

Réduire les fuites de nitrate au moyen de cultures intermédiaires

Conséquences sur les bilans d'eau et d'azote, autres services écosystémiques

10. Impacts de la gestion de l'interculture sur les bilans d'azote et d'eau et sur le rendement de la culture suivante, simulés avec le modèle de culture STICS

Auteurs :

Julie Constantin

Eric Justes

avec la participation de :

Nicolas Beaudoin

Patrick Bertuzzi

Carolyne Dürr

Christine Le Bas

Bruno Mary

Laurent Ruiz

Julien Tournebize

Juin 2012

Sommaire

10.1. Objectifs.....	331
10.2. Variables d'intérêt et méthodes d'analyse.....	331
10.3. Caractérisation de la gamme des variables environnementales et de production simulées pour la situation de référence (sol nu en interculture).....	332
10.4. Croissance et acquisition d'azote des cultures intermédiaires et repousses de blé et colza.....	336
10.5. Impact des cultures intermédiaires et des repousses sur le bilan hydrique et le drainage.....	344
10.6. Efficacité des modes de gestion de l'interculture pour réduire la lixiviation et la concentration en nitrate de l'eau de drainage.....	356
10.7. Effet des cultures intermédiaires et des repousses sur le rendement de la culture suivante.....	374
10.8. Synthèse et conclusions.....	387

Relecteurs externes du chapitre : Bernard Itier, Marie Launay et Bernard Nicolardot.

Le plan de simulation et les résultats préliminaires ont été discutés par les membres du groupe technique composé de : Jean-Pierre Cohan (Arvalis - Institut du végétal), Rémy Duval (Institut Technique de la Betterave), Tanegmart Redjala-Ounnas (CETIOM - Centre technique interprofessionnel des oléagineux et du chanvre), Sébastien Minette (Chambre régionale d'agriculture de Poitou-Charentes), Alain Lecat (Chambre régionale d'agriculture du Nord Pas-de-Calais et Institut Technique de l'Agriculture Biologique), Nathael Leclech (Chambre régionale d'agriculture de Lorraine), Damien Ronget (Chambre d'agriculture de Côte d'Or), Frédérique Hupin (Nitrawal, Belgique).

10.1. Objectifs

Ce travail de simulation vise à évaluer l'impact des cultures intermédiaires sur les fuites de nitrate, le bilan d'eau et la culture suivante, en fonction des espèces utilisées, de leurs modalités de gestion et par rapport à des pratiques alternatives, dans une large gamme de pédoclimats et systèmes de culture français, représentant la variabilité des conditions rencontrées sur le territoire métropolitain.

Ainsi, ce travail a pour objectifs :

- de déterminer l'efficacité des cultures intermédiaires pour réduire les fuites de nitrate, par rapport à une interculture laissée en sol nu, selon leurs modalités de gestion (espèce, dates de semis et de destruction) dans divers pédoclimats, et d'identifier les principaux déterminants de cette efficacité ;
- d'appréhender, conjointement aux aspects de réduction des pertes de nitrate par lixiviation, l'effet des cultures intermédiaires sur le bilan hydrique, en particulier dans des régions à faible pluviométrie, fréquemment soumises à des déficits hydriques, pouvant entraîner potentiellement des conséquences non négligeables sur la recharge des nappes, et sur la culture suivante ;
- de comparer les effets des CI par rapport à des pratiques alternatives telles que les repousses, de céréales ou de colza, ou l'enfouissement des résidus de culture.

Cependant, le semis sous couvert des CI ainsi que les mélanges d'espèces ne seront pas abordés par le biais de la modélisation, car ces situations sont très difficiles à représenter d'un point de vue technique puisqu'il s'agit de simuler, avec le modèle de culture choisi, le fonctionnement de plusieurs cultures en même temps et sur une même parcelle tout en considérant leur compétition. Des travaux spécifiques seraient nécessaires pour traiter par simulation de façon satisfaisante de l'effet de ces types de couverts mixtes sur le bilan d'azote.

10.2. Variables d'intérêt et méthodes d'analyse

Les variables de sortie du modèle STICS analysées concernent les bilans azoté, hydrique et carboné (Figure 10-1). Les principales variables d'intérêt analysées sont : i) dans un premier temps, l'azote lixivié, en termes de quantité et de concentration nitrique des eaux de drainage à la base du profil de sol sous les racines ; ii) dans un deuxième temps, la quantité d'eau drainée à la base du profil du sol et le stock d'eau du sol en sortie d'hiver. Dans un troisième temps, le rendement de la culture suivante, et donc l'effet des différents modes de gestion de l'interculture sur ces rendements, est également étudié.

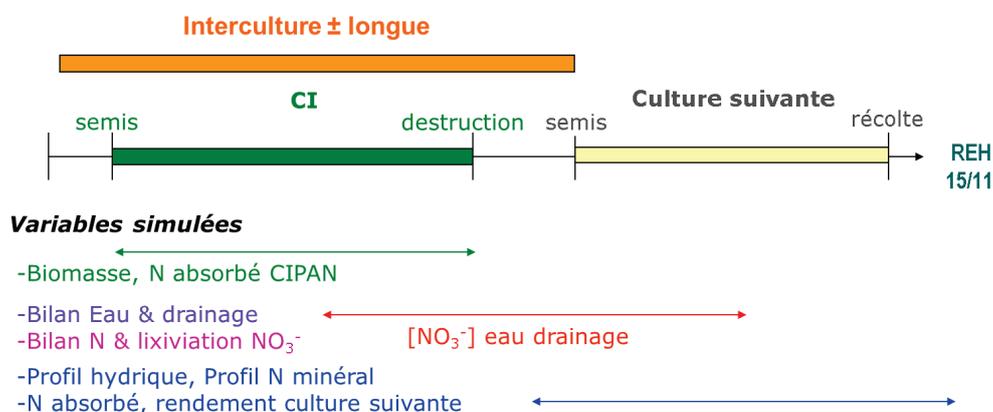


Figure 10-1. Variables d'intérêt en sortie de la simulation STICS (REH = Reliquat d'Entrée Hiver).

Des variables complémentaires, dites explicatives, sont aussi analysées. Ces variables concernent notamment les cultures intermédiaires ou les repousses, en termes de quantités d'azote acquis (absorbé du sol + fixé de

l'atmosphère) et de biomasses produites. Elles portent également sur le bilan d'eau (évapotranspiration réelle en interculture, composée de l'évaporation du sol et de la transpiration de la plante), et sur l'azote minéral du sol, en termes de stock (en début de drainage, sortie d'hiver et post-récolte) et de flux (quantité d'azote minéralisé ou immobilisé depuis la matière organique du sol ou les résidus de culture).

Il est important de noter que, la même gamme de dates de levée et de destruction n'ayant pas été testée pour les repousses et les 3 espèces de CI, la comparaison entre ces 5 modes d'interculture n'est réalisée qu'à des dates de levée et de destruction équivalentes, afin de réaliser une comparaison cohérente, liée à des facteurs "espèce" et non à des effets "date".

Dans un premier temps, la gamme de variabilité explorée par le modèle dans la situation dite "de référence" avec une interculture en "sol nu" (sans couvert végétal vivant) sera présentée, en termes de quantités d'eau drainée, d'azote lixivié et de concentration nitrique de l'eau de drainage, de production des cultures suivantes et de minéralisation de l'azote du sol.

Dans un second temps, l'effet de l'absorption d'azote et de la production de biomasse des cultures intermédiaires et des repousses sera analysé en termes d'efficacité pour réduire la lixiviation d'azote et la concentration nitrique des eaux de drainage. Cette analyse permettra de confirmer ou d'infirmer l'efficacité de ces couverts automnaux pour réduire les fuites de nitrate, dans des contextes pédoclimatiques et culturels contrastés et selon les itinéraires techniques de ces couverts.

D'autres impacts connexes de l'implantation de ces couverts seront ensuite abordés, d'une part sur le bilan hydrique et le drainage et, d'autre part sur la production de la culture suivante.

Afin de quantifier et illustrer ces impacts, nous utiliserons la représentation en "boîte à moustaches" précédemment employée pour les études sur la phase de semis-levée et de destruction des cultures intermédiaires. Dans cette étude des résultats du modèle STICS, nous représenterons entre les 2 "moustaches" 95,7% de la distribution de la variable considérée, considérant une fois l'écart interquartile (au lieu de 1,5 fois dans la boîte à moustache "standard" présentée dans le Chapitre 7, section 7.11).

En complément de cette représentation, une analyse de variance, de type ANOVA, est réalisée de façon à permettre de hiérarchiser les différentes sources de variabilité des variables étudiées, en particulier pour le drainage et la lixiviation de nitrate. Cette analyse consiste à estimer les paramètres d'un modèle linéaire afin d'expliquer la variabilité observée pour la variable d'intérêt, par des facteurs explicatifs. Il s'agit, par exemple, de déterminer la part de la variabilité de la quantité d'azote lixivié, liée à la quantité d'eau drainée et à la quantité d'azote minéral initial dans le sol. Ainsi, il est possible d'expliquer la variable étudiée par la somme des effets de chacune des modalités des facteurs, seuls ou en interaction avec d'autres facteurs. A partir de cette analyse, il est alors possible d'attribuer une part de variance de la variable étudiée à chacun des facteurs testés dans l'analyse de variance, et donc de hiérarchiser l'importance de ces facteurs dans l'explication de la variabilité observée. Cette analyse permet ainsi d'identifier les paramètres et les variables d'entrée qui ont une forte ou faible influence sur la variable d'intérêt, et qu'il est donc important de prendre en compte ou pas dans l'analyse des résultats.

En parallèle à cette analyse de variance, une quantification des fréquences d'occurrence d'événements particuliers, permettant de déterminer les chances de réussite de la pratique considérée selon plusieurs facteurs, a été réalisée.

10.3. Caractérisation de la gamme des variables environnementales et de production simulées pour la situation de référence (sol nu en interculture)

10.3.1. Drainage annuel

Le classement des sites sélectionnés (voir Chapitre 7) est réalisé par valeur croissante de pluviométrie annuelle moyenne. Ce classement sera systématiquement respecté tout le long de ce rapport, lorsque les résultats seront illustrés en fonction du site.

Le drainage varie sur les 20 années et pour l'ensemble des 24 sites climatiques dans une très large gamme allant de 0 à 1370 mm par an (Figure 10-2). Le site le moins pluvieux (573 mm/an) a un drainage médian de 170 mm avec une variabilité interannuelle allant de 0 à moins de 650 mm, indiquant des années sans aucun drainage sous le sol cultivé. Les sites les plus pluvieux (plus de 900 mm/an) ont systématiquement du drainage chaque année, compris entre 200 et 1370 mm.

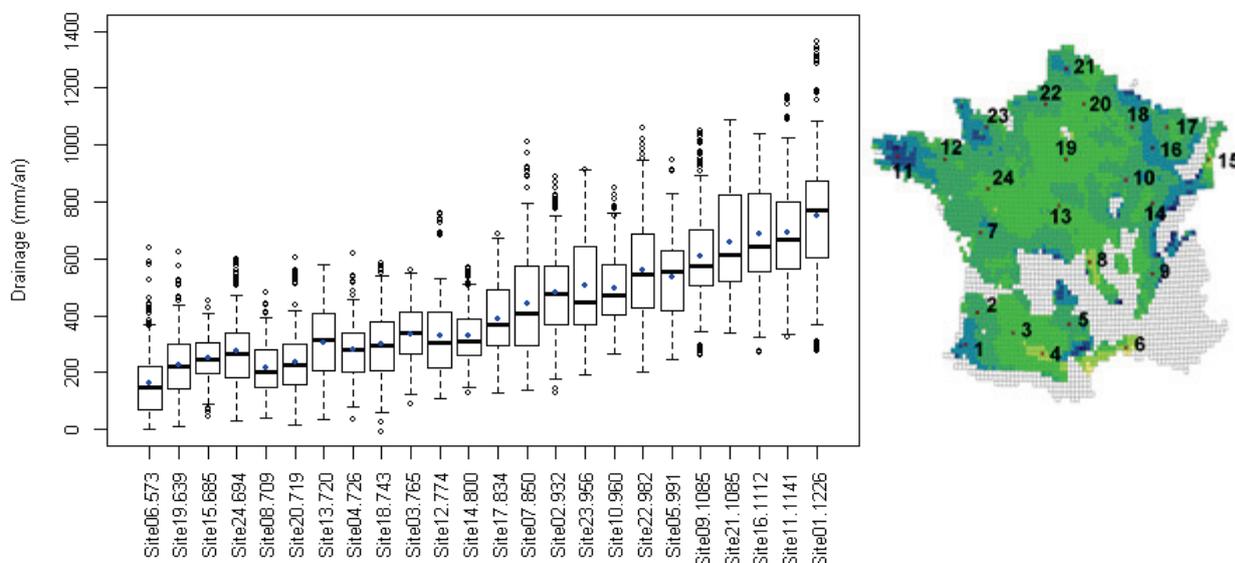


Figure 10-2. Variabilité du drainage annuel par site climatique simulé avec STICS pour la situation de référence (sol nu) pour tous les sols, les successions de culture et les trois états initiaux de reliquat d'azote minéral (point bleu = moyenne par site, la pluviométrie annuelle moyenne est indiquée en abscisse, après le numéro de site).

Cette gamme de variation ne doit pas être interprétée comme la représentation spatialement pondérée du drainage à l'échelle de la France ; ainsi la moyenne de ces 24 valeurs ne peut pas représenter le drainage moyen pondéré de la "ferme France" des grandes cultures, car tous les climats n'ont pas la même représentativité spatiale. Cette gamme de drainage permet toutefois d'analyser l'effet des modes de gestion de l'interculture pour une très large gamme de situations pédoclimatiques, et aussi d'identifier des situations climatiques ayant des réponses spécifiques. Enfin, les niveaux de drainage médian correspondent à une gamme de sols dont la profondeur et la réserve utile (RU) ne représentent pas de façon spatialement pondérée les sols français. Il existe des sols très profonds pour lesquels le niveau de drainage médian est certainement plus faible. Toutefois, la gamme de la variabilité interannuelle du drainage permet de s'assurer que des cas de drainage nul ou très faible, ou au contraire très intense, seront considérés dans l'analyse de l'effet des couverts sur les bilans d'eau, d'azote et sur la culture principale suivante.

La variabilité du drainage s'explique quasi exclusivement par la différence entre la pluviométrie et l'évapotranspiration potentielle (P-ETP) en cumul sur la période d'octobre à mars, comme en attestent les résultats de l'analyse de variance par ANOVA (Figure 10-3). Même si les caractéristiques du sol (profondeur et niveau de réserve utile) ont un effet significatif, celui-ci est très faible (< 2% de la variance expliquée). Cela s'explique en partie par le fait que nous n'avons pas considéré de sols ni très profonds (> 1,5 m) qui peuvent avoir une large RU, ni très superficiels (< 50 cm) avec de très faibles RU. Enfin, le choix des climats a été effectué de façon à couvrir une large gamme de climats sans chercher à avoir une représentation spatiale de la surface agricole des climats représentant les zones françaises des systèmes de grande culture.

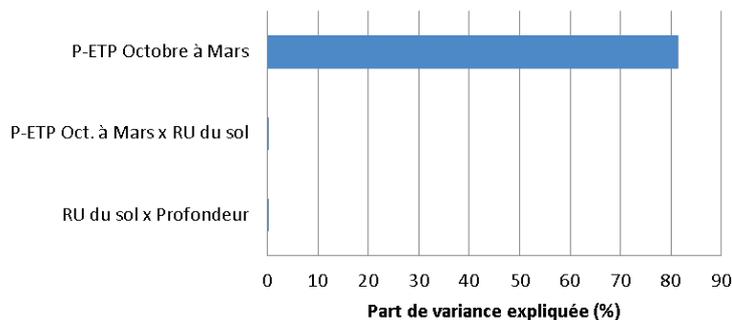


Figure 10-3. Part de variance expliquée par différentes variables pouvant expliquer le drainage et leurs interactions

Dans ce cas, le "poids" de la pluviométrie des climats pluvieux à très pluvieux est clairement prépondérant dans l'analyse des résultats. Il faut cependant noter que sous un climat donné, la profondeur et la texture du sol qui déterminent la réserve utile du sol peuvent avoir un effet important sur la dynamique de l'eau et de l'azote nitrique ; ainsi, des sols à faible RU auront des niveaux de drainage plus élevés que des sols à forte RU, avec un risque de lixiviation d'azote plus élevé.

10.3.2. Lixiviation et concentration nitrique annuelle

La gamme de lixiviation annuelle est très large, puisque les pertes simulées varient de 0 à près de 250 kgN/ha. Globalement et comme attendu, plus le site climatique a une pluviométrie et un drainage élevés, plus la lixiviation est élevée, comme l'illustre le classement croissant des sites climatiques en fonction de la pluviométrie (Figure 10-4). De même, plus le reliquat d'azote minéral initial est élevé, plus la quantité d'azote lixivié est élevée. Ainsi, pour les sites les moins pluvieux (les 10 premiers classés en fonction de l'état initial), la lixiviation annuelle peut être nulle ou quasi nulle certaines années avec l'état initial 1.

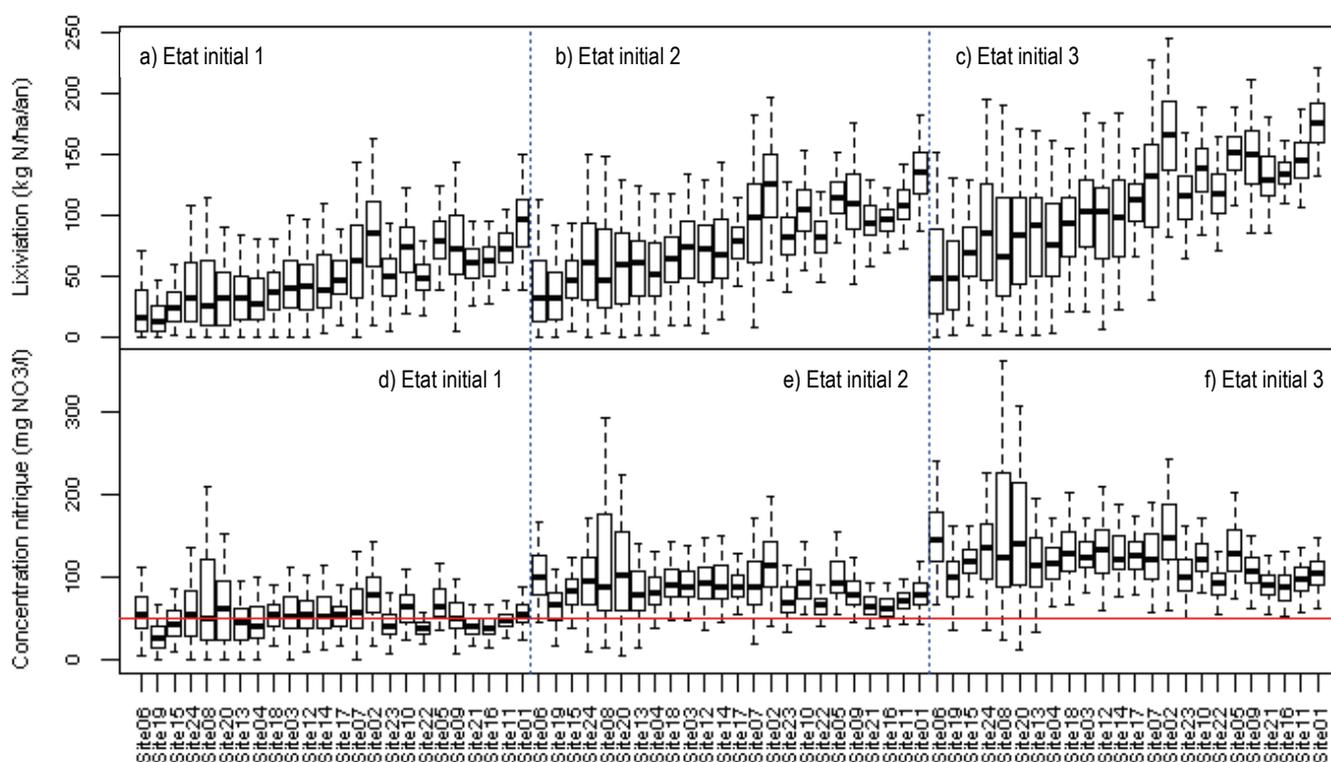


Figure 10-4. Variabilité de la lixiviation (a, b, c) et de la concentration en nitrate (d, e, f) par site climatique simulées avec STICS pour la situation de référence (sol nu) pour tous les sols et toutes les successions de culture, pour chacun des trois états initiaux de reliquat d'azote minéral (1 ≈ 20, 2 ≈ 60 et 3 ≈ 100 kgN/ha). La concentration nitrique à 50 mg/l est représentée par le trait rouge.

Cette grande variabilité de lixiviation se traduit par des concentrations nitriques des eaux de drainage de 55 mgNO₃/l en moyenne pour l'état initial 1, à 122 mgNO₃/l dans le cas de l'état initial 3. Contrairement aux quantités d'azote lixivié, la concentration nitrique est plus dépendante du niveau d'azote initial que du site, avec une absence de classement croissant avec l'augmentation de la pluviométrie annuelle moyenne des sites climatiques. On constate également une plus grande variabilité de cette concentration pour des cas de forts reliquats d'azote minéral et des sites peu pluvieux, en partie liée à la variabilité du drainage qui entraîne une dilution plus ou moins forte de l'azote lixivié et par conséquent des concentrations plus variables.

10.3.3. Relation entre drainage et lixiviation annuelle

Il existe une relation significative entre le drainage et la lixiviation annuelle. Cependant, on observe une assez grande variabilité qui s'explique par l'effet de différents facteurs, et en particulier de l'état initial d'azote minéral, comme illustré par la Figure 10-5. Ainsi, plus le profil de sol contient de l'azote minéral au début de la période de drainage et plus la lixiviation est élevée pour un même niveau de volume d'eau percolé dans et hors du sol exploré par les racines.

Cette variabilité de réponse est tout à fait cohérente avec les facteurs cités dans la bibliographie. Ces résultats illustrent le fait que le modèle de culture STICS fonctionne de façon dynamique, et que la prise en compte des divers processus du sol se déroulant de façon concomitante induit une gamme de variables de sortie très large et avec une réponse non linéaire et une forte variance. Cela illustre également tout l'intérêt d'utiliser un modèle dynamique pour analyser les effets des systèmes de culture sur les variables environnementales en prenant en compte une large gamme de sols, de climats, d'état initiaux et d'itinéraires techniques.

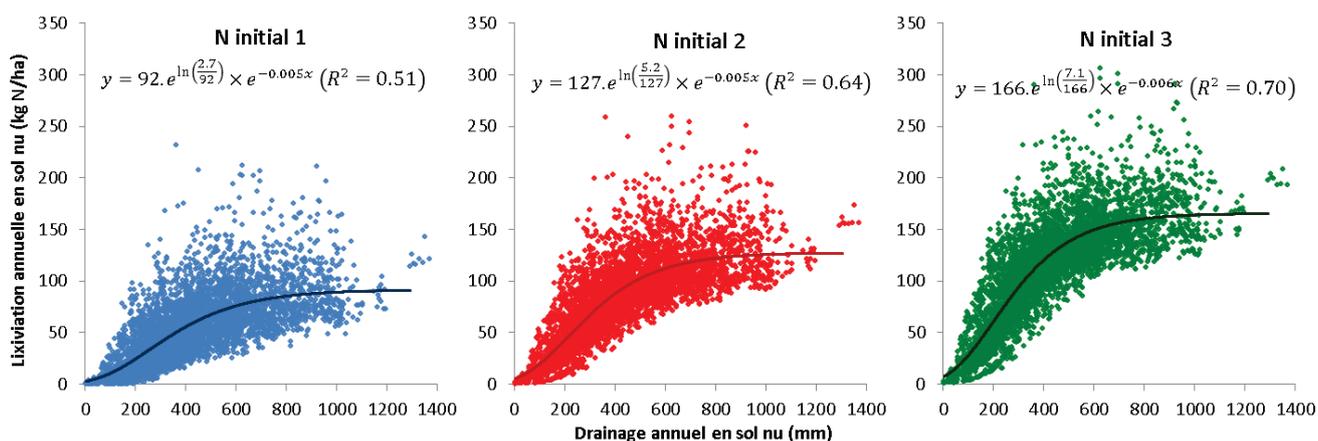


Figure 10-5. Relation entre drainage et lixiviation avec un sol nu en interculture, pour l'ensemble des situations pédoclimatiques et successions de culture, en fonction des 3 états initiaux de reliquat d'azote minéral (1, 2 et 3).

10.3.4. Production de la culture principale

La gamme des productions à la récolte (rendement en grains ou biomasse aérienne pour le maïs fourrage) est présentée pour les 3 successions en fonction du site climatique (Figure 10-6). Comme attendu, cette gamme est relativement large et doit permettre d'évaluer l'effet, aussi bien positif que négatif, des cultures intermédiaires sur la culture suivante, car les niveaux variables obtenus indiquent que l'on se situe généralement en dessous du potentiel de production et de rendement. La production du maïs est généralement plus élevée sur les sites irrigués (1 à 9, 13, 15, 19 et 24).

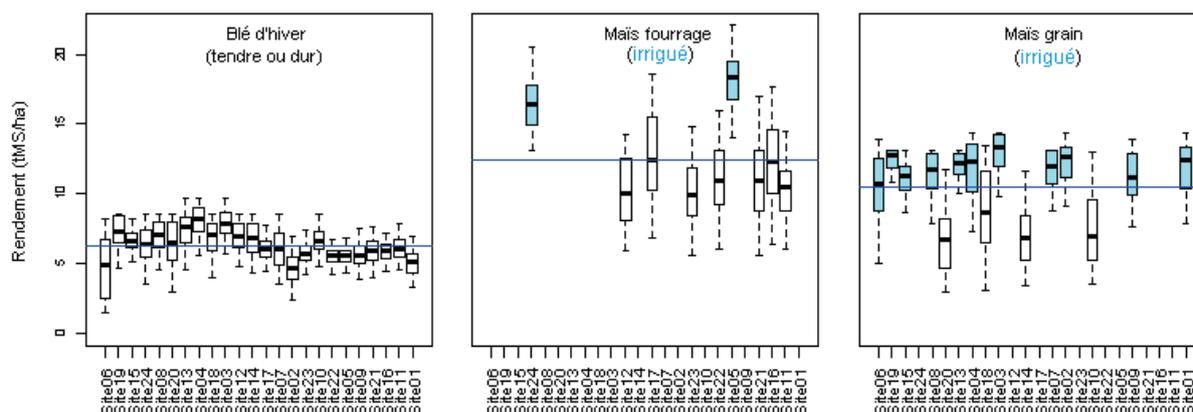


Figure 10-6. Gamme des productions à la récolte des cultures principales suivantes en fonction des sites climatiques (trait bleu = moyenne inter-sites)

10.3.5. Minéralisation nette annuelle en azote du sol : cas de la succession blé-maïs

La minéralisation nette annuelle, intégrant la minéralisation nette de l'azote issu de la matière organique du sol et des résidus de culture, se situe en médiane entre 110 et un peu plus de 200 kgN/ha/an, mais peut valoir, dans des cas moins fréquents, de 65 à 278 kgN/ha/an (Figure 10-7). Elle est en général plus élevée sur les sites du Sud de la France (sites 1, 3, 4, 7) que sur ceux du Nord, plus froids (17, 20, 21, 22, 23).

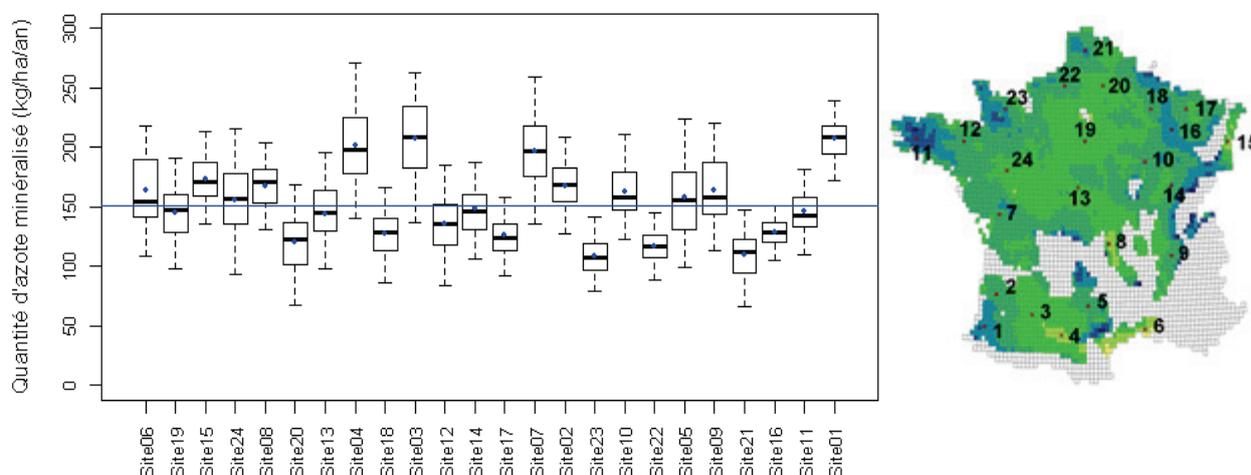


Figure 10-7. Gamme de minéralisation nette annuelle (matière organique du sol et résidus du précédent cultural) pour les différents sites climatiques dans la succession blé-maïs (trait bleu = moyenne inter-sites ; point bleu = moyenne par site).

Au sein d'un même site climatique, cette minéralisation dépend du type de sol considéré, en particulier de ses taux d'argile et de calcaire et de sa teneur en azote organique. Ainsi, des sols différents sur un site climatique donné peuvent présenter des écarts de 40 kg/ha/an entre niveaux de minéralisation annuelle (Tableau 10-1).

	Minéralisation nette annuelle moyenne (kgN/ha) par site climatique																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Sol 1	206	157	176	173	140	194	196	166	175	186	167	162	123	157	184	134	141	144	155	111	127	131	105	173
Sol 2	202	179	221	208	195	151	215	171	146	153	142	129	153	133	163	124	114	108	135	142	88	119	113	147
Sol 3	212	167	225	224	141	147	180	164	189	150	144	134	156	155	-	129	123	125	145	99	114	103	115	159
Sol 4	213	-	-	-	-	-	-	-	148	-	131	120	-	-	-	128	126	133	146	131	-	116	103	144

Tableau 10-1. Exemple de minéralisation nette annuelle moyenne (humus plus résidus du précédent cultural) dans la succession blé-maïs, par site et sol (les sols 1 à 4 sont différents d'un site à l'autre).

10.4. Croissance et acquisition d'azote des cultures intermédiaires et repousses de blé et colza

Le terme "acquisition de l'azote" sera utilisé pour décrire l'accumulation de l'azote dans la plante issue de l'absorption d'azote minéral par les racines dans le sol (espèces non légumineuses) et de la fixation symbiotique dans les nodosités (vesce uniquement) ; les légumineuses pouvant acquérir de l'azote par les deux voies, absorption racinaire et fixation symbiotique. Ces deux sources d'azote sont simulées par le modèle STICS et peuvent être analysées conjointement pour les légumineuses.

10.4.1. Capacités globales d'acquisition de l'azote en interculture pour tous les sites climatiques et sols

Globalement pour l'ensemble des simulations, on observe les résultats marquants suivants (Figure 10-8) :

- 1) Une forte capacité de l'absorption racinaire de l'azote pour la moutarde, le ray-grass et les repousses de blé ou de colza avec un taux de couverture de 100% ("rp100"), de l'ordre de 55 kgN/ha en médiane pour toutes les situations et avec des maximums de l'ordre de 200 kgN/ha ;
- 2) Le niveau d'azote acquis dépend de l'état initial d'azote minéral du sol, indiquant que l'azote disponible dans le sol est un facteur limitant de la croissance des couverts. Ce résultat est différent pour la vesce car il y a complémentarité entre absorption et fixation symbiotique pour satisfaire les besoins en azote pour la croissance de la légumineuse ;
- 3) La moutarde est l'espèce la plus efficace pour absorber de l'azote minéral du sol à l'automne, en particulier en situation de semis tardif (cas de l'interculture maïs-maïs) ;
- 4) Les repousses de blé et de colza ont des capacités d'absorption d'azote aussi élevées que les deux CI, mais seulement si elles sont réparties de façon homogène, et avec une densité de plantes par m² suffisante. Sinon, elles absorbent nettement moins d'azote, comme l'indique la situation avec 50% de taux de couverture ("rp50") ;
- 5) Les quantités d'azote absorbé sont plus faibles après maïs fourrage, et sont particulièrement faibles après maïs grain, en raison d'une date de levée très tardive ;
- 6) La quantité d'azote acquise par la vesce après blé et colza est supérieure à celle des autres espèces de couvert pour les deux états initiaux d'azote minéral du sol 1 et 2, en raison de la fixation symbiotique. Cette fixation est moins efficace en cas de levée tardive (après maïs) ou avec l'état initial d'azote minéral 3, indiquant un potentiel de croissance et d'absorption de l'azote minéral du sol plus faible de la vesce par rapport aux autres espèces.

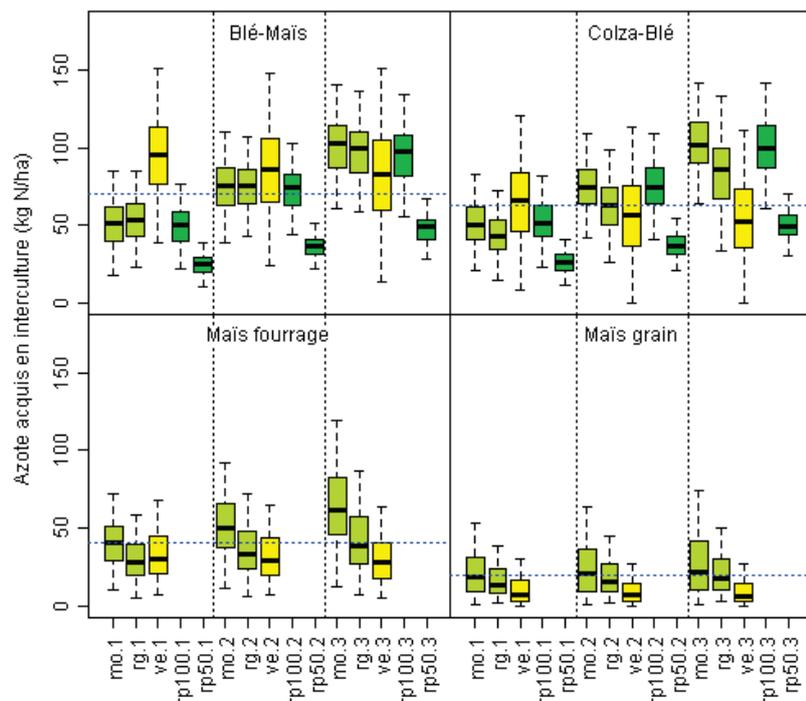


Figure 10-8. Gamme des quantités d'azote acquises par les différents types de couverts (moutarde "mo" et ray-grass "rg" en vert clair, vesce "ve" en jaune, repousses à 100% de taux de couverture "rp100" et à 50% "rp50" en vert foncé) selon l'état initial en azote minéral du sol (1, 2, 3) et la succession de culture (trait bleu = moyenne par succession).

En résumé, les capacités de croissance des cultures intermédiaires et des repousses en couverts denses et homogènes sont globalement élevées et doivent permettre de réduire de façon très importante la quantité d'azote minéral du sol avant la période de drainage. Toutefois, il est nécessaire d'analyser la variabilité inter-sites climatiques car la gamme de valeurs simulées est très large ; en effet, elle indique aussi des valeurs très faibles qu'il convient de repérer et d'analyser pour savoir si des comportements spécifiques se produisent sous certaines conditions pédo-climatiques et pourquoi.

10.4.2. Biomasse produite pour tous les sites climatiques et sols

Les résultats marquants sur les biomasses produites en interculture sont les suivants (Figure 10-9) :

- 1) Comme pour les quantités d'azote acquis, les biomasses produites dépendent du niveau d'azote minéral initial dans le sol, avec des biomasses d'autant plus élevées que l'azote est disponible sous forme minérale dans le sol, excepté dans le cas de la vesce ;
- 2) Des biomasses généralement plus élevées pour le ray-grass que la moutarde, dans le cas des successions blé-maïs et colza-blé. Des biomasses faibles pour ces deux espèces après maïs fourrage et encore plus après maïs grain, avec une meilleure production pour la moutarde que pour le ray-grass ;
- 3) Des biomasses plus faibles pour la vesce, en particulier pour des niveaux d'azote initial élevés ou des levées tardives, après maïs ;
- 4) Des repousses de colza équivalentes, en termes de biomasse, à la moutarde, et des repousses de blé équivalentes au ray-grass, dans le cas où ces repousses atteignent un taux de couverture de 100% de la surface. Des niveaux de production des repousses beaucoup plus faibles lorsque seulement 50% de la surface est couverte, avec des biomasses inférieures à 3 t/ha en médiane.

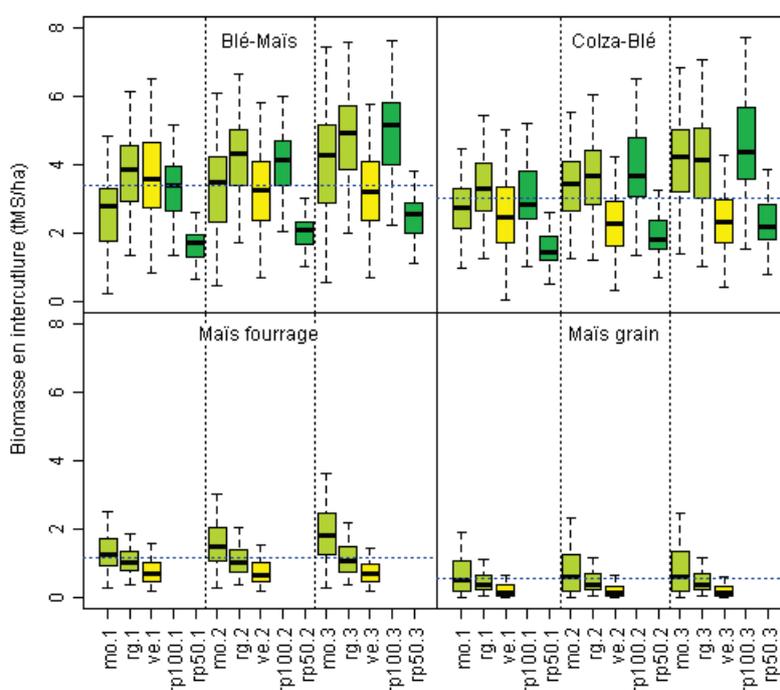


Figure 10-9. Gamme des biomasses produites par les différents types de couverts (moutarde "mo" et ray-grass "rg" en vert clair, vesce "ve" en jaune, repousses à 100% de taux de couverture "rp100" et à 50% "rp50" en vert foncé) selon l'état initial en azote minéral du sol (1, 2, 3) et la succession de culture (trait bleu = moyenne par succession).

En résumé, les biomasses sont en accord avec les résultats sur l'azote acquis par le couvert par rapport aux types de successions, espèces de CI ou repousses considérées et niveaux d'azote initial. Des effets "espèce" ressortent avec des phénomènes de dilution d'azote, aboutissant, par exemple, à des biomasses produites pour le ray-grass italien supérieures à celles de la moutarde, malgré une absorption d'azote plus élevée pour cette dernière.

10.4.3. Relation globale entre production de biomasse et accumulation d'azote dans les cultures intermédiaires

Globalement, on observe une relation entre la biomasse produite et la quantité d'azote accumulée dans la plante. Toutefois la relation, bien que significative ($R^2 = 0,93$ à $0,96$), indique une assez forte variabilité de l'absorption d'azote pour un même niveau de biomasse produite (Figure 10-10). Cela induit une variabilité de la teneur en azote (ou du ratio C/N) des cultures intermédiaires, et donc de leur niveau de nutrition azotée, en fonction des conditions pédoclimatiques mais aussi, et surtout, de l'état initial d'azote minéral du sol.

En moyenne, la quantité d'azote acquise par unité de biomasse (et donc la teneur en azote) est plus faible pour le ray-grass que pour la moutarde. Comme attendu, la teneur en azote de la vesce est la plus élevée. Ainsi, le rapport C/N du ray-grass est de l'ordre de 23 en moyenne, contre 17 pour la moutarde et 15 pour la vesce.

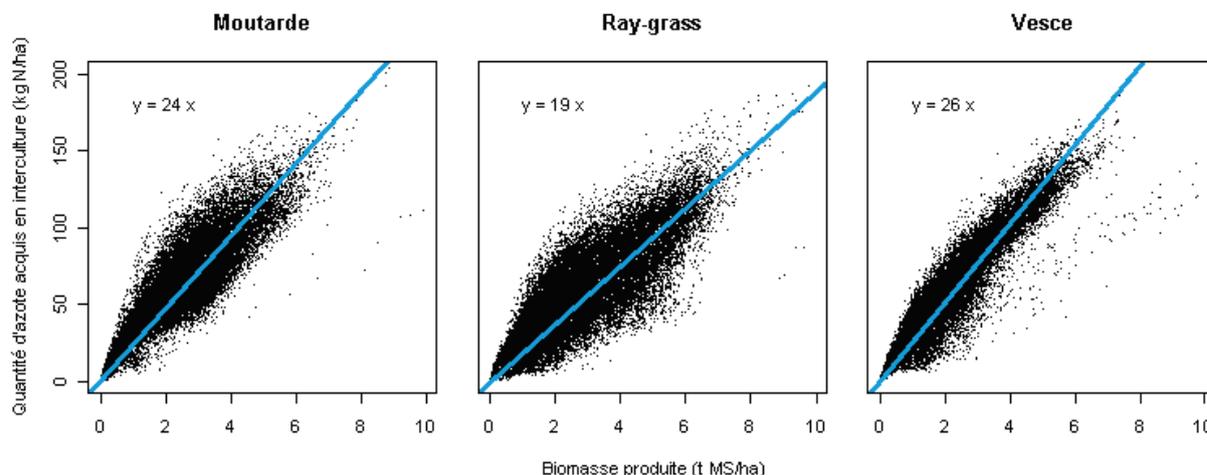


Figure 10-10. Relation entre production de biomasse et acquisition de l'azote pour les 3 cultures intermédiaires (droite de régression en bleu).

10.4.4. Variabilité de l'acquisition de l'azote en fonction du site climatique : l'exemple de l'interculture longue

Les capacités d'acquisition de l'azote par les CI sont globalement proches entre les sites, pour un état d'azote initial donné (exemple de l'état 2), variant en médiane de 70 à 90 kgN/ha, mais avec une très large gamme de variabilité (Figure 10-11).

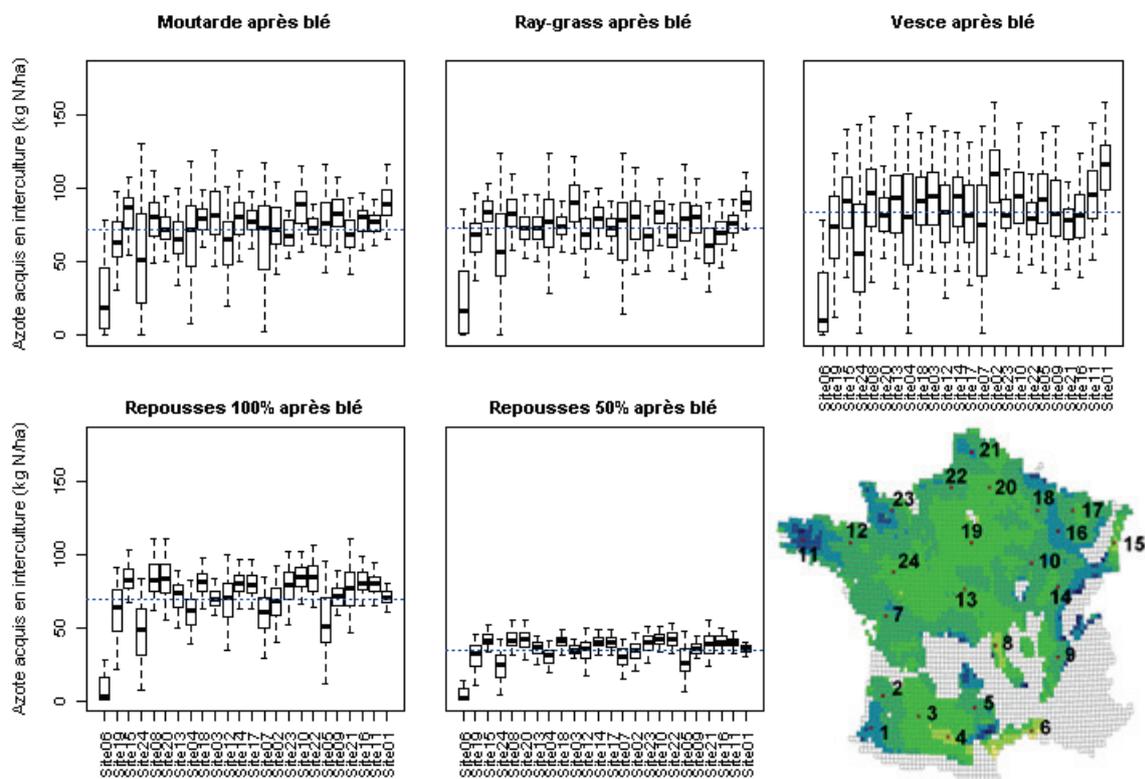


Figure 10-11. Variabilité inter-sites et climatique de l'acquisition de l'azote pour les 3 cultures intermédiaires et les repousses, pour tous les sols, dans la succession blé-mais avec un état initial 2 (trait bleu = moyenne inter-sites).

Quelques sites climatiques se distinguent, notamment le site 6 (climat méditerranéen) avec une médiane très faible, ainsi que le site 24 (climat du Pays de Loire), indiquant que les stress hydriques réduisent fortement la production de biomasse et l'acquisition de l'azote. *A contrario*, le site 1 (climat océanique du Sud, chaud et le plus pluvieux) est le plus favorable à la croissance et à l'acquisition de l'azote. Les repousses de blé, notamment celles avec un taux de couverture de 100%, ont une variabilité plus forte que les cultures intermédiaires, car elles lèvent un peu plus tôt et subissent davantage de stress hydriques d'été ; cela réduit leur potentiel de croissance et d'absorption de l'azote, phénomène particulièrement visible pour le climat le plus sec (site 6).

La variabilité interannuelle de la croissance et de l'acquisition de l'azote est globalement, pour les 24 sites climatiques, relativement forte, due à la variabilité de la pluviométrie et de la température moyenne, qui ont un effet direct sur la croissance des cultures intermédiaires. Cette variabilité est illustrée par le Tableau 10-2 qui présente les valeurs minimales et maximales obtenues par site, pour un ensemble de conditions données (1 sol, 1 CI, 1 date de levée et de destruction). L'écart entre les valeurs minimale et maximale est donc exclusivement dû à un effet climat, illustrant l'impact de la pluviométrie et de stress hydriques forts, certaines années, qui constitue un facteur fort de réduction de la croissance et de l'acquisition d'azote des cultures intermédiaires.

Niveau N initial	N acquis (kgN/ha)	Site climatique																							
		06	19	15	24	08	20	13	04	18	03	12	14	17	07	02	23	10	22	05	09	21	16	11	01
1	Min	1	12	54	2	8	33	39	13	41	8	3	46	42	4	19	35	54	40	40	53	46	49	40	60
	Max	65	70	94	90	96	71	76	94	76	100	67	80	85	95	79	61	83	61	78	82	68	81	66	93
2	Min	1	29	13	3	66	56	63	35	64	11	4	71	65	5	22	61	68	68	24	59	54	55	55	78
	Max	90	96	121	116	125	97	102	119	101	126	94	105	103	120	105	86	106	87	105	106	94	103	88	117
3	Min	1	39	105	3	89	83	91	45	82	44	6	98	83	7	42	74	83	85	81	66	60	63	64	90
	Max	117	125	148	144	155	126	132	148	133	156	123	132	128	149	135	115	133	116	134	134	122	131	117	146

Tableau 10-2. Acquisition d'azote minimale et maximale, par site et N minéral initial, dans le cas de la moutarde, levée au 10 août et détruite au 10 décembre, sur 20 années climatiques, pour un sol donné.

Cette variabilité interannuelle se manifeste pour les 3 niveaux d'azote minéral initial pour les 3 espèces de cultures intermédiaires. Cependant, dans les cas de la moutarde et du ray-grass, plus la disponibilité du sol en azote minéral est élevée, plus cette variabilité a tendance à être forte, contrairement à celui de la vesce, pour laquelle la variabilité est semblable et forte pour les 3 états initiaux d'azote minéral. Ces effets observés sur moutarde et ray-grass s'expliquent par le fait que les cas de faible acquisition d'azote ne sont pas dus à une limitation par l'azote, tandis que ceux d'acquisition maximale le sont. Ainsi, si la disponibilité en azote augmente, les acquisitions faibles restent faibles alors que les acquisitions élevées, qui étaient limitées par l'azote disponible, augmentent. La vesce étant capable de compenser un manque d'azote minéral dans le sol par de l'azote fixé depuis l'atmosphère, elle est moins sensible à ce phénomène.

10.4.5. Effet des dates de levée et de destruction sur l'acquisition de l'azote par les cultures intermédiaires

10.4.5.1. Quantités d'azote acquis tous sites, sols et états initiaux d'azote confondus

La Figure 10-12, qui présente les quantités d'azote acquis (absorption d'azote minéral et fixation pour la légumineuse) par dates de levée et de destruction des CI et pour l'ensemble des sites, des sols et les 3 états initiaux d'azote minéral, indique les points marquants suivants :

- 1) Une vitesse d'absorption et d'acquisition de l'azote très rapide pour la moutarde et le ray-grass pour les 4 premières dates de levée (fin juillet à mi-septembre) puisqu'en seulement 2 mois de croissance une grande partie de l'azote a été absorbée ;

- 2) Les semis tardifs, avec une levée au-delà de la mi-septembre, voient leur capacités d'absorption d'azote nettement réduites. Cette capacité est d'autant plus réduite que les sites climatiques sont situés au Nord de la France ;
- 3) Les semis les plus précoces (juillet) ne sont pas forcément ceux qui permettent la plus forte absorption, sauf pour la vesce ;
- 4) D'un point de vue de l'efficacité de l'absorption d'azote minéral du sol, il est possible de détruire assez tôt, voire dès octobre, une culture intermédiaire non légumineuse semée avant le mois de septembre, car la production de biomasse et l'accumulation d'azote augmentent peu à partir du début novembre.

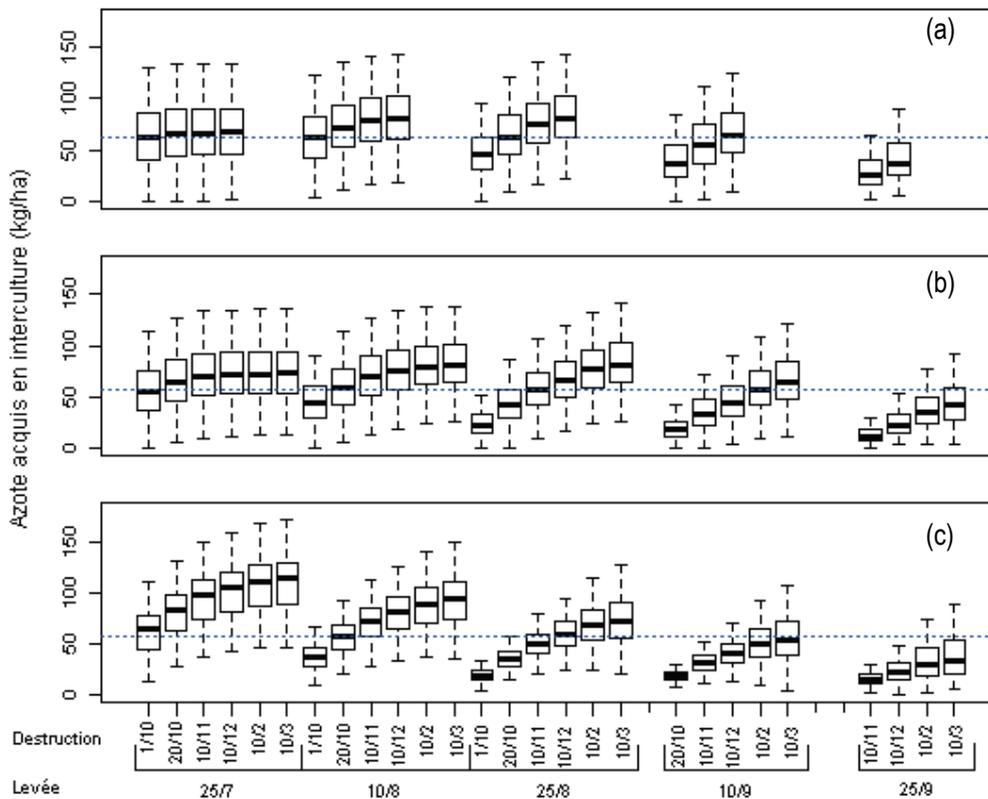


Figure 10-12. Gamme des quantités d'azote acquis par la moutarde (a), le ray-grass (b) et la vesce (c) en fonction des dates de levée et de destruction (trait bleu = moyenne toutes dates confondues).

10.4.5.2. Quantités d'azote acquis par les CI pour des sites ayant une réponse contrastée à la date de levée : exemple du ray-grass

Parmi les 24 sites, nous avons choisi de présenter les résultats spécifiques de 6 sites, illustrant des réponses différentes de l'acquisition de l'azote à la date de levée.

L'analyse pour des sites ayant des caractéristiques contrastées en termes de pluviométrie et de température montre, dans le cas du ray-grass, les résultats importants suivants (Figure 10-13) :

- Les sites situés au Sud, donc plus chauds (1, 4) ont des acquisitions d'azote par les CI plus élevées en moyenne et sont également plus sensibles aux dates de destruction, car le développement des CI en automne est probablement plus fort que pour des sites situés dans des contextes plus froids ;
- Dans les sites plus arides (6), un phénomène de stress hydrique pour les dates de levée précoces empêche le bon développement de CI ; dans ce cas, des dates de levée plus tardives sont préférables. Au contraire, pour des sites du Nord (16), dont les faibles températures ralentissent la croissance des couverts, les semis précoces sont préférables.

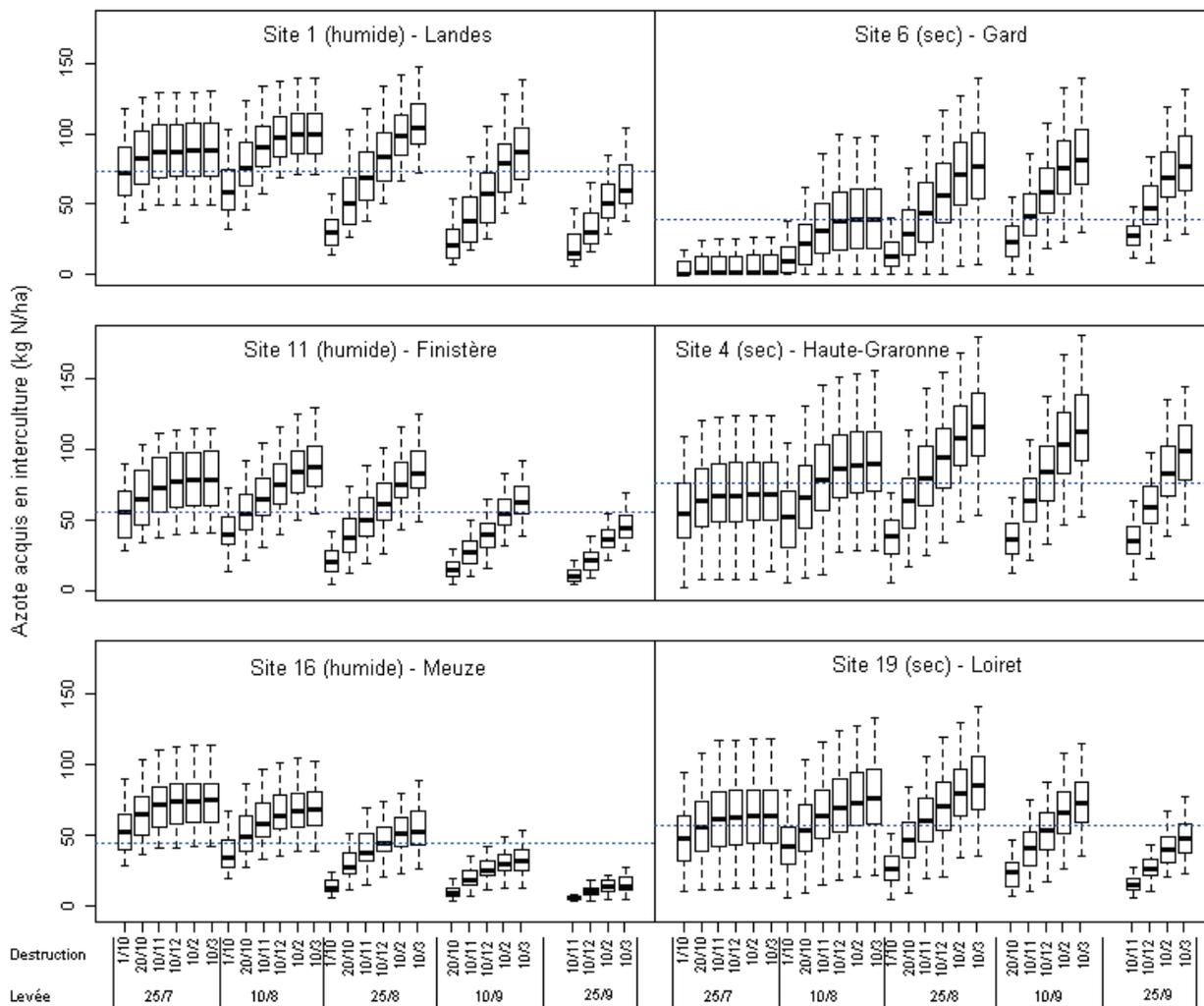


Figure 10-13. Gamme des quantités d'azote absorbé par le ray-grass en fonction des dates de levée et de destruction pour 6 sites ayant des réponses contrastées (trait bleu = moyenne toutes dates confondues).

10.4.6. Probabilité d'échec de la culture intermédiaire selon le site, l'espèce et sa date de levée

La probabilité est abordée en termes de fréquence d'occurrence, sur 20 ans, d'un évènement. Dans cette section, nous avons analysé la fréquence d'échec de la culture intermédiaire après sa levée ; le risque d'échec lié à la période semis-levée est étudié par ailleurs avec le modèle SIMPLE (Chapitre 8). La CI est considérée comme un échec, autrement dit inefficace, quand elle n'a prélevé que peu d'azote minéral dans le sol. Nous ne présentons que les résultats pour l'état initial en azote minéral intermédiaire (Figure 10-14), soit environ 60 kgN/ha disponibles dans le sol à la récolte du précédent (dans cette situation, il est peu probable que les prélèvements soient limités par la disponibilité de l'azote minéral dans le sol). Les résultats sont présentés par espèce (moutarde, ray-grass, vesce), date de levée (du 25/7 au 25/10) et site climatique.

Deux seuils "d'inefficacité" sont présentés : (1) prélèvement par la CI < 5 kgN/ha, donc CI probablement inefficace, et (2) prélèvement par la CI < 20 kgN/ha, donc CI ayant une efficacité réduite (cette seconde catégorie incluant donc la première). Ces seuils ne considèrent que l'azote absorbé par la culture et non l'azote fixé depuis l'atmosphère, qui ne contribue pas à réduire la lixiviation d'azote.

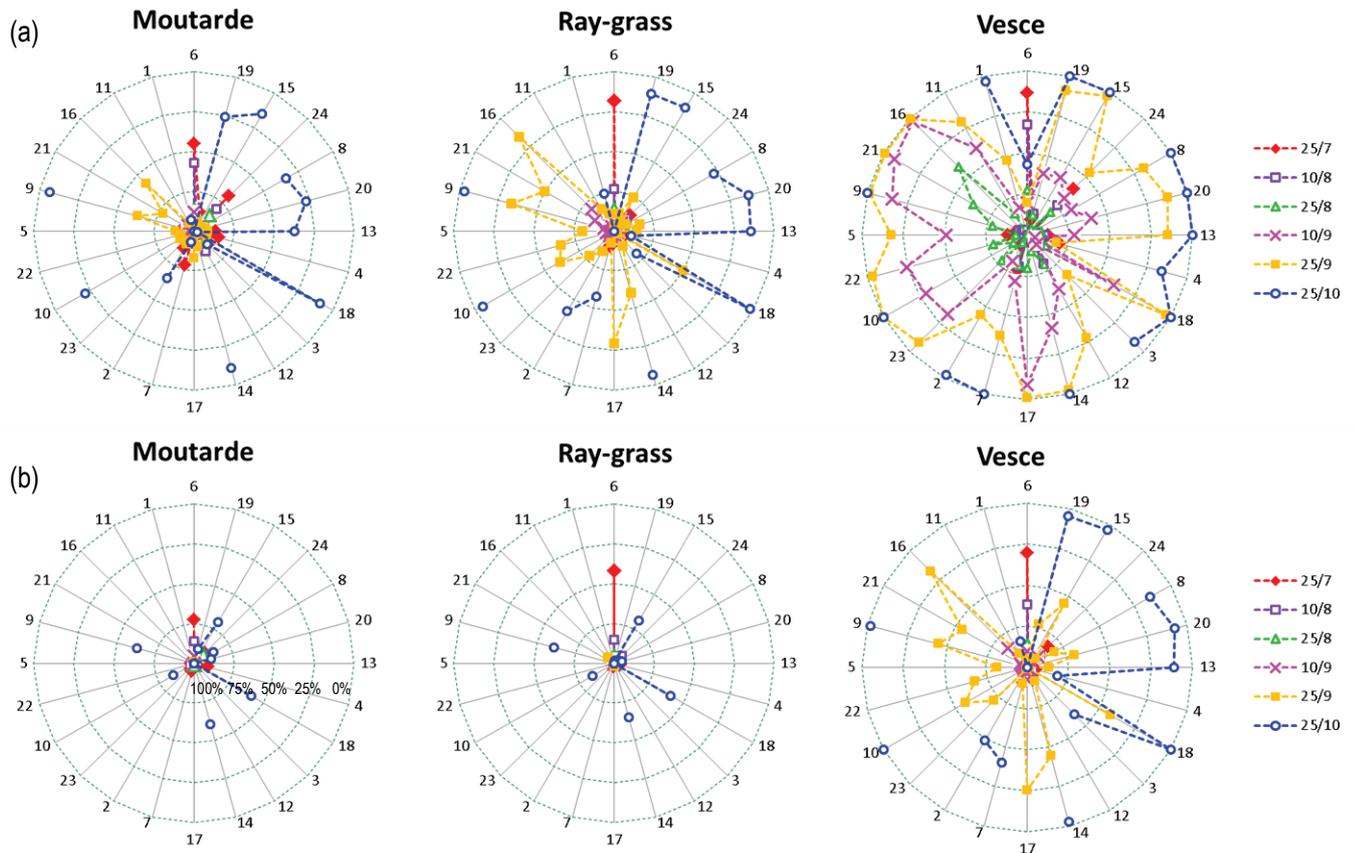


Figure 10-14. Fréquence sur 20 ans pour laquelle la CI a absorbé plus de 5 kgN/ha (a) et plus de 20 kgN/ha (b) de l'azote du sol, avec un niveau d'azote minéral initial d'environ 60 kgN/ha, et en la détruisant au plus tôt le 10/12, selon le site (1 à 24 en rayons) et la date de levée (25/7 au 25/10) pour la moutarde, le ray-grass et la vesce (centre du cercle = 100% et chaque cercle = 25% de fréquence en moins, jusqu'à 0% pour le cercle extérieur).

La fréquence à laquelle la CI n'est pas bien développée, et donc est probablement inefficace, dépend de l'espèce considérée, des contraintes climatiques et de la date de semis. L'effet de la quantité d'azote minéral initial dans le sol n'a que peu d'influence, avec une différence en moyenne de $\pm 3\%$. La fréquence d'échec est un peu plus élevée pour le niveau d'azote initial le plus faible et un peu plus faible quand la quantité d'azote initial est élevée, montrant que dans un petit nombre de cas c'est l'azote disponible dans le sol qui est limitant.

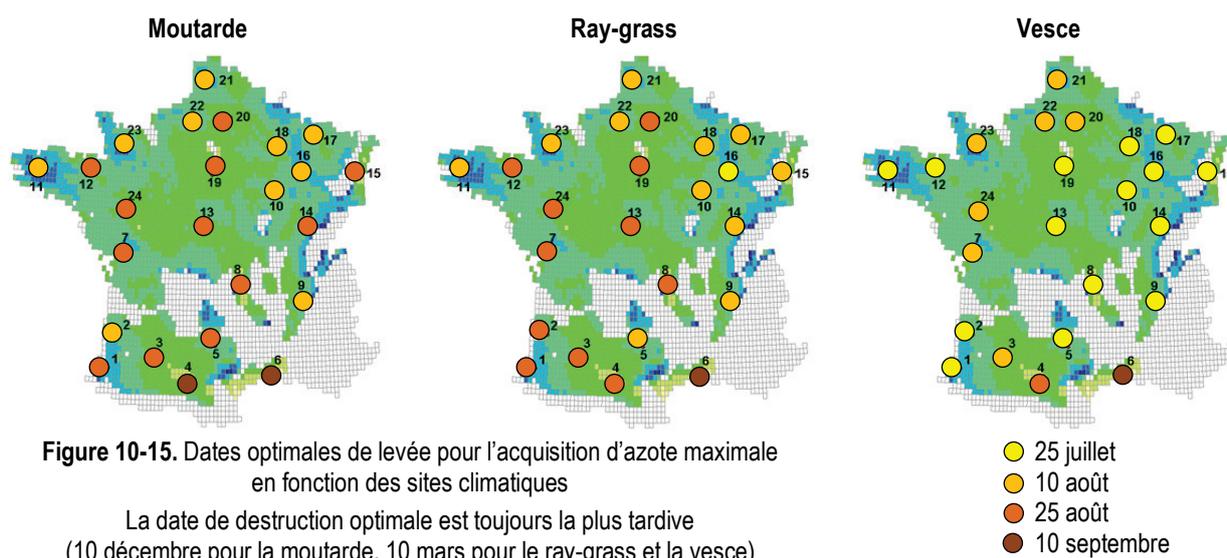
Concernant les effets "espèce", la vesce présente des fréquences d'échec plus élevées que le ray-grass et la moutarde, que le seuil considéré soit de 5 ou de 20 kgN/ha et quels que soient la date de levée et le site. Ceci est dû en partie au fait que la vesce est plus sensible à la sécheresse et au froid que les 2 autres espèces considérées, mais aussi au fait qu'elle tire une partie de sa fourniture en azote de la fixation symbiotique. La moutarde présente des fréquences d'échec un peu plus fortes que le ray-grass pour des dates de levée précoces et inversement pour les dates tardives.

Un effet "date de levée" apparaît aussi très clairement, avec des fréquences d'échec d'autant plus fortes que la date de levée (et donc de semis) sera tardive, en particulier pour la vesce et le ray-grass et dans les sites climatiques du Nord, à températures automnales faibles. La fréquence d'échec augmente aussi quand la levée est précoce (25/7), surtout pour des sites situés au Sud (6,4) ou secs (13, 24). Les dates de levée pour lesquelles la fréquence d'échec de la CI est la plus faible se situent, dans la grande majorité des cas, entre le 10/8 et le 25/9 pour la moutarde, entre le 25/7 et le 10/9 pour le ray-grass et entre le 25/7 et le 25/8 pour la vesce.

Il est cependant important de noter que si ces plages de dates de levée présentent généralement des fréquences d'échec faibles, cela n'est pas vrai dans certains cas, car les contraintes climatiques auront un impact important sur la survenue d'échecs des CI. En particulier, des sites très secs comme le site 6 peuvent avoir des dates de levée avec une fréquence d'échec minimale entre le 10/9 et le 25/10, alors que pour des sites pluvieux et froids, les dates de levée optimales se situent entre le 25/7 et le 25/8.

10.4.7. Dates de levée pour obtenir les quantités d'azote acquises les plus élevées par site et espèce de culture intermédiaire

La date de levée optimale permettant d'obtenir les quantités d'azote acquises les plus élevées est variable en fonction du site climatique (Figure 10-15). Contrairement à ce que l'on pourrait penser intuitivement, ce n'est pas forcément en semant le plus tôt possible après la récolte d'une culture d'hiver (exemple illustré ici après blé) que l'acquisition de l'azote par la culture intermédiaire sera la plus élevée. Il est intéressant de noter que cette date optimale de levée (et donc de semis) est d'autant plus tardive que l'espèce est la moutarde et que le site climatique est au Sud de la France. Ainsi, pour le site méditerranéen, c'est même lorsque la levée a lieu en septembre que la culture intermédiaire est la plus efficace pour prélever de l'azote. Une date de levée tardive sera d'autant plus pénalisante que l'on se situe au Nord de la France. Pour une grande partie des sites, notamment ceux de la moitié Sud de la France, un semis après le 15 août devrait permettre d'optimiser l'installation des cultures intermédiaires, aussi bien pour favoriser la levée (cf. les résultats des simulations semis-levée avec le modèle SIMPLE, Chapitre 8) que l'acquisition de l'azote.



Cela s'explique par des effets de stress hydrique en été, qui ont un impact sur la levée mais aussi sur la croissance et l'acquisition de l'azote. Ces résultats démontrent que la date de semis doit être adaptée en fonction du site climatique et d'une manière pratique également en fonction des prévisions météorologiques et de l'état hydrique du sol.

La date de destruction optimale, que ce soit pour la moutarde, le ray-grass ou la vesce, est toujours la date de destruction la plus tardive. Cependant, le gain par rapport à une date de destruction plus précoce peut ne représenter que quelques kilos d'azote et avoir un impact négligeable sur la réduction de la lixiviation.

10.5. Impact des cultures intermédiaires et des repousses sur le bilan hydrique et le drainage

Le drainage et le bilan hydrique ont été analysés au 25 avril, pour l'ensemble des sites climatiques, afin de simplifier et d'homogénéiser les résultats, et d'éviter des confusions d'effet avec la gestion de l'irrigation de la culture suivante. Cette date peut être assimilée à la fin de la période de drainage pour une grande majorité des sites, bien qu'il soit possible d'avoir quelques épisodes drainants après le 25 avril sous culture de printemps ou d'été en cas de forte pluviométrie au printemps, dans certains sites très pluvieux. Nous avons vérifié qu'à cette date du 25/04 la différence de drainage entre la situation avec culture intermédiaire et la situation de référence avec sol nu en interculture n'est pas ou peu modifiée par rapport à une évaluation faite strictement au bout d'un an de simulation. Cette date permet également d'analyser le stock d'eau du sol au semis de la culture de printemps suivante (maïs). L'éventuel effet sur l'alimentation hydrique de la culture suivante est simulé et ses conséquences sur la production (biomasse aérienne totale et rendement) sont prises en compte.

10.5.1. Effet des cultures intermédiaires sur les composantes du bilan hydrique

10.5.1.1. Analyse globale pour tous les sites

Afin de comprendre la variabilité de l'effet des cultures intermédiaires sur le drainage, exprimé sous forme de différentiel de drainage entre la situation avec CI et la situation en sol nu, nous avons tout d'abord analysé les variables clés du bilan hydrique pour l'ensemble des sites climatiques. Les résultats présentés ici considèrent uniquement les simulations en interculture longue (blé-maïs et maïs-maïs) qui permettent d'analyser sans confusion d'effet les composantes du bilan hydrique. Comme la croissance des cultures intermédiaires est le premier facteur d'explication de la variabilité de cet effet (Figure 10-16), nous avons cherché à quantifier les relations entre le niveau de biomasse produite par les cultures intermédiaires et les composantes principales du bilan hydrique. Ainsi, l'évapotranspiration réelle (ETR) a été analysée en situation de couvert et de sol nu, en décomposant la transpiration du couvert et l'évaporation du sol, pour estimer la "consommation supplémentaire d'eau" des cultures intermédiaires. L'effet des cultures intermédiaires sur l'ETR et sur l'évaporation d'eau du sol a été analysé en différentiel, correspondant, pour une simulation donnée, à la différence entre la valeur simulée en culture intermédiaire et celle en sol nu.

Bien que la relation entre la biomasse produite par les cultures intermédiaires et les différentes composantes du bilan hydrique apparaisse peu étroite, indiquant une forte variance lorsque l'on considère l'ensemble des pédoclimats et années climatiques, une relation linéaire hautement significative ($r > 0,9$) a été déterminée entre la biomasse et les composantes du bilan hydrique (Figure 10-16). Les points majeurs suivants peuvent être tirés :

- Le différentiel de drainage dépend significativement de la biomasse de la culture intermédiaire, avec en moyenne (pente de la régression linéaire), une réduction du drainage de 9,6 mm par tonne de biomasse produite (Figure 10-16.a) ;
- Cette différence de drainage s'explique en très grande partie par une différence d'ETR (évapotranspiration réelle) entre la situation avec culture intermédiaire et celle en sol nu (différentiel d'ETR). Ce différentiel correspond à une augmentation moyenne de l'ETR de 9,4 mm par tonne de biomasse (Figure 10-16.b).

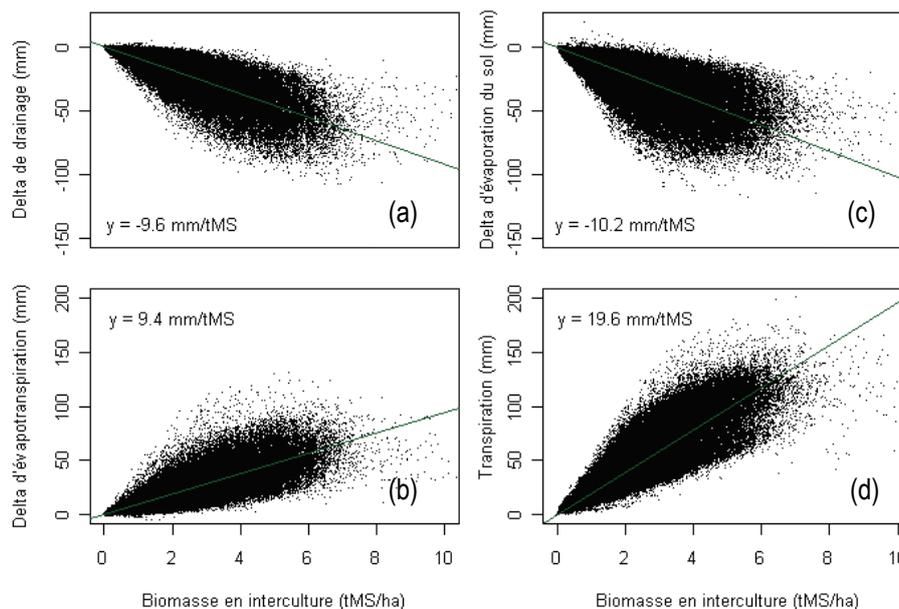


Figure 10-16. Relations entre, d'une part, la biomasse produite par la culture intermédiaire et, d'autre part, le différentiel (ou delta) de drainage (a), le différentiel d'ETR (b), le différentiel d'évaporation du sol (c) et la transpiration du couvert (d), en considérant tous les sites climatiques, les 3 espèces de cultures intermédiaires et les 3 états initiaux d'azote minéral du sol (droite de régression en vert)

Ce différentiel d'ETR peut être qualifié de "consommation supplémentaire" d'eau par les cultures intermédiaires. Ce différentiel d'ETR provient, d'une part de la transpiration des cultures intermédiaires, et d'autre part d'un effet

non négligeable de réduction de l'évaporation d'eau du sol sous couvert, permis par la couverture du sol par l'indice foliaire.

- La transpiration de la culture intermédiaire est en moyenne de 19,6 mm par tonne de biomasse produite (Figure 10-16.d) ;
- De façon concomitante, la réduction de l'évaporation de l'eau du sol par l'effet du couvert végétal est en moyenne de 10,2 mm par tonne de biomasse produite (Figure 10-16.c). Cet effet de réduction de l'évaporation d'eau du sol est ainsi conséquent, puisqu'il est du même ordre de grandeur que l'effet net sur l'ETR des cultures intermédiaires.

Un autre résultat marquant est que l'intensité de ces interactions simulées s'est avérée variable, notamment entre sites climatiques. Aussi avons-nous choisi d'illustrer cette variabilité de réponse pour deux sites contrastés en termes de pluviométrie et d'ETP (évapotranspiration potentielle du site climatique) durant l'interculture.

La variabilité du différentiel de drainage s'explique à 96% par les variations du différentiel d'évapotranspiration (ETR) qui correspond à la somme de transpiration d'eau de la CI et de la différence d'évaporation de l'eau du sol sous CI par rapport au sol nu :

$$\text{Delta de drainage} = -99\% * (\text{Delta d'évaporation du sol} + \text{Transpiration de la CI}) \quad (R^2 = 0.96)$$

OU

$$\text{Delta de drainage} = -91\% * \text{Delta d'évaporation du sol} - 82\% * \text{Transpiration de la CI} \quad (R^2 = 0.97)$$

Les relations obtenues entre différentiel de drainage et les composantes du bilan hydrique montrent clairement que les CI modifient les flux d'eau plutôt que le stock du sol, puisque la réduction de drainage est très fortement corrélée à l'augmentation de l'évapotranspiration. En fait, les CI transpirent deux fois plus d'eau qu'elles ne limitent l'évaporation du sol par leur effet de couvert, résultant donc en une augmentation de l'évapotranspiration, ce qui entraîne une réduction du drainage dans les mêmes proportions.

10.5.1.2. Analyse pour deux sites climatiques ayant des réponses contrastées

Les résultats présentés ci-dessous ont été déclinés pour chaque site climatique, dont deux ont été choisis pour illustrer la gamme de réponses des composantes du bilan hydrique, selon la même représentation que pour l'analyse sur l'ensemble des simulations en interculture longue (cf. 10.4.5.1). Les deux sites sont le site 4 (région toulousaine) et le site 11 (Bretagne Ouest), car la pluviométrie et l'ETP sont assez contrastées en période d'interculture.

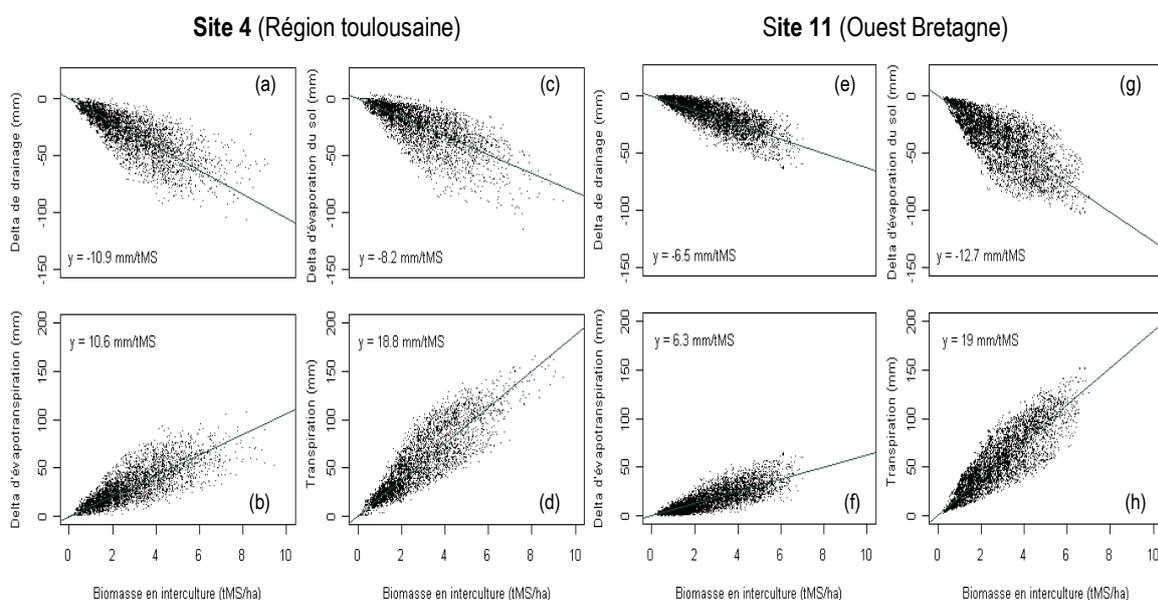


Figure 10-17. Relations entre, d'une part, la biomasse produite par la culture intermédiaire et, d'autre part, le différentiel de drainage (a, e), d'ETR (b, f), d'évaporation du sol (c, g) et la transpiration du couvert (d, h), en considérant les 3 espèces de cultures intermédiaires et les 3 états initiaux d'azote minéral du sol pour les sites climatiques 4 et 11. (droite de régression en vert).

Les résultats marquants sont les suivants (Figure 10-17) :

- L'effet moyen sur le différentiel de drainage par tonne de biomasse produite est nettement plus faible pour le site 11, plus pluvieux (-6,5 mm par tonne de biomasse) que pour le site 4, plus sec (-10,9 mm par tonne de biomasse) ;
- Comme déjà montré pour l'ensemble des sites, le différentiel d'ETR explique le différentiel de drainage, et donc la réduction du drainage est plus faible pour le site 11, plus pluvieux et moins chaud (-6,3 mm par tonne de biomasse) que pour le site 4, plus sec (-10,6 mm par tonne de biomasse) ;
- Le ratio de transpiration est par contre quasi-identique entre les deux sites, de l'ordre de 19 mm par tonne de biomasse, indiquant une alimentation hydrique globale peu différente ;
- La réduction de l'évaporation d'eau du sol est nettement plus élevée dans le site 4 (-8,2 mm par tonne de biomasse) que pour le site 11 (-12,7 mm par tonne de biomasse) où la pluviométrie est plus régulière et donc le sol plus souvent ré-humecté, ce qui favorise l'évaporation de l'eau (moins de résistance à l'évaporation).

Le différentiel de drainage par tonne de biomasse produite par la culture intermédiaire est donc différent entre les deux sites, de même que la variabilité interannuelle pédoclimatique pour une espèce et un état initial donnés (Figure 10-18).

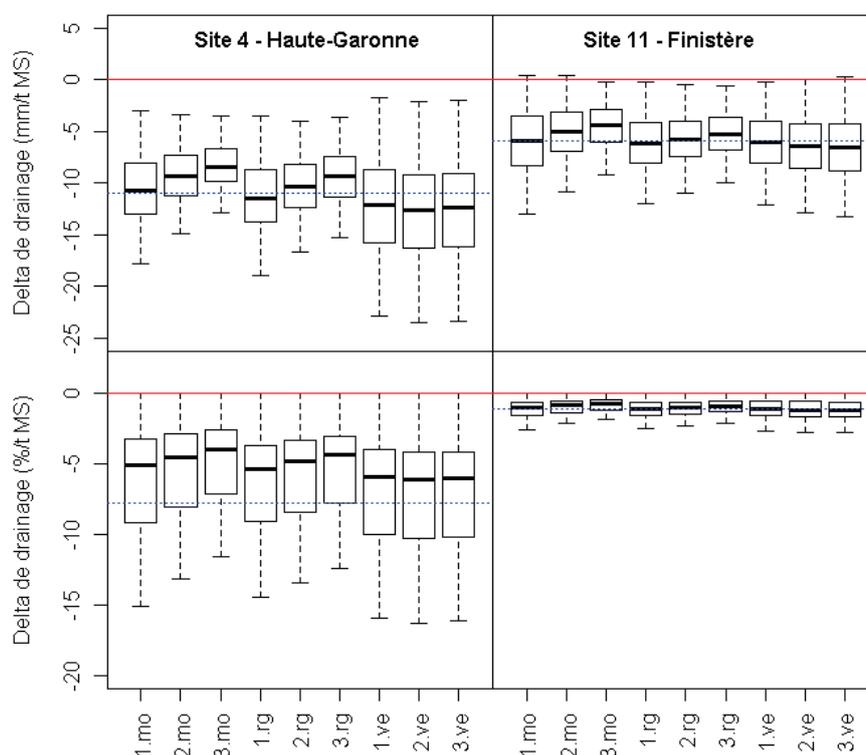


Figure 10-18. Différentiel (ou delta) de drainage par tonne de biomasse produite calculé pour chacune des 3 espèces de culture intermédiaire (mo = moutarde, rg = ray-grass, ve = vesce) et par niveau d'état initial d'azote minéral du sol (1, 2, 3) pour le **site 4** (Région toulousaine), et le **site 11** (Bretagne Ouest) (trait bleu = moyenne du site).

Le différentiel de drainage est plus variable en fonction de l'état initial et de l'espèce de culture intermédiaire dans le cas du site 4, et est d'un niveau médian plus élevé que pour le site 11 ; ce ratio est en médiane compris entre -9 et -13 pour le site 4, contre -5 à -7 mm/tonne de biomasse pour le site 11. La réduction du drainage par unité de biomasse est donc près de 2 fois plus élevée sur le site de Haute-Garonne que sur le site breton. En termes de proportion par rapport au volume d'eau drainée sous sol nu, cette différence est accrue avec, en médiane, une réduction de 5% par tonne de biomasse produite pour le site 4 alors qu'elle n'est que de 1% pour le site 11. Le différentiel de drainage médian ne dépend pas de l'état initial d'azote minéral pour la vesce, contrairement aux deux espèces non légumineuses, qui consomment proportionnellement moins d'eau par tonne de biomasse en situation de meilleure nutrition azotée (état initial 3) qu'en situation plus déficiente en azote (état initial 1).

Toutefois, la réduction de drainage peut s'avérer légèrement plus élevée par unité de surface de sol en situation de meilleure nutrition azotée (état initial 3) car la biomasse produite est significativement plus élevée, mais cette différence reste faible.

10.5.2. Comparaison globale du drainage annuel en sol nu et sous culture intermédiaire

Le drainage sous culture intermédiaire est en moyenne réduit de 20 mm (avec moutarde) à 26 mm (avec ray-grass) par rapport au sol nu lorsque toutes les situations sont comparées (Figure 10-19.a,b,c). Toutefois, certaines dates de levée ayant induit une faible production de biomasse, il est intéressant de comparer le drainage entre le sol nu et les cultures intermédiaires qui ont une croissance et une acquisition de l'azote parmi les plus élevées, correspondant pour cette illustration à une levée des cultures intermédiaires au 10 août et une destruction au 10 décembre. Pour ces dernières situations, la réduction du drainage est légèrement supérieure, allant de 27 à 35 mm (Figure 10-19.d,e,f). L'effet sur la réduction du drainage est donc logiquement plus élevé quand les cultures intermédiaires se sont bien développées.

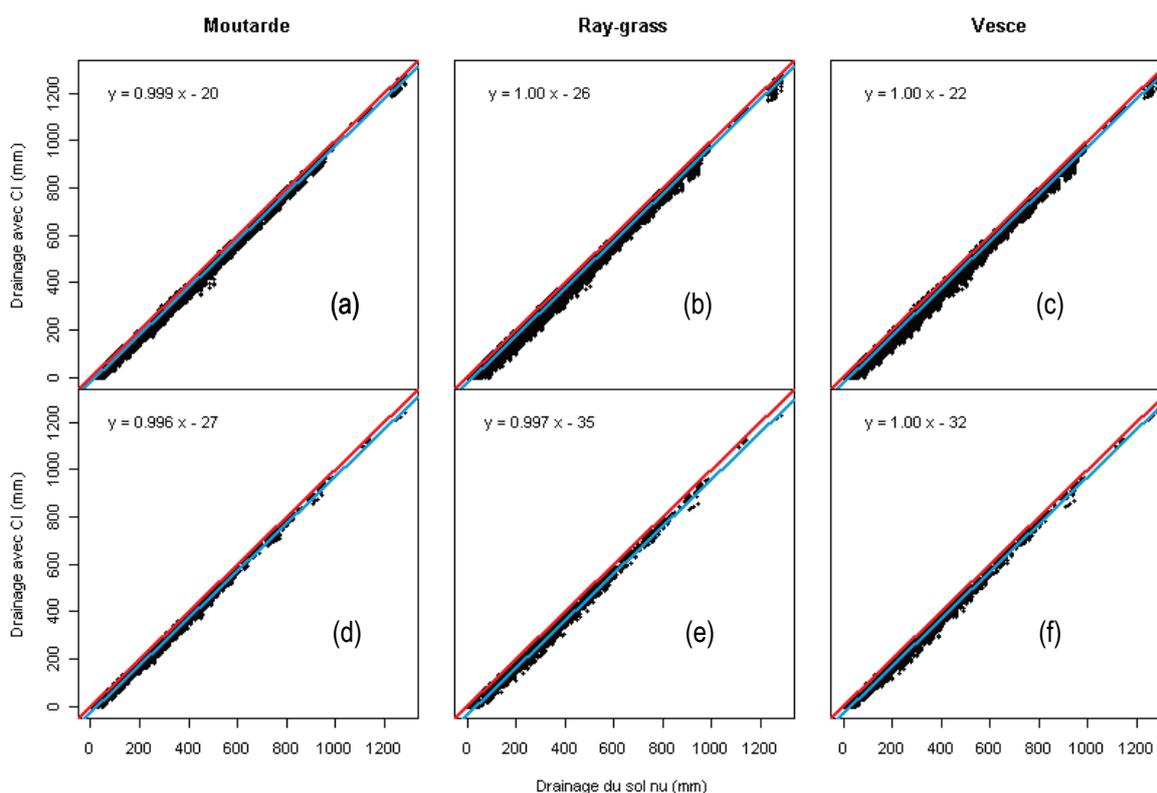


Figure 10-19. Relation entre drainage avec et sans culture intermédiaire pour les 3 espèces, avec toutes leurs dates de levée-destruction pour toutes les successions (en haut), et après blé, avec une levée des CI au 10 août et une destruction au 10 décembre (en bas). La bissectrice est en rouge et la droite de régression en bleu.

Globalement, l'effet des cultures intermédiaires n'est pas proportionnel au niveau du drainage en sol nu puisque la relation entre les deux situations ne diffère que par l'ordonnée à l'origine, alors que la pente est égale à 1 pour les 3 espèces. La différence de drainage entre culture intermédiaire et sol nu s'explique principalement par la transpiration supplémentaire liée à la production de biomasse du couvert combinée à l'effet de réduction de l'évaporation du sol. Ainsi, le ray-grass a un impact légèrement supérieur à la vesce et à la moutarde (comparaison des ordonnées à l'origine dans les régressions linéaires de la Figure 10-19).

10.5.3. Effet des couverts en fonction du type d'interculture et de l'état initial sur le différentiel de drainage

L'analyse de la différence de drainage entre culture intermédiaire et sol nu calculée par simulation a été réalisée en séparant les 3 types d'interculture et les 3 états initiaux d'azote minéral du sol afin d'illustrer les résultats (Figure 10-20).

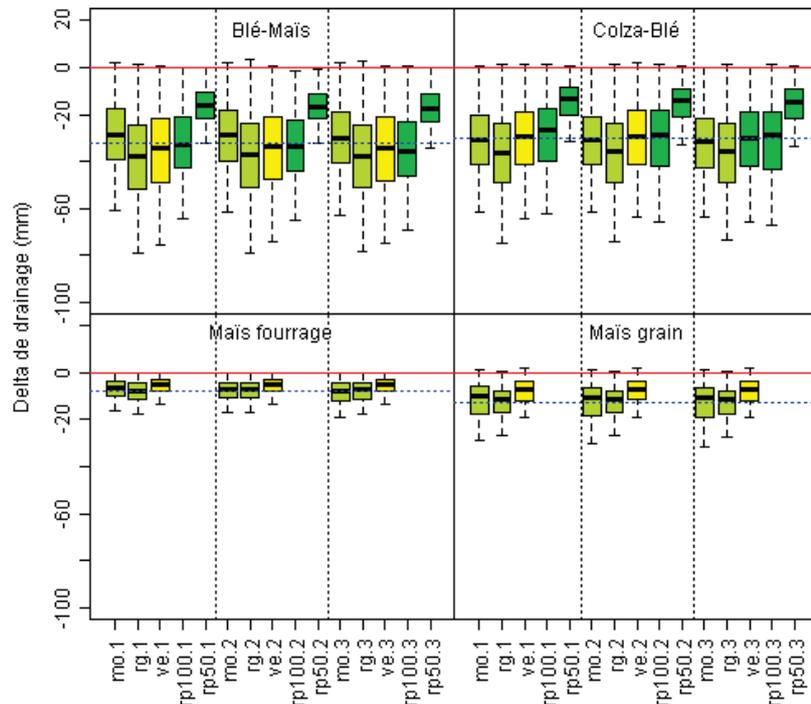


Figure 10-20. Différentiel (ou delta) de drainage entre culture intermédiaire et sol nu en fonction des différents modes de couverts (moutarde "mo" et ray-grass "rg" en vert clair, vesce "ve" en jaune, repousses à 100% de taux de couverture "rp100" et à 50% "rp50" en vert foncé) et de l'état initial en azote minéral du sol (1, 2, 3) et de la succession de culture (trait bleu = moyenne par succession).

Les résultats marquants sont les suivants :

- L'implantation d'une culture intermédiaire ou des repousses réduisent le drainage dans la très grande majorité des cas de récolte précoce du précédent, aussi bien en situation d'interculture courte (type colza-blé) qu'en interculture longue (blé-maïs). Ainsi, la réduction médiane du drainage est de l'ordre de 30 mm pour ces deux types d'interculture. *A contrario*, la réduction médiane du drainage est très faible après maïs (interculture longue, récolte tardive) avec une médiane inférieure à 10 mm et une distribution de différentiel de drainage peu variable entre 0 et 20 mm, car les cultures intermédiaires se sont peu développées ;
- La réduction du drainage est très variable quel que soit le type d'interculture (courte et longue) puisqu'elle s'étage de 0 à 80 mm pour 95% des cas, et est comprise entre 20 et 50 mm pour la moitié centrale de la distribution des résultats des simulations ;
- La réduction ne dépend pas, ou très peu, de la quantité d'azote minéral initial, bien que le niveau de biomasse soit accru quand l'état initial est plus élevé ;
- Les différences médianes entre espèces sont relativement faibles, bien que la moutarde réduise légèrement moins le drainage. Les repousses 100%TC réduisent autant le drainage que les espèces de culture intermédiaire. Par contre, si les repousses sont moins bien réparties spatialement (repousses 50%TC), la réduction du drainage est environ deux fois plus faible. Ainsi, pour un niveau d'efficacité sur la réduction de la lixiviation d'azote nitrique similaire à celui de la vesce, les repousses 50%TC ont un impact moins fort sur la réduction du drainage que la vesce.

10.5.4. Effet des couverts sur le différentiel de drainage en fonction du site climatique

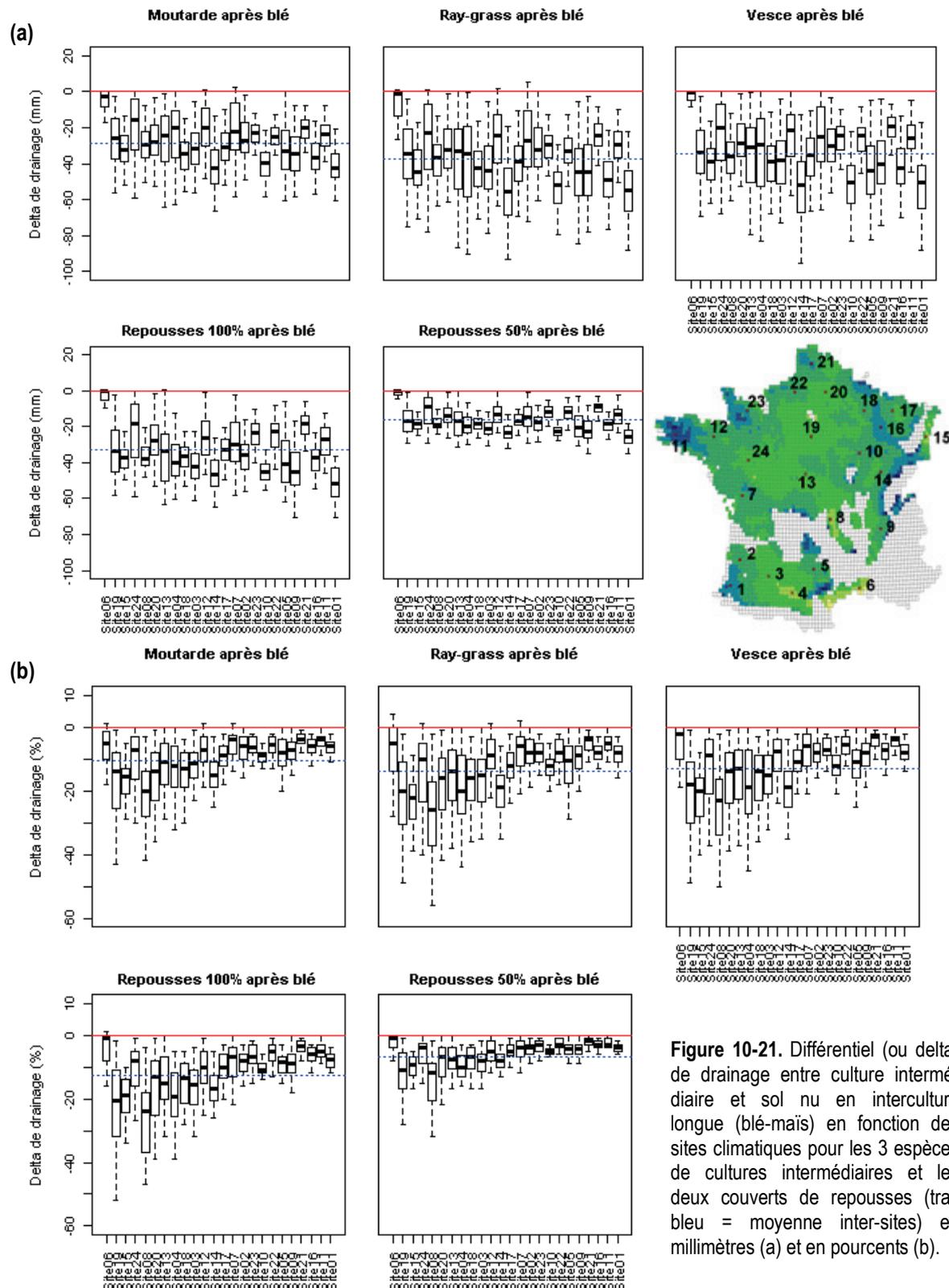


Figure 10-21. Différentiel (ou delta) de drainage entre culture intermédiaire et sol nu en interculture longue (blé-maïs) en fonction des sites climatiques pour les 3 espèces de cultures intermédiaires et les deux couverts de repousses (trait bleu = moyenne inter-sites) en millimètres (a) et en pourcents (b).

La variabilité des différentiels de drainage a été analysée selon le site climatique. Nous avons choisi de présenter les résultats concernant l'interculture longue pour mieux illustrer la variabilité inter-sites sans confusion d'effet

(Figure 10-21) et d'illustrer l'effet des CI et des repousses sur la réduction du drainage, d'une part, en quantité (mm) et, d'autre part, en proportion (%) du drainage sous sol nu. La médiane des valeurs de différentiels de drainage pour les 3 espèces de culture intermédiaire et les repousses de blé 100%TC varie de -20 à -45 mm selon le site, sauf pour le site 6 où elle est quasi-nulle car la croissance des couverts a été faible en médiane. La variabilité du différentiel de drainage est également forte pour chacun des sites, puisqu'elle s'étage de 0 à -70 mm pour la moutarde et les repousses de blé. Cette variabilité est accrue jusqu'à -95 mm pour le ray-grass et la vesce, car les dates de destruction vont jusqu'au 10/03. Le différentiel de drainage ainsi que la variabilité liée au climat et au sol (indiquée par la distribution de la boîte à moustaches pour chaque site) sont globalement deux fois plus faibles pour les repousses 50%TC, en cohérence avec la biomasse produite (Figure 10-9). Si en termes de quantité d'eau drainée en moins, aucun impact majeur de la pluviosité du site n'apparaît, c'est le contraire quand l'étude est réalisée en termes de proportions. En effet, la réduction de drainage est proportionnellement plus élevée pour les sites peu pluvieux, *a fortiori* s'ils se situent dans le sud de la France. Ainsi, l'impact sera très différent d'une région à l'autre avec des réductifs de près de 20% du drainage en médiane dans certains cas, contre des réductions de quelques pourcents dans d'autres.

Ces résultats indiquent que l'effet des cultures intermédiaires sur le niveau du drainage, et donc potentiellement sur la recharge des nappes, sera très variable en fonction des pédoclimats et des pluviométries annuelles.

10.5.5. Effet des dates de levée et de destruction des cultures intermédiaires sur le différentiel de drainage

10.5.5.1. Effet global pour tous les sites

L'analyse du différentiel de drainage a été réalisée par dates de levée et de destruction afin de tester l'hypothèse d'un effet de la durée de croissance de la CI sur la réduction du drainage. Les résultats ont d'abord été analysés en prenant en compte l'ensemble des situations pédoclimatiques et les 3 états initiaux d'azote minéral dans le cas de l'interculture longue (blé-maïs), où la gamme de dates de levée et de destruction testée a été la plus large (Figure 10-22).

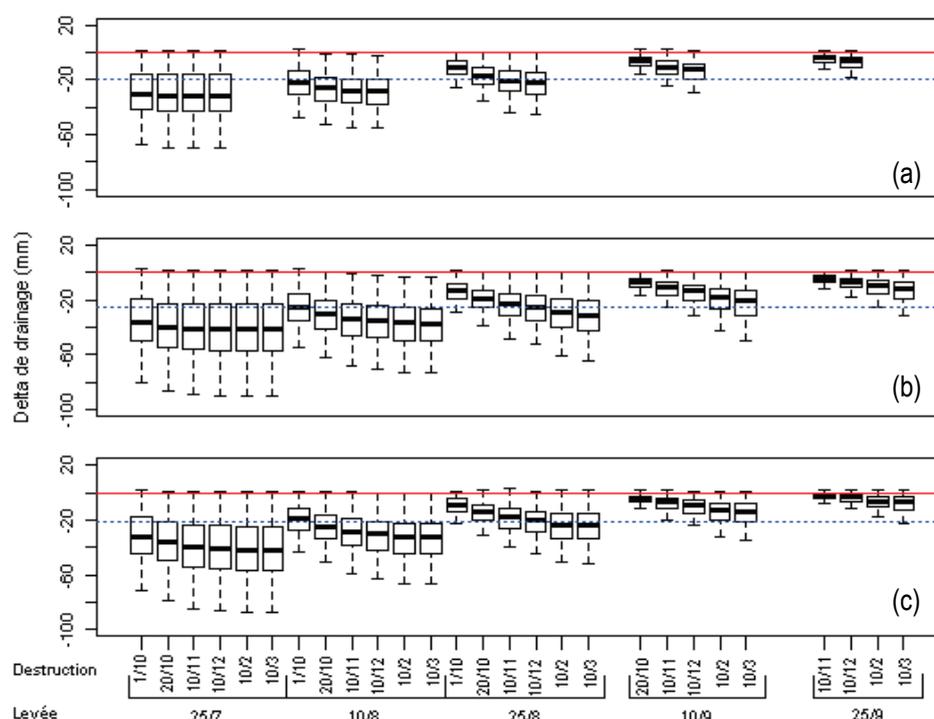


Figure 10-22. Différentiel (ou delta) de drainage entre culture intermédiaire et sol nu en fonction des dates de levée et de destruction de la moutarde (a), du ray-grass (b) et de la vesce (c), tous pédoclimats et états initiaux analysés. (trait bleu = moyenne toutes dates confondues).

L'analyse, tous sites confondus, indique les résultats marquants suivants :

- Plus la levée d'une culture intermédiaire est précoce, plus la réduction du drainage est importante, et ce quelle que soit l'espèce (effet évident de la forte demande évapotranspirante pendant la période estivale comparée à un sol nu). L'effet est relativement fort, puisqu'en médiane, la réduction du drainage va atteindre environ 50 mm pour les deux dates précoces de levée (25/09 et 10/8). La variabilité associée à cet effet sur le différentiel de drainage est toutefois très importante, suggérant une forte variabilité entre sites climatiques. Cette réduction est très faible pour la date de levée la plus tardive (25/09), avec moins de 10 mm et une plus faible variabilité d'effet, en lien avec les faibles biomasses produites à cette date de levée pour la plupart des sites ;
- L'effet de la date de destruction est également significatif, mais moins fort que celui de la date de levée. Pour une même date de levée, la réduction médiane du drainage va être supérieure de 10 à 20 mm entre la date de destruction la plus précoce et la plus tardive. C'est pour les deux dates de levée intermédiaires (25/08 et 10/09) que l'effet de la date de destruction est le plus important, car l'installation de la culture intermédiaire est moins rapide et impacte donc moins rapidement le bilan hydrique. La croissance en hiver n'étant pas nulle, la culture intermédiaire induit une réduction du drainage ;
- L'effet de la date de levée sur la réduction du drainage semble plus fort pour la vesce que pour le ray-grass, et est encore moindre pour la moutarde.

10.5.5.2. Effet pour différents sites ayant une réponse contrastée à la date de levée

L'analyse par site climatique indique clairement une discrimination des réponses entre les sites les moins pluvieux et les très pluvieux, en interaction avec la température moyenne en interculture. Nous avons choisi d'illustrer la variabilité du différentiel de drainage en fonction des dates de levée et de destruction d'une espèce de CI, en l'occurrence du ray-grass, pour 6 sites donnant des résultats contrastés (Figure 10-23) ; il s'agit des sites : 1 (Sud-Ouest, pluvieux), 4 (Sud-Ouest, sec), 6 (Sud-Est, sec), 11 (Nord-Ouest, très pluvieux), 16 (Nord-Est, pluvieux) et 19 (Nord, peu pluvieux).

Les résultats marquants sont les suivants :

- Dans le cas des sites les plus pluvieux (sites 1, 11 et 16), le différentiel de drainage est d'autant plus élevé que la date de levée est précoce. La culture intermédiaire induit une réduction du différentiel de drainage très bien corrélée avec la date de levée, classant systématiquement les dates par ordre décroissant d'impact sur la réduction du drainage, du à la culture intermédiaire. Par ailleurs, l'effet de la date de destruction sur la réduction du drainage est d'autant plus marqué que la date de levée est tardive. De plus, la distribution des différentiels de drainage est d'autant plus large (taille de la boîte à moustaches illustrant la variabilité des résultats de simulation) que le site est sous une latitude septentrionale ; cela s'explique par une faible variabilité climatique interannuelle dans les sites du Nord. Finalement, l'effet d'une CI de ray-grass sur le différentiel de drainage varie fortement entre dates de levée en valeur médiane, mais le type de réponse est similaire pour ces trois sites ;
- Concernant les sites les moins pluvieux (sites 4, 6 et 19), le différentiel de drainage est très variable (très large distribution des résultats sur les boîtes à moustaches), avec un effet contrasté des dates de levée. Cette forte variance de réponse s'explique par la variabilité interannuelle des pluviométries sur ces sites, en particulier le site 6, induisant en conséquence une forte variabilité interannuelle de la croissance des CI, en l'occurrence du ray-grass ;
- Dans le cas des sites 1, 4 et 19, la date la plus précoce de levée est celle pour laquelle la variabilité de réponse est la plus forte, et également celle pour laquelle les effets maximums sur le drainage sont observés ; ceci est dû à la survenue de forts stress hydriques, certaines années ;
- Dans le cas spécifique du site 6, plus la date de levée est tardive et plus le différentiel de drainage s'accroît, car le ray-grass a une très faible croissance lorsqu'il est semé tôt parce que soit le couvert ne pousse pas, soit le très fort stress hydrique initial a un effet délétère sur la croissance ultérieure de la CI. Ainsi, le différentiel de drainage est surtout impacté par le ray-grass pour les dates tardives de levée, avec un effet qui s'accroît de façon importante pour des dates de destruction tardives. On retrouve aussi un effet important de la date de destruction sur le site 4 pour les 3 dates de levée les plus tardives. Ce dernier effet (date de destruction) est dû à une croissance hivernale du couvert notable sous ces 2 climats.

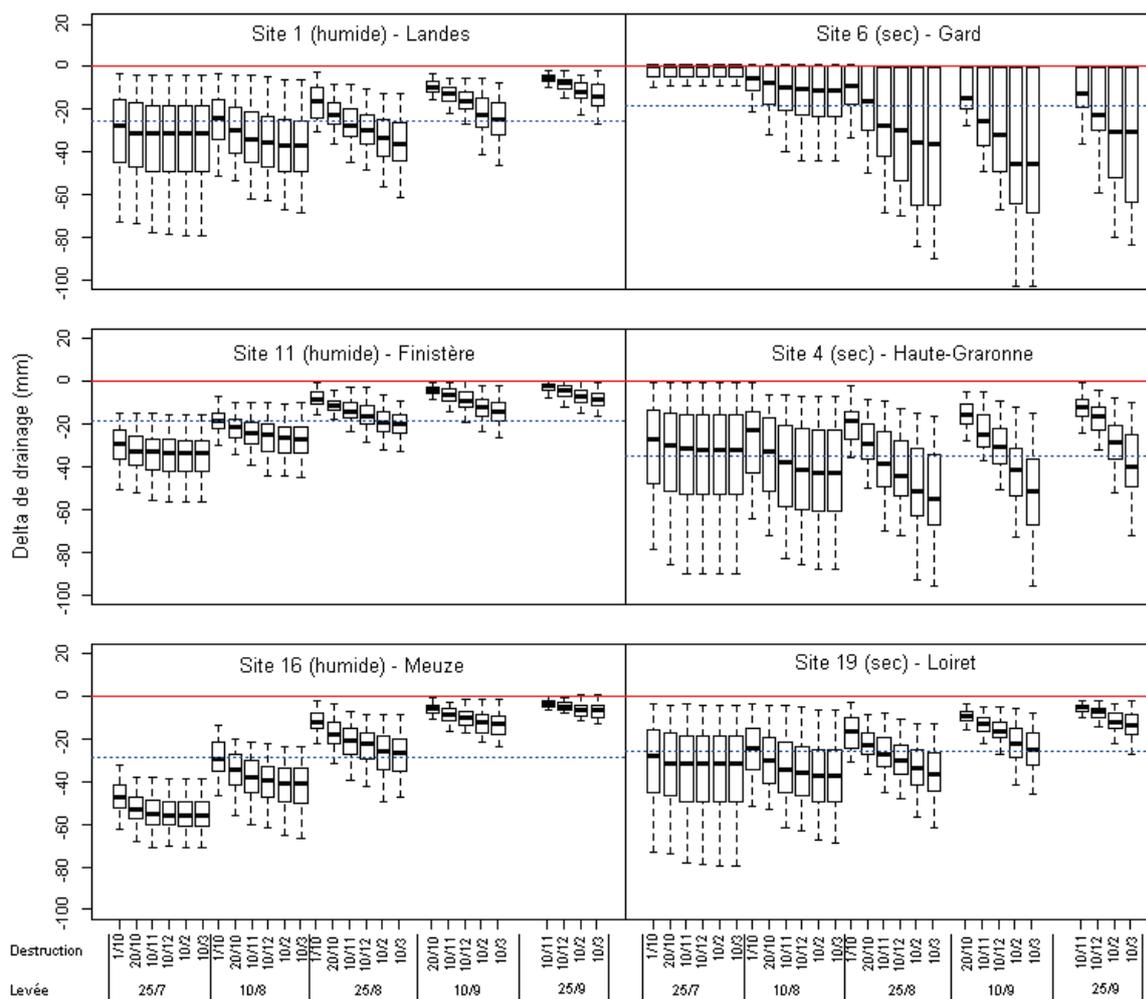


Figure 10-23. Différentiel (ou delta) de drainage entre culture intermédiaire et sol nu en fonction des dates de levée et de destruction du ray-grass, pour 6 sites climatiques contrastés (trait bleu = moyenne toutes dates confondues).

En conclusion, l'effet d'une culture intermédiaire, illustrée ici pour le ray-grass, sur le différentiel de drainage dépend fortement du site climatique, en interaction étroite avec les dates de levée. Ainsi, les effets moyens ou médians calculés pour l'ensemble des simulations doivent être utilisés à titre d'ordre de grandeur de l'effet des dates de levée et de destruction, mais ne peuvent représenter les effets pour des sites pédoclimatiques spécifiques.

10.5.5.3 .Probabilité de réduire significativement le drainage

La probabilité est abordée en termes de fréquence d'occurrence, sur les 20 ans (correspondant à des répétitions climatiques indépendantes), d'un événement. La fréquence analysée dans ce paragraphe est celle de réduire significativement le drainage. Deux valeurs seuils de réduction ont été choisies : réduction de plus de 10%, et de plus de 25% par rapport à la condition sans CI. Au dessus du seuil de 10%, tous les cas présentant un effet significatif sont identifiés, tandis qu'au dessus du seuil de 25%, seuls les effets les plus importants sont identifiés.

La Figure 10-24 indique que la fréquence de réduction du drainage de plus de 10% avec l'implantation de CI est forte pour les dates de semis précoces. Cette fréquence est légèrement plus élevée pour le ray-grass que pour la moutarde et la vesce, et plus élevée pour les sites peu pluvieux.

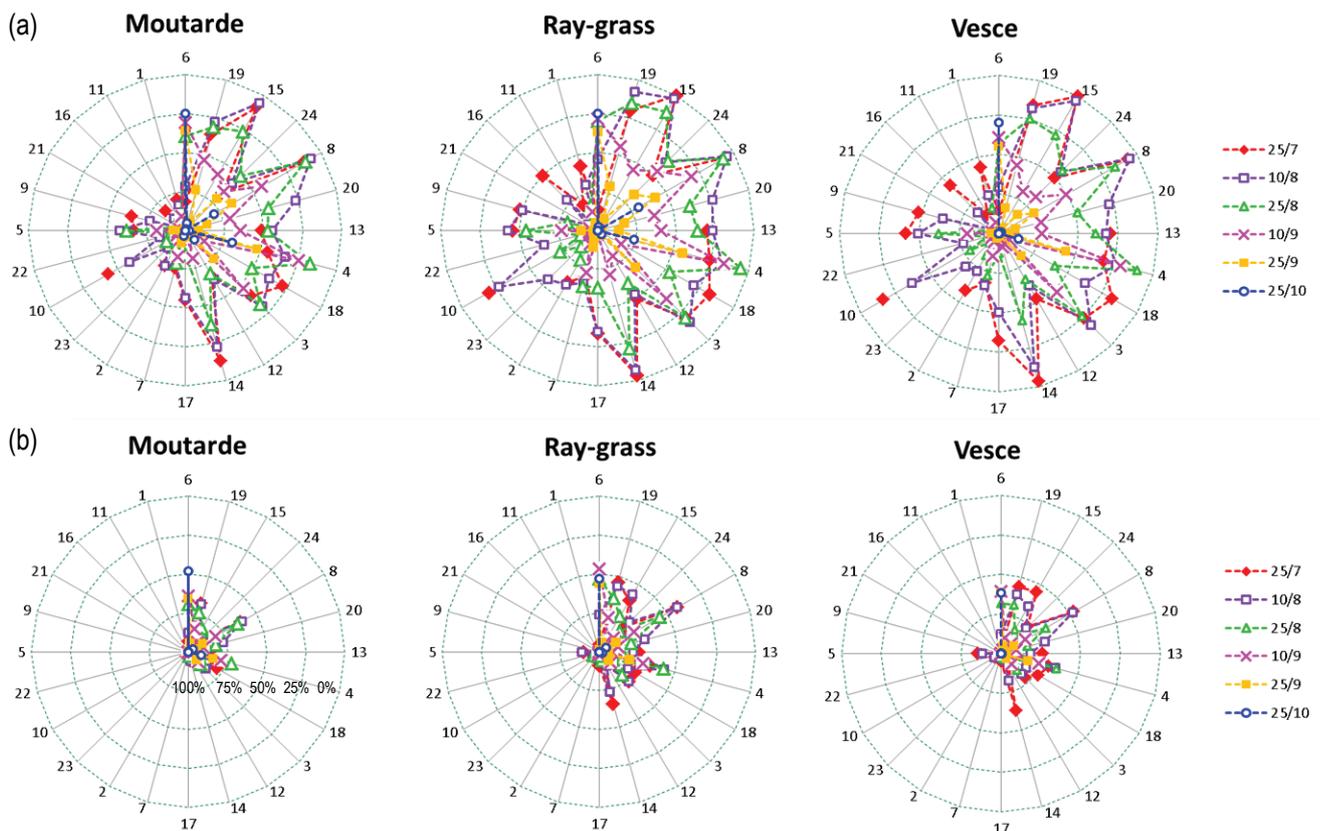


Figure 10-24. Fréquence sur 20 ans d'avoir une CI qui induit une diminution du drainage de moins de 10% (a) et de moins de 25% (b) par rapport au sol nu, en la détruisant au plus tôt le 10/12, par site (1 à 24, en rayons) et date de levée (25/7 au 25/10) pour la moutarde, le ray-grass et la vesce.
(centre du cercle = 100% et chaque cercle = 25% de fréquence en moins jusqu'à 0% pour le cercle extérieur).

La fréquence d'une réduction supérieure à 25% de drainage par rapport au sol nu est élevée, notamment pour les sites les moins pluvieux. Cela pourrait s'avérer être un problème pour la recharge des eaux souterraines dans des régions où les surfaces agricoles sont importantes et les CI généralisées. Ce résultat indique également la nécessité de réaliser des études hydrogéologiques spécifiques pour analyser l'impact de la réduction du drainage par les CI à l'échelle du bassin versant ou de la nappe alluviale. En conséquence, il est pertinent d'effectuer un compromis de "double efficacité", entre le niveau de réduction de la concentration nitrique visé et le niveau de consommation d'eau des CI acceptable : dans ce contexte, la gestion des CI pourra être optimisée en termes d'espèce, de dates de semis et de destruction, en fonction de la sensibilité du milieu à la lixiviation et de l'état initial d'azote minéral du sol à la récolte du précédent cultural.

10.5.6. Comparaison globale du niveau de la réserve hydrique en sortie d'hiver et au semis de la culture de printemps suivante

La variation du stock d'eau du sol est quasi nulle entre les situations en sol nu et en cultures intermédiaires à la date du 25 avril en situation d'interculture longue. Toutefois, plus la date de destruction de la culture intermédiaire est tardive, plus il est possible d'avoir quelques situations où le stock d'eau du sol est plus faible après culture intermédiaire (Figure 10-25).

Bien que la différence moyenne soit seulement de 2,3 mm de moins (ordonnée à l'origine) après culture intermédiaire, le stock d'eau du sol peut être réduit de plusieurs dizaines de mm dans certaines situations (Figure 10-26), notamment pour le site climatique 6 (climat méditerranéen) et lorsque la date de destruction est tardive (février et mars en particulier).

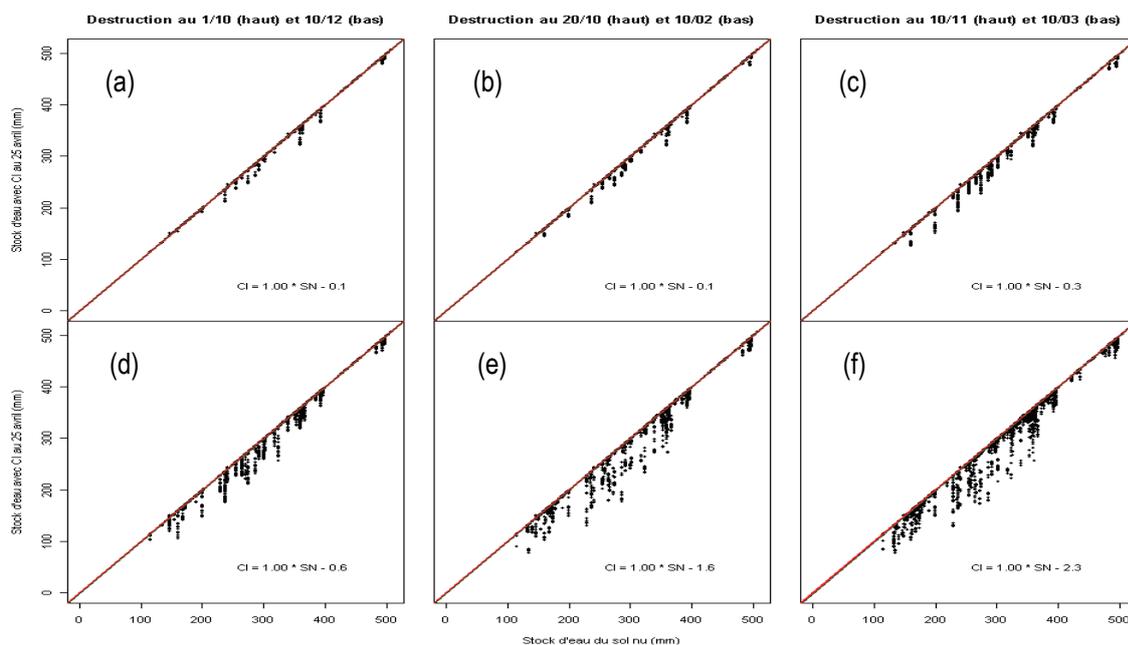


Figure 10-25. Comparaison du stock d'eau dans le sol au 25/04 entre sol nu et culture intermédiaire pour 6 dates de destruction correspondant au (a) 01/10, (b) 20/10, (c) 10/11, (d) 10/12, (e) 10/02 et (f) 10/03. (bissectrice en rouge et droite de régression en bleu, confondue ici avec la bissectrice).

Pour la très grande majorité des cas (> 95%, expliquant une pente de 1 dans la régression linéaire), le stock d'eau du sol est identique au moment du semis du maïs entre la culture intermédiaire et le sol nu (Figure 10-25). La médiane de cette différence de stock d'eau est généralement nulle, aussi bien en date de destruction du 10 février que du 25 avril. Toutefois, on observe d'autant plus de situations où le stock d'eau du sol est plus faible avec culture intermédiaire que le site est peu pluvieux et que la date considérée est précoce, par exemple le 10 février. Cela indique qu'en climat hivernal peu pluvieux, si la date de destruction est tardive, il existe un risque que la réserve en eau du sol ne se soit pas autant reconstituée après culture intermédiaire qu'en sol nu.

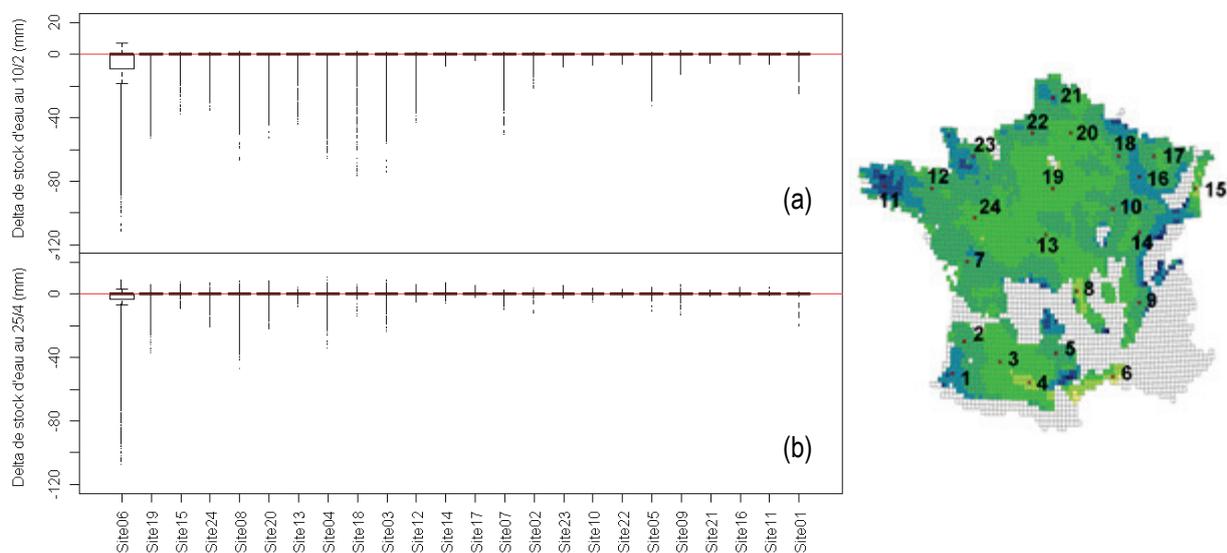


Figure 10-26. Différentiel (ou delta) de stock d'eau dans le sol au 10/02 (a, haut) et au 25/04 (b, bas) en fonction du site climatique.

Ces cas extrêmes sont plus importants sur les sites du Sud, avec des stocks d'eau du sol au 25 avril parfois beaucoup plus faibles (et avec un nombre significatif de cas jusqu'à -20 mm sur le site 6). La pluviométrie de mars et avril permet toutefois de combler une grande partie de ce déficit de stock d'eau dans le sol, puisque le

nombre de cas où le différentiel de stock d'eau est négatif après culture intermédiaire est nettement plus faible, et en particulier pour le site 6. Ce résultat indique que pour éviter d'avoir un effet de la culture intermédiaire sur le stock d'eau du sol, il faut la détruire avant l'hiver dans le cas de climats peu pluvieux au printemps.

Ces résultats sur les stocks d'eau dans le sol au 25 avril sont en accord avec la forte corrélation observée entre le différentiel d'ETR et le différentiel de drainage (section 10.5.1), indiquant que ce sont, à l'échelle de la période d'interculture, essentiellement les flux d'eau qui sont modifiés, alors que le stock d'eau du sol en sortie d'hiver n'est que peu ou pas réduit.

10.6. Efficacité des modes de gestion de l'interculture pour réduire la lixiviation et la concentration en nitrate de l'eau de drainage

Les simulations de lixiviation d'azote et de concentration nitrique des eaux de drainage, en dessous du profil de sol, ont été analysées à la date du 25 avril, pour l'ensemble des sites climatiques. Cette date peut être assimilée à la fin de la période de drainage pour une grande majorité des sites, bien qu'il soit possible d'avoir quelques épisodes drainants sous culture de printemps ou d'été en cas de forte pluviométrie au printemps, dans certains sites très pluvieux. Nous avons vérifié qu'à cette date du 25/04 les différences de lixiviation d'azote entre la situation avec culture intermédiaire et la situation de référence avec sol nu en interculture et la concentration nitrique moyenne des eaux de drainage ne sont que peu ou pas modifiées par rapport à une évaluation faite strictement au bout d'un an de simulation. Cette date permet également d'analyser le stock d'azote minéral du sol au semis de la culture de printemps suivante (maïs). Les stocks d'azote minéral du sol simulés après cette culture suivante ont été quantifiés à la date du 10 novembre afin d'évaluer si la minéralisation de l'azote des résidus de la CI peut augmenter les risques de lixiviation au cours de l'hiver suivant. Dans la suite du texte, les concentrations nitriques sont systématiquement exprimées en mg de NO_3^- par litre.

10.6.1. Efficacité des couverts de cultures intermédiaires et des repousses pour réduire la lixiviation et la concentration en nitrate de l'eau de drainage

10.6.1.1. Efficacité pour réduire la lixiviation d'azote

10.6.1.1.1. Efficacité globale des 3 espèces de CI par rapport au sol nu

La lixiviation d'azote sous culture intermédiaire est en moyenne réduite de 23% (avec la vesce) à 51% (avec la moutarde) par rapport au sol nu, lorsque toutes les situations sont considérées (Figure 10-27.a,b,c).

La variabilité des réponses est cependant très large, avec des cas où l'effet des CI est faible ou nul (points sur ou proches de la bissectrice) et des cas où la lixiviation sous CI est proche ou égale à 0, alors que la lixiviation en sol nu peut atteindre plus de 100 kgN/ha (points sur ou proches de l'axe des abscisses).

Il est également intéressant de constater que, pour des quantités d'azote lixivié très élevées en sol nu, la réduction par l'implantation d'une CI est limitée, comme si on atteignait une efficacité maximale des CI, qui semble tout de même être de l'ordre de 120-150 kgN/ha de réduction pour la moutarde et le ray-grass.

Certaines dates de levée ayant induit une faible production de biomasse, la réduction de la lixiviation simulée est faible, voire très faible à nulle, dans ces situations (date tardive de levée ou très précoce en climat peu pluvieux et "sec" en été). Lorsque les cultures intermédiaires se sont correctement développées et que l'absorption d'azote a été supérieure à 30 kgN/ha (dates de levée intermédiaires), la réduction de la lixiviation est systématiquement significative par rapport au sol nu, comme cela est illustré pour les cultures intermédiaires avec une levée au 10 août et une destruction au 10 décembre (Figure 10-27.d,e,f). Pour ces situations, la réduction de la lixiviation est bien plus importante. Pour la moutarde et le ray-grass, les réductions sont en moyenne de 73 et 70% respectivement, et les cas où l'effet est nul sont extrêmement rares. Par contre, l'efficacité de réduction est bien plus faible pour la vesce (34%). L'effet sur la réduction de la lixiviation est donc logiquement plus élevé quand les cultures intermédiaires se sont bien développées, en particulier s'il ne s'agit pas de légumineuses.

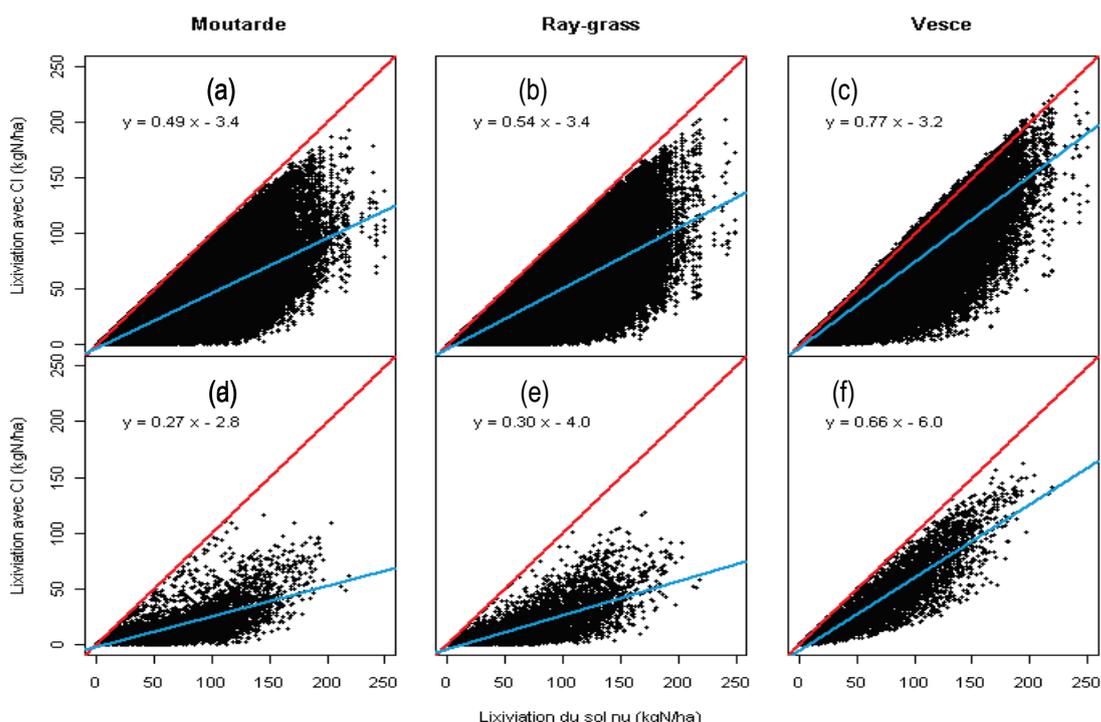


Figure 10-27. Relation entre drainage avec et sans culture intermédiaire pour les 3 espèces avec toutes leurs dates de levée – destruction pour toutes les successions (a, b, c), et après blé, avec une levée des CI au 10 août et une destruction au 10 décembre (d, e, f). La droite rouge représente la bissectrice et la bleue, la droite de régression.

10.6.1.1.2. Hiérarchie des facteurs expliquant la variabilité de la lixiviation et sa réduction en interculture

L'analyse de variance réalisée permet de mettre en évidence la hiérarchie des facteurs et leur niveau d'explication de la variabilité de la lixiviation d'azote en sol nu et avec CI et de sa réduction par rapport à la situation de référence en sol nu pendant l'interculture (Figure 10-28).

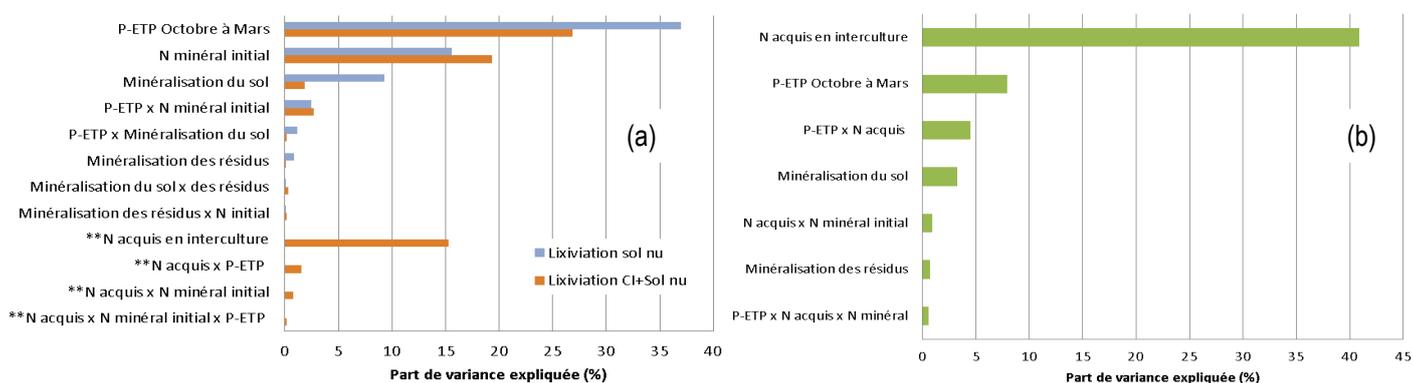


Figure 10-28. Part de variance expliquée par différents facteurs pour les variables : (a) lixiviation d'azote nitrique et (b) différence de lixiviation induite par rapport à la situation de référence en sol nu.

** : variable absente dans l'analyse de la lixiviation en sol nu (sans occurrence)

Pour la lixiviation d'azote en sol nu, le facteur prédominant est lié au climat : c'est la somme de (P-ETP) sur la période d'octobre à mars qui, comme nous l'avons vu précédemment, est un facteur déterminant du drainage, dont dépend la lixiviation. Le facteur suivant qui conditionne la lixiviation d'azote est lié au système de culture : il s'agit de la quantité d'azote minéral laissée à la récolte de la culture précédente, qui dépend notamment de la gestion de la fertilisation azotée. Enfin, le troisième facteur qui détermine la lixiviation en sol nu est la minéralisation hivernale de l'azote du sol.

Dans le cas de gestion de l'interculture avec des CI ou des repousses, les déterminants de la lixiviation restent la différence entre les termes P et ETP et l'azote minéral initial dans le sol, mais le troisième facteur qui entre en jeu est la quantité d'azote acquis en interculture ; il s'agit donc de savoir si des repousses ou des CI se sont développées pendant l'interculture et dans quelles mesures. Enfin, on constate que la minéralisation de l'azote du sol n'est pas un facteur déterminant pour la lixiviation quand des couverts végétaux sont utilisés en interculture, illustrant la capacité de ces couverts intermédiaires à piéger l'azote minéral issu de la minéralisation automnale.

Dans le cas de la réduction de lixiviation, ou différence de lixiviation avec et sans CI ou repousses pendant l'interculture, le facteur le plus influent est l'azote acquis en interculture, *via* les repousses ou cultures intermédiaires. Ainsi, plus la quantité d'azote piégée est grande, plus la réduction de lixiviation est élevée. On retrouve ensuite un facteur climatique (P-ETP) et la combinaison de celui-ci avec le premier. La capacité des couverts intermédiaires à piéger l'azote du sol réduit l'influence de la quantité d'azote minéral initiale sur la lixiviation, l'accumulation d'azote dans la CI étant fortement liée à la disponibilité en azote du sol.

10.6.1.1.3. Efficacité des CI et des repousses en fonction de l'état initial de l'azote minéral du sol pour les 3 successions

L'analyse de la différence de lixiviation entre culture intermédiaire et sol nu, calculée par situation identique simulée pour les deux traitements, a été réalisée en séparant les 3 types d'interculture et les 3 états initiaux d'azote minéral *du sol* pour éviter des confusions d'effets. Les résultats marquants sont les suivants (Figure 10-29) :

- L'implantation d'une culture intermédiaire ou les repousses réduisent la lixiviation dans la très grande majorité des cas, aussi bien en situation d'interculture courte (type colza-blé) qu'en interculture longue (blé-mais), d'environ 50 kgN/ha en moyenne, mais avec une forte variabilité (0 à 150 kgN/ha) ;
- *A contrario*, la réduction de la lixiviation est faible mais non négligeable (surtout pour la moutarde) après maïs fourrage (-18 kgN/ha), et quasi-nulle après maïs grain (-3 kgN/ha), du fait du faible développement des CI pour ces dates de levée tardives ;
- La réduction de la lixiviation dépend de l'espèce utilisée et de son taux de couverture du sol, avec des réductions les plus importantes, et du même ordre, pour la moutarde, le ray-grass et les repousses à 100% de couverture du sol, alors que la vesce et les repousses à 50% de couverture sont bien moins efficaces. De plus, la vesce entraîne parfois des effets négatifs (augmentation de la lixiviation) dans le cas de l'interculture colza-blé, probablement liés à une destruction trop précoce et une minéralisation de l'azote de la vesce, en partie issu de la fixation symbiotique ;
- La réduction de la lixiviation dépend aussi fortement de la quantité d'azote minéral initial, avec une réduction d'autant plus forte que l'azote du sol est disponible en quantité, excepté pour la vesce pour laquelle cet effet est faible. Ces résultats sont cohérents avec la réponse en terme d'acquisition d'azote par ces cultures de couverture. La hausse de la réduction médiane avec l'état initial s'accompagne d'une plus grande variabilité de réponse.

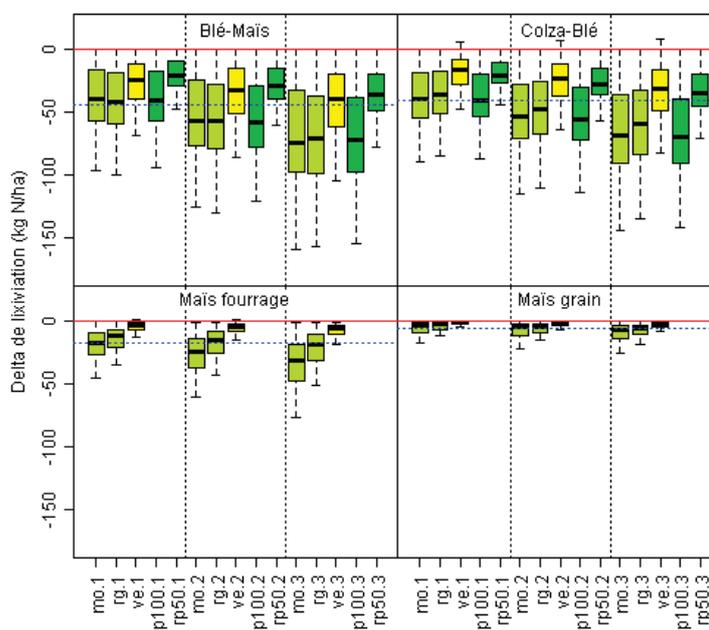


Figure 10-29. Différentiel (ou delta) de lixiviation d'azote nitrique entre culture intermédiaire et sol nu (delta) en fonction des différents modes de couverts (moutarde "mo" et ray-grass "rg" en vert clair, vesce "ve" en jaune, repousses à 100% de taux de couverture "rp100" et à 50% "rp50" en vert foncé) et de l'état initial en azote minéral du sol (1, 2, 3) et de la succession de culture. (trait bleu = moyenne par succession).

10.6.1.1.4. Efficacité des cultures intermédiaires selon leurs dates de levée et de destruction

L'analyse du différentiel de lixiviation d'azote nitrique entre culture intermédiaire et sol nu a été réalisée par dates de levée et de destruction afin de tester l'hypothèse d'un effet de la durée de croissance de la culture intermédiaire sur la réduction de la lixiviation d'azote. Les résultats ont d'abord été analysés en prenant en compte l'ensemble des situations pédoclimatiques et les 3 états initiaux d'azote minéral dans le cas de l'interculture longue (blé-maïs) où la gamme de dates de levée et de destruction testées a été la plus large (Figure 10-30).

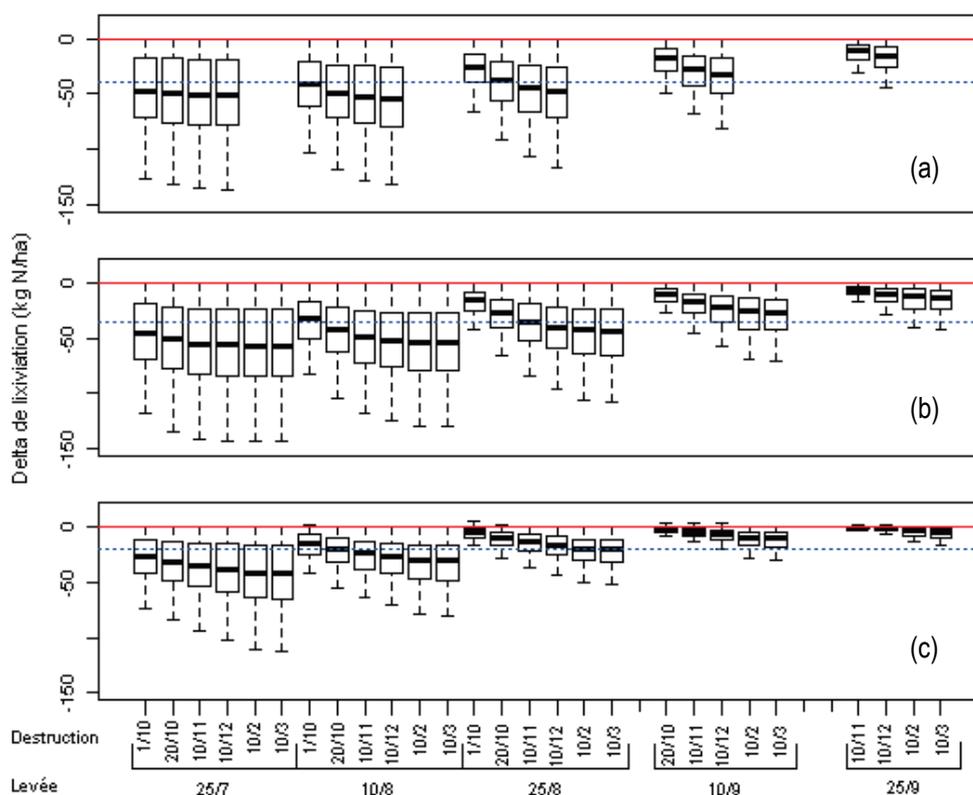


Figure 10-30. Différentiel (ou delta) de lixiviation d'azote nitrique entre culture intermédiaire et sol nu en fonction des dates de levée et de destruction des cultures intermédiaires : pour (a) la moutarde, (b) le ray-grass et (c) la vesce. (trait bleu = moyenne toutes dates confondues)

L'analyse, tous sites confondus, indique les résultats marquants suivants :

- Plus la levée d'une culture intermédiaire est précoce, plus la réduction de la lixiviation est importante, avec une efficacité de réduction à peu près équivalente pour les 2 premières dates de levée, dans le cas de la moutarde et du ray-grass. L'effet est relativement fort, puisqu'en médiane, la réduction est d'un peu plus de 50 kgN/ha pour ces deux dates précoces de levée (25/07 et 10/8). La variabilité associée à cet effet est très importante, probablement du fait, d'une part de la grande variabilité interannuelle et inter-sites du drainage, et d'autre part de l'effet des 3 états initiaux contrastés en terme d'azote minéral dans le sol. La date de levée la plus tardive présente une réduction beaucoup plus faible, en particulier dans le cas de la vesce, plus sensible au froid ;
- L'effet de la date de destruction, bien que moins fort que celui de la date de levée, est aussi significatif. C'est pour les deux dates de levée intermédiaires (25/08 et 10/09) que l'effet de la date de destruction est le plus important, car l'installation de la culture intermédiaire est moins rapide et les quantités d'azote prélevées sont plus faibles.

La grande variabilité de réponse aux dates de levée et de destruction suggèrent, comme pour l'acquisition d'azote par les CI, des effets "site" importants, avec potentiellement des réponses différentes et des dates optimales d'efficacité variées. Il est donc utile d'examiner ces mêmes graphiques par site.

10.6.1.1.5. Efficacité du ray-grass selon les dates de levée et de destruction pour 6 sites ayant des réponses contrastées

L'étude de l'impact des dates de levée et de destruction site par site montre des réponses contrastées, comme illustré dans le cas du ray-grass. Ces effets s'expliquent majoritairement par les caractéristiques climatiques de ces sites. L'étude de 6 sites contrastés permet de mieux voir ces réponses spécifiques (Figure 10-31).

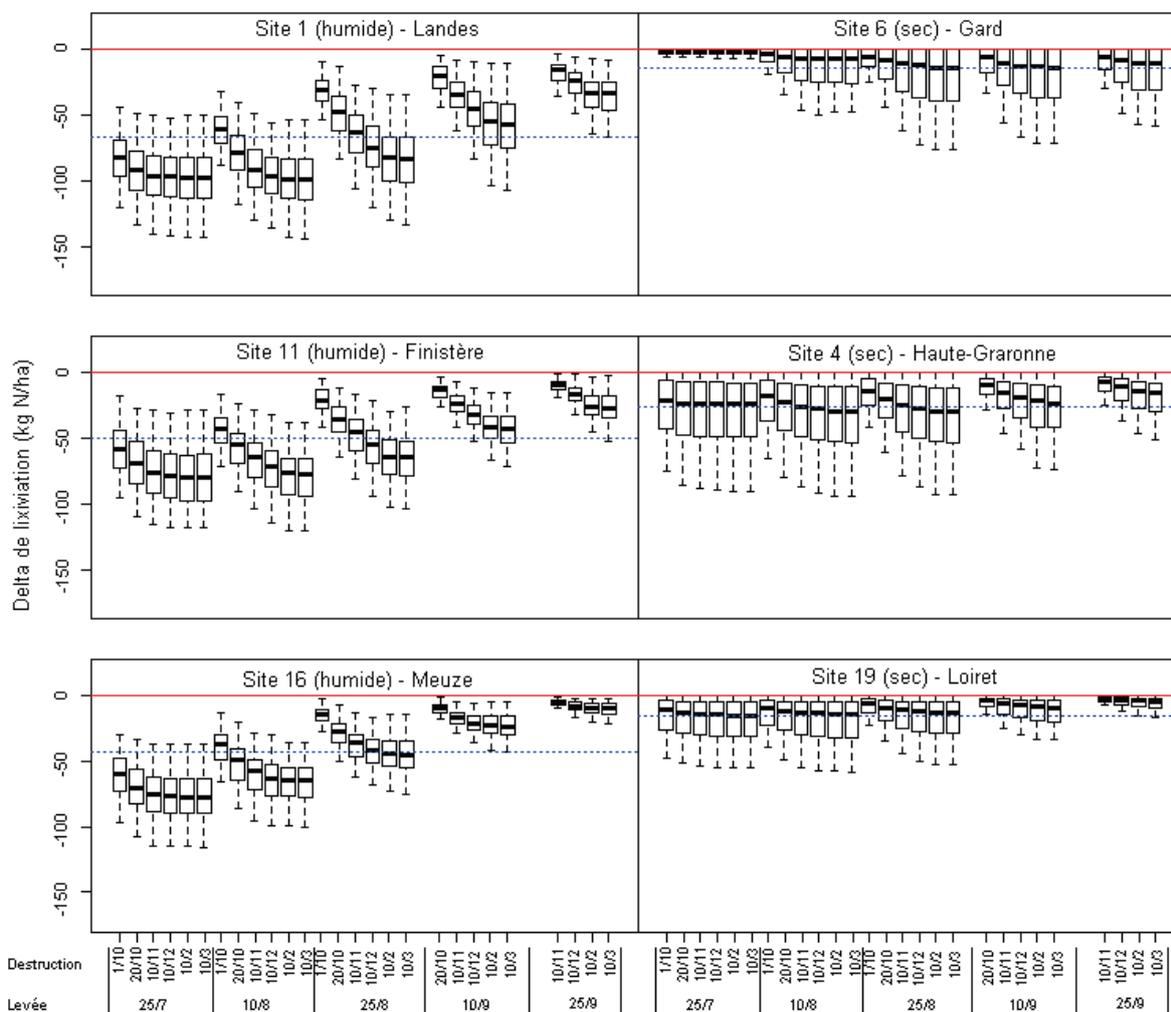


Figure 10-31. Différentiel (ou delta) de lixiviation d'azote nitrique entre culture intermédiaire et sol nu en fonction des dates de levée et de destruction du ray-grass dans le cas de 6 sites contrastés.

(trait bleu = moyenne toutes dates confondues)

Ainsi, l'analyse montre principalement plusieurs points importants :

- Plus le site est pluvieux (1, 11, 16), plus l'effet de la date de levée est marqué et plus le semis précoce est efficace pour réduire la quantité d'azote lixivié. L'effet de la date de destruction est également plus prononcé pour les sites humides, probablement en lien, comme pour les dates de semis, avec les fortes quantités d'eau drainées et donc d'azote lixivié initialement en sol nu. L'effet est d'autant plus fort que le site est chaud (1) car la CI se développe mieux et piège plus d'azote, comme indiqué dans la section 10.2.5.2 ;
- Dans le cas de sites très secs (6, 4, 19), un semis plus tardif, fin août ou début septembre, semble préférable, avec une date d'autant plus tardive que le site est chaud (6). Cependant, pour ces sites secs, l'effet de la date de semis est moins important que pour les sites humides, excepté pour le site 6 où les CI subissent de forts stress hydriques en été et ne poussent pas en cas de semis précoce ;

- Pour les sites situés au Nord de la France, avec des températures froides (19,16), le semis tardif est très peu efficace car la CI ne se développe pas suffisamment, contrairement à des sites plus chauds (1) où l'effet d'un semis tardif n'est pas négligeable.

Pour les sites humides, l'implantation d'une CI s'avère toujours utile, à condition qu'elle se développe correctement, car il y a toujours du drainage pendant l'automne et l'hiver, tandis que pour les sites plus secs, les CI sont parfois inutiles car il n'y a pas de drainage tous les ans. Cependant, les résultats médians de réduction montrent que même si elles ne sont pas toujours utiles, sur 20 années climatiques, leur effet est positif.

10.6.1.1.6. Efficacité des CI selon la réserve utile en eau du sol pour les 3 successions

L'efficacité des cultures intermédiaires et des repousses pour réduire la lixiviation d'azote dépend en partie des caractéristiques hydriques du sol, en particulier de la réserve utile en eau (RU). Trois catégories de RU ont été déterminées afin d'analyser son effet pour 4 sites climatiquement contrastés (Figure 10-32). Ces sites ont été sélectionnés pour leurs caractéristiques climatiques mais aussi parce qu'ils présentaient des sols appartenant à chacune de 3 classes de RU retenues : inférieure à 100 mm, comprise entre 100 et 175 mm et supérieure à 175 mm.

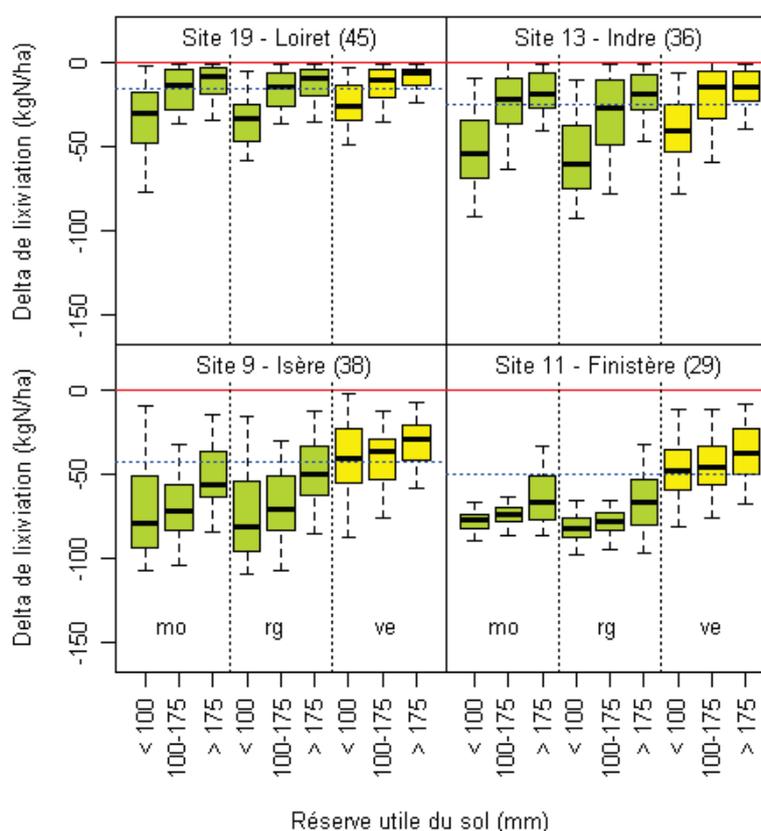


Figure 10-32. Différentiel (ou delta) de lixiviation d'azote nitrique entre culture intermédiaire et sol nu en fonction des différents types de couverts (moutarde "mo" et ray-grass "rg" en vert clair, vesce "ve" en jaune) dans la succession blé-mais selon la réserve utile en eau du sol (RU) et le site.
(trait bleu = moyenne du site).

Un premier constat est que, quelles que soient les caractéristiques du site, le différentiel de lixiviation entre culture intermédiaire et sol nu est plus faible quand le sol considéré a une plus grande réserve utile en eau. Dans un second temps, il apparaît que plus le site est sec (site 13 et 19), plus cet effet de la RU du sol est visible, bien qu'il ne soit pas négligeable dans le cas de sites pluvieux (9 et 11). Cet effet de la RU du sol sur la réduction de la lixiviation s'explique par le fait que les niveaux de lixiviation de ces sols ne sont pas les mêmes, pour un même site climatique (Figure 10-33). Ainsi, la lixiviation d'azote est plus intense pour des sols à faibles réserves utiles en eau, tandis qu'elle est plus faible pour des sols profonds avec des réserves utiles conséquentes, malgré le fait que les quantités initiales d'azote soient plus faibles dans le cas des sols peu profonds.

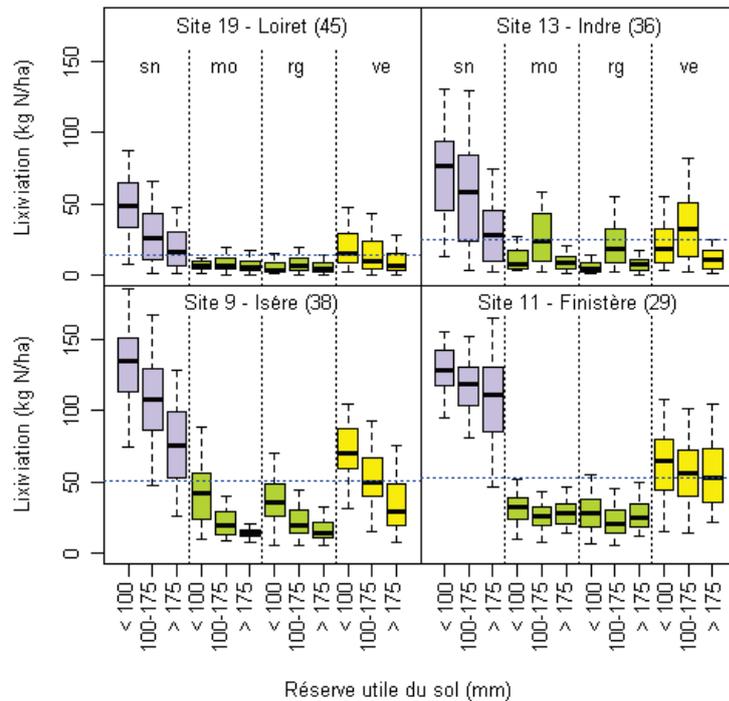


Figure 10-33. Lixiviation d'azote nitrique en sol nu ("sn" en violet) ou avec les différents types de couverts (moutarde "mo" et ray-grass "rg" en vert clair, vesce "ve" en jaune) dans la succession blé-maïs, selon la réserve utile en eau du sol (RU) et le site.
(trait bleu = moyenne du site)

L'impact des cultures intermédiaires et des repousses est donc dépendant des caractéristiques de sol, mais elles s'avèrent efficaces dans tous les cas pour réduire la lixiviation d'azote, même si, dans les cas de sols à RU élevée et de climats secs, leur efficacité est limitée, du fait de la faible lixiviation dans la situation de référence, en sol nu pendant l'interculture.

10.6.1.2. Efficacité pour réduire la concentration en nitrate de l'eau de drainage

10.6.1.2.1. Effet du type de couvert en fonction de l'état initial d'azote minéral pour les 3 successions

La concentration nitrique dans les eaux de drainage a été analysée en séparant les 3 types d'interculture et les 3 états initiaux d'azote minéral du sol (Figure 10-34). La figure présente la concentration nitrique (à gauche) pour chaque type de gestion de l'interculture, mais aussi le taux d'abattement de la concentration par rapport à la situation de référence en sol nu (à droite). Les principaux résultats sont les suivants :

- Dans le cas des successions blé-maïs et colza-blé, l'implantation d'une culture intermédiaire ou des repousses réduit significativement la concentration, avec une efficacité forte de la moutarde, du ray-grass et des repousses 100%, avec des taux d'abattement de plus de 50 à 85% en médiane. La vesce et les repousses 50% ont des efficacités plus faibles, avec des taux d'abattement de 30 à 55% et une forte variabilité de réponse pour la vesce ;
- Dans le cas de la succession maïs-maïs, la concentration nitrique est réduite le plus efficacement par la moutarde (-35%), puis par le ray-grass (-25%) et enfin par la vesce qui a un effet très faible (-8%). Cet effet de réduction est non négligeable en maïs fourrage, surtout avec la moutarde, mais est très faible en maïs grain (abattement < 10% en médiane) pour la moutarde et le ray-gras et quasi nul pour la vesce ;
- La concentration nitrique et le taux d'abattement par rapport au sol nu dépendent fortement de la quantité d'azote minéral initial, ceci pour chaque type de gestion. Les taux d'abattement diminuent quand la quantité d'azote initial augmente. C'est d'autant plus vrai que la durée de l'interculture est courte, limitant la durée de croissance de la CI, ce qui indique que la plante n'a pas été en mesure d'exprimer le potentiel de ses capacités d'absorption d'azote pour piéger les ions nitrate sur tout le profil de sol, et notamment en profondeur ;
- Il est possible d'atteindre des concentrations nitriques inférieures à 50 mg/l, dans les deux successions blé-maïs et colza-blé, dans la majorité des cas, à condition que le reliquat d'azote minéral à la récolte ne soit pas trop élevé (60 kgN/ha ou moins, états initiaux 1 et 2). Sinon, les CI ne suffisent pas pour

rattraper des situations avec un profil d'azote minéral excédentaire (état initial 3). Ceci est encore plus vrai pour la monoculture de maïs, où les taux d'abattement avec CI sont faibles. Il est donc d'autant plus important en maïs fourrage, et *a fortiori* en maïs grain, de bien maîtriser la fertilisation azotée et la gestion de l'azote sur la rotation, afin que le reliquat d'azote minéral soit minimal à la récolte.

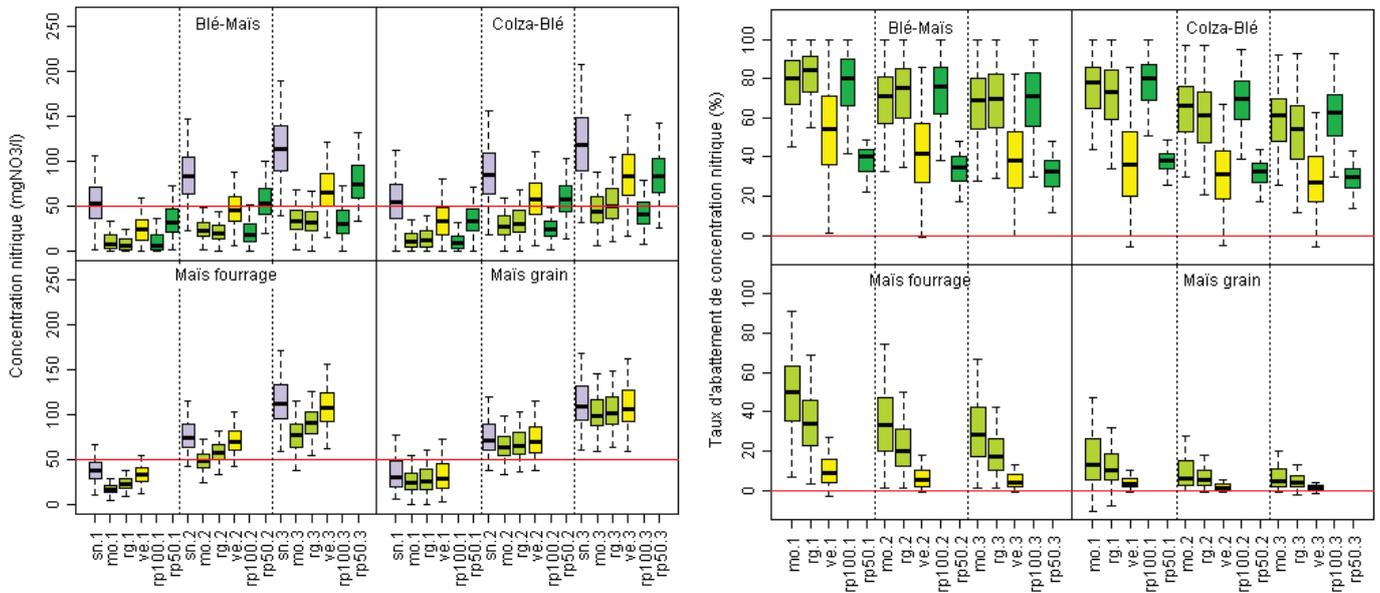


Figure 10-34. Concentration nitrique (à gauche) et taux d'abattement de la concentration (à droite) en fonction des différents modes de couverts (sol nu "sn" en violet, moutarde "mo" et ray-grass "rg" en vert clair, vesce "ve" en jaune, repousses à 100% de taux de couverture "rp100" et à 50% "rp50" en vert foncé) et de l'état initial en azote minéral du sol (1, 2, 3) et de la succession de culture.

10.6.1.2.2. Efficacité des cultures intermédiaires selon leurs dates de levée et de destruction

Les taux d'abattement médians de la concentration en nitrate sont élevés avec la moutarde et le ray-grass italien, indiquant une efficacité forte pour les 3 premières dates de levée, notamment avec des dates tardives de destruction (Figure 10-35).

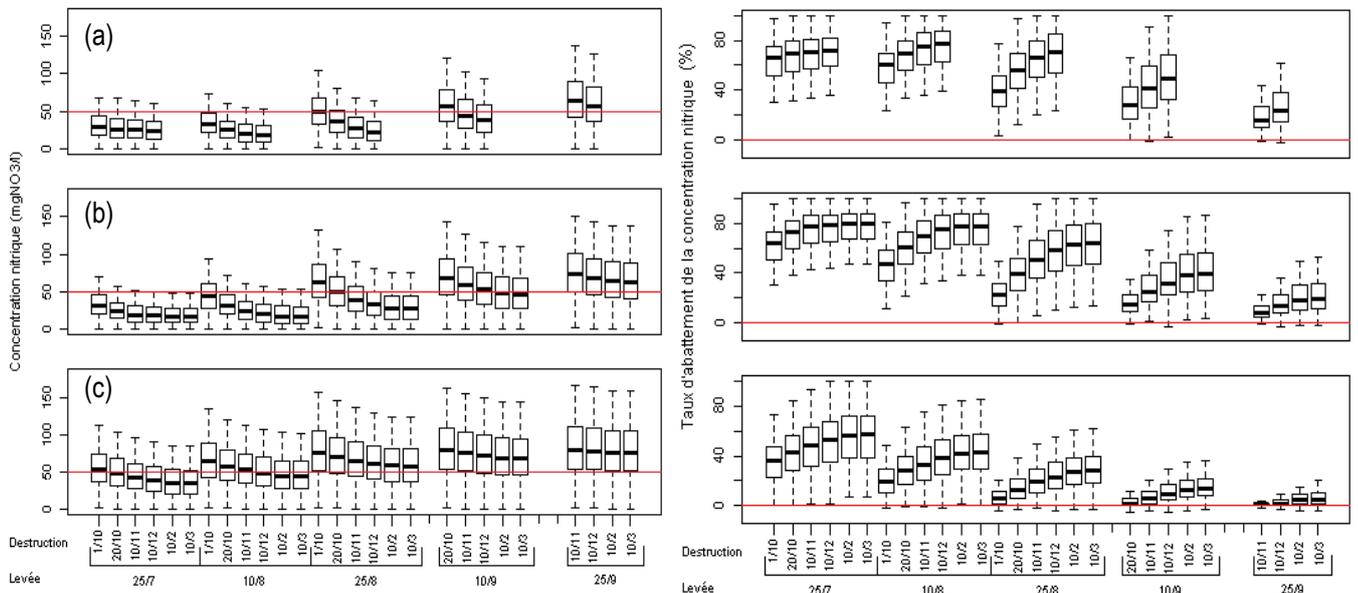


Figure 10-35. Concentration nitrique (à gauche) et taux d'abattement par rapport au sol nu de référence (à droite) en fonction des dates de levée et de destruction des cultures intermédiaires, pour (a) la moutarde, (b) le ray-grass et (c) la vesce.

Bien que le taux d'abattement diminue significativement avec les 2 dates de levée les plus tardives, en médiane ces taux sont non négligeables et indiquent que la moutarde et le RGI sont utiles pour réduire la concentration en nitrate de l'eau de drainage. Bien que non nuls, les taux d'abattement obtenus avec la vesce sont environ 2 à 3 fois plus faibles que pour les CI non légumineuses.

Ces taux d'abattement élevés aboutissent à des concentrations nitriques faibles, inférieures à 50 mg/l dans la grande majorité des cas, pour la moutarde et le ray-grass, aux 3 premières dates de levée. Elles sont égales ou supérieures à cette valeur pour les deux autres dates de levée plus tardives, moins efficaces pour réduire la concentration nitrique.

La concentration nitrique sous vesce est plus élevée, en lien avec des taux d'abattement plus faibles par rapport aux autres espèces de CI testées. Seule la première date de levée et les deux dates de destruction les plus tardives permettent de passer sous les 50 mgNO₃/l dans 50% des cas.

10.6.1.3. Arrière effet à court terme des cultures intermédiaires et des repousses sur le reliquat d'azote minéral au début de la période de drainage suivante

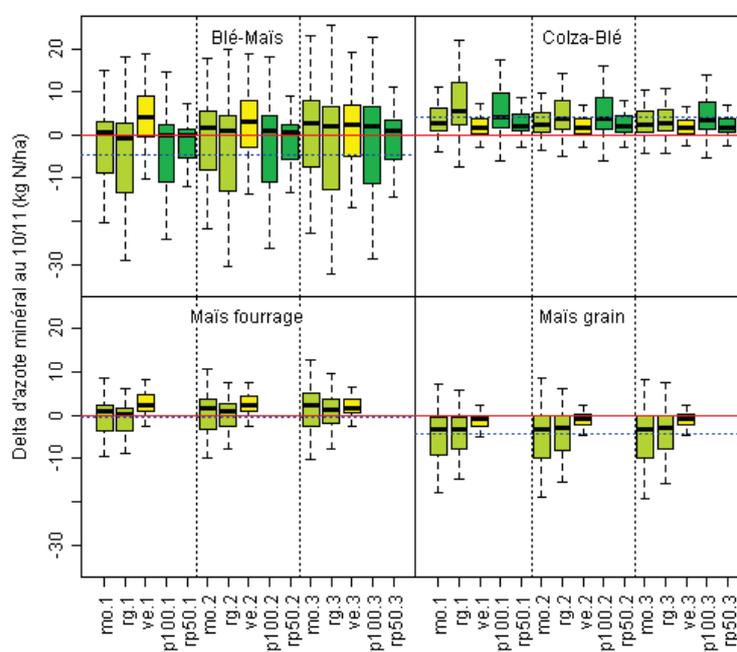
L'analyse du reliquat d'azote minéral du sol au 10 novembre de l'année suivante, qui indique le risque de lixiviation pour l'interculture suivante, permet de détecter d'éventuels problèmes liés aux CI ou aux repousses qui pourraient accroître le risque de lixiviation l'année suivante, en lien avec la minéralisation des résidus de cultures intermédiaires. Ainsi, ce reliquat indique le risque de perdre une partie du bénéfice obtenu par l'implantation de couverts végétaux une année dans le cas où aucune CI ne serait implantée l'année suivante.

La Figure 10-36 présente le différentiel de reliquat au 10 novembre après la culture suivante. Quand il est positif, cela signifie que le reliquat est plus fort après la situation avec CI ou repousses qu'après la situation de référence en sol nu pendant la précédente interculture, accroissant ainsi le risque d'avoir plus de lixiviation pendant l'interculture suivante si celle-ci reste en sol nu. Cette figure indique que le reliquat en entrée d'hiver est en moyenne plus faible pour les successions blé-maïs et maïs-maïs. Pour ces successions, la médiane est proche de zéro pour toutes les espèces sauf la vesce, qui présente un différentiel légèrement positif, ou dans le cas où l'état initial était excédentaire en azote (> 100 kgN/ha).

Dans le cas de la succession colza-blé, le reliquat est en moyenne et en médiane plus élevé, indiquant un risque de lixiviation légèrement accru. La différence de reliquat dépend également du site dans le cas des successions blé-maïs et maïs-maïs avec des reliquats en général plus faibles que quand l'interculture précédente était en sol nu pour les sites secs, et l'inverse pour les sites pluvieux.

Cependant, le risque d'une augmentation de la lixiviation semble faible avec des reliquats en entrée d'hiver supérieurs de quelques kilos d'azote seulement (> 10 kgN/ha en moyenne).

Figure 10-36. Différentiel (ou delta) d'azote minéral entre culture intermédiaire et sol nu dans le sol au 10 novembre après la culture suivante, après les différents modes de couverts (moutarde "mo" et ray-grass "rg" en vert clair, vesce "ve" en jaune, repousses à 100% de taux de couverture "rp100" et à 50% "rp50" en vert foncé) par état initial en azote minéral du sol (1, 2, 3) et succession de culture (trait bleu = moyenne par succession).



10.6.2. Efficacité comparée des 3 espèces de CI et des repousses en fonction du site climatique

10.6.2.1. Cas des intercultures blé-maïs et colza-blé

10.6.2.1.1. Efficacité des couverts en fonction du site climatique pour réduire la lixiviation

L'analyse des valeurs de différentiel de lixiviation avec couverts par rapport au sol nu selon le site climatique montre que plus le site est pluvieux, plus le différentiel de lixiviation est fort, quelle que soit l'espèce en couvert pendant l'interculture, et qu'il s'agisse d'une interculture longue de type blé-maïs ou d'une courte de type colza-blé (Figure 10-37). Cet effet, survenant dans des proportions similaires pour les deux types d'interculture, est dû au fait que le drainage est fortement corrélé à la pluviométrie du site climatique et que la lixiviation d'azote est également conditionnée par le drainage. Ainsi, plus la quantité d'azote lixivié dans la situation en sol nu est forte, plus l'effet d'une CI ou de repousses sera fort pour une même quantité d'azote piégé.

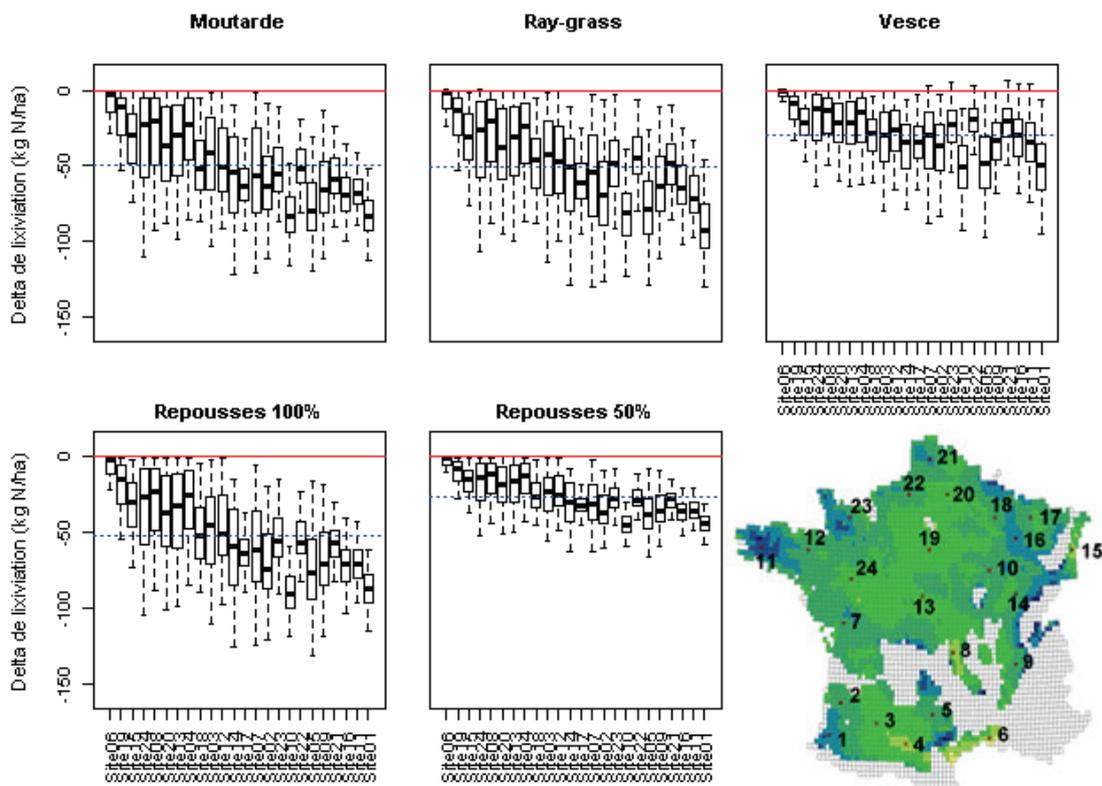


Figure 10-37. Différentiel (ou delta) de lixiviation d'azote nitrique entre culture intermédiaire et sol nu avec les cultures intermédiaires (moutarde, ray-grass, vesce) et les repousses (à 100% de taux de couverture et à 50%) par sites, dans les successions blé-maïs et colza-blé, pour un niveau d'azote minéral initial de 60 kg/ha (trait bleu = moyenne inter-sites).

Même sur le site le plus "sec" (6), pour lequel le différentiel médian de lixiviation est très faible, l'effet est toujours positif voire nul, dans un contexte d'interculture longue (en haut) ou courte (en bas), exception faite de la vesce dans l'interculture colza-blé. En effet, dans le cas où la vesce est détruite précocement, la minéralisation rapide de ses résidus riches en azote couplée à des drainages intenses entraîne une augmentation de la lixiviation par rapport au sol nu, dans des proportions qui restent cependant très faibles (< 5 kgN/ha).

Quel que soit le site considéré, la moutarde, le ray-grass et les repousses à 100% de couverture du sol sont le meilleur moyen de réduire la lixiviation d'azote, comparés au sol nu ou à l'implantation de la vesce ou à des repousses à 50% de taux de couverture. La réduction est d'autant plus importante que le niveau d'azote minéral initial est élevé ; toutefois l'effet est non négligeable pour des reliquats d'azote post-récolte faibles (≈ 20 kgN/ha).

10.6.2.1.2. Efficacité des couverts en fonction du site climatique pour réduire la concentration nitrique

Les taux d'abattement varient fortement entre années (cela se traduit par la largeur de la boîte à moustaches) et en fonction du site climatique, mais la médiane est en général comprise entre 50 et 90% pour la moutarde et le ray-grass (Figure 10-38). Par contre, la médiane du taux d'abattement est inférieure à 50% pour la vesce et à 40% pour les repousses hétérogènes. Le site 6 présente les taux d'abattement les plus faibles, d'un niveau deux à trois fois moindre, bien que significativement positifs, et donc indiquant une efficacité non nulle des CI, y compris dans des situations climatiques très sèches.

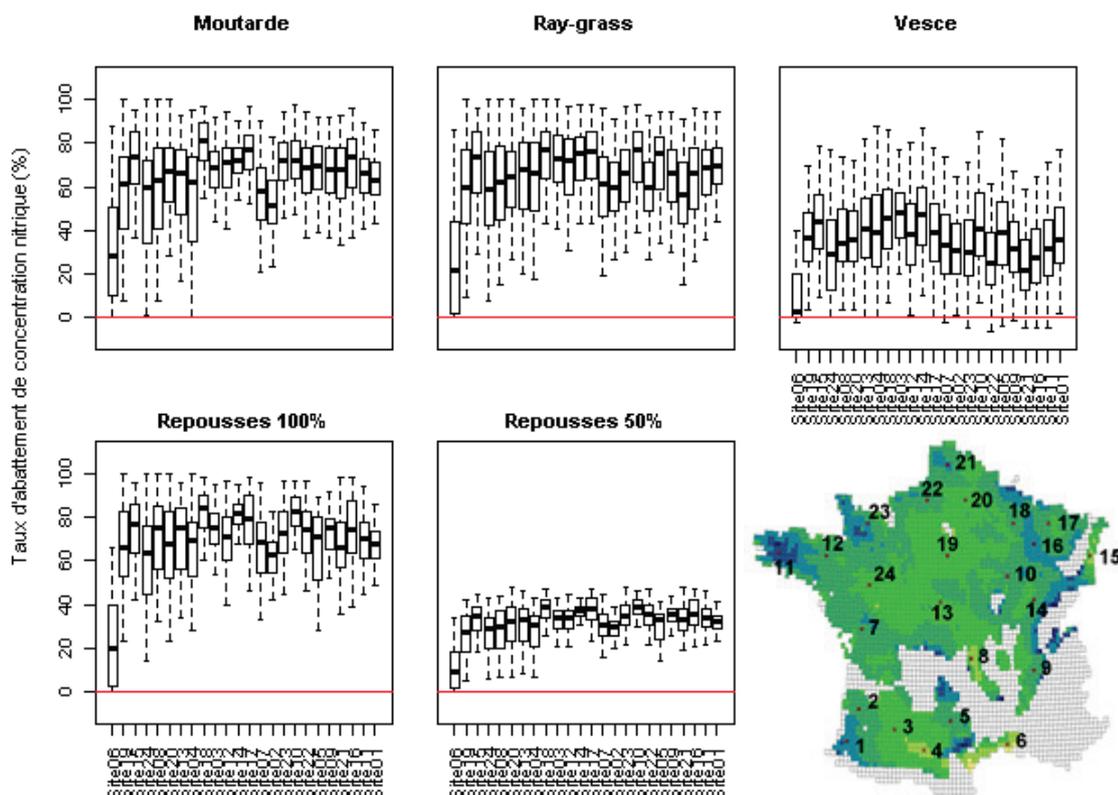


Figure 10-38. Taux d'abattement de la concentration nitrique avec les cultures intermédiaires (moutarde, ray-grass, vesce) et les repousses (à 100% de taux de couverture et à 50%) en fonction des sites dans les successions blé-maïs et colza-blé.

En termes de concentration nitrique dans les eaux de drainage, les trois couverts les plus efficaces aboutissent à des concentrations faibles, inférieures à 50 mg/l dans 75 à près de 100% des cas pour la majorité des sites, alors que les concentrations en sol nu étaient de l'ordre de 80 mg/l en médiane (Figure 10-39). Les concentrations les plus élevées sont obtenues quand les quantités d'azote minéral initial dans le sol sont élevées. Les repousses hétérogènes (50% de taux de couverture) et la vesce sont moins efficaces pour atteindre de faibles concentrations, en accord avec les résultats sur les quantités d'azote lixivié.

Un site en particulier, le site 6, ne présente pas de diminutions aussi fortes de la concentration, car les CI et les repousses se développent très peu à cause de stress hydriques trop forts. Cependant, sur ce site 6, le taux d'abattement de la concentration n'est pas négligeable, car il atteint en médiane entre 20 et 30% pour les couverts les plus efficaces. Les sites 2 et 7 présentent aussi des concentrations nitriques un peu plus fortes que les autres sites car les taux d'abattement sont un peu plus faibles, sous CI non légumineuses, pour les mêmes raisons mais qui se produisent dans des proportions moindres que pour le site 6 (faible absorption d'azote).

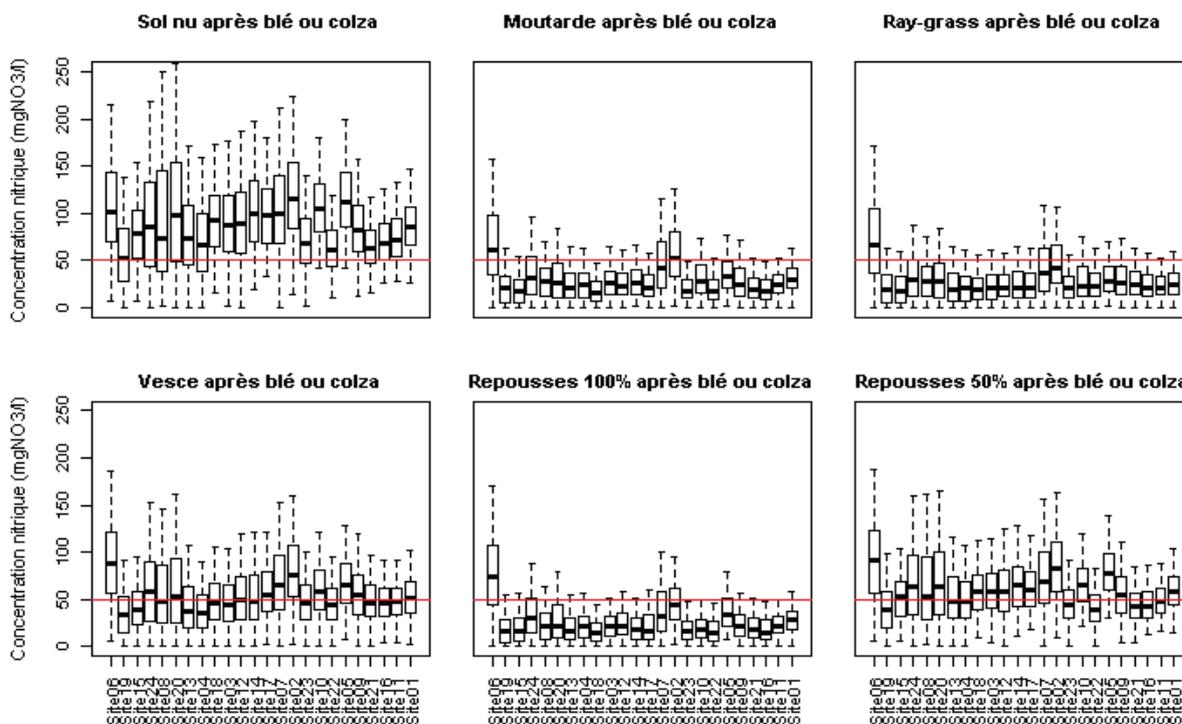


Figure 10-39. Concentration nitrique avec les cultures intermédiaires (moutarde, ray-grass, vesce) et les repousses (à 100% de taux de couverture et à 50%) en fonction des sites.

10.6.2.2. Cas de l'interculture longue récolte tardive (Maïs-Maïs)

10.6.2.2.1. Efficacité des couverts en fonction du site climatique pour réduire la lixiviation

Dans le cas de la monoculture de maïs, les valeurs du différentiel de lixiviation entre culture intermédiaire et sol nu varient selon les sites, avec des réductions de lixiviation d'autant plus importantes que le site est pluvieux et chaud, en corrélation avec les productions des CI. Cet effet climatique est d'autant plus important que la date de semis est tardive, avec un effet encore plus marqué après maïs grain (Figure 10-40). Dans ce cas, si le site est situé plutôt au Nord, la CI ne se développe que peu ou pas du tout et n'a donc pas d'effet (sites 15 ou 19). Dans le cas où le site a des températures suffisamment élevées en octobre pour une croissance des CI, une réduction de la lixiviation est observée, en particulier si la pluviométrie est élevée (site 1).

10.6.2.2.2. Efficacité des couverts en fonction du site climatique pour réduire la concentration nitrique

Les faibles effets sur la lixiviation après maïs se traduisent par un impact réduit sur la concentration nitrique des eaux de drainage. Les taux d'abattement médian atteignent tout de même 30 à 50% après maïs fourrage avec la moutarde, qui est l'espèce la plus efficace, mais seulement 0 à 22% après maïs grain, avec plus de la moitié des sites ayant une médiane quasi-égale à 0 (Figure 10-41).

Ces effets se traduisent par des concentrations nitriques peu différentes après maïs grain et des concentrations légèrement réduites après maïs fourrage avec de la moutarde, de façon non négligeable (Figure 10-42).

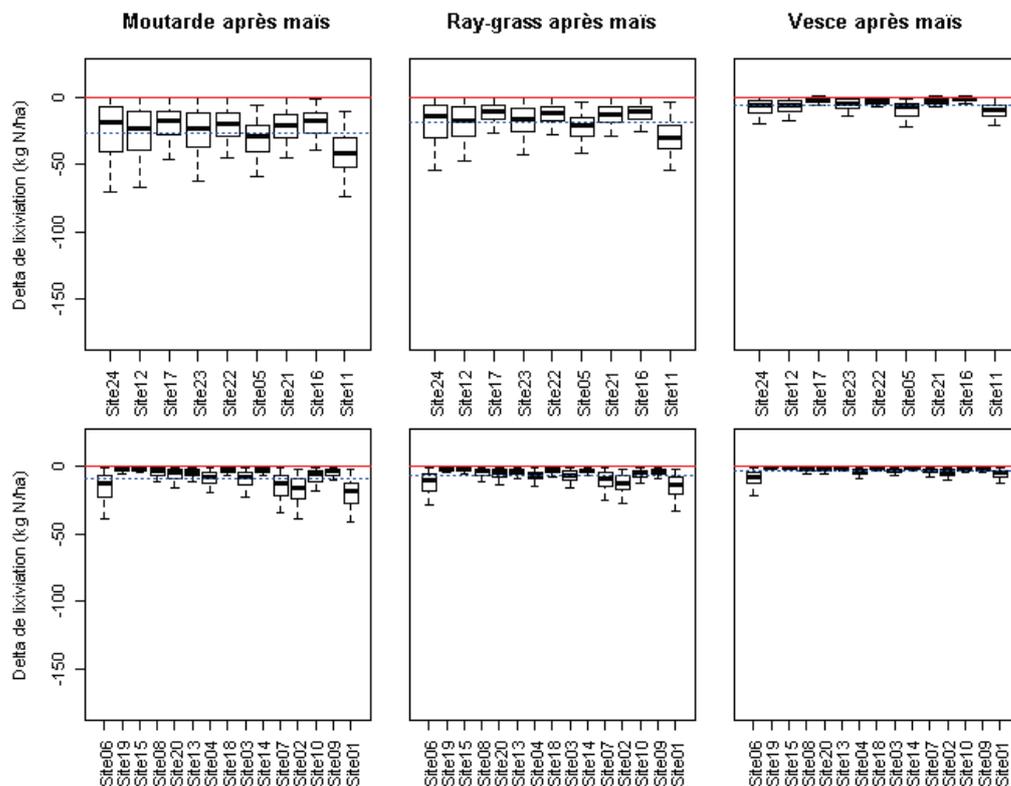


Figure 10-40. Différentiel (ou delta) de lixiviation d'azote nitrique entre culture intermédiaire et sol nu avec les cultures intermédiaires (moutarde, ray-grass, vesce) en fonction des sites, dans la succession maïs-maïs fourrage (en haut) et grain (en bas). (trait bleu = moyenne inter-sites)

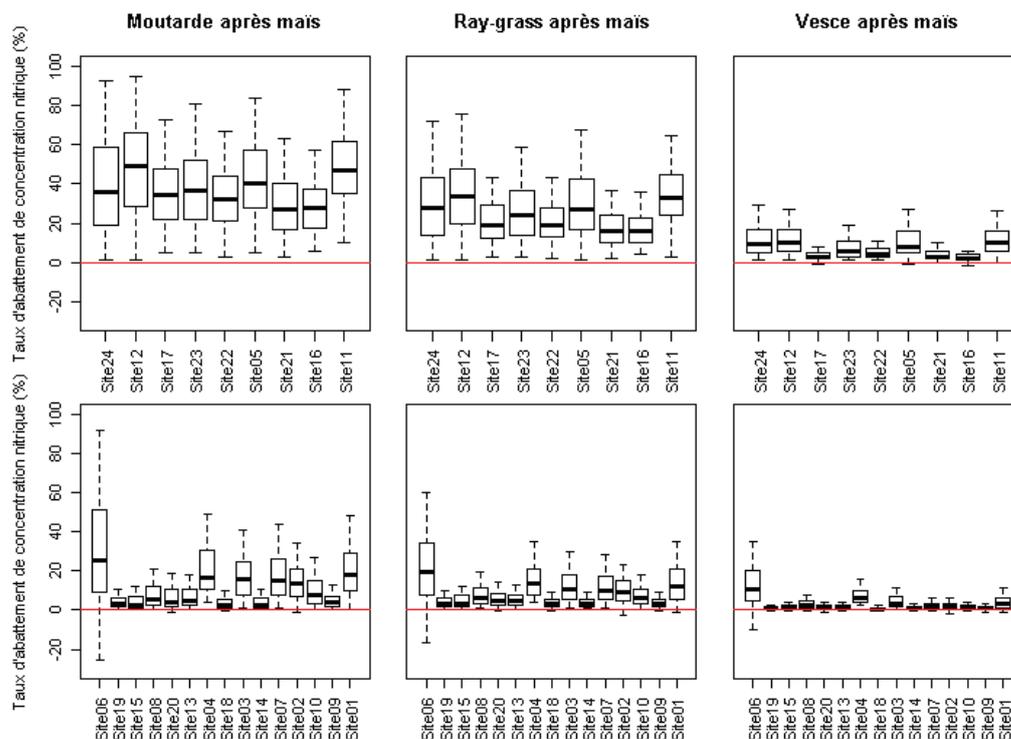


Figure 10-41. Taux d'abattement de la concentration nitrique avec les cultures intermédiaires (moutarde, ray-grass, vesce) en fonction des sites dans la succession maïs-maïs fourrage (en haut) et grain (en bas).

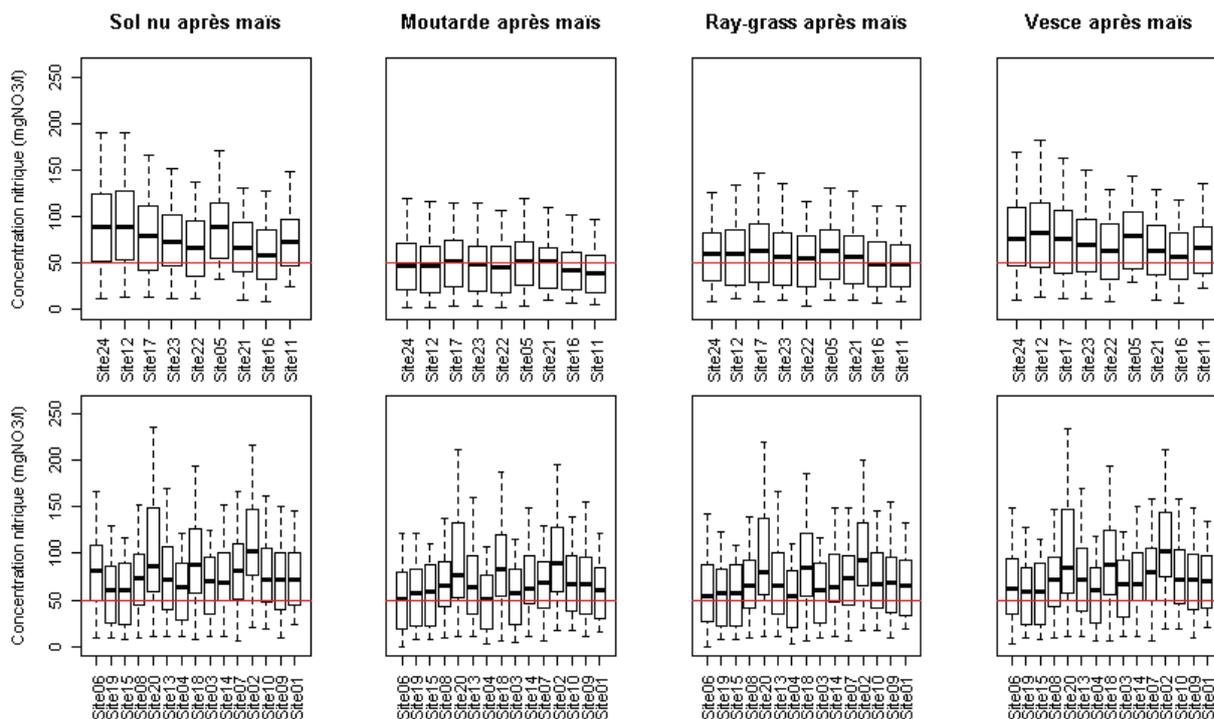


Figure 10-42. Concentration nitrique avec les cultures intermédiaires (moutarde, ray-grass, vesce) et les repousses (à 100% et 50% de taux de couverture) en fonction des sites, dans la succession maïs-maïs fourrage (en haut) et grain (en bas).

10.6.2.3. Probabilité que la CI soit efficace pour réduire la concentration nitrique de l'eau drainée selon le site, l'espèce et sa date de levée

La probabilité est abordée en termes de fréquence d'occurrence, sur 20 ans (simulations indépendantes pouvant être assimilées à des répétitions), d'un évènement. La fréquence analysée dans ce paragraphe est celle d'avoir une CI ayant permis d'atteindre un taux d'abattement de la concentration nitrique de plus de 25% et de plus de 50% par rapport à la situation en sol nu. Les résultats, pour l'ensemble des trois états initiaux en azote minéral simulés, sont présentés par espèce de CI (moutarde, ray-grass, vesce), date de levée (du 25/7 au 25/10) et site climatique (Figure 10-43).

La fréquence d'atteinte d'un taux d'abattement de plus de 25% de la concentration nitrique dépend de l'espèce considérée, des contraintes climatiques et de la date de semis ; il en est de même lorsque l'on analyse les taux d'abattement supérieur à 50%. Il est important de noter qu'une quantité d'azote minéral initial réduite entraîne une diminution non négligeable de cette fréquence, en moyenne de 12% pour l'état 1 par rapport au 2, et de 5% de l'état 2 au 3 (données non présentées).

Les fréquences d'obtention des taux d'abattement de 25% et de 50% de la concentration nitrique sont plus faibles pour la vesce que pour le ray-grass et la moutarde, et ce, quels que soient la date de levée et le site. Ceci est en partie dû au fait que la vesce acquiert son azote de l'atmosphère en quantité non négligeable. En adéquation avec les conclusions sur les fréquences pour l'azote acquis (Figure 10-14), la moutarde présente des fréquences de taux d'abattement élevées ; la fréquence est légèrement plus faible que pour le ray-grass pour des dates précoces mais est très supérieure pour les dates tardives, donnant un avantage à l'utilisation de la moutarde.

L'effet des dates de levée apparaît aussi très clairement, avec des fréquences d'efficacité plus faibles pour les dates tardives, en particulier pour la vesce et le ray-grass et dans le cas de sites pluvieux. Les plus faibles fréquences simulées pour la date de levée précoce (25/7) sont à relier avec les problèmes de développement des CI sur certains sites soumis à des stress hydriques estivaux (sites 6, 4, 24, 13). Les dates de levée pour lesquelles l'efficacité semble maximale en termes de taux d'abattement de la concentration nitrique sont entre le 10/8 et le 25/8 pour la moutarde, entre le 25/7 et le 25/8 pour le ray-grass et très souvent au 25/7 pour la vesce.

Tout comme dans le cas de l'évaluation des fréquences de faible efficacité pour l'azote absorbé par les CI, il est important de noter que si ces plages de dates de levée présentent généralement des fréquences d'efficacité fortes, dans certains cas, cela n'est pas vrai comme cela a été déjà montré avec l'exemple du site 6, dont la date optimale se situe plutôt autour du 10/9.

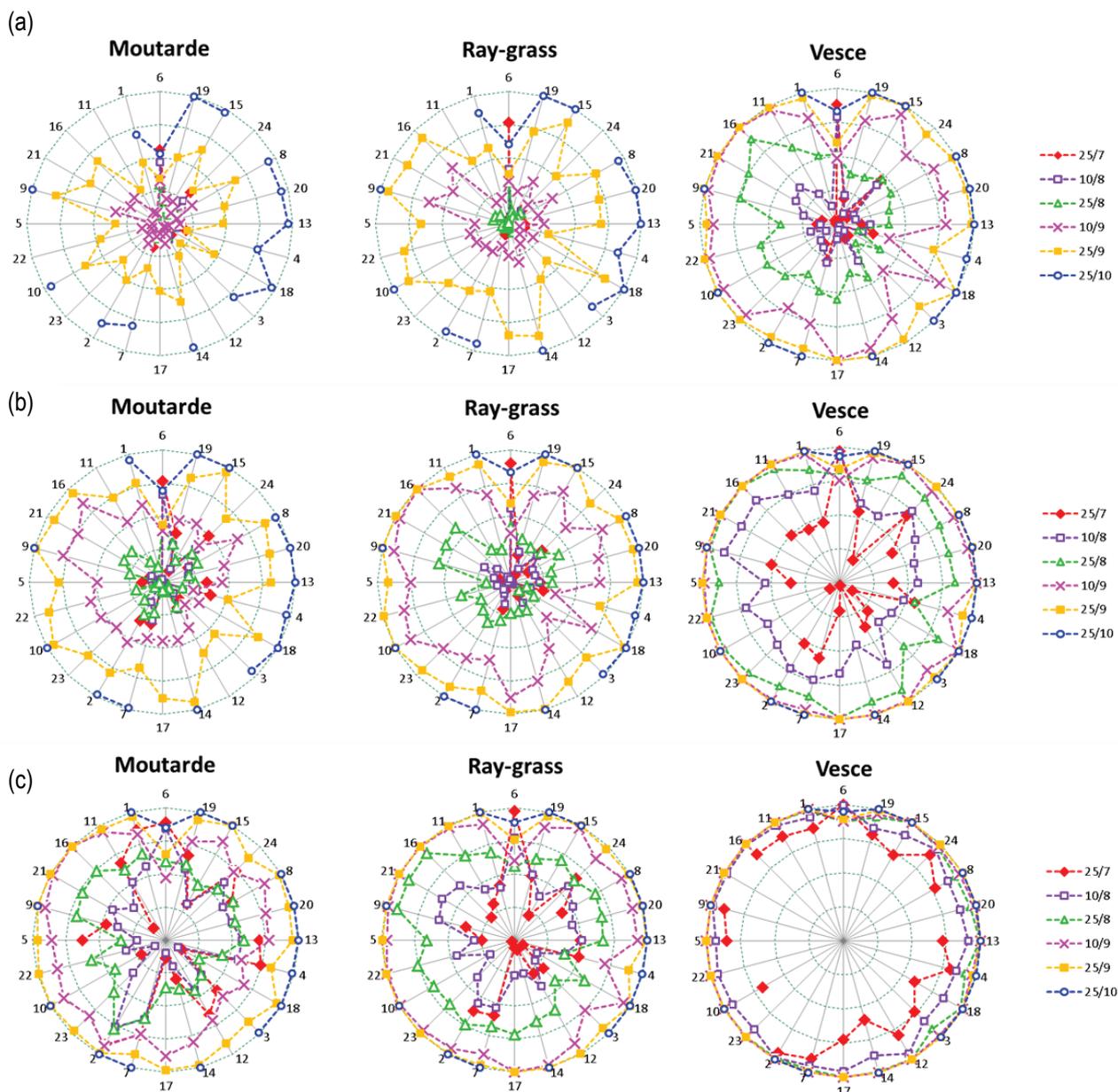


Figure 10-43. Fréquence sur 20 ans à laquelle le taux d'abattement de concentration nitrique des eaux de drainage est supérieur à 25% (a), à 50% (b) et à 75% (c), en détruisant la CI au plus tôt le 10/12, par site (1 à 24 en rayon) et la date de levée (25/7 au 25/10) pour la moutarde, le ray-grass et la vesce (centre du cercle = 100% et chaque cercle = 25% de fréquence en moins, jusqu'à 0% pour le cercle extérieur).

10.6.3. Efficacité de l'enfouissement des résidus du précédent pour réduire la lixiviation et la concentration en nitrate de l'eau de drainage

La lixiviation pour les différents modes de gestion des résidus de blé ou de maïs grain est comparée dans une situation où l'interculture est laissée en sol nu et où aucune repousse, ni culture intermédiaire n'est simulée (Figure 10-44). Elle est, comme dans les analyses précédentes, évaluée au 25 avril, en sortie d'hiver.

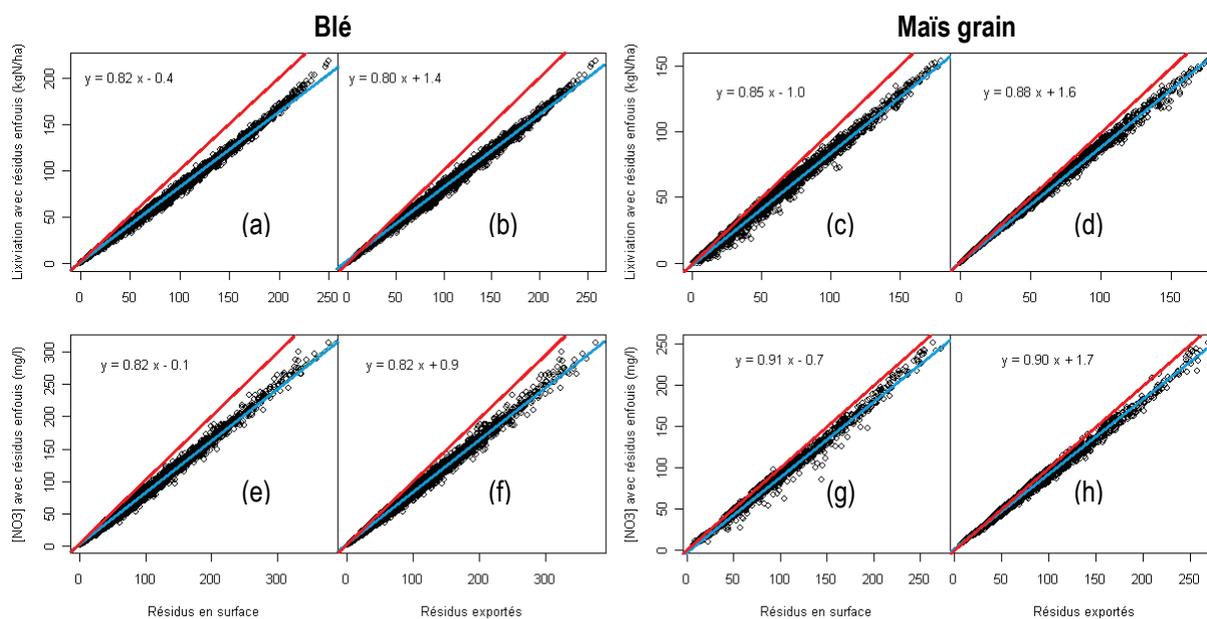


Figure 10-44. Lixiviation d'azote (a,b,c,d) et concentration nitrique (e,f,g,h) en sol nu avec des résidus de blé (a,b,e,f) et de maïs grain (c,d,g,h) enfouis (en ordonnée), comparés à des résidus laissés en surface ou exportés (en abscisse) (Bissectrice en rouge et droite de régression en bleu).

La lixiviation est plus faible quand les résidus sont enfouis alors qu'elle est à des niveaux plus élevés et très proches dans les cas du mulch (résidus en surface) et de l'exportation des pailles de blé. En effet, l'enfouissement des résidus entraîne une organisation nette de l'azote du sol, qui dépend du ratio C/N des résidus et de la disponibilité en azote minéral du sol, et qui immobilise de l'azote minéral sous forme organique. La lixiviation est ainsi réduite de 12 à 20% environ avec un enfouissement des résidus par rapport à une exportation des pailles ou à un mulch (Figure 10-45). L'effet est plus élevé pour le blé, car son rapport C/N (= 80) est plus élevé que celui du maïs (C/N = 50). La concentration nitrique est réduite en conséquence de 9 à 18%, avec les mêmes tendances que la lixiviation en fonction du rapport C/N des résidus.

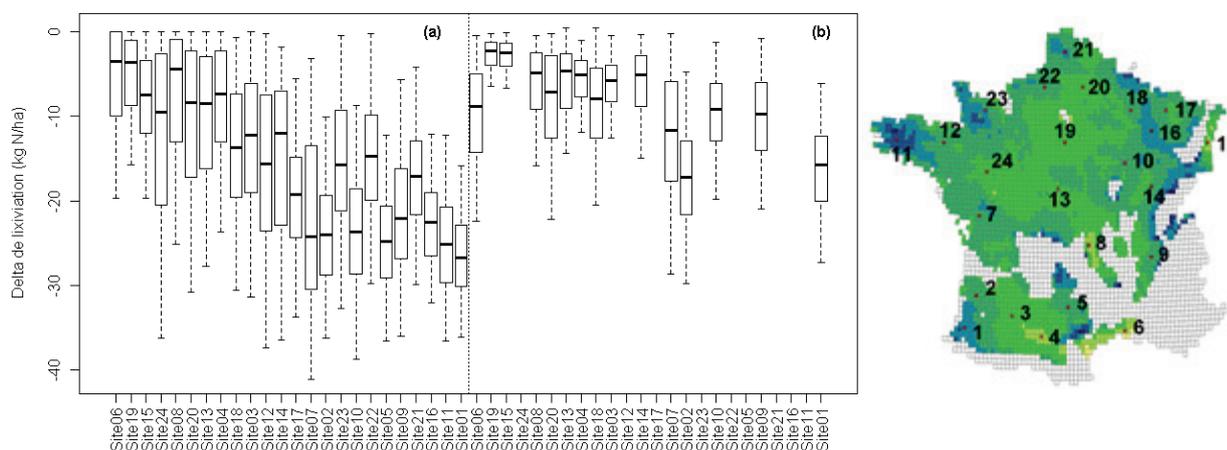


Figure 10-45. Différentiel (ou delta) de lixiviation par site avec des résidus de blé (a) et de maïs grain (b) enfouis par rapport à des résidus laissés en surface.

La diminution reste cependant modérée, avec des réductions de moins de 20 et 5 kgN/ha en moyenne, respectivement pour le blé et le maïs. Cependant, la réduction de la lixiviation est, en quantité d'azote non lixivié, plus élevée pour les sites pluvieux (Figure 10-45), tout comme avec les cultures intermédiaires et les repousses qui sont plus efficaces en climat pluvieux. L'efficacité maximale reste tout de même nettement plus faible, avec un taux d'abattement de la lixiviation de l'ordre de 10 à 20% contre plus de 60% pour les CI non légumineuses (Figure 10-27).

10.6.4. Efficacité des cultures intermédiaires pour recycler des apports de lisier et effet sur la lixiviation et la concentration en nitrate de l'eau de drainage

L'apport de lisier est réalisé au semis de la culture intermédiaire, sur une sélection de sites climatiques dont les statistiques régionales montrent une utilisation de fumures organiques sur des surfaces importantes. Deux doses de lisier ont été simulées : 75 et 150 kg/ha en azote total, dont 70% sous forme minérale. Les mêmes apports ont été réalisés sur les sols nus aux mêmes dates, pour pouvoir comparer les effets de ces apports sur la lixiviation d'azote, avec ou sans culture intermédiaire. Seul l'effet de CI non légumineuses est simulé car la vesce ne serait pas suffisamment efficace (cf. résultats précédents), et pour des dates de levée et de destruction qui se sont révélées parmi les plus efficaces pour l'absorption d'azote.

L'azote absorbé par la moutarde et le ray-grass, en fonction du reliquat d'azote minéral initial du sol et de la dose de lisier apportée, est présenté dans la Figure 10-46. L'absorption augmente avec l'augmentation de ces deux facteurs, avec un effet plus prononcé dans le cas de la moutarde que du ray-grass. La différence d'absorption reste cependant inférieure à la différence de quantités d'azote apporté ou disponible dans le sol. Il n'y a pas d'effet "site" très prononcé pour l'absorption, avec des niveaux médians proches. La variabilité observée sur la figure (hauteur des boîtes à moustaches) est plus due à la variabilité interannuelle de l'absorption qu'à la variabilité inter-sites.

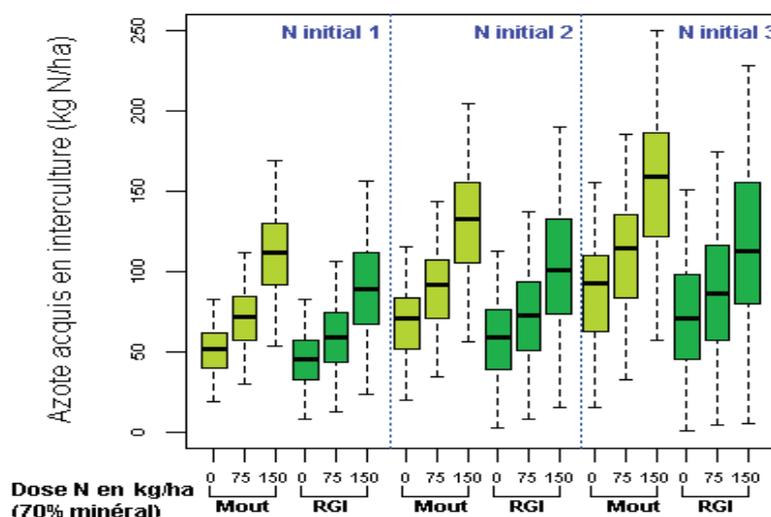


Figure 10-46. Quantité d'azote acquis par espèce de CI (moutarde en vert clair et ray-grass en foncé) selon le reliquat d'azote minéral initial (1, 2, 3) et la dose d'azote apportée par le lisier (0, 75 ou 150 kg/ha)

En termes de lixiviation et de concentration nitrique des eaux de drainage (Figure 10-47), on retiendra que :

- L'apport de lisier accroît fortement les concentrations nitriques (effet plus que proportionnel) en situation de sol nu. Il est important de ne jamais épandre de lisier en été et en automne en sol nu, même en situation de pailles enfouies, sous peine d'accroître fortement la lixiviation et la concentration nitrique ;
- Les CI sont efficaces pour recycler du lisier et permettent de réduire la lixiviation d'azote par rapport au sol nu sans lisier, dans une majorité de cas, surtout si la quantité d'azote minéral dans le sol était faible avant l'apport et que l'apport n'est pas trop important. Cette réduction de lixiviation permet de restituer une eau de drainage moins concentrée qu'une situation en sol nu sans apport de lisier.
- Toutefois, si l'apport de lisier est élevé (150 kgN/ha) et que le reliquat d'azote minéral initial est de 60 kg/ha ou plus (états initiaux 2 et 3), l'efficacité des CI n'est pas suffisante pour restituer une eau de drainage dont la concentration en NO_3 est inférieure à 50 mg/l ni a fortiori pour 95% de l'ensemble des situations simulées ; ce résultat est particulièrement marquant pour le ray-grass ;

- La moutarde est plus efficace que le ray-grass pour réduire la lixiviation et la concentration en nitrate de l'eau de drainage en cas d'apport de lisier, car cette espèce a des vitesses de croissance et d'absorption d'azote plus rapides ;
- Bien que les CI permettent de réduire la lixiviation et la concentration nitrique par rapport au sol nu, elles ne permettent pas de restituer une eau de drainage faiblement concentrée en nitrate lorsque l'état initial du reliquat d'azote minéral à la récolte du blé est supérieur au reliquat minimum (état initial 1) avec des apports de lisier élevés (150 kgN/ha). De plus, le risque d'avoir des eaux de drainage avec une concentration élevée augmentent d'autant plus que l'apport est élevée et le reliquat d'azote minéral initial important. Ainsi, malgré la présence de CI, la lixiviation suite à l'apport de lisier peut s'avérer plus élevée qu'en sol nu non épandu avec l'effluent dans un nombre non négligeable de cas.

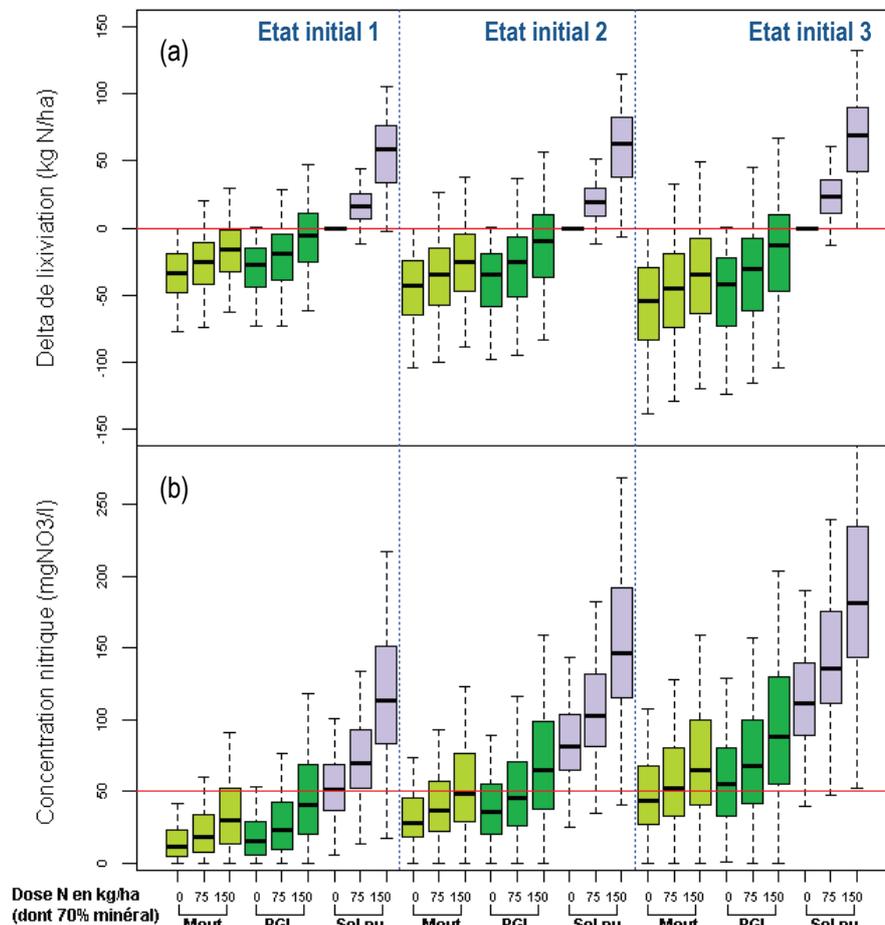


Figure 10-47. Différentiel (ou delta) d'azote lixivié (a) et concentration nitrique (b) par type d'interculture (Moutarde en vert clair, ray-grass en foncé ou sol nu en violet) selon le reliquat d'azote minéral initial (1, 2, 3) et la dose d'azote apportée par le lisier (0, 75 ou 150 kg/ha)

En conséquence et pour éviter d'accroître les pertes de nitrate et la concentration nitrique de l'eau de drainage, le recyclage de lisier peut être réalisé sous 3 conditions à remplir impérativement :

- 1) s'assurer que la CI a bien levé et est correctement répartie spatialement avant d'épandre du lisier, car si le couvert n'est pas correctement installé, l'apport de lisier induira une augmentation importante des fuites de nitrate et de la concentration nitrique de l'eau de drainage ;
- 2) s'assurer que le reliquat d'azote minéral à la récolte est faible (inférieur à 40 kgN/ha sur 90 cm), une mesure du reliquat devrait être réalisée à la récolte du précédent pour vérifier cette condition ;
- 3) la dose épandue de lisier doit être raisonnablement faible (inférieure à 75 kg N/ha).

10.7. Effet des cultures intermédiaires et des repousses sur le rendement de la culture suivante

L'arrière effet à court terme de l'implantation d'un couvert de type culture intermédiaire ou de repousses de colza ou de blé a été évalué en comparant chaque simulation élémentaire avec la situation de référence en sol nu en interculture, correspondant au différentiel de rendement. Ce différentiel est exprimé en pourcentage de la situation de référence pour prendre en compte les niveaux différents de rendement entre cultures et pédoclimats simulés. L'itinéraire technique de la culture suivante est identique entre la situation sans et avec couvert en interculture concernant les modalités de semis (date, dose, variété), la dose d'engrais azoté et la forme chimique (référence régionale issue des données Agreste) et la pratique ou non de l'irrigation. Pour des raisons techniques, lorsque le maïs est irrigué, la dose d'irrigation est calculée automatiquement par le modèle STICS pour chaque simulation en fonction des besoins de la culture, et peut donc être théoriquement différente entre la situation sans et avec CI.

La différence de production (rendement en graines ou en biomasse pour le maïs fourrage) est donc le révélateur de l'effet de l'implantation d'un couvert en interculture sur la culture principale suivante d'un point de vue des bilans d'azote et d'eau, sans prise en compte d'effet de l'état structural du sol ou de facteurs biotiques non simulés par le modèle STICS.

Lorsque que la différence de rendement entre situation avec couvert en interculture et sol nu est nulle cela indique que le couvert n'a pas d'effet sur la disponibilité en eau et en azote et donc qu'il était légitime de simuler le même itinéraire technique dans les deux situations.

Si le différentiel de rendement est négatif, cela indique que pour atteindre le même niveau de production, il aurait été nécessaire d'apporter plus d'engrais azoté ou/et que la consommation en eau du couvert intermédiaire est préjudiciable pour la culture suivante ; cela indique un effet négatif sur les bilans d'eau et d'azote globaux ou en dynamique.

Enfin, si le différentiel est positif, cela indique que l'implantation de couvert en interculture permet i) soit d'accroître la quantité d'azote disponible pour la culture suivante globalement, soit ii) modifie la dynamique de disponibilité en azote et en conséquence permet d'augmenter l'efficacité de l'absorption de l'azote pour la production simulée ; ces variations de production sont théoriques car tous les effets abiotiques ne sont pas pris en compte (P, K, ..) et aucun effet d'origine biotique, ni de problème physiologique (par exemple la verse) n'est simulé par le modèle STICS. En conséquence, l'interprétation la plus pertinente est que l'implantation d'un couvert en interculture permettrait d'économiser de l'engrais azoté pour produire le niveau de rendement objectif.

10.7.1. Effet global des CI et des repousses sur le différentiel de rendement de la culture principale suivante

Globalement, tous pédoclimats pris en compte, l'analyse par type de précédent cultural (et donc type d'interculture) et par niveau d'état initial en azote minéral du sol des différents modes de gestion indique les résultats marquants suivants (Figure 10-48) :

1) Des effets globalement positifs après blé et maïs fourrage.

- Les cultures intermédiaires et les repousses implantées après blé (Figure 10-48.a) induisent une augmentation des rendements simulés du maïs, irrigué pour 13 sites sur 24, en médiane de 1 à 8%. De plus, quasiment 75% de la population des simulations ont un différentiel positif (boîte à moustaches complètement au dessus de la valeur zéro), indiquant un effet globalement positif des couverts pour accroître la disponibilité en azote pour la culture de maïs suivante. Les augmentations de rendement simulées peuvent atteindre exceptionnellement 20%, notamment avec la vesce ou pour l'état initial 3. Toutefois, une partie non négligeable de la population des simulations indique des rendements réduits avec des couverts, mais avec une réduction maximale modérée, de 5% de perte de rendement.

Cela indique un effet significatif simulé de "sauvegarde" de l'azote minéral du sol par l'implantation de couvert en interculture longue de type blé-culture de printemps (ici le maïs).

- Un effet positif, certes modéré (en médiane de 3%) mais quasi systématique, de l'implantation de culture intermédiaire après maïs fourrage (Figure 10-48.c) pour la culture de printemps suivante (simulée ici par du maïs fourrage, mais mimant aussi l'effet sur d'autres cultures semées au printemps).

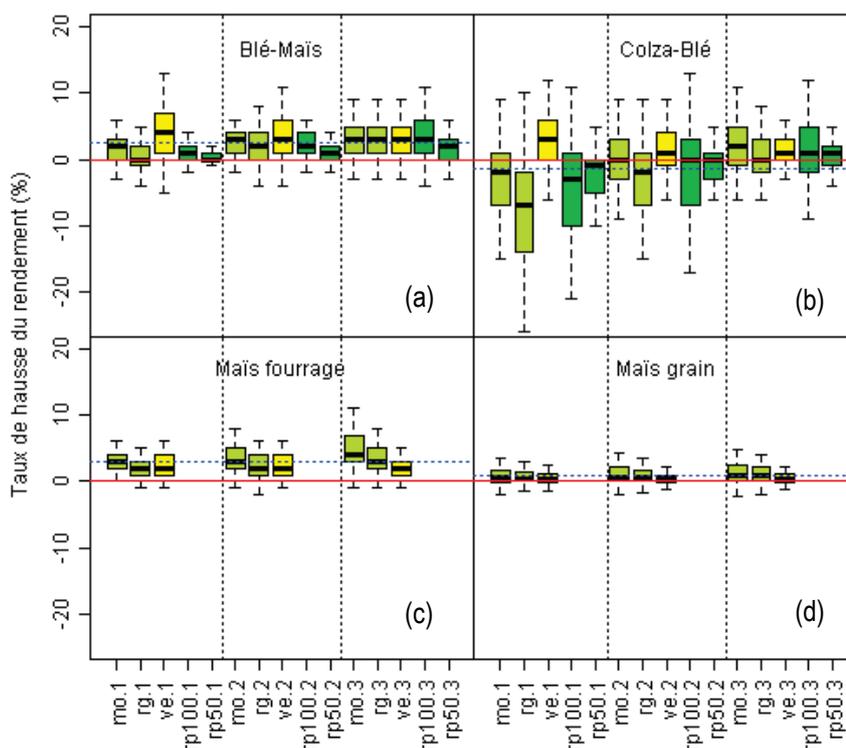
2) Un effet négligeable sur la monoculture de maïs grain (Figure 10-48.d), dû aux faibles quantités de biomasse produite et d'azote absorbé par les cultures intermédiaires (cf. sections 11.4.2 et 11.4.3).

3) Des effets très variables en situation d'interculture courte après colza (Figure 10-48.b), et surtout potentiellement négatifs avec quelques situations fortement pénalisées.

- Les effets simulés sont négatifs en médiane en situation d'état initial d'azote minéral 1 (reliquat minimum incompressible) pour les espèces non-légumineuses (moutarde, ray-grass et repousses de colza), avec un effet négatif potentiellement plus fort avec le ray-grass (en médiane de -5% et pouvant aller au maximum jusqu'à -25%) ;
- Les effets seront d'autant moins négatifs que l'azote minéral initial du sol est élevé. Ainsi globalement l'effet des couverts est positif pour l'état initial 3 ;
- Dans cette situation d'interculture courte, la vesce aura un effet positif quasi-systématiquement et très significatif en médiane.

Ces résultats indiquent qu'en situation d'interculture courte, le phénomène de compétition préemptive pour l'azote (diminution de la disponibilité en azote) se produit dans de nombreux pédoclimats français et est particulièrement préjudiciable quand l'état initial est pauvre en azote minéral (notamment état initial 1). Cela explique pourquoi la vesce dans ces conditions, qui "fait entrer" de l'azote exogène dans le système de culture par fixation symbiotique, permet de réduire fortement ce phénomène négatif et permet même d'obtenir au final un effet positif pour le blé suivant dans environ 75% de la population simulée.

Figure 10-48. Différence de rendement relatif entre culture intermédiaire et sol nu, exprimé en fonction du rendement référence en sol nu) en fonction des différents modes de couverts (moutarde "mo" et ray-grass "rg" en vert clair, vesce "ve" en jaune, repousses à 100% de taux de couverture "rp100" et à 50% "rp50" en vert foncé) et de l'état initial en azote minéral du sol (1, 2, 3) et de la succession de culture (trait bleu = moyenne par succession).



10.7.2. Effets des CI et des repousses sur le différentiel de rendement de la culture principale suivante

10.7.2.1. Effet de la date de levée et de destruction : l'exemple de la succession blé-maïs

La médiane du différentiel de rendement est positive, pour une grande proportion de la population des simulations et pour les trois espèces de CI, quelles que soient les dates de levée ou de destruction (Figure 10-49). L'effet médian le plus favorable à l'augmentation de rendement du maïs suivant est obtenu pour les dates de levée au mois d'août et la date de destruction la plus tardive. Les différentiels de rendement les plus élevés sont obtenus pour la vesce, en particulier pour les deux premières dates de levée (Figure 10-49.c), car le niveau d'azote acquis par la légumineuse est d'autant plus élevé que le semis est précoce pour une majorité de sites climatiques.

Quelle que soit l'espèce, plus la date de destruction est tardive et plus la variabilité dans la réponse est accrue (plus forte largeur des boîtes à moustaches). Ce résultat indique qu'une destruction très tardive en février ou en mars peut induire un effet négatif fort, ou au contraire un effet encore plus positif sur le rendement de la culture de maïs suivante. Il convient donc d'analyser d'où provient cette variabilité, notamment en examinant la réponse pour divers sites climatiques.

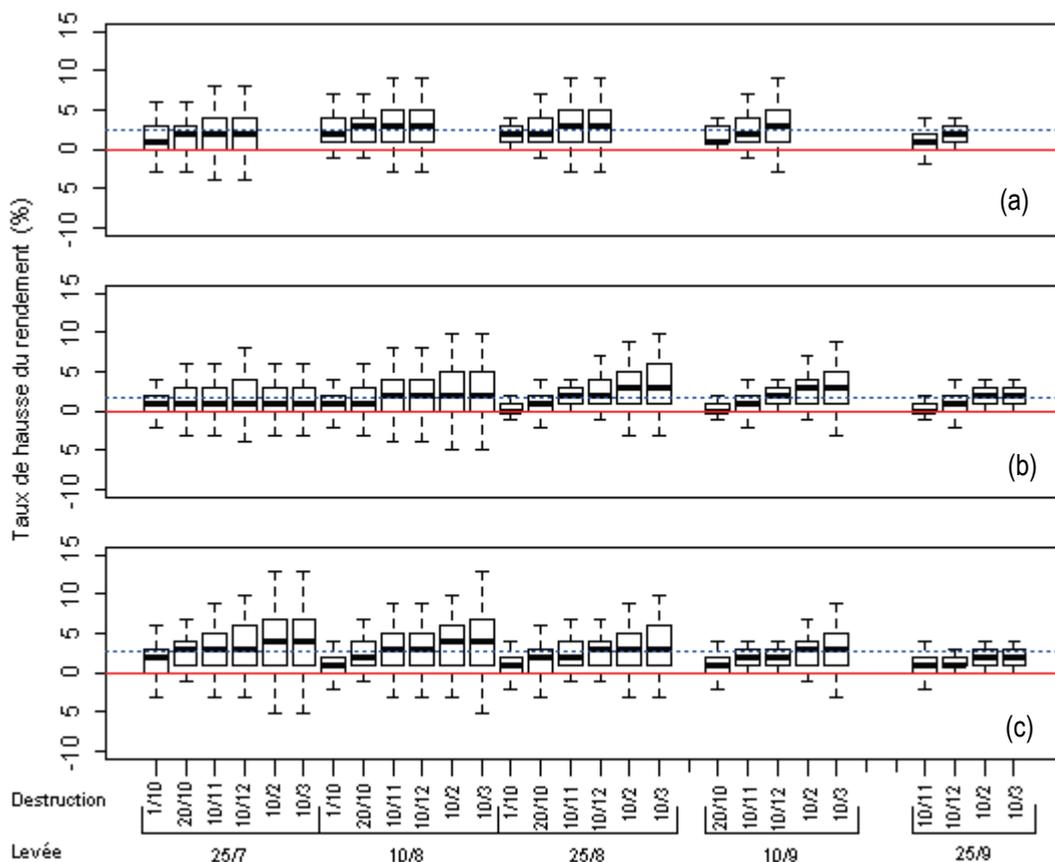


Figure 10-49. Différence de rendement relatif entre culture intermédiaire et sol nu (exprimée en fonction du rendement référence en sol nu) en fonction des dates de levée et de destruction des cultures intermédiaires de moutarde (a), ray-grass (b) et vesce (c) pour les 3 états initiaux d'azote minéral confondus (trait bleu = moyenne toutes dates confondues).

La figure 10-50 illustre les différentiels de rendement pour 6 sites climatiques présentant des réponses contrastées aux différentes sorties analysées précédemment. Les simulations indiquent également une réponse contrastée pour le différentiel de rendement de ces 6 sites pour le ray-grass, notamment en fonction de leur niveau de pluviométrie et de leur latitude.

Concernant les sites les "plus pluvieux" (sites 1, 11 et 16), globalement, plus la date de destruction est tardive plus l'effet sur le différentiel de rendement s'accroît. Toutefois, cet effet d'augmentation du rendement du maïs suivant qui est accru avec le retard de la date de destruction est moins vrai pour la première date de levée fin juillet, et aussi pour le site le plus au Nord (site 16).

Pour les sites "peu pluvieux" (sites 4, 6 et 19), l'effet de la date de destruction est moins marqué et moins positif en médiane, ou peut même s'avérer négatif. Ainsi, des dates de destruction de février et mars peuvent induire des effets de réduction du rendement du maïs suivant en climat méditerranéen pour le site 4. Ceci s'explique par une consommation d'eau de la culture intermédiaire en hiver qui devient préjudiciable pour l'implantation du maïs suivant en année peu pluvieuse au printemps : dans cette situation, il se produit un effet de compétition préemptive pour l'eau du sol, situation que l'on ne simule que pour ce climat. Enfin, toujours pour le site 4, on observe un effet quasi nul pour la première date de levée, car la culture intermédiaire ne s'est pas développée (déjà indiqué précédemment).

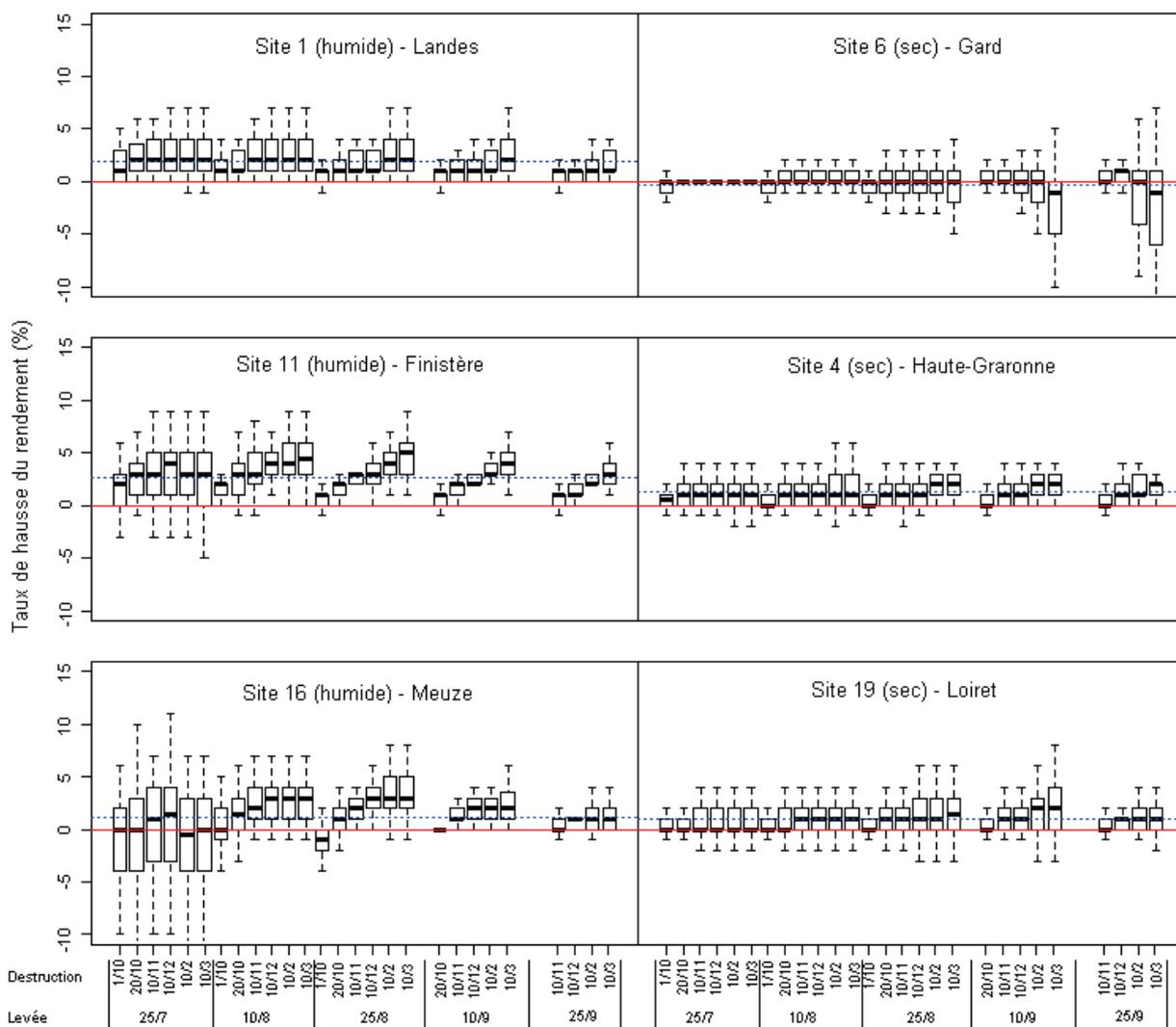


Figure 10-50. Différence de rendement relatif entre culture intermédiaire et sol nu (exprimée en fonction du rendement référence en sol nu) en fonction des différents dates de levée et de destruction du ray-grass pour 6 sites climatiques contrastés (trait bleu = moyenne toutes dates confondues)

10.7.2.2. Variabilité de l'effet des couverts sur le différentiel de rendement en fonction du site climatique

10.7.2.2.1. Effet sur le différentiel de rendement pour la succession colza-blé

Il a été montré précédemment que c'est dans le cas de l'interculture courte, avec l'exemple de la succession colza-blé, que le différentiel de rendement pouvait être négatif, notamment avec les couverts intermédiaires d'espèces non-légumineuses. L'analyse de cet effet a été effectuée pour chaque site climatique pour chacun des 5 couverts simulés (Figure 10-51). Cette analyse indique clairement que plus le site est "pluvieux", plus le différentiel de rendement devient positif. Ainsi, la bascule entre effet négatif et positif se situe aux environs de la moitié des sites classés par ordre de pluviométrie pour les couverts de moutarde, ray-grass et repousses de colza. Toutefois, les effets négatifs simulés pour les sites "peu pluvieux" sont nettement plus élevés que les effets positifs des sites "très pluvieux", ce qui explique qu'en médiane pour l'ensemble des sites, l'effet est négatif.

Toutefois avec la vesce, les effets négatifs simulés sont, d'une part, moins nombreux et obtenus seulement pour les cinq sites les "moins pluvieux", et d'autre part la variabilité de l'effet négatif sur le différentiel de rendement est nettement plus faible.

Comme indiqué précédemment, c'est avec le ray-grass que les effets négatifs sur le rendement du blé suivant sont les plus élevés, et la médiane est quasiment toujours négative sur l'ensemble des sites.

Les effets des repousses sont intermédiaires entre ceux de la moutarde et ceux du ray-grass, et d'autant plus négatifs que la couverture du sol est élevée.

Ainsi, l'effet de compétition préemptive qui se produit aux dépens de la culture d'hiver suivante (ici le blé) est d'autant plus élevé que le climat est "peu pluvieux" en hiver. La forte variabilité simulée de l'effet du couvert intermédiaire sur le différentiel de rendement illustre l'effet de la variabilité inter-annuelle de la pluviométrie sur l'intensité de cet effet de compétition préemptive pour l'azote et l'eau.

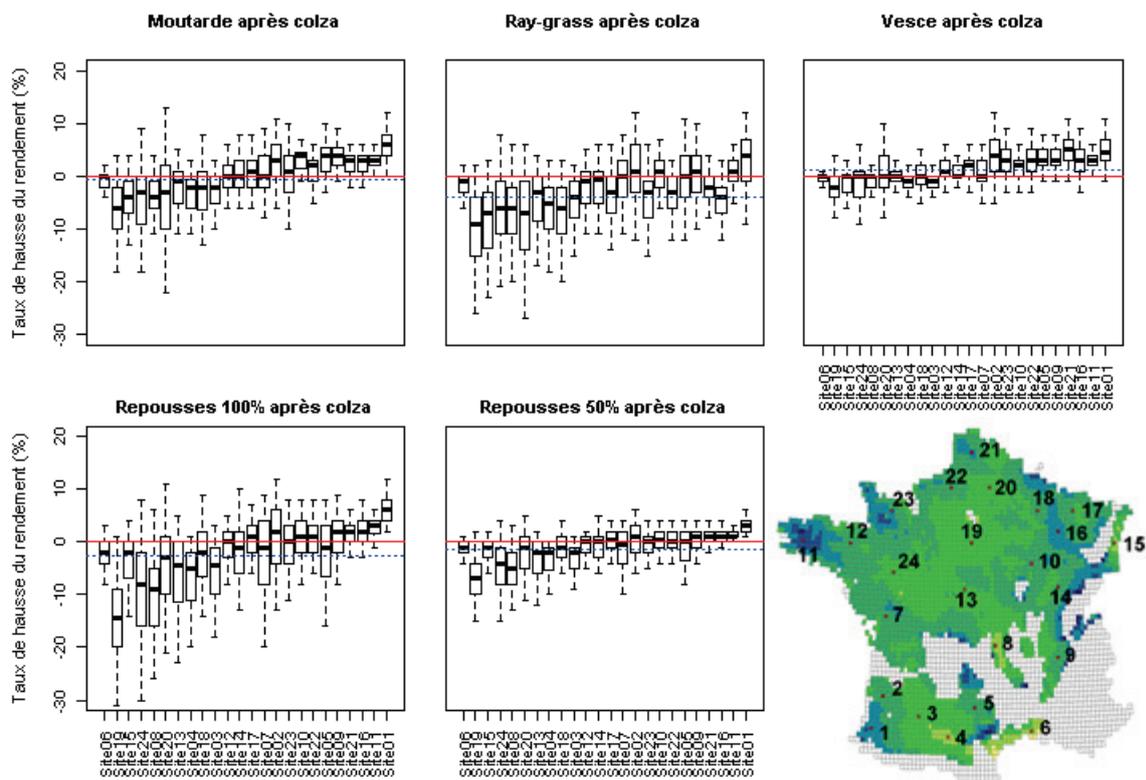


Figure 10-51. Différence de rendement relatif entre culture intermédiaire et sol nu exprimée en fonction du rendement référence en sol nu pour la succession colza-blé en fonction des différents sites climatiques pour les divers types de couverts (trait bleu = moyenne inter-sites).

10.7.2.2. Effet sur le différentiel de rendement pour la succession blé-maïs

Comme indiqué précédemment, dans le cas de l'interculture longue avec la succession blé-maïs, le différentiel de rendement est généralement positif, et ce pour tous les couverts intermédiaires et quasiment tous les sites climatiques (Figure 10-52). Il est cependant important de noter que le maïs est irrigué selon ses besoins sur 13 des 24 sites étudiés. Les situations de différentiel de rendement négatif sont obtenues plutôt pour les sites les "moins pluvieux". La variabilité des différentiels de rendement est nettement plus faible que pour l'interculture courte colza-blé. C'est toujours pour le ray-grass que les effets les moins favorables pour le rendement de la culture suivante sont simulés, de même qu'avec la vesce pour les effets positifs.

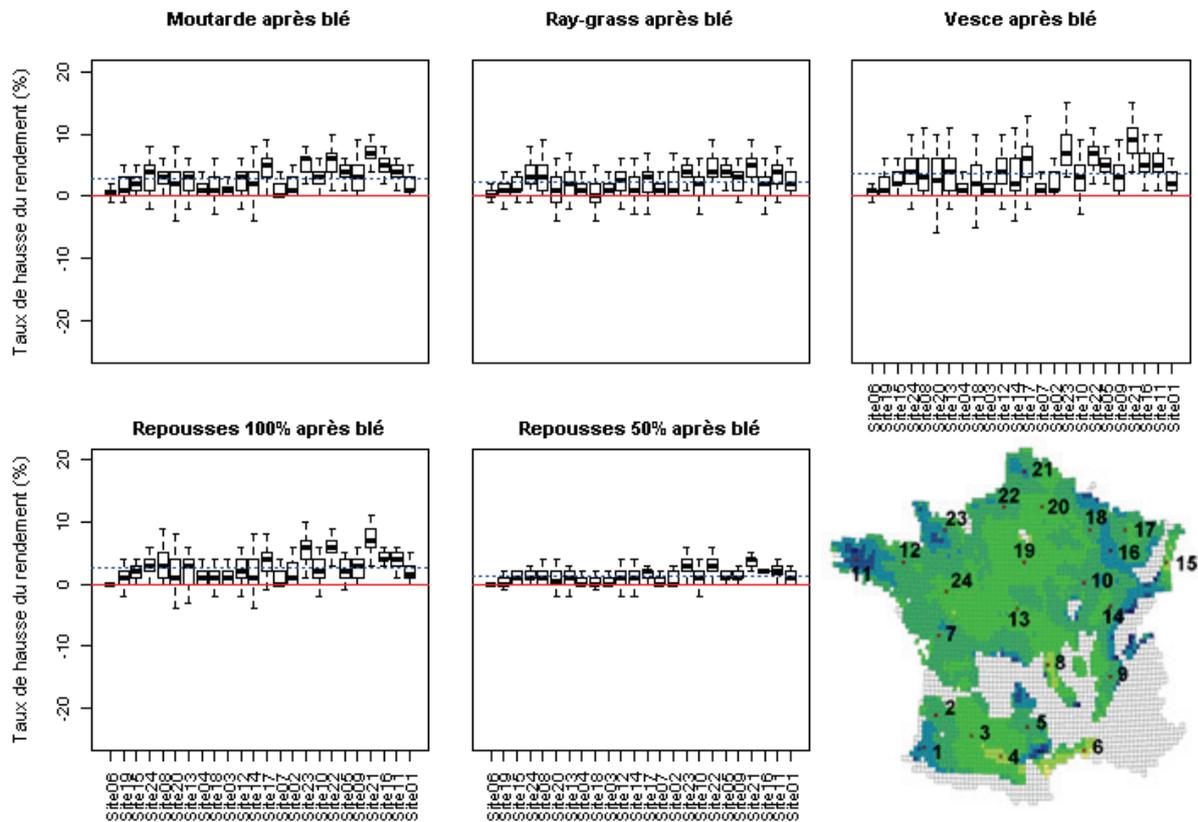


Figure 10-52. Différence de rendement relatif entre culture intermédiaire et sol nu, exprimée en fonction du rendement référence en sol nu pour la succession blé-maïs en fonction des différents sites climatiques pour les divers types de couverts (trait bleu = moyenne inter-sites).

10.7.2.3. Effet sur le différentiel de rendement pour la succession maïs-maïs

Comme indiqué précédemment, les résultats des différentiels de rendement simulés après maïs sont différents de ceux après blé pour le maïs suivant, et ce quel que soit le site climatique (Figure 10-53). Après maïs fourrage où la culture intermédiaire peut se développer significativement, le différentiel de rendement est positif (médiane de l'ordre de +5%) pour la majeure partie de la distribution des simulations sur tous les sites climatiques, et ce quelle que soit l'espèce de culture intermédiaire.

Après maïs grain, l'effet médian est nul quels que soient le site et l'espèce de culture intermédiaire, et la variabilité de l'effet est très faible car les couverts se sont très peu développés.

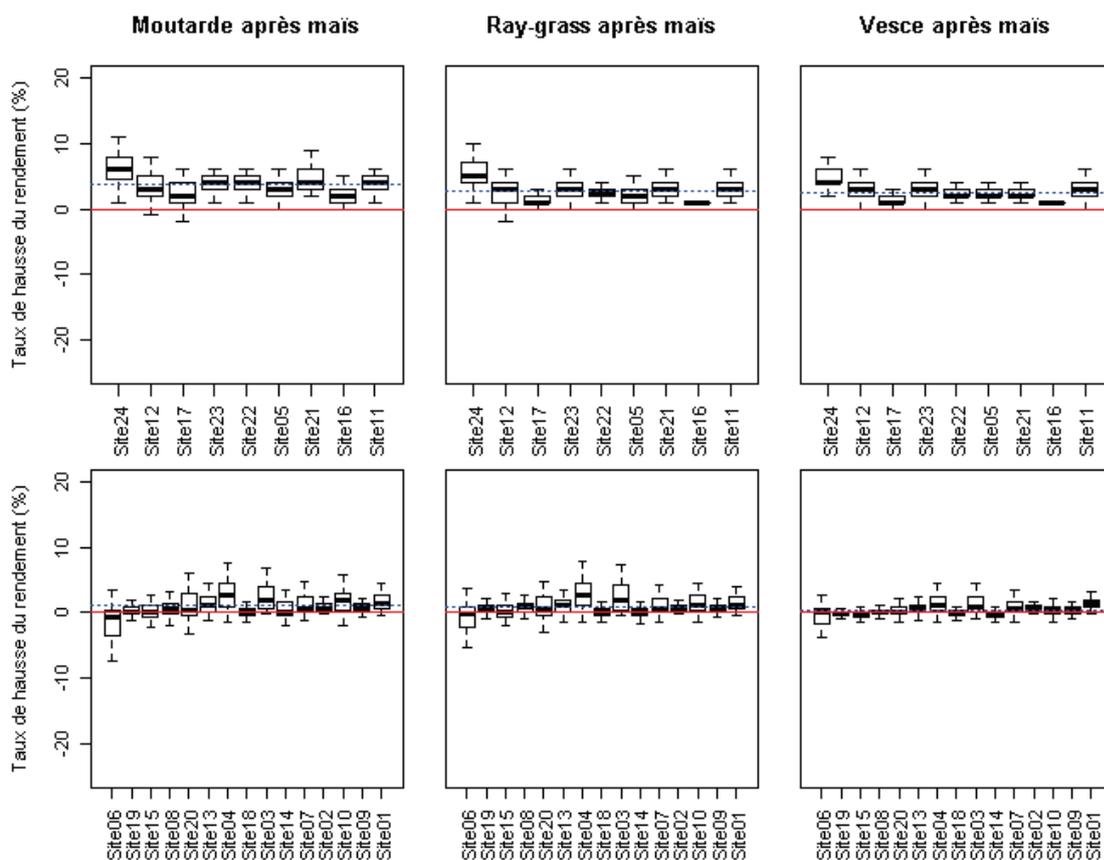


Figure 10-53. Différence de rendement relatif entre culture intermédiaire et sol nu, exprimée en fonction du rendement référence en sol nu, pour la succession maïs-maïs avec maïs fourrage (en haut) et avec maïs grain (en bas) en fonction des différents sites climatiques pour la moutarde, le ray-grass et la vesce (trait bleu = moyenne inter-sites).

10.7.2.3. Analyse des facteurs expliquant les effets sur le rendement de la culture suivante

Nous avons cherché à comprendre les facteurs expliquant les effets sur le rendement de la culture suivante, vis-à-vis d'une part du bilan hydrique et d'autre part du bilan azoté.

10.7.2.3.1. Bilan hydrique

Concernant l'interculture courte colza-blé, le stock d'eau du sol, analysé quelques jours après le semis du blé au 10 novembre, est identique avec ou sans cultures intermédiaires, dans une majorité de cas (Figure 10-54). Cependant, pour les sites les plus "secs" (sites 19 à 3), dans un nombre non négligeable de situations, le stock d'eau est réduit par la culture intermédiaire, excepté pour le site 6 où le développement des CI est faible. Cette plus faible disponibilité en eau peut partiellement expliquer les effets négatifs des CI sur le rendement du blé, notamment dans le cas de sites peu pluvieux. Cependant, plus le niveau initial d'azote minéral dans le sol était élevé, moins ces effets négatifs apparaissaient, confirmant que l'effet négatif est observé quand l'azote minéral du sol est peu disponible, suggérant des limitations d'azote pour la croissance de la culture.

Les effets nuls ou positifs sur le rendement de la culture suivante en interculture longue (blé-maïs) indiquent globalement que le bilan hydrique n'est pas significativement modifié. Précédemment, nous avons montré que la réserve en eau du sol (cf. section 10.5 ; Figure 10-26) n'est pas différente en médiane à la date de semis du maïs (25/04). Par ailleurs, la différence d'irrigation (calculée automatiquement par le modèle en fonction des besoins de la culture) entre situation sans et avec CI est quasi nulle pour le maïs irrigué (moyenne des différences = 0,9 mm pour une dose moyenne apportée de 226 mm). Les cultures intermédiaires, avec une destruction la plus tardive au 10 mars, n'ont donc pas ou peu d'effet sur le bilan hydrique de la culture suivante. Dans ce cas,

les différences de rendement qui sont généralement positives s'expliquent donc essentiellement par des différences liées au bilan d'azote.

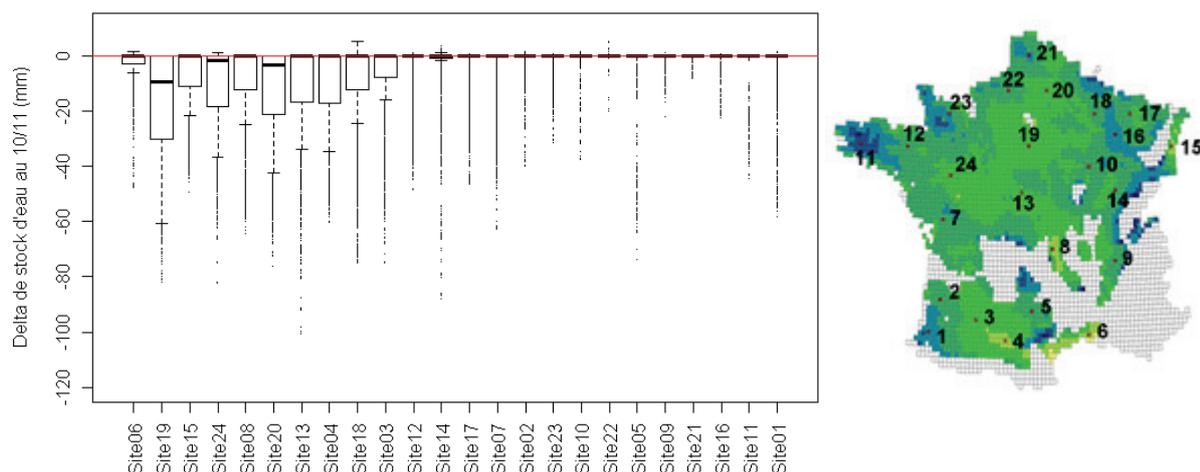


Figure 10-54. Différentiel (ou delta) de stock d'eau avec et sans CI, au 10/11 suivant le semis du blé dans la succession colza-blé, selon le site climatique

Malgré l'absence d'effet direct des CI sur l'alimentation hydrique de la culture suivante, les résultats indiquent que les CI ont un impact non négligeable sur le drainage et donc potentiellement sur la recharge des nappes ; il serait alors possible que la généralisation puisse conduire à réduire les quotas d'irrigation et donc avoir un effet indirect défavorable sur le bilan hydrique de la culture suivante si l'irrigation est plus faible.

10.7.2.3.2. Bilan azoté

Les résultats de différentiels de rendement sur la culture suivante et leur variabilité en fonction du type d'interculture et de l'espèce de CI s'expliquent en grande partie par les composantes du bilan azoté. L'analyse en dynamique de la disponibilité en azote permet de mieux comprendre comment les effets sur la culture suivante se sont produits.

1) Différentiel d'azote absorbé de la culture suivante à la récolte

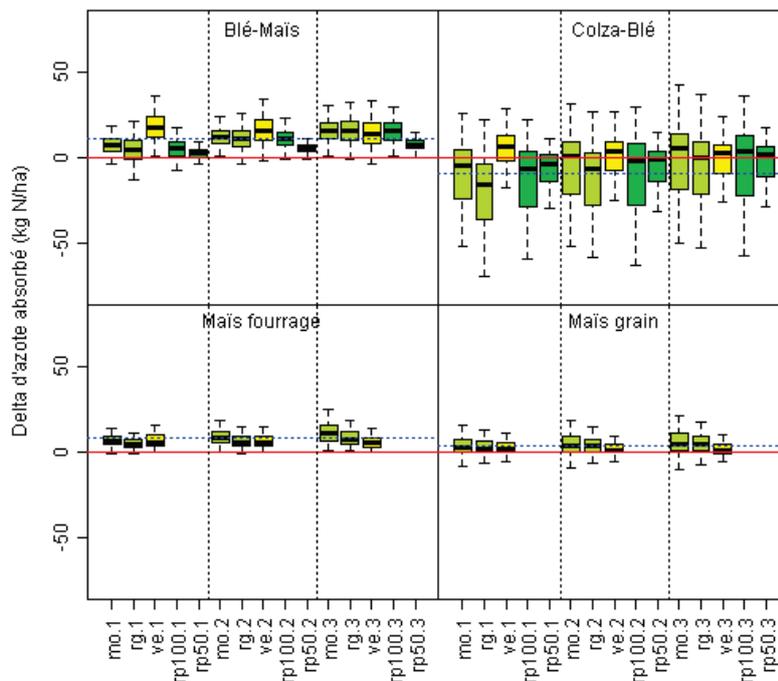
Globalement, le différentiel de rendement est expliqué par le différentiel d'azote absorbé de la culture suivante à la récolte.

Concernant l'interculture longue blé-maïs, l'effet globalement positif des cultures intermédiaires sur le rendement suivant est expliqué par une augmentation de la quantité d'azote absorbé du maïs à la récolte, pour le même niveau de fertilisation azotée (Figure 10-55). Cela indique que la disponibilité en azote pour la culture suivante est plus élevée avec l'insertion d'une culture intermédiaire dans la succession, du fait de la réduction de la lixiviation nitrique et de la restitution d'azote à la culture suivante par le biais de la minéralisation de l'azote des résidus de CI.

Dans le cas de l'interculture courte colza-blé, les effets négatifs s'expliquent également par un effet de réduction de la quantité d'azote absorbé par le blé suivant en situation avec culture intermédiaire non-légumineuse ou couvert de repousses de colza. Ce résultat indique que globalement, la réduction de la quantité d'azote minéral du sol qui permet une réduction de la lixiviation, n'est pas compensée par une restitution d'azote supplémentaire par la minéralisation des résidus du couvert intermédiaire.

Pour la succession avec maïs fourrage, l'implantation d'une culture intermédiaire permet d'accroître légèrement, mais dans quasiment toutes les situations, la disponibilité en azote pour la culture suivante de maïs. Comme attendu, le différentiel d'azote absorbé du maïs grain suivant est quasi nul, à l'instar du différentiel de rendement.

Figure 10-55. Différentiel (ou delta) d'azote absorbé de la culture principale suivante à la récolte entre culture intermédiaire et sol nu (kgN/ha) en fonction des différents modes de couverts (moutarde "mo" et ray-grass "rg" en vert clair, vesce "ve" en jaune, repousses à 100% de taux de couverture "rp100" et à 50% "rp50" en vert foncé) et de l'état initial en azote minéral du sol (1, 2, 3) et de la succession de culture (trait bleu = moyenne par succession).



2) Différentiel d'azote minéral dans le profil de sol au semis au début (10/11) et en fin de période de drainage (25/04)

Comme déjà illustré et explicité précédemment dans la section sur le bilan hydrique, les cultures intermédiaires réduisent la quantité d'azote minéral du sol, en proportion de l'état initial de l'azote minéral du sol (Figure 10-56.a), ce qui diminue très fortement la disponibilité en azote minéral en début de période de drainage (ici évaluation au 10/11). Cette réduction peut donc se faire au détriment de la culture suivante semée à l'automne, comme le blé. Ceci peut expliquer que le rendement du blé puisse être réduit si son niveau de nutrition azotée est trop faible après sa levée et au début de la reprise de croissance au printemps.

Ce qu'il est intéressant de souligner ici, c'est que le différentiel de disponibilité en azote du sol s'est nettement réduit en date du 25/04, indiquant une restitution d'azote après destruction par incorporation des résidus de couvert intermédiaire (Figure 10-56.b).

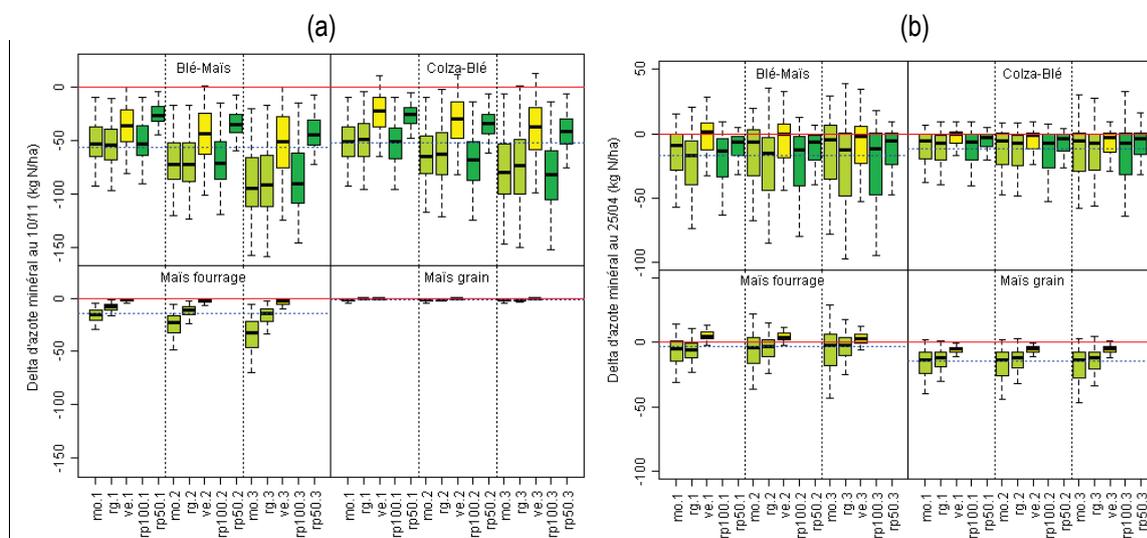


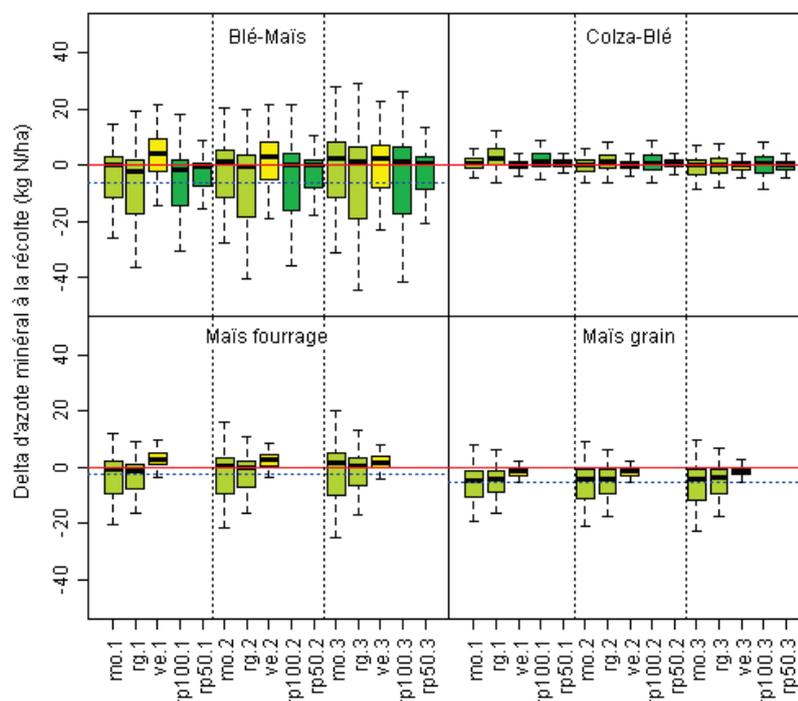
Figure 10-56. Différentiel (ou delta) d'azote minéral du sol entre culture intermédiaire et sol nu en fonction des différents modes de couverts (moutarde "mo" et ray-grass "rg" en vert clair, vesce "ve" en jaune, repousses à 100% de taux de couverture "rp100" et à 50% "rp50" en vert foncé) et de l'état initial en azote minéral du sol (1, 2, 3) et de la succession de culture, simulé (a) en date du 10/11 au début de période de drainage et (b) du 25/04 de l'année calendaire suivante (trait bleu = moyenne par succession).

3) Différentiel d'azote minéral dans le profil de sol à la récolte de la culture suivante

Il convient d'analyser le profil d'azote minéral à la récolte de la culture suivante pour voir si celle-ci a utilisé efficacement l'azote disponible, et ainsi pouvoir conclure sans risque de mauvaise interprétation, sur l'effet des cultures intermédiaires sur le bilan d'azote et sur l'effet sur le rendement de la culture suivante.

Dans le cas de l'interculture longue, le différentiel d'azote minéral du sol à la récolte est globalement nul en médiane, mais légèrement négatif de quelques kg N/ha en moyenne (Figure 10-57) ; de plus, il varie de -40 à +20 kgN/ha.

Figure 10-57. Différentiel (ou delta) d'azote minéral du sol à la récolte de la culture principale suivante entre culture intermédiaire et sol nu (kgN/ha) en fonction des différents modes de couverts (moutarde "mo" et ray-grass "rg" en vert clair, vesce "ve" en jaune, repousses à 100% de taux de couverture "rp100" et à 50% "rp50" en vert foncé) et de l'état initial en azote minéral du sol (1, 2, 3) et de la succession de culture (trait bleu = moyenne par succession).



Ces résultats indiquent que le maïs suivant a correctement absorbé la quantité d'azote disponible supplémentaire due aux résidus de CI dans les cas des simulations, alors que la fertilisation azotée n'avait pas été ajustée en fonction de la situation avec et sans CI. Cela indique que, pour obtenir un même niveau de rendement après CI, il serait possible de réduire de quelques kgN/ha la fertilisation azotée dans les situations où l'effet de la culture intermédiaire induit un accroissement de la disponibilité en azote minéral pour la culture suivante.

Concernant l'interculture courte, le reliquat d'azote minéral à la récolte du blé est identique avec ou sans CI, avec une très faible variabilité, indiquant ainsi une grande efficacité de la culture suivante pour absorber tout l'azote disponible dans le sol.

4) Minéralisation en azote supplémentaire provenant des résidus de couvert intermédiaire

La dynamique de minéralisation est étudiée en 2 phases distinctes. La première couvrant la période de simulation jusqu'au 25 avril, date à laquelle le drainage et la lixiviation d'azote ont été analysés, et du 25 avril à la récolte de la culture suivante. Cette analyse indique que la restitution en azote entre la date de destruction de la CI et la fin de la période de drainage (25/04) est très variable en fonction de la succession, de l'espèce et de l'état initial. Pour la succession colza-blé, il est même possible que l'incorporation du ray-grass produise de l'organisation de l'azote du sol pour l'état initial d'azote minéral le plus faible, car le rapport C/N de cette CI est élevé. La quantité d'azote restituée varie de -20 à +50 kg N/ha durant cette première phase (Figure 10-58.a).

Durant la seconde phase, du 25/04 à la récolte de la culture suivante, la quantité d'azote minéralisée peut varier de 0 à 30 kg N/ha, indiquant une minéralisation nette d'azote systématique (Figure 10-58.b).

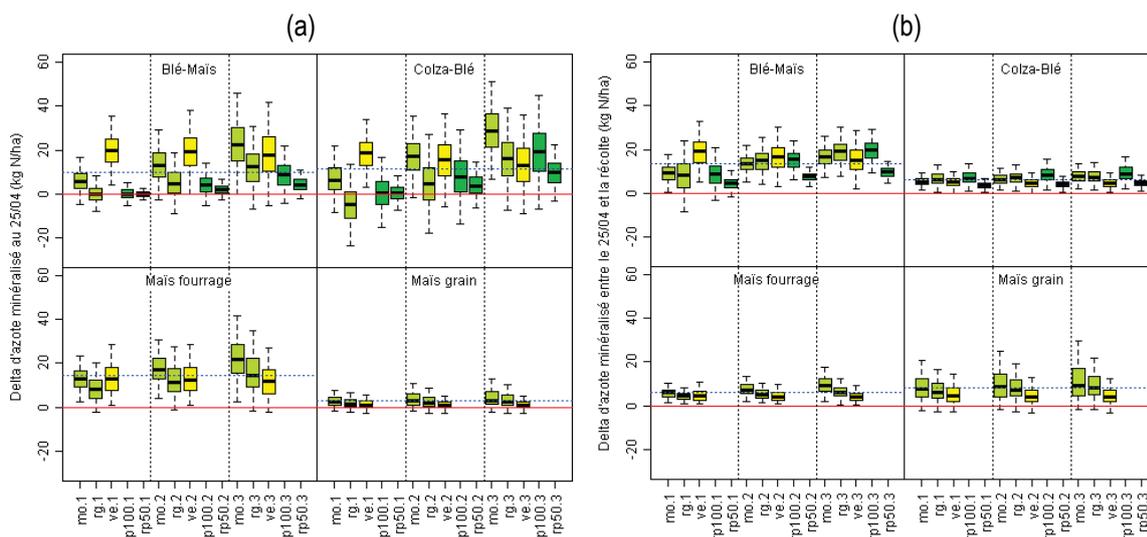


Figure 10-58. Quantité d'azote minéralisé issu des résidus de couvert intermédiaire en fonction des différents modes de couverts (moutarde "mo" et ray-grass "rg" en vert clair, vesce "ve" en jaune, repousses à 100% de taux de couverture "rp100" et à 50% "rp50" en vert foncé) et de l'état initial en azote minéral du sol (1, 2, 3) et de la succession de culture pour deux périodes : (a) entre la date de destruction et le 25/04 et (b) entre le 25/04 et la récolte de la culture suivante (trait bleu = moyenne par succession).

5) Taux de minéralisation en azote des résidus de couvert intermédiaire

Le taux de minéralisation des résidus de couvert intermédiaire entre la date de destruction et la récolte de la culture suivante varie fortement, de -35% à +65% de l'azote accumulé dans les parties aériennes (Figure 10-59). La variabilité la plus forte est obtenue pour le ray-grass et les états initiaux de reliquat faible.

Le taux de minéralisation médian le plus élevé est simulé pour la vesce ; c'est aussi pour cette espèce qu'il est le moins variable. Cela s'explique par un rapport C/N moins variable et plus faible (teneur en azote plus élevée) que celui des espèces non-légumineuses.

Le taux de minéralisation de la moutarde est toujours positif mais également très variable, de 0 à 65% de l'azote accumulé dans les parties aériennes, avec une augmentation significative du taux médian avec le niveau de l'état initial d'azote minéral. Ceci s'explique par une diminution du rapport C/N des résidus de moutarde avec la disponibilité initiale en azote minéral.

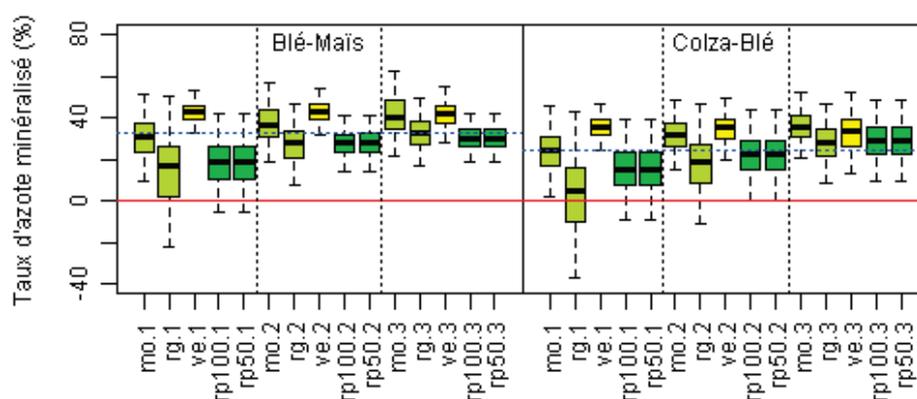


Figure 10-59. Taux de minéralisation des résidus de couvert intermédiaire entre la date de destruction et la récolte de la culture suivante, en fonction des différents modes de couverts (moutarde "mo" et ray-grass "rg" en vert clair, vesce "ve" en jaune, repousses à 100% de taux de couverture "rp100" et à 50% "rp50" en vert foncé) et de l'état initial en azote minéral du sol (1, 2, 3) et de la succession de culture (trait bleu = moyenne par succession).

Le taux de minéralisation médian des repousses de blé et de colza est proche de celui du ray-grass, mais avec une variabilité associée plus faible que pour la graminée fourragère ; ce taux s'accroît également avec le niveau

initial d'azote minéral. Le taux de minéralisation des repousses est identique entre les deux niveaux de taux de couverture de sol, car on simule la même biomasse et la même quantité d'azote absorbé par unité de surface de sol dans les zones de repousses.

10.7.3. Effet du mode de gestion des CI sur le différentiel de rendement de la culture principale suivante

L'analyse de l'effet de la gestion des résidus de culture intermédiaire a été conduite uniquement pour la situation de l'interculture longue blé-maïs (Figure 10-60). Les résidus de CI ont été considérés soit comme enfouis (situation de référence simulée pour tous les résultats présentés précédemment), soit broyés et laissés en mulch en surface du sol, soit exportés (parties aériennes). Ce dernier cas simule un usage de la biomasse en dehors du cadre de définition de la notion de culture intermédiaire, mais correspondrait à la définition d'une culture dérobée, en vue, par exemple de la production de fourrage. Il permet aussi d'analyser l'effet sur le bilan d'azote de la seule restitution au sol des parties racinaires de la culture intermédiaire.

La simulation indique que le mode de gestion des résidus (enfouis ou laissés en surface) aurait peu d'impact sur le rendement de la culture suivante de maïs, et ce pour les trois espèces. Cela indiquerait que la décomposition de résidus "verts" serait peu modifiée et donc que la restitution d'azote serait aussi efficace après un simple broyage de résidus laissés en surface du sol qu'avec un enfouissement favorisant le contact entre la biomasse microbienne du sol et les résidus. Ce résultat doit être discuté car peu de références expérimentales existent, et il est donc difficile de savoir si ce résultat est totalement réaliste ou s'il s'explique aussi en partie par le fonctionnement du modèle STICS (limitation technique actuelle) et le paramétrage de la décomposition, sans compter la non-prise en compte d'éventuelles pertes par volatilisation d'azote ammoniacal, probablement faibles puisque, sauf cas de sols hydromorphes, la nitrification n'est pas un facteur limitant et les quantités d'azote restant sous forme ammoniacale est donc négligeable.

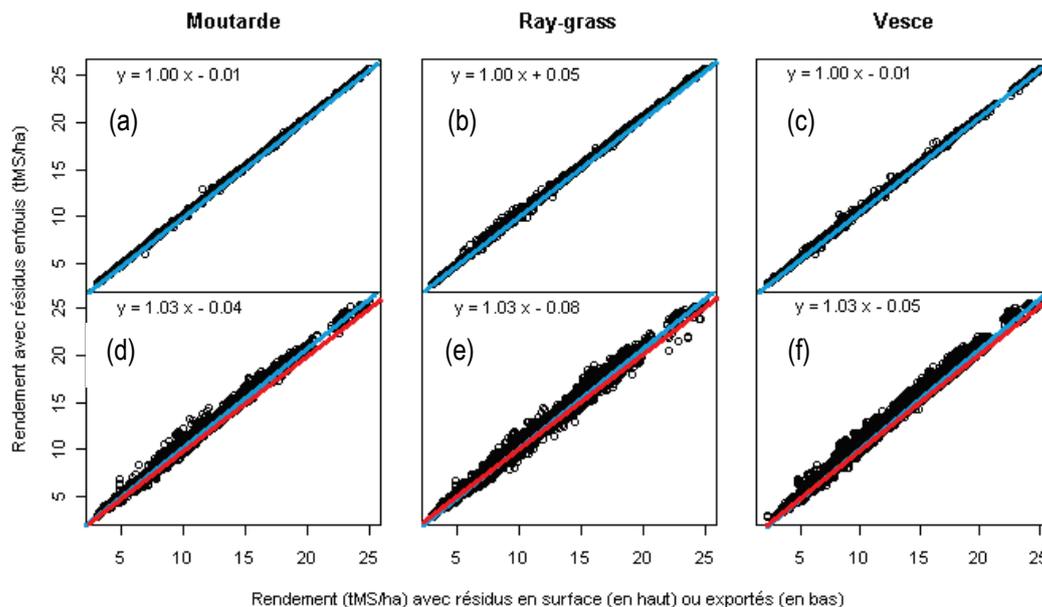


Figure 10-60. Rendement du maïs pour la succession blé-maïs en fonction du mode de gestion des résidus de culture intermédiaire : enfouis (en ordonnée) vs. laissés en surface (a, b, c) et vs. exportés (d, e, f) par espèce de CI (Bissectrice en rouge et droite de régression en bleu), confondues dans les graphes a, b et c)

Par contre, les simulations indiquent clairement que l'exportation des résidus de CI a un effet fort sur la disponibilité en azote et peut induire, soit une large annulation des effets positifs par la restitution des résidus au sol, soit une réduction du rendement de la culture de maïs suivante. Cet effet négatif se produirait en particulier avec le ray-grass et pour une grande partie des sites en particulier les "moins pluvieux". Ces résultats indiquent

qu'en exportant les résidus, on annule l'effet "engrais vert" provenant de la minéralisation de l'azote accumulé dans les parties aériennes, et donc que l'effet de compétition préemptive produit par la culture intermédiaire vis-à-vis de l'azote minéral disponible dans le profil du sol n'est pas compensé par la minéralisation de résidus de CI. Dans ce cas, pour obtenir le même rendement, la fertilisation azotée du maïs suivant devra être augmentée. Cela réduira également le stockage de carbone et d'azote organique dans le sol issu de l'humification qui se produit après la décomposition des résidus.

10.7.4. Analyse de l'effet de l'apport de lisier en interaction avec les CI sur le rendement du maïs suivant

L'effet de l'apport de lisier au semis de la CI sur le rendement de la culture du maïs suivant a été analysé pour la succession blé-maïs sur quelques sites climatiques situés en région de polyculture-élevage. Cette analyse a été réalisée pour les trois états initiaux d'azote minéral du sol et deux doses de lisier de porc, en comparaison d'une situation sans apport d'effluent ; ainsi trois traitements sont analysés avec et sans CI : pas d'apport, 75 et 150 kgN/ha. Tous sites confondus, le rendement du maïs est significativement augmenté par l'apport de lisier au semis de la CI de moutarde ou de ray-grass, quel que soit l'état initial d'azote minéral (Figure 10-61). Ce résultat indique une valorisation de l'apport d'effluent qui accroît de façon importante la disponibilité en azote par rapport à la situation de référence sans apport de lisier. Le rendement du maïs est supérieur lorsque le lisier est épandu avant une CI par rapport au sol nu sans couvert. Cela indique que la culture intermédiaire permet de mieux valoriser le lisier grâce au double rôle de piège à nitrate qui réduit les pertes et de restitution en azote pour la culture du maïs.

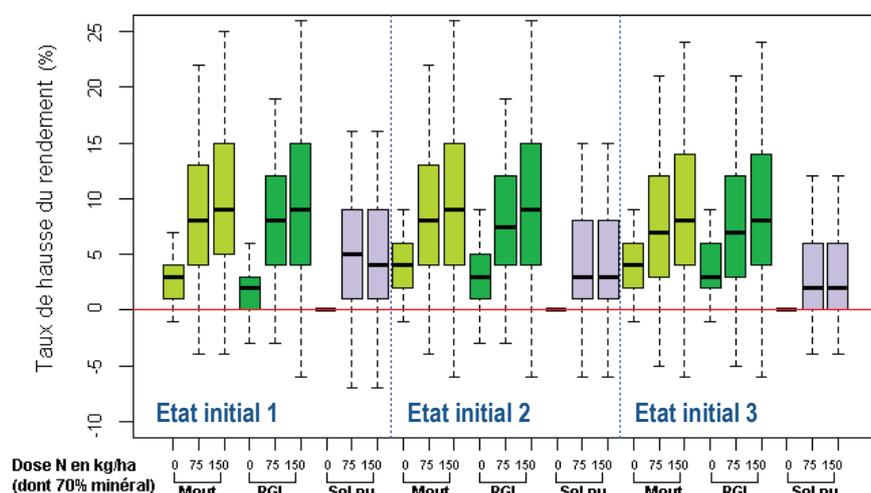


Figure 10-61. Différence de rendement relatif du maïs entre CI et sol nu, exprimée en fonction du rendement référence en sol nu, et sans apport de lisier) pour la succession blé-maïs en fonction de l'espèce de culture intermédiaire (moutarde "Mout" en vert clair, ray-grass "RGI" en foncé et sol nu en violet) et de l'état initial d'azote minéral pour les 2 situations avec apport de lisier au semis (75 et 150 kgN/ha) et la situation sans apport.

Ce résultat global masque cependant une variabilité de réponse entre les 11 sites climatiques, comme illustré pour la moutarde avec les 3 états initiaux d'azote minéral (Figure 10-62). Pour 5 sites, l'augmentation de rendement due à l'apport de lisier est significative. Pour 4 sites, cette augmentation est faible et pour 2 sites, elle ne s'est pas produite. Quand on obtient un accroissement de rendement dû à l'apport de lisier, cette augmentation dépend de la dose de lisier ($L2 > L1$). Ces résultats indiquent que la valorisation du lisier est effective pour la culture de maïs suivante lorsqu'il est absorbé par une CI. Toutefois, il convient de rappeler que cet épandage de lisier ne sera valorisé que si la CI a correctement levé et s'est développée normalement. Il est donc préférable de recommander que l'épandage de lisier ne soit effectué que sur un couvert qui est correctement implanté, pour éviter d'accroître le risque de lixiviation en cas de mauvaise levée de la culture intermédiaire.

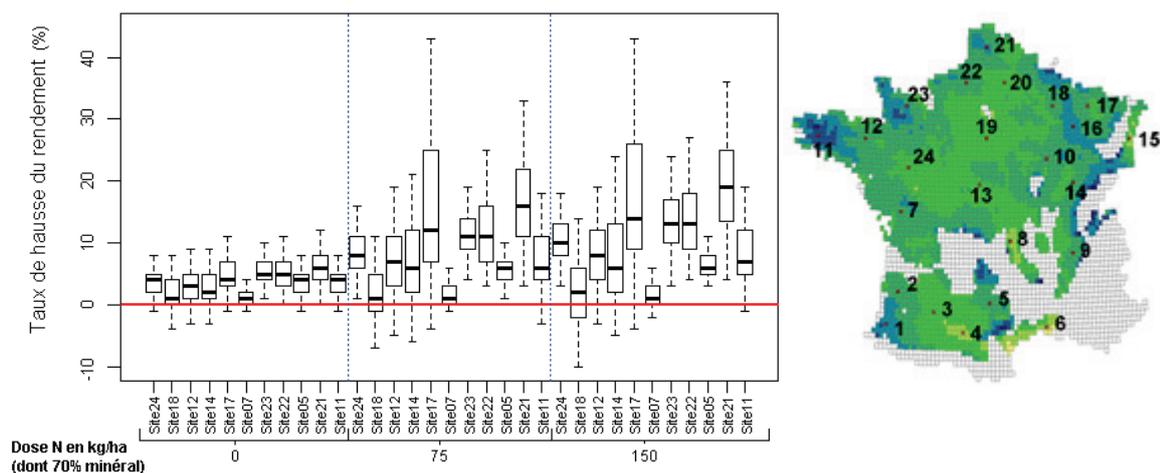


Figure 10-62. Différence de rendement relatif du maïs entre culture intermédiaire et sol nu, exprimée en fonction du rendement référence en sol nu, sans apport de lisier) pour la moutarde dans la succession blé-maïs en fonction du site climatique, avec apport de lisier au semis (75 et 150 kgN/ha) et la situation sans apport (0 kgN/ha).

10.8. Synthèse et conclusions

Nous proposons ci-après une synthèse des résultats principaux obtenus grâce à cette étude par simulation avec le modèle de culture STICS. Nous dresserons *in fine* les conclusions de ce travail.

Nous présenterons d'abord un récapitulatif des effets moyens issus des simulations réalisées pour les 24 sites climatiques et les sols types associés, pour les quatre variables de sortie majeures pour évaluer l'effet des modes de gestion de l'interculture : la lixiviation, le drainage, le taux d'abattement de la teneur en nitrate et le rendement de la culture suivante. Comme nous avons montré précédemment que la variabilité de réponse peut être importante entre, d'une part, les trois états initiaux d'azote minéral, et d'autre part, les sites climatiques, nous illustrerons les résultats déclinés pour ces 3 états initiaux puis pour 6 sites contrastés.

Nous traiterons spécifiquement de la question de l'efficacité des CI en sols argileux pour lesquels il peut être nécessaire de réaliser un travail du sol précoce ; dans ce cas, nous déclinons les résultats pour 4 sites climatiques contrastés.

Enfin, nous terminerons par une évaluation pour chaque site climatique des probabilités :

- de faible efficacité des cultures intermédiaires pour abattre la teneur en nitrate d'au moins 25% d'une part, et des probabilités d'effets indésirables d'autre part soit par une réduction forte du volume de drainage soit par un impact négatif sur le rendement de la culture suivante.
- de forte efficacité des cultures intermédiaires pour abattre la teneur en nitrate de plus de 75% d'une part, et des probabilités d'effets minimes sur les réductions de volume d'eau drainée et positifs sur le rendement de la culture suivante, d'autre part.

10.8.1. Synthèse des effets des modes de gestion sur la lixiviation, le drainage, le taux d'abattement de la teneur en nitrate et le rendement de culture suivante

10.8.1.1. Effets moyens sur l'ensemble des sites par état initial en azote minéral du sol

La Figure 10-63 présente les résultats moyens de l'azote acquis, les différentiels de lixiviation, de drainage et de rendement obtenus entre une interculture en sol nu et différents modes de gestion de l'interculture dans les différentes successions. Pour que la comparaison ne soit pas biaisée, les dates de levée considérées ici pour les cultures intermédiaires correspondent à celles testées pour les repousses (soit le 25/7 et le 10/8).

En moyenne pour tous les sites, on simule une efficacité forte des CI non-légumineuses pour réduire les pertes d'azote nitrique et la teneur en nitrate de l'eau de drainage, aussi bien dans les successions longue de type blé-maïs que courte de type colza-blé. Ainsi, les simulations indiquent une efficacité forte de la moutarde, du ray-grass et des repousses 100%TC (TC = taux de couverture) dans deux successions, longue et courte, pour :

- réduire la lixiviation en moyenne de 35 à 65 kgN/ha (de l'état initial 1 à 3) *via* une absorption d'azote de 45 à 100 kg N/ha (de l'état initial 1 à 3) ;
- abattre la teneur en nitrate de l'eau de drainage en moyenne de 80 à 60% (de l'état initial 1 à 3).

Le niveau d'abattement de la teneur en nitrate est quasiment aussi élevé en situation d'interculture courte qu'en situation d'interculture longue, illustrant l'intérêt d'insérer les cultures intermédiaires autant que possible ou de favoriser les repousses de colza dans les systèmes de culture pour réduire les pertes d'azote et la concentration en nitrate des eaux de drainage. Cette conclusion est en accord avec les résultats expérimentaux obtenus en France depuis de nombreuses années (travaux du CETIOM, d'Arvalis-Institut du Végétal et de l'ITB ; documents "cultures intermédiaires" 2011) et avec la littérature scientifique (cf. Chapitre 4).

La vesce et les repousses 50%TC conduisent à un niveau de réduction de lixiviation proche pour les deux couverts, allant de 45 à 30% correspondant à 15 à 40 kgN/ha (de l'état initial 1 à 3). Bien que sensiblement plus faible que pour la moutarde et le RGI, l'effet de la vesce serait significatif sur la réduction de la lixiviation et de la concentration en nitrate de l'eau de drainage. Cela permet de supposer que des mélanges d'espèces avec des légumineuses pourraient permettre d'obtenir une bonne efficacité de piégeage de nitrate et d'améliorer la restitution d'azote à la culture suivante. Les légumineuses pourraient donc être utilisées en culture intermédiaire en particulier en mélange équilibré avec une ou des espèce(s) non-légumineuse(s) afin de conjuguer les fonctions de "piège à nitrate" et d'"engrais vert". Néanmoins des travaux spécifiques et des simulations complémentaires seraient nécessaires pour quantifier l'efficacité de ce type de mélange vis-à-vis de la réduction de la lixiviation et de la concentration nitrique de l'eau de drainage.

L'efficacité de l'incorporation des pailles ou résidus de récolte du précédent cultural pour réduire la lixiviation et la concentration nitrique de l'eau de drainage due à l'organisation nette d'azote qu'elle induit, est significative. Toutefois, cet effet est faible et d'un niveau d'efficacité 4 à 5 fois moindre que celui des couverts intermédiaires.

L'efficacité des cultures intermédiaires et des repousses décroît avec l'augmentation du niveau d'azote minéral initial, mais cette efficacité reste en moyenne largement supérieure à 50% même avec l'état initial 3 (fort reliquat). Il aurait été intéressant de tester l'effet de la répartition de l'azote minéral dans le profil de sol sur cette efficacité de piégeage, car plus le profil contiendra proportionnellement d'azote minéral dans les horizons profonds et moins cette efficacité pourrait être effective pour des espèces à faible vitesse d'enracinement en profondeur. Toutefois, réaliser cette analyse reviendrait à vérifier si les cultures intermédiaires peuvent être efficaces pour "rattraper" des situations de mauvaise gestion de l'azote répétées (avec un effet cumulatif à l'échelle de la rotation). Une analyse complémentaire serait donc utile pour traiter de cette question. Cela reviendrait à analyser si, en situation de pratiques récurrentes de sur-fertilisation en azote ou d'ajustement non-optimal dû à des incidents climatiques, les CI seront toujours aussi efficaces, voire d'autant plus utiles et efficaces pour réduire la lixiviation et la concentration nitrique de l'eau de drainage. Dans cette situation particulière, le choix d'espèces de CI avec des capacités d'enracinement profond et rapide pourrait s'avérer intéressant.

L'efficacité démontrée des couverts intermédiaires pour réduire les pertes d'azote nitrique s'accompagne cependant d'une réduction du volume de drainage à l'échelle de la parcelle, par l'effet de consommation supplémentaire en eau des cultures intermédiaires et des repousses 100%TC. Cette réduction du drainage est en moyenne et médiane de 30 à 40 mm, quel que soit l'état initial d'azote minéral. Le RGI et les repousses de blé ont un impact légèrement plus élevé sur le drainage que la moutarde. Les repousses de blé à 50%TC consomment 2 fois moins d'eau que la vesce, car la biomasse qu'elles produisent est nettement plus faible (environ deux fois moins). Cependant, si la date de destruction n'est pas trop tardive (avant l'hiver calendaire), les cultures intermédiaires n'ont pas d'effet significatif sur la réserve en eau du sol et donc sur l'alimentation en eau de la culture suivante. La réduction du volume de drainage simulée à l'échelle de la parcelle et de la succession devra être analysée à l'échelle de la rotation et du bassin versant pour quantifier l'effet sur la recharge des nappes. Cette quantification ne faisait pas l'objet de la présente étude ; elle nécessiterait de réaliser une étude hydrologique, forcément spécifique de conditions hydrogéologiques locales, difficilement généralisables à l'échelle du territoire français.

De plus, d'autres conclusions spécifiques de chaque succession sont à retenir, à savoir :

- Successions blé-maïs et colza-blé

Le rendement de la culture suivante n'est pas affecté en moyenne (avec le même niveau de fertilisation azotée qu'en sol nu), et serait même légèrement augmenté pour les reliquats initiaux les plus élevés (états 2 et 3). Par contre, comme attendu, l'impact moyen sur le rendement est supérieur pour la légumineuse car plus d'azote est présent dans la CI, et comme le rapport C/N est aussi supérieur, davantage d'azote est libéré pour la culture suivante.

- Succession colza-blé

L'efficacité forte des couverts intermédiaires pour réduire la lixiviation et la concentration en nitrate de l'eau de drainage a pour corollaire d'induire un effet significatif légèrement négatif sur le rendement du blé suivant par compétition préemptive d'azote. Cet effet moyen est plus sensible avec le RGI et les repousses de colza (qui lèvent tôt) qu'avec la moutarde, mais ne se produit pas avec la vesce qui restitue plus d'azote à la culture suivante.

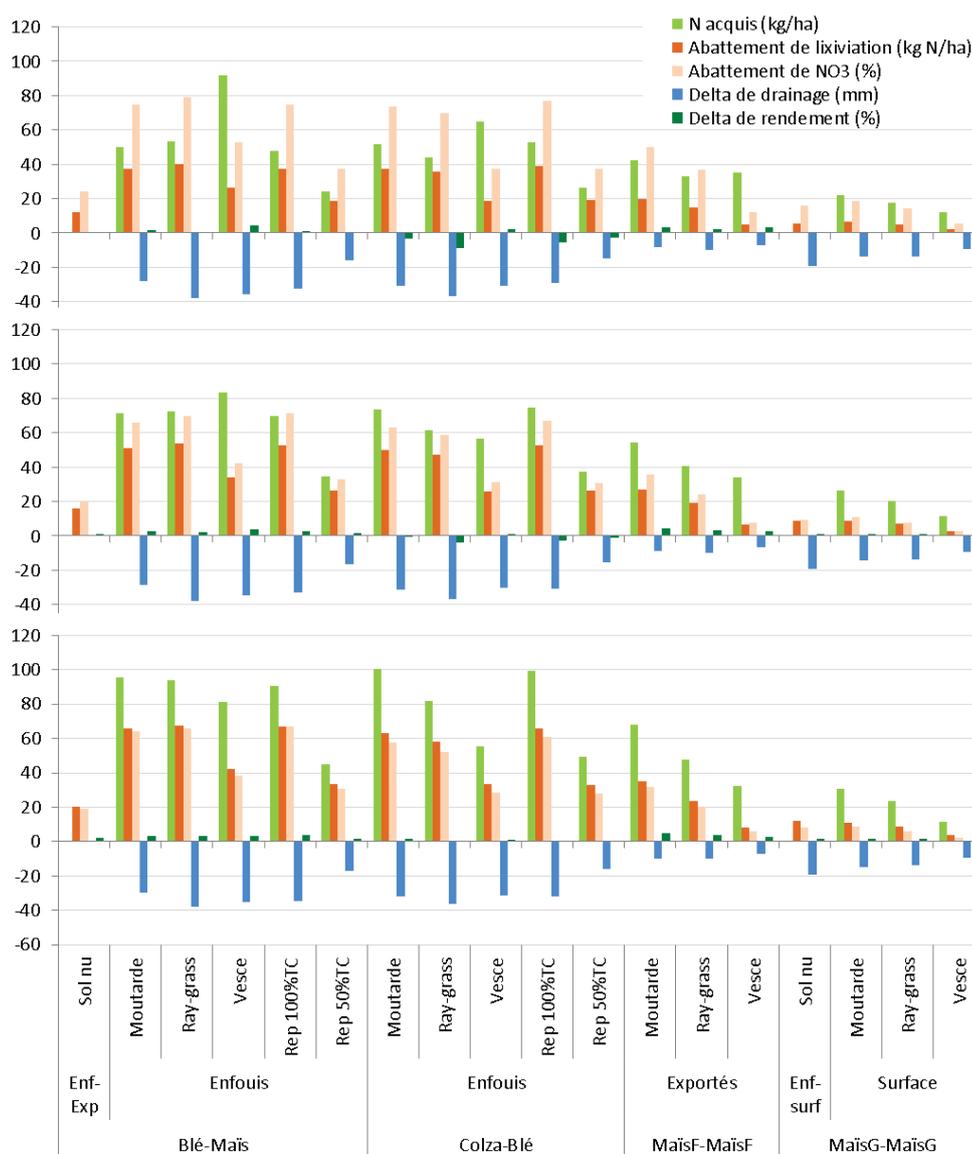


Figure 10-63. Graphique récapitulatif de l'azote acquis par le couvert, de l'abattement de lixiviation, du taux d'abattement de concentration nitrique et du différentiel (ou delta) de drainage et de rendement obtenus entre différents modes de gestion de l'interculture et une interculture en sol nu, dans chaque succession. Les résultats correspondent à la moyenne des simulations pour tous sites et sols confondus, pour les états initiaux 1 (a), 2 (b) et 3 (c). Pour les "sols nus", le différentiel porte sur la différence entre deux modes de gestion des résidus du précédent. ("rep100%TC" et "rep50%TC" = repousses avec un taux de couverture de 100 ou 50% ; "Enf-Exp" et "Enf-Surf" = résidus du précédent enfouis (Enf) - résidus du précédent exportés (Exp) ou en surface (Surf))

- Succession maïs-maïs

Les résultats sont différents selon que l'on est dans une succession après maïs fourrage ou après maïs grain. La date de levée simulée de la CI étant plus précoce (fin septembre) après maïs fourrage, elle permet d'obtenir une efficacité notable après maïs fourrage pour réduire la lixiviation et la teneur en nitrate de l'eau de drainage. Le taux d'abattement moyen varie de 40 à 50% au mieux avec l'état 1 à seulement 20% avec l'état initial 3. Cela indique que la culture intermédiaire n'est pas en mesure de piéger tout l'azote minéral du profil initial du sol avant que les flux de drainage soient importants et entraînent l'azote nitrique hors de la portée des racines. Enfin, et comme attendu, la vesce a une très faible efficacité, avec un taux d'abattement inférieur à 10%, indiquant qu'elle n'est pas un "piège à nitrate" efficace dans ces conditions.

Dans le cas de l'interculture après maïs grain (levée fin octobre), l'efficacité est en moyenne très faible et les taux d'abattement de la teneur en nitrate sont inférieurs à 20% (état initial 1) et même 10% (états initiaux 2 et 3). Cette situation illustre le fait que le phénomène de compétition temporelle entre absorption d'azote et lixiviation décrit par Meisinger et al. (1991) joue contre l'efficacité des CI, car la vitesse de transfert des ions nitrate dans le profil de sol est supérieure à celle de l'enracinement et de l'absorption d'azote minéral.

Par ailleurs, il est préférable d'incorporer les cannes de maïs plutôt que de les laisser en mulch en surface si l'on cherche à réduire la lixiviation ; cet effet sera du même ordre de grandeur qu'une CI après maïs grain.

Toutefois, cette analyse globale masque une variabilité de réponse selon les sites climatiques. Ne pouvant être exhaustifs pour chacun des 24 sites simulés dans ce présent rapport, nous avons cherché à présenter les résultats à travers une déclinaison des 6 sites climatiques déjà analysés précédemment pour les bilans d'eau et, d'azote et l'effet sur la culture suivante.

10.8.1.2. Effets principaux déclinés selon la pluviométrie du site

La Figure 10-64 présente les résultats moyens de l'azote acquis par la CI, des valeurs de différentiel de lixiviation, de drainage et de rendement simulés entre une situation d'interculture conduite en sol nu et différents modes de gestion de l'interculture dans les différentes successions pour 6 sites climatiques. Ces sites varient par leur niveau de pluviométrie annuelle et par leur localisation Nord-Sud : a) site 1 (Sud-Ouest, très pluvieux), b) site 11 (Ouest, très pluvieux), c) site 11 (Nord-Est, pluvieux), d) site 6 (Sud-Est, peu pluvieux), e) site 4 (Sud-Ouest, moyennement pluvieux) et f) site 19 (Centre, peu pluvieux). Le choix des sites présentés ici permet d'illustrer des différences notables dans les résultats obtenus par simulation. Les résultats moyens représentent la moyenne pour les deux dates précoces de levée dans le cas de l'état initial 2, ceci afin d'analyser un effet "site" moyen, en l'absence de connaissances *a priori* du climat et donc des dates optimales de levée et de destruction pour chaque site.

Les principales conclusions sont les suivantes :

- Les simulations indiquent une efficacité moyenne des CI (et des repousses) très nettement plus faible dans le site 6 pour les deux successions blé-maïs et colza-blé, due à des dates de levée trop précoces. Par contre, c'est l'un des sites testés (avec les sites 1 et 4 dans le Sud de la France) où le semis d'une CI, notamment de moutarde, après maïs grain (levée fin octobre) permet d'avoir une efficacité significative pour réduire la lixiviation et la teneur en nitrate, car l'absorption d'azote peut se produire durant l'automne et l'hiver grâce à une température moyenne et un cumul de rayonnement solaire supérieurs aux autres sites climatiques ;
- L'efficacité pour réduire la lixiviation (en quantité d'azote/ha) est nettement plus forte pour les sites très pluvieux de l'Ouest de la France, aussi bien du Sud que du Nord (sites 1 et 11), que pour les autres sites. Néanmoins, malgré des différences fortes de pluviométrie qui se traduisent par des différences en terme de niveau de réduction de la lixiviation par les CI en quantité d'azote/ha, le taux d'abattement moyen de la concentration en nitrate est élevé (> 50%) aussi bien pour les sites pluvieux (sites 1, 11 et 16) que pour les sites moins pluvieux (4, 19). Cela démontre l'intérêt des cultures intermédiaires et des repousses homogènes (100% TC) pour réduire la concentration nitrique de l'eau de drainage dans une large gamme de pédoclimats français se différenciant par le niveau de drainage et de lixiviation d'azote nitrique.

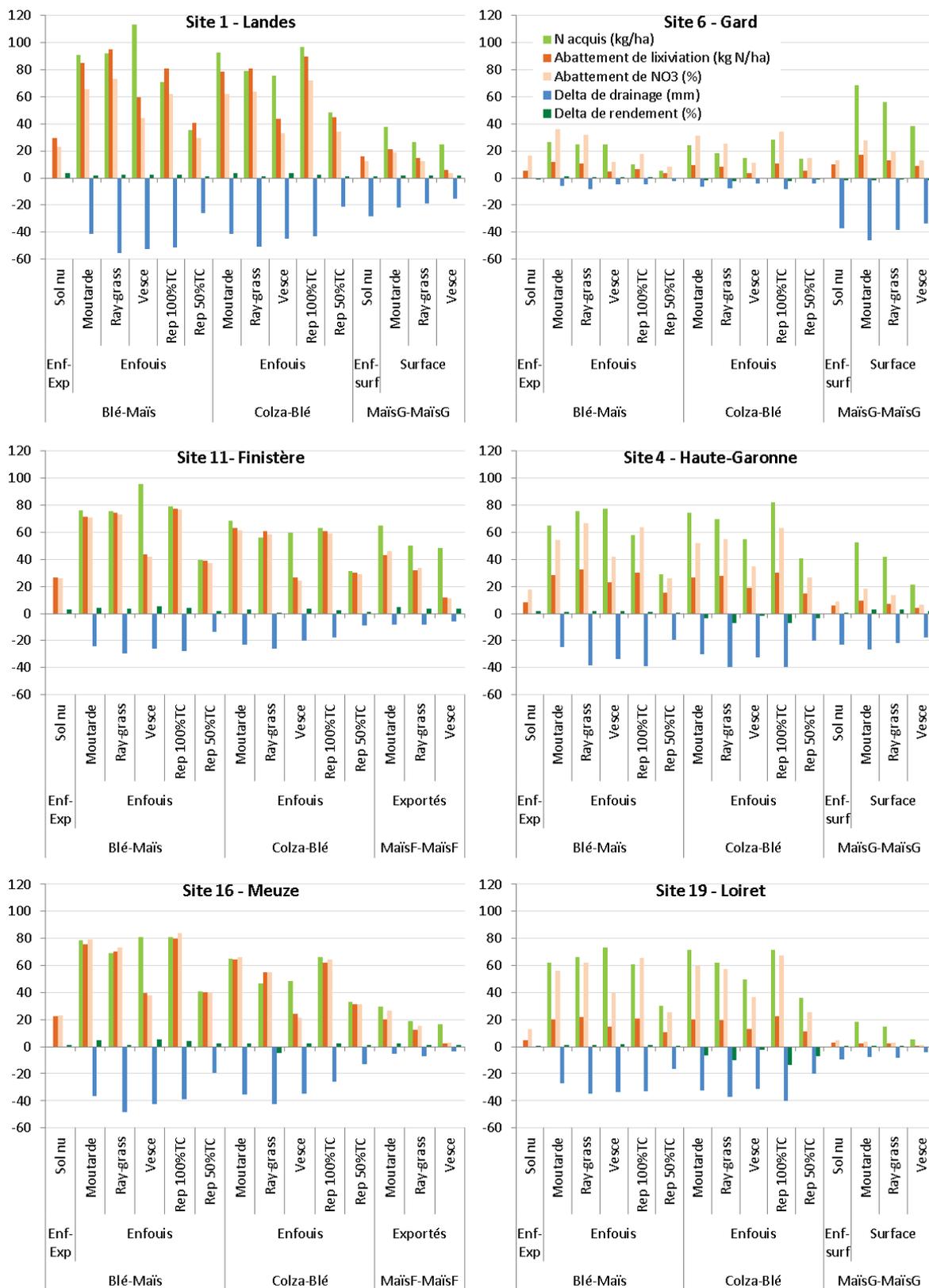


Figure 10-64. Graphiques récapitulatifs de l'azote acquis par le couvert, de l'abattement de lixiviation, du taux d'abattement de la concentration nitrique et du différentiel (ou delta) de drainage et de rendement pour les différents modes de gestion de l'interculture dans chaque succession, pour 6 sites contrastés, pluvieux à gauche (1, 11 et 16) et plus secs à droite (6, 4, et 19), avec un état initial 2 ("rep100%TC" et "rep50%TC" = repousses avec un taux de couverture de 100 ou 50% ; "Enf-Exp" et "Enf-Surf" = résidus du précédent enfouis (Enf) - résidus du précédent exportés (Exp) ou en surface (Surf)).

Ce résultat indique que plus le site est pluvieux, plus la réduction de la lixiviation (en quantité/ha) est élevée, et s'explique par le fait que la quantité d'azote absorbée par la CI est plus élevée (moins de stress hydrique et plus d'azote minéral disponible par minéralisation du sol). Ainsi, pour les sites moins pluvieux (sites 4 et 19), la réduction de la quantité d'azote lixivié ne correspond qu'à environ la moitié de l'azote absorbé par la CI, car les niveaux de drainage et de lixiviation en sol nu sont nettement plus faibles en moyenne interannuelle que pour les sites pluvieux. Par contre, pour les sites très pluvieux (sites 1 et 11), la quantité d'azote absorbée par la CI correspond au différentiel de lixiviation (quantité de N/ha "sauvegardé" par la CI). Nous rappelons cependant que le taux d'abattement de la concentration nitrique peut être élevé aussi dans les sites ayant les drainages les plus faibles (hormis le site 6).

La conséquence est que les sites peu pluvieux vont être sujets aux phénomènes de compétition préemptive vis-à-vis de l'azote car le niveau de lixiviation est plus faible qu'en site pluvieux. Cet effet se répercute par un effet légèrement négatif sur le rendement de la culture suivante (à même niveau de fertilisation azotée) dans le cas des sites peu pluvieux pour la succession courte colza-blé (sites 4 et 19). Cet effet négatif sur la culture suivante n'est pas simulé pour les sites pluvieux car le double effet i) de piégeage de l'azote minéral initial du sol, et donc de "sauvegarde" vis-à-vis de la lixiviation, et ii) de restitution d'azote à la culture suivante, est supérieur à l'effet d'organisation créé par le couvert intermédiaire. Ceci est dû au fait que la lixiviation ne concerne pas tout l'azote minéral initial du sol, et que la majeure partie de l'azote absorbé par la CI se retrouve *in fine* sous forme d'azote organique dans le sol et n'est pas disponible pour la culture suivante ; dans ce cas, la CI permet un stockage d'azote organique dans le sol et réduit la disponibilité pour la culture suivante.

10.8.3. Impact des cultures intermédiaires en cas de destruction précoce (1/10), dans le cas de sols argileux et pour divers sites climatiques

La Figure 10-65 présente les taux d'abattement et l'impact sur la lixiviation et le drainage de CI levées entre le 25 juillet et le 25 août (moyenne pour les 3 dates) et détruites précocement au 1^{er} octobre pour la succession blé-maïs, sur des sols ayant des teneurs en argile de plus de 35%, et pour des sites ayant des caractéristiques contrastées en termes de pluviométrie et de température.

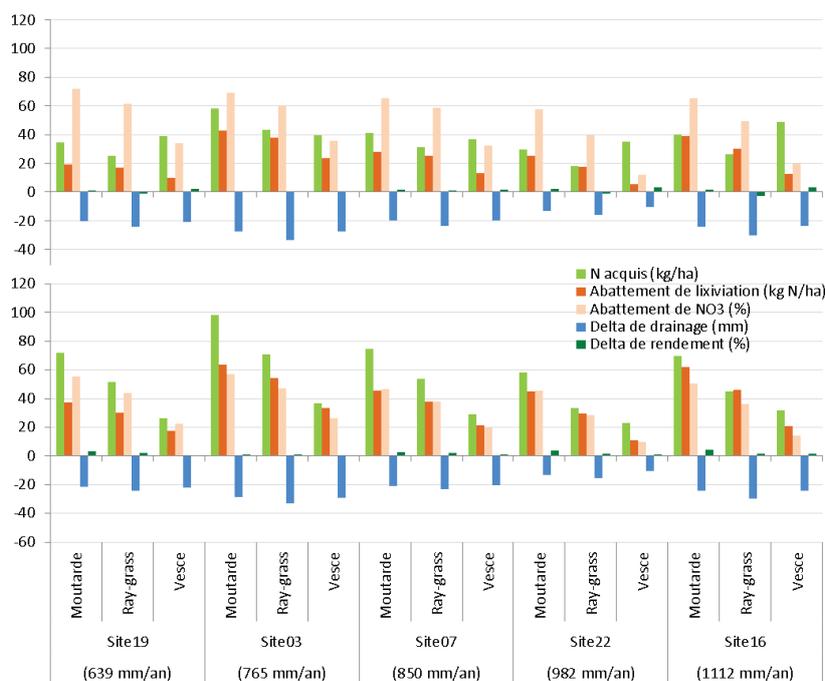


Figure 10-65. Graphiques récapitulatifs de l'azote acquis par la CI, de l'abattement de lixiviation, du taux d'abattement de la concentration nitrique et du différentiel (ou delta) de drainage et de rendement en cas de destruction précoce (1/10) de CI ayant levé entre le 25/7 et le 25/8, pour 4 sites contrastés (avec pluviométrie annuelle) sur des sols argileux (>35%) et un niveau d'azote minéral initial 1 (en haut) et 3 (en bas).

Ces résultats indiquent que, pour les différents sites climatiques testés, l'efficacité d'une CI peut être élevée et de bon niveau même en cas de destruction précoce au 1^{er} octobre. En effet, le taux d'abattement de la teneur en nitrate dû à l'effet de la moutarde est compris entre 70-65 et 55-45%, respectivement pour les états initiaux 1 et 3. Cela indique qu'il est toujours utile et efficace d'implanter une CI même s'il est nécessaire de la détruire précocement par travail du sol en situation de sol argileux. Cette efficacité des CI est simulée aussi bien pour des sites peu pluvieux (640 mm/an) que très pluvieux (1100 mm/an) ; elle s'explique par le développement et la croissance rapide des cultures de type crucifère (moutarde) une fois le couvert levé. Il convient donc dans ces situations de bien adapter la date et le mode de semis pour maximiser les chances de succès de la CI ; il sera donc judicieux de ne pas forcément semer trop tôt si le sol est sec afin de ne pas pénaliser l'installation de la CI à cause de stress hydriques jouant sur la levée et sur la croissance ultérieure.

De plus, il convient de souligner que c'est dans ces conditions de date de destruction précoce que l'effet de l'espèce choisie est le plus prépondérant. Ainsi, le RGI est moins efficace que la moutarde lorsque la période de croissance est réduite, et comme attendu, la vesce est très nettement moins efficace pour réduire la concentration en nitrate, bien que son effet ne soit cependant pas nul.

Enfin, aucun effet négatif pour la culture suivante n'est simulé si la CI est une moutarde ou une vesce, contrairement aux résultats obtenus pour le RGI. Dans ces situations, les espèces à croissance rapide, comme les crucifères, seront plus efficaces pour réduire la lixiviation et la concentration nitrique de l'eau de drainage.

10.8.4. Synthèse de l'efficacité des cultures intermédiaires en fonction des dates de levée et de destruction pour des sites climatiques contrastés

10.8.4.1. Effet de la date de levée : exemple de la moutarde détruite au 10/12

La Figure 10-66 présente les taux d'abattement et l'impact sur la lixiviation et le drainage de CI pour les différentes dates de levée de la moutarde avec une date de destruction au 10/12, qui permet d'obtenir un fort taux d'abattement de la teneur en nitrate pour l'ensemble des sites. Cet effet est illustré pour 3 sites dont la réponse simulée est contrastée, à savoir que la date optimale de levée est, en moyenne interannuelle, différente entre sites vis-à-vis du taux d'abattement de la concentration en nitrate de l'eau de drainage :

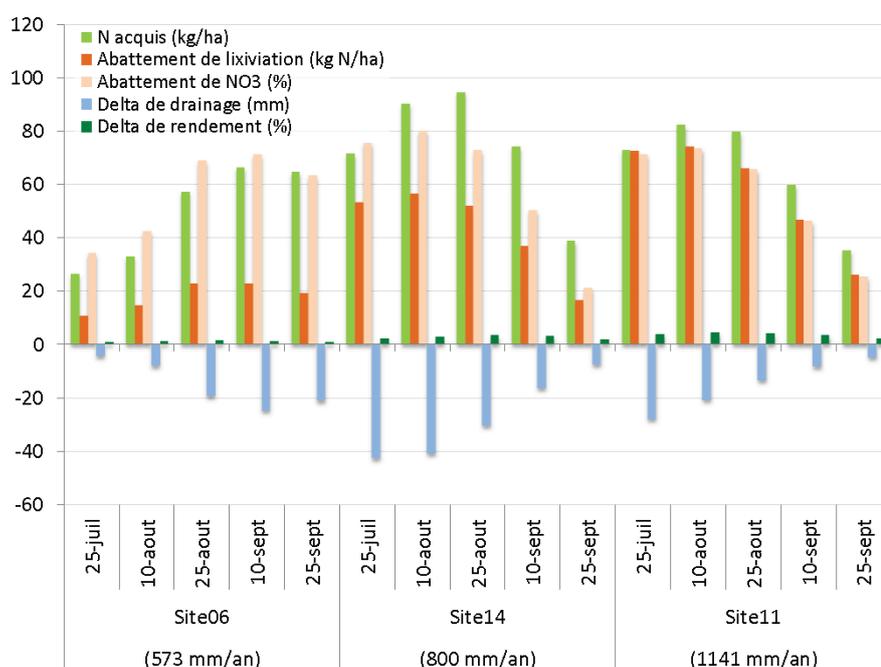


Figure 10-66. Graphique récapitulatif de l'azote acquis par la CI, de l'abattement de lixiviation, du taux d'abattement de la concentration nitrique, et du différentiel (ou delta) de drainage et de rendement selon la date de levée de la moutarde détruite au 10/12, pour 3 sites climatiques contrastés (avec leur pluviométrie annuelle).

- Pour le site 6 (Sud-Est, peu pluvieux), l'efficacité de la CI est fortement accrue avec la tardivité de la date de levée (et donc de semis). Ainsi, sous ce climat, la date de levée optimale est le 10 septembre, voire le 25 septembre, si on veut réduire la consommation en eau et donc l'effet sur le drainage ;
- Pour le site 14 (Centre-Est, moyennement pluvieux), la date optimale de levée est nettement plus précoce, au 10 août, et au plus tard le 25 août pour garder une très bonne efficacité du taux d'abattement de la concentration nitrique sans avoir de forte réduction du drainage. Les deux dates de levée les plus tardives sont ainsi les plus efficaces ;
- Pour le site 11 (Ouest, très pluvieux), comme pour le site 14, on simule une diminution importante de l'efficacité de la CI pour réduire la concentration en nitrate de l'eau de drainage au-delà d'une date de levée au 25/08. Une date de levée au 10 août est sans doute à viser pour maximiser l'efficacité de la moutarde en regard du niveau important de drainage et de lixiviation ; dans ce site climatique, la réduction du niveau de drainage est plus faible malgré une forte quantité d'azote absorbée par la moutarde.

Enfin, des effets positifs sur la culture suivante sont simulés, et ce d'autant plus que le site est pluvieux.

10.8.4.2. Effet de la date de destruction : exemple du ray-grass levé au 10/8

La Figure 10-67 présente l'effet de la date de destruction pour une CI de RGI semée le 10 août pour les 3 sites contrastés sélectionnés auparavant pour analyser l'effet de la date de levée.

Contrairement aux résultats précédents concernant l'effet de la date de levée, l'effet de la date de destruction est moins sensible sur le taux d'abattement de la concentration en nitrate et est même quasiment nul dans certains cas, comme illustré par le site 14. Ce résultat est logique dans la mesure où plus la destruction est tardive et moins la CI va être efficace pour absorber l'azote minéral, car la croissance se ralentit et la disponibilité en azote minéral du sol s'amenuise fortement en raison de l'efficacité du piégeage du RGI. L'accroissement de l'efficacité est significatif pour le site 11 car la pluviométrie hivernale est importante et le RGI est capable d'absorber l'azote disponible durant l'automne et l'hiver ; cet azote provient essentiellement de la minéralisation en azote du sol.

Ainsi, comme indiqué précédemment, le gain sur la lixiviation devient marginal au-delà du 10 décembre. Aussi, sauf cas de site très pluvieux, il n'est pas utile de détruire trop tardivement la CI afin d'éviter d'avoir une consommation d'eau supplémentaire, même si celle-ci est faible, et surtout de favoriser la restitution d'azote à la culture suivante et donc de réduire les risques d'effet négatif sur le rendement de la culture suivante.

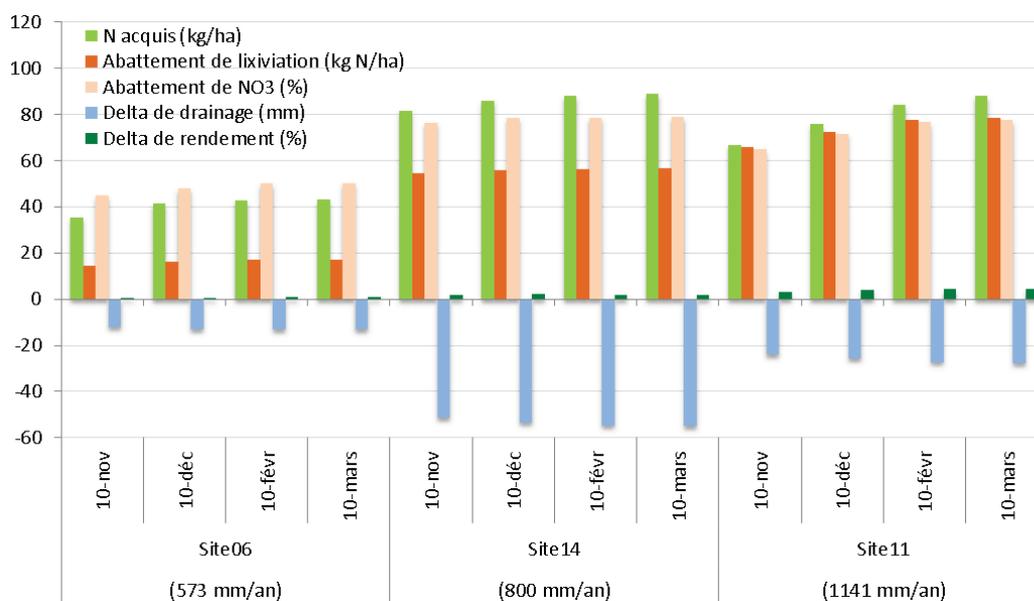


Figure 10-67. Graphique récapitulatif de l'azote acquis par la CI, de l'abattement de lixiviation, du taux d'abattement de la concentration nitrique et du différentiel (ou delta) de drainage et de rendement, selon la date de destruction du ray-grass levé au 10/8, pour 3 sites climatiques contrastés (avec leur pluviométrie annuelle).

10.8.5. Probabilité d'occurrence de faible efficacité et d'effets indésirables des cultures intermédiaires par site climatique selon l'espèce et la date de levée

Nous avons cherché à évaluer la probabilité d'obtenir, d'une part, des effets faibles que l'on pourrait qualifier "d'insuffisants" des CI sur la lixiviation, et d'autre part, d'avoir des effets indésirables sur le rendement de la culture suivante et le drainage (réduction forte du drainage ou différentiel de drainage très négatif).

Pour cela, nous avons calculé la fréquence d'atteinte des différentes conditions à partir de la simulation des 20 années climatiques. Nous considérons que la fréquence des résultats simulés peut être considérée comme une probabilité d'obtenir ce résultat, compte tenu du nombre assez grand de répétitions des simulations (20 ans) pour chaque sol et modalité technique testée.

Nous avons choisi de calculer les fréquences (probabilités), par site climatique, par espèce de CI et pour chaque date de levée.

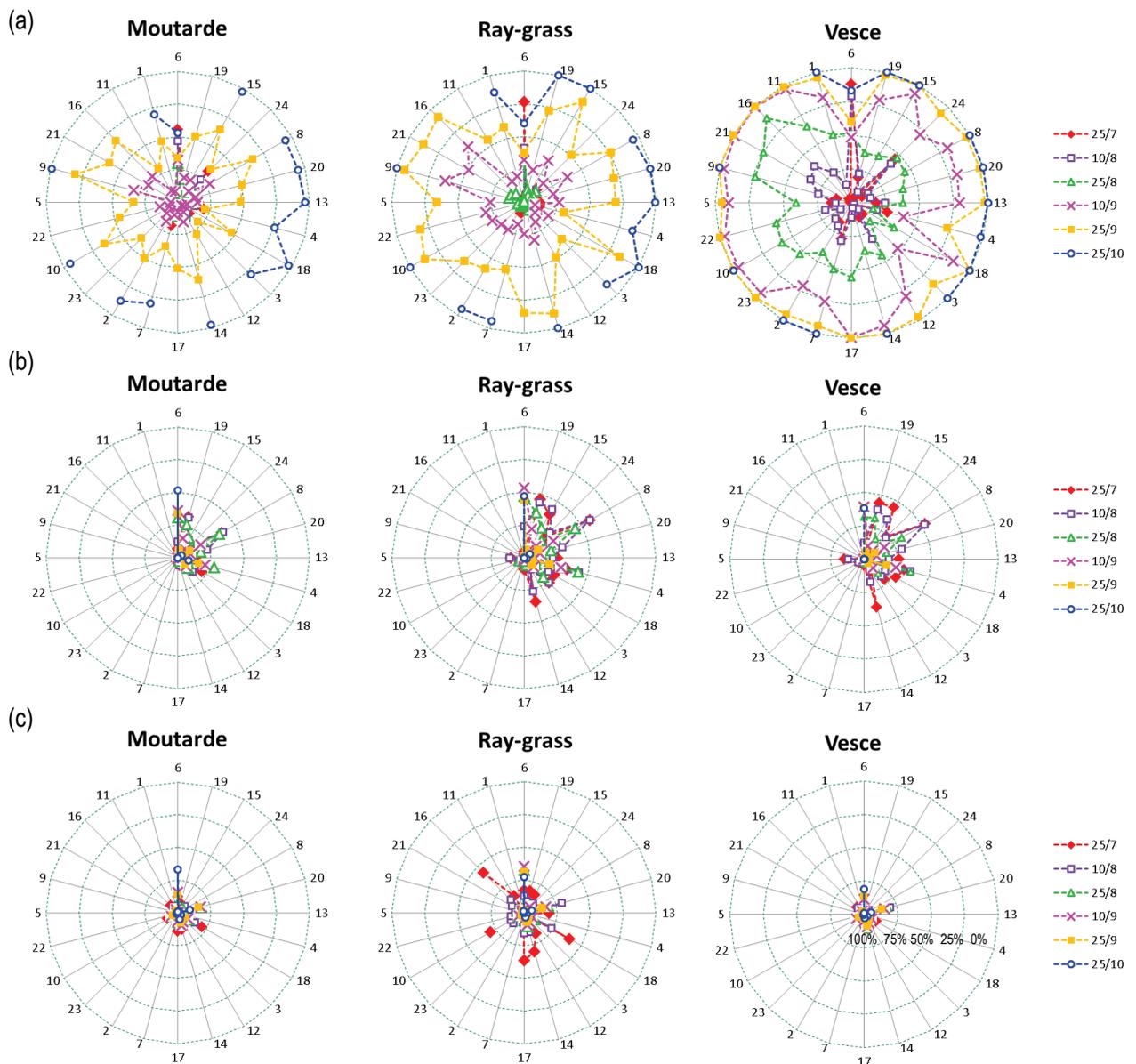


Figure 10-68. Probabilité sur 20 ans d'avoir une culture intermédiaire qui réduit la concentration nitrique de plus de 25% (a), qui induit une diminution du drainage de moins de 25% (b) et qui ne diminue pas le rendement de la culture suivante (c) par rapport au sol nu, en la détruisant au plus tôt le 10/12, selon les sites (1 à 24 en rayons) classés par ordre de pluviométrie annuelle, et la date de levée (25/7 au 25/10) (le centre représente une fréquence de 100% d'évitement de la situation indésirable jusqu'à 0% d'évitement de cette situation "à risque" ou inefficace).

Afin d'évaluer la probabilité d'obtenir des cas d'insuffisante efficacité ou d'occurrence d'effet indésirable des CI, les indicateurs et critères choisis sont les suivants (Figure 10-68) :

- Un taux d'abattement de la concentration nitrique inférieur à 25% par rapport au sol nu, indiquant une faible efficacité de la culture intermédiaire ;
 - Un drainage réduit de plus de 25%, indiquant un fort impact potentiel à l'échelle de la parcelle sur la recharge en eau de la nappe phréatique ;
 - Un impact négatif sur le rendement de la culture suivante, indiquant un effet de compétition préemptive notamment vis-à-vis du bilan en azote.
- Concernant la probabilité d'insuffisance d'efficacité pour réduire la lixiviation

Globalement, et comme déjà indiqué, la moutarde est l'espèce qui permet d'obtenir la probabilité d'occurrence de faible efficacité de la culture intermédiaire la plus faible pour réduire la concentration en nitrate de l'eau de drainage, tant que la date de levée est suffisamment précoce, notamment pour les sites climatiques les plus pluvieux. Cela indique que la moutarde est l'espèce la plus efficace pour réduire la lixiviation et la concentration en nitrate de l'eau de drainage. Comme attendu, la vesce est l'espèce pour laquelle la probabilité de faible efficacité est la plus élevée, notamment lorsque la levée se produit après le 10 août ; ce n'est donc pas une espèce à privilégier pour réduire la lixiviation. Le RGI présente une probabilité intermédiaire, mais sensiblement plus proche de l'effet de la moutarde.

La probabilité de faible efficacité s'accroît nettement à partir d'une levée au 10 septembre, notamment pour les sites situés dans la moitié Nord de la France.

- Concernant la probabilité de forte réduction du drainage

La probabilité d'occurrence d'un impact fort sur le drainage est d'autant plus élevée que le site est peu pluvieux et que la date de levée est précoce, et ce pour les trois espèces de CI. Comme déjà indiqué, le site 6 est particulièrement exposé à une forte réduction du drainage du fait de son niveau initial faible en situation de sol nu. Lorsque le site est pluvieux, cet impact sur le drainage devient marginal, et ce d'autant plus que la pluviométrie annuelle est élevée.

- Concernant la probabilité d'effet indésirable sur le rendement de la culture suivante

La probabilité d'occurrence d'un impact négatif sur le rendement est significativement accrue avec le RGI, en particulier pour les dates de levée très précoces. Toutefois, pour la moutarde et la vesce, cette probabilité est généralement inférieure à 20%, indiquant un risque faible ou modéré de perte de rendement de la culture suivante.

10.8.6. Probabilité d'occurrence de forte efficacité et d'absence d'effet indésirable des cultures intermédiaires par site climatique selon l'espèce et la date de levée

A contrario du paragraphe précédent, c'est la probabilité d'obtenir, d'une part, des effets forts des CI sur la lixiviation, et d'autre part, de ne pas avoir d'effets indésirables sur le rendement de la culture suivante et le drainage, qui a été calculée. Les fréquences (probabilités) ont été calculées, par site climatique, par espèce de CI et pour chaque date de levée. Afin d'évaluer la probabilité d'obtenir des cas d'efficacité forte ou d'absence d'effet indésirable important des CI, les indicateurs et critères choisis sont les suivants (Figure 10-69) :

- Un taux d'abattement de la concentration nitrique supérieur ou égale à 75% par rapport au sol nu, indiquant une forte efficacité de la culture intermédiaire (a) ;
- Un drainage réduit de moins de 10%, indiquant un faible impact potentiel à l'échelle de la parcelle sur la recharge en eau de la nappe phréatique (b) ;
- Un impact positif sur le rendement de la culture suivante, indiquant un probable effet d'"engrais vert" des CI (c).

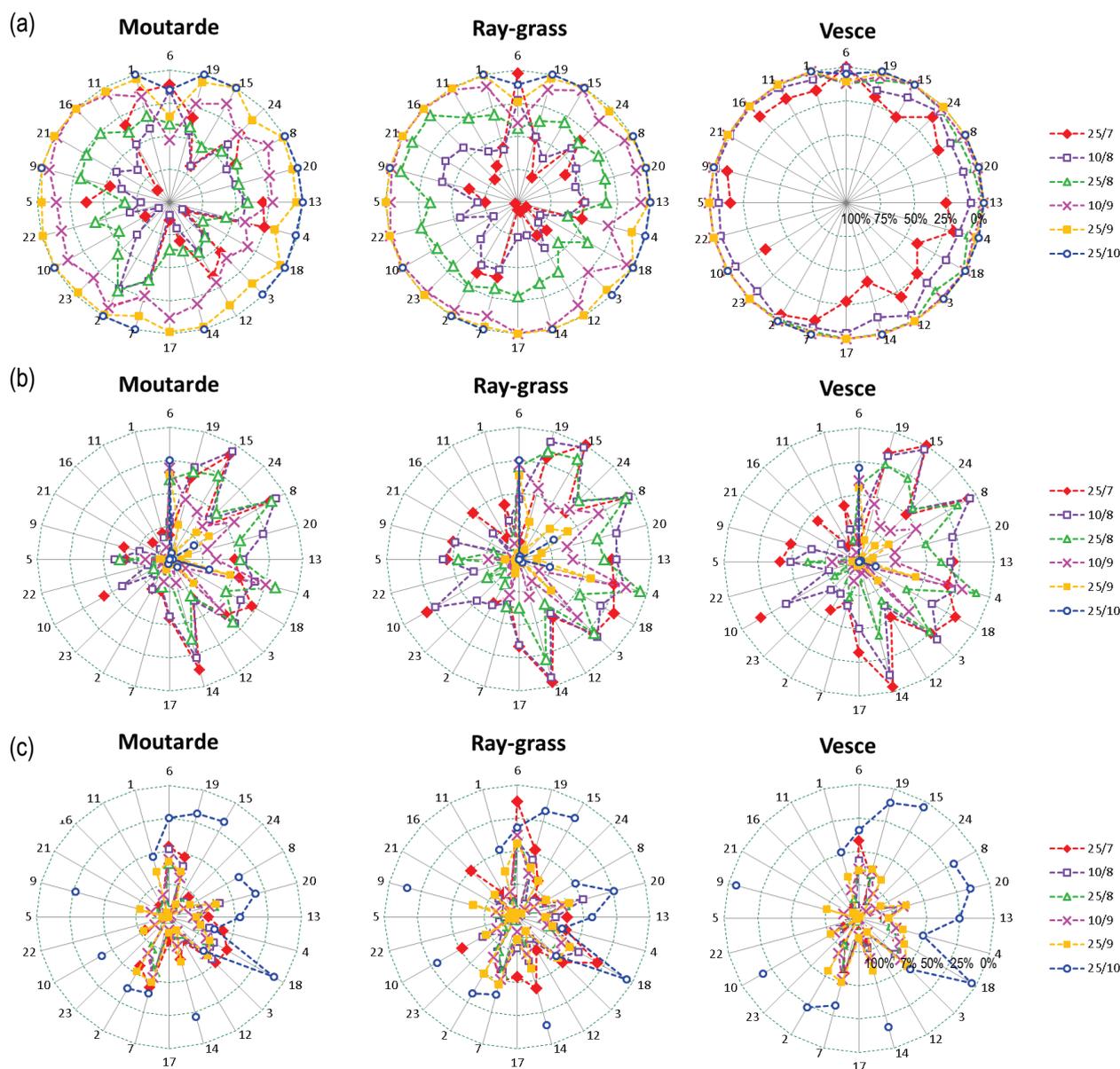


Figure 10-69. Probabilité sur 20 ans d'avoir une culture intermédiaire qui réduit la concentration nitrique de plus de 75% (a), qui induit une diminution du drainage de moins de 10% (b) et qui augmente le rendement de la culture suivante (c) par rapport au sol nu, en la détruisant au plus tôt le 10/12, selon les sites (01 à 24) classés par ordre de pluviométrie annuelle, et la date de levée (25/7 au 25/10) (le centre représente une fréquence de 100% de la situation désirable et le cercle extérieur, une fréquence de 0% soit une absence de cette situation souhaitable ou très efficace).

- Concernant la probabilité d'efficacité importante pour réduire la lixiviation

Afin d'atteindre des niveaux d'efficacité très élevée ($\geq 75\%$ d'abattement de la concentration nitrique), la moutarde apparaît comme la plus efficace, bien que l'efficacité du ray-grass soit proche. La date de levée contribue également fortement à atteindre fréquemment un bon niveau d'efficacité de ces deux espèces ; la date du 10/8 étant souvent optimale pour la moutarde et le 25/7 pour le ray-grass. Comme déjà noté précédemment, dans certains cas de sites secs (6), une date plus tardive au 10 septembre permet d'obtenir une meilleure efficacité, plus souvent. La vesce ne permet pas d'atteindre ces niveaux d'abattement dans plus de 65% des cas pour des levées précoces (25/7) et plus de 75% des cas, pour les autres dates de levée.

- Concernant la probabilité de réduction du drainage réduite

La probabilité d'occurrence d'un impact faible sur le drainage est d'autant plus élevée que le site est pluvieux et que la date de levée est tardive, quelle que soit l'espèce de CI considérée. Pour les sites peu pluvieux (site 06 à

17), la fréquence d'avoir une réduction du drainage de moins de 10% par rapport à celui observé en situation de sol nu pendant l'interculture est très faible. Cela s'explique par le fait que l'impact des CI sur le drainage, en termes de volume d'eau, est relativement stable entre les sites malgré la forte variabilité du drainage moyen de chaque site climatique.

- Concernant la probabilité d'effet positif sur le rendement de la culture suivante

La probabilité d'occurrence d'un impact positif sur le rendement est significativement accrue avec la vesce, exceptée pour des dates de levée tardives (25/9 et 25/10) ; la réponse est similaire avec la moutarde. L'obtention d'un rendement supérieur après ray-grass par rapport à un précédent en sol nu est moins fréquente que pour les deux autres espèces car le taux de minéralisation des résidus de ray-grass, avant et sous la culture principale, est plus faible, augmentant donc peu la disponibilité en azote minéral du sol.

10.8.7. Conclusion : l'itinéraire technique des cultures intermédiaires doit être adapté en fonction du système de culture et des conditions pédoclimatiques locales

L'ensemble de ces résultats indique qu'il est nécessaire d'adapter les itinéraires techniques des cultures intermédiaires en fonction de nombreux facteurs, à savoir :

- L'objectif ou les objectifs recherchés.
Les itinéraires techniques "optimaux" vont dépendre des services écosystémiques visés, à savoir la prise en compte et la pondération des objectifs parmi le taux d'abattement de la concentration nitrique de l'eau de drainage, la production agricole de la culture suivante, le niveau toléré de réduction du drainage... Il convient donc de réaliser une optimisation multicritère pour identifier les dates de levée et de destruction adaptées, ainsi que l'espèce ou le mélange d'espèces à semer.
- Les conditions climatiques, et notamment la pluviométrie qui détermine le niveau du drainage et de la lixiviation ;
- La succession de cultures ;
- L'état initial d'azote minéral du sol ;
- La profondeur du sol et sa capacité de minéralisation.

Bien que des grandes lignes puissent être tirées de cette étude, en cohérence notamment avec les travaux déjà publiés sur le sujet, ce travail d'optimisation en fonction des conditions locales ne peut être réalisé sans une contextualisation *ad hoc* et sans une analyse tenant compte de la multifonctionnalité des cultures intermédiaires. Ce travail ne doit pas être sous-estimé si l'on souhaite que l'introduction des cultures intermédiaires dans les systèmes de culture français soit efficace et n'induisse pas d'effet indésirable. La présente étude n'avait pas pour but de réaliser cette adaptation au contexte local mais avait pour objectif d'analyser et de hiérarchiser les facteurs et conditions qui déterminent l'efficacité des cultures intermédiaires et d'autres modes de gestion de l'interculture.