Réflexions sur la pertinence et les limites de l'utilisation des reliquats azotés d'automne dans le cadre d'actions d'accompagnement d'agriculteurs vers des 'bonnes' pratiques (PLAV2) – Eléments de bibliographie récents… et moins récents

T. Morvan ***INRA UMR SAS*** ***Novembre 2019***

Reliquats N : de quoi parle t'on ?

Reliquat d'azote minéral : correspond à l'azote minéral mesuré sur la hauteur de sol exploré par le système racinaire des cultures (60 cm à plus de 1m20 dans le cas de sols profonds)

Reliquat post absorption (RPA) : mesuré après l'arrêt de l'absorption d'azote par les cultures, ie juin à fin juillet après céréales, juillet après colza, fin aout/ septembre après maïs.

Reliquat début automne (RDa) : réalisé fin septembre/ début octobre

Reliquat début drainage (RDD) : mesuré en principe immédiatement avant la reprise du drainage (et donc de la lixiviation du nitrate) sous le profil d'enracinement des cultures. La date de réalisation de cette mesure n'est pas facile à prédire, car elle dépend des caractéristiques du sol, des pluies automnales, et peut s'échelonner en Bretagne de mi- septembre à début janvier, selon le type de sol, les conditions météo de l'année, elles-mêmes dépendantes de la localisation de la parcelle (gradient E-O)

Le RPA et le RDD sont complémentaires : le RPA est un meilleur indicateur de l'évaluation des pratiques de fertilisation que le RDD, et le RDD est un meilleur indicateur du risque de lixiviation que le RPA, car il intègre la minéralisation de l'azote organique du sol sur une période longue dans le cas des céréales et du colza, que l'on n'a donc pas besoin, avec le RDD, d'estimer sur la période précédant le début lixiviation.

Le RDa est utile pour initialiser des modèles : la mesure est moins éloignée du début lixiviation que celle du RPA, ce qui réduit la part d'incertitude résultant de l'estimation de la minéralisation dans la simulation.

Les reliquats réalisés dans le cadre du PLAV sont réalisés sur une profondeur de 60 cm, en 2 horizons de 30 cm, indépendamment de la profondeur du sol, ce qui conduit à une valeur sous-estimée, pour les sols de profondeur supérieure à 60 cm, qui représentent une proportion importante des sols cultivés bretons. Cette sous-estimation est faible dans le cas d'une mesure de RPA ou de RDa, car la répartition de l'azote est distribuée en 'marche d'escalier inversée', avec très peu d'azote dans les horizons inférieurs à 60 cm, elle peut être nettement plus élevée dans le cas d'une mesure de RDD.

Quels sont les niveaux moyens de reliquat après cultures annuelles ?

La synthèse de données d'essais régionaux établie dans le cadre du module N du projet Territ'Eau (Guiet et al, 2010, Morvan et al, 2012), sur lesquels la fertilisation a été raisonnée par la méthode du bilan prévisionnel (la dose d'engrais apporté ne correspondant pas forcément à la dose optimum), conduit à estimer des valeurs moyennes de RDa de 55 kg N/ha pour une culture de maïs[1], 63 kg N/ha après céréales (sol laissé nu après récolte), et 58 kg N/ha après colza (sol laissé nu après récolte).

Les observations réalisées sur les essais pluriannuels montrent également que la fertilisation organique fréquente (annuelle ou biannuelle) et répétée dans la durée impacte peu la valeur de reliquat (Figure 1 et Tableau 1).

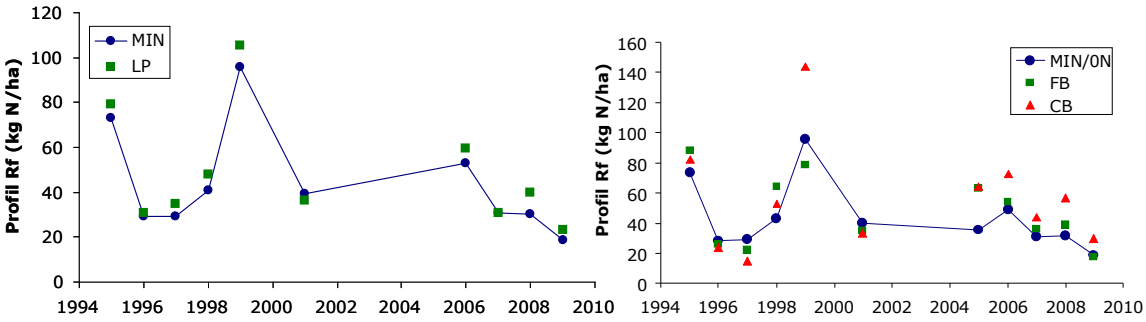

Figure 1. Evolution temporelle du RDa (profil 0-100 cm) mesurée sur l'essai INRA de Champ Noel, entre 1995 et 2009. (MIN : fertilisation minérale – méthode du bilan ; FB : fumier de bovins, tous les 2 ans, années impaires ; CB : fumier de bovins composté, apport tous les 2 ans, années impaires ; LP : lisier de porc) (in Morvan, 2012)

Tableau 1. Quantités moyennes d'azote minéral (RPA ou RDa selon les essais), en kg N/ha, mesurés sur 5 essais pluriannuels ou de longue durée, situés en Bretagne (INRA et CAB) (MIN : fertilisation minérale – méthode du bilan ; FB : fumier de bovins, apport annuel ou tous les 2 ans ; CB : fumier de bovins composté ; FP : fumier de porc ; LP : lisier de porc) (in Morvan, 2012)

	MIN	FB	CB	FP	LP	Durée essai
CHAMP NOEL	**43**	**47**	**56**		**49**	**16**
CRECOM	**16**	**15/11***				**22**
TREVAREZ	**38**	**47**		**41**		**25**
KERLAVIC	**27**	**25**	**27**		**25**	**6**
LECOUSSE	**46 / 94****	**45**				**8**

*** : dose FB 25t/ha / dose FB 50t/ha**

**** : fertilisation 50N / 100N**

A noter également que ces valeurs moyennes de reliquat mesurées en Bretagne ne sont pas plus élevées que celles que l'on rencontre en zones de grande culture (Beaudoin et al, 2005), malgré des apports réguliers de produits organiques sur les sols, une teneur moyenne en azote organique des sols relativement élevée et un climat océanique favorable à la minéralisation automnale.

[1] A l'exclusion des reliquats mesurés sur un maïs cultivé l'année suivant un retournement de prairies

Les données pluriannuelles du réseau Mh[2], constitué de 137 parcelles en maïs non fertilisé pendant 4 à 5 années consécutives, mettent également en évidence une variabilité spatiale et interannuelle importante du RDa (Figure 2).

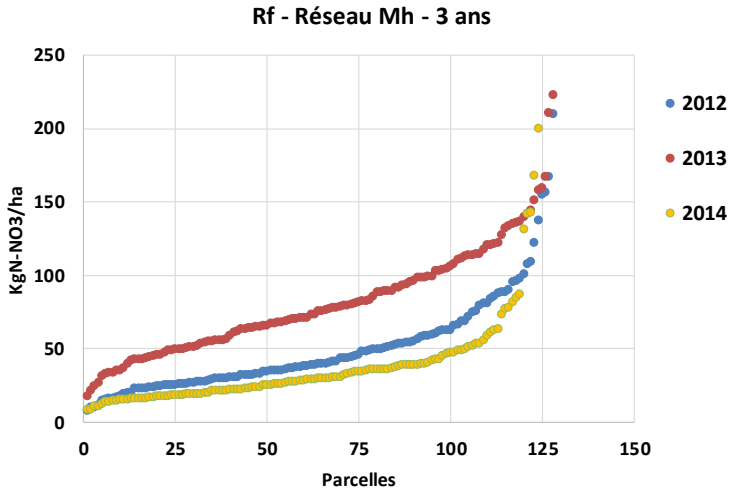

Figure 2. Distribution des RDa mesurés sur le profil de sol 0-90 cm sur le réseau Mh (parcelles en maïs non fertilisé pendant 4 à 5 années consécutives) (valeurs moyennes égales à 50, 81 et 37 kg N/ha en 2012, 2013 et 2014 respectivement – plus de 10 % des valeurs ont été supérieures à 89, 132 et 62 kg N/ha pour ces 3 années respectives)

Variabilité interannuelle confirmée par le suivi de 24 parcelles du réseau Sol-AID[3], sur lequel des mesures de RPA / RDa ont été faites en 2017 et 2018 après culture de maïs, sur les traitements n'ayant pas reçu de fertilisation N (Figure 3) : les valeurs sont en moyenne plus élevées en 2017 qu'en 2018 (43.9 en 2017 *vs* 30.8 kg N/ha en 2018), les conditions plus sèches du début de l'automne 2018 étant un élément d'explication des valeurs plus faibles des reliquats 2018 (Figure 3b). De même que sur le réseau Mh, on observe des reliquats supérieurs à 50 kg N/ha (23 % des reliquats mesurés sur les 2 années), sans pouvoir incriminer la gestion de la fertilisation… puisqu'il n'y en pas eu…

[2] http://geowww.agrocampus-ouest.fr/portails/portail.php?portail=mh

[3] Réseau constitué de 24 parcelles réparties sur le territoire breton, représentatif de la diversité pédo-climatique régionale, sur lequel des essais 'réponse à la fertilisation azotée' ont été conduits pendant 3 années consécutives (2017 à 2019).

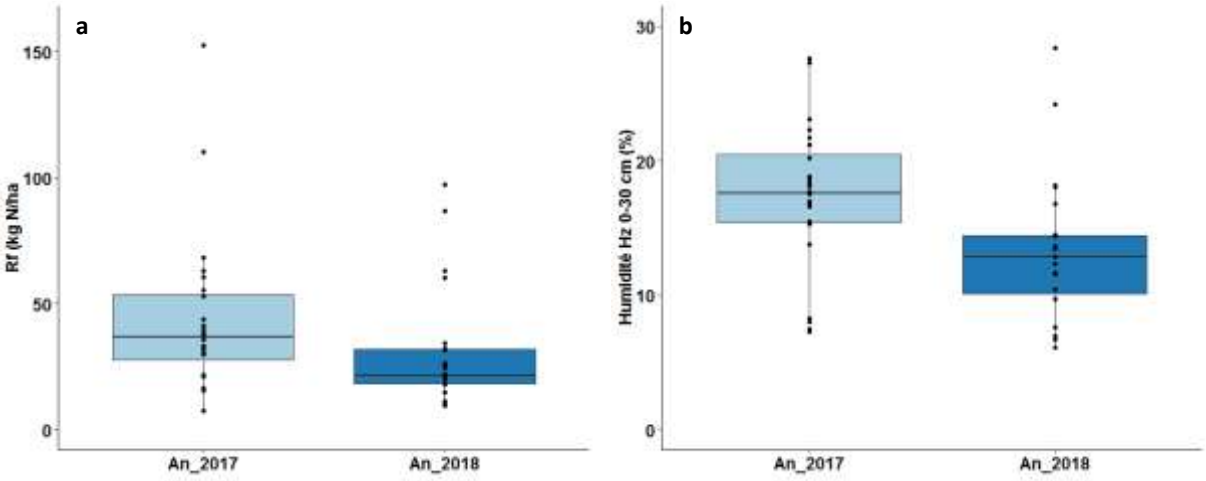

Figure 3. Représentation boxpolt du reliquat d'azote nitrique (Rf) mesuré sur le profil de sol (a) et de l'humidité de l'horizon de surface (0-30 cm) (b), en 2017 et 2018, des traitements sans fertilisation azotée (profils réalisés en 3 horizons de 30 cm, donc sur 90 cm, sur toutes les parcelles en 2017, et à l'exception de 5 parcelles en 2018, pour lesquelles le reliquat a été mesuré sur 60 cm)

Ces résultats confirment l'utilité/nécessité de disposer de situations de référence pour qualifier les reliquats.

Le reliquat est-il un indicateur pertinent des pratiques de fertilisation N?

Il ressort de l'approche bibliographique une relation assez faible entre la sur-fertilisation et la valeur du reliquat :

- La Figure 4a non sourcée présentée dans le document N du Comifer montre une tendance à l'augmentation du reliquat (probablement un RPA) en situation de sur-fertilisation, mais la relation est peu significative, en raison de la forte dispersion des points,
- Beaudoin et al (2005) (Figure 4b) confirment une augmentation du reliquat en situation de sur-fertilisation, avec un effet moyen de 25 kg N/ha environ pour une sur-fertilisation de 50 kg N/ha.

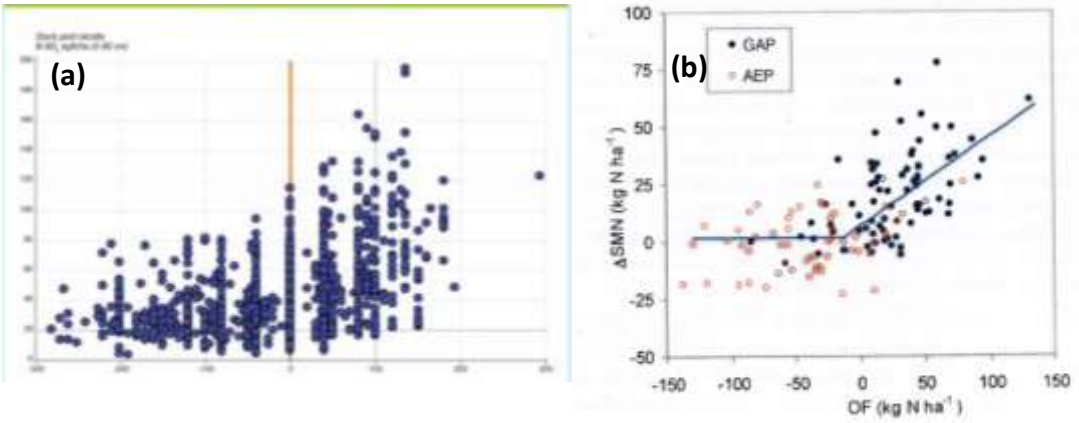

Figure 4. Visualisation des valeurs de Rf en fonction de l'écart de dose d'engrais appliquée, par rapport à la dose optimale en comparaison avec des données obtenues après blé (a) (source Guide Méthodologique du Comifer, 2011) (l'axe des ordonnées de la figure b varie de 0 à 200 kg N/ha)), et relation entre l'excès d'azote minéral à la récolte (ΔSMN) et la surfertilisation calculée a posteriori (OF) pour 2 modes de gestion (GAP : bonnes pratiques environnementales , AEP : mesures agri environnementales)(issu de Beaudoin et al, 2005)

Les mesures réalisées en 2018 sur le réseau Sol-AID permettent de mieux documenter ce point, avec 2 niveaux d'analyse (Morvan et al, 2019) :

- L'analyse statistique globale du jeu de données constitué de 23 essais 'réponse à l'azote' sur culture de maïs, met effectivement en évidence une réponse significative de la valeur du reliquat post récolte (Rf, positionné entre RPA et RDa) au niveau de fertilisation. Pour cela, la variable correspondant à l'écart de la dose étudiée à la dose optimale, par 5 classes d'appartenance permettant de couvrir une gamme allant de la situation de forte sous fertilisation (classe 1) à la situation de forte surfertilisation (classe 5)[4]. Cette discrétisation permet d'étudier la significativité des différences moyennes de reliquats entre classes, par un modèle linéaire (Tableau 2). Les valeurs moyennes s'échelonnent de 24 kg N/ha pour la Classe 1 à 133.7 kg N/ha pour la Classe 5, et l'étude du modèle permet de conclure à un classement

[4] **:** i) classe 1 (C1) : écart inférieur à -100 kg N/ha, ii) classe 2 (C2), écart compris entre -100 et -50[-100 ; -50], C1 et C2 correspondant à des situations de sous-fertilisation iii) classe 3, [-50 ; 0], iv) classe 4, [0 ; 50], v) classe 5 (C5), écarts supérieurs à 50, correspondant à une situation de sur-fertilisation

des moyennes en 3 groupes distincts, le groupe A des faibles valeurs moyennes de reliquat des classes 1 et 2, le groupe B de la valeur moyenne intermédiaire de la classe 3, et le groupe C des valeurs moyennes élevées des classes 4 et 5. Malgré une différence non significative des moyennes des classes 4 et 5, on observe une augmentation importante de la valeur moyenne des reliquats lorsque l'écart à la dose optimale dépasse les 50 kg N/ha (différence de 55.5 kg N/ha entre les moyennes des classes 4 et 5).

Tableau 2. Statistiques des reliquats Rf, en fonction de l'écart à la dose optimale, décliné en 5 classes.

	moyenne	**Groupe**	**écartype**	**min**	**max**	**médiane**	**effectif**
Classe 1 (< -100)	**24.0**	A	14.0	6.8	62.9	21.0	20
Classe 2 [-100 ; -50]	**36.4**	A	31.4	5.9	175.4	26.1	30
Classe 3 [-50 ; 0],	**57.9**	B	34.6	11.1	143.0	58.7	29
Classe 4 [0 ; 50],	**78.2**	C	49.4	18.4	176.9	70.3	27
Classe 5 (> 50)	**133.7**	C	68.2	20.4	263.2	125.7	13

- En regard de cette analyse globale, l'analyse individuelle de la réponse du reliquat à la fertilisation met en évidence une grande diversité de situations, avec i) des essais pour lesquels le reliquat n'augmente pas, ou très peu, avec la dose N (Figure 5a) , ii) des essais pour lesquels on observe une augmentation modérée de Rf (Figure 5b), iii) des essais avec forte augmentation de Rf (Figure 5c), et iv) des essais pour lesquels la réponse à la fertilisation peut être plus forte à certaines doses qu'à des doses plus élevées (Figure 5d). Cette diversité de réponse explique la dispersion des points sur la Figure 6, assez comparable au final à celle des figures 4a et 4b.

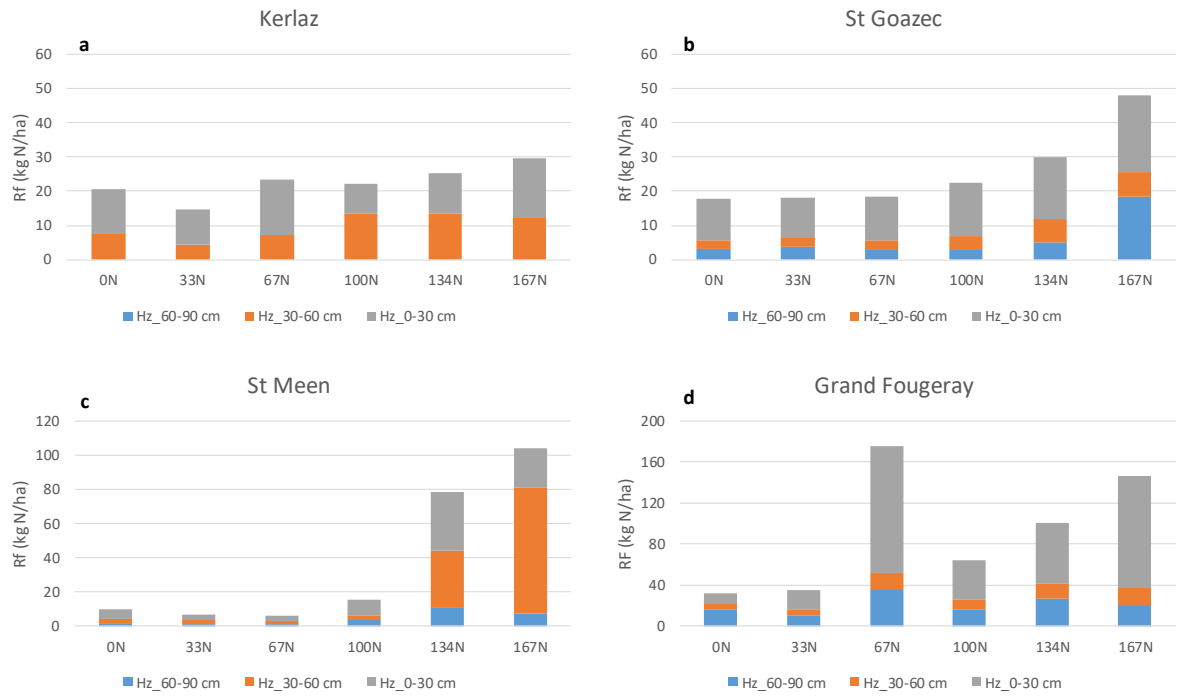

Figure 5. Reliquat post cultural Rf en fonction de la fertilisation N, sur les essais de Kerlaz (a), St Goazec (b), St Meen (c) et Grand Fougeray (d). Les doses de fertilisation N optimales ont été respectivement de 136, 106, 134 et 117 kg N/ha pour ces 4 essais.

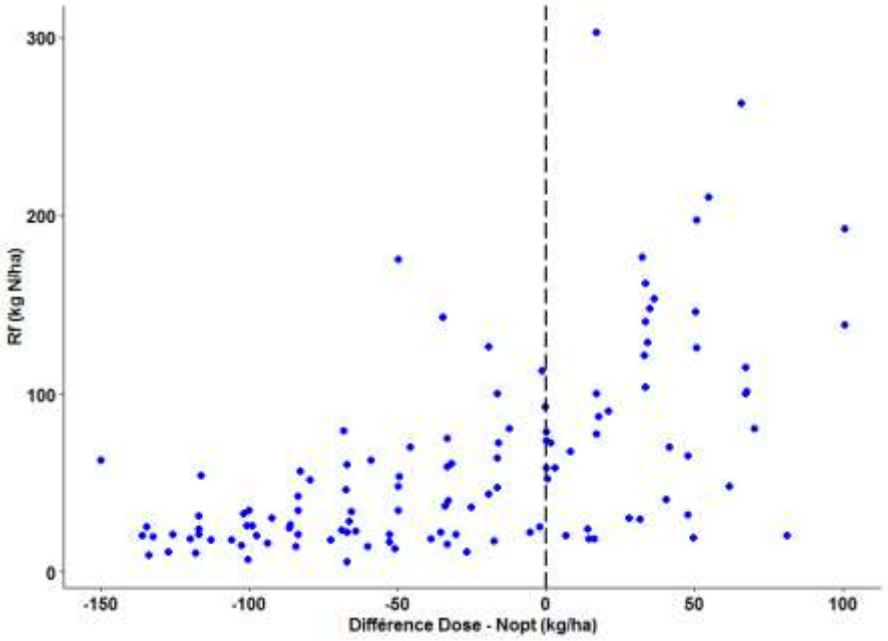

Figure 6. Visualisation des valeurs de Rf en fonction de l'écart de dose d'engrais appliquée, par rapport à la dose optimale, sur le réseau Sol-AID

Ces résultats permettent de mieux comprendre pourquoi il y a discussion récurrente et souvent désaccord entre acteurs du PLAV sur l'interprétation d'un reliquat, résultant du fait que l'interprétation diffère en fonction du niveau d'échelle :

- **A l'échelle individuelle (1 reliquat mesuré sur une parcelle), il est clair que le reliquat N ne peut pas être considéré comme un bon indicateur des pratiques de fertilisation, en raison de la faible corrélation entre reliquat et écart à la dose optimale (**Figure 6**) : un agriculteur en situation de surfertilisation n'est pas forcément 'sanctionné' par un reliquat élevé (15 % des reliquats mesurés en situation de sur-fertilisation sont inférieurs à 55 kg N/ha), et inversement, les situations en sous-fertilisation ne sont pas systématiquement associées à de faibles reliquats (12 % des reliquats mesurés en situation de sous-fertilisation sont supérieurs à 55 kg N/ha). La courbe enveloppe de la Figure 6 permet cependant de discuter et d'objectiver la valeur du seuil de 100 kg N/ha adopté par l'Administration : les reliquats mesurés pour les doses d'engrais inférieures ou égales à la dose calculée à l'équilibre de fertilisation sont très majoritairement inférieurs à cette valeur seuil, à l'exclusion de 4 points sur un effectif de 79. La probabilité de sanctionner à tort un agriculteur en associant un diagnostic de sur-fertilisation à un reliquat supérieur à 100 kg N/ha est donc de 5%. Nos résultats apportent donc une base de discussion objectivée pour décider de l'acceptabilité de ce seuil de 100 kg N/ha.**

  Ces résultats doivent cependant être considérés dans leur contexte :

  - Les reliquats N de 2018 ont été plus faibles que ceux de 2017 sur le réseau Sol-AID (Figure 3), et sont également les plus faibles depuis le début des suivis de reliquats dans le cadre du PLAV en 2010 (Figure 7). La probabilité de 5 % donnée plus haut est donc liée à ce contexte, et il est clair que cette probabilité serait nettement plus élevée pour des années climatiques favorables à des reliquats élevés. Pour exemple, en 2013, le reliquat des parcelles du réseau Mh, non fertilisées depuis 4 ans, a été supérieur à 100 kg N/ha dans 10 % des cas. Il est donc important de rappeler que l'on ne peut s'abstraire de la prise en compte de la variabilité interannuelle (Figure 2) dans l'interprétation des résultats.

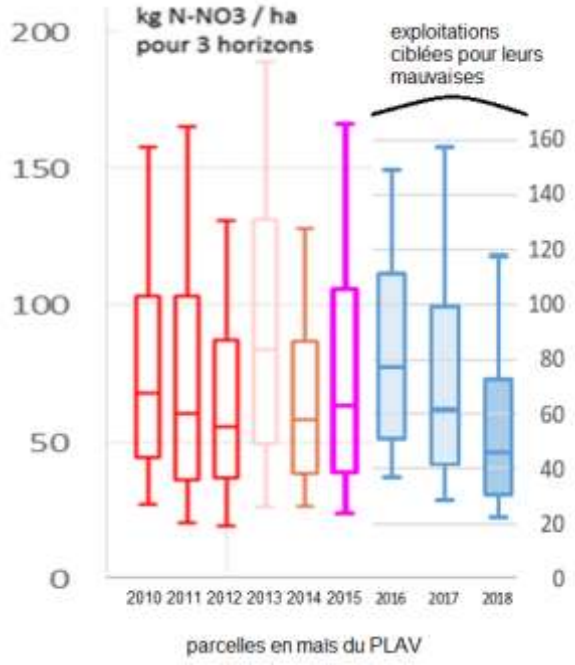

Figure 7. Distribution des reliquats mesurés après culture de maïs dans le cadre du PLAV, de 2010 à 2018 (comm. D. Hanocq)

- La situation culturale est celle d'un maïs, sans possibilité de mettre en place un couvert d'interculture efficace / lixiviation N. Un seuil de 100 kg N/ha doit être évalué différemment dans la situation culturale d'une céréale suivie de l'implantation d'un couvert, dont l'efficacité est montrée par de nombreux résultats expérimentaux, même dans le cas d'un couvert peu développé lors de la mesure d'un RDa. Sur notre dispositif EFELE (Le Rheu), les pertes par lixiviation N sont très faibles (inférieures à 2 kg N/ha par hiver…) sous couvert de moutarde peu développé à la mi-octobre (0.3 à 0.6 t MS/ha), et pour des valeurs de reliquats comprises entre 35 et 65 kg N/ha. Résultats également confirmés par le suivi lysimétrique de l'essai de longue durée de Champ Noel (1994-2009), sur lequel un couvert de phacélie semé 2ème quinzaine de septembre réduit les pertes par lixiviation en moyenne de 50 kg N/ha[5]
- Il est enfin important de rappeler que l'évaluation de la pratique d'un agriculteur par une mesure de reliquat doit prendre en compte le fait que le calcul de la dose d'azote est imposé par les bases de calcul GREN, dont l'application peut conduire à une sur-fertilisation involontaire et 'subie' par l'agriculteur…

- **<u>A une échelle plus globale (n reliquats sur un territoire),</u> l'analyse statistique des données du réseau Sol-AID montre l'effet très hautement significatif du niveau de fertilisation sur le reliquat, et permet de guider la réflexion des décideurs :**
  - **elle confirme que la mise en œuvre de la fertilisation raisonnée / à l'équilibre de la fertilisation N demeure <u>un levier d'action prioritaire pour limiter les fuites de nitrate à l'échelle d'un territoire</u>, et justifie de poursuivre les actions relatives à l'amélioration du raisonnement de la fertilisation (prise en compte des spécificités des sols de l'exploitation et de la valeur fertilisante des produits organiques, application de Sol-AID pour le calcul de la minéralisation…).**

[5] Cf Hanocq, 2012 et Hanocq et Morvan, 2012 pour autres références régionales

- **la diminution significative du reliquat moyen en situation de sous-fertilisation est également un résultat intéressant, qui incite à réfléchir à l'adoption généralisée d'une minoration de la fertilisation dans des zones sensibles[6]. Hormis le fait que cette pratique impacterait le plan d'épandage, cette mesure est loin d'être irréaliste, déjà pratiquée notamment dans la conduite à bas niveaux d'intrants des céréales…**

Relation entre le reliquat et la lixiviation (ou le risque de lixiviation) N

La cohérence dans le temps de suivis dynamiques de l'évolution de l'azote minéral du sol a été montrée par de nombreux travaux, à l'origine d'une démarche de modélisation de la lixiviation par des modèles de type réservoir multicouches assez simples à renseigner (Mary, 1999, Valé, 2006). On peut considérer que la qualité prédictive de ces modèles, implémentés notamment dans STICS et Syst'N, est bonne, sous certaines conditions (qualité des données d'entrée sur les sols, pierrosité modérée…), ce qui valide la démarche de calcul d'un indicateur de risque environnemental (IRE) avec le modèle Syst'N mise en place dans le cadre du PLAV.

Les déterminants de la lixiviation sont bien connus : sol (profondeur, texture), minéralisation de l'azote organique du sol et absorption d'azote par un couvert végétal durant la période de drainage, quantité et répartition des pluies.

La pluviométrie durant la période de drainage agit fortement sur la lixiviation, et le le fort gradient Est-Ouest de pluviométrie à l'échelle de la Bretagne conduit à des flux de lixiviation N nettement plus élevés dans le Finistère qu'en Ille et Vilaine (Hanocq et Morvan, 2012). La relation entre lixiviation et pluies efficaces n'est pas linéaire (sigmoïde), avec une augmentation très importante de la lixiviation dans la gamme de pluies efficaces [100 ; 200 mm] (Figure 8). Dans cette gamme, pour un même type de sol et une même valeur de RDD, la lixiviation varie de 10 à 50 kg N/ha, donc d'un facteur 5, en fonction de la lame drainante.

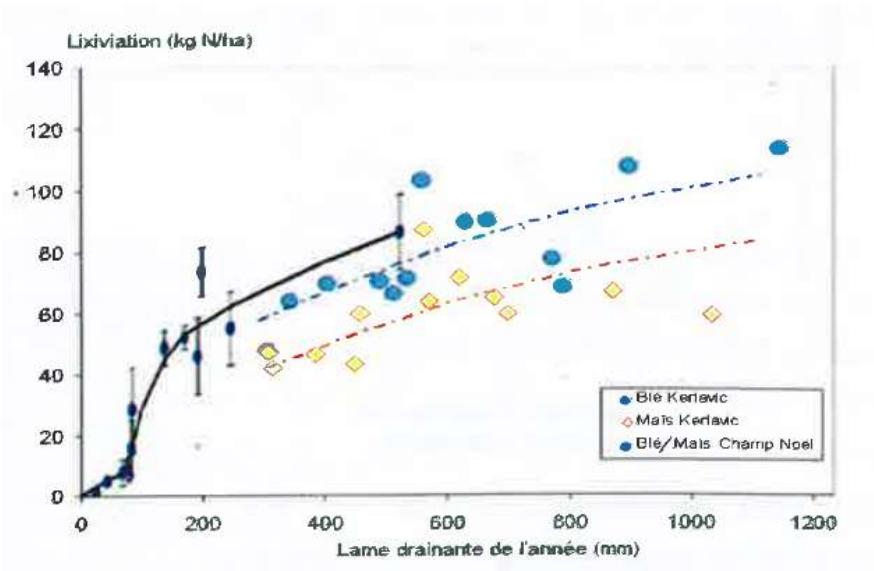

Figure 8. Relation entre les pluies efficaces et la lixiviation de N, dans une succession maïs/blé sans couvert d'interculture (données de l'essai lysimétrique de INRA Champ Noel, Rennes et de l'essai CRAB Arvalis de Kerlavic (29) (in Hanocq et Morvan, 2012)

[6] Sous réserve d'étudier les conséquences de cette mesure sur la perte de rendement et de la teneur en N du maïs, obligeant à compenser par l'importation de protéines. On ne peut pas être gagnant sur tous les tableaux…

La lixiviation de N exprimée en kg N/ha étant très dépendante des conditions climatiques, elles-mêmes totalement indépendantes des pratiques culturales, ne peut donc être interprétable comme IRE qu'en comparaison à des valeurs de référence obtenues dans les mêmes conditions. Valeurs de références obtenues par simulation pour le même type de sol et même climat, avec une valeur de RDD de 'référence' produit par un réseau de parcelles de référence, idéalement, ou par un plan de simulation de situations de référence.

Le calcul de la concentration moyenne de l'azote perdu par lixiviation dans la lame drainante permet de réduire sensiblement l'effet du gradient climatique et de la variabilité spatiale des pluies efficaces. Dans l'exemple pris précédemment, la concentration moyenne est de 44 mg NO3/l dans le contexte de pertes de 10 kg N/ha pour des pluies efficaces de 100 mm, vs 110 mg NO3/l dans le contexte de pertes de 50 kg N/ha pour des pluies efficaces de 200 mm. On passe donc d'un facteur 5 à un facteur 2.5, dans cette gamme [100 ; 200 mm], ce qui montre que l'on ne peut pas s'affranchir de la prise en compte du facteur 'pluies' dans l'interprétation d'un IRE fondé sur cette valeur de concentration moyenne, même si cette variable permet d'en réduire l'effet.

L'interprétation de l'IRE d'une parcelle donnée, qu'il soit exprimé en kg N/ha ou en mg NO_3/l, ne peut donc être objectivement faite qu'en comparaison avec une situation pédo-climatique de référence.