérance appliquée au percentile 66 pour déterminer le seuil d'intervention est calculé par la formule suivante.

$$D = \max(0,198 * \text{médiane}, 15) \quad [1]$$

Trois méthodes d'évaluation de la tolérance ont été testées ; en faisant varier la tolérance minimale (15 kg N-NO₃⁻ ha⁻¹ dans l'équation précédente) et/ou la partie proportionnelle à la médiane (formules suivantes).

Dans l'équation 2, seule la valeur minimale de la tolérance change.

Inévitablement, si la valeur associée à x (valeur minimale de la tolérance) devient faible par rapport à la partie proportionnelle à la médiane, il se pourrait que la tolérance soit toujours déterminée par cette dernière composante. L'équation 3 évalue donc une tolérance dont les composantes fixe et relative varient proportionnellement.

Enfin, l'équation 4 évalue la tolérance sans valeur minimum.

Dans le cas où x vaut 15, les équations 2 et 3 estiment des tolérances identiques à celle évaluée par l'équation 1.

$$D_x = \max(0,198 * \text{médiane}, x) \quad [2]$$

$$D_x = \max(0,198 * \text{médiane} * \frac{x}{15}, x) \quad [3]$$

$$D_x = \max(0,198 * \text{médiane} \frac{x}{15}) \quad [4]$$

De nouvelles tolérances ont été calculées pour des x valant 0, 2, 5, 7, 10, 12 et 14 kg N-NO₃⁻ ha⁻¹ pour évaluer la conformité des parcelles échantillonnées jusqu'à 30 et 60 cm.

Des matrices de confusion dont un exemple est présenté au tableau 2 ont également été créées pour comparer les classifications des valeurs APL en fonction de la profondeur échantillonnée et des équations utilisées pour calculer la tolérance.

La comparaison parfaite est rencontrée lorsque toutes les comparaisons sont situées dans les cases « Vrais positifs » et « Vrais négatifs ».

Lorsqu'une comparaison apparaît dans la cellule « Faux positifs », cela signifie que la valeur APL a été jugée conforme sur une profondeur de 90 cm. Ce cas de figure est défavorable à l'exploitant agricole.

Lorsqu'une comparaison apparaît dans la cellule « Faux négatifs », cela signifie que la valeur APL a été jugée non conforme sur une profondeur de 90 cm. Ce cas de figure est favorable à l'exploitant agricole.

Tableau 2. Matrice de confusion théorique.

	Conforme (0 – 60 cm)	Non conforme (0 – 60 cm)	Total Conformité évaluée sur 90 cm
Conforme (0 – 90 cm)	Vrais négatifs	Faux positifs	
Non conforme (0 – 90 cm)	Faux négatifs	Vrais positifs	
Total Conformité évaluée sur 60 cm			

3. Résultats et discussions

3.1. Introduction

Les graphiques présentés à la figure 1 mettent en évidence l'influence de la manière avec laquelle la tolérance est calculée sur le pourcentage de conformité des parcelles de la classe A4 en 2013 des parcelles échantillonnées jusqu'à 60 cm. Sur le graphique de gauche, le pourcentage est évalué d'après la méthode « historique » (équation 1). Sur le graphique de droite, le pourcentage est ici calculé d'après l'équation 3.

A première vue, on constate que la densité de probabilité de la courbe bleue est supérieure à la densité de probabilité de la courbe jaune dans la gamme de pourcentage de conformité comprise entre 0 et environ 0,7. Pour rappel, les parcelles ayant un pourcentage de conformité supérieur à l'unité sont considérées comme non conformes au regard du PGDA.

Les p-valeurs du test de Wilcoxon associées à ces deux comparaisons de distributions sont respectivement de 0,0005 et de 0,913. L'utilisation de l'équation 3 et une valeur x fixée à $7 \text{ kg N-NO}_3 \text{ ha}^{-1}$ pour calculer la tolérance permettent donc dans ce cas d'améliorer la qualité du contrôle.

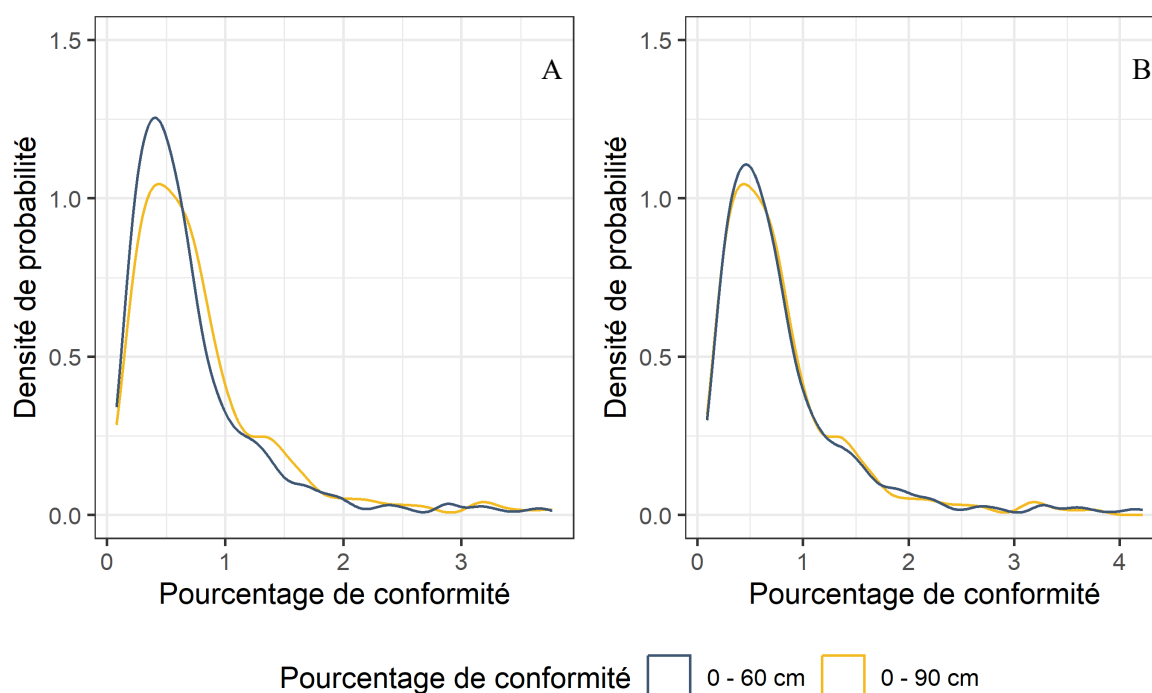


Figure 1. Comparaison des distributions de densités de probabilité du pourcentage de conformité calculée pour l'ensemble des mesures APL de la classe A4 (2013) réalisées jusqu'à 60 et 90 cm selon que la tolérance soit calculée par l'équation 1 (A) ou 3 (B).

Les matrices de confusion associées à la comparaison de ces deux systèmes de classification sont présentées ci-après.

Tableau 3. Matrice de confusion de la classification de la conformité évaluée sur 90 cm et sur 60 cm lorsque la tolérance est évaluée par l'équation 1 (méthode historique).

	Conforme (0 – 60 cm)	Non conforme (0 – 60 cm)	Total Conformité évaluée sur 90 cm
Conforme (0 – 90 cm)	352	1	353
Non conforme (0 – 90 cm)	20	85	105
Total Conformité évaluée sur 60 cm	372	86	

Lorsque la conformité des parcelles est évaluée sur base de mesure APL réalisées jusqu'à 90 cm, 105 parcelles sont considérées comme non conformes et 353 comme conformes.

Lorsque la conformité des parcelles est évaluée sur base de mesure APL réalisées jusqu'à 60 cm et que la tolérance est calculée par l'équation 1, 86 parcelles sont considérées comme non conformes et 372 comme conformes.

Cet exemple montre donc que la conformité d'une parcelle peut être affectée par la profondeur d'échantillonnage. Ici, le taux d'erreur de classement est légèrement inférieur à 5 %.

Tableau 4. Matrice de confusion de la classification de la conformité évaluée sur 90 cm et sur 60 cm lorsque la tolérance est évaluée par l'équation 3 ($x = 7 \text{ kg N-NO}_3^- \text{ ha}^{-1}$).

	Conforme (0 – 60 cm)	Non conforme (0 – 60 cm)	Total Conformité évaluée sur 90 cm
Conforme (0 – 90 cm)	340	13	353
Non conforme (0 – 90 cm)	11	94	105
Total Conformité évaluée sur 60 cm	351	107	

Lorsque la conformité des parcelles est évaluée sur base de mesure APL réalisées jusqu'à 60 cm et que la tolérance est calculée par l'équation 3 ($x = 7$), 107 parcelles sont considérées comme non conformes et 351 comme conformes. Ces taux de conformités correspondent à celui évalué sur base des mesures APL réalisées jusqu'à 90 cm.

Ici, le taux d'erreur de classement est légèrement supérieur à 5 %. Mais, dans ce cas-ci, le nombre de parcelles classées comme conforme sur 60 cm alors qu'elles étaient non conformes sur 90 cm et le nombre de parcelles classées comme non conforme sur 60 cm alors qu'elles étaient conformes sur 90 cm sont du même ordre de grandeur. La somme des probabilités conditionnelles qu'une parcelle soit conforme sur 60 cm alors qu'elle ne l'est pas sur 90 et qu'une parcelle soit non conforme sur 60 cm alors qu'elle ne l'est pas sur 90 cm est plus faible lorsque la tolérance est évaluée par l'équation 3 et un x fixé à 7.

L'exemple présenté ci-dessus met en évidence, pour un cas particulier, l'influence du changement de méthode d'évaluation de la tolérance sur la classification APL. La suite du paragraphe s'attachera à présenter de manière synthétique l'influence du changement de méthode pour l'ensemble des classes de culture et pour l'ensemble des années étudiées. Afin de faciliter la compréhension du document, seules les p-valeurs du test de Wilcoxon seront, dans un premier temps, présentées.

3.2. Résultats globaux (0 – 60 cm)

Le tableau suivant présente l'ensemble des p-valeurs du test de Wilcoxon obtenues en comparant les distributions du pourcentage de conformité évalué à partir des APL mesurés sur 90 cm et sur 60 cm. Lorsque le pourcentage de conformité est évalué à partir des APL mesurés sur 60 cm, la tolérance est calculée selon la méthode historique.

Tableau 5. P-valeurs du test de Wilcoxon ; comparaisons des distributions du pourcentage de conformité évaluée sur 90 cm et 60 cm lorsque la tolérance est calculée selon la méthode historique.

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
2013	0,056	0,007	0,004	0,005	0,047	0,36	0,667
2014	0,025	0,006	0,077	0,282	0,44	0,775	0,528
2015	0,36	0,555	0,992	0,317	0,404	0,728	0,542
2016	0,412	0,164	0,504	0,053	0,991	0,996	0,593
2017	0,281	0,062	0,643	0,482	0,166	0,556	0,739
2018	0,554	0,081	0,82	0,256	0	0,435	0,679
2019	0,25	0	0,01	0,97	0,279	0,546	0,877
2020	0,179	0	0,078	0,801	0,497	0,729	0,267
2021	0,053	0	0,065	0,163	0,135	0,838	0,679
2022	0,72	0,33	0,857	0,142	0,085	0,971	0,636

(en gras, les p-valeurs inférieures à 0,05 qui indiquent un décalage des distributions du pourcentage de conformité)

On peut constater que les p-valeurs associées aux distributions des classes de cultures A6 et A7 sont systématiquement supérieures à 0,05. Le nombre de parcelles échantillonnées dans ces classes de cultures y est traditionnellement plus faible ; ce qui diminue la puissance du test statistique. Cependant, dans les autres classes de cultures, des différences ne sont fréquemment observées que pour les classes de cultures A2 et A3 et ponctuellement dans la classe A5. De manière assez surprenante, la plupart des différences sont mises en évidence en 2013 et 2014.

Avant de présenter les p-valeurs du test de Wilcoxon obtenues en comparant les distributions du pourcentage de conformité évalué à partir des APL mesurés sur 90 cm et sur 60 cm et des tolérances obtenues par les équations 2 et 3, il convient de signaler que le calcul de la tolérance par l'équation 4 n'améliore pas les résultats du test ; quelle que soit la valeur associée au x. Ces résultats ne seront donc pas présentés.

3.2.1. Optimisation 1 ($x = 10 \text{ kg N-NO}_3^- \text{ ha}^{-1}$) ; équation 2

Le tableau suivant présente l'ensemble des p-valeurs du test de Wilcoxon. Une comparaison non présentée dans ce document a été réalisée en amont pour déterminer la valeur de x qui minimise le nombre de situations où la p-valeur est inférieure à 0,05.

Tableau 6. P-valeurs du test de Wilcoxon ; comparaisons des distributions du pourcentage de conformité évaluée sur 90 cm et 60 cm lorsque la tolérance est calculée par l'équation 2 et $x = 10$.

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
2013	0,655	0,828	0,454	0,24	0,184	0,648	0,649
2014	0,531	0,922	0,936	0,582	0,971	0,846	0,476
2015	0,102	0,014	0,174	0,915	0,705	0,889	0,312
2016	0,136	0,51	0,961	0,506	0,895	0,996	0,235
2017	0,22	0,47	0,847	0,632	0,181	0,727	0,848
2018	0,324	0,916	0,993	0,333	0,027	0,478	0,811
2019	0,299	0,036	0,102	0,294	0,564	0,798	0,952
2020	0,506	0,09	0,801	0,983	0,675	0,931	0,484
2021	0,371	0,231	0,777	0,336	0,953	0,78	0,916
2022	0,456	0,337	0,214	0,132	0,47	0,739	0,837

(en gras, les p-valeurs inférieures à 0,05 qui indiquent un décalage des distributions du pourcentage de conformité)

3.2.2. Optimisation 2 ($x = 12 \text{ kg N-NO}_3^- \text{ ha}^{-1}$) ; équation 3

Le tableau suivant présente l'ensemble des p-valeurs du test de Wilcoxon. Une comparaison non présentée dans ce document a été réalisée en amont pour déterminer la valeur de x qui minimise le nombre de situations où la p-valeur est inférieure à 0,05.

Tableau 7. P-valeurs du test de Wilcoxon ; comparaisons des distributions du pourcentage de conformité évaluée sur 90 cm et 60 cm lorsque la tolérance est calculée par l'équation 3 et une valeur x fixée à $12 \text{ kg N-NO}_3^- \text{ ha}^{-1}$.

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
2013	0,55	0,211	0,102	0,064	0,184	0,544	0,783
2014	0,532	0,278	0,496	0,905	0,971	0,901	0,743
2015	0,563	0,228	0,231	0,945	0,813	1	0,346
2016	0,607	0,845	0,96	0,656	0,518	0,889	0,352
2017	0,779	0,723	0,894	0,223	0,044	0,763	0,889
2018	0,697	0,431	0,578	0,089	0,003	0,382	0,632
2019	0,901	0,003	0,079	0,374	0,201	0,69	1
2020	0,892	0,008	0,38	0,539	0,976	0,908	0,416
2021	0,772	0,019	0,543	0,993	0,648	0,985	0,914
2022	0,758	0,863	0,317	0,031	0,097	0,853	0,497

(en gras, les p-valeurs inférieures à 0,05 qui indiquent un décalage des distributions du pourcentage de conformité)

3.3. Résultats globaux (0 – 30 cm)

Le tableau suivant présente l'ensemble des p-valeurs du test de Wilcoxon obtenues en comparant les distributions du pourcentage de conformité évalué à partir des APL mesurés sur 90 cm et sur 30 cm. Lorsque le pourcentage de conformité est évalué à partir des APL mesurés sur 30 cm, la tolérance est calculée selon la méthode historique.

Pour la plupart des comparaisons de distributions, un décalage peut statistiquement être mis en évidence. Comme précédemment, les classes de cultures A6 et A7 sont moins affectées par ces décalages.

Tableau 8. P-valeurs du test de Wilcoxon ; comparaisons des distributions du pourcentage de conformité évaluée sur 90 cm et 30 cm lorsque la tolérance est calculée selon la méthode historique.

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
2013	0	0	0	0	0	0,003	0,024
2014	0	0	0	0	0	0,18	0,047
2015	0	0	0	0,001	0,03	0,169	0,555
2016	0	0	0,175	0	0,014	0,753	0,832
2017	0	0	0,008	0,091	0,476	0,032	0,455
2018	0,018	0	0,078	0,796	0	0,825	0,913
2019	0	0	0	0	0,024	0,062	0,061
2020	0	0	0	0	0	0,246	0,035
2021	0	0	0	0	0	0,78	0,234
2022	0,001	0	0	0,449	0,982	0,315	0,938

(en gras, les p-valeurs inférieures à 0,05 qui indiquent un décalage des distributions du pourcentage de conformité)

Avant de présenter les p-valeurs du test de Wilcoxon obtenues en comparant les distributions du pourcentage de conformité évalué à partir des APL mesurés sur 90 cm et sur 30 cm et des tolérances obtenues par les équations 2 et 3, il convient de signaler que, comme précédemment, le calcul de la tolérance par l'équation 4 n'améliore pas les résultats du test ; quelle que soit la valeur associée au x. Ces résultats ne seront donc pas présentés.

3.3.1. Optimisation 1 ($x = 5 \text{ kg N-NO}_3^- \text{ ha}^{-1}$) ; équation 2

Le tableau suivant présente l'ensemble des p-valeurs du test de Wilcoxon. Une comparaison non présentée dans ce document a été réalisée en amont pour déterminer la valeur du x qui minimise le nombre de situations où la p-valeur est inférieure à 0,05.

Le nombre de situations où la p-valeur est inférieure à 0,05 est logiquement plus important que dans les tableaux précédents. En effet, la fiabilité du contrôle APL diminue lorsque le nombre de couches échantillonnées diminue. Malgré tout, le nombre de situations où la p-valeur est inférieure à 0,05 est moindre que lorsque la tolérance est calculée par la méthode « historique ».

Tableau 9. P-valeurs du test de Wilcoxon ; comparaisons des distributions du pourcentage de conformité évaluée sur 90 cm et 30 cm lorsque la tolérance est calculée par l'équation 2 et une valeur x fixée à 5 kg N-NO₃ ha⁻¹.

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
2013	0,941	0,04	0	0	0	0,064	0,131
2014	0,106	0,08	0,075	0,171	0,409	0,62	0,426
2015	0,004	0,005	0,998	0,673	0,997	0,784	0,235
2016	0,017	0,426	0,431	0,21	0,912	0,824	0,126
2017	0,055	0,232	0,408	0,624	0,053	0,458	0,807
2018	0,029	0,241	0,37	0,195	0,002	0,522	0,862
2019	0,078	0	0	0,524	0,739	0,588	0,717
2020	0,58	0	0,001	0,328	0,001	0,885	0,923
2021	0,002	0,004	0,164	0,001	0,828	0,539	0,762
2022	0,869	0,589	0,45	0,008	0,563	0,684	0,385

(en gras, les p-valeurs inférieures à 0,05 qui indiquent un décalage des distributions du pourcentage de conformité)

3.3.2. Optimisation 2 ($x = 7 \text{ kg N-NO}_3 \text{ ha}^{-1}$) ; équation 3

Le tableau suivant présente l'ensemble des p-valeurs du test de Wilcoxon. Une comparaison non présentée dans ce document a été réalisée en amont pour déterminer la valeur du x qui minimise le nombre de situations où la p-valeur est inférieure à 0,05.

Le nombre de situations où la p-valeur est inférieure à 0,05 est logiquement plus important que dans les tableaux précédents. En effet, la fiabilité du contrôle APL diminue lorsque le nombre de couches échantillonnées diminue. Malgré tout, le nombre de situations où la p-valeur est inférieure à 0,05 est moindre que lorsque la tolérance est calculée par la méthode « historique ».

Tableau 10. P-valeurs du test de Wilcoxon ; comparaisons des distributions du pourcentage de conformité évaluée sur 90 cm et 30 cm lorsque la tolérance est calculée par l'équation 3 et une valeur x fixée à 7 kg N-NO₃ ha⁻¹.

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
2013	0,069	0	0	0	0	0,042	0,131
2014	0,612	0	0,002	0,518	0,38	0,884	0,48
2015	0,291	0,849	0,264	0,646	0,627	0,918	0,389
2016	0,412	0,572	0,108	0,676	0,773	0,505	0,226
2017	0,728	0,327	0,671	0,124	0,001	0,458	0,898
2018	0,266	0,023	0,586	0,005	0	0,345	0,601
2019	0,997	0	0	0,818	0,359	0,373	0,557
2020	0,306	0	0	0,962	0	0,954	0,651
2021	0,334	0	0,003	0,157	0,611	0,642	0,914
2022	0,499	0,027	0,372	0	0,003	0,853	0,399

(en gras, les p-valeurs inférieures à 0,05 qui indiquent un décalage des distributions du pourcentage de conformité)

3.4. Analyses de matrices de confusion

Dans ce paragraphe, une analyse plus détaillée est proposée à titre d'illustration pour montrer l'impact de la méthode de calcul de la tolérance sur les distributions du pourcentage de conformité et sur la classification des parcelles par l'analyse des matrices de confusion.

Deux cas de figures ont été choisis aléatoirement dans l'ensemble des combinaisons (année et de classe de culture) pour lesquelles la modification de la méthode de calcul de la tolérance rapproche statistiquement la distribution du pourcentage de conformité évaluée par une méthode optimisée de la distribution du pourcentage de conformité évaluée par la méthode historique.

3.4.1. Classe A3 en 2019 pour un échantillonnage réalisé sur 60 cm

Les graphiques de la figure 2 mettent en évidence le rapprochement des distributions du pourcentage de conformité de la classe A3 en 2019 évaluée sur 60 cm.

Le graphe A compare le pourcentage de conformité évalué sur 60 ou 90 cm lorsque la tolérance est calculée via la méthode historique. L'observation de ce graphe indique une probabilité de conformité plus importante lorsque la mesure n'est réalisée que jusqu'à 60 cm.

Le graphe B compare le pourcentage de conformité évalué sur 60 cm [avec une tolérance calculée selon l'équation 2 ($x = 10 \text{ kg N-NO}_3^- \text{ ha}^{-1}$)] et sur 90 cm (avec la méthode historique).

L'utilisation de l'équation 2 permet d'obtenir une distribution de probabilité de conformité sur 60 cm plus proche de celle observée sur 90 cm (graphe B versus graphe A).

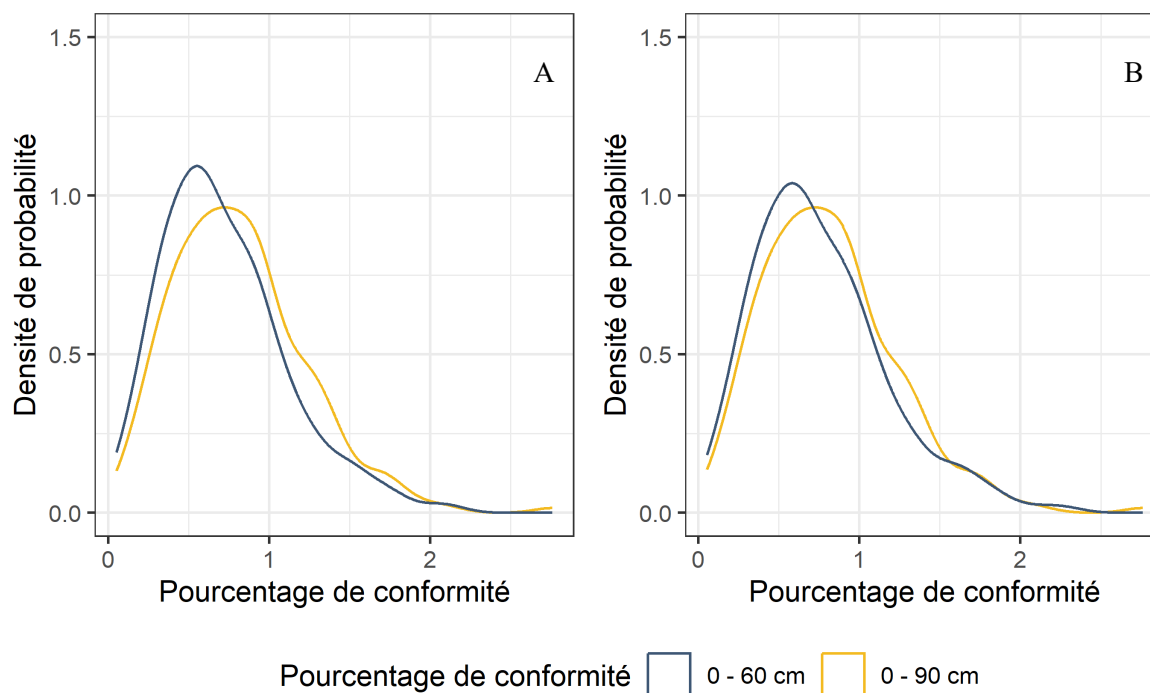


Figure 2. Comparaison des distributions de densités de probabilité du pourcentage de conformité calculée pour l'ensemble des mesures APL de la classe A3 (2019) réalisées jusqu'à 60 et 90 cm selon que la tolérance soit calculée par l'équation 1 (A) ou 2 (B).

Les matrices de confusion présentées aux tableaux 11 et 12 mettent évidence les changements de classification en fonction de la méthode utilisée pour évaluer la tolérance. Le taux de conformité est supérieur d'environ 7 % si l'échantillonnage n'est réalisé que jusqu'à 60 cm. Ainsi, les pourcentages de conformité sont respectivement de 73 %, 80 % et 78 % lorsque la conformité des APL est évaluée 90 cm (méthode historique), 60 cm (méthode historique) et 60 cm (tolérance calculée selon l'équation 2).

Dans ce cas-ci, bien que la modification de la méthode de calcul de la tolérance rapproche les distributions du pourcentage de conformité, le nombre total de parcelles pour lesquelles une modification réelle de la conformité est observée reste limité. On peut toutefois constater que le nombre de faux positifs et de faux négatifs tendent à se compenser.

Tableau 11. Matrice de confusion de la classification de la conformité des parcelles de la classe A3 en 2019 évaluée sur 90 cm et sur 60 cm lorsque la tolérance est évaluée par l'équation 1 (méthode historique).

	Conforme (0 – 60 cm)	Non conforme (0 – 60 cm)	Total Conformité évaluée sur 90 cm
Conforme (0 – 90 cm)	165	1	166
Non conforme (0 – 90 cm)	18	44	62
Total Conformité évaluée sur 60 cm	183	45	

Tableau 12. Matrice de confusion de la classification de la conformité des parcelles de la classe A3 en 2019 évaluée sur 90 cm et sur 60 cm lorsque la tolérance est évaluée par l'équation 2 et $x = 10 \text{ kg N-NO}_3^- \text{ ha}^{-1}$.

	Conforme (0 – 60 cm)	Non conforme (0 – 60 cm)	Total Conformité évaluée sur 90 cm
Conforme (0 – 90 cm)	162	4	166
Non conforme (0 – 90 cm)	15	47	62
Total Conformité évaluée sur 60 cm	177	51	

3.4.2. Classe A4 en 2021 pour un échantillonnage réalisé sur 30 cm

Les graphiques de la figure 3 mettent en évidence le rapprochement des distributions du pourcentage de conformité de la classe A4 en 2021 évaluée sur 30 cm.

Le graphe A compare le pourcentage de conformité évalué sur 30 ou 90 cm lorsque la tolérance est calculée via la méthode historique. L'observation de ce graphe indique une probabilité de conformité plus importante lorsque la mesure n'est réalisée que jusqu'à 30 cm.

Le graphe B compare le pourcentage de conformité évalué sur 30 cm [avec une tolérance calculée selon l'équation 2 ($x = 5 \text{ kg N-NO}_3^- \text{ ha}^{-1}$)] et sur 90 cm (avec la méthode historique).

L'utilisation de l'équation 2 permet d'obtenir une distribution de probabilité de conformité sur 30 cm plus proche de celle observée sur 90 cm (graphe B versus graphe A).

Cette analyse est présentée plus précisément à travers les matrices de confusion (tableaux 13 et 14). Lorsque la méthode historique est utilisée pour évaluer la conformité des parcelles contrôlées sur 30 cm, le taux de conformité est de 84 % alors qu'il n'est que de 73 % lorsque l'évaluation de la conformité est évaluée sur 90 cm selon la méthode historique. L'utilisation de l'équation 2 pour calculer la tolérance diminue le taux de conformité à 67 %. Les taux de faux négatifs et faux positifs sont respectivement d'environ 12 et 1 %. Lorsque l'équation 2 (et x fixé à $5 \text{ kg N-NO}_3 \text{ ha}^{-1}$) est utilisée pour évaluer la tolérance, ces taux sont respectivement de 4 et 10 %.

Il est cependant illusoire de croire que l'analyse des données APL sur 30 cm sera exactement la même que celle sur 90 cm. En effet, alors que la distribution de l'azote nitrique dans la zone racinaire n'a pas d'influence dans lorsque l'évaluation de l'APL est réalisée 90 cm, la distribution de l'azote nitrique dans la zone racinaire influence directement l'évaluation de l'APL lorsque celui-ci est évaluée sur une profondeur inférieure à 90 cm. Par exemple, une parcelle a été échantillonnée 19 octobre 2021, l'APL total de $159 \text{ kg N-NO}_3 \text{ ha}^{-1}$ est distribué selon 25,5, 66,5 et 67 $\text{kg N-NO}_3 \text{ ha}^{-1}$ respectivement en dans les couches 0 – 30, 30 – 60 et 60 – 90 cm. Dans ce cas, la majorité de l'APL (84 %) est située dans les couches 30 – 60 et 60 – 90 cm.

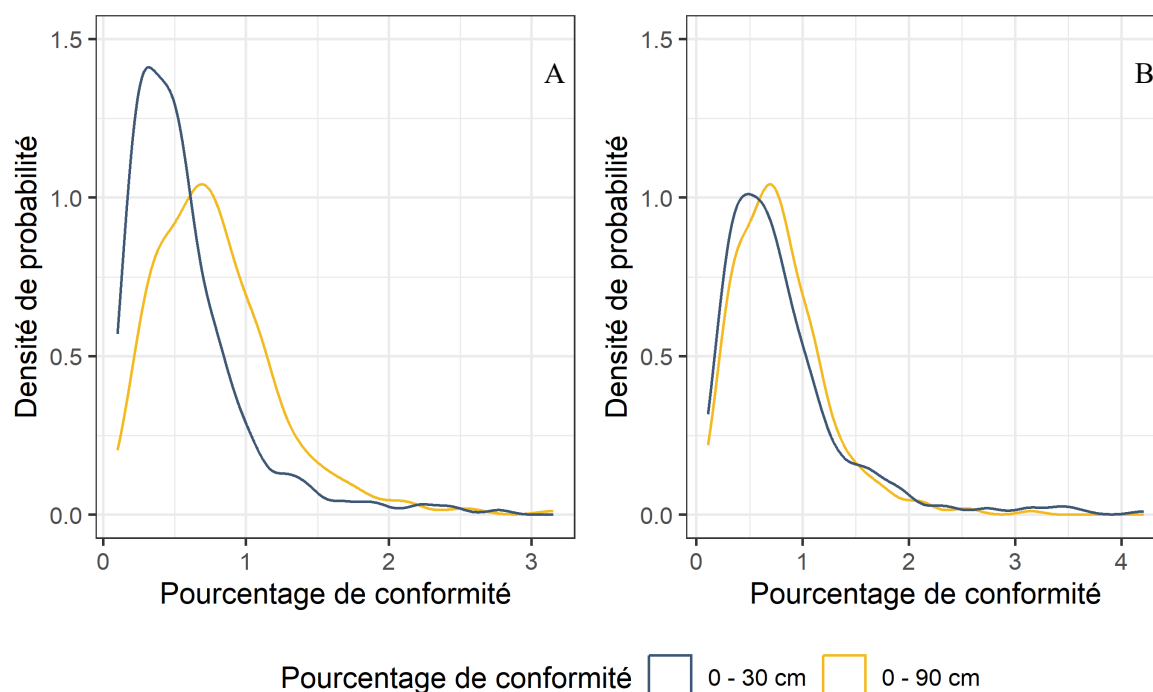


Figure 3. Comparaison des distributions de densités de probabilité du pourcentage de conformité calculée pour l'ensemble des mesures APL de la classe A4 (2021) réalisées jusqu'à 30 et 90 cm selon que la tolérance soit calculée par l'équation 1 (A) ou 2 (B).

Tableau 13. Matrice de confusion de la classification de la conformité des parcelles de la classe A4 en 2021 évaluée sur 90 cm et sur 30 cm lorsque la tolérance est évaluée par l'équation 1 (méthode historique).

	Conforme (0 – 30 cm)	Non conforme (0 – 30 cm)	Total Conformité évaluée sur 90 cm
Conforme (0 – 90)	325	4	329
Non conforme (0 – 90)	54	66	120
Total Conformité évaluée sur 30 cm	379	70	

Tableau 14. Matrice de confusion de la classification de la conformité des parcelles de la classe A4 en 2021 évaluée sur 90 cm et sur 30 cm lorsque la tolérance est évaluée par l'équation 2 et $x = 5 \text{ kg N-NO}_3^- \text{ ha}^{-1}$.

	Conforme (0 – 30 cm)	Non conforme (0 – 30 cm)	Total Conformité évaluée sur 90 cm
Conforme (0 – 90 cm)	282	47	329
Non conforme (0 – 90 cm)	19	101	120
Total Conformité évaluée sur 30 cm	301	148	

4. Conclusions

Ce travail a pour objectif de déterminer une méthode qui permet d'améliorer la justesse dans le contrôle APL en modifiant la méthode de calcul de la tolérance lorsque l'échantillonnage de la parcelle n'a pas été réalisé jusqu'à 90 cm.

Trois équations ont été testées. Malheureusement, aucune de celles-ci ne garantit un résultat parfait. L'équation 2 (ci-dessous) a montré les meilleurs résultats qui sont par ailleurs meilleurs que ceux obtenus par le calcul de la tolérance actuellement mis en œuvre. La différence est particulièrement marquée lorsque l'échantillonnage a été réalisé sur 30 cm.

$$D_x = \max(0,198 * \text{médiane}, x) \quad [2]$$

Lorsque la parcelle est échantillonnée respectivement jusqu'à 30 et 60 cm, il convient de choisir une valeur de x de 5 et 10 kg N-NO₃ ha⁻¹.

Cependant, comme il est montré en annexe (paragraphe 4), il paraît judicieux de fixer la valeur de x à 10 lorsque les échantillonnages ne sont pas réalisés jusqu'à 90 cm. Par ailleurs, l'expérience montre qu'une tolérance minimale de 5 kg N-NO₃ ha⁻¹ minimise largement la variabilité de la mesure (échantillonnage, préparation de l'aliquote, analyse). La valeur de 10 kg N-NO₃ ha⁻¹ correspond donc mieux à la procédure d'échantillonnage/analyse.

Vu le nombre important, toutes les matrices de confusions n'ont pas été analysées une à une. A posteriori, on peut remarquer que les modifications sont parfois marginales.

La conformité de seulement quelques parcelles a été modifiée dans le cas présenté au paragraphe 2.4.1 (Classe A3 en 2019 pour un échantillonnage réalisé sur 60 cm).

La conformité d'un nombre plus important de parcelles a été impactée par la modification méthodologique ; dans le cas présenté au paragraphe 2.4.2 (Classe A4 en 2021 pour un échantillonnage réalisé sur 30 cm). D'une manière générale et sans l'avoir montré, on peut raisonnablement penser que les modifications méthodologiques auront un impact significatif lorsque l'échantillonnage n'est réalisé que jusqu'à 30 cm.

La méthode actuelle ('historique') du calcul de la tolérance est globalement en faveur des agriculteurs (pourcentage de faux négatifs est nettement plus important que celui de faux positifs) lorsque l'échantillonnage n'est pas réalisé jusqu'à 90 cm. La méthode développée et proposée dans ce document est globalement plus juste :

1. la probabilité de conformité lors d'un échantillonnage incomplet est plus proche de celle observée lorsque l'échantillonnage est complet (c-à-d jusqu'à 90 cm) ;
2. les pourcentages de faux négatifs et faux positifs tendent à s'équilibrer et
3. le nombre de faux positifs (non conforme dans le « 0-30 cm » et conforme dans le 0-90 cm) augmente.

5. Annexes

Cette annexe présente l'influence de la méthode d'évaluation de la tolérance sur la conformité des parcelles ; selon que l'échantillonnage soit réalisé sur 30 ou 60 cm. Afin d'avoir une vue générale, les matrices sont présentées par années et pour toutes les classes de cultures confondues.

5.1. Matrice de confusion, année 2019

Les tableaux 15 et 16 permettent d'évaluer le taux de conformité des parcelles lorsque l'échantillonnage est réalisé sur 30, 60 ou 90 cm.

Le taux de conformité évalué par la méthode historique est légèrement supérieur à celui observé 90 cm lorsque les parcelles ne sont échantillonnées que sur 60 cm.

La réévaluation de la conformité sur base de l'équation 2 permet toutefois de diminuer le taux à un niveau presque identique à celui observé sur 90 cm :

Avant : 70 % des parcelles échantillonnées jusqu'à 60 cm sont déclarées conforme alors que si elles avaient été échantillonnées jusqu'à 90 cm, seulement 66 % auraient été déclarées conformes

Avec le changement proposé : 67 % des parcelles échantillonnées jusqu'à 60 cm sont déclarées conforme alors que si elles avaient été échantillonnées jusqu'à 90 cm, seulement 66 % auraient été déclarées conformes

Tableau 15. Matrice de confusion de la classification de la conformité de l'ensemble des parcelles en 2019 évaluée sur 90 cm et sur 60 cm lorsque la tolérance est évaluée par la méthode historique et par l'équation 2 ($x = 10 \text{ kg N-NO}_3 \text{ ha}^{-1}$).

		0-60		
		Conforme	Non Conforme	Total
0-90	Conforme	1101	21	1122
	Non Conforme	90	478	568
	Total	1191	499	

66%

70%

		0-60*		
		Conforme	Non Conforme	Total
0-90	Conforme	1081	41	1122
	Non Conforme	58	510	568
	Total	1139	551	

66%

* équation 2

67%

Les conclusions tirées de la comparaison des conformités évaluées sur 60 et 90 cm peuvent être généralisées à la comparaison des conformités évaluées sur 30 et 90 cm. La magnitude du changement est toutefois supérieure lorsque l'échantillonnage est réalisé sur 30 cm car le taux de conformité (initial) évalué sur 30 cm est de 84 %.

Tableau 16. Matrice de confusion de la classification de la conformité de l'ensemble des parcelles en 2019 évaluée sur 90 cm et sur 30 cm lorsque la tolérance est évaluée par la méthode historique et par l'équation 2 ($x = 5 \text{ kg N-NO}_3^- \text{ ha}^{-1}$).

		0-30			
		Conforme	Non Conforme	Total	
0-90	Conforme	1100	22	1122	66%
	Non Conforme	322	246	568	
	Total	1422	268		
84%					
		0-30*			
		Conforme	Non Conforme	Total	
0-90	Conforme	1041	81	1122	66%
	Non Conforme	192	376	568	
	Total	1233	457		
* équation 2 73%					

5.2. Matrice de confusion, année 2020

Les observations réalisées en 2020 peuvent être assimilées à celles de 2019 (tableaux 17 et 18).

Tableau 17. Matrice de confusion de la classification de la conformité de l'ensemble des parcelles en 2020 évaluée sur 90 cm et sur 60 cm lorsque la tolérance est évaluée par la méthode historique et par l'équation 2 ($x = 10 \text{ kg N-NO}_3^- \text{ ha}^{-1}$).

		0-60			
		Conforme	Non Conforme	Total	
0-90	Conforme	1015	35	1050	64%
	Non Conforme	130	464	594	
	Total	1145	499		
70%					
		0-60*			
		Conforme	Non Conforme	Total	
0-90	Conforme	989	61	1050	64%
	Non Conforme	81	513	594	
	Total	1070	574		
* équation 2 65%					

Tableau 18. Matrice de confusion de la classification de la conformité de l'ensemble des parcelles en 2020 évaluée sur 90 cm et sur 30 cm lorsque la tolérance est évaluée par la méthode historique et par l'équation 2 ($x = 5 \text{ kg N-NO}_3^- \text{ ha}^{-1}$).

		0-30			
		Conforme	Non Conforme	Total	
0-90	Conforme	1014	36	1050	64%
	Non Conforme	387	207	594	
	Total	1401	243		

85%

		0-30*			
		Conforme	Non Conforme	Total	
0-90	Conforme	949	101	1050	64%
	Non Conforme	231	363	594	
	Total	1180	464		

* équation 2

72%

5.3. Matrice de confusion, année 2021

Les observations réalisées en 2021 peuvent être assimilées à celles de 2020 et de 2019 (tableaux 19 et 20).

Tableau 19. Matrice de confusion de la classification de la conformité de l'ensemble des parcelles en 2021 évaluée sur 90 cm et sur 60 cm lorsque la tolérance est évaluée par la méthode historique et par l'équation 2 ($x = 10 \text{ kg N-NO}_3^- \text{ ha}^{-1}$).

		0-60			
		Conforme	Non Conforme	Total	
0-90	Conforme	1515	14	1529	77%
	Non Conforme	93	366	459	
	Total	1608	380		

81%

		0-60*			
		Conforme	Non Conforme	Total	
0-90	Conforme	1477	52	1529	77%
	Non Conforme	43	416	459	
	Total	1520	468		

* équation 2

76%

Tableau 20. Matrice de confusion de la classification de la conformité de l'ensemble des parcelles en 2021 évaluée sur 90 cm et sur 30 cm lorsque la tolérance est évaluée par la méthode historique et par l'équation 2 ($x = 5 \text{ kg N-NO}_3 \text{ ha}^{-1}$).

		0-30			
		Conforme	Non Conforme	Total	
0-90	Conforme	1515	14	1529	77%
	Non Conforme	236	223	459	
	Total	1751	237		
88%					
		0-30*			
		Conforme	Non Conforme	Total	
0-90	Conforme	1377	152	1529	77%
	Non Conforme	99	360	459	
	Total	1476	512		
74%					

* équation 2

5.4. Matrice de confusion, année 2022

En 2022, les taux de conformités évalués sur 60 cm ou sur 90 cm sont du même ordre de grandeur lorsque la tolérance est évaluée par la méthode historique. L'optimisation de la méthode d'évaluation de la tolérance conduit à une diminution du taux de conformité.

Le taux de conformité évalué sur 30 cm est supérieur à celui observé sur 90 cm. L'application de l'équation 2 implique également une diminution de 77 à 68 % de conformité.

Tableau 21. Matrice de confusion de la classification de la conformité de l'ensemble des parcelles en 2022 évaluée sur 90 cm et sur 60 cm lorsque la tolérance est évaluée par la méthode historique et par l'équation 2 ($x = 10 \text{ kg N-NO}_3 \text{ ha}^{-1}$).

		0-60			
		Conforme	Non Conforme	Total	
0-90	Conforme	884	39	923	73%
	Non Conforme	31	316	347	
	Total	915	355		
72%					
		0-60*			
		Conforme	Non Conforme	Total	
0-90	Conforme	855	68	923	73%
	Non Conforme	19	328	347	
	Total	874	396		
69%					

* équation 2

Tableau 22. Matrice de confusion de la classification de la conformité de l'ensemble des parcelles en 2022 évaluée sur 90 cm et sur 60 cm lorsque la tolérance est évaluée par la méthode historique et par l'équation 2 ($x = 5 \text{ kg N-NO}_3^- \text{ ha}^{-1}$).

		0-30			
		Conforme	Non Conforme	Total	
0-90	Conforme	855	68	923	73%
	Non Conforme	121	226	347	
	Total	976	294		

77%

		0-30*			
		Conforme	Non Conforme	Total	
0-90	Conforme	792	131	923	73%
	Non Conforme	67	280	347	
	Total	859	411		

* équation 2

68%

5.5. Conclusions

Globalement, la modification méthodologique permet d'atteindre des niveaux de conformités évalués sur 30 et 60 cm plus comparables à ceux évalués sur 90 cm. Il est évident que la distribution de l'azote nitrique dans le profil influence grandement le taux de conformité. Les conditions météorologiques observées durant l'année et principalement à proximité de la période de mesure des APL influencent la distribution de l'azote nitrique.

Afin de limiter le risque d'une diminution drastique du taux de conformité lorsque les analyses sont réalisées sur 30 cm, le niveau de tolérance minimum peut être fixé à $10 \text{ kg N-NO}_3^- \text{ ha}^{-1}$.