



**MINISTÈRE  
DE L'AGRICULTURE  
ET DE L'ALIMENTATION**

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*



**MINISTÈRE  
DE LA TRANSITION  
ÉCOLOGIQUE**

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

# **Actualisation des connaissances permettant d'objectiver les variabilités des périodes recommandées pour l'épandage des fertilisants azotés en France**

Rapport final - Phases 1 et 2

Décembre 2020



**acta**  
LES INSTITUTS  
TECHNIQUES  
AGRICOLES#



Le présent document constitue le rapport final d'une étude sollicitée conjointement par le ministère chargé de l'agriculture et par le ministère chargé de l'écologie et financé par le Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation.

## Liste des participants

### Equipe projet et comité de suivi

BEDU Marine – Acta (rédactrice)  
DROUET Jean-Louis – INRAE UMR ECOSYS  
FORAY Sylvain – Idele  
GIRARD Constantin - Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation DGPE/SCPE/SDPE/BESEC  
HERAUD Fanny – Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation DGPE/SCPE/SDPE/BESEC  
HEURTAUX Mathilde – Acta  
LE GAL Olivier – Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation DGPE/SCPE/SDPE/BESEC  
LEDUC David – Chambre d'Agriculture Pays de la Loire  
LEHOUCK Marie - Ministère de la Transition Ecologique DGALN/DEB/EARM  
SINE Mehdi – Acta  
SOENEN Baptiste – Arvalis-Institut du végétal

### Experts sollicités

AGASSE Sophie – UNIFA  
BEAUDOIN Nicolas – INRAE AgroImpact  
BUREL Enguerrand – ITAB et Centre de Recherche et d'Expérimentation en Agriculture Biologique  
CHAMPOLIVIER Luc – Terres Inovia  
DEGAN Francesca – Arvalis-Institut du végétal  
DELABY Luc – INRAE UMR PEGASE  
FERCHAUD Fabien - INRAE AgroImpact  
GRAUX Anne-Isabelle - INRAE UMR PEGASE  
HOUOT Sabine – INRAE UMR ECOSYS  
JIMENEZ Julie – INRAE LBE  
LE SOUDER Christine – Arvalis-Institut du végétal  
LEVAVASSEUR Florent – INRAE UMR ECOSYS  
METAIS Pascale – Arvalis-Institut du Végétal  
VERTES Françoise – INRAE UMR SAS

Les membres du bureau STICS ont également été contactés concernant le choix de la version du modèle (Eric Justes, Marie Launay, Dominique Ripoché et Samuel Buis)

Les auteurs remercient l'équipe projet STICS pour la diffusion et le développement de ce modèle.

**Table des matières**

1	Introduction.....	8
1.1	Contexte et objectifs .....	8
1.2	Démarche de l'étude .....	12
1.2.1	Organisation du travail .....	12
1.2.2	Le modèle STICS : description du modèle et dernières améliorations .....	12
1.2.3	Mise à jour de la typologie des fertilisants azotés .....	14
1.2.4	Scénarisation et simulations.....	14
2	Construction d'une typologie des fertilisants azotés .....	15
2.1	Objectifs.....	15
2.2	Méthode de classification et présentation des classes de fertilisants azotés .....	15
2.3	Paramétrage dans STICS et simulations du comportement des fertilisants azotés.....	24
2.3.1	Discussion et limites de la typologie proposée .....	27
3	Analyse de l'impact des périodes d'épandage dans différentes situations identifiées .....	28
3.1	Méthodologie .....	28
3.1.1	Les situations traitées.....	28
3.1.2	Différentes modalités testées pour chaque situation.....	29
3.1.3	Analyse des résultats de simulation avec STICS .....	30
3.2	Epandage de fertilisants organiques sur couvert précédant un maïs.....	32
3.2.1	Références bibliographiques .....	33
3.2.2	Simulations de scénarios d'épandage de fertilisants organiques sur couvert précédant un maïs.....	34
3.3	Epandage de fertilisants organiques sur maïs.....	47
3.3.1	Simulations de scénarios d'épandage de fertilisants organiques sur maïs.....	47
3.4	Epandage de fertilisants azotés minéraux sur maïs grain .....	54
3.4.1	Contexte et objectifs .....	54
3.4.2	Simulations de scénarios d'épandage de fertilisants azotés minéraux sur maïs .....	55
3.5	Epandage de fertilisants organiques sur prairies .....	62
3.5.1	Références bibliographiques concernant les prairies .....	64
3.5.2	Simulations de scénarios d'épandage de fertilisants organiques sur prairies .....	65
3.6	Fertilisation azotée modérée d'automne-hiver sur colza .....	77
3.6.1	Références bibliographiques .....	78
3.6.2	Simulations de scénarios de fertilisation modérée sur colza .....	78
3.7	Epandage de fertilisants azotés minéraux au printemps sur céréales d'hiver.....	103
3.7.1	Contexte et objectifs .....	103

3.7.2	Simulations de scénarios d'épandage de fertilisants azotés minéraux au printemps sur céréale d'hiver .....	104
3.8	Epandage de fertilisants azotés sur CI en interculture courte .....	118
3.8.1	Contexte et objectifs .....	118
3.8.2	Simulations de scénarios d'épandage de fertilisants azotés sur CI en interculture courte .....	118
3.9	Epandage de printemps de fertilisants azotés sur CIVE et dérobées d'hiver .....	128
3.9.1	Contexte et objectifs .....	128
3.9.2	Simulations de scénarios d'épandage de fertilisants azotés sur CIVE et dérobées d'hiver .....	128
3.10	Analyse globale et discussions .....	140
3.10.1	Analyse générale des différentes situations et mise en perspective .....	140
3.10.2	Discussions sur les limites de l'étude (modèle, choix méthodologiques).....	142
4	Conclusion générale et perspectives.....	144
5	Références :.....	146

## TABLEAUX

TABLEAU 1 : SYNTHÈSE DES CLASSES DE LA TYPOLOGIE DES FERTILISANTS AZOTES .....	18
TABLEAU 2 : LISTE DES PRODUITS REPRESENTANT CHAQUE CLASSE DE FERTILISANT POUR LES SIMULATIONS .....	25
TABLEAU 3 : CARACTERISTIQUES DES FERTILISANTS ORGANIQUES "REPRESENTANTS" PARAMETRES DANS LE MODELE STICS .....	26
TABLEAU 4 : AZOTE MINERAL FOURNI SUR UNE ANNEE PAR LES DIFFERENTS FERTILISANTS ORGANIQUES PARAMETRES DANS STICS...	26
TABLEAU 5 : VARIABLES DE SORTIES ANALYSEES A PARTIR DES RESULTATS DE SIMULATIONS STICS.....	31
TABLEAU 6 : CARACTERISTIQUES DES SOLS ET SEUILS D'HUMIDITES CRITIQUE RETENUS (SOURCES : (JUSTES ET AL. 2012 ; LEFEBVRE 2010)) .....	32
TABLEAU 7 : MODALITES TRAITEES POUR LA SITUATION D'EPANDAGE DE FERTILISANTS ORGANIQUES SUR UNE SUCCESSION D'UN COUVERT D'INTERCULTURE SUIVI D'UN MAÏS .....	34
TABLEAU 8 : DETAILS DES MODALITES LIEES AUX PRATIQUES D'APPORT DE FERTILISANTS ORGANIQUES .....	36
TABLEAU 9 : MODALITES TRAITEES POUR LA SITUATION D'APPORT DE FERTILISANTS MINERAUX SUR MAÏS .....	55
TABLEAU 10 : COEFFICIENT APPARENT D'UTILISATION (CAU) MEDIAN SELON LES PRATIQUES DE FERTILISATION, D'IRRIGATION ET DE LA LOCALISATION DE LA CULTURE DE MAÏS GRAIN .....	57
TABLEAU 11: RECAPITULATIF DES MODALITES D'APPORTS DE FERTILISANTS ORGANIQUES SUR PRAIRIE TEMPORAIRE.....	67
TABLEAU 12 : SURPLUS D'AZOTE LIXIVIE (VALEURS CENTILE 75) PENDANT L'AUTOMNE-HIVER PAR MODALITE D'APPORT.....	71
TABLEAU 13 : SURPLUS DE PERTES PAR VOLATILISATION (CENTILES 75) EN CAS D'APPORT D'ENGRAIS ORGANIQUE SELON LA CLASSE DE FERTILISANT AZOTE, LA DOSE APPOREE ET LA PERIODE D'APPORT POUR DES SOL A <b>pH&lt;8 (A) OU ≥8 (B)</b> .....	72
TABLEAU 14 : DATES DE SEMIS CHOISI POUR LES SIMULATIONS STICS SELON LA ZONE ET LA PRECOCITE DE SEMIS .....	80
TABLEAU 15 : ADAPTATIONS DU PLAN DE SIMULATION DANS LE CADRE DE LA PHASE 2 DE L'ETUDE .....	80
TABLEAU 16 : ANALYSE SUR UNE SELECTION DE SOLS DES SITUATIONS FAVORABLES OU NON A UNE BONNE VALORISATION A L'AUTOMNE PAR LE COLZA DE L'AZOTE APPOREE .....	87
TABLEAU 17 : MODALITES TRAITEES POUR LA SITUATION D'APPORT DE FERTILISANTS MINERAUX SUR BLE D'HIVER.....	105
TABLEAU 18 : DETAILS DES FRACTIONNEMENTS TESTES DANS LES DIFFERENTS SCENARIOS SIMULES .....	106
TABLEAU 19 : ANALYSE DES CONDITIONS PEDOClimATIQUES A RISQUE EN CAS DE FERTILISATION AU 15/01 .....	111
TABLEAU 20 : MODALITES TRAITEES POUR LA SITUATION D'APPORT DE FERTILISANTS AZOTES SUR CI D'ETE.....	119
TABLEAU 21 : EQUIVALENCES ENTRE QUANTITE D'AZOTE TOTALE ET VOLUMES APPORES POUR LES DIFFERENTS PRODUITS ORGANIQUES DANS LES SIMULATIONS .....	120

TABLEAU 22 : MODALITES TRAITEES POUR LA SITUATION D'APPORT DE FERTILISANTS AZOTES SUR CIVE OU DEROBES D'HIVER .....	129
TABLEAU 23 : EQUIVALENCES ENTRE QUANTITE D'AZOTE, AZOTE EFFICACE PENDANT LA DUREE DU COUVERT ET VOLUMES APPORTES POUR LES DIFFERENTS PRODUITS ORGANIQUES DANS LES SIMULATIONS.....	130

## FIGURES

FIGURE 1 : SCHEMA DU FORMALISME DE MINERALISATION DES RESIDUS A DEUX COMPARTIMENTS DANS STICS (LEVAVASSEUR, COM PERS) EN TRAITS PLEINS : FLUX DE CARBONE/ EN TRAITS POINTILLES : FLUX D'AZOTE.....	13
FIGURE 2 : TYPOLOGIE EN 6 CLASSES SUR LA BASE DE CINETIQUES MESUREES AU CHAMP (BOUTHIER ET AL. 2009).....	16
FIGURE 3 : DISTRIBUTION DES VALEURS DE L'INDICATEUR ISMO, CALCULE POUR DIFFERENTS TYPES DE PRO .....	17
FIGURE 4 : TENEURS EN AZOTE MINERAL (% N TOTAL) DES FRACTIONS LIQUIDES DE DIGESTATS ET DES DIGESTATS BRUTS ISSUE DE LA BASE DE DONNEES DIGESTATS INRAE LBE .....	23
FIGURE 5 : DYNAMIQUES DE MINERALISATION DE L'AZOTE PROVENANT DES DIFFERENTS FERTILISANTS ORGANIQUES REPRESENTANTS DES CLASSES 1 A 6 DE LA TYPOLOGIE.....	27
FIGURE 6 : SELECTION DES 24 SITES UTILISES POUR LES SIMULATIONS .....	30
FIGURE 7 : SCHEMA CHRONOLOGIQUE DE LA SITUATION SUR COUVERT PRECEDANT UN MAÏS.....	34
FIGURE 8 : AZOTE EFFICACE DISPONIBLE POUR LA CULTURE INTERMEDIAIRE SELON LA CLASSE DE FERTILISANT ET LA QUANTITE DE FERTILISANT APORTE (LES BOXPLOTS PRESENTENT LES CENTILES 25, 50 ET 75).....	37
FIGURE 9 : BIOMASSE ET AZOTE ACCUMULE PAR LES CULTURES INTERMEDIAIRES DANS LE CAS DES SCENARIOS TEMOIN SANS FERTILISANT.....	38
FIGURE 10 : SURPLUS D'AZOTE ABSORBE PAR LES COUVERTS EN CAS D'APPORTS DE FERTILISANTS ORGANIQUES .....	39
FIGURE 11 : PERTES PAR LIXIVIATION ET DRAINAGE ENTRE LE 01/10 ET LE 15/03 SELON LE SITE-SOL ET LA CULTURE EN PLACE POUR LES SCENARIOS TEMOINS .....	40
FIGURE 12 : PERTES AZOTEES PAR LIXIVIATION ET PAR VOLATILISATION POUR LES SCENARIOS AVEC APPORTS DE FERTILISANTS DE CLASSES 3 A ET B SELON LES PRATIQUES DE FERTILISATION.....	42
FIGURE 13 : PERTES AZOTEES PAR LIXIVIATION ET PAR VOLATILISATION POUR LES SCENARIOS AVEC APPORTS DE FERTILISANTS DE CLASSES 5 ET 6 SELON LES PRATIQUES DE FERTILISATION .....	44
FIGURE 14 : SURPLUS D'AZOTE ABSORBE PAR LE MAÏS ET SURPLUS DE REH APRES MAÏS PAR RAPPORT AU TEMOIN SELON LA CLASSE DE FERTILISANT ET LA QUANTITE APPOREE PENDANT L'INTERCULTURE PRECEDENTE .....	45
FIGURE 15 : AZOTE EFFICACE DISPONIBLE POUR LA CULTURE INTERMEDIAIRE SELON LA CLASSE DE FERTILISANT ET LA QUANTITE DE FERTILISANT APORTE.....	48
FIGURE 16 : AZOTE ACCUMULE PAR LE MAÏS DANS LE CAS DES SCENARIOS TEMOIN SANS FERTILISANT .....	49
FIGURE 17 : SURPLUS D'AZOTE ABSORBE PAR LE MAÏS LIES AUX APPORTS DE FERTILISANTS ORGANIQUES.....	49
FIGURE 18 : PERTES PAR LIXIVIATION ET DRAINAGE ENTRE LE 15/03 ET LE 31/08 SELON LE SITE-SOL ET LA CULTURE EN PLACE POUR LES SCENARIOS TEMOINS SANS AZOTE .....	50
FIGURE 19 : PERTES AZOTEES PAR LIXIVIATION ET PAR VOLATILISATION POUR LES SCENARIOS AVEC APPORTS DE FERTILISANTS DE CLASSES 3 A ET B SELON LES PRATIQUES DE FERTILISATION .....	51
FIGURE 20 : PERTES AZOTEES PAR LIXIVIATION ET PAR VOLATILISATION POUR LES SCENARIOS AVEC APPORTS DE FERTILISANTS DE CLASSES 5 ET 6 SELON LES PRATIQUES DE FERTILISATION .....	52
FIGURE 21 : SURPLUS D'AZOTE ABSORBE PAR LE MAÏS ET SURPLUS DE REH APRES MAÏS PAR RAPPORT AU TEMOIN SELON LA CLASSE DE FERTILISANT ET LA QUANTITE APPOREE PENDANT L'INTERCULTURE PRECEDENTE .....	53
FIGURE 22 : SCHEMA CHRONOLOGIQUE DE LA SITUATION D'APPORT DE FERTILISANTS MINERAUX SUR MAÏS .....	55
FIGURE 23 : AZOTE ABSORBE PAR LE MAÏS GRAIN SELON LES SITES ET LES PRATIQUES DE FERTILISATION .....	57
FIGURE 24 : QUANTITES D'AZOTE LIXIVIE ET D'EAU DRAINEE ENTRE LE 10/03 ET LA DATE BUTOIR DE RECOLTE (25/10) POUR LES SCENARIOS TEMOINS SANS AZOTE .....	58
FIGURE 25 : PERTES D'AZOTE PAR VOLATILISATION ET SURPLUS DE PERTES PAR LIXIVIATION SELON LES SITES DE L'ECHANTILLON .....	59
FIGURE 26 : RELIQUAT ENTREE D'HIVER A LA RECOLTE DU MAÏS SELON LES PRATIQUES DE FERTILISATION ET SELON LES SITES-SOLS ....	60
FIGURE 27 : PERTES PAR VOLATILISATION ASSOCIEES A CHAQUE APPORT SELON LA DOSE, LA CLASSE ET LE MODE D'APPORT EN SURFACE (s) OU EN PROFONDEUR (p)).....	61
FIGURE 28 : SCHEMA CHRONOLOGIQUE DE LA SITUATION SUR PRAIRIE TEMPORAIRE FAUCHEE .....	66
FIGURE 29 : COMPARAISON DE L'AZOTE EFFICACE ATTENDU ET SIMULE SOUS PRAIRIE .....	68

FIGURE 30 : PRODUCTION ANNUELLE DE MATIERE SECHE DE LA PRAIRIE FAUCHEE SELON LES SITES POUR LES SCENARIOS SANS APPORT DE FERTILISANTS ORGANIQUES.....	69
FIGURE 31 : QUANTITES D'AZOTE LIXIVIE ET D'EAU DRAINEE PENDANT L'AUTOMNE-HIVER ET MINERALISATION BASALE ANNUELLE SUR CHAQUE SITE-SOL POUR LES TEMOINS SANS APPORT ORGANIQUE .....	70
FIGURE 32 : SURPLUS DE PERTES PAR VOLATILISATION EN CAS D'APPORT D'ENGRAIS ORGANIQUE.....	72
FIGURE 33 : PART DE JOURS NON DISPONIBLES PAR QUINZAINE DU FAIT D'UNE PORTANCE INSUFFISANTE POUR UNE CONTRAINTE EXERCEE DE 100KPA – FOCUS SUR QUELQUES SOLS ARGILEUX .....	74
FIGURE 34 : PART DE JOURS NON DISPONIBLES PAR QUINZAINE DU FAIT D'UNE PORTANCE INSUFFISANTE POUR UNE CONTRAINTE EXERCEE DE 140KPA – FOCUS SUR QUELQUES SOLS A PLUS FAIBLES TENEURS EN ARGILE (<35%) .....	75
FIGURE 35 : SCHEMA CHRONOLOGIQUE DE LA SITUATION SUR COLZA .....	79
FIGURE 36 : RECOMMANDATIONS DE SEMIS PAR ZONES CLIMATIQUES .....	80
FIGURE 37 : CUMUL D'AZOTE ABSORBE PAR LE COLZA ET D'AZOTE MINERALISE DANS LES DIFFERENTS SOLS ENTRE LE SEMIS ET LE 31/12 POUR LES SCENARIOS SANS APPORT. ....	82
FIGURE 38 : VALEURS MEDIANES ET CENTILES 25 ET 75 POUR LES SURPLUS DE BIOMASSE ACCUMULEE, D'AZOTE ABSORBE ET LE CAU SELON LA DATE DE SEMIS ET LE RELIQUAT POST-RECOLTE A) JUSQU'AU 15/12 (SCENARIOS APPORT MI-JANVIER NON COMPRIS) ET B) JUSQU'AU 15/03 (TOUS SCENARIOS).....	83
FIGURE 39 : SURPLUS DE BIOMASSE ACCUMULEE, D'AZOTE ABSORBE ET CAU PAR RAPPORT AU TEMOIN SANS AZOTE JUSQU'AU 31/12 POUR L'ENSEMBLE DES SITES-SOLS SIMULES I. ....	84
FIGURE 40 : VALEUR MEDIANE DU COEFFICIENT APPARENT D'UTILISATION AU 31/12 POUR LES 24 SITES .....	84
FIGURE 41 : SURPLUS DE BIOMASSE ACCUMULEE, D'AZOTE ABSORBE ET CAU JUSQU'AU 31/12 PAR RAPPORT AU TEMOIN SANS AZOTE SELON LES PRATIQUES DE FERTILISATION A) DANS LE CAS DE SOLS A PLUS FAIBLES FOURNITURES D'AZOTE ET B) DANS LE CAS DE SOLS A PLUS FORTES FOURNITURE D'AZOTE .....	86
FIGURE 42 : DATE DE LEVEE EN FONCTION DE LA DATE DE SEMIS ET DU CUMUL DE PRECIPITATIONS SUR LE MOIS D'AOUT .....	89
FIGURE 43 : COEFFICIENT APPARENT D'UTILISATION DU FERTILISANT AZOTE SELON LES PRATIQUES DE FERTILISATION (CLASSES DE FERTILISANTS ET DATE D'APPORT) ET SELON LA DATE DE LEVEE .....	90
FIGURE 44 : ANALYSE CROISEE DE L'AZOTE ABSORBE ET DE L'INN AU 01/10 AINSI QUE DU CAU CALCULE JUSQU'AU 31/12 AU TRAVERS DE L'EXEMPLE DES APPORTS DE FERTILISANT DE CLASSE 7 EN VEGETATION SUR TROIS SITES DIFFERENTS.....	92
FIGURE 45 : CUMUL D'AZOTE LIXIVIE ET DRAINAGE PENDANT L'HIVER JUSQU'AU 15/03 POUR LES SCENARIOS TEMOINS .....	93
FIGURE 46 : DRAINAGE ET SURPLUS DE LIXIVIATION SUPPLEMENTAIRE EN AUTOMNE-HIVER PAR RAPPORT AU TEMOIN POUR L'ENSEMBLE DES SITES-SOLS SIMULES.....	94
FIGURE 47 : CUMUL D'AZOTE PERDU PAR LIXIVIATION ET PAR VOLATILISATION PENDANT L'AUTOMNE ET L'HIVER JUSQU'AU 15/03 SUITE A UN APPORT DE CLASSE 8 EN SURFACE OU ENFOUI .....	96
FIGURE 48 : DYNAMIQUES D'ACCUMULATION DE BIOMASSE ET FLUX D'AZOTE DANS LES DIFFERENTS COMPARTIMENTS EN 2006 POUR LE SITE 19_2 (A) ET 10_2 (B).....	98
FIGURE 49 : DYNAMIQUES D'ACCUMULATION DE BIOMASSE ET FLUX D'AZOTE DANS LES DIFFERENTS COMPARTIMENTS EN 1998 POUR LE SITE 19_2 (A) ET 10_2 (B).....	99
FIGURE 50 : PART DE JOURS NON DISPONIBLES PAR QUINZAINE EN CAS DE CONTRAINTE EXERCEE SUR LE SOL DE 100KPA – FOCUS SUR QUELQUES SOLS ARGILEUX.....	100
FIGURE 51 : PART DE JOURS NON DISPONIBLES PAR QUINZAINE EN CAS DE CONTRAINTE EXERCEE SUR LE SOL DE 140KPA – FOCUS SUR QUELQUES SOLS A TENEUR EN ARGILE INFERIEURE A 35%. ....	101
FIGURE 52 : SCHEMA CHRONOLOGIQUE DE LA SITUATION D'APPORT DE FERTILISANTS MINERAUX SUR BLE D'HIVER.....	104
FIGURE 53 : QUANTITES MEDIANES D'AZOTE ABSORBE PAR LE BLE D'HIVER (KG/HA) SUR LA DUREE DE SON CYCLE SELON LE SITE POUR LES SCENARIOS TEMOINS SANS AZOTE (A) ET POUR LES SCENARIOS AVEC APPORTS DE FERTILISANTS MINERAUX (B) .....	107
FIGURE 54 : COEFFICIENT APPARENT D'UTILISATION DES FERTILISANTS AZOTES MINERAUX DANS LE CAS DES SCENARIOS AVEC APPORT .....	107
FIGURE 55 : PERTES ANNUELLES PAR LIXIVIATION POUR LES SCENARIOS TEMOINS SANS AZOTE).....	108
FIGURE 56 : SURPLUS DE PERTES PAR LIXIVIATION ENTRE LE 15/01 ET LE 15/03 PAR RAPPORT AU TEMOIN SANS APPORT SELON LES PRATIQUES DE FERTILISATION AU TALLAGE .....	109
FIGURE 57 : PERTES TOTALES PAR VOLATILISATION LIEES A L'ENSEMBLE DES APPORTS DE FERTILISANTS AZOTES SELON LE CHOIX DE FRACTIONNEMENT ET SELON LE TYPE D'ENGRAIS APORTE.....	112
FIGURE 58 : PERTES TOTALES PAR VOLATILISATION SUITE A L'APPORT AU TALLAGE (A) OU AU STADE EPI 1 CM (B) SELON LA DOSE APORTEE ET LE TYPE D'ENGRAIS APORTE .....	113

FIGURE 59 : PART DE JOURS NON DISPONIBLES PAR QUINZAINE DU FAIT D'UNE PORTANCE INSUFFISANTE POUR UNE CONTRAINTE EXERCEE DE 100KPA – FOCUS SUR QUELQUES SOLS ARGILEUX .....	115
FIGURE 60 : PART DE JOURS NON DISPONIBLES PAR QUINZAINE DU FAIT D'UNE PORTANCE INSUFFISANTE POUR UNE CONTRAINTE EXERCEE DE 140KPA – FOCUS SUR QUELQUES SOLS A TENEUR EN ARGILE INFERIEURE A 35% .....	116
FIGURE 61 : SCHEMA CHRONOLOGIQUE DE LA SITUATION D'APPORT DE FERTILISANTS AZOTES SUR CI D'ETE .....	118
FIGURE 62 : AZOTE EFFICACE DISPONIBLE POUR LA CULTURE INTERMEDIAIRE SELON LA CLASSE DE FERTILISANT ET LA DOSE D'AZOTE TOTAL APORTE .....	121
FIGURE 63 : BIOMASSE ET AZOTE ACCUMULE PAR LES CULTURES INTERMEDIAIRES ET INDICATEUR DE STRESS HYDRIQUE DANS LE CAS DES SCENARIOS TEMOIN SANS FERTILISANT .....	122
FIGURE 64 : QUANTITES SUPPLEMENTAIRES D'AZOTE ABSORBEES PAR LES CI SELON LES SITES ET LA DOSE APORTEE AU TRAVERS D'EXEMPLES DE SCENARIOS AVEC APPORT DE FERTILISANT DE CLASSE 7 .....	123
FIGURE 65 : QUANTITES SUPPLEMENTAIRES D'AZOTE ABSORBEES PAR PRATIQUE DE FERTILISATION ET LE RELIQUAT INITIAL DANS LE SOL .....	124
FIGURE 66 : DRAINAGE ET PERTES PAR LIXIVIATION PAR SITE-SOL DANS LE CAS DES SCENARIOS TEMOINS .....	125
FIGURE 67 : QUANTITE D'AZOTE VOLATILISE PAR PRATIQUES DE FERTILISATION SUR LES SITES A PH DU SOL >6 .....	126
FIGURE 68 : SURPLUS D'AZOTE MINERAL DANS LE SOL A LA RECOLTE DE LA CULTURE INTERMEDIAIRE .....	127
FIGURE 69 : SCHEMA CHRONOLOGIQUE DE LA SITUATION D'APPORT DE FERTILISANTS AZOTES SUR CIVE OU DEROBES D'HIVER ....	128
FIGURE 70 : AZOTE EFFICACE DISPONIBLE POUR LA CULTURE INTERMEDIAIRE SELON LA CLASSE DE FERTILISANT ET LA QUANTITE DE FERTILISANT APORTE .....	131
FIGURE 71 : BIOMASSE ET AZOTE ACCUMULE PAR LES CULTURES INTERMEDIAIRES DANS LE CAS DES SCENARIOS TEMOIN SANS FERTILISANT.....	132
FIGURE 72 : COEFFICIENT APPARENT D'UTILISATION (% N TOTAL APORTE) SELON LA CULTURE LA CLASSE DE FERTILISANT, LA DOSE ET LA DATE DE RECOLTE .....	133
FIGURE 73 : PERTES PAR LIXIVIATION ENTRE LE 01/10 ET LE 15/03 SELON LE SITE-SOL ET LA CULTURE EN PLACE EN L'ABSENCE D'APPORT DE FERTILISANT .....	134
FIGURE 74 : AZOTE VOLATILISE SUITE A UN APPORT DE FERTILISANT ORGANIQUE AU SEMIS DE LA CULTURE INTERMEDIAIRE .....	135
FIGURE 75 : AZOTE VOLATILISE SUITE A UN APPORT DE FERTILISANT EN SORTIE D'HIVER.....	137
FIGURE 76 : QUANTITES D'AZOTE MINERAL SUPPLEMENTAIRES DANS LES SOLS A LA RECOLTE DE LA CULTURE INTERMEDIAIRE SELON LES PRATIQUES DE FERTILISATION ET LA DATE DE RECOLTE .....	138
FIGURE 77 : PERTES TOTALES PAR LIXIVIATION ET VOLATILISATION SUR LE CYCLE CULTURES DES CIVE ET DEROBES .....	139
FIGURE 78 : CARTES DES PRESSIONS EN AZOTE ORGANIQUE (A) ET MINERAL (B) .....	141

# 1 INTRODUCTION

---

## 1.1 CONTEXTE ET OBJECTIFS

### Les différents types de pertes azotées (impacts sur la qualité de l'eau et de l'air)

L'azote joue un rôle déterminant sur le rendement des cultures et sur la qualité des productions. Les entrées d'azote (par fertilisation par exemple) ainsi que les processus en jeu du cycle de l'azote produisent de l'azote sous différentes formes et concourent à rendre cet élément mobilisable par la plante mais aussi à le perdre par différentes voies (lixiviation des nitrates, volatilisation ammoniacale, émissions de protoxyde d'azote). Ces pertes affectent à la fois le bon fonctionnement du système agricole mais son environnement à plus grande échelle.

Le nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ) présent dans le sol soit par apport d'engrais minéraux soit obtenu par minéralisation de produits ou résidus organiques est susceptible d'être entraîné sous le profil racinaire des cultures lorsque l'eau non consommée par les plantes ni retenue par le sol est drainée à travers le sol. La présence de nitrate en excès dans les eaux de surface et les nappes phréatiques est susceptible d'entraîner le non-respect des normes de potabilité de l'eau et/ou des phénomènes d'eutrophisation.

L'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ) émis en conditions chaudes et sèches par les déjections des animaux et les engrais azotés utilisés pour la fertilisation des cultures peut contribuer à l'augmentation des concentrations en particules fines dans l'air (par recombinaison avec des oxydes) et conduire à l'acidification et à l'eutrophisation des milieux (par redépôt au sol). En 2018 en France, l'ammoniac était produit à hauteur de 93 % par l'agriculture, et notamment les élevages, (Citepa 2020), faisant de ce secteur le levier principal pour la réduction des émissions de  $\text{NH}_3$  en France. Le Citepa estime que 59 % de ces émissions sont liées aux pratiques à la parcelle (29 % liées à l'application des engrais minéraux, 21 % à l'application d'engrais organiques et 9 % à la pâture), et 41 % aux bâtiments d'élevage et stockage des déjections.

Le protoxyde d'azote ( $\text{N}_2\text{O}$ ) est quant à lui un puissant gaz à effet de serre, avec un potentiel de réchauffement global (PRG) de 265 (5<sup>ème</sup> rapport du GIEC). Bien que les quantités d'azote concernées soient bien plus faibles que pour la lixiviation et la volatilisation et n'affectent que rarement le rendement, ces faibles quantités émises ont un impact non négligeable sur le réchauffement climatique. En France, 3/4 des émissions de  $\text{N}_2\text{O}$  proviennent des activités agricoles et plus particulièrement de la transformation des produits azotés (engrais, fumier, lisier par exemple) dans les sols agricoles. Il se forme lors des processus de nitrification et dénitrification. La dynamique de ces émissions s'étend sur des périodes plus longues que la volatilisation. De nombreux débats scientifiques ont encore lieu aujourd'hui sur les émissions de  $\text{N}_2\text{O}$  liées à l'utilisation des engrais azotés. L'estimation de la part d'azote appliqué émise sous forme de  $\text{N}_2\text{O}$  dans l'atmosphère divergent selon les études, en particulier du fait d'une forte variabilité de l'estimation, sensible à de nombreux facteurs dont les conditions pédoclimatiques. A l'échelle internationale on a des valeurs d'émissions de  $\text{N}_2\text{O}$  comprises entre moins de 1 % et 5 % de l'azote épandu (Vandaele, Lebreton, et Faraco 2010). Le GIEC retient quant à lui un facteur d'émissions de 1,33 %, qui prend en compte les émissions directes (1 %) et indirectes liées à la fabrication et au transport des engrais (0,33 %).

On peut observer des effets potentiellement antithétiques des pratiques sur les différentes pertes azotées, menant à des transferts de contamination. Par exemple, les pratiques de limitation de la volatilisation comme l'injection ou l'enfouissement dans le sol peuvent contribuer à l'augmentation des émissions de  $\text{N}_2\text{O}$  si l'ensemble des conditions sont favorables.



## Contexte réglementaire en France et en Europe

La Directive Nitrates 91/676/CEE du 12 décembre 1991 relative à la lutte contre les nitrates d'origine agricole a imposé aux Etats-membres d'identifier des "zones vulnérables" sur leur territoire selon des critères posés par cette même directive (comme une concentration en nitrate des eaux supérieure à 50 mg/l ou des phénomènes d'eutrophisation). Les Etats-membres doivent également y mettre en œuvre un programme d'actions pour réduire la pollution des eaux et un programme de surveillance pour évaluer l'efficacité de ce dernier. Les programmes d'actions sont révisés tous les 4 ans. Le programme d'actions national en France est complété et renforcé par les programmes régionaux, définis par arrêté des préfets de région, qui adaptent la réglementation aux spécificités des territoires en zone vulnérable.

Le programme d'actions français contient huit mesures. Il fixe par exemple des périodes d'interdiction d'épandage de fertilisants azotés, des capacités de stockage minimales requises pour les effluents d'élevage, des quantités épandues ou encore des couvertures obligatoires du sol. Un plafond maximal d'azote organique épandable est également fixé à 170 kgN/ha (en moyenne sur la SAU de l'exploitation) par la Directive dans toutes ces zones vulnérables. Concernant la couverture du sol, elle est obligatoire pendant les intercultures longues et les intercultures courtes entre une culture de colza et une culture semée à l'automne.

En juin 2013 et septembre 2014, la France a été condamnée par la Cour de Justice de l'Union européenne pour une application insuffisante de la Directive Nitrates, ce qui a mené entre autres à un allongement des périodes d'interdiction d'épandage des fertilisants azotés selon les caractéristiques pédoclimatiques des régions, le type de fertilisant et de couverture du sol. Le contentieux est clos depuis 2016, grâce à l'adoption du 6<sup>ème</sup> programme d'actions national (*Arrêté du 11 octobre 2016*).

L'allongement des périodes d'interdiction d'épandage actuellement en vigueur dans certaines régions est aujourd'hui rediscuté en particulier du fait des impacts potentiels d'une concentration des applications sur une plus courte période et notamment au printemps. Les enjeux actuels amènent en outre à une évaluation intégrée des impacts des pratiques agricoles sur la qualité de l'eau et de l'air. En France concernant les apports d'engrais et d'amendements minéraux, les émissions ammoniacales ont augmenté de 8,5 % entre 2005 et 2017, tandis que la quantité totale d'azote minéral apportée a diminué de 3 %. Cette évolution est liée à la progression de l'utilisation d'urée. Sur la même période, les émissions liées à l'épandage des déjections animales produites sur le territoire ont diminué (-6,7 %). Cette diminution s'explique à la fois par une diminution des quantités épandues, cependant moins importante que la baisse des émissions (-5,4 %) mais aussi par l'utilisation plus importante par les agriculteurs de matériels d'épandage moins émissifs (CITEPA).

Les émissions ammoniacales dans le milieu agricole sont encadrées par plusieurs législations à différentes échelles :

- A l'échelle internationale, le protocole de Göteborg relatif à la prévention de l'acidification, de l'eutrophisation et de l'ozone troposphérique (adopté en 1999, entré en vigueur le 17 mai 2005 et renforcé en 2012) fixe des plafonds d'émissions nationaux de différents polluants atmosphériques ainsi que des objectifs de réduction (par exemple pour la France un objectif de diminution des émissions ammoniacales de 4 % entre 2005 et 2020, soit un objectif de 580 kt)
- A l'échelle de l'Union Européenne, plusieurs directives visent à réduire les émissions ammoniacales. La directive NEC (National Emission Ceiling), qui s'appuie sur le protocole de Göteborg révisé, fixe également des plafonds d'émissions de chaque Etat membre ainsi

que des objectifs de réduction à échéance 2030. La révision de 2016 (NEC-2) a durci les objectifs de réduction des émissions ammoniacales d'ici 2030 : dans le cas de la France, les objectifs définis dans la directive NEC-2 sont les suivants : -4 % en 2020 (base 2005) et -13 % à partir de 2030 (base 2005). La directive IED de 2010 relative aux émissions industrielles s'applique quant à elle aux exploitations agricoles (en particulier aux élevages porcins et avicoles) et encadre les pratiques sur différents postes pour réduire les émissions au niveau de l'exploitation.

- En France, un Plan national de réduction des émissions de polluants atmosphériques (PRÉPA) a été adopté dans le cadre de la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte et la directive de 2016. Il ajoute un objectif intermédiaire de -8 % pour la période 2025-2029. Le plan mentionne aussi des pistes de réduction des émissions pour le secteur agricole (utilisation d'engrais et de matériels d'épandage moins émissifs, financement de projets pilotes, ...). En outre, pour les élevages soumis aux différents régimes de la réglementation ICPE, des mesures permettant la réduction des émissions d'ammoniac sont mises en place dont l'enfouissement des déjections au plus tard 24 heures après épandage. Dans le cadre de la Directive révisée en 2016, chaque État membre doit également se doter d'un guide des bonnes pratiques agricoles permettant de limiter les émissions de NH<sub>3</sub> et de particules. En France, un guide des bonnes pratiques agricoles pour l'amélioration de la qualité de l'air (ADEME, 2019) répond à cette obligation réglementaire.

### **Les programmes d'action dans l'Union Européenne : focus sur la question des périodes d'épandage**

Les travaux de Gault et al. (2015) et Foray (2016, 2017) ont permis de synthétiser différents cas de mises en application de la Directive Nitrates dans plusieurs Etats (ou régions) membres de l'Union Européenne : en Allemagne, au Danemark, en Flandres, en Catalogne, en Irlande et aux Pays-Bas.

Concernant les périodes d'interdiction d'épandage, les calendriers issus des différents programmes d'action se révèlent relativement proches quant aux distinctions faites (types de cultures, de fertilisants par exemple). Le nombre de situations distinguées reste bien souvent restreint. En

Allemagne par exemple, une période d'interdiction générale est fixée entre mi-août et fin janvier pour les terres agricoles mais s'accompagne de cas particuliers pour lesquels la réglementation raccourcit la durée de l'interdiction. Ces spécifications concernent 7 types de cultures (comme le colza, les prairies ou les cultures légumières) et 2 types de fertilisants organiques (fumier et compost). On retrouve souvent les mêmes classes de fertilisants et des critères proches pour les distinguer, même si on identifie plusieurs approches :

- Une distinction entre engrais minéraux et produits organiques que l'on retrouve quasi-systématiquement. Les engrais azotés industriels à mobilisation lente (avec membranes semi-perméables ou avec retardateurs) sont plus rarement isolés des autres catégories (par exemple en Catalogne) ;
- Pour les produits organiques, les fertilisants sont distingués soit selon leur teneur en matière sèche (MS) (ex : en Flandres seuil de 20 % de MS ou encore au Danemark et aux Pays-Bas), soit selon la dynamique de minéralisation et le C/N des produits, comme c'est le cas dans la réglementation actuelle en France (ex : en Catalogne, on distingue les engrais organiques avec minéralisation lente de l'azote et C/N > 10 des engrais organiques avec azote facilement minéralisable et C/N < 10).

Au-delà des catégories de cultures ou de fertilisants azotés, les réglementations intègrent de manière plus anecdotique dans ces calendriers d'autres critères comme :

- La prise en compte de la culture précédente (ex : en Allemagne, orge d'hiver après une récolte de céréales)
- Des doses seuils exprimées de différentes manières : en kg d'azote ammoniacal ou d'azote total
- Des cas particuliers pour certaines caractéristiques pédologiques (ex : terres argileuses en Flandres)

Malgré une question politique encore récente, la prise en compte des émissions ammoniacales dans les pratiques agricoles évolue en France comme dans les autres pays. Les mesures prises concernent la couverture des fosses de stockage comme au Danemark ou aux Pays-Bas mais aussi l'injection ou l'incorporation plus ou moins rapide des fertilisants. Aux Pays-Bas, un enfouissement dans les 24 heures est exigé pour les fumiers, composts et autres engrais pauvres en azote ammoniacal mais les délais d'incorporation peuvent être parfois plus courts (par exemple en Allemagne, une incorporation dans les 4 heures est exigée pour les fumiers).

### Objectifs de l'étude

La présente étude fait suite à une précédente étude menée en 2012 (ACTA-ARTELIA 2012) qui avait pour objectif d'actualiser les références techniques et scientifiques du code des bonnes pratiques agricoles de 1993 concernant les facteurs et les paramètres qui déterminent les périodes d'apports d'azote favorables ou défavorables selon les contextes agropédoclimatiques. L'accent avait été mis sur les apports d'automne-hiver et sur les risques de pollution des eaux au travers des pertes nitriques.

Suite à l'allongement des périodes d'interdiction d'épandage dans certaines régions, aujourd'hui rediscuté en particulier concernant les potentiels impacts d'une concentration des applications sur une plus courte période et notamment au printemps, les enjeux actuels amènent à une évaluation intégrée des impacts des pratiques agricoles sur la qualité de l'eau et de l'air. Pour cette nouvelle étude, le champ d'étude est donc élargi : premièrement en prenant en compte les risques de pollution non seulement des eaux par le nitrate mais aussi de l'air par l'ammoniac, et deuxièmement en considérant les épandages des fertilisants azotés sur toute l'année.

Le présent rapport concerne les deux phases de l'étude réalisée entre mars et novembre 2020. Les objectifs de cette étude sont les suivants :

- ✓ Actualiser la typologie de fertilisants azotés à partir des connaissances sur les produits résiduels organiques (PRO) et sur les engrais minéraux, acquises depuis 2012 ;
- ✓ Compiler les références existantes sur les impacts des pratiques d'épandage (enfouissement par exemple) sur les différents compartiments de l'environnement (sols, eaux, air, plantes) de manière intégrée : minéralisation et lixiviation du  $\text{NO}_3^-$ , mais aussi émissions de  $\text{NH}_3$  dans l'air ;
- ✓ En complément de la bibliographie : simuler avec les dernières versions disponibles de STICS les impacts de différentes situations d'épandage sur les différents compartiments de l'environnement (sols, eaux, air, plantes) de manière intégrée : minéralisation et lixiviation du  $\text{NO}_3^-$ , mais aussi émissions de  $\text{NH}_3$  dans l'air, notamment analyser les épandages de printemps-été en complément de ceux d'automne-hiver et évaluer les interactions entre eux, et en particulier l'effet d'un report d'une partie des épandages au printemps sur les quantités d'azote lixiviées d'une part, et volatilisées d'autre part.

## 1.2 DEMARCHE DE L'ETUDE

### 1.2.1 Organisation du travail

Le projet s'est articulé autour d'une équipe projet, constituée de membres de l'Acta et chargée de la réalisation technique de l'étude (collecte et préparation des données, simulations et interprétation des simulations) et de la sollicitation d'un ensemble d'experts scientifiques qui combine des compétences zootechniques, agronomiques et de modélisation des cultures et des prairies. Les listes nominatives figurent en page 2. Ces sollicitations n'ont pas donné lieu à la création d'un comité d'experts mais à de multiples échanges et réunions de travail. Les experts ont été chargés de participer aux différentes phases de l'étude (aide à l'accès aux données et aux références bibliographiques à mobiliser, élaboration des scénarios et plan de simulation, analyse des résultats des simulations).

Un comité de suivi a également été constitué pour assurer le suivi et le pilotage de l'étude. Il est composé de représentants du Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation et du Ministère de la Transition Ecologique ainsi que de quelques membres du Comité Scientifique et Technique (CST) du groupe de concertation GENEM, « Gestion des Eléments Nutritifs et des Emissions vers les Milieux », impliqués dans la rédaction de l'avis ayant suscité la réalisation de la présente étude. Au cours de l'étude, ce comité de suivi s'est réuni cinq fois (13 mars, 15 mai et 10 juillet, 14 septembre et 3 novembre 2020).

L'état d'avancement des travaux a en outre été présenté par l'équipe projet au groupe de concertation GENEM lors de ses réunions des 28 avril, 2 juillet et 22 septembre ainsi qu'au CST du GENEM le 25 juin 2020.

La démarche générale de l'étude consistait en une mise à jour des connaissances acquises depuis l'étude (ACTA-ARTELIA 2012) qu'il s'agisse des dernières améliorations intégrées dans les modèles de culture et en particulier dans STICS utilisé pour cette étude, des références bibliographiques plus récentes concernant la fertilisation azotée et les risques de pertes mais également des simulations concernant les impacts de différentes situations d'épandage complémentaires à ces références.

### 1.2.2 Le modèle STICS : description du modèle et dernières améliorations

#### Présentation générale du modèle

STICS est un modèle agronomique de simulation du système sol-culture-atmosphère développé par INRAE (Brisson et al. 1998). Il permet de simuler au pas de temps journalier, à partir d'une caractérisation du pédoclimat et d'une description du système de culture, les évolutions de nombreuses variables relatives à la culture (production qualitative et quantitative, différents stress, teneur en azote dans les différents compartiments de la plante,...) mais aussi à son environnement, qu'il s'agisse de variables d'état (azote minéral ou teneur en eau dans le sol par exemple) ou de flux (pertes par lixiviation, émissions gazeuses,...). De nombreuses cultures ont été paramétrées dans le modèle bien qu'il s'agisse en grande majorité de grandes cultures. Ce modèle a été paramétré et validé dans des contextes pédoclimatiques français diversifiés.

La culture est simulée au travers de son indice foliaire et de sa biomasse aérienne, calculés par l'interception lumineuse par le feuillage et la conversion en biomasse de l'énergie photosynthétique, mais aussi par sa teneur en azote et les caractéristiques de ses organes récoltés. Le sol correspond quant à lui à une suite de couches horizontales, chaque couche étant caractérisée par sa réserve en eau et ses teneurs en azote minéral et organique. L'interaction de la plante avec le sol est appréhendée notamment par la distribution de la densité racinaire.

Pour cette étude, il a été choisi d'utiliser la version 9.1 actuellement diffusée. Cette version n'inclut pas toutes les dernières évolutions encore en cours de validation mais qui ont pu être en partie mobilisées dans d'autres études récentes telles que les travaux sur les prairies françaises (Graux et al. 2017) incluant des adaptations importantes pour la simulation des prairies permanentes et prairies pâturées. Le modèle est également adapté pour paramétrer de nouvelles cultures. Cette possibilité n'a cependant pas été explorée dans le temps contraint de cette étude.

### Présentation des modules de minéralisation de la matière organique du sol, des résidus de culture et des amendements organiques

Dans STICS, la minéralisation de l'humus et des matières exogènes organiques sont distinguées. La minéralisation est supposée se produire jusqu'à une profondeur maximale et être négligeable en dessous de cette profondeur. Le module de minéralisation de l'azote de la matière organique du sol a été récemment modifié à partir des travaux de Clivot et al. (2017). Elle dépend de la texture (taux d'argile et de calcaire), du pH et du C/N du sol mais aussi du stock d'azote organique, de l'humidité et de la température du sol.

Concernant la minéralisation de l'azote des produits organiques exogènes (résidus de cultures ou produits résiduaux organiques [PRO]), elle dépend à la fois du taux de décomposition des résidus (soit les flux de carbone), de leur rapport C/N mais aussi de celui de la biomasse microbienne et de l'humus formé (Nicolardot, Recous, et Mary 2001). Le stock d'azote organique, l'humidité, la température du sol mais aussi la profondeur d'incorporation dans le sol et la disponibilité en azote minéral dans la couche de sol où se situent les résidus jouent également sur les quantités d'azote minéralisé provenant des résidus. Ce module fait actuellement l'objet d'évolutions non intégrées dans la version diffusée à ce jour (v9.1) mais qui ont pu être prises en compte dans l'étude. En effet, il a été proposé de représenter les résidus organiques au travers de deux compartiments afin de mieux prendre en compte les dynamiques de C et N dans le sol en particulier à moyen et long terme (Levasseur 2017). Ce nouveau formalisme intègre un compartiment « labile » et un compartiment « passif » qui rejoint directement la matière organique passive du sol, comme le montre la Figure 1.

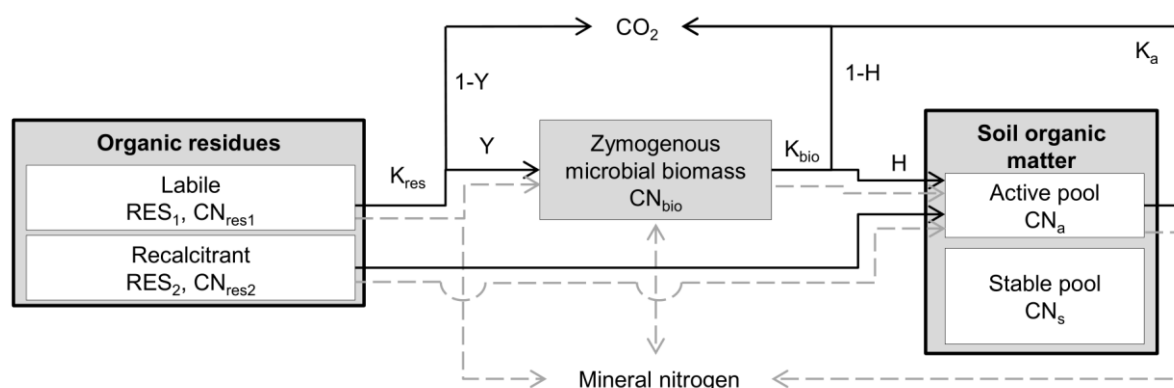


Figure 1 : Schéma du formalisme de minéralisation des résidus à deux compartiments dans STICS (Levasseur, com pers) En traits pleins : flux de carbone/ En traits pointillés : flux d'azote.

### Présentation des modules de pertes azotées dans STICS

La lixiviation dans STICS dépend du module de transfert des nitrates et donc des transferts d'eau entre les couches du sol. L'azote nitrique qui arrive avec l'eau dans une couche élémentaire de sol se mélange au nitrate déjà présent. L'eau en excès quitte ensuite la couche avec une nouvelle concentration.

La volatilisation se produit à la surface du sol et dépend de la concentration ammoniacale. On distingue deux formalismes différents pour les fertilisants organiques et minéraux. Dans le cas des produits organiques, la volatilisation est donc affectée par le type d'engrais, la dose apportée mais aussi par la teneur en eau du sol et l'infiltration de l'azote minéral dans le sol. En effet, le modèle distingue un pool d'azote ammoniacal qui reste à la surface du sol et qui peut être volatilisé et un pool qui s'infiltré et n'est pas volatilisable. La proportion de la fraction volatilisable augmente avec la teneur en matière sèche du produit. Elle est également affectée par le travail du sol : elle diminue si le sol a été labouré au cours des 7 derniers jours avant l'épandage et augmente dans le cas contraire. L'augmentation de pH qui accompagne l'ajout de nombreux effluents est prise en compte dans le modèle. Les caractéristiques pédoclimatiques telles que la température, la teneur en eau et la porosité du sol mais aussi son pH et la vitesse du vent interviennent également dans ce module.

Pour les engrais minéraux, les pertes gazeuses sont définies en fonction des paramètres pour chaque type d'engrais et des caractéristiques de cet engrais. Les pertes réelles dépendent ensuite du taux d'absorption d'azote des jours précédant l'application d'engrais et également du pH du sol (augmentation linéaire en fonction du pH).

### 1.2.3 Mise à jour de la typologie des fertilisants azotés

Afin de compléter la typologie de fertilisants azotés proposée en 2012 au vu des enjeux de cette étude, deux axes de travail ont été définis :

- Intégrer de nouvelles références, publications et bases de données pour compléter la connaissance des caractéristiques de certains produits déjà décrits dans la précédente étude mais aussi pour mieux prendre en compte les fertilisants issus de traitements plus récents (ex : digestats de méthanisation, séparation de phase, ...)
- Prendre en compte l'effet sur la qualité de l'air et en particulier sur la volatilisation de l'épandage de différents types de fertilisants azotés.

La méthodologie est décrite de manière plus détaillée dans la suite du document.

### 1.2.4 Scénarisation et simulations

Pour l'élaboration de scénarios pertinents dans le temps imparti, le choix a été fait de cibler des situations pour lesquelles les simulations apportaient des connaissances complémentaires par rapport à la bibliographie existante et aux précédentes simulations de 2012 concernant les enjeux de qualité de l'eau et de l'air. La priorisation des situations prend également en considération les limites du modèle et de son paramétrage actuel. Ces quelques situations (ici 4 qui sont présentées dans la suite du document) sont déclinées en multiples scénarios, destinés à être simulés, selon différentes modalités à la fois pédoclimatiques mais également de pratiques culturales et en particulier de fertilisation.

La simulation et l'analyse de ces scénarios a pour but d'aider à la formulation de recommandations concernant les périodes d'épandage suivant un certain nombre de critères qui restent relativement simples et opérationnels.

La méthodologie est décrite de manière plus détaillée dans la suite du document.

## 2 CONSTRUCTION D'UNE TYPOLOGIE DES FERTILISANTS AZOTES

---

### 2.1 OBJECTIFS

La précédente typologie proposée en 2012 partait des travaux de Lashermes et al. (2010) (440 échantillons provenant d'une trentaine de types de PRO) permettant de classer le comportement des PRO concernant la minéralisation de l'azote selon certains paramètres biochimiques.

La typologie produite dans cette nouvelle étude part de l'étude ACTA-ARTELIA de 2012 en valorisant des connaissances acquises depuis cette date (essais en laboratoire et au champ, publications, bases de données) et en affinant certains aspects :

- ✓ Une intégration plus importante de produits d'origine organique encore peu étudiés lors de l'étude précédente : c'est le cas des digestats et en particulier après séparation de phase et divers post-traitements. Cela passe par la mobilisation des travaux ainsi que des bases de données les plus récentes (dont la base de données digestats INRAE LBE et les travaux menés dans le cadre du projet Concept-Dig [ADEME 2016-2019])
- ✓ Proposer une typologie discriminante au regard des enjeux étudiés (qualité de l'eau et de l'air) et opérationnelle.

### 2.2 METHODE DE CLASSIFICATION ET PRESENTATION DES CLASSES DE FERTILISANTS AZOTES

Proposer une typologie la plus opérationnelle possible nécessite d'identifier un nombre limité de caractéristiques pouvant être connues et pouvant expliquer une grande partie du comportement des fertilisants vis-à-vis des enjeux évoqués.

Concernant les risques pour la **qualité de l'eau**, la méthode a consisté à caractériser le **potentiel de lixiviation** associé à un fertilisant azoté. Ce dernier dépend à la fois de **la quantité d'azote minéral** présent initialement et de la **dynamique de minéralisation du produit**. De nombreuses études ont déjà permis de décrire les cinétiques de minéralisation issues d'incubation en laboratoire ou de suivis au champ de nombreux PRO. Des approches statistiques (multifactorielles) ont été réalisées pour établir des relations entre la minéralisation de l'azote (et également du carbone) et les caractéristiques biochimiques des produits. Des typologies ont été proposées à partir de l'analyse de ces cinétiques. Différentes publications (Lashermes et al. 2007 ; Bouthier et al. 2009 ; Lashermes et al. 2010) ont proposé une typologie en 6 classes de comportement de minéralisation de l'azote organique des PRO (Figure 2). Les types de PRO définis *a priori* d'après leur nom (boue, fumier, composts...) peuvent être distribués dans ces différentes classes, ce qui montre bien l'importance d'un minimum de caractérisation biochimique pour pouvoir prédire le comportement au champ des PRO.

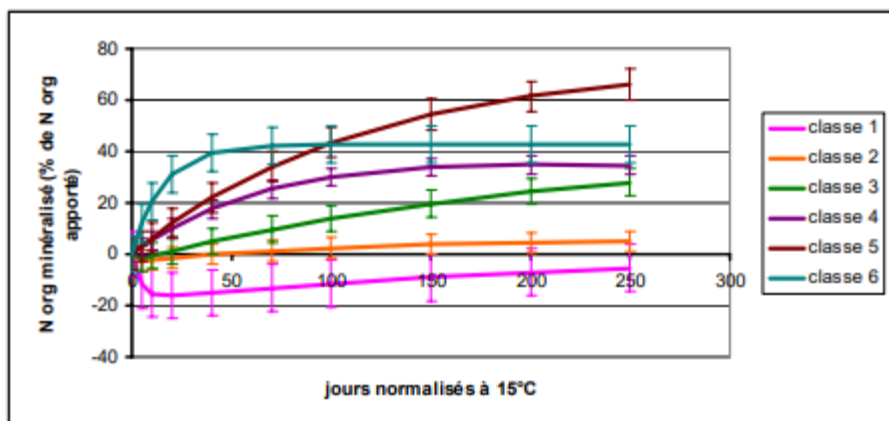


Figure 2 : Typologie en 6 classes sur la base de cinétiques mesurées au champ (Bouthier et al. 2009)

Les classes de dynamiques de minéralisation issues de ces différents travaux ont été reprises ici afin de proposer 5 classes de comportements différents (voir type 1 à 5 dans la typologie présentée en fin de document). Afin de rendre la typologie la plus opérationnelle possible, à chaque catégorie a ensuite été associé un certain nombre de caractéristiques qui peuvent être assez facilement connues. La variabilité des différentes caractéristiques physico-chimiques associées à des résultats d'incubation (issus de la bibliographie ou de bases de données) a été étudiée pour identifier de potentielles gammes de valeurs distinctes entre deux types de produits.

En l'état actuel des connaissances, il reste difficile d'établir une relation générale entre des caractéristiques simples et opérationnelles et le comportement de minéralisation des fertilisants organiques. Le rapport C/N ou C/N organique explique une partie du comportement de décomposition de la matière organique (MO). Houot et al. (2015) ont caractérisé le lien entre des gammes de C/Norg et des phénomènes d'organisation nette :

- Une minéralisation importante et rapide pour des produits dont la fraction organique est peu stable accompagné d'un C/Norg relativement faible (< 8-15),
- Une réorganisation transitoire de l'azote avant une reminéralisation dans le cas d'une biodégradabilité importante mais un C/Norg plus élevé (> 8-15),
- Une minéralisation lente de l'azote pour des produits dont la matière organique est stable et un rapport C/Norg faible (compost, digestat solide...).

L'analyse des références qui ont pu être collectées a permis de distinguer des niveaux de C/N différents à chaque classe de dynamique de minéralisation d'azote. Cependant, cet indicateur n'est pas suffisant (Recous et al. 1995) et les gammes de C/N ne peuvent être complètement distinguées d'une classe à une autre (effet de chevauchement) (Figure 3). Il a également été proposé de mobiliser l'indicateur de stabilité de la matière organique (ISMO), construit pour prédire la fraction de C des PRO susceptible d'être incorporée à la MO du sol (Lashermes et al. 2007). Il faut tout de même noter que cet indicateur reste moins connu et principalement utilisé pour des amendements organiques. De plus, les références qui ont pu être collectées permettant de relier des résultats d'incubation avec une caractérisation de l'ISMO restent limitées.



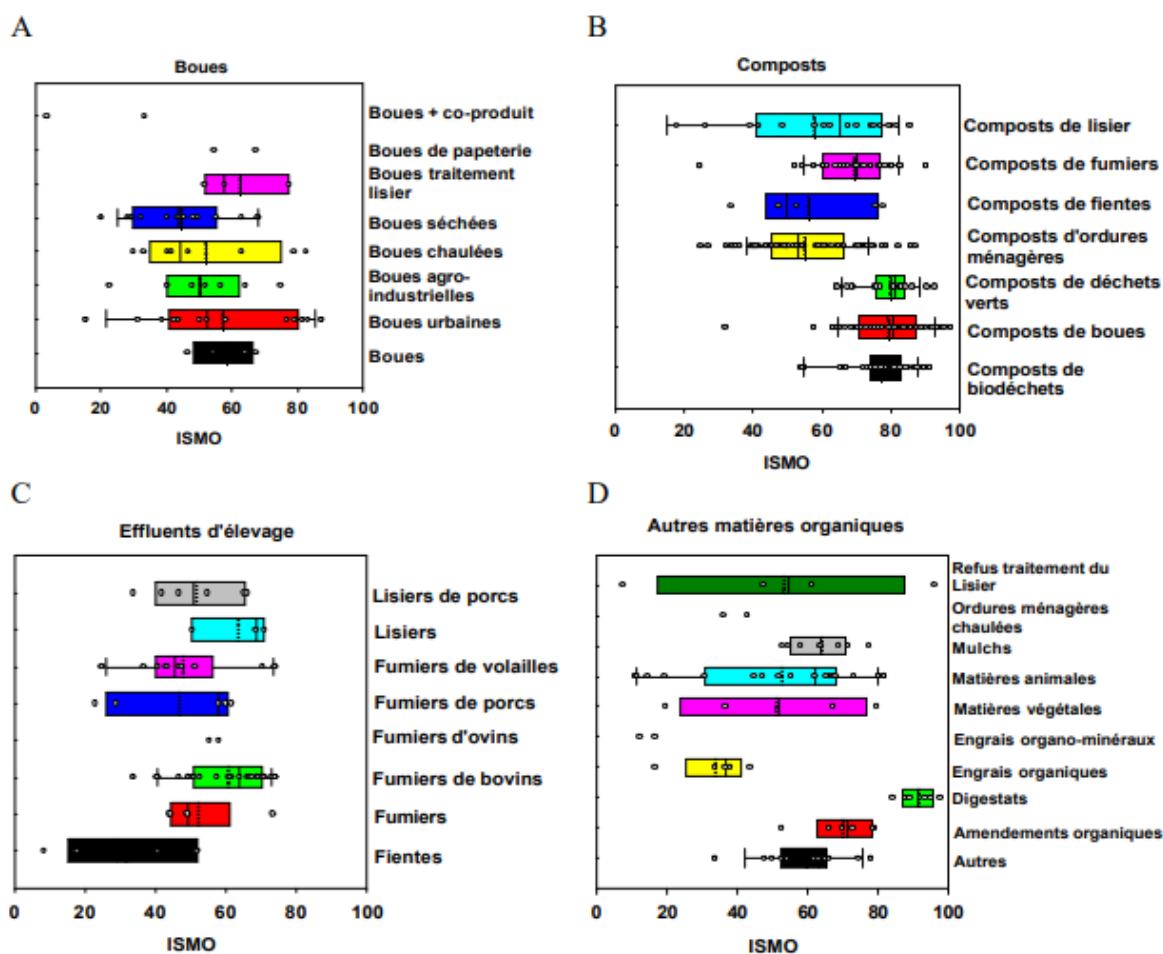


Figure 3 : Distribution des valeurs de l'indicateur ISMO, calculé pour différents types de PRO (d'après (Lashermes et al. 2007) : (A) boues, (B) composts, (C) effluents d'élevage et (D) autres produits organiques. La limite gauche de la boîte est définie par le 1er quartile, la limite droite par le 3ème quartile, la médiane est représentée par le trait fin qui partage la boîte, la moyenne par le trait en pointillés. Les valeurs extrêmes ne sont pas prises en compte.

Comme indiqué précédemment, la typologie distingue également les fertilisants organiques selon la part d'azote minéral qu'ils contiennent initialement et donc directement disponible pour la plante ou potentiellement lixiviable. Cette distinction s'est faite sur la proportion d'azote minéral par rapport à l'azote total du produit. Une sixième classe a donc été ajoutée aux cinq premières pour distinguer les produits organiques avec une teneur en azote minéral de plus de 30 %. A cela s'ajoutent également des catégories d'engrais minéraux.

Concernant les risques pour la qualité de l'air, il a été choisi de caractériser le potentiel de volatilisation des fertilisants. Les facteurs impactant les pertes de  $N_2O$  n'ont pas été intégrés dans la construction de la typologie, même si ces pertes ont été étudiées. Il faut de plus noter que les études concernant les pertes par dénitrification soulignent l'effet prépondérant des conditions pédoclimatiques sur ce type de perte (effet de la température et des précipitations, de la teneur en eau du sol, de la teneur en argile des sols) (Vaudour 2014). Cependant, certaines caractéristiques retenues dans la classification influent sur ces émissions, comme la teneur en azote minéral et la vitesse de minéralisation. Concernant l'évaluation du risque de volatilisation, auquel on s'intéresse ici, un seul facteur a été retenu afin de rester sur un nombre restreint de critères pour la typologie : la teneur en azote ammoniacal et uréique.

Le pH des produits a été étudié (un pH élevé augmentant le risque de volatilisation) ; cependant, la variabilité dans les caractéristiques collectées étant faible, ce critère n'a pas été retenu dans la

typologie. La teneur en matière sèche des produits n'a pas été intégrée comme critère de construction de la typologie bien que la moindre viscosité des produits ait tendance à faciliter la pénétration dans le sol et donc à limiter les pertes gazeuses.

La typologie se compose donc de 8 classes, synthétisées dans le tableau 1 :

- 5 classes (type 1 à 5) se distinguent par la dynamique de minéralisation de leur azote organique ;
- Les 3 autres classes (type 6 à 8) se distinguent par la teneur en azote minéral total mais également en azote ammoniacal et uréique.

Tableau 1 : Synthèse des classes de la typologie des fertilisants azotés

Classe	Description cinétique N	N minéral initial	N ammoniacal (+ uréique)	C/N	ISMO
1	Organisation nette à moyen terme		<20%	>20	
2	Minéralisation faible et très lente			10-20	>70%
3	Minéralisation lente				50-70%
4	Minéralisation importante et progressive			7-15	40-60%
5	Minéralisation importante et rapide			5-12	<40%
6	Forte proportion d'azote minéral	40-95%			
7	Fertilisants minéraux	>95%	< 50%		
8			> 50%*		

Les paragraphes suivants détaillent plus précisément ces classes. Afin de rendre la typologie la plus opérationnelle possible, un certain nombre d'exemples sont également cités dans chaque catégorie. Il faut cependant signaler que l'on peut retrouver une même appellation de produit dans différentes classes, une même appellation pouvant désigner des produits aux comportements variés.

#### **Classe 1 : Produits organiques caractérisés par une organisation nette à moyen terme de l'azote**

Cette classe se caractérise par des PRO qui organisent de l'azote après leur épandage et ne libèrent pas ou très peu d'azote au cours de l'année qui suit leur application sur la parcelle. En termes de propriétés physico-chimiques, on constate qu'ils se caractérisent également par un C/N élevé (> 20) et une faible teneur en azote ammoniacal (< 20 %). On peut citer dans cette catégorie :

- De nombreuses boues de papeterie
- Des marcs de raisin frais
- Des eaux terreuses de sucrerie

- Certains composts de déchets verts (jeunes et ligneux)
- Certains composts de fumier
- Des eaux de déshydratation de luzerne

Remarque : il ne s'agit pas véritablement de fertilisants azotés au sens agronomique.

La caractérisation de cette classe s'appuie premièrement sur les cinétiques de minéralisation (incubations) de l'azote pour les eaux de sucrerie mobilisées dans l'étude précédente de 2012 et issues de la base de données ISMO de l'ADEME ainsi que des cinétiques minimales et maximales qui en découlent. Dans la majorité des cinétiques obtenues, on observe une première phase d'organisation de l'azote qui démarre relativement rapidement et est suivie d'une reminéralisation très lente. L'analyse des bases de données a également permis d'associer, par extension, d'autres produits à cette catégorie. D'autres travaux ont été mobilisés comme ceux de Bouthier et al. (2009) dans lesquels 68 cinétiques de minéralisation au champ (associées à des suivis en laboratoire) ont été analysées afin d'élaborer une typologie en 6 classes. La première classe de cette typologie présente une cinétique semblable à celle décrite pour les eaux de sucrerie ci-dessus. Cette classe regroupe des composts de fumier, des composts de déchets verts et des eaux de déshydratation de luzerne.

**Classe 2 : Produits organiques à minéralisation d'azote très lente et à teneur en azote ammoniacal faible**

Cette classe se caractérise par des PRO qui présentent une très faible minéralisation d'azote au cours de l'année qui suit leur application (< 10%). Les teneurs en azote ammoniacal sont faibles (< 20 % de l'azote total) mais peuvent être à l'origine d'une réorganisation transitoire (jusqu'à 50 JN après épandage). L'analyse des caractéristiques de ces produits fait ressortir un C/N majoritairement compris entre 10 et 20 (tout comme le C/Norg) et une stabilité importante de la matière organique (ISMO supérieur à 0,7 bien que peu de données soient disponibles).

On peut citer dans cette catégorie :

- Des composts matures de déchets verts
- Des composts d'OMR (Ordures ménagères résiduelles)
- Des composts de boues urbaines et de déchets verts
- Des composts matures de fumier de bovin
- Des composts de marc de raisin
- Des composts de digestats solides
- Des fumiers de cheval jeunes pailleux
- Des composts de fumier de bovin de plus de 4 mois
- Certaines eaux de sucreries

La caractérisation de cette classe s'appuie sur les cinétiques de minéralisation de l'azote pour les composts de déchets verts et de biodéchets mobilisées dans l'étude précédente de 2012 et issues de la base de données ISMO de l'ADEME ainsi que des cinétiques minimales et maximales qui en découlent. L'analyse des bases de données a également permis d'associer par extension d'autres produits à cette catégorie comme des fumiers de cheval jeunes pailleux, composts de fumier de bovin de plus de 4 mois et des composts de marc de raisin non épépiné. La classe 2 de la typologie issue de Bouthier et al. (2009) présente une cinétique semblable aux cinétiques décrites précédemment et regroupe des composts de fumier de bovins, composts de déchets verts, composts de déchets verts et de boues, mais aussi des eaux terreuses de sucrerie. Les résultats du projet PROSTOCK (Vaudour 2014) ont également été réutilisés ici et en particulier les cinétiques de minéralisation obtenues au champ pour les composts de déchets verts et composts de boues et de déchets verts qui affichaient une légère organisation suivie d'une libération lente d'azote minéral. Les cinétiques de minéralisation

de 7 PRO suivies dans le cadre du projet PROLAB (Trochard et Houot 2017) confirment les dynamiques précédemment décrites pour les composts d'OMR et les composts de boues et de déchets verts.

Pour finir, dans la base de données Digestats INRAE LBE, bien que peu de résultats de cinétiques de minéralisation soient disponibles pour des composts de digestats solides, les proportions d'azote minéralisé au bout de 175 jours normalisés ne dépassaient pas les 10% d'azote total. De plus ces composts de digestats présentent des caractéristiques similaires à d'autres types de composts : une faible proportion d'azote minéral et un C/N compris entre 10 et 20. Ces résultats sont étayés par un certain nombre d'essais qui concluent à un comportement des composts des digestats proches de celui d'autres composts (Houot et al. 2014).

### **Classe 3 : Produits organiques à minéralisation d'azote lente et à teneur en azote ammoniacal limitée**

Ces produits peuvent occasionnellement présenter une phase d'organisation très transitoire suivie d'une minéralisation relativement lente. Les quantités minéralisées un an après l'épandage sont cependant plus importantes que dans la catégorie précédente (de 10 à 30 % de l'azote organique). L'analyse des caractéristiques de ces produits fait ressortir un C/N majoritairement compris entre 10 et 20 (tout comme le C/Norg) et une stabilité de la matière organique un peu plus faible que pour la classe 2 (ISMO compris entre 0,5 et 0,7 bien que peu de données soient disponibles).

On peut citer par exemple dans cette catégorie :

- De nombreuses fractions solides de digestats de méthanisation
- Des fumiers très pailleux de vaches laitières
- Des fumiers de bovin d'étable animaux entravés
- Des fumiers de bovin litière accumulée compacts jeunes
- Des fumiers de bovin compacts pente paillée jeunes
- Des fumiers mous de logettes très peu paillées
- Des fumiers mous de logettes moyennement paillées
- Des fumiers d'ovins / caprins
- Des fumiers de porc à l'engraissement à base de paille
- Des composts de lisier de porc avec déchets verts de 6 mois
- Des composts de lisier de porc avec paille de 4 mois
- Des lisiers de lapin 20 à 25 % MS
- Des vinasses de betterave
- Des composts urbains et de biodéchets
- Des composts de MIATE (Matières d'Intérêt Agronomique issues du Traitement des Eaux, i.e. boues ou dérivés d'origine urbaine ou industrielle) avec support carboné

La caractérisation de cette classe s'appuie sur les cinétiques de minéralisation de l'azote pour les fumiers de bovins mobilisées dans l'étude précédente de 2012 et issues de la base de données ADEME ISMO ainsi que des cinétiques minimales et maximales qui en ont découlé. L'analyse des bases de données a également permis d'associer, par extension, d'autres produits à cette catégorie comme des vinasses de betterave, lisiers de lapins (20-25 % de MS), composts de lisier de porc avec paille de 4 mois, composts de lisier de porc avec déchets verts de 6 mois, fumiers de porc à l'engraissement à base de paille, fumier d'ovin / caprin, des fumiers mous de logettes. La classe 3 de la typologie issue de Bouthier et al. (2009) présente une cinétique de minéralisation de l'azote organique progressive et atteignant 20 à 40 % de l'azote organique appliqué. Cette classe regroupe des fumiers de bovins essentiellement. Dans le projet PROLAB, les cinétiques de minéralisation d'un fumier très pailleux de vaches laitières et d'un digestat solide issu de déchets agricoles (pailles et fumiers de taurillons) se

caractérisaient également par le type de comportement décrit ici. Le digestat solide présentait une organisation rapide avant une reminéralisation qui atteignait 20 % de l'azote organique apporté.

Pour finir, dans la base de données Digestats d'INRAE LBE, bien que peu de résultats de cinétiques de minéralisation soient disponibles, l'ensemble des fractions solides de digestats pour lesquels de tels suivis ont été réalisés présentent des proportions d'azote minéralisé au bout de 175 jours normalisés inférieures à 30 %. L'analyse de l'ensemble des fractions solides caractérisées dans la base met en outre en avant des caractéristiques proches des fumiers pailleux de ruminants : des teneurs en azote ammoniacal autour de 20 % et dépassant rarement 30 % et un C/N supérieur à 10.

#### **Classe 4 : Produits organiques à minéralisation d'azote importante et progressive et à teneur en azote ammoniacal limitée**

Cette classe se caractérise par des PRO qui minéralisent plus de 30 % de l'azote organique au cours de l'année suivant l'épandage mais de manière relativement progressive. L'analyse des caractéristiques de ces produits, bien que peu aient pu être collectées jusqu'à présent, fait ressortir un C/N majoritairement compris entre 7 et 15 et une stabilité de la matière organique un peu plus faible que pour la classe 3 (ISMO compris entre 0,4 et 0,6).

On peut citer par exemple dans cette catégorie :

- Des fientes de volailles séchées
- Des boues de station d'épuration déshydratées
- Des fumiers de volaille de chair avec litière de paille
- Des fumiers de dinde avec litière de paille
- Des fientes de poules pondeuses séchées (80% MS)
- Certains composts de fientes de volaille avec litière
- Des vinasses

Les produits pailleux de cette classe comme les fumiers de volaille peuvent présenter une phase organisation initiale de leur azote ammoniacal, mais contrairement aux produits des autres classes, cette immobilisation de l'azote est faible et de très courte durée.

La caractérisation de cette classe s'appuie sur les cinétiques de minéralisation analysées dans les travaux de Bouthier et al. (2009). Les classes 4 et 5 de la typologie réalisée dans cette étude se composent de PRO qui minéralisent progressivement de 30 à 80 % de l'azote organique appliqué, dont la moitié au cours des 50 premiers jours normalisés suivant l'épandage. Les fumiers de volailles, les boues urbaines déshydratées et les vinasses composaient ces classes dans l'étude. Dans le projet PROLAB, les cinétiques de minéralisation de fumier de volailles de chair sur sciure et des boues de station d'épuration déshydratées se caractérisaient également par une minéralisation progressive pour atteindre un seuil autour de 40 % de l'azote minéralisé. Le Roux et al. (2016) ont en outre comparé la minéralisation de fientes brutes et de fientes séchées : la courbe de minéralisation des fientes lorsqu'elles étaient séchées présentaient une augmentation progressive qui s'approche des 30 % au bout de 175 jours.

**Classe 5 : Produits organiques à minéralisation d'azote importante et rapide et à teneur en azote ammoniacal limitée**

Ces produits minéralisent également plus de 30 % de l'azote organique au cours de l'année suivant l'épandage mais on constate que cette valeur est atteinte bien plus rapidement que pour la classe 4 (50 jours normalisés environ). L'analyse des caractéristiques de ces produits, bien que peu aient pu être collectées jusqu'à présent, fait ressortir un C/N majoritairement compris entre 6 et 12 et une stabilité de la matière organique faible (ISMO inférieur à 0.5)

On peut citer par exemple :

- Des fientes de poules biologiques
- Des lisiers de canards gras
- Des lisiers de lapins
- Certains lisiers de bovins
- Du guano d'oiseaux marins
- Effluents de féculerie et de distillerie
- Boues urbaines pâteuses non déshydratées
- De la farine de plumes (hydrolysées et non hydrolysées)
- De la farine de poisson
- De la farine de sang
- De la farine d'os
- Des soies de porcs
- Des tourteaux de ricin

La caractérisation de cette classe s'appuie sur les cinétiques de minéralisation analysées dans les travaux de Bouthier et al. (2009). La classe 6 de la typologie réalisée dans cette étude présente des PRO qui minéralisent entre 40 et 80 % de leur azote organique et pour lesquels l'essentiel de la minéralisation se passe dans les 50 premiers jours normalisés suivant l'épandage. Les fientes de volailles, effluents de féculerie et de distillerie ainsi que des boues urbaines pâteuses suivis dans cette étude rentrent dans cette catégorie. Les travaux de Leclerc (1989) montrent que dans le cas du guano d'oiseaux marins, les cinétiques de minéralisation mesurées atteignent de l'ordre de 95 % en 2 mois. Ces déjections contiennent de plus des quantités d'azote importantes essentiellement sous forme organique (Guet 2003). Les résultats de cinétiques de minéralisation réalisées dans le cadre du projet Trochard et Houot (2017) pour un digestat liquide issu de fumiers de vaches laitières (20 %), de lisier de bovin (45 %), de lisier de porc (19 %), de déchets tiers (1 %) et de déchets d'industrie alimentaire liquides (15 %) montraient que ce digestat liquide présentait une minéralisation rapide de l'azote organique qui atteignait près de 40 % d'azote minéralisé bien avant 50 jours normalisés.

**Classe 6 : Produits organiques à forte teneur en azote ammoniacal**

Ces produits contiennent initialement une forte proportion d'azote sous forme minérale (> 30 %) immédiatement disponible pour la plante mais susceptible d'être perdu par lixiviation ou par volatilisation. Ils peuvent de plus présenter une minéralisation rapide de la part d'azote organique.

Quelques exemples :

- De nombreuses fractions liquides de digestat de méthanisation
- De nombreux digestats bruts en particulier issus d'intrants de type lisier de non ruminants et de graisses

- Des fractions solides de digestats de méthanisation dont les intrants sont constitués au moins en partie de lisier de non ruminants
- Des effluents peu chargés (purin dilué et mélanges) de bovin
- Des lisiers de bovin dilués système couvert
- Des lisiers de veau de boucherie
- Des lisiers de bovin à l'engraissement non dilués système couvert
- Des lisiers de porcs mixtes
- Des lisiers de porcs engraissement
- Des lisiers de truies gestantes
- Des lisiers de truies allaitantes
- Des lisiers de canard (< 10 % de MS)
- Des fractions liquides issues d'un raclage en V en élevage porcin
- Des fractions liquides issues de la séparation de phase, en élevage de lapins

La caractérisation de cette classe s'appuie sur les analyses de l'étude précédente (ACTA-ARTELIA 2012) à partir de différentes bases de données de PRO qui avaient permis de déterminer des teneurs importantes de plus de 30 % pour différents lisiers de bovins, purins dilués de bovins, lisiers de canards. L'analyse de la base de données Digestats d'INRAE LBE montre que la très grande majorité des digestats bruts et des fractions liquides de digestats ont des teneurs en azote ammoniacal supérieures à 30 % de l'azote total (Figure 4). La variabilité au sein des digestats bruts est par contre bien plus importante mais on constate que la moitié des digestats bruts étudiés ont des teneurs en azote ammoniacal supérieures à 40 % de l'azote total. Ces résultats sont cohérents avec l'analyse faite par Maynaud et al. (2017). L'analyse de la composition des intrants de ces digestats bruts semble montrer qu'il s'agit principalement de digestats à base de lisier de ruminants ou non-ruminants ainsi que de graisses. Les travaux de Möller et Müller (2012) font ressortir des teneurs en azote ammoniacal supérieures à 30 % de l'azote total pour les phases liquides des digestats, quels que soient les intrants initialement incorporés, de même que pour les digestats bruts analysés. Les données IFIP sur les effluents porcins permettent en outre de classer de nombreux produits issus des élevages porcins dans cette classe.

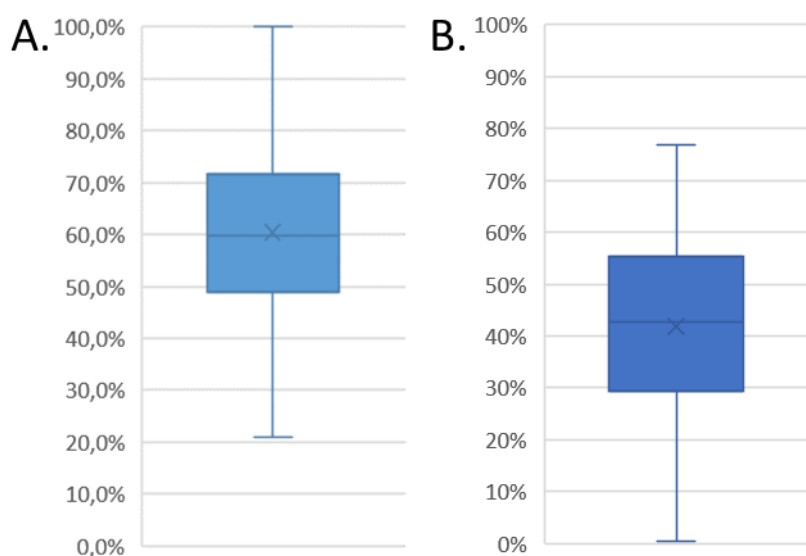


Figure 4 : Teneurs en azote minéral (% N total) des fractions liquides de digestats (A) et des digestats bruts (B) issue de la base de données Digestats INRAE LBE

**Classes 7 et 8 : fertilisants avec azote essentiellement minéral**

Il s'agit à la fois des fertilisants azotés de synthèse et des produits issus de traitements de matières organiques qui permettent d'en extraire l'azote minéral. C'est le cas du procédé de stripping, une technique de traitement du lisier ou des digestats qui permet de récupérer 60 à 90 % de l'azote ammoniacal dans une solution acide (souvent acide sulfurique) : le sulfate d'ammonium (ou le nitrate d'ammonium en cas de lavage acide avec l'acide nitrique) issu du stripping sera assimilable à un engrais minéral azoté.

Concernant les engrais azotés de synthèse, les trois formes majeures disponibles sur le marché français sont l'ammonitrate, l'urée et la solution azotée. Ces formes d'engrais n'avaient pas été distinguées dans la précédente étude. Cependant afin de prendre en compte le risque de volatilisation, il est proposé de les distinguer comme suit :

- **Classe 7. Fertilisants azotés minéraux présentant un risque faible de volatilisation**  
On peut citer ici les ammonitrates
- **Classe 8. Fertilisants azotés minéraux présentant un risque important de volatilisation**  
Cette catégorie regroupe les sulfates d'ammoniaque, les solutions azotées et l'urée. Ces engrais se caractérisent par une forte teneur en ammonium ou en urée (dont l'hydrolyse qui se produit après son application augmente le pH autour des granulés et engendre ainsi une augmentation des émissions d'ammoniac).

La caractérisation de ces deux classes s'appuie sur les synthèses du COMIFER concernant la prise en compte de la volatilisation dans le calcul de la dose prévisionnelle pour les engrais minéraux mais aussi sur les facteurs d'émissions issus du guide EMEP pour le calcul des émissions de polluants atmosphériques (European Environment Agency (EEA) 2019). Ces facteurs d'émissions sont fixés à 20 %, 10 % et 3 % respectivement pour l'urée, la solution azotée et l'ammonitrate.

### 2.3 PARAMETRAGE DANS STICS ET SIMULATIONS DU COMPORTEMENT DES FERTILISANTS AZOTES

A partir de la typologie présentée ci-dessus, il est proposé de choisir un produit représentatif par catégorie (voir tableau 2 ci-dessous) pour réaliser des simulations dans STICS. Des travaux sont actuellement en cours (Levavasseur, com pers) pour le paramétrage de PRO dans STICS, avec de nouveaux formalismes qui représentent un compartiment labile et un compartiment récalcitrant pour chaque produit (voir présentation du modèle). Ce travail de paramétrage est réalisé à partir d'un ensemble de mesures d'incubation et a pu être mobilisé dans le cadre de la présente étude. Pour chacune des classes de la typologie proposée précédemment, un représentant a pu être paramétré à partir d'une à quelques dizaines d'incubations.

Il avait été envisagé de proposer deux représentants pour prendre en compte la variabilité au sein d'une même classe, en particulier concernant le comportement de minéralisation. Cependant cela n'a pu être réalisé, pour les raisons suivantes :

- Manque de données d'incubation dans certains cas
- Des résultats d'incubation qui restent parfois peu variables pour proposer des paramétrages distincts

Deux types de fumiers ont cependant été distingués pour la classe 3, en fonction de la présence ou non d'une phase transitoire d'immobilisation juste après l'apport. Cette question a été soulevée lors de l'élaboration des scénarios et a donc fait l'objet d'une attention particulière.



Tableau 2 : Liste des produits représentant chaque classe de fertilisant pour les simulations

Classe	Description	Représentant(s) paramétré(s)
1	Produits organiques qui réorganisent l'azote puis libèrent peu ou pas d'azote à moyen terme	Fumier de cheval
2	Produits organiques à minéralisation d'azote très lente et à teneur en azote ammoniacal faible	Compost de déchets verts
3	Produits organiques à minéralisation d'azote lente et à teneur en azote ammoniacal limitée	Fumier de bovin - deux types : - 3a) Un fumier frais pailleux dont la dégradation nécessite une remobilisation préalable de l'azote du sol - 3b) Un fumier plus vieux décomposé
4	Produits organiques à minéralisation d'azote importante et progressive	Fumier de volailles
5	Produits organiques à minéralisation d'azote importante et rapide	Fientes de volailles Boues de station d'épuration urbaine
6	Produits organiques à forte teneur en azote ammoniacal (> 30 % de l'azote total)	Lisier de porc
7	Fertilisants azotés minéraux présentant un risque faible de volatilisation	Ammonitrate
8	Fertilisants azotés minéraux présentant un risque important de volatilisation	Urée* Solution azotée*

\* déjà paramétré dans le modèle

**Remarque** : un paramétrage à partir de données d'incubations de digestats avait également été proposé initialement. Il s'agissait cependant d'une cinétique moyenne tous digestats confondus, qui donnait lieu à une minéralisation très faible (comparables aux courbes de minéralisation de digestats solides dans la bibliographie). Il n'a pas semblé pertinent de mobiliser cette cinétique, issue d'une variabilité trop importante de comportements des digestats.

Le tableau 3 présente une partie des paramètres renseignés dans le modèle pour les fertilisants organiques (classe 1 à 6). Il s'agit uniquement des paramètres permettant de décrire les caractéristiques de chacun des produits, qui viennent compléter les paramètres spécifiques au formalisme de minéralisation du modèle. Ils sont issus de différentes références bibliographiques et en particulier des fiches réalisées dans le cadre du RMT « élevages et environnement » (Levasseur et al., s. d.).

Tableau 3 : Caractéristiques des fertilisants organiques "représentants" paramétrés dans le modèle STICS

Nom	MS (%MB)	N minéral (kgN/tMB)	Norg produit (kgN/tMB)	C/Norg	C/N	Sources
<b>Fumier de cheval</b>	54	2	6,05	32	24	Paramétrage F. Levvasseur (Martin-Rosset et al. 2013) composition chimique du fumier et du compost (d'après IFCE 2007 et FIVAL 2006)
<b>Compost de DV</b>	70	0,4	11,9	15	15	Paramétrage F. Levvasseur Caractéristiques par défaut proposé dans STICS
<b>Fumier de bovin 1</b>	20	1	5,9	16	14	Paramétrage F. Levvasseur Caractéristiques de "Fumier de bovins sur litière accumulée" (fiche RMT E&E, Idele)
<b>Fumier de bovin 2</b>	15	1,4	4,0	12	9	Paramétrage F. Levvasseur Caractéristiques des fumiers de bovins (fiches RMT E&E, Idele)
<b>Fumier de volailles</b>	55	3	19,1	14	11	Paramétrage F. Levvasseur Caractéristiques de "Fumier de poulet de chair conventionnel" (fiche RMT E&E, ITAVI)
<b>Fientes de volailles</b>	75	3,25	35,8	9	8	Paramétrage F. Levvasseur Caractéristiques de "Fientes de poudeuses en cages » (fiche RMT E&E, ITAVI)
<b>Boues de STEP</b>	10	1,20	4,3	7	5	Paramétrage F. Levvasseur Caractéristiques par défaut proposé dans STICS
<b>Lisier de porc</b>	7	3,7	2,0	12	4	Paramétrage F. Levvasseur Caractéristiques de "Lisier de porcs charcutiers" (fiche RMT E&E, IFIP)

Des tests préliminaires ont été effectués sur sol nu dans STICS pour vérifier le comportement de ces représentants paramétrés dans le modèle. Les résultats obtenus sont dans l'ensemble cohérents avec les dynamiques de libération de l'azote décrites pour chaque catégorie de la typologie, comme le montrent le tableau 4 et la figure 5. Le fumier de volailles minéralise toutefois moins que ce qui avait été envisagé, mais ce comportement est en accord avec les mesures d'incubation obtenues. Le choix de ce représentant peut être remis en question mais il n'a pas été possible de proposer actuellement un autre représentant à paramétrer dans le modèle.

Tableau 4 : Azote minéral fourni sur une année par les différents fertilisants organiques paramétrés dans STICS

		N minéral disponible sur l'année (en kgN/ha pour 100 kgNtot/ha)		
		N minéral	N minéralisé	Total
1	Fumier de cheval	24,8	-29,5	-4,7
2	Compost de DV	3,3	3,1	6,4
3	Fumier de bovin 1	14,6	12,5	27,1
3	Fumier de bovin 2	25,9	16,9	42,8
4	Fumier de volailles	13,5	13,9	27,4
5	Fientes de volailles	8,3	31,4	39,7
5	Boues de STEP	21,8	29,5	51,3
6	Lisier de porc	65,3	13,7	79

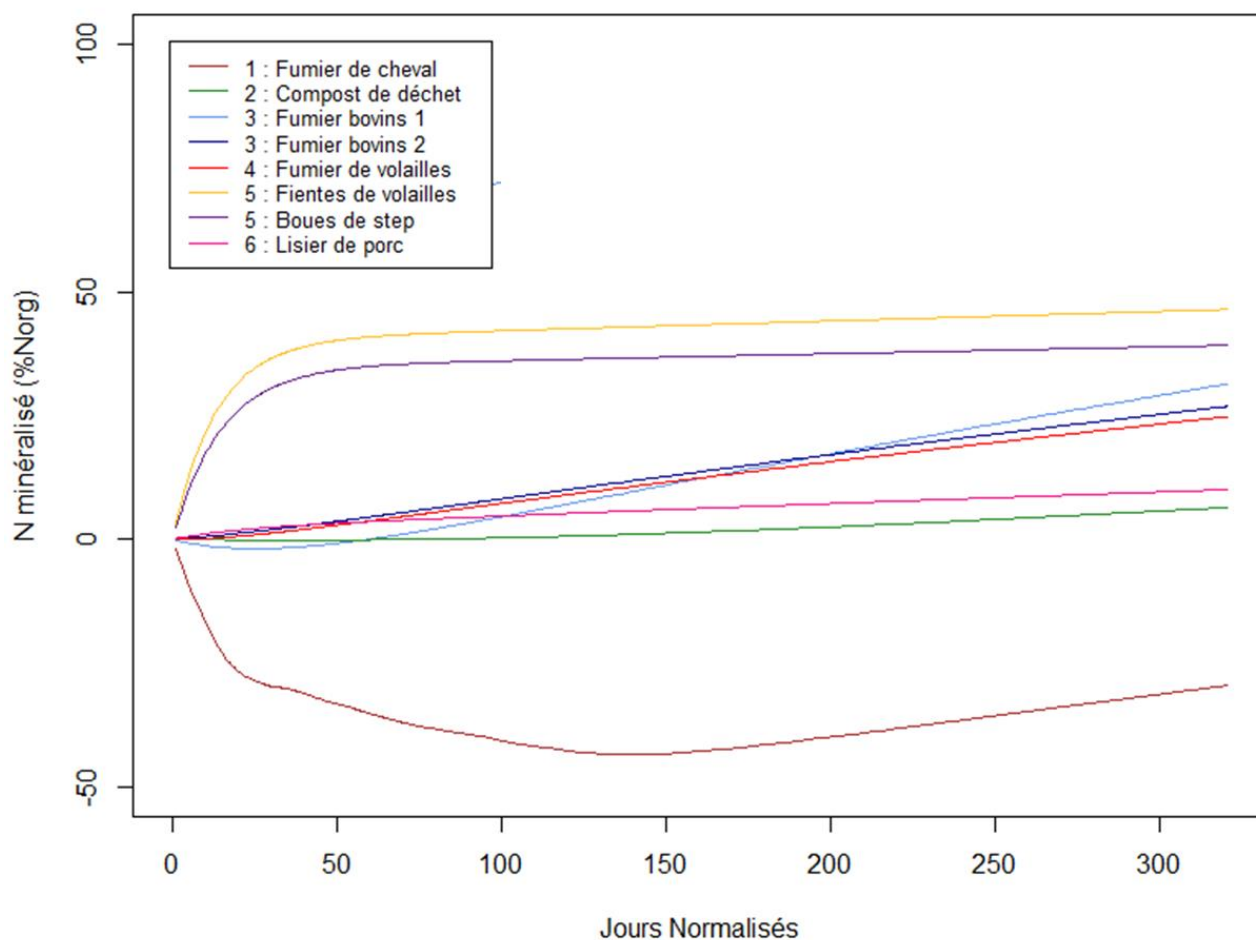


Figure 5 : Dynamiques de minéralisation de l'azote provenant des différents fertilisants organiques représentants des classes 1 à 6 de la typologie

### 2.3.1 Discussion et limites de la typologie proposée

La typologie proposée dans cette étude a cherché à intégrer des fertilisants plus récents. Cependant les travaux associés à certains de ces nouveaux produits ne permettent pas toujours une prise de recul suffisante. Ils permettent cependant de dégager quelques tendances sur le comportement de ces engrais vis-à-vis de l'azote rendu disponible. De nouvelles formes d'engrais de synthèse sont par exemple apparues sur le marché et revendiquent une meilleure efficacité du fait d'une réduction des pertes et une absorption favorisée.

On peut citer quelques exemples comme de l'urée imprégnée d'additifs inhibiteurs d'uréase (NBPT, NPPT) permettant de ralentir l'hydrolyse de l'urée en ion ammonium pour limiter la volatilisation ou encore de l'urée enrobée imprégnée dans de l'huile qui se dilatera ensuite sous l'effet de la chaleur, permettant une libération progressive de l'azote uréique. Des essais menés par Arvalis sur de l'urée avec inhibiteurs et de l'urée enrobée comparé à des engrais plus classiques (ammonitrate, urée) n'ont pas fait ressortir de performance significativement plus importante comparée à l'ammonitrate dans des situations favorables à une bonne valorisation des engrais apportés (enfouissement, irrigation). Les résultats sont en revanche significatifs quand ils sont comparés à l'urée classique.

Ces produits commencent aujourd'hui à être pris en compte dans les réglementations de certains pays, comme par exemple en Belgique où les engrais avec retardateur sont distingués dans le programme national de mise en œuvre de la Directive Nitrates. Cependant la réglementation propose une

adaptation au cas par cas pour les périodes d'interdiction d'épandage de ces engrais, soulignant la question encore complexe autour de ces produits.

L'élaboration de la typologie s'est de plus concentrée autour d'un nombre restreint de critères afin de rester opérationnelle. Certains aspects qu'il aurait pu être intéressant d'intégrer n'ont pas été pris en compte. C'est le cas par exemple de la capacité d'un produit à s'infiltrer plus ou moins rapidement dans le sol. Elle est liée à la teneur en eau des produits mais aussi pour les engrais minéraux solides à un potentiel rapide de solubilisation du produit en cas de pluie. Cette capacité d'infiltration dans le sol peut limiter le risque d'émissions gazeuses et en particulier de volatilisation. Bien que la teneur en matière sèche des produits organiques soit un facteur pris en compte dans les formalismes du modèle STICS, les premiers tests n'ont pas fait ressortir d'écarts significatifs selon la sécheresse du produit et cet aspect n'a donc pas été retenu en priorité.

### 3 ANALYSE DE L'IMPACT DES PERIODES D'EPANDAGE DANS DIFFERENTES SITUATIONS IDENTIFIEES

---

#### 3.1 METHODOLOGIE

##### 3.1.1 Les situations traitées

Pour la réalisation d'un certain nombre de simulations qui permettent d'apporter des réponses concernant les impacts des pratiques d'épandage (en particulier le choix des périodes d'épandage) sur les pertes par lixiviation et les émissions gazeuses, il était nécessaire d'identifier des situations à enjeux vis-à-vis des objectifs de l'étude. Elles ont été définies pour cette étude selon les critères suivants :

- La situation concerne des pratiques courantes sur le territoire hexagonal,
- La situation relève d'un enjeu particulier vis-à-vis des risques de pertes azotées et de la réglementation actuelle des périodes d'interdiction d'épandage,
- La situation permet d'apporter des connaissances complémentaires aux études déjà menées, qu'il s'agisse d'une meilleure prise en compte intégrée des impacts sur l'eau et sur l'air ou d'identifier des critères permettant de limiter les risques sur certaines périodes (situation pédoclimatique, dose d'apport, méthode d'apport, ...).

Les réflexions se sont appuyées à la fois sur (i) la description des pratiques actuelles sur le territoire métropolitain (références Agreste et des instituts techniques agricoles), (ii) la réglementation actuelle à l'échelle nationale et les possibles renforcements à des échelles plus locales, (iii) des essais et études qui ont déjà permis d'analyser l'impact de pratiques d'épandage sur les pertes azotées mais aussi (iv) l'avis des experts, du Comité de suivi et du Comité Scientifique et Technique du GENEM, qui ont fait quelques propositions pour approfondir les travaux menés en 2012.

Du fait de la contrainte de temps de l'étude mais aussi des limites du modèle utilisé (par exemple une culture que l'on ne pourrait pas modéliser ou un facteur mal pris en compte par le modèle), 8 situations ont été retenues et traitées au cours des deux phases de l'étude :

- Épandage de fertilisants organiques sur couvert précédant un maïs (phase 1 et 2)
- Épandage de fertilisants organiques sur maïs (phases 1 et 2)
- Épandage fractionné de fertilisants minéraux sur maïs (phase 2)
- Épandage de fertilisants organiques sur prairie (phase 1)
- Fertilisation modérée d'automne-hiver sur colza (phases 1 et 2)

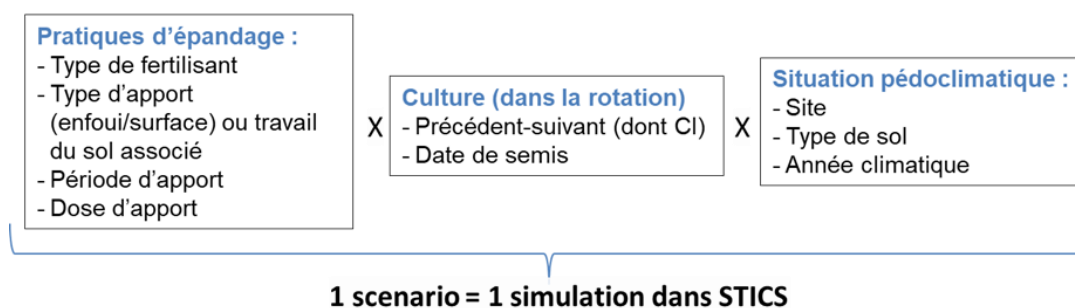
- Épandage fractionné de fertilisants minéraux sur céréales d'hiver (phase 2)
- Épandage de fertilisants sur CI en interculture courte (phase 2)
- Épandage de fertilisants sur CIVE et dérobées en interculture longue (phase 2)

Les situations traitées en phase 2 ont été étudiées sur un nombre restreint de contextes pédoclimatiques par rapport aux situations de phase 1. Ces pédoclimats sont précisés dans le paragraphe suivant.

### 3.1.2 Différentes modalités testées pour chaque situation

En vue des simulations avec STICS, ces 8 situations sont par la suite déclinées, selon le type de sol, le climat, le système de culture et l'itinéraire technique (tout particulièrement les pratiques de fertilisation), en une multitude de scénarios. Le schéma ci-dessous précise les variables à paramétrer pour chaque scénario.

- **Scénario** = pratiques d'épandage sur une culture avec un précédent et une situation pédoclimatique



Les pratiques d'épandage simulées dans STICS sont analysées à l'échelle du précédent-suivant. Les scénarii sont donc élaborés de la même manière : **culture précédente - (couvert en interculture) - culture suivante**.

Concernant les situations pédoclimatiques, il a été décidé de reprendre, pour la phase 1, celles qui avaient été utilisées en 2012 pour l'étude sur les cultures intermédiaires (Justes et al. 2012) et remobilisées dans la précédente actualisation de l'étude sur les périodes d'épandage (ACTA-ARTELIA 2012). La méthode employée n'avait pas pour ambition de proposer une vision exhaustive de l'ensemble des pédoclimats de toutes les régions agricoles françaises ni une représentation spatialement pondérée, mais de couvrir une large gamme de situations pédoclimatiques. Ainsi en 2012, l'étude s'est fondée sur une sélection de 24 points climatiques sur le territoire (Figure 6). Ces points de grille climatique correspondaient à des climats ayant une bonne représentativité régionale (sauf situations topographiques particulières). A chacun de ces points ont été associés deux sols représentatifs de la zone et contrastés (selon des niveaux de minéralisation). Ces sols sont présentés en annexe 1.1. Pour chaque point, on simulera également 20 années climatiques à partir des données SAFRAN. Cela représente donc **960 simulations associées à une pratique d'épandage**.

Les situations traitées lors de la phase 2 ont été étudiées sur un nombre restreint de sites, sélectionnés dans les zones les plus pertinentes vis-à-vis de la culture considérée tout en conservant une diversité pédoclimatique de l'échantillon. Le choix des sites sera détaillé et expliqué dans chaque description de situation.

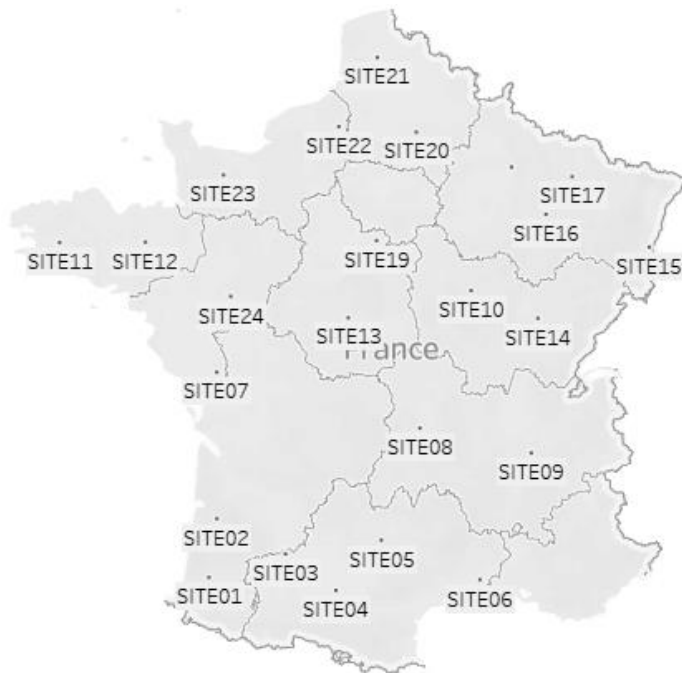


Figure 6 : Sélection des 24 sites utilisés pour les simulations

Outre la déclinaison des scénarios selon différentes modalités pédoclimatiques, un certain nombre de modalités liées aux pratiques agricoles ont été testées. Elles sont listées ci-dessous mais il faut noter qu'elles ne sont pas systématiquement toutes considérées pour l'ensemble des situations :

- La précocité de semis d'une culture et de sa récolte/destruction
- Le type de fertilisant apporté
- La quantité de fertilisant apporté (exprimée en azote minéral pour les engrais minéraux et en azote efficace pour les fertilisants organiques)
- La période d'apport du fertilisant (à des dates fixes ou en fonction de la date de semis d'une culture)
- Le fractionnement de l'apport
- Le choix d'un apport en surface ou en profondeur
- Le reliquat d'azote dans le sol avant semis de la culture

### 3.1.3 Analyse des résultats de simulation avec STICS

Les résultats de simulations ont principalement été analysés à partir de variables de cumuls sur différentes périodes fixées (par exemple un cumul de surplus de lixiviation pendant la période automne-hiver) ou des variables d'état à une date fixée ou calculée (par exemple : le calcul du reliquat entrée hiver). L'analyse s'est essentiellement appuyée sur les valeurs de médianes, 1<sup>ers</sup> quartiles (ou centile 25) et 3<sup>èmes</sup> quartiles (centile 75). Pour certaines analyses plus ciblées sur quelques sites, un travail sur les dynamiques de certaines variables de sortie a été réalisé mais ne constitue pas la majeure partie de l'étude. Le tableau 5 présente les variables étudiées dans ce rapport.

Tableau 5 : Variables de sorties analysées à partir des résultats de simulations STICS

		Variables	Détails
Evaluer les pertes azotées	Lixiviation	Quantité maximale d'azote minéral dans le sol à l'automne (en kgN.ha <sup>-1</sup> )	Afin de prendre en compte la variabilité du démarrage du drainage selon les sites et les années et d'évaluer le risque potentiel de lixiviation hivernale, le reliquat n'est pas évalué à une date fixe mais par sa valeur maximale à l'automne.
		Surplus d'azote lixivié pendant la période automne-hiver ou printemps par rapport à la situation témoin exprimé en kgN.ha <sup>-1</sup> et en kgN.ha <sup>-1</sup> pour 100 mm d'eau drainée	Ces deux indicateurs permettent dans un premier cas d'être comparable aux autres flux d'azote exprimés en kgN/ha et dans le second cas de s'affranchir de l'effet du volume de lame drainante pour comparer différentes conditions pédoclimatiques
	Volatilisation	Surplus d'azote émis par volatilisation en kgN.ha <sup>-1</sup> et en %N apporté pour chaque épandage considéré	Ces deux indicateurs permettent dans un premier cas d'être comparable aux autres flux d'azote exprimés en kgN/ha et dans le second cas d'effectuer des comparaisons avec d'autres références bibliographiques
	Emissions N <sub>2</sub> O	Surplus d'émissions en kgN/ha à l'échelle de la simulation	Ces émissions sont ponctuellement présentées à titre indicatif mais n'ont pas fait l'objet d'une analyse approfondie
Evaluer l'impact sur la croissance et l'absorption de la culture	Biomasse	Surplus de biomasse aérienne accumulée en tMB.ha <sup>-1</sup>	Le surplus de biomasse accumulée est analysé sur différentes périodes selon la pertinence pour la situation traitée
	Absorption d'azote	Surplus d'azote absorbé par la culture en place ou suivante en kgN.ha <sup>-1</sup>	Cet indicateur permet une comparaison aux autres flux d'azote exprimés en kgN/ha
		Coefficient Apparent d'Utilisation (en %)	Cet indicateur permet de s'affranchir de l'effet de la quantité d'azote apporté
Carence azotée	Indicateur ICDC	Il s'agit d'un indicateur proposé par (Jeuffroy et Bouchard 1999) permettant de caractériser une carence en azote temporaire par le produit de son intensité (IC) et de sa durée (DC)	

#### Estimer l'accès à la parcelle selon la portance des sols sur une période :

Lors de la phase 2, un travail complémentaire a porté sur la portance des sols pendant les périodes d'apport testées. Afin d'évaluer l'accès à la parcelle selon la portance des sols, la méthode décrite dans Justes et al, 2012 a été reprise ici avec toutefois quelques modifications. Cette méthode s'appuie sur la comparaison journalière de la teneur en eau dans les premiers horizons de sol à une valeur d'humidité critique afin de définir un nombre de jours disponibles pour des interventions à la parcelle. Dans l'étude de 2012, les valeurs d'humidité critiques avaient été déterminées pour des contraintes de 40 kPa. Dans le cas du matériel utilisé pour l'épandage de différents fertilisants azotés, cette contrainte semble faible par rapport aux références : d'après les références disponibles (Tomis et al. 2018) et simulations faites avec Terranimo® (Stettler et al. 2014), les contraintes exercées sur le sol

sont de l'ordre de 100 à 140 kPa pour ce type de matériel. Les humidités critiques correspondantes à ces niveaux de contraintes sont issues des travaux de Lefebvre (2010) et sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 6 : Caractéristiques des sols et seuils d'humidités critique retenus (Sources : (Justes et al. 2012 ; Lefebvre 2010))

Texture du sol	H <sub>CC</sub> sur 0-30 cm	H <sub>PF</sub> sur 0-30 cm (% massique)	Humidité critique à 100 kPa (%HCC)		Humidité critique à 140 kPa (%HCC)	
			0-10 cm	10-30 cm	0-10 cm	10-30 cm
Grossière	13.6-18.7	5.9-12.2	116	126	69	94
Moyenne	19.8-26.6	19.8-26.6	106	110	98	102
Moyenne fine	23.2-27	23.2-27	98	101	94	94
Fine	26.7-28	26.7-28	91	98	94	94

H<sub>CC</sub> : humidité à la capacité au champ

H<sub>PF</sub> au point de flétrissement

Dans le cas où l'humidité de l'un des 2 horizons de sol 0-10 cm ou 10-30 cm dépasse son seuil critique, un passage d'engin agricole risque d'entraîner un tassement du sol. Dans les différents scénarios qui sont simulés et analysés par la suite, cette problématique est suivie au travers d'un calcul du nombre de jours par quinzaine pour lesquels la parcelle n'est pas accessible du fait d'un risque de tassement.

La portance des sols a été étudiée sur une partie des situations en particulier lorsque des apports entre l'automne et la fin de l'hiver étaient réalisés.

### 3.2 EPANDAGE DE FERTILISANTS ORGANIQUES SUR COUVERT PRECEDANT UN MAÏS

Le maïs grain et ensilage sont fortement cultivés en France (avec des surfaces à peu près équivalentes de plus de 1,4Mha pour le maïs grain comme pour le maïs ensilage d'après les Statistiques Agricoles Annuelles (Agreste, 2018). Les surfaces en maïs recevant des apports organiques peuvent être importantes en particulier dans les régions d'élevage avec par exemple plus de 50 % des surfaces en Bretagne, Normandie, Pays de la Loire d'après l'enquête Pratiques Culturelles (Agreste, 2011). Les apports organiques peuvent se faire au printemps mais aussi à l'automne précédent. Du fait de l'obligation d'implanter un couvert d'interculture en zone vulnérable, la situation traitée ici s'intéresse aux apports d'automne sur un couvert intermédiaire, bien que la culture de maïs fasse encore régulièrement l'objet de dérogations en particulier dans des cas de monoculture de maïs où l'interculture est plus courte (Justes et al. 2012).

L'actuelle réglementation interdit l'épandage des fertilisants de type I :

- De 20 jours avant la destruction du couvert jusqu'au 15 janvier pour les fumiers compacts non susceptibles d'écoulement et composts d'effluents d'élevage
- Du 1<sup>er</sup> juillet à 15 jours avant l'implantation de la CIPAN ou de la dérobée et de 20 jours avant la destruction de la CIPAN ou la récolte de la dérobée et jusqu'au 15 janvier pour les autres effluents de type I

Ce type de fertilisants, caractérisé par un ratio C/N > 8, correspond aux classes 1 à 4 de la typologie présentée dans cette étude.



Dans le cas des fertilisants de type II (classe 5 et 6 de la présente étude), la période d'interdiction se prolonge jusqu'au 31 janvier.

L'objectif de cette analyse est de s'intéresser à l'effet d'un apport à l'interculture d'un produit organique selon sa classe et sa période d'apport sur :

- L'absorption du couvert d'interculture
- Les risques de pertes azotées entre la fin de l'été et la fin de l'hiver soit par lixiviation soit par volatilisation
- La croissance du maïs implanté à la suite du couvert

### 3.2.1 Références bibliographiques

Une étude réalisée en 2012 (Justes et al. 2012) afin d'établir un état des connaissances sur la gestion de l'azote en période d'interculture au moyen de cultures intermédiaires avait entre autres objectifs permis d'évaluer les capacités d'absorption de cultures intermédiaires pièges à nitrate (CIPAN) pendant l'automne et l'hiver et les risques de pertes d'azote associées sur cette même période. Cette étude s'était appuyée à la fois sur de nombreuses références bibliographiques nationales et internationales ainsi que sur un travail de modélisation réalisé avec STICS.

Les résultats de cette étude ont montré une efficacité des CIPAN à réduire les fuites de nitrates à la fois par une réduction du drainage (de l'ordre de 30 à 50 mm bien que variable selon les pédoclimats et la gestion de la CIPAN) et par une absorption importante d'azote, pouvant même mener à une disponibilité en azote diminuée pour la culture suivante.

Dans le cas de la succession blé-maïs et maïs-maïs qui faisait partie du plan de simulation de cette étude, des taux d'abattement médians entre 70 et 80% ont été obtenus concernant les concentrations nitriques des eaux de drainage dans le cas où une moutarde ou un raygrass était implanté pendant l'interculture. Les cultures de légumineuses, bien que toujours utiles pour réduire les fuites de nitrate et la concentration nitrique, sont en revanche deux fois moins efficaces que des graminées ou des crucifères. Quant aux repousses de colza ou de blé, leur capacité d'absorption s'est avérée efficace dans des cas d'un développement dense et homogène.

Les conclusions de l'étude nuancent également cette efficacité selon les conditions pédoclimatiques rencontrées. Les sols argileux (37 à 45% Arg.) nécessitant un travail du sol à l'automne, obligent à une destruction précoce des couverts et limitent les capacités d'absorption de ces derniers. De même, en climat méditerranéen, des problèmes de développement se produisent certaines années, induisant une forte variabilité de l'efficacité d'absorption de la CIPAN.

L'étude n'a par contre que peu traité la question de la fertilisation organique sur ces couverts en interculture. Seuls des scénarios d'apport de lisier au semis des cultures intermédiaires ont été traités. A ce sujet, les auteurs avaient conclu à un épandage compatible avec la réduction des fuites de nitrate permise par les CIPAN uniquement dans les conditions suivantes :

- Un reliquat post-récolte faible (20-40 kg N/ha)
- L'implantation préférentielle d'une crucifère
- Le développement homogène du couvert
- Une dose de lisier inférieure à 75 kg Ntot.ha<sup>-1</sup>

### 3.2.2 Simulations de scénarios d'épandage de fertilisants organiques sur couvert précédant un maïs

#### 3.2.2.1 Plan de simulation et modalités testées

L'objectif des simulations réalisées est de tester sur une large gamme de conditions pédoclimatiques l'effet sur la croissance des cultures et sur les risques de pertes de différentes modalités d'apport de fertilisants organiques à l'automne précédant le semis d'un maïs et en présence d'un couvert en interculture.

Cette situation a été étudiée à la fois en phase 1 sur les 24 sites de l'échantillon puis en phase 2 sur un nombre restreint de sites mais en proposant un plan de simulation modifié pour favoriser l'analyse comparative avec la situation suivante qui concerne les apports sur maïs après un couvert. Les graphiques présentés ici correspondent au plan de simulation élaboré en phase 2 mais les réflexions et conclusions tiennent compte des résultats obtenus en phase 1 également. Les éléments ci-dessous présentent à la fois les pratiques d'apport sur couvert avant maïs et celles au printemps sur maïs, qui sont étudiés dans la partie suivante (Paragraphe 3.3)

Les apports sont donc réalisés soit à l'automne sur couvert soit au printemps suivant sur maïs. Une gamme de conditions pédoclimatiques restreinte par rapport à l'échantillon initial de couples site-sol a été testé en phase 2 : sur les 24 sites, 11 ont été retenus selon la surface en maïs grain ou fourrage du département associé à chacun des sites. Les modalités sont détaillées dans le tableau 7. Environ 150 000 scénarios sont simulés.

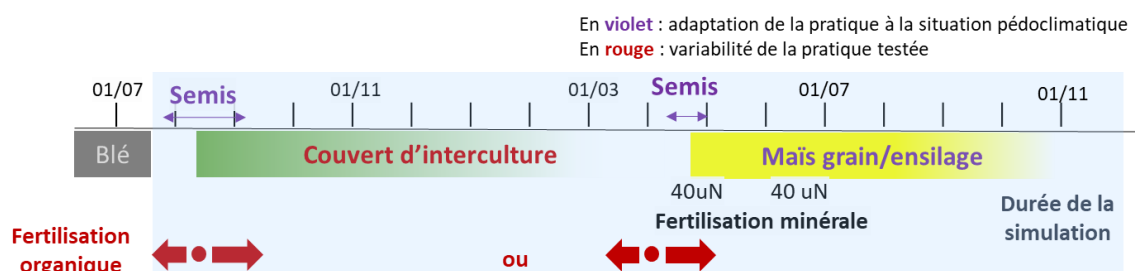


Figure 7 : Schéma chronologique de la situation sur couvert précédant un maïs

Tableau 7 : Modalités traitées pour la situation d'épandage de fertilisants organiques sur une succession d'un couvert d'interculture suivi d'un maïs

Catégorie	Modalités testées	Détails
Pédoclimat	Années climatiques Sites et sols	<p><b>20</b> années climatiques</p> <p><b>22</b> sites-sols (suivant les régions où le maïs est le plus répandu et les remontées régionales synthétisées par l'APCA )</p> <p><i>Maïs grain / maïs ensilage</i></p>

Couvert	Espèces, date de fin et destruction/récolte	<p><u>2 modalités :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Couvert type CIPAN (choix d'une moutarde) semé à date optimale (calée par site à partir de Justes et al, 2012) et détruit en novembre</li> <li>- Couvert type dérobée/CIVE semé en août à date optimale (calée par site à partir de Justes et al, 2012) récoltée mi-mars (choix RGI avant maïs ensilage et avoine rude avant maïs grain)</li> </ul>
Maïs	Ensilage/grain	<p>Une modalité selon la pratique prépondérante (en termes de surfaces) sur un site</p> <p>Semis au 15/04 ou au 25/04 respectivement pour les sites de la moitié sud ou de la moitié nord</p>
Initialisation conditions de sol avant couvert	Nsol/humidités	<p>Une modalité fixée pour chaque site à partir des résultats de simulation de 2012 sur les conditions à la récolte d'un blé d'hiver</p>
PRO	Selon la typologie	<p>3 types (soit 4 représentants) de fertilisants organiques testés : Classes 3a, 3b, 5 et 6</p> <p><i>Remarque : les classes 2 et 4 avaient également été traitées en phase 1 mais n'ont pas été reprises en phase 2 du fait d'effet non significatif pour la classe 2 et de faibles écarts de comportement entre la classe 3 et 4 dans les simulations</i></p>
Pratiques d'apport	Quantité, dates automne/ printemps, enfoui ou non	<p>Apport de fertilisant organique :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Des doses identiques d'azote total testées à l'automne et au printemps : 2 doses par produit (voir tableau 8) ainsi qu'un scénario témoin sans apport organique</li> <li><i>Remarque : Les deux doses d'azote testées correspondent à un apport de 50 et 100 kg d'azote disponible pour le maïs en cas d'apport de printemps (calculé à partir des valeurs de Keq et de premières simulations)</i></li> <li>- 4 dates d'apports testées à l'automne avant semis ou sur couvert) et 4 au printemps avant semis ou sur maïs (voir tableau 8)</li> <li>- Apport en surface ou incorporé testé systématiquement</li> </ul> <p>Fertilisation minérale :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 80 uN complémentaires en deux apports sous forme d'ammonitrate</li> <li>- Un témoin sans azote</li> </ul>

Tableau 8 : Détails des modalités liées aux pratiques d'apport de fertilisants organiques

Classe	Description produit	Volume apporté	Azote total (kgN/ha)	Azote efficace (kgNeff/ha)	Période apport	Localisation apport
3	Produit à minéralisation lente et présentant une phase transitoire d'immobilisation	29 t	200	Apports d'automne : ~ <b>35kgN</b> disponible pendant l'interculture Apports de printemps : ~ <b>50kgN</b> disponible pour le maïs	<u>Apports d'automne :</u> 20 j avant semis du couvert Au semis du couvert 40 j après semis du couvert 60 j après semis du couvert  <u>Apports de printemps :</u> 60 j avant semis 15 j avant semis Au semis 60 j après semis	Apport en surface ou incorporé testé systématiquement
		58 t	400	Apports d'automne : ~ <b>70kgN</b> disponible pendant l'interculture Apports de printemps : ~ <b>100kgN</b> disponible pour le maïs		
	Produit à minéralisation lente	25 t	135	Apports d'automne : ~ <b>40kgN</b> disponible pendant l'interculture Apports de printemps : ~ <b>50kgN</b> disponible pour le maïs		
		50 t	270	Apports d'automne : ~ <b>80kgN</b> disponible pendant l'interculture Apports de printemps : ~ <b>100kgN</b> disponible pour le maïs		
5	Minéralisation importante et rapide	3 t	130	Apports d'automne : ~ <b>45kgN</b> disponible pendant l'interculture Apports de printemps : ~ <b>50kgN</b> disponible pour le maïs		
		7 t	260	Apports d'automne : ~ <b>90kgN</b> disponible pendant l'interculture Apports de printemps : ~ <b>100kgN</b> disponible pour le maïs		
6	Forte proportion d'azote minéral	12,5 t	70	Apports d'automne : ~ <b>50kgN</b> disponible pendant l'interculture Apports de printemps : ~ <b>50kgN</b> disponible pour le maïs		
		25 t	140	Apports d'automne : ~ <b>100kgN</b> disponible pendant l'interculture Apports de printemps : ~ <b>100kgN</b> disponible pour le maïs		

### 3.2.2.2 Résultats de simulation et analyse

#### **Apports de fin d'été et d'automne : Azote fourni par le fertilisant azoté pendant la durée de la culture intermédiaire**

Les valeurs médianes pour les quantités d'azote provenant des produits organiques apportés et disponibles pour le couvert sont proches des valeurs d'azote efficace attendues (Figure 8). Elles sont cependant légèrement inférieures pour le représentant a de la classe 3a (représenté par un fumier de bovin caractérisé par une phase d'immobilisation transitoire). Pour les autres classes, les écarts entre azote efficace attendu et la valeur médiane simulée sont de moins de 5 kgN. Il faut toutefois noter une certaine variabilité autour de cette valeur médiane, s'expliquant principalement par les conditions pédoclimatiques mais aussi la localisation en surface ou en profondeur de l'apport. En effet l'azote efficace attendu avait été calé pour des situations avec enfouissement. Il est donc normal d'obtenir des valeurs plus faibles en cas d'apport en surface.



Figure 8 : Azote efficace disponible pour la culture intermédiaire selon la classe de fertilisant et la quantité de fertilisant apporté (les boxplots présentent les centiles 25, 50 et 75)

App1 : entre 35 et 50 kg Neff selon le produit/ App 2 : entre 70 et 100 kgN eff selon le produit

#### **Croissance et absorption des cultures intermédiaires**

De manière générale, en absence d'épandage de fertilisants, la biomasse et l'azote accumulés par les couverts d'interculture ne sont pas significativement différents entre les trois cultures testées avec des biomasses accumulées médianes de 2.4 ,2.5 et 2.7 tMS respectivement pour l'avoine, la moutarde et le raygrass. On constate en revanche une variabilité importante de croissance selon les sites et sols de l'échantillon comme le montre la figure 9 synthétisant les résultats pour les scénarios témoins. Les écarts de croissance entre sites s'expliquent principalement par les écarts de fournitures d'azote par les sols des différents sites. Le site-sol 03\_2 est par exemple caractérisé par un climat doux et un sol à minéralisation importante (autour de 160 kgN/ha minéralisés pendant l'interculture). On constate

dans ces conditions des niveaux d'absorption de plus de 100 kgN/ha. Au contraire, le site-sol 02\_1 a une minéralisation basale faible (entre 15 et 35 kgN/ha minéralisation sous le couvert) et les niveaux d'absorption des couverts dans les scénarios témoins sur ce sol sont de l'ordre 25 kgN/ha. Les sols à minéralisation faible dans l'échantillon sont essentiellement des sols très acides dont le pH, de l'ordre de 5, freine fortement l'activité bactériologique. Pour des sols à pH plus neutre d'un même site, l'azote absorbé par les couverts dans les scénarios témoins diminue avec l'augmentation de la teneur en carbonates et en argile, ce qui est en adéquation avec les formalismes du modèle et les récents travaux concernant la minéralisation de la matière organique du sol (Clivot et al. 2017).

Les analyses en phase 1 avaient en outre mis en avant une plus forte occurrence des gelées détruisant précocement le couvert sur les sites de l'est, du nord-est de la France et du Massif Central pour lesquels les conditions climatiques en hiver sont moins propices à la croissance du couvert. Ces constats concernent principalement l'avoine paramétré dans STICS.

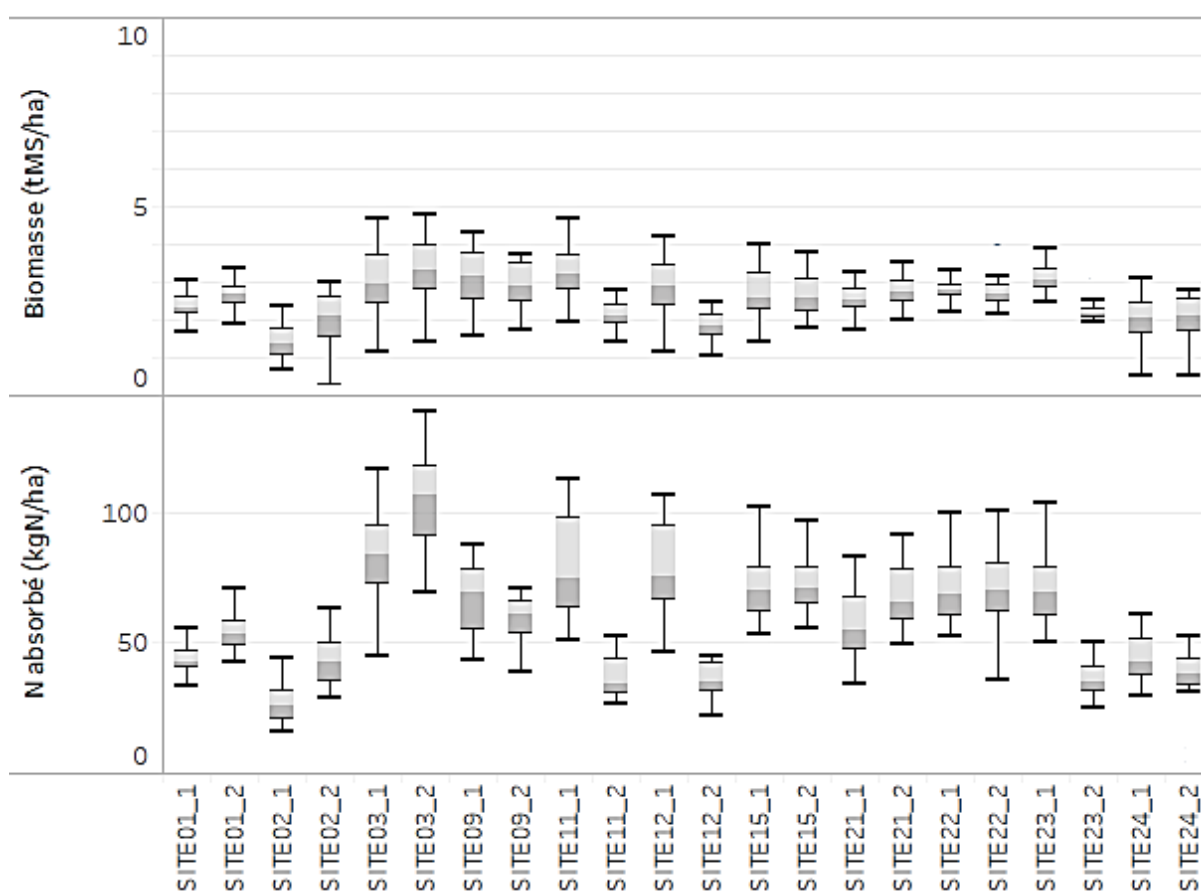


Figure 9 : Biomasse et azote accumulé par les cultures intermédiaires dans le cas des scénarios témoin sans fertilisant (les boxplots présentent les valeurs minimales et maximales ainsi que les valeurs de centiles 25, 50 et 75).

Ces écarts s'expliquent également par des dates de semis et de levée variables d'un site à un autre. En effet des dates de semis optimales ont été fixées à différentes dates selon la localisation du site et selon la culture intermédiaire considérée (au 10/08 ou au 25/08). Dans le cas des semis les plus précoces, la levée survient très majoritairement avant la fin du mois d'août mais peut être retardée jusqu'à la seconde moitié de septembre pour certains épisodes climatiques plus extrêmes. Pour des semis au 25/08, les dates de levée sont en moyenne plus tardives mais la levée a lieu très majoritairement avant mi-septembre. Seules quelques simulations présentent des levées retardées en

octobre. L'analyse comparative des dates de levée avec le cumul de pluie sur le mois d'août montre que, dans les simulations, cet indicateur climatique permet d'identifier les situations à risque de retard de levée. En effet les levées tardives correspondent uniquement à des années pour lesquelles les pluies cumulées sur le mois d'août sont inférieures à 50 mm. Il faut toutefois nuancer ce résultat puisque toutes les situations à faible pluviométrie ne génèrent pas de retard de levée. Ces résultats sont détaillés dans l'annexe 2.1.

En cas d'apport de fertilisants organiques à l'automne, comme le montre la figure 10 ci-dessous, les quantités d'azote supplémentaires absorbées par le couvert jusqu'au 31/12 varient selon les sites (avec des valeurs médianes tous produits et doses confondus entre 15 et 40 kgN/ha). L'analyse à cette date permet de s'intéresser plus spécifiquement à la part de l'apport déjà valorisée pendant l'hiver. Les différences constatées s'expliquent principalement par deux facteurs. Premièrement, comme dans l'analyse des témoins sans azote, un climat doux à l'automne et en hiver favorise la croissance et l'absorption de la culture. Les sites caractérisés par un climat océanique présentent donc des surplus plus importants. Deuxièmement, dans le cas des sols présentant une minéralisation faible en automne et en hiver, un épandage de fertilisant organique permet de compenser une fourniture d'azote par le sol plus limitée et d'augmenter fortement l'absorption initialement faible du couvert. Ce point se vérifie néanmoins uniquement pour des climats propices à la croissance du couvert à l'automne et à l'hiver. Lors de la phase 1 de l'étude, il a été identifié pour le site-sol 08\_2 dans le Massif Central, que malgré une minéralisation basale faible, les couverts tirent peu profit d'un apport supplémentaire du fait d'un climat rude induisant une diminution forte de la croissance voire une destruction par le gel dans les simulations.

En plus de la variabilité intersites, on constate des écarts importants sur chaque site-sol de ces quantités d'azote supplémentaires absorbées. La figure ci-dessous montre déjà l'effet du choix du fertilisant et de la dose d'apport avec une variabilité plus importante de l'azote absorbé en cas d'apport de près de 100 kg N efficace par rapport à des quantités plus faibles mais aussi en cas d'apport de fertilisant à libération d'azote plus rapide (classes 5 et 6). Il convient d'approfondir cette analyse en distinguant les différentes modalités testées et en reliant ces résultats aux pertes associées (lixiviation et émissions gazeuses) sur chacun des sites-sols afin d'identifier les facteurs pédoclimatiques en jeu.

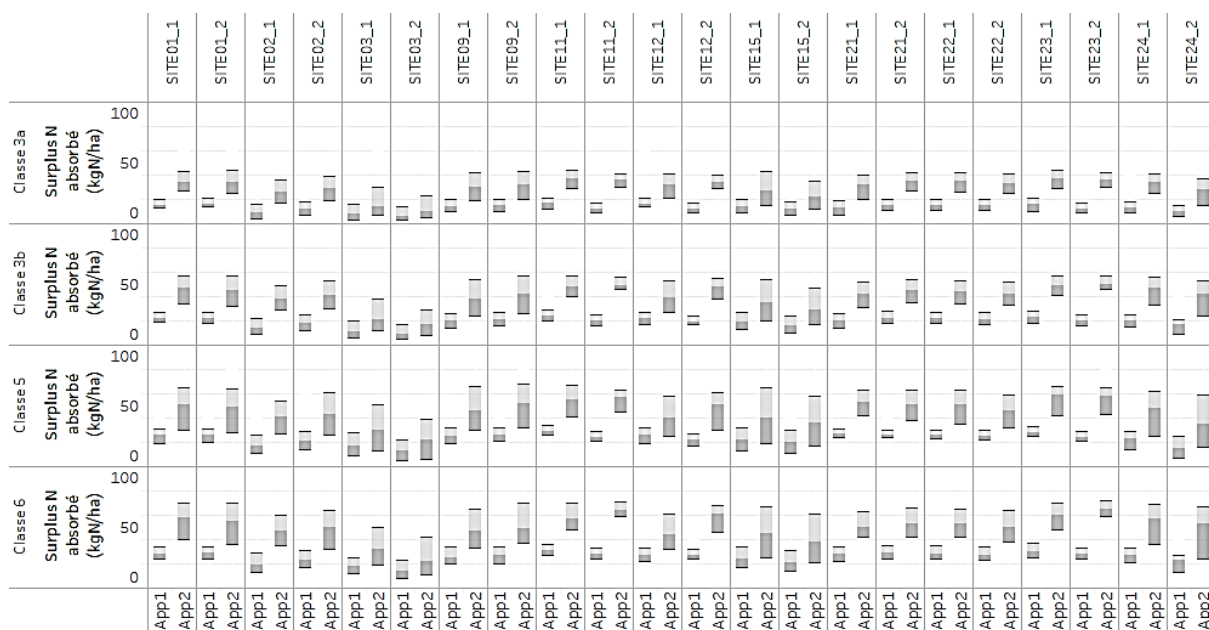


Figure 10 : Surplus d'azote absorbé par les couverts en cas d'apports de fertilisants organiques (les boxplots présentent les centiles 25, 50 et 75) App1 : entre 35 et 50 kg Neff selon le produit/ App 2 : entre 70 et 100 kgN eff selon le produit

### Effet des pratiques d'apports de fin d'été et d'automne sur les pertes azotées

Concernant la lixiviation hivernale, les pertes sont très variables d'un site à un autre. La figure 11 illustre ces constats dans le cas des scénarios témoins.

Bien que très modérées dans la très grande majorité des cas, les quantités lixiviées dans ces scénarios témoins dépendent fortement des quantités d'azote dans le sol et minéralisées pendant la période ainsi que des précipitations et du caractère drainant du sol. Elles varient entre 2 et 15 kgN/ha en valeur médiane selon les sites-sols. Si l'on ramène ces pertes à 100 mm de lame drainante, on constate que même dans les conditions pédoclimatiques les plus extrêmes, les pertes sont inférieures à 15 kgN/ha pour 100 mm drainés.

Les pertes par volatilisation pendant la durée du couvert sont quant à elles nulles pour les scénarios témoins du fait d'une absence d'apport de fertilisants azotés.

Dans le cas des autres scénarios simulés, un apport de fertilisant azoté est réalisé en fin d'été ou à l'automne. On peut alors considérer les surplus de pertes azotées engendrés par ces apports par rapport aux scénarios témoins.

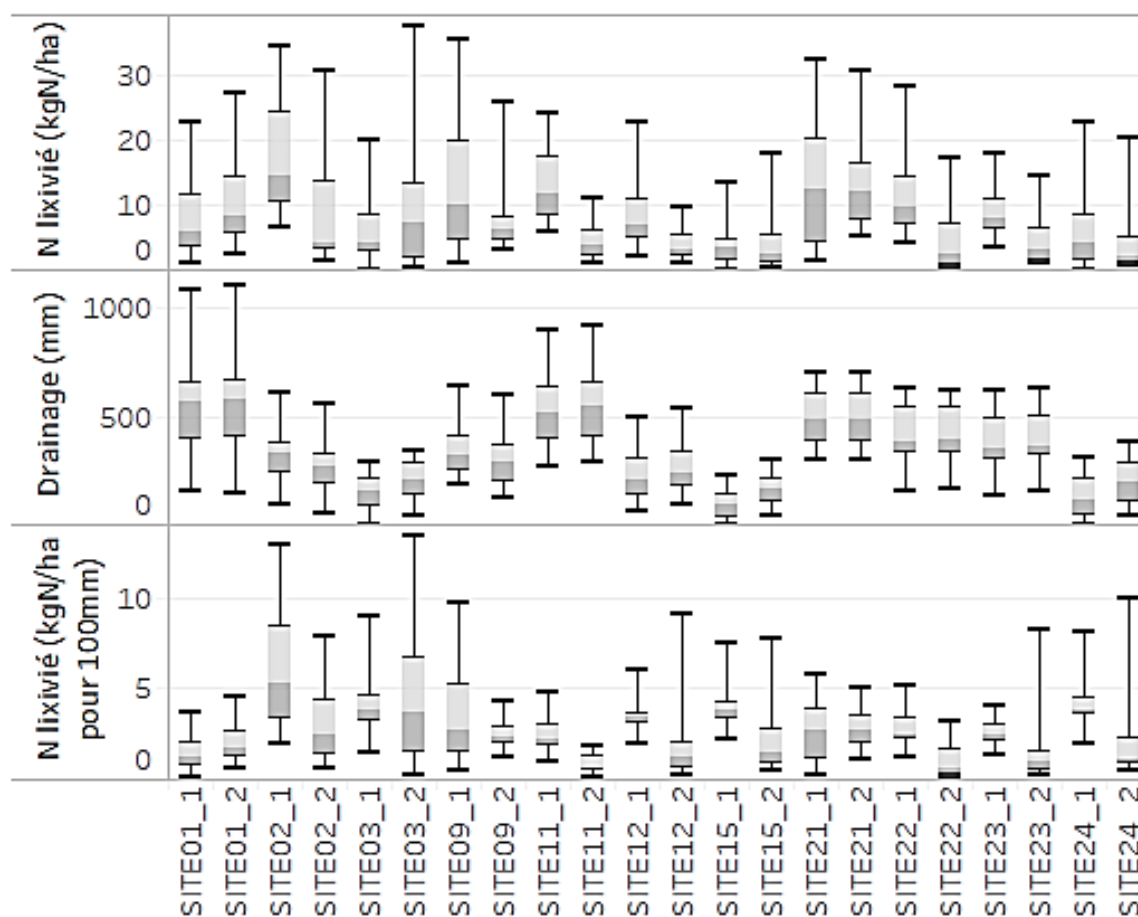


Figure 11 : Pertes par lixiviation et drainage entre le 01/10 et le 15/03 selon le site-sol et la culture en place pour les scénarios témoins (les boxplots présentent les valeurs minimales et maximales ainsi que les valeurs de centiles 25, 50 et 75)



Concernant les principaux facteurs pédoclimatiques, on constate les points suivants (analyse issue de la phase 1 et de la phase 2) :

- **Les surplus de pertes de nitrates sont fortement liés aux quantités d'eau drainées** qui expliquent une part importante de la variabilité intersites observée. Rapportées à 100 mm de lame drainante, la majorité des sites présente des pertes relatives de seulement quelques kg d'azote (les valeurs centiles 75 sont inférieures à 5 kgN/ha pour 100 mm d'eau drainée sauf sur 6 sols répartis sur toute la France).
- **Concernant la volatilisation, l'effet du pH du sol sur les quantités perdues est important.** Sur les sols à pH>8, les surplus médians de pertes simulées en cas d'apport organique dépassent 10 kgN/ha et la variabilité des pertes augmente, témoignant d'un risque accru de volatilisation si les conditions sont favorables. Au contraire sur des sols à pH acide (<6 dans l'échantillon de sols testés), les pertes suite à un épandage sont très faibles (valeurs médianes de moins de 2 kgN/ha) et présentent une variabilité très limitée d'une simulation à une autre.

Ces résultats agrègent l'ensemble des pratiques d'épandage testées, qui seront distinguées dans la suite du document afin d'identifier les pratiques les moins favorables. L'analyse est divisée en deux parties : une première concerne les épandages de produits à libération lente d'azote (classes 3a et 3b), la seconde les produits à libération rapide (classes 5 et 6).

Remarque : la classe 2 étudiée en phase 1 avait généré des pertes négligeables du fait de la très faible minéralisation à moyen terme et des faibles teneurs en azote ammoniacal. Les résultats ne sont donc pas détaillés pour cette classe.

#### Analyse détaillée dans le cas des apports de fertilisants azotés à libération lente d'azote (classes 3a et 3b)

Les résultats des pertes par lixiviation et par volatilisation selon les pratiques testées sont présentés dans la figure 12. **Le détail par site-sol se trouve en annexe 2.2.**

L'apport de fertilisant de classe 3 en fin d'été ou en automne génère des surplus de pertes par lixiviation très modérés avec des valeurs médianes allant de 1 à 7 kgN supplémentaires perdus selon la classe (a ou b), la dose et la date de l'apport. Il faut également noter que les pertes totales (et non simplement aux surplus) ramenées à 100 mm de lame drainante sont de moins de 7 kgN/ha pour 100 mm dans 75 % des simulations et que les valeurs les plus extrêmes simulées ne dépassent pas 26 kgN/ha pour 100 mm drainés, témoignant d'un risque bien souvent modéré pour ces types de fertilisants. Bien que faible dans l'ensemble, la volatilisation peut quant à elle s'avérer importante sur des sols à pH neutre à basique et en cas d'apport non enfoui. Les pertes médianes varient entre 7 et 19 kgN/ha volatilisés en cas d'apports en surface.

#### **Certaines pratiques testées s'avèrent plus ou moins favorables à un maintien de très faibles niveaux de pertes azotées (lixiviation ou volatilisation) :**

- Les apports de classe 3a, présentant une phase d'immobilisation transitoire avant minéralisation, génèrent des pertes très limitées pour des doses de 200 kgN total ou 35 kgN efficace si l'apport est enfoui ou s'il est laissé en surface mais apporté 40 ou 60 j après semis (i.e. entre fin septembre et fin octobre). En effet, des apports de surface en fin d'été 20 j avant semis ou au semis présentent des risques de volatilisation. L'enfouissement peut toutefois être réalisé à cette période.
- En cas d'apport de 400 kgN total apporté (soit 70kg efficace) pour un fertilisant de cette classe 3 a, les constats précédents s'appliquent également avec des pertes plus importantes sur les

périodes les moins favorables mais on constate par ailleurs une augmentation des pertes par lixiviation pour les apports les plus tardifs (en octobre). Toutefois du fait d'une plus faible volatilisation qu'en été, les surplus de pertes totales restent plus faibles (valeur centile 75 autour de 5% de l'azote total apporté)

- Pour des apports de fertilisants de classe 3b, qui fournissent progressivement de l'azote minéral dès leur apport, des constats similaires peuvent être faits concernant les périodes à risque vis-à-vis de la volatilisation. En effet, bien que de légers écarts apparaissent dans les résultats du fait des différences de teneurs en azote ammoniacal des représentants paramétrés dans STICS ces classes a et b sont caractérisées par des teneurs faibles en azote ammoniacal. Concernant les apports 60 jours après semis (octobre), les surplus de pertes restent très faibles pour des apports de 40 kgN efficace. En revanche pour des doses doublées, la valeur centile 75 des surplus de pertes totales peut atteindre 28 kgN/ha (soit 10% de l'azote total apporté)

Dans le cas de la classe 3, les pertes par lixiviation restent donc très modérées bien qu'une légère augmentation soit constatée pour des apports en octobre. Les principaux facteurs de pertes restent les pratiques favorisant la volatilisation. Il faut toutefois noter que les apports d'octobre sont moins valorisés par la culture intermédiaire du fait d'une fourniture d'azote retardée alors que les trois dates précédentes présentent des niveaux de valorisation similaires.

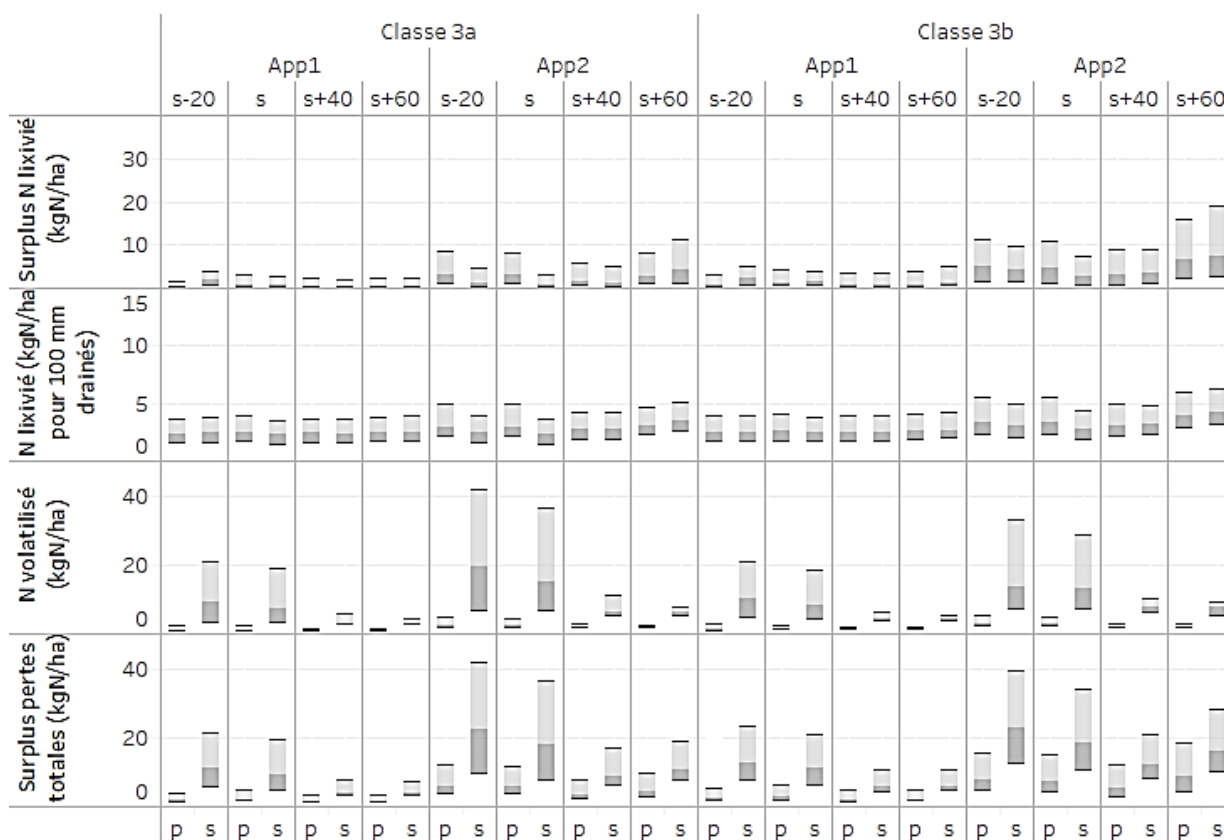


Figure 12 : Pertes azotées par lixiviation et par volatilisation pour les scénarios avec apports de fertilisants de classes 3a et b selon les pratiques de fertilisation (les boxplots présentent les valeurs de centiles 25, 50 et 75)

Le graphique présente à la fois les pertes par lixiviation et par volatilisation de manière distincte et en cumul  
 App1 : entre 35 et 50 kg Neff selon le produit/ App 2 : entre 70 et 100 kgN eff selon le produit

### Analyse détaillée dans le cas des apports de fertilisants azotés des 5 et 6

Les résultats des pertes par lixiviation et par volatilisation selon les pratiques testées sont présentés dans la figure 13. Le détail par site-sol se trouve en annexe 2.3.

L'apport en fin d'été ou en automne de fertilisant de classe 5, qui minéralise dans les premiers mois une grande partie de l'azote organique qu'il contient, génère des surplus de pertes par lixiviation dont les valeurs médianes varient de 1 à 10 kgN supplémentaires perdus selon la dose et la date de l'apport. On peut toutefois noter une variabilité autour de cette médiane plus importante que dans les classes étudiées précédemment. Les pertes totales ramenées à 100 mm de lame drainante sont de moins de 8 kgN/ha pour 100 mm dans 75 % des simulations et les valeurs les plus extrêmes simulées ne dépassent pas 31 kgN/ha pour 100 mm drainés. Le risque de pertes par lixiviation est donc légèrement supérieur à celui de la classe 3. La volatilisation est plus faible que pour la classe 3 mais cela est lié au représentant choisi caractérisé par des teneurs en azote ammoniacal plus faibles. Les fertilisants des produits de classes 3 et 5 peuvent avoir des teneurs variables qui restent toutefois inférieures à 40%. Les constats faits pour la classe 3 sur la volatilisation peuvent donc également s'appliquer pour la classe 5.

Quant aux fertilisants de la classe 6, dont la teneur en azote minéral est supérieure à 40%, les surplus médians de pertes par lixiviation varient entre 1 et 16 kgN/ha selon la pratique d'épandage, témoignant de pratiques plus à risque pour la lixiviation que pour les autres classes. Malgré ces surplus plus élevés, les pertes en valeur absolue n'augmentent que légèrement avec des pertes de moins de 9 kgN/ha pour 100 mm dans 75 % des simulations et les valeurs les plus extrêmes simulées ne dépassent pas 32 kgN/ha pour 100 mm drainés.

#### **Certaines pratiques testées s'avèrent plus ou moins favorables à un maintien de très faibles niveaux de pertes azotées (lixiviation et volatilisation) :**

- Les apports de 45 kgN efficace de fertilisant de classe 5 génèrent des pertes qui demeurent très modérées quelle que soit la date d'apport. L'apport en profondeur permet en outre de limiter la volatilisation. Pour des apports de 90 kgN efficace, les pertes dépassent en revanche 15 kgN d'azote supplémentaires perdus dans la moitié des simulations voire 30 kgN (soit plus de 10% de l'azote total apporté) dans un quart des scénarios pour des apports en surface entre fin septembre et fin octobre. Les apports enfouis limitent les pertes mais risquent d'être peu pratiqués.
- Pour la classe 6, on constate un effet amplifié sur les pertes d'un apport en surface du fait d'une forte augmentation de la volatilisation, en particulier pour des apports 20 j avant semis ou au semis (près de 30% de l'azote total perdu en valeur médiane). Excepté ces pratiques, les autres pratiques d'épandage de 50 kgN efficace génèrent des pertes modérées (centile 75 < 15 kgN/ha lixiviés et volatilisés). Pour des apports de 100 kgN efficace, des constats similaires peuvent être faits quant aux pratiques défavorables en ajoutant également le cas des apports les plus tardifs qui sont suivis d'une augmentation de la lixiviation par rapport aux autres pratiques (plus de 15 kgN supplémentaires perdus par lixiviation dans la moitié des simulations soit plus de 10% de l'azote apporté).

Il faut en outre noter que les apports d'octobre sont bien plus faiblement valorisés par la culture intermédiaire que dans les cas des apports plus précoces en végétation, au semis ou avant semis.

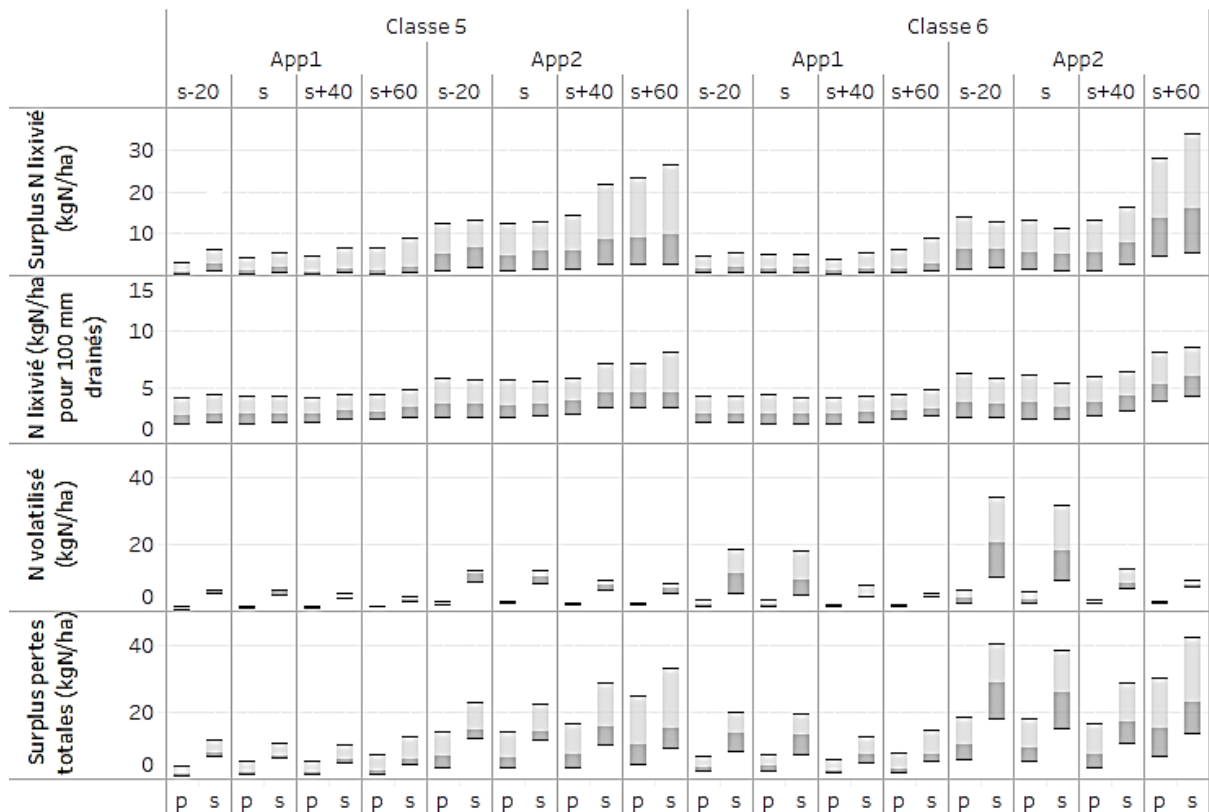


Figure 13 : Pertes azotées par lixiviation et par volatilisation pour les scénarios avec apports de fertilisants de classes 5 et 6 selon les pratiques de fertilisation (les boxplots présentent les valeurs de centiles 25, 50 et 75)

#### Effet sur le maïs suivant et le reliquat post-récolte

Le dernier point d'analyse a concerné l'effet de ces apports d'automne sur le maïs suivant. Les résultats semblent faire ressortir que le choix de la date d'apport à l'automne influe de manière négligeable sur l'absorption du maïs suivant. Cette modalité n'est donc pas illustrée sur la figure 14, qui montre en revanche l'effet de la dose et de la classe de fertilisant qui influent sur les quantités supplémentaires absorbées par le maïs et sur les reliquats d'azote dans le sol après la récolte du maïs. En valeurs médianes, les surplus de reliquats sont similaires mais le risque de laisser des quantités d'azote dans le sol augmente avec des classes à minéralisation progressive.

Ces résultats seront par ailleurs comparés aux résultats d'analyse des scénarios avec apports organiques au printemps sur maïs.

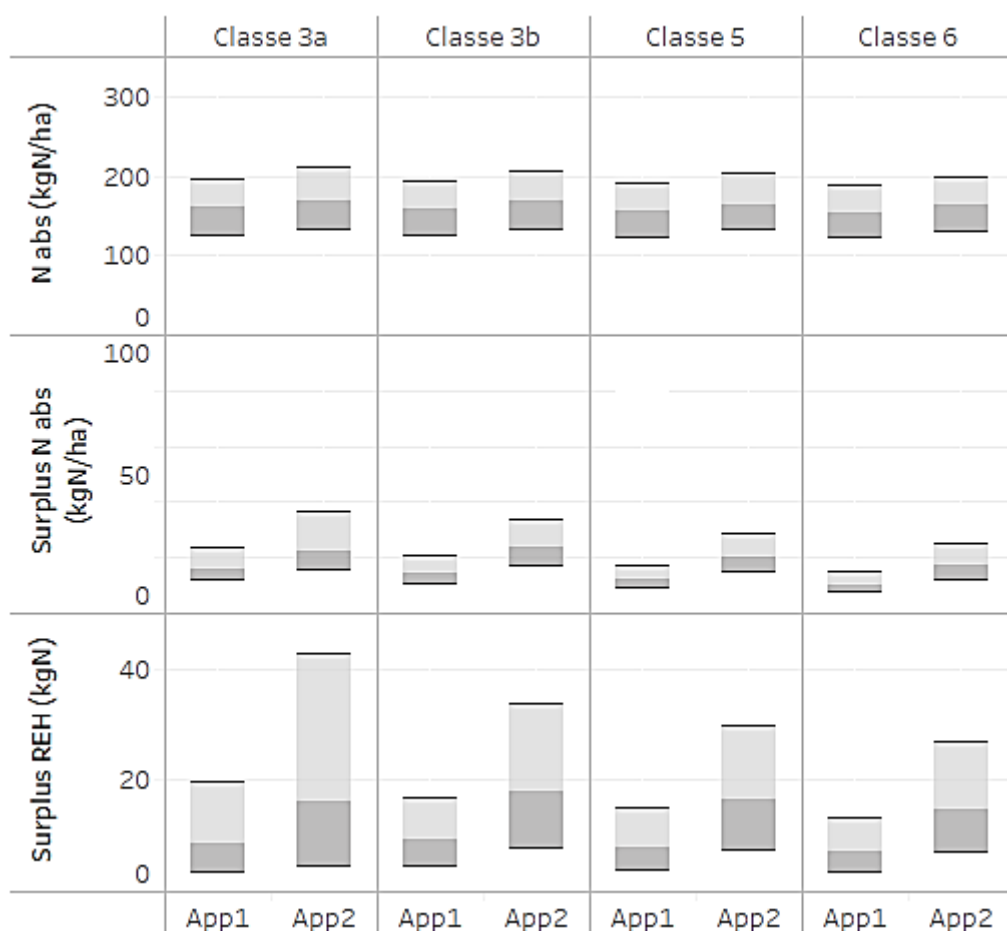


Figure 14 : Surplus d'azote absorbé par le maïs et surplus de REH après maïs par rapport au témoin selon la classe de fertilisant et la quantité apportée pendant l'interculture précédente (borne inférieure : centile 25/borne centrale : médiane /borne supérieure : centile 75)

### 3.2.2.3 Conclusions et discussions

Les simulations traitées en phase 2 de l'étude ont concerné des apports d'automne entre 35 kgN et 100 kgN efficace sur un couvert avant implantation d'un maïs. Les doses d'azote total épandues varient donc entre 70 et 400 kgNtot.ha<sup>-1</sup>. Les dates d'apport testées varient quant à elles entre fin juillet (en cas d'apport 20 j avant semis) et fin octobre (en cas d'apport 60 jours après semis) pour les fertilisants de classes 3 (a et b), 5 et 6. Une partie des simulations traite donc des scénarios d'apports à la limite de périodes d'interdiction ainsi que de doses supérieures à la réglementation actuelle du programme d'actions nitrates. Il s'agit des épandages pendant l'été pour des apports de 20 jours avant semis (ou au semis pour des fumiers compacts et composts d'effluents d'élevage) et des apports 60 jours après semis au cas où le couvert est détruit mi-novembre.

**Les principales conclusions tirées des analyses sont présentées ici** et intègrent également les conclusions des analyses préliminaires de la phase 1 :

- Le surplus d'azote provenant de l'apport d'un fertilisant organique en fin d'été ou à l'automne sont absorbés en plus grande quantité pour les couples **sites-sols présentant à la fois une minéralisation faible en automne et en hiver**, ne couvrant qu'une partie des besoins du couvert, mais également **un climat doux** favorisant la croissance du couvert plus tardivement dans la saison et limitant la destruction par le gel. On retrouve principalement ces conditions pour les sites de la façade atlantique et de la Manche (climat océanique) pour l'échantillon testé. Les simulations montrent donc l'intérêt d'un couvert adapté au choix de la zone pour

maximiser l'absorption pendant l'hiver. En revanche, une moutarde même détruite en novembre permet d'absorber des quantités importantes avant la fin de l'hiver et non significativement différentes des couverts laissés jusqu'au printemps. Ce constat ne pourrait toutefois pas se généraliser à l'ensemble des espèces cultivées en interculture.

- Bien qu'elle survienne très majoritairement avant mi-septembre, la date de levée, qui dépend de la date de semis et des conditions pédoclimatiques de fin d'été, influe également sur les niveaux d'absorption atteints pendant l'hiver. L'indicateur de pluviométrie semble bien expliquer les écarts constatés dans les simulations mais il est possible que dans les situations réelles, les pratiques de l'agriculteur, en particulier concernant le travail du sol, puissent limiter les effets d'une faible pluviométrie sur la diminution du stock d'eau dans les premiers horizons de sols.
- Les apports de classe 2 testés en phase 1 n'ont pas généré de pertes significatives même pour des apports de 270 kgN total (représentant de faibles quantités d'azote efficace).
- Dans le cas de la classe 3, les pertes par lixiviation restent très modérées bien qu'une légère augmentation soit constatée pour des apports en octobre. Les principaux facteurs de pertes restent les pratiques favorisant la volatilisation (apports de fin d'été et en surface). Il faut toutefois noter que les apports d'octobre sont moins valorisés par la culture intermédiaire du fait d'une fourniture d'azote retardée alors que les trois dates précédentes présentent des niveaux de valorisation similaires.
- Pour les **classes 5 et 6, les pratiques les plus favorables pour limiter la volatilisation (i.e. apport enfoui ou en végétation à l'automne)** permettent de maintenir des niveaux de pertes modérés. Ces pratiques sont d'autant plus recommandables pour les fertilisants de classe 6 dont la part volatilisée est plus conséquente. Les pertes par lixiviation après des apports de 45 à 50 kg N efficace restent faibles. **En revanche, pour des quantités deux fois plus importantes (90 à 100 kgN efficace), la lixiviation est fortement impactée par des apports tardifs en octobre** (entre le 10/10 et le 25/10).

Il faut cependant noter certaines limites concernant les simulations réalisées :

- Les dates de semis de couverts testées dans l'étude correspondaient à des dates « optimales » spatialisées issues de (Justes et al. 2012) pour maximiser la limitation de la lixiviation. Afin de ne pas multiplier les modalités, il n'y a pas eu d'autres dates de tester mais la question de l'effet de ces apports organiques pour d'autres périodes de semis serait intéressante à approfondir. Allison et al., (1998) ont en effet montré que les variations de la quantité moyenne d'azote absorbée liées à la date de semis sont aussi voire plus importantes que les variations entre espèces de CIPAN.
- Le plan de simulation n'a pas pris en compte les possibilités (ou au contraire nécessités) d'intervenir pour détruire ou récolte le couvert en novembre ou en mars selon les conditions pédoclimatiques de chaque site. L'échantillon de sols comprend en particulier quelques sols argileux (>37% d'argile) pour lesquels le couvert sera sûrement détruit précocement.
- STICS ne permet pas de traiter la problématique de l'homogénéité spatiale d'un couvert qui reste pourtant importante au regard de la bibliographie. Malgré cela, en faisant abstraction de l'aspect spatialisé, le modèle permet de prendre en compte des difficultés de croissance ou de levée (et la variabilité de densité de culture qui s'ensuit) ainsi des destructions précoces liées au gel.

### 3.3 EPANDAGE DE FERTILISANTS ORGANIQUES SUR MAÏS

Cette situation fait suite à la partie précédente afin de comparer l'effet d'un apport organique réalisé en fin d'hiver ou au printemps sur maïs par rapport à un apport à l'automne précédent.

L'objectif de cette analyse est de s'intéresser à l'effet d'un apport avant maïs ou pendant les premiers stades du maïs d'un produit organique selon sa classe et sa période d'apport sur :

- La croissance du maïs
- Les risques de pertes azotées au printemps mais aussi à l'automne qui suit la récolte du maïs

#### 3.3.1 Simulations de scénarios d'épandage de fertilisants organiques sur maïs

##### 3.3.1.1 Plan de simulation et modalités testées

Cette situation a été étudiée à la fois en phase 1 sur les 24 sites de l'échantillon puis en phase 2 sur un nombre restreint de sites mais en proposant un plan de simulation modifié pour favoriser l'analyse comparative avec la situation précédente qui concerne les apports sur couvert avant maïs. Les graphiques présentés ici correspondent au plan de simulation élaboré en phase 2 mais les réflexions et conclusions tiennent compte des résultats obtenus en phase 1 également. Le plan de simulation a été présenté dans la partie précédente sur les pratiques d'apport sur couvert avant maïs (Paragraphe 3.3).

##### 3.3.1.2 Résultats de simulation et analyse

#### **Apports de printemps : Azote fourni par le fertilisant azoté pendant la durée de la culture de maïs**

Tout comme pour les apports d'automne, la concordance entre les quantités simulées et attendues est vérifiée concernant l'azote provenant des produits organiques apportés disponible pour le maïs (Figure 15). Les résultats de simulation avec les quantités de 50 et 100 kgN efficace attendues sont légèrement inférieures aux valeurs attendues pour classes de fertilisant 5 et 6. Les écarts entre azote efficace attendu et la valeur médiane simulée sont de moins de 10 kgN/ha. En revanche ils sont plus conséquents pour les deux représentants de la classe 3 avec une sous-estimation de l'ordre de 30 kgN/ha pour la classe 3a.

Il faut noter une certaine variabilité autour de cette valeur médiane, s'expliquant principalement par les conditions pédoclimatiques mais aussi la localisation en surface ou en profondeur de l'apport. En effet l'azote efficace attendu avait été calé pour des situations avec enfouissement. Il est donc normal d'obtenir des valeurs plus faibles en cas d'apport en surface.

Des valeurs négatives sont même obtenues bien qu'il s'agisse d'un nombre limité de simulations concernées. L'analyse approfondie des facteurs montre que ces cas de faibles (voire négatives) fournitures d'azote par le produit organique apporté sont liés à certaines situations pédoclimatiques et n'apparaissent que sur certains sites (tous non irrigués) et bien souvent sur un nombre limité d'années climatiques. Les sorties du modèle exploitées dans cette étude n'ont pas permis d'identifier le ou les facteurs pédoclimatiques qui ont impacté fortement la dynamique de minéralisation de ces produits organiques. Les mêmes conclusions peuvent être faites sur les valeurs extrêmes supérieures. Elles concernent également un nombre très faible de scénarios liés à certaines combinaisons sol x climat mais pas aux pratiques testées.

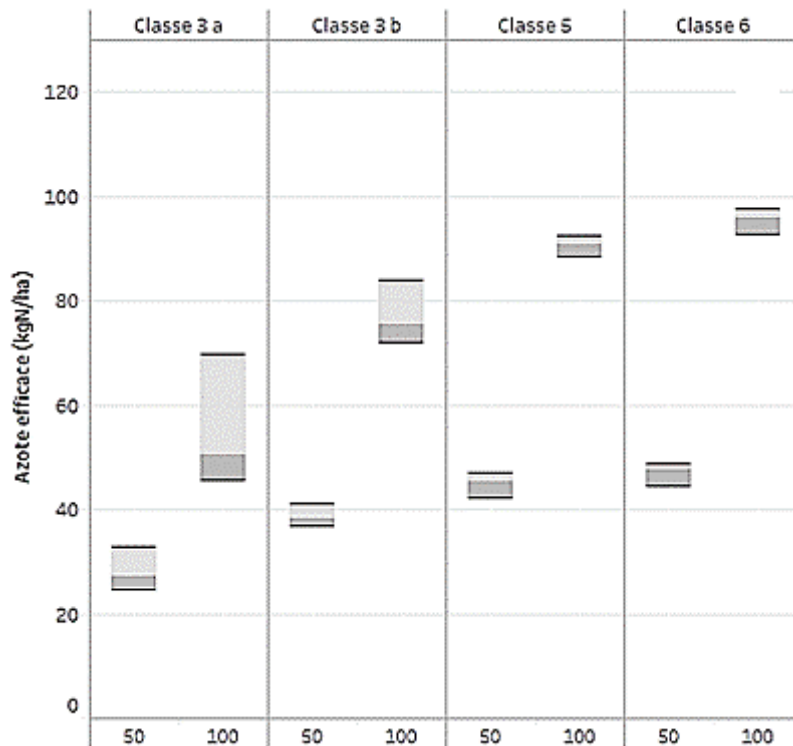


Figure 15 : Azote efficace disponible pour la culture intermédiaire selon la classe de fertilisant et la quantité de fertilisant apporté (les boxplots présentent les centiles 25, 50 et 75)

Les doses sont indiquées en kgN efficace

### **Croissance et absorption du maïs**

En absence d'épandage de fertilisants (minéraux et organiques), les valeurs médianes d'absorption du maïs sur les différents sites-sols varient entre 40 et 210 kgN/ha (Figure 16). Comme cela a déjà pu être constaté pour les couverts, ce niveau d'absorption est fortement corrélé avec la minéralisation de la matière organique du sol qui peut fournir des quantités importantes d'azote à la culture pendant sa croissance. Pour rappel, le maïs reçoit une fertilisation minérale de 70 uN en 2 apports d'ammonitrate. Dans les sites de la moitié sud de la France, le maïs lève entre fin avril et début mai. Des levées après la deuxième quinzaine de mai sont très rares dans le jeu de simulation (uniquement sur une année climatique du site isérois et deux années pour le site en Gironde). Dans la moitié nord de la France, où la date de semis a été fixée plus tardivement, les dates de levée médianes varient entre le 1<sup>er</sup> et le 20 mai. Les levées plus tardives (après début juin) sont toutefois plus fréquentes que dans le cas précédent.



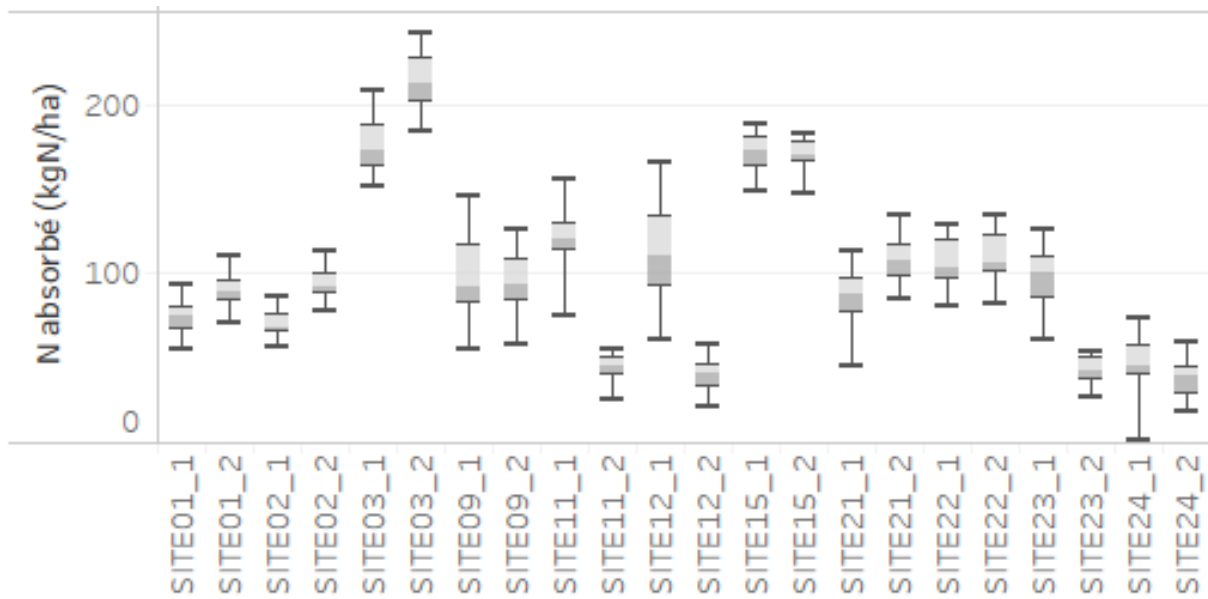


Figure 16 : Azote accumulé par le maïs dans le cas des scénarios témoin sans fertilisant (les boxplots présentent les valeurs minimales et maximales ainsi que les valeurs de centiles 25, 50 et 75).

En cas d'apports de fertilisants organiques, la figure 17 présente les surplus d'absorption provoqués par ces apports. Les compléments minéraux (80 uN) sont exclus de ce graphique pour s'intéresser uniquement à l'effet de l'épandage de début de printemps sur la croissance.

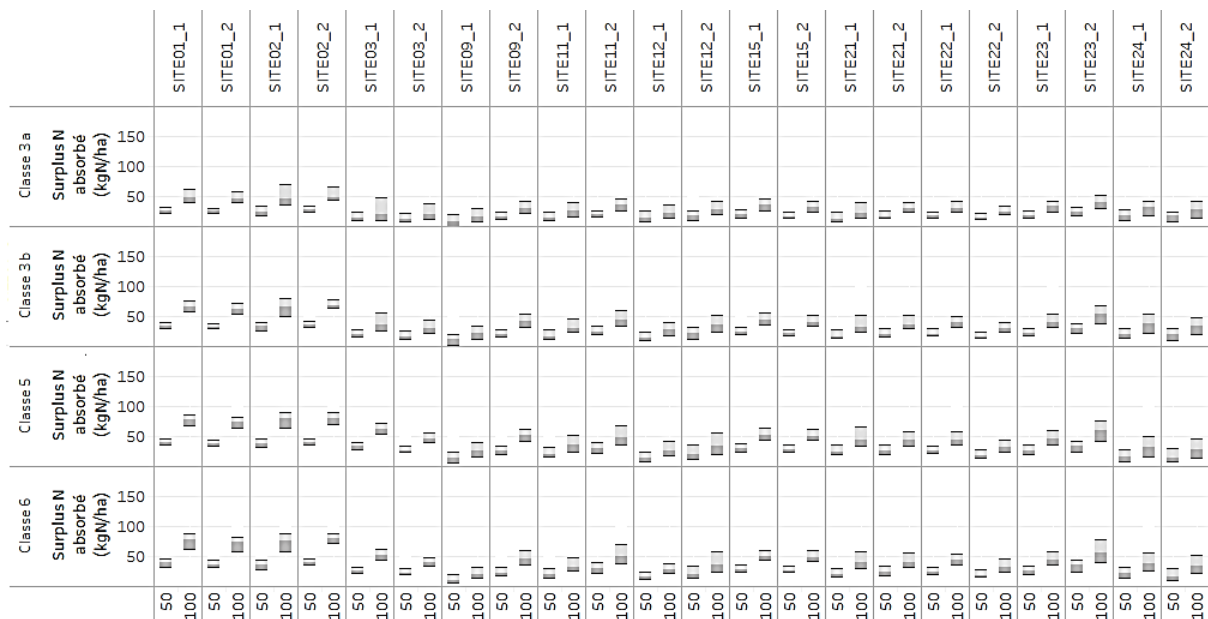


Figure 17 : Surplus d'azote absorbé par le maïs liés aux apports de fertilisants organiques (les boxplots présentent les centiles 25, 50 et 75)

Les quantités d'azote supplémentaires absorbées par le maïs varient selon les sites mais de manière moins importante que ce qui avait pu être observé pour les quantités absorbées sous couvert à l'automne précédent. Les différences constatées s'expliquent principalement par deux facteurs. Premièrement, pour les sites irrigués (qui présentent par extension également un climat chaud au printemps) le maïs absorbe des quantités d'azote plus importantes comme c'est le cas des sites du sud-ouest et de l'Alsace. Deuxièmement, dans le cas des sols présentant une minéralisation faible au

printemps et en été, un épandage de fertilisant organique permet de compenser une fourniture d'azote par le sol plus limitée et d'augmenter fortement l'absorption initiale.

En plus de la variabilité intersites, on constate des écarts importants sur chaque site-sol de ces quantités d'azote supplémentaires absorbées. La figure ci-dessus montre déjà l'effet du choix du fertilisant et de la dose d'apport avec une variabilité plus importante de l'azote absorbé en cas d'apport de près de 100 kg N efficace par rapport à des quantités plus faibles. On constate en outre de plus faibles surplus pour les classes 3 a et b par rapport aux classes 5 et 6 mais cela doit être relié au fait que les quantités apportées et disponibles sont plus faibles qu'attendues pour ces classes de produits. Il convient d'approfondir cette analyse en distinguant les différentes modalités testées et en reliant ces résultats aux pertes associées (lixiviation et émissions gazeuses) sur chacun des sites-sols afin d'identifier les facteurs pédoclimatiques en jeu.

### **Effet des pratiques d'apports de printemps sur les pertes azotées**

En absence de fertilisation azotée, les pertes par lixiviation entre mi-mars (à la suite de la récolte des couverts) et fin août sont bien plus faibles que pendant l'hiver précédent avec des valeurs médianes par site très majoritairement inférieures à 2 kgN/ha. Si l'on ramène ces pertes à 100 mm de lame drainante, les pertes relatives sont en revanche du même ordre de grandeur voire supérieures pour certaines années climatiques extrêmes du fait de lame drainante plus faible sur la période printemps-été. Toutefois on constate à nouveau un effet des conditions pédoclimatiques (minéralisation de l'humus, pluviométrie et caractère drainant du sol). Les sols du site du Gers (site 03) et le sol 09\_1 (Isère) peuvent présenter des pertes plus importantes (jusqu'à 20 kgN/ha en pertes médianes sur le site-sol 09\_1) du fait de l'importante minéralisation de l'humus (Figure 18).

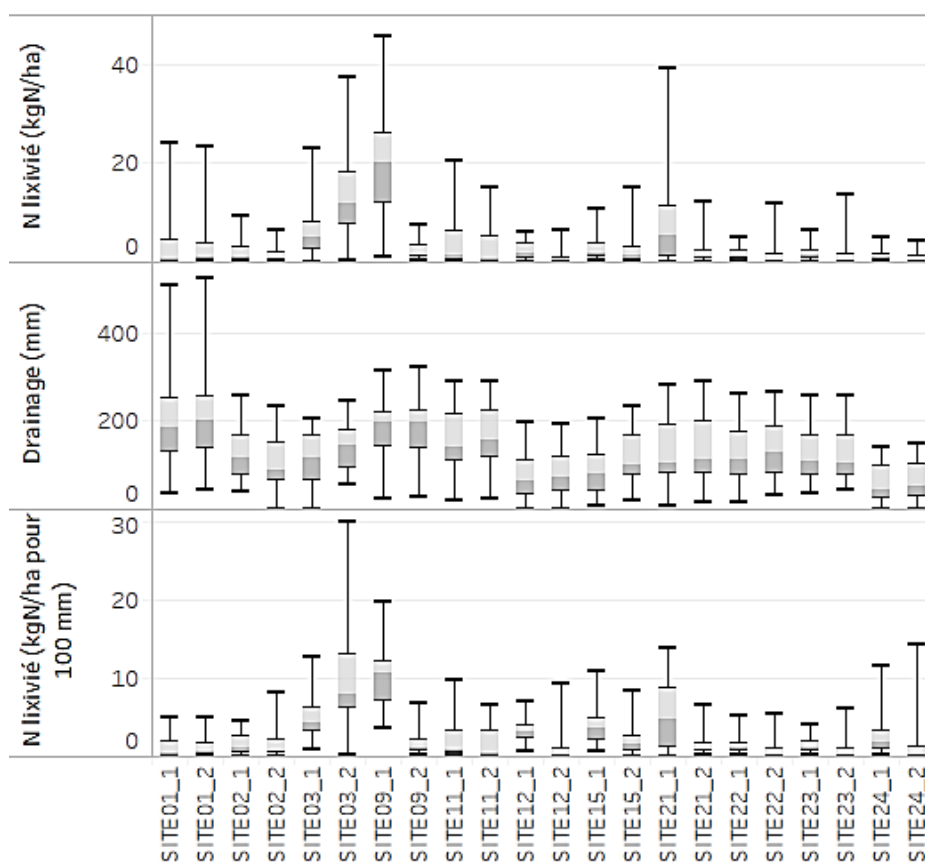


Figure 18 : Pertes par lixiviation et drainage entre le 15/03 et le 31/08 selon le site-sol et la culture en place pour les scénarios témoins sans azote (les boxplots présentent les valeurs minimales et maximales ainsi que les valeurs de centiles 25, 50 et 75)

### Analyse détaillée dans le cas des apports de fertilisants azotés à libération lente d'azote (classes 3a et 3b)

Les résultats des pertes par lixiviation et par volatilisation selon les pratiques testées sont présentés dans la figure 19. **Le détail par site-sol se trouve en annexe 3.1.**

Les surplus de lixiviation suite à un apport de fertilisant organique de classe 3 a ou b sont négligeables dans la très grande majorité des scénarios simulés avec des pertes médianes de moins de 2 kgN/ha supplémentaires. En cas d'épandage 60 jours avant le semis, des quantités lixiviées plus importantes que pour les autres périodes d'apport peuvent s'observer mais la valeur du centile 75 reste inférieure à 10 kgN/ha pour les apports de 100 kgN efficace théorique. En croisant avec l'analyse par site-sol présente en annexe 3.1, on peut ajouter que ces pertes plus importantes surviennent sur les sites-sols à risque important de lixiviation déjà identifié dans l'analyse des scénarios témoins. Les pertes totales d'azote pour des apports au printemps sont donc principalement dépendantes des quantités volatilisées. Sur des sites à pH acide ou en cas d'apport enfoui, ces dernières demeurent très faibles mais peuvent dépasser 10 voire 20 kgN perdus en cas d'apport en surface sur des sols à pH neutres à basiques. On observe de plus une augmentation de ce risque lorsque l'apport est fait plus tardivement et pour des quantités de 100 kgN efficace.

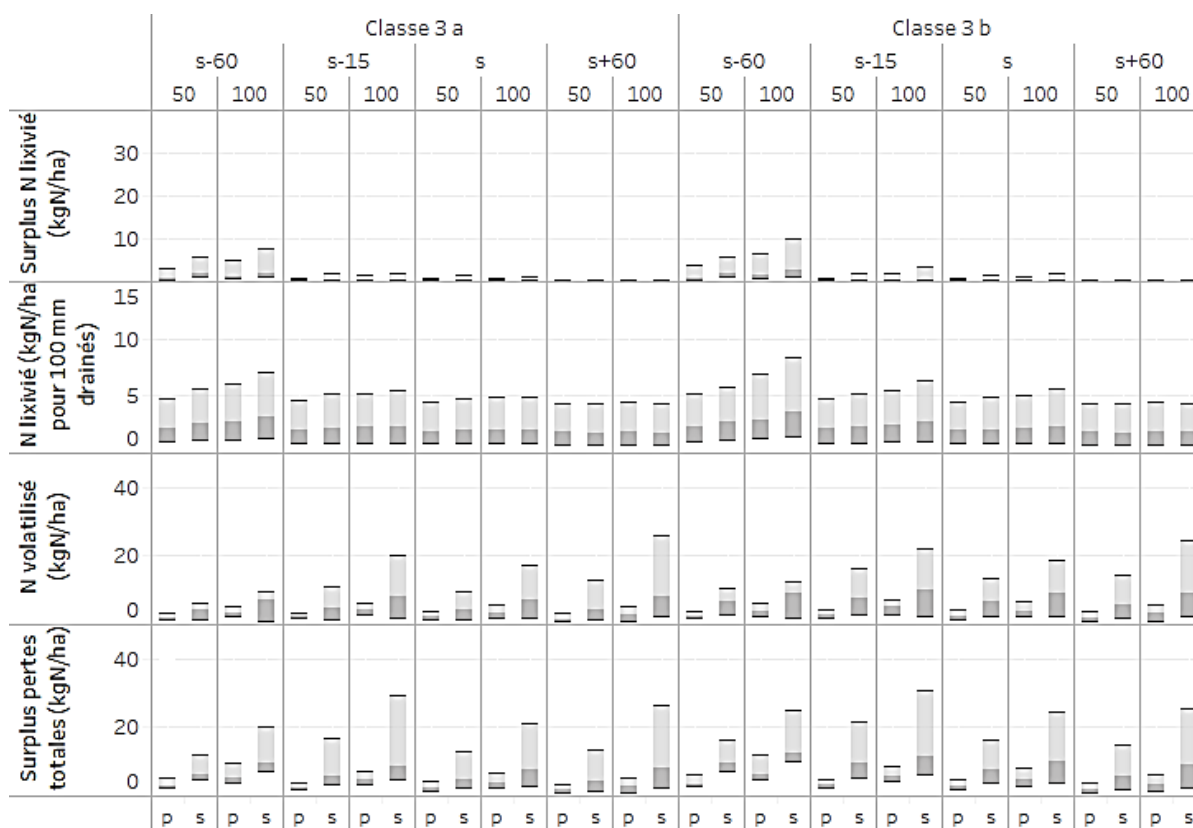


Figure 19 : Pertes azotées par lixiviation et par volatilisation pour les scénarios avec apports de fertilisants de classes 3 a et b selon les pratiques de fertilisation (les boxplots présentent les valeurs de centiles 25, 50 et 75)

Le graphique présente à la fois les pertes par lixiviation et par volatilisation de manière distincte et en cumulé. Les doses sont indiquées en kgN efficace.

L'analyse a été complétée par une analyse de la variabilité des pertes par volatilisation selon les conditions climatiques au travers du cumul de précipitations dans les 15 jours qui suivent l'apport. Cependant cet indicateur ne s'est pas avéré pertinent pour distinguer différents niveaux de pertes selon la pluviométrie qui suit la date d'apport.

### Analyse détaillée dans le cas des apports de fertilisants azotés des 5 et 6

Les résultats des pertes par lixiviation et par volatilisation selon les pratiques testées sont présentés dans la figure 20. Le détail par site-sol se trouve en annexe 3.2.

Concernant les pertes par lixiviation, les constats sont identiques à ceux faits pour la classe 3 avec des pertes supplémentaires négligeables sauf dans certains contextes pédoclimatiques du fait de fourniture d'azote déjà importantes par le sol et d'un drainage de printemps de plus de 150 mm (en lien avec la pluviométrie de printemps du site et du caractère drainant du sol). A nouveau, les surplus de pertes simulés dépendent principalement des quantités volatilisées. Pour la classe 5, les conclusions sont les mêmes que pour la classe 3 du fait de teneur en azote ammoniacal dans ces produits de moins de 40%.

En revanche, la volatilisation augmente fortement pour les épandages de fertilisants de classe 6 avec des pertes médianes pour des apports de 100 kgN efficace en surface entre 10 et 15 kgN/ha selon la date d'apport et des valeurs de centile 75 atteignant 30 kgN/ha. Le fait d'injecter ou d'enfouir immédiatement le fertilisant limite fortement les pertes (divisées par près de 3) en particulier pour des sols à pH neutre à basique. Les résultats tous sites confondus ne font pas ressortir d'effet clair de la période d'apport mais en étudiant les résultats site par site, la période d'apport en surface la plus à risque concernant la volatilisation est celle d'un apport au semis ou 15 jours avant semis.

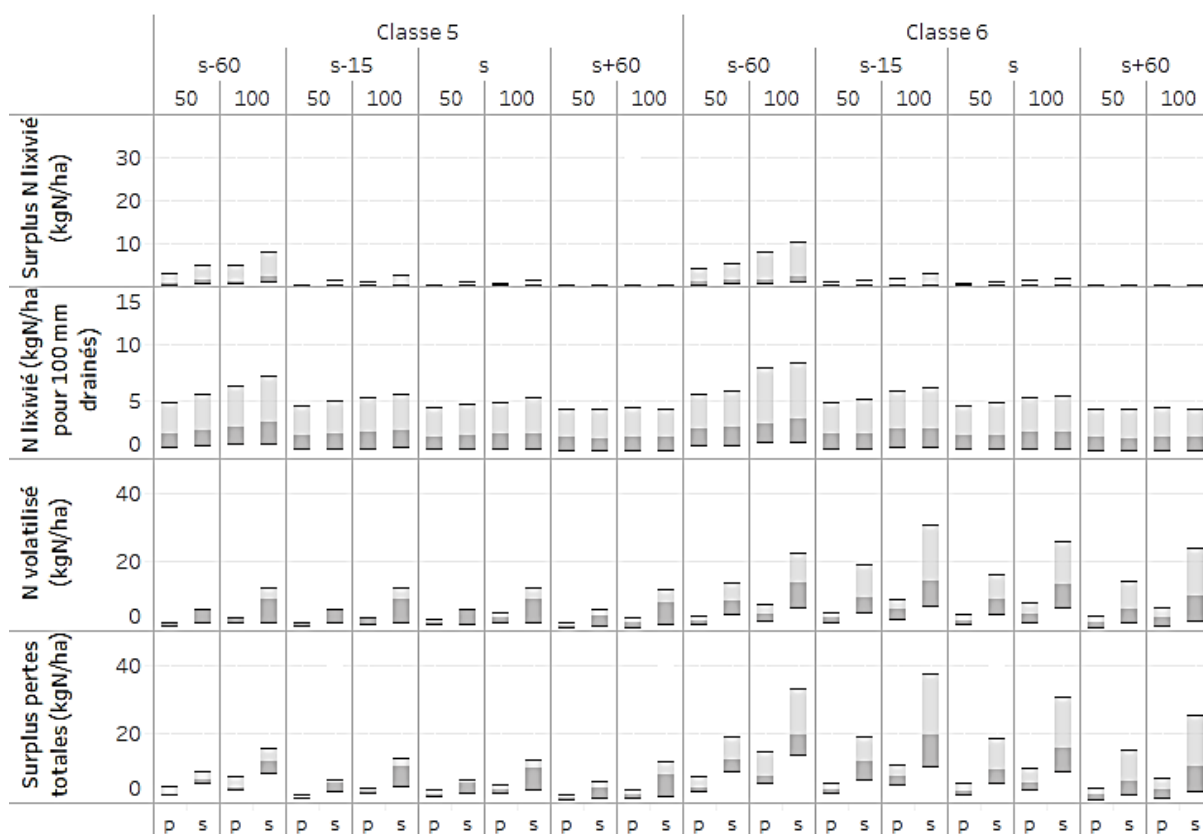


Figure 20 : Pertes azotées par lixiviation et par volatilisation pour les scénarios avec apports de fertilisants de classes 5 et 6 selon les pratiques de fertilisation (les boxplots présentent les valeurs de centiles 25, 50 et 75)

Le graphique présente à la fois les pertes par lixiviation et par volatilisation de manière distincte et en cumul. Les doses sont indiquées en kgN efficace.

L'analyse a été complétée par une analyse de la variabilité des pertes par volatilisation selon les conditions climatiques au travers du cumul de précipitations dans les 15 jours qui suivent l'apport.

Cependant cet indicateur ne s'est pas avéré pertinent pour distinguer différents niveaux de pertes selon la pluviométrie qui suit la date d'apport.

### Effet sur le reliquat post-récolte

Le dernier point d'analyse a concerné l'effet de ces apports de printemps sur le stock d'azote minéral dans le sol après récolte du maïs. Contrairement aux résultats précédents concernant les apports à l'automne sur couvert avant maïs, il ressort ici un effet de la date d'apport sur l'absorption du maïs et sur le reliquat entrée d'hiver quand cet apport est réalisé 60 jours après semis (résultat non détaillé dans la figure 21). Pour cette pratique on constate pour toutes les classes de fertilisants testées une baisse d'absorption de 10 à 20 % de l'azote efficace apporté entre des apports plus précoces et cet apport tardif. Il met en évidence une plus faible capacité du maïs à valoriser cet apport réalisé en juin. Cette baisse d'absorption s'accompagne pour les fertilisants à libération rapide d'azote d'une augmentation du REH en particulier pour la classe 5 (les surplus de reliquats médians augmentent de 30 à 45 kgN/ha en cas d'apport de 100 kgN efficace). Pour les fertilisants de classe 3, cet effet n'est pas visible mais il est probable que le stock d'azote organique qui pourra être minéralisé à l'automne soit également plus important. La figure 21 montre l'effet de la dose et de la classe de fertilisant.

Si l'on compare ces résultats à ceux de la situation précédente, pour laquelle les épandages étaient réalisés à l'automne sur couvert avant maïs, on peut noter une diminution de l'azote absorbé par le maïs et une augmentation du REH en cas d'apport au printemps malgré des quantités d'azote total apportées identiques. Ce constat est fait quelle que soit la classe de fertilisant.

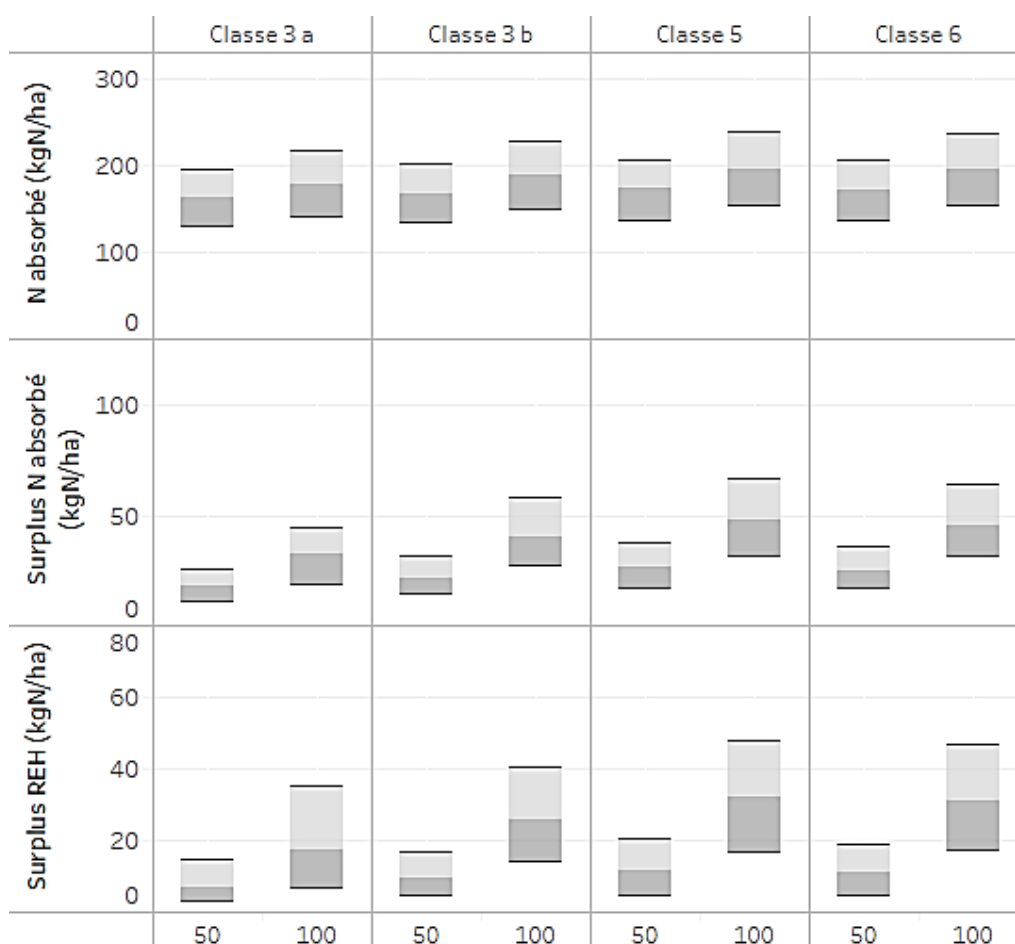


Figure 21 : Surplus d'azote absorbé par le maïs et surplus de REH après maïs par rapport au témoin selon la classe de fertilisant et la quantité apportée pendant l'interculture précédente (borne inférieure : centile 25/borne centrale : médiane /borne supérieure : centile 75)

### 3.3.1.3 Conclusions et discussions

Les simulations traitées ici ont concerné des apports de fin d'hiver et printemps entre 50 kgN et 100 kgN efficace pour un maïs (azote minéral fourni par le fertilisant pendant la durée de la culture). Les doses d'azote total épandues varient donc entre 70 et 400 kgNtot.ha<sup>-1</sup>. Les dates d'apport testées varient quant à elles entre mi-février (pour des apports 60 j avant les semis dans les régions les plus précoces) et fin juin (en cas d'apport 60 j après semis dans les régions les plus tardives).

**Les principales conclusions tirées des analyses sont présentées ici :**

- Lors d'apports de printemps, la date de l'épandage impacte peu les quantités **d'azote absorbé** par le maïs dans les simulations sauf en cas **d'apports tardifs 60 j après semis (juin) pour lesquels la valorisation s'avère limitée de manière significative** ;
- Dans l'échantillon de sols testés, les **pertes par lixiviation au printemps se sont avérées généralement faibles** induisant des surplus d'azote lixivié majoritairement inférieurs à 5 kgN/ha en cas d'épandage, y compris sur des sites irrigués. Sur certains sols très drainant et à fourniture d'azote de plus de 100 kgN/ha sous maïs, la lixiviation au printemps reste néanmoins un phénomène important et peut provoquer des pertes plus conséquentes pour des apports 60 j avant semis. Le fait de retarder l'apport permet de réduire de manière non négligeable les pertes. Au printemps, ce sont majoritairement les émissions ammoniacales qui expliquent de possibles pertes. **La date d'apport au printemps n'est pas le levier principal pour limiter ces pertes, majoritairement influencées par le pH du sol, la teneur en azote ammoniacal du produit et le choix d'un apport en surface ou incorporé.** Cependant pour des produits à forte teneur ammoniacale (classe 6), dans le cas où l'apport est fait en surface, la fertilisation 60 jours avant semis ou sous végétation très développée (60 jours près semis) semble permettre de réduire fortement les pertes par rapport à un épandage autour du semis.
- **Les apports de printemps pour les différents produits testés ont tendance à laisser de plus forts niveaux de reliquats en entrée d'hiver par rapport à des apports à l'automne** (surplus médian entre 10 et 35 kgN selon les modalités), ce qui nécessite de porter **une attention particulière à la culture implantée à la suite du maïs**. Des apports à l'automne précédant semblent être plus favorables pour mieux synchroniser la fourniture d'azote par des produits minéralisant lentement en particulier et l'absorption de maïs et laisser ainsi des reliquats plus faibles à l'automne suivant.

## 3.4 EPANDAGE DE FERTILISANTS AZOTES MINERAUX SUR MAÏS GRAIN

### 3.4.1 Contexte et objectifs

Le maïs grain est cultivé sur 1.36 Mha principalement dans les Landes, en Alsace, dans la vallée du Rhône mais également en périphérie parisienne. D'après l'enquête Pratiques culturales de 2011, la culture reçoit des apports organiques avec une fréquence plus importante que les autres céréales mais très variable d'une région à une autre (avec par exemple 64 % des surfaces en Bretagne et 19% des surfaces en Alsace). Les scénarios avec apport organique ont été étudiés précédemment à la fois sur maïs grain et ensilage. Il s'agit ici de s'intéresser aux pratiques de fertilisation minérale sur maïs grain au travers du choix du fertilisant minéral et des choix de fractionnement. Les scénarios élaborés visent à évaluer l'effet de différentes pratiques de fractionnement de l'apport minéral au printemps sur les pertes (en particulier par volatilisation) selon les conditions pédoclimatiques de la période, la dose et le type d'engrais minéral apporté.

### 3.4.2 Simulations de scénarios d'épandage de fertilisants azotés minéraux sur maïs

#### 3.4.2.1 Plan de simulation et modalités testées



Figure 22 : Schéma chronologique de la situation d'apport de fertilisants minéraux sur maïs

Pour ce plan de simulation, une gamme de conditions pédoclimatiques restreinte par rapport à l'échantillon initial de couples site-sol a été conservée. Sur les 24 sites, 12 ont été retenus selon la surface en maïs grain du département associé à chacun des sites mais aussi dans le but de conserver une certaine variabilité des conditions pédoclimatiques testées. D'après les enquêtes Pratiques Culturelles de 2011, dans le cas d'une fertilisation minérale, la dose est pour près de 75% des surfaces fractionnée en deux ou trois apports : ces fractionnements majoritaires ont donc été retenus ici. Concernant les doses et les dates apportées, le plan de simulation ne permet pas de reproduire des pratiques de pilotage de la fertilisation azotée ou un choix d'apport en fonction des prévisions météorologiques (précipitations par exemple). Les apports ont été fixés à des stades données (à partir des cumuls de degrés-jours) afin de s'approcher au mieux des besoins de la culture selon sa dynamique de croissance dans un climat donné. Une gamme de doses pour chaque date a en outre été testée à chaque période d'apport afin d'en analyser l'effet sur les pertes azotées. Les modalités sont détaillées dans le tableau 9. Environ 4500 scénarios sont simulés.

Tableau 9 : Modalités traitées pour la situation d'apport de fertilisants minéraux sur maïs

	Modalités testées	Détails
<b>Pédoclimat</b>	Années climatiques Sites et sols	<p><b>20 années</b> climatiques  <b>12 sites</b> (sélectionnés à partir de l'échantillon initial de 24 sites)  <b>2 sols</b> par site (sols initiaux de l'échantillon)</p> <p>Les sites en noir ne sont pas retenus pour cette situation</p>
<b>Initialisation</b>	Conditions des sols (Nsol et humidité) en sortie d'hiver	Une modalité fixée par site-sol pour caractériser les teneurs en eau et en azote en sortie d'hiver : teneur en eau à la capacité au champ et 30kgN pour 90 cm de sol.
<b>Maïs</b>	Variété	Une unique variété a été choisie pour l'ensemble des sites : Furio (variété semi-tardive)

<b>Semis</b>	Date de semis	Une modalité fixée mais modulée selon la zone (moitié sud 15/04 – moitié nord 25/04)
<b>Récolte</b>	Date de récolte	Une modalité calculée par le modèle STICS lorsque l'humidité des grains atteint 32% (une date butoir est cependant fixée au 25/10 dans le cas où l'objectif ne serait pas atteint)
<b>Irrigation</b>	Irrigué/non irrigué	Une modalité choisie entre culture irriguée/non irriguée selon la pratique prédominante (en termes de surfaces) dans le département du site en question
<b>Fertilisants azotés</b>	Selon la typologie	Deux classes de la typologie testées : <ul style="list-style-type: none"> <li>- Classe 7 (fertilisation minérale à plus faible risque de volatilisation ; ex : ammonitrate)</li> <li>- Classe 8 (fertilisation minérale à plus fort risque de volatilisation ; ex : solution azotée, urée)</li> </ul>
<b>Pratiques d'apport</b>	Quantité, dates, enfou ou non	Dose et fractionnement <ul style="list-style-type: none"> <li>- Témoin sans azote</li> <li>- 100 uN - 2 apports : 50 uN au stade 2-4 feuilles puis 50 uN au stade 8-10f</li> <li>- 200 uN - 3 apports : 30 uN au semis puis 70 uN à 2-4f et 100 uN à 8-10f</li> </ul> Test systématique d'un apport en surface ou en profondeur

### 3.4.2.2 Résultats de simulation et analyse

#### **Croissance et absorption du maïs**

Dans les sites de la moitié sud de la France, pour lesquels le maïs a été semé au 15/04, les dates de levée médianes s'étalent sur la première décennie de mai selon le site considéré. Pour les sites de la moitié nord, un décalage de 10 jours de la date de semis (25/04) entraîne également un décalage des dates de levée médianes par site sur la deuxième décennie de mai. Exceptées pour quelques années aux conditions climatiques particulières, la date de levée simulée varie peu sur un même site (une semaine d'écart environ entre le centile 25 et 75). Pour les sites de la moitié sud, la date de récolte médiane varie entre le 20/09 et le 15/10. Dans la zone nord, la date de récolte simulée est très souvent bornée par la date butoir du 25/10 fixée pour les paramètres d'entrée du modèle, témoignant d'un niveau d'humidité des grains souhaité non atteint. Seul le site en Alsace présente des dates de récolte avant la date butoir avec une récolte médiane au 08/10.

Le rendement moyen simulé sur l'ensemble des scénarios est de 113 q/ha (pour une teneur en eau des grains de 32%) avec des écarts importants entre les sites irrigués (un rendement moyen de 170 q/ha) et non irrigués (69 q/ha). Dans les cas des sites irrigués, les rendements simulés semblent plus importants que le rendement moyen 2015-2019 de 109 q/ha pour le maïs irrigué (Agreste Statistiques Agricoles Annuelles).



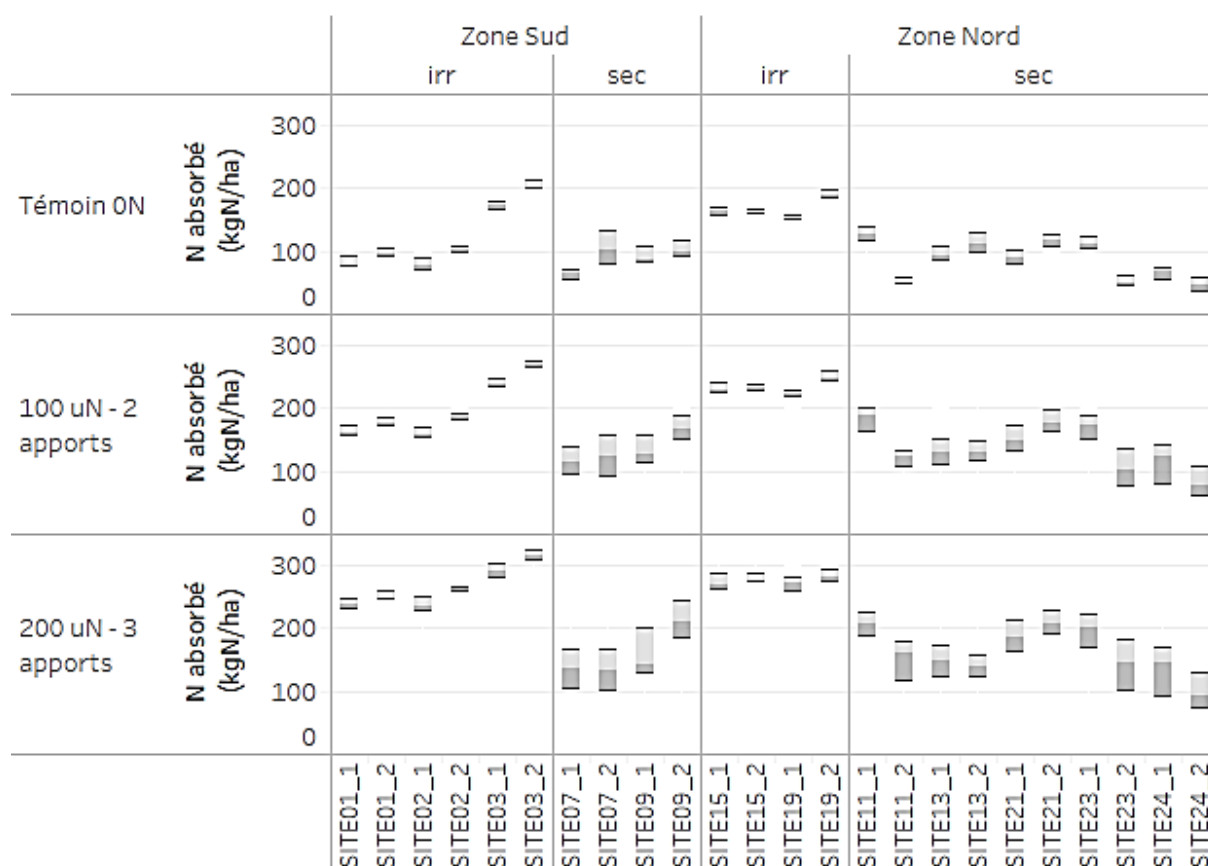


Figure 23 : Azote absorbé par le maïs grain selon les sites et les pratiques de fertilisation

L'analyse des quantités d'azote absorbées par le maïs grain fait ressortir avant tout une variabilité importante d'un site à un autre selon sa localisation géographique et les pratiques d'irrigation associées à ce site. Pour les scénarios témoins, les cumuls d'absorption médians varient entre 50 et 200 kgN/ha selon le site. La variabilité interannuelle demeure en revanche faible. En cas de fertilisation azotée, l'absorption médiane augmente respectivement de 64 et 102 kgN/ha pour des doses totales apportées de 100 ou 200 uN. Comme le montre la figure 23, cette absorption varie à nouveau fortement selon le site considéré mais on constate également une amplification de la variabilité interannuelle en particulier pour les scénarios non irrigués. La variabilité des conditions climatiques et en particulier des précipitations risque en effet d'impacter plus fortement les capacités de la culture à absorber l'azote apporté selon le stress hydrique auquel elle est soumise mais aussi les risques de pertes par volatilisation au printemps.

Tableau 10 : Coefficient apparent d'utilisation (CAU) médian selon les pratiques de fertilisation, d'irrigation et de la localisation de la culture de maïs grain

Fertilisant	Dose Fractionnement	Zone Sud		Zone Nord	
		Irrigué	Sec	Irrigué	Sec
Classe 7	100 uN – 2 apports	78 %	45 %	67 %	53 %
	200 uN – 3 apports	75 %	33 %	54 %	38 %
Classe 8	100 uN – 2 apports	79 %	44 %	66 %	52 %
	200 uN – 3 apports	76 %	33 %	53 %	38 %

L'efficacité de la fertilisation, évaluée dans le tableau 10 au travers du coefficient apparent d'utilisation (CAU), s'avère plus faible pour les scénarios avec apport d'une dose totale de 200 uN

fractionnée en 3 apports par rapport aux scénarios 100 uN en 2 apports. Les écarts sont d'autant plus marqués sur les sites non irrigués pour les raisons déjà évoquées précédemment. Les écarts de CAU entre les deux classes de fertilisants sont en revanche négligeables à cette échelle d'analyse. Afin d'affiner ces premiers résultats, l'impact des différents choix de fractionnement sur les pertes azotées est étudié dans la suite du document à la fois à l'échelle du cycle cultural et pour chaque période d'apport.

#### Effet des pratiques de fertilisation sur les pertes azotées :

Avant l'analyse de l'impact des pratiques de fertilisation simulées sur les pertes azotées, les pertes par lixiviation entre le 10/03 avant le semis du maïs et le 25/10 (date la plus tardive de récolte) ont été évaluées pour les scénarios témoins. La figure 24 illustre la variabilité importante des pertes d'un site à un autre. Le sol superficiel 09\_1 en Isère présente par exemple des quantités lixiviées plus importantes que sur les autres combinaisons sites-sols (pertes médianes de 26 kgN/ha). Par la suite, les pertes supplémentaires liées à un apport de fertilisant sont évaluées.

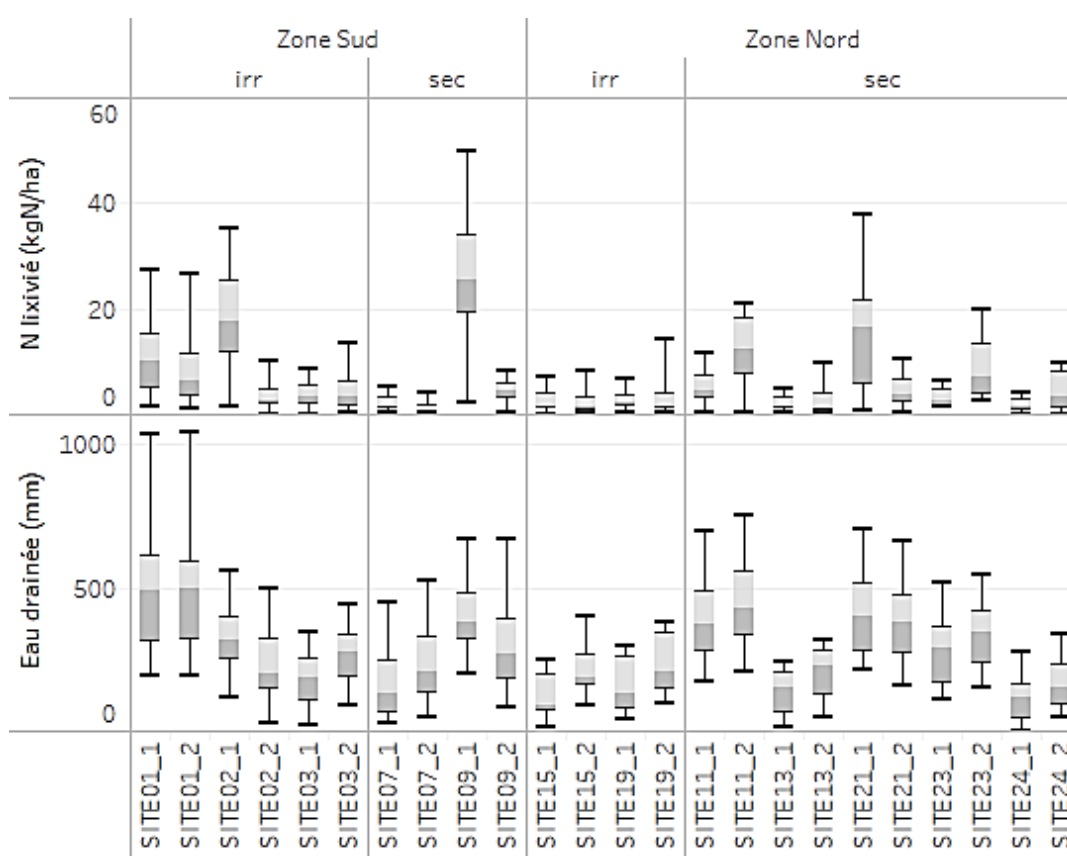


Figure 24 : Quantités d'azote lixivié et d'eau drainée entre le 10/03 et la date butoir de récolte (25/10) pour les scénarios témoins sans azote (les boxplots présentent les valeurs minimales et maximales ainsi que les valeurs de centiles 25, 50 et 75)

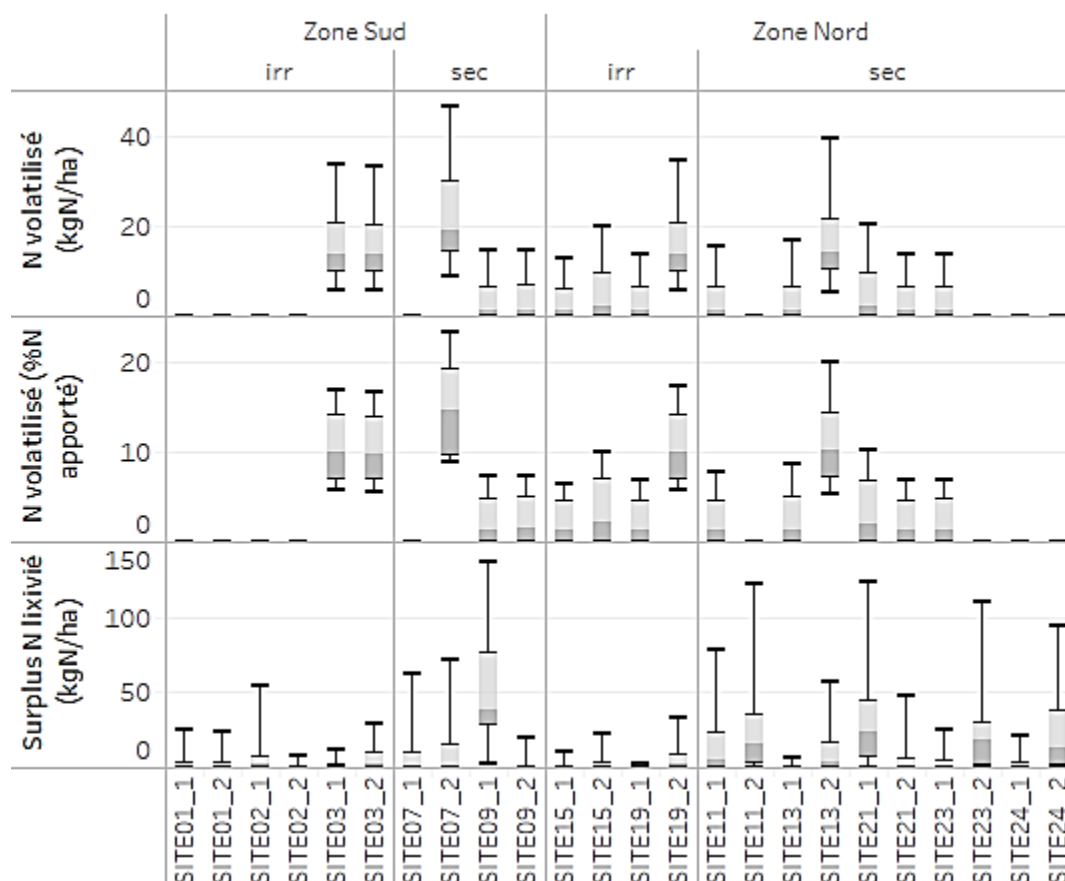


Figure 25 : Pertes d'azote par volatilisation et surplus de pertes par lixiviation selon les sites de l'échantillon (les boîtes à moustaches présentent les valeurs minimales et maximales ainsi que les valeurs de centiles 25, 50 et 75)

Dans le cas des scénarios avec fertilisation azotée, les pertes associées sont également fortement dépendantes des conditions pédoclimatiques du site considéré. Comme cela a déjà été montré pour d'autres situations, les quantités d'azote volatilisé sont majoritairement impactées par le pH du sol. Pour des sols à  $\text{pH} < 6$  dans l'échantillon étudié, la volatilisation simulée est nulle. Les connaissances actuelles sur la volatilisation ont en effet montré que les émissions d'ammoniac issues de l'application d'engrais minéraux sont étroitement liées au pH du sol, influençant l'équilibre entre l'ammonium du sol et l'ammoniac. Lorsque le pH est inférieur à 6,5, l'ammonium des engrais n'est pas transformé en ammoniac. Pour des pH de sols plus élevés, la concentration de  $\text{NH}_3$  augmente, ainsi que les risques par volatilisation. Les émissions peuvent atteindre 15% de l'azote apporté en valeur médiane sur certains sites de l'échantillon de simulation. Ces résultats semblent donc en cohérence avec la bibliographie bien que les pertes nulles simulées sous-estiment peut-être de potentielles émissions lors de l'intervention pour des apports en surface.

Les surplus de lixiviation provoqués par les différents apports d'engrais minéraux demeurent très faibles sur la majorité des sites (avec une médiane de pertes supplémentaires de moins de 3 kg/ha). Ils s'avèrent toutefois plus importants sur certains sites (sites 09\_1, 11\_2, 21\_1, 23\_2 et 24\_2). Il s'agit essentiellement de sols superficiels sur des sites non irrigués pour lesquels une absorption relativement faible par le maïs avait déjà été constatée auparavant, tout comme des quantités lixiviées déjà importantes sur scénarios témoins. Sur ces sols, dans des contextes climatiques extrêmes, les pertes par lixiviation peuvent dépasser 50 kgN/ha. L'analyse plus approfondie des scénarios a permis d'identifier que de tels niveaux de pertes étaient atteints essentiellement pour des doses totales d'apport de 200 uN. Comme le montre la figure 26, à la récolte du maïs, les reliquats entrée hiver en cas de fertilisation à une dose totale de 200 uN peuvent dépasser 100 kgN en particulier sur les sites

non irrigués, témoignant d'apports surestimés par rapport aux besoins de la culture. Seuls les sites irrigués en particulier du sud de la France présentent une faible augmentation du REH par rapport aux témoins sans azote en cas de fertilisation de 100 ou 200 uN.

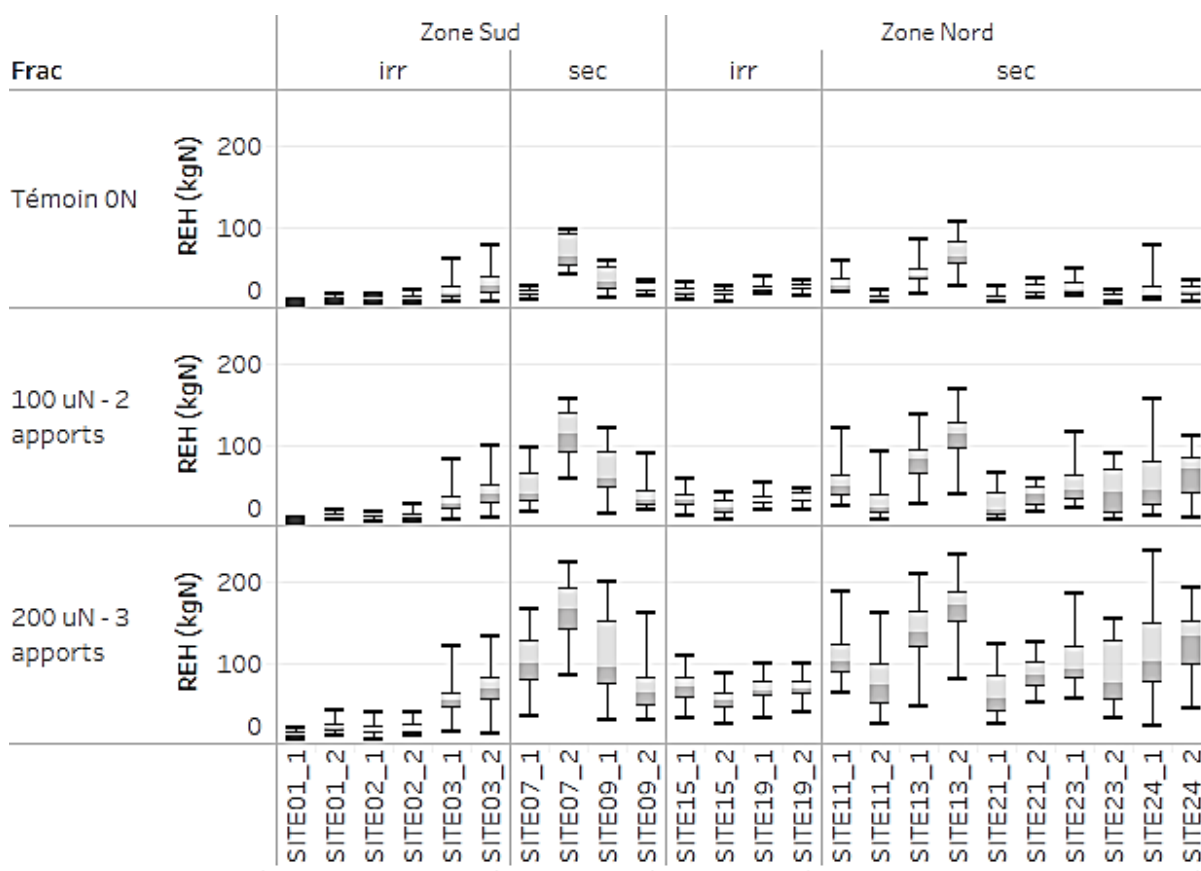


Figure 26 : Reliquat entrée d'hiver à la récolte du maïs selon les pratiques de fertilisation et selon les sites-sols (les boxplots présentent les valeurs minimales et maximales ainsi que les valeurs de centiles 25, 50 et 75)

Pour ce qui est des pratiques les plus à risque concernant la volatilisation, **afin d'affiner l'analyse sur les sites présentant des pertes par volatilisation, les sols à pH<6 ont été retirés des résultats et graphes suivants.**

A l'échelle du cycle cultural du maïs, les pratiques impactant les quantités totales volatilisées sont la dose totale apportée, le choix du fertilisant et les modalités d'apport en surface ou en profondeur. Pour des apports de classe 8 (avec une plus forte teneur en azote ammoniacal), les pertes médianes sont respectivement de 6.4 et 12.8 kgN/ha pour des doses apportées de 100 ou 200 uN alors qu'elles sont deux fois moins importantes pour des apports de fertilisants de classe 7. On constate en outre un risque de pertes accru pour les scénarios de fertilisation avec fertilisants de classe 8 dans le cas où les conditions pédoclimatiques favorisent la volatilisation. En ce qui concerne la dose, on constate une augmentation des pertes quand l'apport total d'azote minéral augmente mais il faut noter que la proportion d'azote total volatilisé par rapport à la dose apportée est similaire pour une même classe de produit considéré, soit respectivement 3% et 6% de l'azote apporté pour les classes 7 et 8.

Comme le montre la figure 27 pour chaque période d'apport, le choix d'un apport en surface ou en profondeur dans les simulations influence fortement les pertes par volatilisation : en cas d'apport en profondeur sur des sols à pH>6 les pertes médianes sont nulles. Seuls les sols au pH les plus élevés

(pH>8) présentent encore des pertes qui peuvent atteindre dans les situations les plus extrêmes 15 à 25 % de l'azote apporté selon la classe du fertilisant azoté. En cas d'apport en surface, bien que les pertes les plus importantes obtenues sur des sols à pH basique soient équivalentes à celles des scénarios avec azote en profondeur, les valeurs médianes sont en revanche plus élevées (3 à 6 % de l'azote apporté) et on n'observe pas de scénario sans volatilisation.

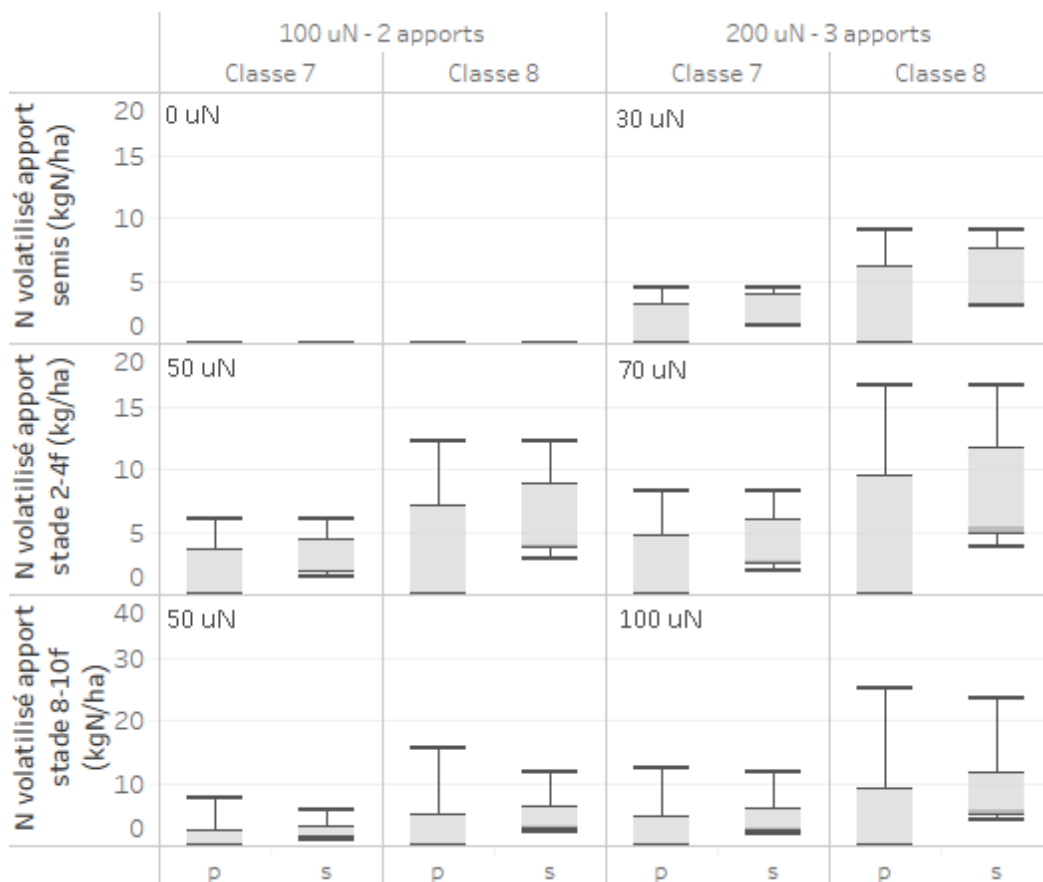


Figure 27 : Pertes par volatilisation associées à chaque apport selon la dose, la classe et le mode d'apport en surface (s) ou en profondeur (p) (les boxplots présentent les valeurs minimales et maximales ainsi que les valeurs de centiles 25, 50 et 75)  
*Attention échelle différente sur la dernière ligne*

La figure 27 distingue également les pertes apport par apport :

- Pour l'apport au semis (au 15/04 ou 25/04 selon les sites), les quantités volatilisées restent faibles avec des pertes médianes entre 0 et 3 kgN/ha selon les pratiques (enfouï ou non, choix du fertilisant) mais cela peut donc représenter 10 % de l'azote apporté à cette période voire même près de 30 % sur des sols basiques
- Dans le cas d'un apport au stade 2-4 feuilles (entre fin mai et fin juin selon les sites), les pertes varient en fonction de la quantité d'azote apporté (50 ou 70 uN selon le scénario) mais ramenées à cette dose, les pertes relatives sont similaires : on constate donc des pertes médianes en 0 et 7.5 % de l'azote apporté. En valeur absolue, la volatilisation est plus importante qu'au semis du fait de doses apportées plus conséquentes mais les pertes relatives à la dose sont plus faibles, probablement du fait du développement du couvert à ce stade. Les écarts restent toutefois faibles.

- En cas d'apport au stade 8-10 feuilles (entre mi-juin et mi-juillet selon les sites), les mêmes constats que pour le stade précédent peuvent être faits avec des pertes relatives à la dose apportée légèrement plus faibles (des valeurs médianes entre 0 et 5.8 % selon les pratiques).

En ce qui concerne l'effet de la variabilité climatique, les indicateurs utilisés pour décrire les conditions climatiques dans les 15 jours qui suivent l'apport (dont le cumul de précipitations) n'ont pas permis d'apporter d'éléments complémentaires à cette analyse. Les résultats d'expérimentations menées ont cependant montré l'effet de la pluviométrie sur la diminution de la volatilisation et l'augmentation de l'efficacité de l'engrais. Dans des essais menés par Arvalis en 1995 et 1997 pour différentes formes d'engrais, le seuil de 20 mm de précipitations cumulées dans les 20 jours suivant l'apport permettait d'assurer une valorisation satisfaisante d'un apport d'engrais azoté que le sol soit sec ou humide au moment de l'apport.

### 3.4.2.3 Conclusions et discussions

Les analyses des simulations pour cette situation ne permettent pas d'identifier des périodes d'apport de fertilisant azoté plus à risque concernant les pertes à la fois par lixiviation ou par volatilisation. Les résultats font principalement ressortir des risques de pertes importants pour une dose totale apportée de 200 uN quand cette dernière s'avère surestimée par rapport aux capacités d'absorption de la culture.

Des situations pédoclimatiques à risque ont été identifiées concernant la lixiviation sur des sols superficiels et des sites non irrigués pour lesquels les conditions météorologiques peuvent mener à un stress hydrique du maïs malgré des cumuls relativement importants de précipitations sur la durée du cycle cultural (exemple du sol superficiel en Isère dans l'échantillon de l'étude). Ces facteurs conduisent à une diminution des capacités d'absorption du maïs et une faible valorisation du fertilisant apporté en particulier pour des doses totales de 200 uN.

Les simulations ont mis en avant sur une majorité des sites (et en particulier les sites non irrigués) une augmentation importante des reliquats entrée d'hiver à la récolte du maïs en cas d'apport de 200 uN qui vient confirmer un risque de surfertilisation pour cette modalité d'apport.

En valeur absolue, la volatilisation aux stades 2-4 feuilles et 8-10 feuilles est plus importante qu'au semis du fait de doses apportées plus conséquentes liées à des besoins en azote plus importants à cette période mais les pertes relatives à la dose sont plus faibles, probablement du fait du développement du couvert à ces stades. Les écarts de pertes entre dates restent toutefois modérés par rapport aux effets des caractéristiques pédologiques du sol (en particulier le pH), du type de fertilisant et du mode d'apport (en surface ou en profondeur). Les simulations ont en effet mis en avant le levier efficace que peut représenter l'enfouissement d'un fertilisant pour limiter les pertes par volatilisation. Toutefois cette pratique n'est pas toujours réalisable en particulier en végétation. Dans le cas d'un apport uniquement possible en surface, la classe 7 d'engrais azoté, présentant des teneurs en azote ammoniacal et uréique plus faibles, semble donc à privilégier.

## 3.5 EPANDAGE DE FERTILISANTS ORGANIQUES SUR PRAIRIES

Les prairies représentent 45% de la SAU française, avec environ 3 millions d'ha de prairies non permanentes et 9,6 millions d'ha de prairies permanentes (Statistiques Agricoles Annuelles, 2018). Les prairies permanentes productives se concentrent principalement dans les régions d'élevage (en Normandie, dans les Ardennes, les Vosges, le Jura, le Cantal, le Charolais, le Morvan et l'Auxois) tandis que les prairies permanentes peu productives se situent plutôt dans les régions montagneuses (Alpes, Massif Central, Pyrénées, Corse) et les situations topographiques peu mécanisables où les activités de

parcours et de pâturage extensif prédominant. A cela s'ajoutent les prairies temporaires en particulier dans les régions d'élevage de l'ouest, le Limousin, le Ségala et les Grands Causses, avec en 2010 près de 3 Mha soit 11,5% de la SAU (contre 33,6% pour les prairies permanentes). Les prairies à base de légumineuses souvent également nommées prairies artificielles sont présentes de manière significative en Champagne crayeuse, dans le Marais poitevin, le Ségala et le Diois (Therond et al. 2017). On observe une variabilité importante des caractéristiques de ces prairies due à la fois à une diversité des espèces pures ou en mélange mais aussi à de nombreux modes d'exploitation selon la fréquence et l'intensité de fauche et/ou de pâturage. Les apports azotés bien qu'en moyenne modérés (de l'ordre de  $150 \text{ kgN} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$  en prenant en compte la fixation symbiotique) sont très variables : entre 0 et  $400 \text{ kgN} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$  (Vertès et al. 2008). En système d'élevage, les pratiques de fertilisation peuvent combiner apports organiques et minéraux.

D'après le Programme d'actions national consolidé au 14 octobre 2016, les périodes minimales d'interdiction d'épandage sont les suivantes sur prairies implantées depuis plus de six mois (dont prairies permanentes, luzerne) sont les suivantes :

- ✓ Du 15 décembre au 15 janvier pour l'épandage de produit de type I (correspondant aux classes 1 à 4 de la typologie présentée dans cette étude)
- ✓ Du 15 novembre au 15 janvier pour l'épandage de produit de type II (correspondant aux classes 5 et 6 de la typologie présentée dans cette étude). L'épandage d'effluents peu chargés est cependant autorisé pendant cette période dans la limite de  $20 \text{ kg}$  d'azote efficace\* / ha.
- ✓ Du 1er octobre au 31 janvier pour l'épandage de produit de type III (correspondant aux classes 7 et 8 de la typologie présentée dans cette étude). Dans les zones de montagne, l'épandage est interdit :
  - Jusqu'au 15 février dans les zones de montagne des régions Provence-Alpes-Côte-d'Azur, Languedoc-Roussillon-Midi-Pyrénées et du département des Pyrénées-Atlantiques
  - Jusqu'au 28 février dans les zones de montagne non citées précédemment

\*Pour rappel l'azote efficace correspond ici à la somme de l'azote présent sous forme minérale et sous forme organique minéralisable entre le 15 novembre et le 15 janvier.

Certaines régions ont renforcé la réglementation en allongeant les périodes d'interdiction d'épandage ou en précisant certains points. Les allongements d'interdiction concernent essentiellement les fertilisants de type II (effluents organiques à  $C/N < 8$ ) et III (engrais minéraux). Pour les prairies de plus de 6 mois, les renforcements suivants sont appliqués selon les régions :

- ✓ On observe pour le type II un allongement de la période principalement en sortie d'hiver (ex : Nouvelle-Aquitaine, Pays de la Loire, territoires du Grand Est et d'Occitanie) et pour certaines régions comme le Centre-Val-de-Loire des conditions d'épandage plus stricte dès la fin de l'été (ex. apport limité à  $5 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$  pour le fumier de volailles)
- ✓ Concernant les engrais minéraux (type III), un renforcement par rapport aux périodes minimales d'interdiction issues du programme national est moins fréquent mais c'est le cas en Bretagne et en Bourgogne avec respectivement un allongement en début d'automne et en fin d'hiver.

La précédente étude (ACTA-ARTELIA 2012) avait déjà rassemblé un certain nombre de références bibliographiques concernant la fertilisation des prairies. Cette analyse bibliographique avait été complétée par une série de simulations réalisées avec le modèle Pasim sur 3 sites en France. Ce travail

a fourni de premiers éléments concernant les périodes de fertilisation favorables ou non sous des systèmes prairiaux. Pour la présente étude, l'objectif est d'affiner cette première analyse en prenant en compte une plus grande diversité de contextes pédoclimatiques mais également de pratiques de fertilisation.

### 3.5.1 Références bibliographiques concernant les prairies

Graux et al. (2017) ont réalisé un important travail à la fois bibliographique et de modélisation concernant la croissance et l'exportation d'azote par les prairies françaises. La phase de simulation a été faite à partir d'une version de recherche de STICS-prairie nommée PâturSTICS, permettant principalement de mieux simuler les pratiques liées au pâturage (dont les restitutions à la parcelle). Ces travaux apportent plusieurs résultats :

- Une cartographie des types de prairies et des modes de gestion de ces prairies
- Une cartographie des niveaux de production et de flux d'azote prenant en compte la typologie des prairies et les conditions pédoclimatiques
- Une quantification du risque de lixiviation selon l'azote organique épandu, l'objectif initial de l'étude étant en effet de discuter d'une éventuelle révision de la limite actuelle d'épandage des effluents organiques de 170 kg Norg/ha SAU/an.

Au-delà du fait que l'étude conclut à des prélèvements de plus de 170 kg N/ha/an dans de nombreuses régions ainsi qu'une lixiviation globalement modérée (le plus souvent inférieure à 50-75 kg N/ha/an), il existe tout de même des disparités avec par exemple une productivité plus faible notamment pour les zones les plus défavorables en Bretagne (zones à printemps froids et séchantes en été), et dans le Sud des Pays-de-Loire (sécheresse estivale). Quelques « hots spots » de lixiviation ont également été identifiés (Sud Finistère, certaines zones des Vosges, les Pyrénées) souvent en lien avec un fort drainage et des sols riches en matière organique. L'étude a montré une forte dépendance de la lixiviation aux quantités d'azote minéralisé sur l'année et au bilan entre la minéralisation et l'organisation.

En complément des simulations réalisées, les auteurs avaient également analysé les mesures des différents réseaux de suivi en France (Bretagne, Pays-de-Loire, Franche-Comté et Auvergne) en particulier les périodes de diminution et de reprise de croissance des prairies françaises. Une diminution de la croissance est observée souvent en octobre voire en septembre dans les réseaux de suivi montagnards (ex : Auvergne). La croissance se maintient cependant parfois sur la première décade d'octobre dans des climats à hiver doux. La croissance estivale est également variable selon les zones. En Bretagne, on peut distinguer par exemple une zone sèche à croissance faible en juillet-août et une zone humide à croissance plus active à cette même période du fait d'une pluviométrie plus importante et de températures plus fraîches. Ces résultats viennent compléter les conclusions des travaux sur la date du premier apport d'azote minéral sur prairie de graminée en sortie d'hiver (Protin 2009), déjà évoquée dans la synthèse bibliographique de la précédente étude de 2012. En effet ces travaux avaient identifié des périodes optimales pour le premier apport d'azote minéral sur prairie de graminée en sortie d'hiver en fonction du redémarrage de la croissance :

- De fin janvier à février pour les régions de la façade atlantique et du sud-est de la France selon s'il s'agit d'espèces précoces pour lesquelles le démarrage apparent de la végétation **début** **après un cumul de 200 degrés-jours en base 0°C** (ex : fétuque élevée, ray-grass italien, brome...) ou plus tardives (ex : ray-grass anglais semi-tardif et tardif, dactyle, fétuque des prés...)



- De fin février à mars pour les zones du Massif Central et de l'est de la France (Ardennes, Lorraine, Vosges, Alsace, Jura, Alpes)

Dans Graux et al. (2017), les réflexions n'avaient pas porté sur la distinction des fertilisants azotés ni sur les périodes d'application mais plutôt sur le pâturage. D'autres travaux ont toutefois abordé ces questions. Concernant les effets de la période d'apport, de nombreux travaux de recherche confirment les conclusions de la précédente étude Acta-ARTELIA concernant les apports d'effluents organiques en automne. Froment et al. (1992) ont par exemple montré que les apports de lisier en octobre et en novembre sont plus risqués que des apports en septembre (du fait d'une absorption encore importante de la prairie) ou en janvier-février (dans des situations où le drainage est moindre et la minéralisation plus lente). En effet 32% et 43% de l'azote apporté étaient lessivés respectivement en octobre et en novembre contre 17%, 8% et 10% en septembre, décembre et janvier. Ces auteurs avaient également testé l'ajout d'un inhibiteur de nitrification qui a permis en novembre de limiter de manière non négligeable les pertes par lixiviation. Pour des apports automnaux de fumier, les essais semblent également confirmer de faibles pertes nitriques associées à ce type d'apport (Laurent et al. 2000), ce qu'avait également conclu l'étude de 2012.

Vertes et al. (1997) ont montré l'influence sur la lixiviation du niveau et de la répartition de la fertilisation azotée (sous forme minérale) d'une prairie de ray-grass anglais fauchée. Pour une dose totale identique, les apports concentrés sur la période printemps-été limitent la lixiviation par rapport à une répartition sur toute l'année. Pour une fertilisation de l'ordre de 200-250 kgN.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>, les pertes passent de 7 à 20 kgN.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> lors d'une fertilisation répartie sur toute l'année. Cette augmentation est d'autant plus importante pour des niveaux de fertilisation plus conséquents : pour des apports totaux de 400 kgN.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> les pertes liées à des épandages centrés sur le printemps été restent faibles (10 kgN.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>) alors qu'elles atteignent 58 kgN.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> pour une fertilisation répartie sur toute l'année. Les résultats lysimétriques de Kerfilly confirment cet effet : pour une fertilisation azotée de 400 kgN.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> concentrée sur la période printemps-été, le lessivage moyen est de 10 kgN.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> en absence de pâturage et 50 sinon, alors que pour la même dose d'azote répartie sur l'année les flux générés sont respectivement de 52 et 105 kgN.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> (Simon et Le Corre 1996).

Les références bibliographiques sur les épandages de printemps-été sont cependant moins abondantes en particulier pour une analyse conjuguée de l'effet sur la qualité de l'eau et de l'air. Dans une quarantaine d'essais menés au champ par les chambres d'agriculture de Bretagne, du Centre et du Pays de la Loire, les émissions ammoniacales induites par des apports de digestat de méthanisation au printemps ont été mesurées en parallèle du suivi de l'azote mis à disposition de la culture (TROCHARD 2016). Pour des digestats à base de lisier de porc, les résultats ont mis en avant un comportement proche de celui du lisier de porc et une tendance à la forte hausse des pertes ammoniacales pour des apports de fin de printemps ou dans des zones plus sèches en comparaison des apports de début de printemps et dans un climat humide.

### 3.5.2 Simulations de scénarios d'épandage de fertilisants organiques sur prairies

#### 3.5.2.1 Plan de simulation

L'objectif des simulations réalisées était de compléter sur une plus large gamme de conditions pédoclimatiques et sur une période plus étendue l'effet d'apport de fertilisants organiques en fin d'hiver et au printemps sur la croissance de la prairie et sur les risques de pertes azotées. Seul le cas de prairies temporaires fauchées sur plusieurs années a été traité dans cette étude.

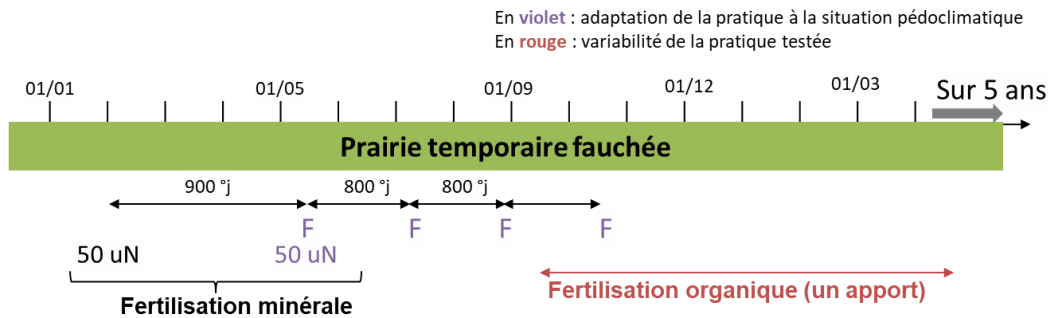


Figure 28 : Schéma chronologique de la situation sur prairie temporaire fauchée (F : fauche)

Les simulations sont réalisées sur 5 ans (Figure 28). Pour cette situation, la déclinaison des scénarios s'est faite de la manière suivante :

- ✓ **Modalités pédoclimatiques** : 48 sites-sols (présentés précédemment) et 14 années climatiques. Les simulations n'ont pas pu être réalisées sur 20 ans pour des raisons de contraintes de temps.
- ✓ **Initialisation de la simulation** : le précédent n'est pas pris en compte car les premières années de prairie servent d'initialisation pour cette simulation. L'initialisation dans le modèle concerne les teneurs en eau et en azote avant implantation de la prairie. La prairie a été implantée en sortie d'hiver. Pour les teneurs en eau dans le sol, au début des simulations, le sol a été initialisé à la capacité au champ. Le reliquat d'azote minéral dans le sol est initialisé à 30kgN/ha pour 90cm (adapté selon la profondeur de chaque sol)
- ✓ **Prairie** : le modèle ne permettant pas de décrire des mélanges d'espèces, une prairie de graminées pures (fétuque) est implantée. Les pratiques de fauche se sont basées sur les modes d'exploitation décrits dans *Graux et al. 2017* et dérivés du système ISOP (Ruguet et al., 2006). Une sélection d'un mode de gestion a été faite avec l'aide des experts. Il s'agit d'une prairie fauchée à trois reprises. Les dates de fauche sont définies en cumul de degrés-jours comme le montre la figure 28 et doivent vérifier une condition de biomasse suffisante de la prairie (>1 t.ha<sup>-1</sup> fixée d'après Graux et al. 2017).
- ✓ **Fertilisation organique** : on teste de manière systématique pour chaque site l'apport de produits organiques issus des classes 2, 3, 5 et 6 de la typologie présentée en section 2, en utilisant les représentants paramétrés pour chaque classe. Dans le cas de la classe 3, les deux fumiers représentants ont été utilisés dans les simulations. Pour ce qui est de la classe 5, la boue a été choisie comme représentant plutôt que les fientes de volailles pour ces simulations. Pour l'ensemble des classes, différentes doses sont apportées selon les scénarios. Excepté pour la classe 2, qui minéralise très peu voire pas du tout au cours d'une année, la quantité de matière brute à apporter pour une mise à disposition par le PRO d'une quantité définie d'azote minéral sur prairie (soit azote minéral initial et azote minéralisé pendant la période) a été estimée à partir des valeurs de Keq bilan issues des grilles du COMIFER pour un apport d'automne-hiver. Pour la classe 2, deux quantités de matière brute ont été testées : 15 et 30 tMB. Ces éléments ainsi que les différentes périodes d'apports testées sont détaillés dans le tableau 11.

Tableau 11: Récapitulatif des modalités d'apports de fertilisants organiques sur prairie temporaire

Classe	Description produit	Azote total (kgN/ha)	Azote efficace (kgNeff/ha)	Période apport et localisation de l'apport
2	Produit à très lente minéralisation d'azote	185	-	Une date par mois testée : - 15/09 - 15/10 - 15/11 - 15/12 - 15/01 - 15/02 - 15/03 - 15/04  Apport en surface uniquement
		370	-	
3	Produit à minéralisation lente et présentant une phase transitoire d'immobilisation	137	25	
		275	50	
	Produit à minéralisation lente	108	25	
		216	50	
5	Minéralisation importante et rapide	138	50	
		275	100	
6	Forte proportion d'azote minéral	85	50	
		170	100	

- ✓ Fertilisation minérale : toujours basés sur les modes d'exploitation déjà définis, deux apports d'engrais minéraux sont réalisés (sous forme d'ammonitrate) : un premier de 50 uN à la fin de l'hiver (01/02) et un second de 50 uN également au moment de la première fauche.

### 3.5.2.2 Résultats de simulation et analyses

Les scénarios simulés ont été analysés sur la fin de la 3<sup>ème</sup> année et la 4<sup>ème</sup> année de croissance de la prairie afin de considérer une prairie temporaire implantée depuis plusieurs années.

#### Disponibilité de l'azote sous prairie

On constate que les valeurs médianes pour les quantités d'azote provenant des produits organiques apportés et disponibles pour la prairie sur une année sont souvent légèrement supérieures aux valeurs d'azote efficace calculées initialement à partir des valeurs de Keq (Figure 29). Pour des quantités attendues de 100 kg N efficace (classes de fertilisants 5 et 6), un surplus de 20kgN disponible est simulé. Seuls les scénarios d'apport de 50kgNeff théorique comportent des valeurs simulées plus faibles (environ 40kgN/ha). Dans ce cas précis, l'épandage d'une quantité double ne multiplie pas par deux l'azote mis à disposition sur l'année pour la prairie. En comparaison de la situation sous maïs, la variabilité de cet azote disponible est plus faible. On peut avancer l'hypothèse de conditions dans le sol moins variables, en particulier les teneurs en eau qui semblaient impacter fortement la minéralisation dans les scénarios non irrigués sous maïs. Toutefois les sorties du modèle exploitées dans cette étude n'ont pas permis de vérifier cette hypothèse.

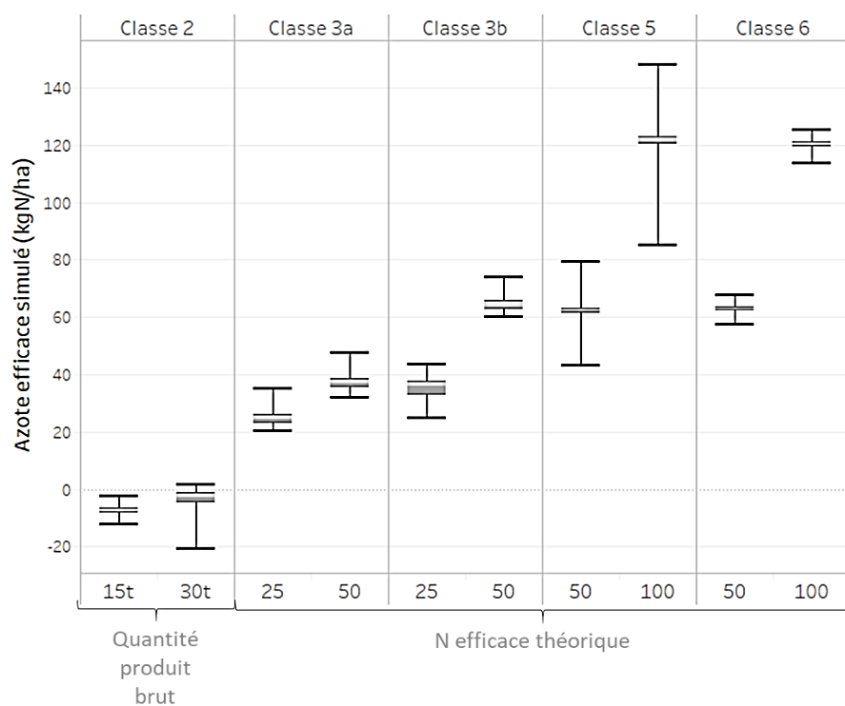


Figure 29 : Comparaison de l'azote efficace attendu et simulé sous prairie (Bornes inférieures et supérieures : valeurs minimales et maximales/ Bornes rectangles : centile 25 et 75)

### Biomasse et absorption

Des vérifications préliminaires ont été réalisées concernant la production de biomasse et l'absorption d'azote par la prairie de fauche simulée. Les ordres de grandeur obtenus semblent cohérents avec la bibliographie. Les résultats, présentés en annexe 5.1, montrent bien que les prairies prélèvent nettement plus de 170 kg N/ha/an dans de nombreuses régions comme avaient conclu Graux et al. (2017). Comme dans les réseaux de suivi répartis sur la France, des écarts de production de biomasse sont observés selon la localisation géographique des sites étudiés avec par exemple des productions de matière sèche plus faibles dans les sites à l'est de la France par rapport aux zones plus arrosées de l'ouest de la France (Bretagne, Normandie, façade atlantique, Pyrénées...). La figure 30 illustre ces constats pour les scénarios témoins ne recevant qu'une fertilisation sous forme minérale au printemps. On note que le site du Gard présente une croissance bien plus faible que les autres sites en particulier pour le sol le plus superficiel. Ces résultats s'expliquent vraisemblablement par un cumul de précipitations bien plus faible sur ce site (moins de 500 mm en moyenne).

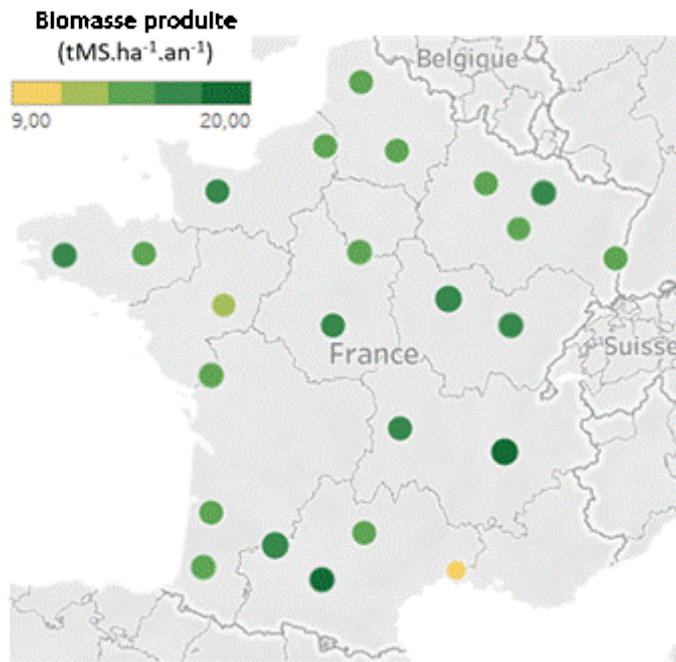


Figure 30 : Production annuelle de matière sèche de la prairie fauchée selon les sites pour les scénarios sans apport de fertilisants organiques

Une analyse de l'effet de la période d'épandage des différents fertilisants organiques testés sur l'absorption des prairies a également été réalisée, à la fois sur l'absorption globale annuelle et les quantités absorbées selon la période de l'année (ici entre chaque fauche). A l'échelle de l'année, il ressort que les surplus d'azote absorbés associés à des épandages de septembre sont plus faibles que sur les autres périodes alors que des apports en décembre et janvier ressortent bien plus favorables y compris pour des produits de classe 2 et 3 qui minéralisent plus lentement. Ce constat est valable quel que soit le produit mais avec des niveaux de surplus d'absorption différents. Les valeurs obtenues pour l'analyse à l'issue de la 1<sup>ère</sup> fauche et de la 2<sup>ème</sup> fauche sont présentées en annexe 5.2. Pour la 1<sup>ère</sup> fauche, des conclusions identiques à celles pour les surplus d'absorption annuelle peuvent être faites : les épandages pendant l'hiver semblent plus favorables à augmenter les quantités absorbées par la prairie avant la première fauche. En revanche, concernant l'azote accumulé entre la 1<sup>ère</sup> et la 2<sup>ème</sup> fauche, ce sont les apports de mi-avril qui sont les plus favorables en particulier pour les classes 3, 5 et 6. Dans le cas de la classe 2, les écarts entre modalités restent faibles.

#### Pertes azotées associées

Concernant les pertes par lixiviation en automne et en hiver, la figure 31 présente les niveaux de pertes absolues pour les scénarios témoins sans épandage de fertilisant organique sur chaque site, ainsi que les quantités d'eau drainée et la minéralisation annuelle. Le reste de l'analyse s'appuyant uniquement sur des variables relatives, ce graphe permet de donner quelques références sur les pertes globales simulées sous une prairie fauchée sans épandage de produit organique. Les quantités lixiviées sont très faibles pour les scénarios témoins, ce qui est cohérent avec la bibliographie pour des prairies non pâturées et peu fertilisées. Il ressortait des conclusions de l'étude précédente une forte corrélation des pertes par lixiviation avec les quantités drainées qui ne ressort pas pour ce jeu de simulations en tout cas pour les scénarios témoins. Ceci est probablement lié à la forte capacité de la prairie à absorber les quantités relativement faibles d'azote apporté (uniquement fertilisation minérale de 100 uN fractionné en deux apports au printemps). Sur la majorité des sites, les quantités lixiviées sont de moins de 1kgN/ha même pour des années plus à risque. Toutefois, pour certains sols caractérisés par une forte minéralisation les valeurs maximales de pertes sont plus élevées traduisant un risque de

lixiviation plus important selon les conditions climatiques de l'année. Sur le sol site 04\_2 (sol à forte minéralisation basale de Haute-Garonne), pour les cinq années les plus à risque, les pertes sont comprises entre 20 et 50 kgN/ha.

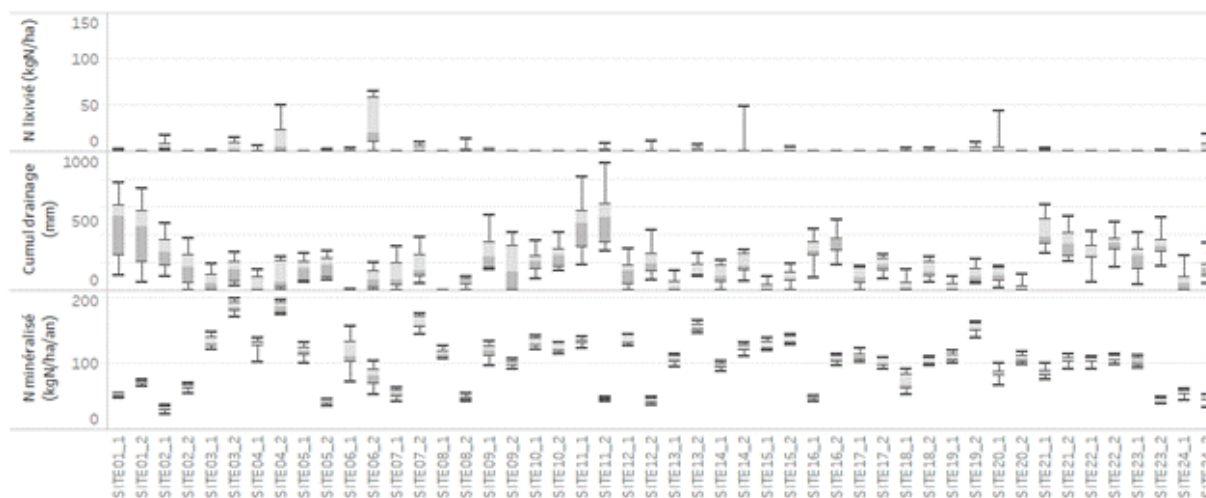


Figure 31 : Quantités d'azote lixivié et d'eau drainée pendant l'automne-hiver et minéralisation basale annuelle sur chaque site-sol pour les témoins sans apport organique (Bornes inférieures et supérieures : valeurs minimales et maximales/ Bornes rectangles : centile 25 et 75)

Pour les scénarios avec épandage de fertilisants organiques, les pertes absolues sont présentées en annexe 5.3 : les valeurs médianes sont inférieures à 6kgN/ha sauf pour le site 06\_2, du fait d'une faible capacité d'absorption de la prairie pour ce type de pédoclimat (voir paragraphes précédents). Les surplus de pertes liés à cet apport s'avèrent généralement faibles dans les simulations réalisées. Le tableau 12 présente les valeurs des centiles 75 pour ces surplus de pertes selon la classe du fertilisant simulé, la dose (en azote efficace théorique) et la période de l'apport. L'analyse du centile 75 permet, par rapport à la valeur médiane, de considérer le risque de lixiviation pour des années climatiques favorisant le drainage et ou la minéralisation de l'azote. Les surplus de pertes pendant l'automne et l'hiver sont négligeables pour les classes 2 et 3 et pour les deux doses testées. Ces constats sont cohérents avec les conclusions de 2012, qui s'étaient appuyées sur trois sites répartis en France (Bretagne, Lorraine et Massif Central). Les pertes en cas d'apport de fumier de bovin s'avéraient très faibles et relativement constantes quelle que soit la date d'épandage (entre mi-septembre et mi-février). Concernant les classes 5 et 6, les surplus de pertes augmentent pour des apports entre la fin de l'été et le début de l'hiver. Pour des apports de 50 kgN efficace, ces pertes restent cependant faibles (des valeurs de centile 75 inférieures à 3kgN/ha). En revanche, elles peuvent dépasser 10kgN/ha supplémentaires perdus pour des apports deux fois plus importants réalisés entre mi-septembre et mi-novembre. A nouveau, ce constat confirme sur un plus large échantillon de sites les constats de l'étude précédente qui identifiait comme déconseillée, pour l'épandage sur prairie de lisiers de porcs et de bovins, la période de mi-septembre à mi-novembre.

La présente étude permet en outre de distinguer le cas des fertilisants organiques à minéralisation forte et rapide mais avec une teneur en azote ammoniacal initiale modérée (classe 5) et celui des produits riches en azote ammoniacal (classe 6). Pour cette dernière classe, les pertes de nitrate ont tendance à être plus importantes que pour la classe 5 et la période la plus à risque est plus tardive (mi-octobre) bien que les pertes par lixiviation restent élevées en septembre. Les apports de septembre pour la classe 5 sont les plus défavorables du fait d'un climat encore doux favorable à une minéralisation rapide de l'azote juste avant les épisodes de drainage d'automne et d'hiver.

Tableau 12 : Surplus d'azote lixivié (valeurs centile 75) pendant l'automne-hiver par modalité d'apport

PRO	Dose	15/01	15/02	15/03	15/04	15/09	15/10	15/11	15/12
Classe 2	15 t	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	30 t	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
Classe 3a	25 kg Neff	0,03	0,01	0,00	0,00	0,01	0,02	0,03	0,02
	50 kg Neff	0,09	0,03	0,01	0,02	0,06	0,37	0,35	0,27
Classe 3b	25 kg Neff	0,06	0,01	0,00	0,00	0,02	0,03	0,14	0,09
	50 kg Neff	0,33	0,05	0,01	0,02	1,19	3,04	1,97	0,98
Classe 5	50 kg Neff	0,21	0,05	0,01	0,02	1,77	2,61	1,34	0,57
	100 kg Neff	1,71	0,84	0,59	1,13	20,19	18,74	9,08	3,76
Classe 6	50 kg Neff	0,43	0,07	0,02	0,04	1,41	3,36	2,43	1,19
	100 kg Neff	2,72	0,92	0,57	0,70	20,09	27,33	15,26	6,44

Ces premiers résultats sont complétés par une analyse par site pour identifier une potentielle variabilité de ces périodes les plus à risque du point de vue de la lixiviation selon les conditions pédoclimatiques testées. Les cartes en annexe 5.4 présentent les centiles 75 des surplus de pertes associés à chaque site (moyenne des deux sols de chaque site) pour les classes 5 et 6. On en tire les constats suivants :

- Quel que soit le site (excepté le site 06 dans le Gard sur lequel la prairie se développe très peu) et la classe du produit, les apports de printemps n'induisent pas de pertes par lixiviation pendant l'automne suivant pour les doses testées.
- Pour la classe 5, l'apport de mi-septembre reste le moins favorable concernant les pertes par lixiviation pour l'ensemble des sites. Les surplus de pertes sont plus importants pour les sites du sud-ouest de la France et de la façade atlantique.
- Pour la classe 6, les sites et sols simulés dans le sud-ouest de la France ont tendance à présenter des surplus de pertes de nitrates un peu plus importants pour des apports de septembre. Ces pertes diminuent légèrement en octobre mais restent relativement importantes. A l'inverse dans le nord et l'est de la France, l'apport le moins favorable est plutôt celui d'octobre. Les surplus de pertes restent également plus importants pour les sites du sud-ouest de la France et de la façade atlantique.
- Les apports de novembre et décembre induisent de faibles pertes de nitrates, sauf pour les deux sites du Nord de la France.

La lixiviation de printemps simulée a également été regardée à l'échelle agrégée de tous les sites mais également par site. Les surplus de pertes ont souvent été négligeables (centile 75 < 5 kgN/ha dans 75% des scénarios) quel que soit le site, le fertilisant ou la date d'apport. Ce point ne fait donc pas l'objet d'une analyse plus approfondie.

Concernant la volatilisation, comme pour les autres situations, l'effet du pH du sol (Figure 32), de la dose apportée et du type de PRO sont les facteurs principaux expliquant les écarts de pertes constatées dans les simulations. Pour des sols à pH basique, les pertes sont bien plus élevées que sur les autres sols. Des écarts négligeables sont alors observés entre les différentes dates d'épandage qu'il s'agisse d'apport d'automne, d'hiver ou de printemps (Tableau 13 (B)). Les quantités d'azote volatilisé varient par contre selon le produit et sont corrélées à la teneur en azote ammoniacal des représentants de chaque classe. Les pertes les plus importantes sont obtenues pour la classe 6, riche en azote ammoniacal, avec un centile 75 pour les surplus d'émissions d'environ 45 kgN/ha (soit 40 % de l'azote minéral apporté). Pour les produits de classe 3, ces émissions sont plus faibles mais représentent une part plus importante de l'azote ammoniacal contenu initialement dans le produit (70 %).

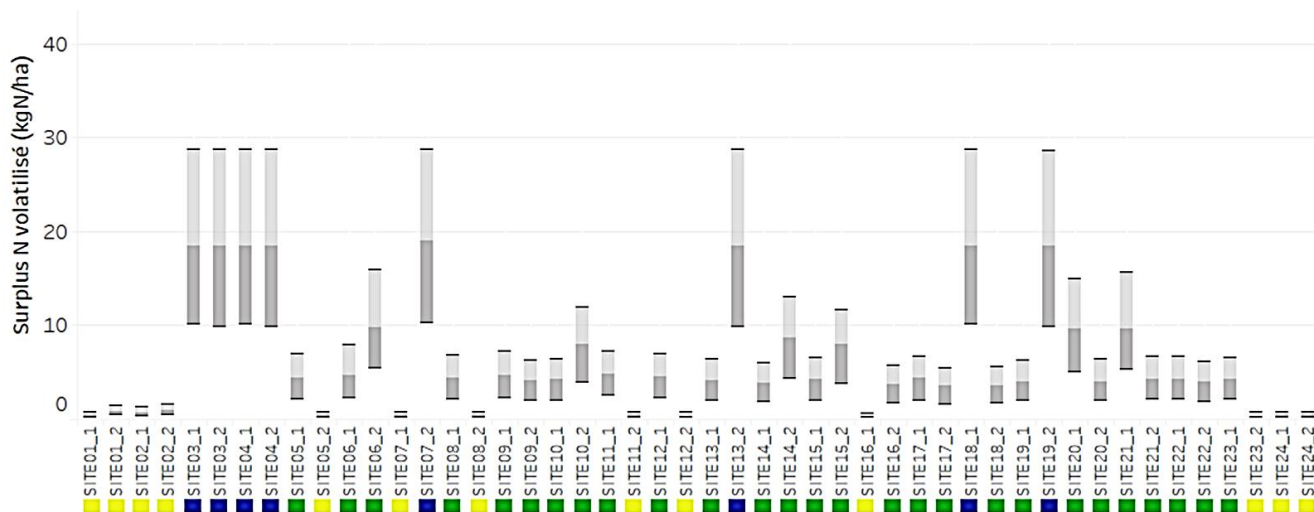


Figure 32 : Surplus de pertes par volatilisation en cas d'apport d'engrais organique (borne inférieure : centile 25/borne centrale : médiane /borne supérieure : centile 75). Les rectangles de couleur précisent les gammes de pH des sols de l'échantillon (en **jaune** :  $pH < 6$ /en **vert** :  $6 \leq pH < 8$ /en **bleu**  $pH \geq 8$ )

Pour des sols à  $pH < 8$ , l'effet de la date d'apport est en revanche visible (Tableau 13 (A)). Pour des apports d'automne, on constate une tendance à la hausse des pertes quand les épandages sont réalisés plus tôt à l'automne voire à la fin de l'été, ce qui s'explique par un climat plus propice au phénomène de volatilisation. Cependant les pertes diminuent jusqu'en novembre en particulier pour les quantités apportées les plus importantes. Les pertes simulées en décembre sont ensuite bien plus faibles. Pour les apports de fin d'hiver, on constate que les pertes simulées les plus importantes surviennent pour les apports les plus précoces, en janvier. Ce résultat se retrouve à la fois lors de l'analyse agrégée de tous les sites mais également par site. **Cela semble surprenant au regard des références bibliographiques identifiées, concluant plutôt à une augmentation des émissions lors d'apports plus tardifs au printemps. Les niveaux de volatilisation supplémentaire obtenus semblent de plus très élevés. Ces résultats de simulation mériteraient d'être approfondis par la suite pour mieux expliquer ces fortes valeurs obtenues.**

Tableau 13 : Surplus de pertes par volatilisation (centiles 75) en cas d'apport d'engrais organique selon la classe de fertilisant azoté, la dose apportée et la période d'apport pour des sol à  $pH < 8$  (A) ou  $\geq 8$  (B)

(A)  $pH_{sol} < 8$

Classe fertilisant	Dose	Surplus N volatilisé (kgN/ha) – centile 75 par périodes d'apports							
		15/01	15/02	15/03	15/04	15/09	15/10	15/11	15/12
2	15t	2.1	1.9	1.5	1.3	0.8	0.9	0.8	1.5
	30t	3.4	3.0	2.4	2.2	1.5	1.6	1.5	3.0
3a	25 kgNeff	4.9	4.4	3.6	3.4	2.2	2.4	2.3	4.1
	50 kgNeff	7.6	6.8	5.9	5.8	4.4	4.5	4.5	6.9
3b	25 kgNeff	6.6	5.9	5.0	4.8	2.7	2.7	3.2	4.5
	50 kgNeff	10.7	9.9	8.7	8.2	6.3	6.4	6.0	9.5
5	50 kgNeff	6.1	6.0	6.1	6.1	5.1	4.4	2.6	3
	100 kgNeff	12.4	12.5	12.1	11.4	9.2	8.1	5.2	4.8
6	50 kgNeff	8.1	7.3	6.5	6.8	5.7	5.2	4.4	6.9
	100 kgNeff	13.9	12.9	11.5	11.6	9.2	9.3	8.4	11.4



(B)pH<sub>sol</sub> ≥ 8

Classe fertilisant	Dose	Surplus N volatilisé (kgN/ha) – centile 75 par périodes d'apports							
		15/01	15/02	15/03	15/04	15/09	15/10	15/11	15/12
2	15t	5.0	5.0	5.0	5.1	5.1	5.1	5.0	5.0
	30t	10.1	10.1	10.1	10.2	10.2	10.2	10.1	10.
3a	25 kgNeff	14.3	14.3	14.3	14.4	14.4	14.4	14.3	14.3
	50 kgNeff	28.7	28.7	28.7	28.8	28.8	28.8	28.7	28.6
3b	25 kgNeff	18.5	18.5	18.5	18.5	14.4	14.4	18.5	18.4
	50 kgNeff	37.1	37.1	37.1	37.1	37.2	37.2	37.1	36.9
5	50 kgNeff	9.7	9.7	9.7	9.7	9.8	9.8	9.7	9.7
	100 kgNeff	19.5	19.5	19.5	19.5	19.6	19.6	19.5	19.5
6	50 kgNeff	22.5	22.5	22.5	22.6	22.6	22.6	22.5	22.5
	100 kgNeff	45.1	45.1	45.1	45.2	45.2	45.2	45.1	45.0

### Analyse complémentaire sur la portance des sols

Les résultats précédents ont pu montrer que les épandages d'automne et d'hiver pouvaient être, selon les cas, favorables sur prairie. Toutefois la pratique montre que l'accès à la parcelle n'est pas toujours favorable sur ces périodes du fait d'une faible portance des sols et donc d'un risque de tassement de ces derniers voire d'enlèvement des engins mécaniques. Afin d'apporter quelques éléments à ce sujet pour les scénarios simulés, la portance des sols de l'échantillon a été évaluée pour deux niveaux de contraintes (100 et 140 kPa) entre septembre et avril. La méthode employée basée sur la comparaison des humidités journalières à des seuils d'humidités critiques selon la texture du sol est détaillée dans la partie méthodologique du document (Paragraphe 3.1).

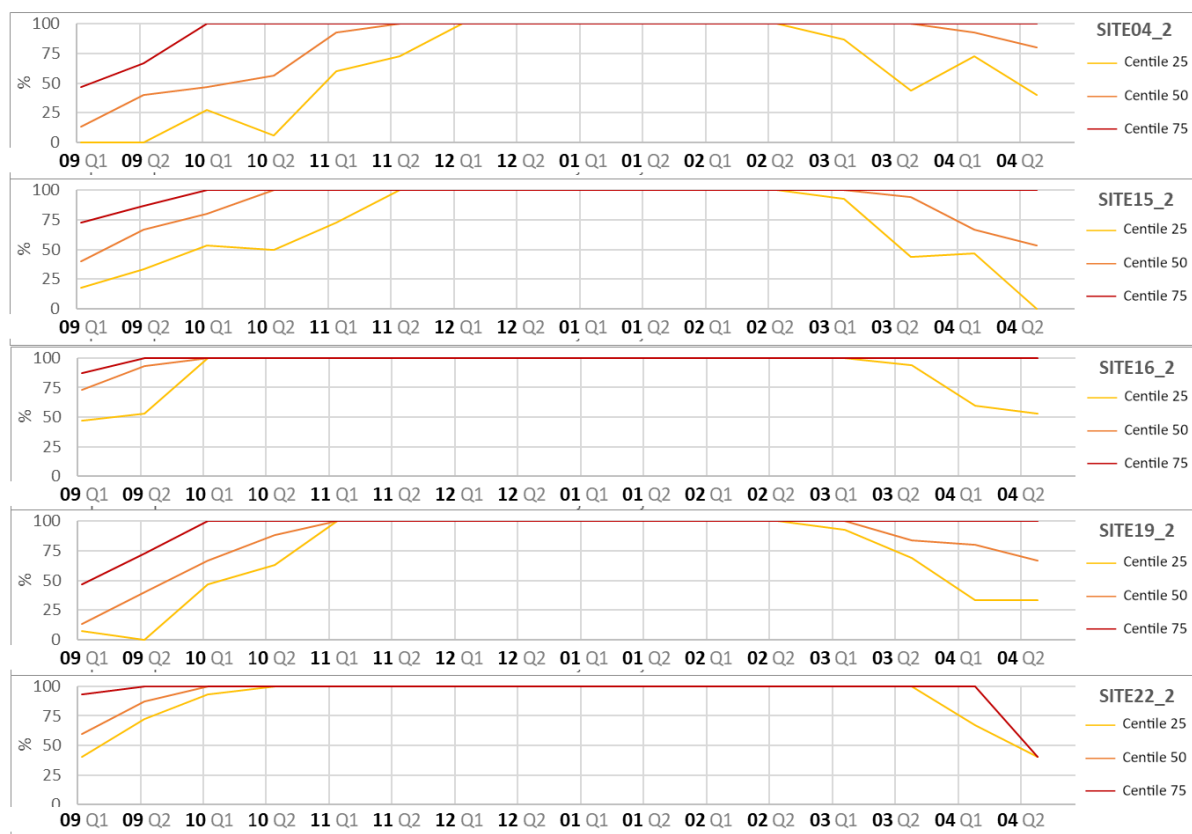


Figure 33 : Part de jours non disponibles par quinzaine du fait d'une portance insuffisante pour une contrainte exercée de 100kPa – Focus sur quelques sols argileux

Les résultats ont été analysés en comptabilisant le nombre de jours par quinzaine non disponibles pour intervention du fait d'une faible portance. Pour des contraintes de 100 kPa, on constate qu'il ne semble pas y avoir de limite d'accès à la parcelle même en hiver sur plus de la moitié des sites-sols pour des parcelles en prairie. En revanche sur d'autres sites-sols, tous caractérisés par des fortes teneurs en argile (>35%), la portance du sol peut s'avérer plus critique. La figure 33 présente la part de jours non disponibles par quinzaine pour quelques-uns de ces sols argileux répartis sur la France au travers des valeurs médianes et des centiles 25 et 75. De manière générale, il y a un risque importante d'avoir plus de 75% des jours non disponibles sur ces sites entre novembre et mars mais cela peut débuter plus tôt en particulier pour des sites du nord de la France ( ex : sites 16 et 22).

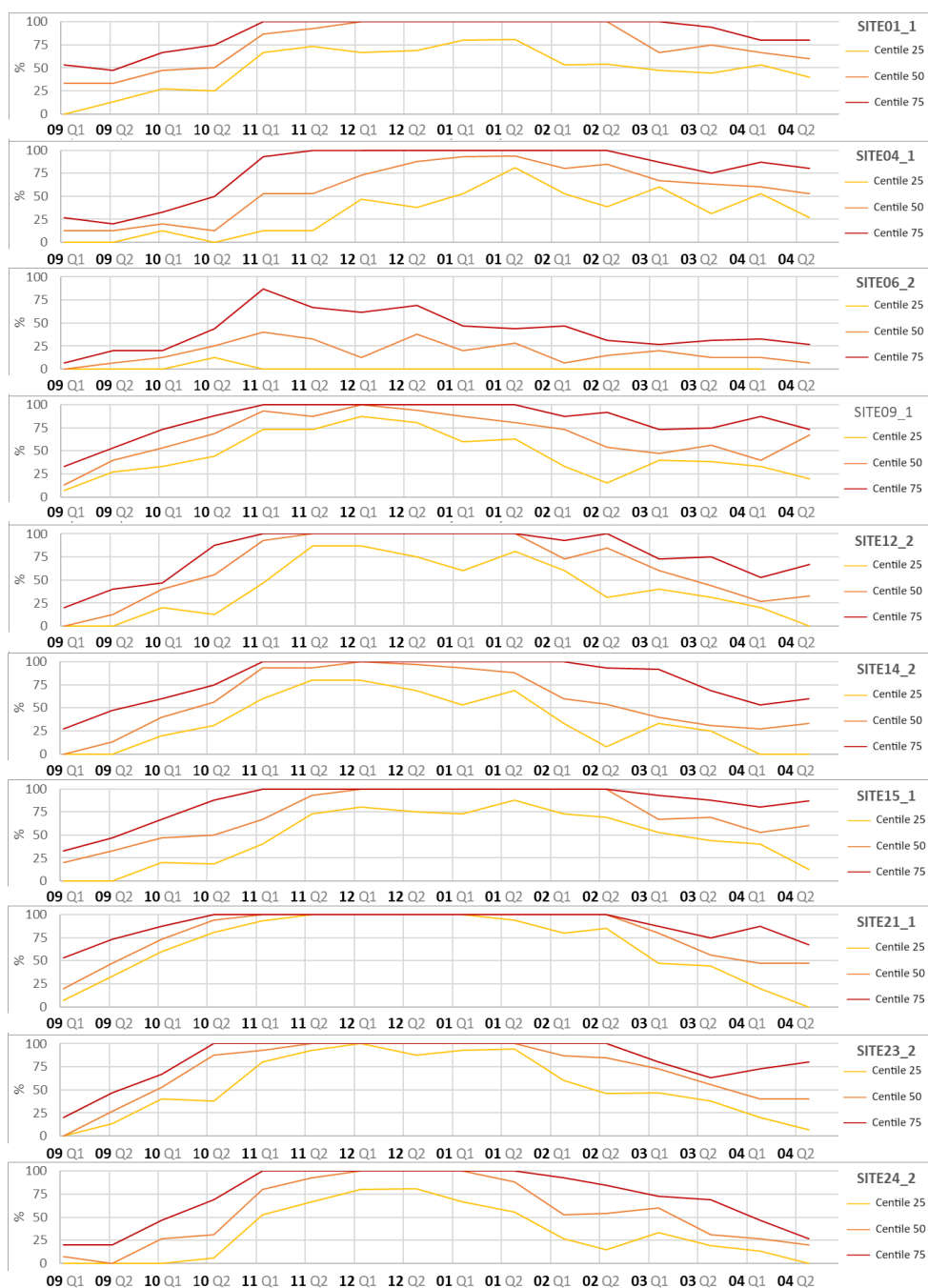


Figure 34 : Part de jours non disponibles par quinzaîne du fait d'une portance insuffisante pour une contrainte exercée de 140kPa – Focus sur quelques sols à plus faibles teneurs en argile (<35%)

En revanche, pour des contraintes exercées plus importantes (140 kPa dans l'étude), le risque de faible portance augmente fortement même sur des sites moins argileux. On constate des écarts entre les sites entre autres du fait de la variabilité de la pluviométrie. Les sites de la Haute-Garonne (04) et du Gard (06) présentent par exemple des risques moindres de faible portance mais il ne s'agit pas des principales zones où la prairie est implantée. Malgré ces écarts, le risque de compaction sur les mois de décembre et janvier voire également en novembre est élevé en cas d'utilisation de matériel d'épandage exerçant des pressions fortes sur les sols. Une adaptation du matériel choisi semble préférable sur ces périodes.

### 3.5.2.3 Conclusions et discussions

Les scénarios testés dans cette situation avaient pour objectif de compléter les premières conclusions de l'étude de 2012 sur un plus large échantillon de sites et également pour des épandages de printemps (et non uniquement d'automne-hiver). Les résultats de simulations réalisées sur prairie temporaire fauchée semblent montrer que des épandages organiques de fin d'été et début d'automne sur prairie sont moins favorables, en particulier en septembre. En effet, quelle que soit la classe de fertilisants organiques testées, les surplus d'azote absorbés par la prairie du fait de cet apport sont plus faibles qu'en hiver et au printemps, traduisant une moindre valorisation de l'apport d'azote par la plante.

L'analyse des pertes met également en avant des pertes plus importantes sur cette période mais ce constat est à nuancer selon les modalités testées :

- Les surplus de pertes par lixiviation liées à un apport de produit de classe 2 ou 3 sont négligeables y compris en automne-hiver, ce qui confirme les références bibliographiques existantes.
- Pour des apports de classe 5 ou 6 réalisés entre mi-septembre et mi-novembre, en particulier pour des doses plus élevées (ici 100 kgN eff testés), les quantités d'azote lixivié peuvent en revanche dépasser 10kgN/ha supplémentaires perdus. Ce constat confirme à nouveau les conclusions issues de différentes études. Dans le cas des produits à forte teneur ammoniacale (classe 6), les surplus de pertes ont tendance à augmenter pour un apport en octobre dans le nord et l'est de la France et plus précocement en septembre pour les sites du sud-ouest de la France et de la façade atlantique. Pour des produits à plus faible teneur ammoniacale mais minéralisant rapidement, la période défavorable est un peu plus avancée quel que soit le site (mi-septembre dans les simulations) du fait d'un climat encore doux favorable à une minéralisation rapide de l'azote juste avant les épisodes de drainage d'automne et d'hiver.
- Pour des apports de 50 kgN efficace, ces pertes restent cependant faibles voire négligeables (des valeurs de centile 75 inférieures à 3kgN/ha).
- Bien que ces périodes d'épandage soient interdites dans la réglementation actuelle, les apports entre mi-novembre et mi-janvier induisent des pertes supplémentaires par lixiviation plus faibles que les apports d'automne précédemment évoqués. Toutefois l'analyse faite sur la portance des sols semble montrer un risque important de compaction des sols sur cette période en particulier pour du matériel d'épandage exerçant des contraintes élevées de l'ordre de 140 kPa.
- Les apports de printemps n'induisent pas de pertes par lixiviation. Les simulations ont de plus fait ressortir des surplus de pertes par volatilisation plus faibles que pour des apports en hiver, ce qui diverge des conclusions de précédentes études qui concluaient plutôt à une hausse des pertes ammoniacales pour des apports de fin de printemps en particulier pour des produits riches en azote ammoniacal. Ce dernier résultat nécessiterait donc d'être approfondi.

Il faut également noter certaines limites concernant les simulations réalisées :

- Les simulations n'ont pu tourner que sur 14 ans pour des raisons de contraintes de temps.
- Des simulations de scénarios de prairies avec pâturage avaient été envisagées pour cette phase 1 de l'étude afin d'être plus représentatif des pratiques de l'Ouest et des massifs montagneux. Elles n'ont néanmoins pas pu être réalisées du fait du temps restreint de l'étude et d'un module de pâturage non activé dans la version diffusée de STICS. Malgré cela, l'étude s'intéressant à la contribution des épandages sur les flux supplémentaires d'azote qu'il s'agisse

d'absorption ou de pertes et non à des pertes absolues, il est probable que les écarts restent faibles entre prairies fauchées et pâturées mais la répartition dans l'année des apports par pâturage et par fertilisation peut tout de même influencer différemment sur les flux de pertes. Si on s'intéresse en revanche aux pertes absolues, de nombreuses références ont montré un risque d'augmentation des pertes sous prairies pâturées en particulier pour des pratiques intensives. Les risques de pertes par lixiviation peuvent atteindre  $100 \text{ kgN} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$  voire plusieurs centaines de kg (Vertes et al. 2007). Un surplus de pertes liés à un apport de fertilisant azoté supplémentaire vient donc dans ces cas-là s'ajouter à un niveau de pertes déjà élevé.

### 3.6 FERTILISATION AZOTEE MODEREE D'AUTOMNE-HIVER SUR COLZA

Le colza est cultivé sur environ 1,35 Mha en France (références Terres Inovia) avec des surfaces plus importantes sur la moitié nord. Les dernières campagnes marquées par des conditions sèches lors de l'implantation de la culture dans de nombreuses régions ont conduit à une réduction d'environ un tiers de la surface. D'après les données Agreste de 2011, 67% des surfaces en colza ne reçoivent que des fertilisants minéraux, 32 % un mixte minéral/organique (contre 19% en 2006 ce qui montre une augmentation de cette pratique) et 1% uniquement de l'organique. Selon une enquête plus récente de 2019 menée par Terres Inovia, cette tendance à l'augmentation des apports mixtes sur ces dernières années semble se confirmer avec un apport mixte dans 45% des cas (et 55% de fertilisation uniquement minérale).

Lors de la précédente étude de 2012 (ACTA-ARTELIA 2012), des scénarios colza pour tester l'impact d'apports organiques (fumier de bovins et fientes de volailles) à l'automne sur colza avaient été mis en place. Avec un apport de PRO, les simulations avaient mis en avant un risque augmenté de hausse de concentration en nitrates et de la lixiviation en particulier pour les apports de fientes. La date d'apport des fientes de volaille avait peu d'impact sur la réduction de la lixiviation supplémentaire par rapport au témoin (étant donné sa cinétique de minéralisation et son comportement proche d'un engrais minéral). La différence de lixiviation par rapport au témoin pouvait être réduite en modulant la dose mais aussi dans le cas de semis plus précoces.

La présente étude s'est intéressée à un autre type de pratique de fertilisation : la fertilisation minérale à l'automne sur colza. Certaines régions fortement productrices de colza sont depuis quelques années confrontées à des niveaux importants de résistances de ravageurs (plus précisément des altises) aux traitements phytosanitaires. La lutte par traitement s'avère en conséquence peu efficace. La situation est d'autant plus critique dans un contexte d'automne doux, comme on en rencontre fréquemment ces dernières années. En effet, ces conditions sont favorables à une augmentation des populations d'altises jusqu'à la reprise de la végétation en janvier/février. Ces problématiques mènent à identifier d'autres pratiques de protection intégrée permettant à la culture de mieux tolérer ces attaques. L'expertise et les premiers résultats d'expérimentations montrent en effet l'intérêt d'un colza robuste<sup>1</sup> et bien implanté (préparation du sol réussie, semis précoce...) présentant une croissance continue tout au long de l'automne pour limiter les risques liés à ces attaques. Une fertilisation modérée en fin d'été et à l'automne pourrait favoriser cette croissance soutenue, en venant pallier une faible disponibilité en azote du sol, contexte fréquent dans ces situations du fait de faibles reliquats lors de l'implantation mais aussi souvent d'une minéralisation insuffisante au regard des capacités d'absorption du colza surtout s'il est semé précocement. Dans le 6<sup>ème</sup> programme d'action nitrate national, dans le cas de l'implantation d'un colza, il est interdit d'épandre du 1<sup>er</sup> septembre au 31 janvier (ou 15 janvier selon les régions) des fertilisants du type III (i.e. engrais minéraux). Un renforcement peut de plus être

observé au niveau régional (ex : un allongement en fin de période en Normandie). L'étude s'est donc intéressée à des scénarios de fertilisation minérale avant et pendant cette période d'interdiction.

### 3.6.1 Références bibliographiques

Terres Inovia s'est intéressé à l'effet d'un apport modéré et potentiellement déterminant de fertilisant azoté après le 1<sup>er</sup> septembre. Sur un colza robuste et si les conditions du mois d'octobre sont favorables à la croissance, un tel apport permettrait d'éviter une rupture d'alimentation de la plante. La migration des larves dans le cœur des plantes est réduite dans ces conditions. La reprise de végétation en sortie d'hiver est en outre plus dynamique et limite à nouveau la nuisibilité du ravageur.

Dans 8 essais sur 2 campagnes (2016-17 et 2017-18) réalisés entre autres dans l'Yonne et en Côte-d'Or, l'effet sur la croissance du colza d'un apport de 30 uN en végétation (après le 1<sup>er</sup> septembre au stade 4 feuilles) en relais ou non à un apport au semis a été suivi. Ces colzas étaient semés avant le 15 août. Il ressort plusieurs constats de ces essais :

- Un apport d'azote en végétation "seul" non couplé à un apport au semis permettait de ne pas perdre de biomasse entre l'entrée et la sortie d'hiver voire même d'en gagner alors que la croissance du témoin sans apport à une tendance à stagner
- Dans le cas d'un apport couplé à un apport au semis, la croissance est de plus soutenue jusqu'à l'entrée d'hiver, au contraire du témoin
- En cas d'apport uniquement au semis on observe des biomasses similaires en sortie d'hiver par rapport à l'apport en végétation mais la dynamique de croissance certes plus forte en début de cycle est ensuite moins régulière.
- Le fractionnement d'une dose de 60 uN joue également sur la dynamique de croissance : en effet, en cas d'un apport de la totalité de la dose au semis, la biomasse stagne ou décroît entre l'entrée et la sortie d'hiver alors qu'un apport fractionné évite ce décrochement et semble permettre des niveaux de biomasse en entrée et en sortie d'hiver supérieurs.

<sup>1</sup> *Colza moins sensible aux dégâts de ravageurs et aux aléas climatiques caractériser par une croissance dynamique et des pieds vigoureux*

L'analyse des reliquats entrée d'hiver montrait de plus que dans les conditions citées, cet apport à l'automne n'induisait pas de risque supplémentaire de lessivage du nitrate, du fait de différences de reliquat avec le témoin non statistiquement significatives.

### 3.6.2 Simulations de scénarios de fertilisation modérée sur colza

#### 3.6.2.1 Plan de simulation et modalités testées

L'objectif des simulations réalisées était de tester sur une large gamme de conditions pédoclimatiques l'effet de différentes modalités d'apport modérée d'engrais azoté en automne-hiver selon la précocité de semis du colza à la fois sur la croissance de la culture pendant les premiers mois et sur les risques de pertes d'azote. Cette situation a été étudiée à la fois pendant la phase 1 sur les 48 sites-sols de l'échantillon initiale et pendant la phase 2 avec quelques adaptations des contextes pédoclimatiques et des pratiques testés. Ces adaptations sont précisées par la suite.

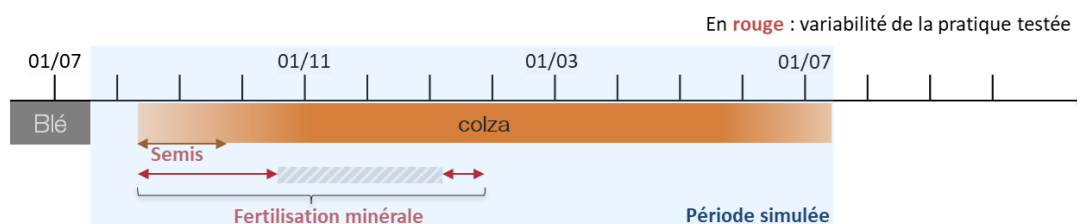


Figure 35 : Schéma chronologique de la situation sur colza

Comme le montre la figure 35, sur chacun de ces sites-sols, un colza est semé après un blé (blé d'hiver), une des cultures majoritairement implantées dans des rotations de grande culture avec un colza d'après les données Agreste. Ce blé est récolté à la mi-juillet sur l'ensemble des sites. A défaut de pouvoir proposer un paramétrage ad hoc sur des variétés récentes, la variété de colza Goeland a été choisie parmi 3 variétés déjà disponibles dans STICS. Bien que cette variété ne soit plus cultivée actuellement, elle est utilisée dans plusieurs études précédentes dont (Therond et al. 2017) du fait d'un paramétrage consolidé. Pour cette situation, la déclinaison des scénarios s'est faite de la manière suivante :

- ✓ Modalités pédoclimatiques : 48 sites-sols et 20 années climatiques (présentés précédemment)
- ✓ Initialisation de la simulation : l'initialisation dans le modèle concerne les teneurs en eau et en azote dans le sol juste après récolte du blé. Concernant la teneur en eau, les moyennes définies par sol dans l'étude précédente (ACTA-ARTELIA 2012) juste après une céréale à paille ont été reprises ici. Pour les quantités d'azote dans le sol, deux hypothèses de reliquats post-récolte sont testés :
  - 45 kgNmin/ha pour 90 cm de sol
  - 90 kgNmin/ha pour 90 cm de sol
 Ces reliquats sont ensuite adaptés selon la profondeur de chaque sol et répartis dans les horizons selon les mêmes règles de répartition que celles définies en 2012 pour un précédent céréale d'hiver (65%-18%-17% par tranche de 30 cm de sol)
- ✓ Semis : le semis est toujours réalisé à 3 cm de profondeur et avec une densité de 47 gr/m<sup>2</sup> mais trois dates de semis ont été testées (afin de d'obtenir différentes précocités de levée) et sont également modulées selon la zone géographique comme le montrent la figure 36 et le tableau 14.
- ✓ Fertilisation minérale : différentes modalités ont été testées à la fois sur le type d'engrais, la localisation de l'apport et le fractionnement de différentes doses :
  - Type de fertilisant : deux classes de la typologie sont testées ici, la classe 7 (représentée par de l'ammonitrate) et la classe 8 (représentée par de la solution azotée)
  - Localisation de l'apport : dans le cas de la solution azotée, des scénarios d'apport en surface ou en profondeur sont systématiquement testés bien que dans la pratique les apports au semis sont majoritairement incorporés et les apports en végétation en surface. L'ammonitrate n'a été apporté qu'en surface.
  - Dose, fractionnement et périodes d'apport : 8 pratiques sont testées :
    - Pas d'apport
    - 30uN au semis
    - 60uN au semis
    - 30 uN pendant la croissance du colza (date fixée pour tous les sites 25/09)
    - 30 uN pendant la croissance du colza (date fixée pour tous les sites 15/10)
    - 30 uN pendant la croissance du colza (date fixée pour tous les sites 15/01)
    - 30uN au semis + 30 uN pendant la croissance du colza 25/09
    - 30uN au semis + 30 uN pendant la croissance du colza 15/10

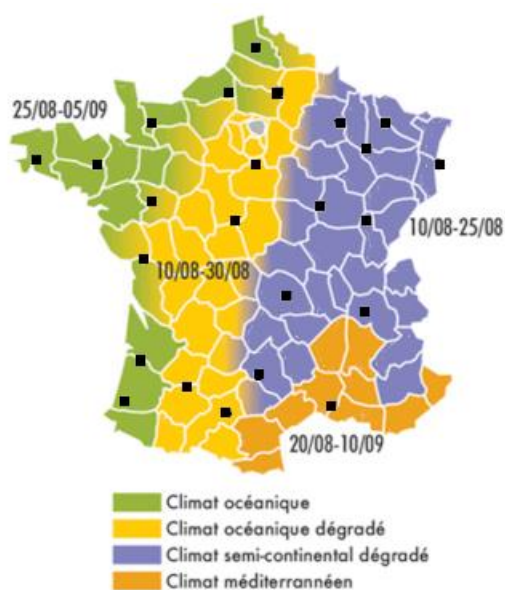


Figure 36 : Recommandations de semis par zones climatiques (source : Terres Inovia)

Tableau 14 : Dates de semis choisis pour les simulations STICS selon la zone et la précocité de semis

Zones	Semis	Dates
Climat océanique	Précoce	25/08
	Médian	01/09
	Tardif	20/09
Climat océanique dégradé	Précoce	10/08
	Médian	20/08
	Tardif	10/09
Climat semi-continentale dégradé	Précoce	10/08
	Médian	18/08
	Tardif	08/09
Climat méditerranéen	Précoce	20/08
	Médian	01/09
	Tardif	20/09

P : précoce / M : médian / T : tardif

Suite aux premières simulations faites en phase 1 de l'étude concernant des doses modérées d'engrais minéraux azotés apportées en automne et en hiver sur colza, des scénarios complémentaires ont été simulés afin d'affiner l'analyse. Ces compléments concernent :

- Des situations pédoclimatiques plus représentatives des conditions rencontrées sous colza en particulier des sols plus superficiels peu représentés dans l'échantillon initial de sol.
- Des modifications et compléments pour les pratiques
- Des pratiques testées sur un nombre restreint de sites par rapport à la phase 1 (voir tableau ci-dessous)

Tableau 15 : Adaptations du plan de simulation dans le cadre de la phase 2 de l'étude

Modalités	Description
<b>Pédoclimats</b>	<p><b>20 années climatiques</b></p> <p><b>10 sites</b> retenus à partir de l'échantillon initial des 24 sols</p> <p><b>2 à 3 sols par site</b> : intégration de sols superficiels de la région si non représentés initialement (voir tableau en annexe 6.1)</p>
<b>Initialisation (conditions dans le sol à la récolte du précédent)</b>	Concernant les teneurs en eau à la récolte du précédent, les valeurs précédemment utilisées semblaient élevées



	pour la période et ont été recalculées par simulation d'un précédent blé. Des teneurs en eau plus faibles ont été obtenues en particulier sur les horizons de surface : ces valeurs recalculées ont été renseignées dans le modèle (voir tableau en annexe 6.2)
<b>Semis du colza</b>	Les dates de semis tardives testées en phase 1 s'avéraient <i>a posteriori</i> trop éloignées de la fenêtre de recommandation et peu pertinentes. Pour ce jeu de scénarios complémentaires, les dates de semis les plus tardives ont été avancées entre le 25/08 et le 05/09 (fin de la période recommandée) selon la zone climatique
<b>Pratiques de fertilisation</b>	En plus des fertilisants de classes 7 et 8, un apport de fertilisant de classe 6 en surface a été testé à deux dates différentes : 10 m <sup>3</sup> de lisier (soit 59kgN total dans les simulations) sont apportés soit au semis soit le 15/10

Lors de ce deuxième lot de simulations, certaines sorties supplémentaires ont été extraites et analysées :

- Le jour de la levée du colza (seules les dates de semis avaient été étudiées précédemment)
- Les données de stress hydrique au travers des trois facteurs calculés par STICS afin d'affiner l'analyse des situations de mauvaise croissance du colza : l'indice de stress hydrique impactant la turgescence, indice de stress stomatique et le facteur de réduction de la durée de vie des feuilles lié au stress hydrique. Elles ont été analysées au travers d'un indicateur calculé sur août et septembre prenant en compte à la fois la durée et l'intensité du stress : il permet à la fois d'identifier des cas de présence de stress hydrique et le cas échéant de comparer en entre eux les scénarios avec stress hydrique.
- Le suivi de la portance des sols au travers d'un nombre de jours où l'accès à la parcelle est possible (en comparant l'humidité des premiers horizons de sols à l'humidité critique du sol)

L'analyse qui suit porte dans un premier temps sur les quantités d'azote que le colza a pu capter pendant l'automne et le début de l'hiver. Dans un second temps, l'effet des différentes pratiques de fertilisation sur la qualité de l'eau et de l'air est étudié, avec une attention plus particulière sur les pratiques qui semblaient les plus favorables pour une bonne valorisation par le colza de l'azote apporté.

### 3.6.2.2 Résultats de simulation et analyse

#### **Absorption et croissance du colza à l'automne et à l'hiver**

La figure 37 présente la variabilité des quantités d'azote absorbées sur les différents sites-sols testés pour les scénarios témoins (sans apport) lors de la phase 2. Les sols nouvellement intégrés dans ce second échantillon d'analyse présentent des niveaux d'absorption plus faibles avec des valeurs médianes inférieures à 50 kgN/ha voire autour de 10 kgN/ha pour le sol 3 en Vendée (site 07\_3). Ces sites se caractérisent par une moindre profondeur (25 à 60 cm) mais également par une minéralisation basale bien souvent plus faible par rapport aux autres sols d'un même site.

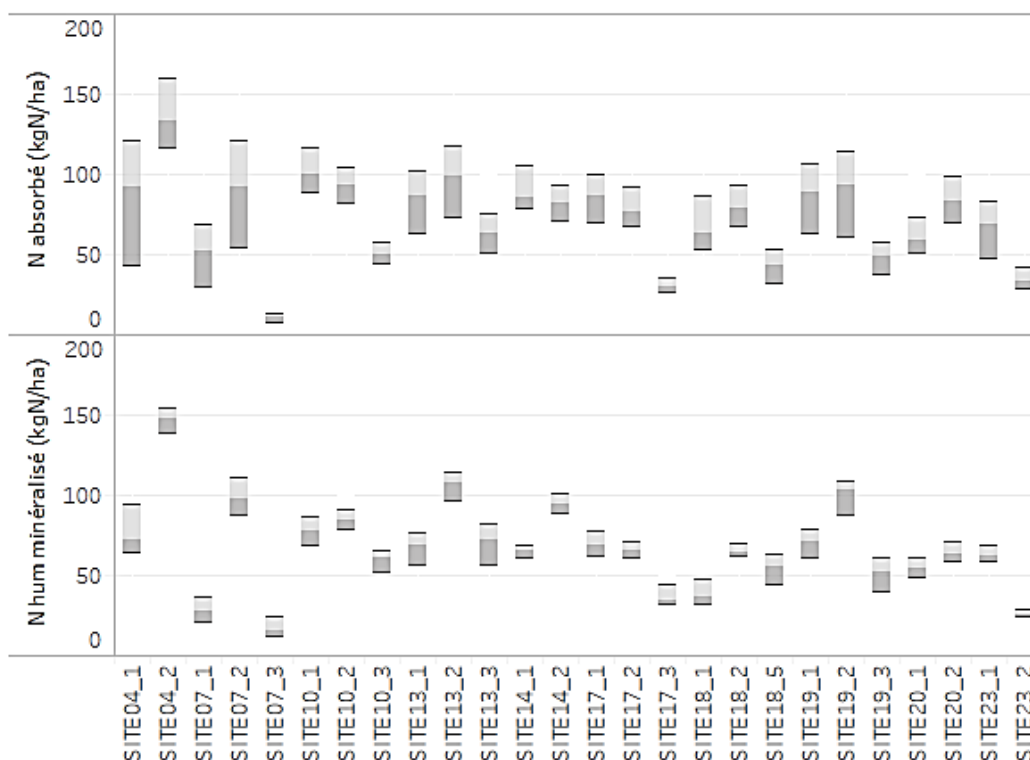


Figure 37: Cumul d'azote absorbé par le colza et d'azote minéralisé dans les différents sols entre le semis et le 31/12 pour les scénarios sans apport (borne inférieure : centile 25/borne centrale : médiane /borne supérieure : centile75).

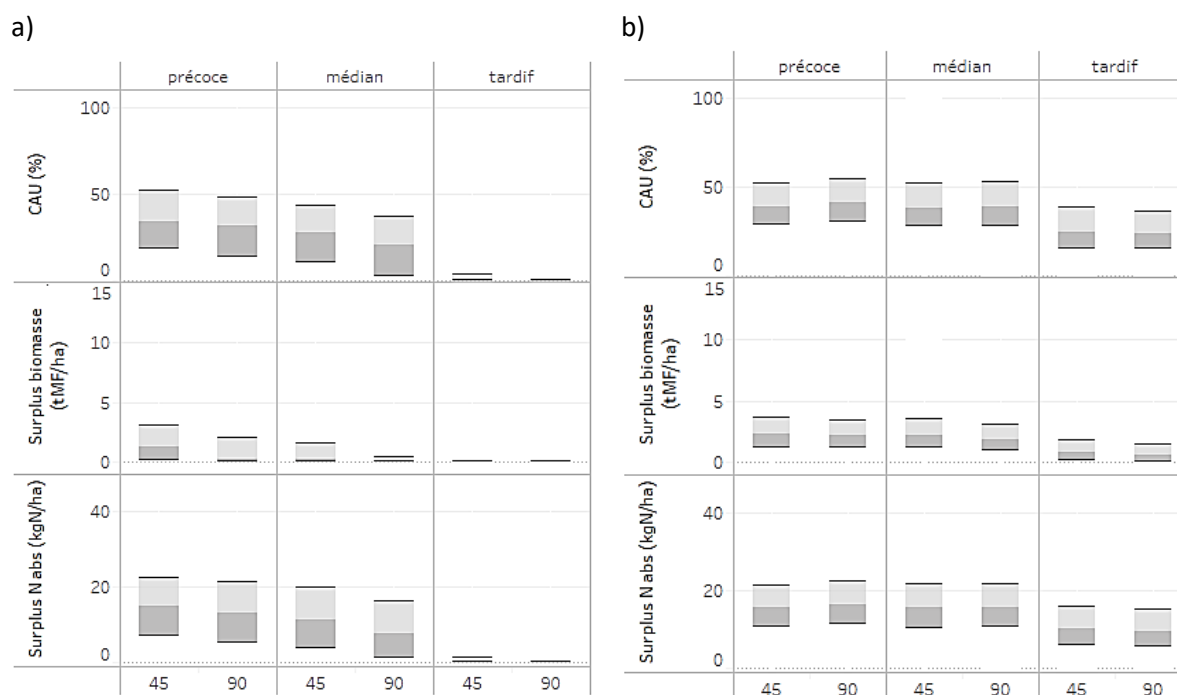
Dans le cas d'une fertilisation minérale à l'automne ou en hiver, un surplus de biomasse par rapport au témoin non fertilisé de 1.9 t de MF/ha (tonnes de matière fraîche par hectare) est obtenu après l'hiver à la mi-mars et en moyenne pour l'ensemble des sites et des modalités testées dans les simulations (centile 25 et 75 respectivement de 0.7 et 2.9 tMF/ha). Cette biomasse produite supplémentaire s'accompagne d'une absorption également plus importante d'azote de 16.0 kgN/ha.

L'analyse des surplus de biomasse accumulés sur le début de l'hiver (i.e. jusqu'au 31/12 ici), permet de révéler l'effet de deux facteurs testés avant de traiter la question de la période et du fractionnement de l'apport : la précocité du semis et le reliquat post-récolte. Ces résultats excluent donc le cas des apports en janvier qui n'impactent pas la croissance jusqu'en décembre.

- En cas de semis tardif, hors de la fenêtre de recommandation, les résultats de modélisations montrent une absence de surplus de biomasse lié à l'apport de fertilisation minérale dans 75 % des cas (Figure 38 a). Il n'y a pas non plus d'absorption supplémentaire d'azote. En revanche pour des semis en début ou en milieu de période de recommandation, ces surplus de biomasse produite ou d'azote absorbés sont bien plus élevés et on peut noter une tendance à l'augmentation des surplus pour les dates de semis les plus avancées. La comparaison des absorptions obtenues pendant l'hiver puis plus tardivement à la mi-mars montre bien que la fertilisation couplée à un semis plus précoce permet de maintenir une croissance soutenue et des cumuls plus importants pendant l'hiver. Dans le cas d'un semis médian, les surplus de biomasse et d'azote à la mi-mars sont en effet proches des scénarios avec semis précoce mais la croissance est moins soutenue pendant l'hiver.
- Concernant l'effet du reliquat post-récolte, bien que les écarts restent faibles à cette échelle d'analyse, on peut également noter que les surplus de biomasse et d'azote absorbés dans les situations fertilisées sont d'autant plus importants que le reliquat post récolte est faible. Ces effets ne sont plus visibles après l'hiver (Figure 38 b).

Remarque : les données associées à la figure 38 sont disponibles en annexe 6.2. Il s'agit des résultats des simulations de phase 1 qui n'incluent pas le cas des apports de fertilisants organiques de classe 6. Ces derniers sont traités dans la suite du document.

Du fait d'une absence d'effet positif sur la croissance du colza dans une très grande majorité des scénarios simulés, les cas de semis tardifs hors de la fenêtre de recommandation ont été retirés du reste de l'analyse afin d'affiner l'analyse sur le reste des modalités testées.



L'effet de la fertilisation minérale sur une production accrue de biomasse du colza en automne et en hiver dans le cas de semis précoces ou médians est variable selon les sites comme le montrent la figure 39 et la figure 40. Dans la majorité des sites et sols du sud-ouest de la France et de la façade de la Manche, les surplus de biomasse restent très faibles alors que l'on constate des valeurs plus élevées dans l'est. L'analyse des caractéristiques pédoclimatiques de ces différents sites et sols permet d'expliquer cette variabilité intersite. Les surplus les plus faibles sont obtenus sur des sols profonds de plus d'1m et pour lesquels la minéralisation de l'humus est plus importante que sur les autres sites. Au contraire, sur des sols plus superficiels comme c'est le cas pour les sites-sols 23\_1, 24\_1 ou encore 08\_2 (60 cm de profondeur) ou relativement profonds mais avec une minéralisation limitée par rapport aux autres sols (par exemple : site-sol 16\_1, 7\_1 ou 5\_2), les surplus s'avèrent plus élevés, car la fertilisation a permis de pallier une faible disponibilité en azote du sol. Dans l'échantillon de sols de l'étude, outre l'aspect superficiel, les sols à faible minéralisation sont caractérisés par un pH faible (<6).

Les graphes indiquent une variabilité intrasite avec des surplus parfois négligeables mais pouvant dans d'autres cas s'approcher de la dose d'azote minéral apportée. Il convient donc d'identifier dans quel cas l'apport d'azote minéral est valorisé par le colza.

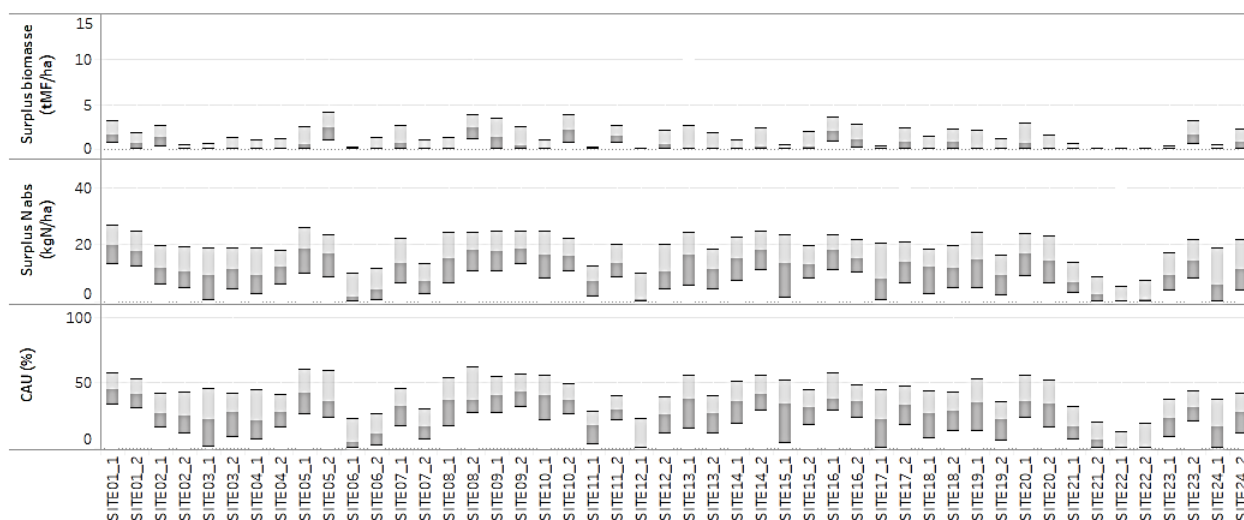


Figure 39 : Surplus de biomasse accumulée, d'azote absorbé et CAU par rapport au témoin sans azote jusqu'au 31/12 pour l'ensemble des sites-sols simulés (borne inférieure : centile 25/borne centrale : médiane /borne supérieure : centile75). Rq : la modalité v3 pour laquelle l'apport est réalisé au 15/01 est exclue ici.

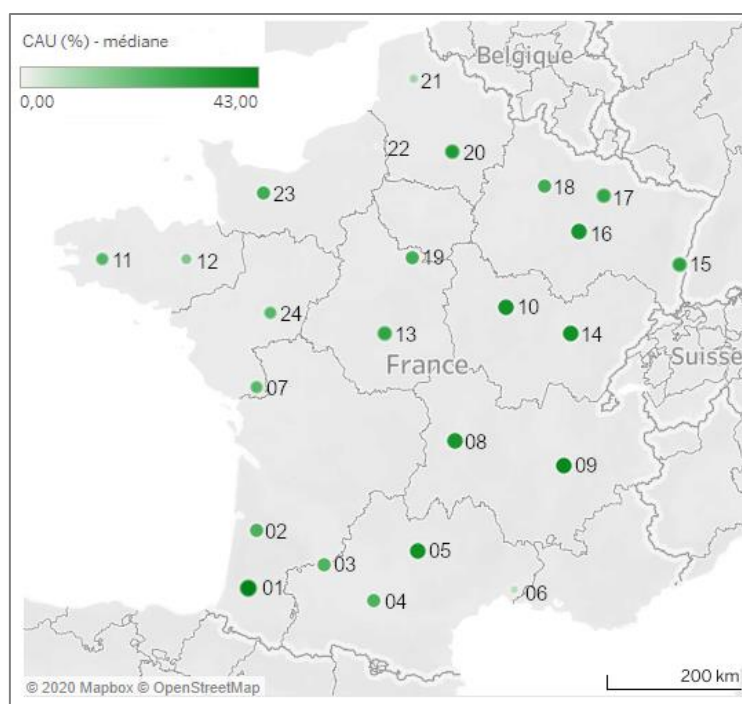


Figure 40 : Valeur médiane du Coefficient Apparent d'Utilisation au 31/12 pour les 24 sites (les numéros correspondent aux numéros de sites)

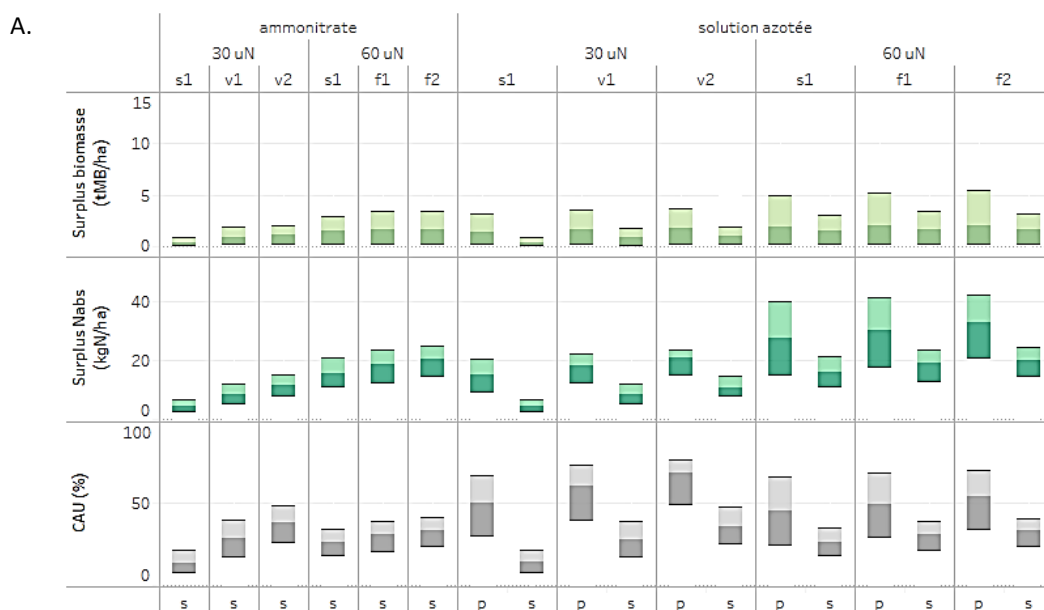
La figure 41 précise l'effet des différentes pratiques de fertilisation testées sur la croissance et l'absorption du colza jusqu'à l'hiver qu'il s'agisse de la dose apportée, de la période d'apport, du fractionnement et de la localisation de l'apport (en surface ou injectée). Ces résultats ont été distingués selon les deux niveaux de fournitures d'azote par les sols retenus pour les simulations. Plusieurs constats peuvent être faits :

- ✓ La biomasse produite et l'azote absorbé augmentent lorsque la dose de fertilisation minérale apportée augmente. Si on analyse les variables ramenées à la dose apportée, en regardant par exemple le CAU, l'efficacité des apports augmente lorsque ces derniers sont réalisés plus tardivement. **Le meilleur CAU est obtenu pour un apport de 30 uN à la mi-octobre.** On

remarque également dans les simulations que, dans le cas d'un apport au semis, le CAU pour une dose de 60 uN apportée sans fractionnement est légèrement supérieur à celui pour 30 uN. Dans les situations où l'azote est suffisamment limitant pour contrarier nettement la croissance racinaire et aérienne, l'apport d'azote au semis pourrait permettre de lever ce verrou, au moins partiellement, ce qui conduirait à une meilleure capacité d'exploration du sol des racines (et donc d'absorption d'azote) et à une croissance plus forte, ce phénomène contribuant à un meilleur CAU.

- ✓ Dans le cas d'un apport de solution azotée, les conclusions sont identiques à celles pour des scénarios avec ammonitrate mais on constate également l'effet non négligeable de l'injection pour augmenter le CAU de l'engrais. On obtient alors des valeurs plus élevées que pour les scénarios équivalents avec ammonitrate. En revanche, si la solution ne peut être apportée qu'en surface, l'efficacité de la fertilisation minérale sur les quantités absorbées par le colza s'en retrouve significativement diminuée du fait de pertes importantes par volatilisation.
- ✓ Pour des sols à plus fortes fournitures d'azote, bien que les tendances décrites dans les points précédents correspondent également, on constate qu'il n'y a aucun surplus de biomasse dans la moitié des scénarios simulés quelle que soit la pratique de fertilisation choisie. Le colza absorbe tout de même de l'azote supplémentaire par rapport au scénario témoin mais la fréquence de situations avec surplus faibles est plus importante.

Remarque : les éléments présentés sur la figure 41 sont détaillés en annexes 6.2 et 6.3 en distinguant également les niveaux de reliquat initial. Ces graphes mettent en avant l'effet d'autant plus favorable de la fertilisation que le reliquat est faible.



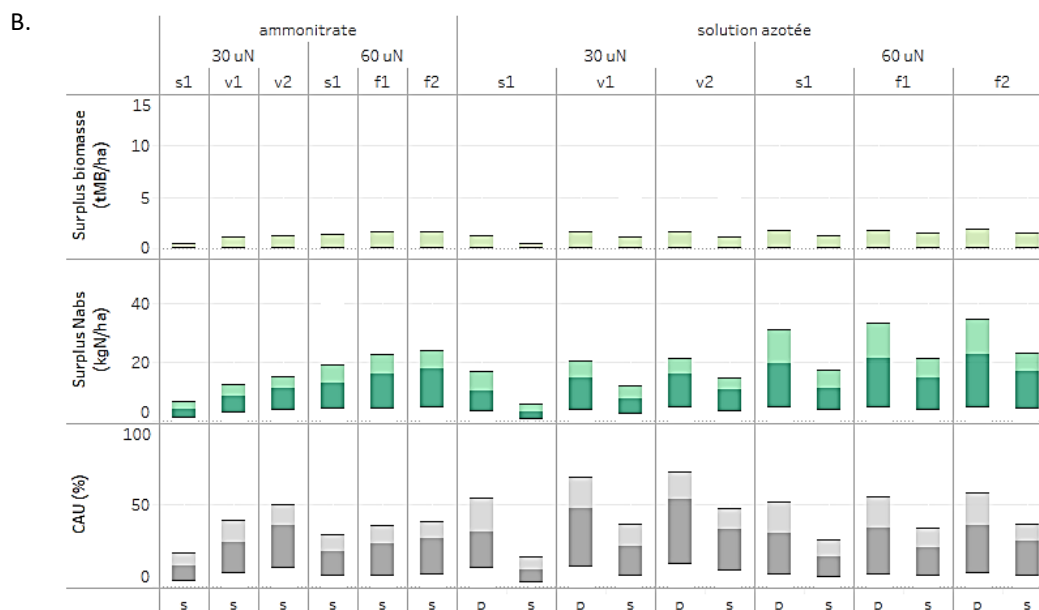


Figure 41: Surplus de biomasse accumulée, d'azote absorbé et CAU jusqu'au 31/12 par rapport au témoin sans azote selon les pratiques de fertilisation A] dans le cas de sols à plus faibles fournitures d'azote et B] dans le cas de sols à plus fortes fourniture d'azote (modalités : s : apport en surface/p : injection/ s1 : 30 ou 60 uN apportées au semis/ v1et v2: 30 uN apportées en végétation respectivement le 25/09 et le 15/10/ f1 et f2 : 60 uN apportées de manière fractionnée au semis puis en végétation respectivement le 25/09 et le 15/10)

Afin d'étudier également l'effet d'une fertilisation en fin d'hiver (au 15/01), les mêmes analyses ont été réalisées en regardant les surplus obtenus à la mi-mars en l'absence de fertilisation N de printemps avant cette date. Les résultats sont disponibles en annexe 6.4. On constate que l'azote apporté au 15/01 est absorbé en plus grande quantité que pour des apports en végétation à l'automne. Il faut cependant noter que ce surplus d'absorption ne survient que tardivement par rapport aux autres scénarios. Le surplus de biomasse a en revanche tendance à être plus faible que pour la fertilisation d'automne-été et la quantité de biomasse perdue par sénescence est comparable au témoin alors que les scénarios avec fertilisation à l'automne présentent une diminution de la sénescence.

#### Compléments de la phase 2 concernant l'effet des pratiques de fertilisation sur l'absorption d'azote du colza selon les contextes pédoclimatiques

Lors de la phase 2, l'analyse a été approfondie sur quelques sites-sols afin d'identifier les situations les plus favorables à une bonne valorisation de l'azote apporté par fertilisation. La sélection de sols a été faite afin de considérer différentes conditions pédoclimatiques en fin d'été et d'automne à la fois concernant l'azote fourni par le sol et les conditions climatiques en fin d'été et à l'automne. La date de semis la plus tardive testée correspond pour ces résultats à la fin de fenêtre de recommandations. Les cas d'apport de fertilisants organiques de classe 6 sont considérés ici.

Le tableau 16 synthétise l'analyse des pratiques de fertilisation les plus favorables à une bonne valorisation de l'azote apporté pour chaque sol sélectionné.

Tableau 16 : Analyse sur une sélection de sols des situations favorables ou non à une bonne valorisation à l'automne par le colza de l'azote apporté

Type de conditions pédoclimatiques	Site-sol analysé	Synthèse de l'analyse des simulations sur le site-sol sélectionné
Sol fournissant plus de 100 kgN minéral à l'automne	Site 04_2 (Haute-Garonne)	<p><b>Globalement une faible valorisation de l'azote apporté</b></p> <p>En cas de faibles cumuls de pluie en août (&lt;20 mm), quelle que soit la pratique de fertilisation testée, les quantités d'azote apportées sont très peu valorisées par la culture avant l'hiver (CAU &lt;40%) principalement du fait d'un effet retard important simulé sur la levée du colza.</p> <p>Pour une pluviométrie moyenne (autour de 50 mm) sur le mois d'août, ce site présente un nombre restreint de situations les plus favorables à une bonne valorisation de l'azote apporté : une fertilisation en végétation après un <b>semis précoce</b> (10/08-25/08), majoritairement en cas de <b>reliquats post-récolte plus faibles</b> (ici de l'ordre de 45 kgN/ha). Si un apport est fait au semis (apport unique ou fractionné), l'azote est bien valorisé en cas d'apport du fertilisant en profondeur.</p> <p>En cas d'année très pluvieuse en août et septembre de plus nombreuses pratiques semblent favorables à une bonne valorisation de l'apport même en cas de semis plus tardifs.</p> <p>Les années très pluvieuses en août sont rares sur ce site (1 année sur 20 testées) alors que des mois d'août à faible pluviométrie sont plus fréquentes (5 années sur 20 avec un cumul de 20 mm ou moins)</p>
Sol qui fournit entre 60 et 100 kgN minéral à l'automne et pour lequel les conditions pédoclimatiques favorisent l'absorption par le colza à l'automne	Site 10_2 (Yonne)	<p><b>Globalement une bonne valorisation de l'azote apporté</b></p> <p>En cas de faibles cumuls de pluie en août (~20 mm), quelle que soit la pratique de fertilisation testée, les quantités d'azote apportées restent faiblement valorisées par le colza avant l'hiver (CAU &lt;60%).</p> <p>Pour une pluviométrie moyenne (autour de 70 mm) sur le mois d'août, la valeur du CAU dépasse 60% pour un plus grand nombre de conditions que la catégorie précédente : des apports d'engrais minéraux (classe 7 ou 8) en surface ou enfoui en végétation (15/09 ou 15/10) mais aussi pour une fertilisation au semis quand l'azote n'est pas laissé en surface. Dans les deux cas, il s'agit de scénarios avec <b>semis précoce</b>. Pour un apport de fertilisant organique de classe 6, un apport en végétation après semis précoce permet d'atteindre un coefficient de 50% ou plus.</p> <p>Pour des années à pluviométrie importante au mois d'août (près de 150mm), on dépasse 60% pour le CAU et on observe les mêmes situations favorables que dans le cas précédent mais à la fois pour des semis précoces et médians.</p>
Sol qui fournit entre 60 et 100 kgN minéral à l'automne et une faible pluviométrie en fin d'été	Site 19_1 (Loiret)	<p><b>Globalement une faible valorisation de l'azote apporté</b></p> <p>Les années à faibles cumuls de pluie sur le mois d'août (moins 20 mm) sont relativement fréquentes sur ce site. Le CAU dépasse pour ces années-là très rarement 60% du fait d'une levée retardée (entre le 10/09 et le 30/09) même pour les semis les plus précoces.</p>

		<p>Pour une pluviométrie moyenne (autour de 50 mm) sur le mois d'août, le CAU dépasse également rarement 60% sauf dans le cas d'apport en végétation après <b>semis précoce</b> ou pour un apport effectué en <b>profondeur</b> (qu'il soit au semis ou en végétation, fractionnés ou non). Les reliquats avant semis du colza élevés sont de plus en plus favorables à une bonne valorisation. Pour un apport de fertilisant organique de classe 6, un apport en végétation après semis précoce permet d'atteindre un coefficient de 50% ou plus.</p> <p>Les années présentant une pluviométrie de plus de 100 mm en août sont rares sur ce site (1 année sur 20).</p>
<p>Sol fournissant entre 25 et 60kgN minéral à l'automne et pour lequel les conditions pédoclimatiques favorisent l'absorption par le colza à l'automne</p>	<p>Site 10_3 (Yonne)</p>	<p><b>Globalement une bonne valorisation de l'azote apporté</b></p> <p>Sur les 20 années testées, le cumul de pluie n'a pas été inférieur à 20 mm pour le mois d'août. En cas de pluviométrie proche de cette valeur, les pratiques de fertilisation restent cependant comme sur les autres sites très majoritairement peu favorables à une bonne valorisation par le colza à l'automne. Pour des années avec des cumuls de pluie moyens sur le mois d'août, Les situations favorables sont globalement moins fréquentes que pour le sol 10_2 du même site, du fait d'une volatilisation plus importante. L'apport <b>en profondeur et en végétation</b> d'engrais minéraux est à privilégier. L'apport organique en surface mi-octobre n'est que peu valorisé.</p> <p>Pour des années à pluviométrie importante au mois d'août, relativement fréquentes sur ce site par rapport aux autres sites, plusieurs pratiques de fertilisation permettent une bonne valorisation dès l'automne de l'azote apporté : en cas d'apports d'engrais minéraux de classe 7 ou 8 (si ce dernier est enfoui) <b>en végétation</b> (15/09 ou 15/10) après une levée relativement précoce par rapport à d'autres scénarios (avant le 05/09) et en cas d'apports minéraux <b>en profondeur au semis</b> ou en végétation (y compris apports de 60 uN fractionnés). Les apports de fertilisant organique de classe 6 en surface restent cependant faiblement valorisés du fait d'une importante volatilisation.</p>
<p>Sol qui fournissant moins de 25kgN/ha à l'automne et dont les conditions pédoclimatiques semblent limiter la capacité d'absorption du colza</p>	<p>Site 07_3 (Vendée)</p>	<p><b>Globalement une valorisation faible de l'azote apporté</b></p> <p>Ce site présente une forte fréquence d'années à faible pluviométrie en août (cumul &lt;20 mm pour 5 années sur 20) et peu d'années à forte pluviométrie (les deux années concernées présentaient par ailleurs un très faible cumul de pluie sur le mois de septembre). Ce sol présente de plus une très faible réserve utile. Le colza est fréquemment en situation de stress hydrique pour les semis précoces ou de forts retards de levée pour les semis plus tardifs et les pratiques de fertilisation permettant une bonne valorisation de l'azote apporté à l'automne restent anecdotiques dans les scénarios simulés.</p>



Plusieurs éléments ressortent de cette analyse par site. Quel que soit le site, les situations à pluviométrie en août faibles (généralement moins de 20 mm) impactent fréquemment la levée du colza en la retardant dans les simulations (comme le montre la figure 42) et cette date de levée tardive limite la bonne valorisation de l'azote apporté pour l'ensemble des pratiques de fertilisation testées (Figure 43). Il faut toutefois nuancer ces résultats de simulation qui mettent certes en avant un facteur climatique à risque pour la levée mais qui dans la réalité ne génèrent pas systématiquement un retard de levée. En effet, un certain nombre de bonnes pratiques autour de la date de semis en particulier le travail du sol peuvent permettre de garantir une réussite de la levée y compris en cas de très faible pluviométrie en préservant l'humidité du sol et en favorisant sa réhumectation en cas de pluie. Ces pratiques sont adaptées selon les sols et les conditions climatiques de la zone, ce qui n'est pas le cas dans les simulations faites.

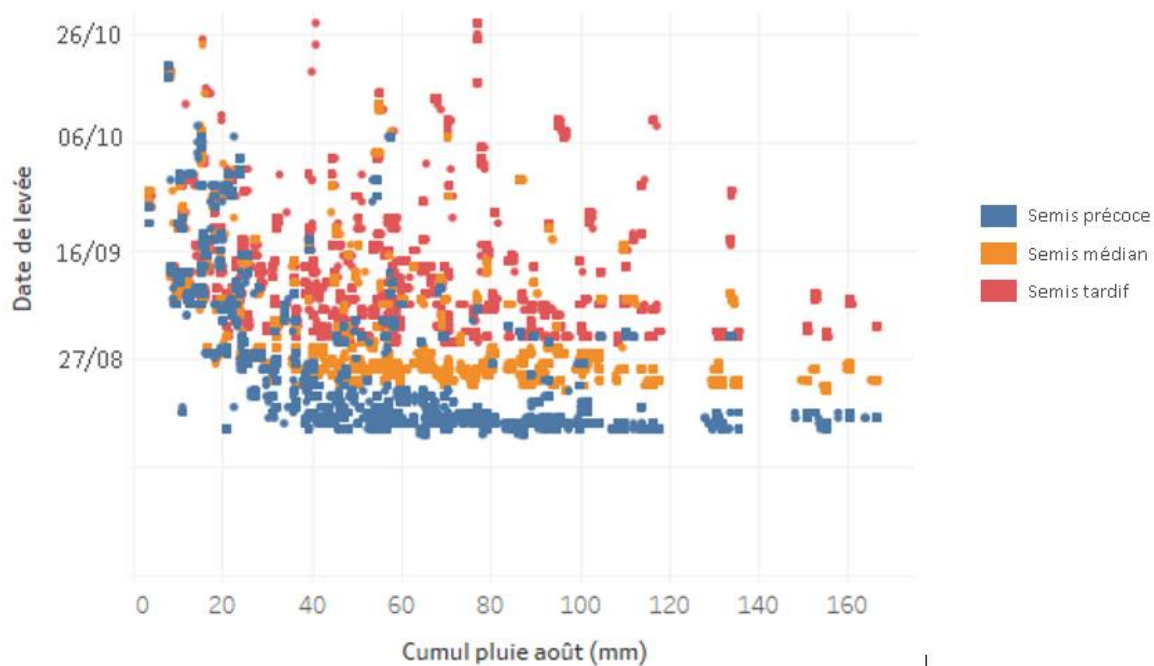


Figure 42 : Date de levée en fonction de la date de semis et du cumul de précipitations sur le mois d'août

L'analyse du stress hydrique n'a fait ressortir que peu de situations de stress hydrique en fin d'été et en automne sur le colza mais certains sols sont fréquemment concernés comme le sol très superficiel (25 cm) de Vendée présentant une réserve utile de 50 mm environ. Pour ce type de combinaison site-sol, même les années les plus pluvieuses sur cette période ne permettent de valoriser que de manière limitée l'azote apporté.

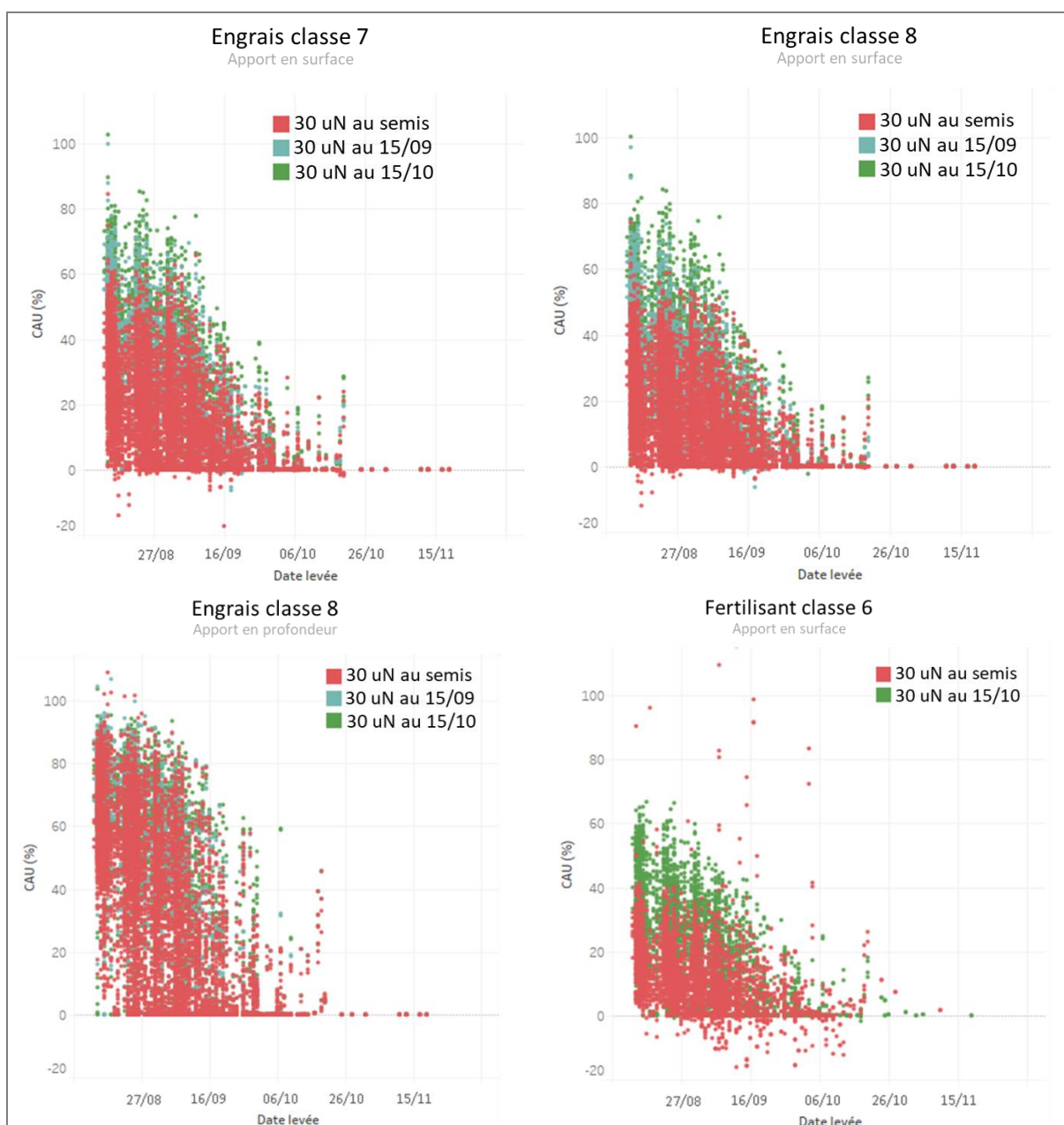


Figure 43 : Coefficient apparent d'utilisation du fertilisant azoté selon les pratiques de fertilisation (classes de fertilisants et date d'apport) et selon la date de levée

Malgré des conditions pédoclimatiques différentes entre les sites-sols analysés menant à des fréquences plus ou moins élevées d'épisodes de sécheresse mais aussi à des fournitures d'azote par le sol variables, le tableau précédent met en avant quelques pratiques générales favorables à une bonne valorisation de l'azote apporté :

- Une fertilisation après un semis précoce (10/08-25/08) ou du moins des pratiques et/ou conditions au semis permettant une levée rapide du colza.
- Une fertilisation en végétation y compris pour les fertilisants organiques de classe 6 malgré un CAU qui demeure plus faible que les fertilisants minéraux mais qui peut dans ces conditions atteindre 50% ou plus. L'apport en profondeur et en végétation d'engrais minéraux est à privilégier sur les sols basiques.
- Un apport au semis (apport unique ou fractionné) effectué en profondeur (enfouissement immédiat ou injection).

- Un apport à adapter en fonction des stocks initiaux d'azote dans le sol du fait d'un constat fréquent de fertilisation plus favorable en cas de reliquats post-récolte plus faibles (ici de l'ordre de 45 kgN/ha) en particulier sur des sols qui fournissent déjà des quantités conséquentes d'azote.

Une analyse croisée de l'azote absorbé, de l'INN début octobre et du CAU jusqu'au 31/12 a été réalisée afin de voir dans les simulations quel est l'effet d'un début de carence azotée pour des colzas déjà bien développés au début de l'automne sur l'efficacité d'absorption d'un apport en végétation. De cette analyse n'est ressorti que l'effet positif d'un colza bien développé sur la valorisation d'un apport à l'automne. Le niveau de développement pour obtenir par exemple au moins 50 % de CAU est toutefois variable d'un site à un autre comme l'illustre la figure 44 avec l'exemple des sols 19\_1 et 23\_1. Concernant l'INN, il est maximal à cette période pour la très grande majorité des simulations. Seuls quelques sites présentent sur une partie des années des INN plus faibles comme par exemple le site 17\_3. Le faible nombre de simulations ne permet pas de faire ressortir de tendance quant à l'effet d'un début de carence à cette période sur la valorisation d'un fertilisant apporté en végétation. Les niveaux d'INN élevés simulés avec STICS peuvent toutefois poser question.

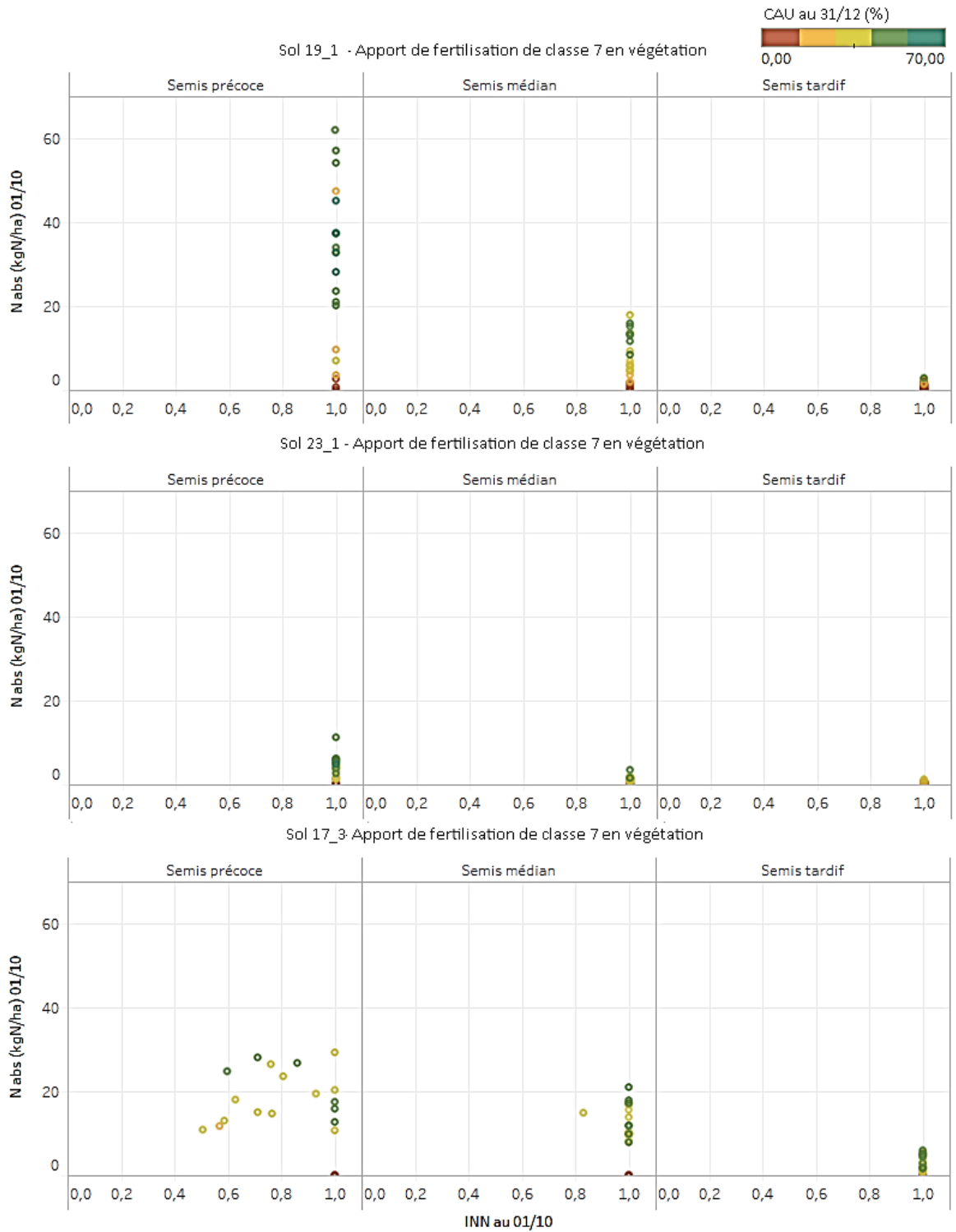


Figure 44 : Analyse croisée de l'azote absorbé et de l'INN au 01/10 ainsi que du CAU calculé jusqu'au 31/12 au travers de l'exemple des apports de fertilisant de classe 7 en végétation sur trois sites différents.

### Pertes azotées en automne et en hiver

La figure 45 présente les pertes azotées pour les scénarios témoins étudiés en phase 2. Les pertes par volatilisation étant nulles pour ces scénarios, seules les pertes par lixiviation pendant l'automne et l'hiver sont illustrées. Les quantités médianes d'azote lixivié varient entre 0 et 15 kgN/ha selon les sites-sols. Les pertes peuvent s'avérer plus importantes certaines années en particulier en cas de forte variabilité comme le site-sol 07\_2 (sol de Vendée profond à minéralisation basale importante et RU moyenne). L'analyse des quantités lixiviées pour 100 mm d'eau drainée permet de comparer les différentes situations pédoclimatiques pour une même quantité de drainage. Les pertes médianes varient alors entre 0 et 8 kgN/ha pour 100 mm.

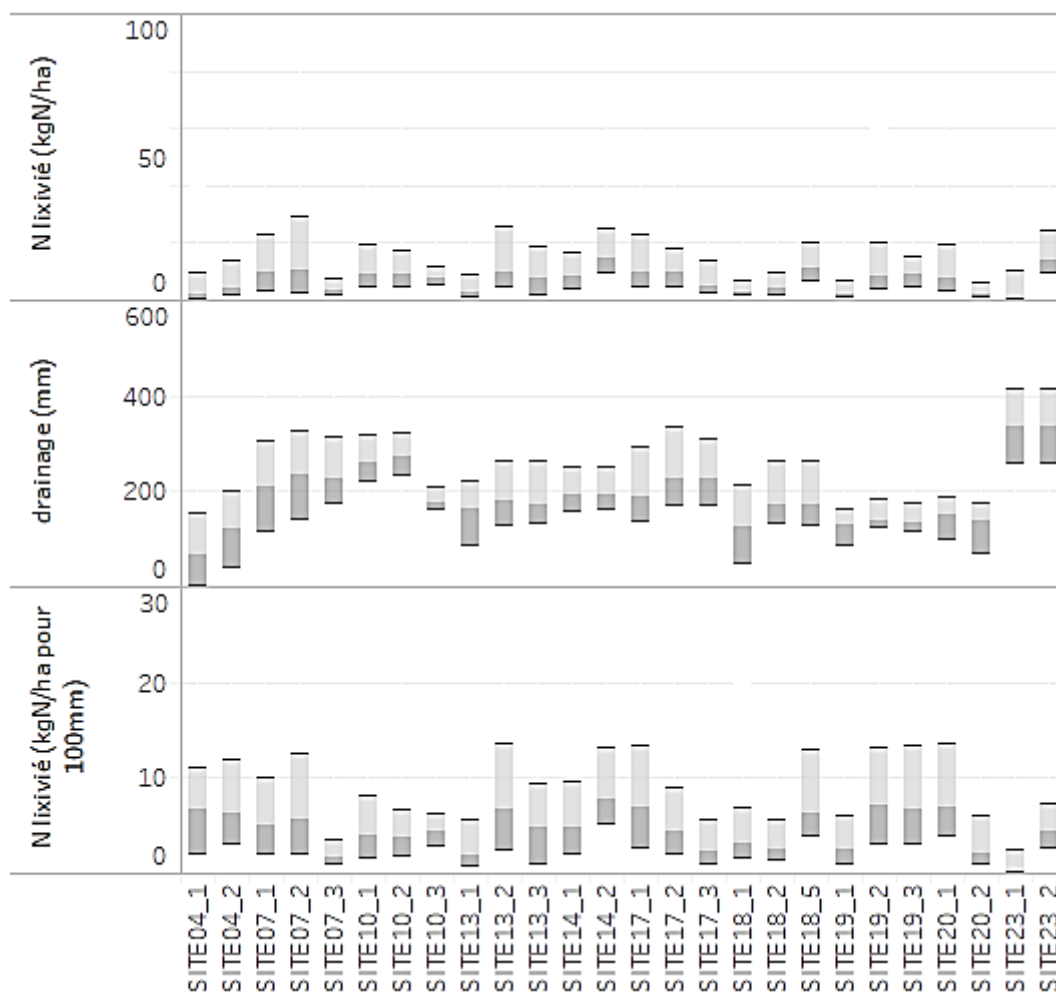


Figure 45 : Cumul d'azote lixivié et drainage pendant l'hiver jusqu'au 15/03 pour les scénarios témoins (borne inférieure : centile 25/borne centrale : médiane /borne supérieure : centile75).

La suite de l'analyse a concerné la lixiviation et la volatilisation uniquement pour les scénarios avec semis du colza pendant la période de recommandation, les semis plus tardifs hors de la période recommandée ayant été identifiés comme peu favorables à une valorisation de l'azote apporté à l'automne, quel que soit l'engrais minéral.

En cas d'apports de fertilisants, l'effet de la date de semis joue fortement sur la lixiviation avec des valeurs pratiquement nulles de surplus d'azote lixivié lorsque le semis a lieu dans la première moitié de la fenêtre de recommandations mais plus importantes en cas de semis tardif (en fin de période de recommandation). Cependant la médiane est de l'ordre de 2kgN/ha dans ce dernier cas. L'effet du reliquat post-récolte est cette fois-ci visible avec une augmentation du surplus médian de pertes pour

des reliquats plus importants mais surtout une augmentation du risque de pertes avec un centile 75 et des valeurs extrêmes supérieures qui augmentent fortement.

En ce qui concerne la lixiviation, comme le montre la figure 46, les surplus de pertes de nitrate sont fortement liés aux quantités d'eau drainées qui expliquent une part importante de la variabilité intersite observée. La variable de pertes rapportée à 100 mm de lame drainante permet de s'affranchir de l'effet du volume d'eau drainée et permet de faire ressortir quelques sites-sols pour lesquels les pertes sont plus importantes. Au regard des précédents constats concernant la croissance du colza, on remarque que certains sols concernés sont des sols profonds pour lesquels les surplus d'absorption par le colza étaient plus faibles du fait d'une fourniture d'azote déjà importante (ex : sol 02\_1). Les surplus de pertes les plus importants concernent cependant principalement de sols superficiels à faible fourniture d'azote. Ces résultats sont liés au fait que l'indicateur de pertes rapporté à 100 mm d'eau drainée ne permet pas de s'affranchir totalement de l'effet lame drainante : la répartition des précipitations et du drainage influe encore sur cette variable. Il faut toutefois noter que malgré des pertes plus élevées sur certains sols, les valeurs médianes ne dépassent pas 10kgN/ha quel que soit le site. Seuls deux sols-sites présentent un centile 75 supérieur à 10 kgN/ha : le sol 11\_1 dans le Finistère et le sol 21\_1 dans le Pas-de-Calais du fait d'une lame drainante relativement importante. Les résultats de la phase 2 ont confirmé ces éléments.

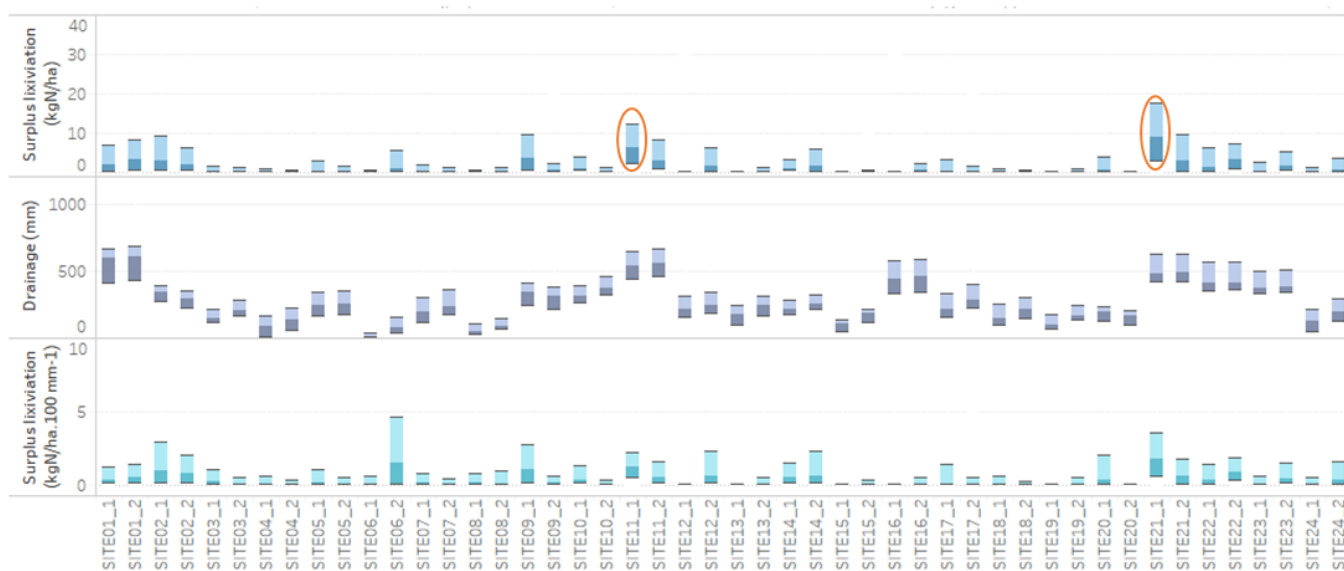


Figure 46 : Drainage et surplus de lixiviation supplémentaire en automne-hiver par rapport au témoin pour l'ensemble des sites-sols simulés (borne inférieure : centile 25/borne centrale : médiane /borne supérieure : centile75).

Concernant la volatilisation, l'effet des apports sur ce type de pertes est très variable d'un sol à un autre. La valeur de pH du sol impacte en effet fortement sur les niveaux de volatilisation ce qui est confirmé par les références existantes (*com. pers. Sophie Genermont*). Tous les sols à  $\text{pH} \geq 8$  sont caractérisés par des pertes médianes suite à un apport de 8-9 kgN/ha mais ces pertes peuvent s'approcher de 20 kgN perdus pour certaines combinaisons pédoclimat x pratiques.

Pour les engrais minéraux, les résultats obtenus pour les pertes par volatilisation ont été comparés aux facteurs d'émissions de référence issus de EMEP mais aussi de l'outil CADASTRE\_NH3 (Ramanantenasoa et al. 2018). Les valeurs médianes des sorties simulées correspondent à des facteurs d'émissions de 0.05 et 0.12 kgNH<sub>3</sub>.kg<sup>-1</sup>N appliqués respectivement pour des apports en surface d'ammonitrate et de solution azotée. Ces valeurs sont en accord avec les références de facteurs

d'émissions : entre 0.037 et 0.040 pour l'ammonitrate et entre 0.125 et 0.143 pour la solution azotée selon l'évaluation EMEP ou CADASTRE\_NH3.

Les éléments qui suivent reprennent l'analyse, faite en phase 2, de l'effet de différents facteurs sur les pertes azotées, qu'il s'agisse de pertes par lixiviation ou par volatilisation. La date de semis la plus tardive testée a lieu en fin de fenêtre de recommandation. Les résultats de phase 2 ne reprennent pas les scénarios d'apport de 30 uN de fertilisant minéral en janvier, du fait d'un effet tardif sur l'absorption du colza, mais il faut noter que les pertes induites par ces apports se sont avérées faibles qu'il s'agisse de lixiviation ou de volatilisation.

#### **Effet d'une pluviométrie en août limitant les retards de levée (annexe 6.5) :**

La comparaison des pertes pour un cumul de pluie inférieur ou supérieur à 20 mm en août fait ressortir des écarts importants des pertes par lixiviation sur la quasi-totalité des sites en particulier sur les sols superficiels (dont les sols nouvellement intégrés à l'échantillon). De manière générale, pour les scénarios avec une pluviométrie de plus de 20 mm, les valeurs des centiles 75 nous renseignent sur un risque moindre dans ces situations pour les pertes par lixiviation :

- Des surplus de pertes ramenées à 100 mm d'eau drainée inférieurs à 5 kgN sur la grande majorité des sites-sols (sauf sites-sols 07\_3, 14\_2 et 23\_2 déjà identifiés auparavant)
- Des pertes totales pour 100 mm d'eau drainée de moins de 20 kgN/ha pour 100 mm (et des médianes de moins de 10 kgN/ha pour 100 mm)

Ces résultats convergent avec le constat d'une meilleure absorption de l'azote apporté simulé pour ces mêmes scénarios. A nouveau, il faut rappeler que dans les pratiques réelles, des retards de levée en cas de faible pluviométrie auraient pu être évités en adaptant les pratiques selon les conditions et les sols. Ce sont donc soit des conditions de pluviométrie favorables soit une pratique adaptée permettant le maintien d'une humidité suffisante qui, en évitant les retards de levée, génèrent de faibles pertes par lixiviation en hiver.

Concernant la volatilisation, bien que l'effet soit moins important, on constate généralement une baisse du risque de volatilisation (analysée au travers de la diminution des valeurs de centile 75) en particulier sur les sites à pH supérieurs à 8. Le levier sur la volatilisation reste cependant limité.

#### **Effet d'un semis précoce (annexe 6.6) :**

*Remarque : pour la suite de l'analyse les scénarios avec faibles cumuls de pluie en août ont été retirés afin de se focaliser sur d'autres facteurs*

En cas de semis précoce (avant le 25/08 ici), les pertes par lixiviation s'avèrent être fortement réduites, un résultat qui converge à nouveau avec le constat d'une meilleure absorption de l'azote apporté simulé pour ces mêmes scénarios. Pour le site 14\_2 dans l'Yonne les pertes médianes peuvent être abaissées jusqu'à 10 kgN par rapport à un semis médian (deuxième quinzaine d'août) voire 25 kgN par rapport à un semis tardif (fin août-début septembre). Certains sites-sols présentent cependant de faibles écarts entre semis précoces et médians comme les sites-sols 07\_3, 17\_3 et 18\_5 (sols superficiels). Dans toutes les situations pédoclimatiques testées, les valeurs des centiles 75 pour des pertes totales ramenées à 100 mm ne dépassent pas 6 kgN/ha pour 100 mm.

Concernant la volatilisation, bien que l'effet soit moins important, on constate généralement une baisse du risque de volatilisation (analysée au travers de la diminution des valeurs de centile 75) en particulier sur les sites à pH supérieur à 8. Le levier sur la volatilisation reste cependant limité. Il faudrait de plus distinguer les cas d'apport au semis et en végétation.

### Effet d'un apport en profondeur pour le fertilisant de classe 8 (annexe 6.7)

L'analyse n'est faite que sur la classe 8 car cette modalité n'a été testée que sur cette classe. Le fait d'apporter en profondeur l'engrais a des effets bien souvent antagonistes sur les pertes par volatilisation et par lixiviation. Les quantités volatilisées simulées sont majoritairement annulées en cas d'apport en profondeur sauf pour les sols à  $\text{pH} > 7.5$  pour lesquels une diminution de quelques  $\text{kgN}$  est tout de même constatée. Concernant la lixiviation, l'apport en profondeur a tendance à augmenter les quantités lixiviées (jusqu'à  $5 \text{ kgN/ha}$  supplémentaires pour les valeurs médianes) du fait d'une augmentation du reliquat entrée d'hiver. L'azote non volatilisé n'a donc pas été entièrement valorisé par le colza.

Comme le montre la figure 47, si l'on somme les pertes par lixiviation et par volatilisation, le fait de ne pas laisser le fertilisant azoté en surface diminue la valeur médiane des pertes sur chaque site-sol (jusqu'à  $10 \text{ kgN/ha}$ ) sauf sur les sols superficiels à risque de drainage important (comme les sites superficiels des sites de Vendée, de l'Yonne, de la Côte-d'Or, de Lorraine). Pour ces derniers, si le colza n'a pas capté l'azote minéral qui n'a pas été perdu par volatilisation l'augmentation du reliquat entrée induit un risque important de pertes par lixiviation.

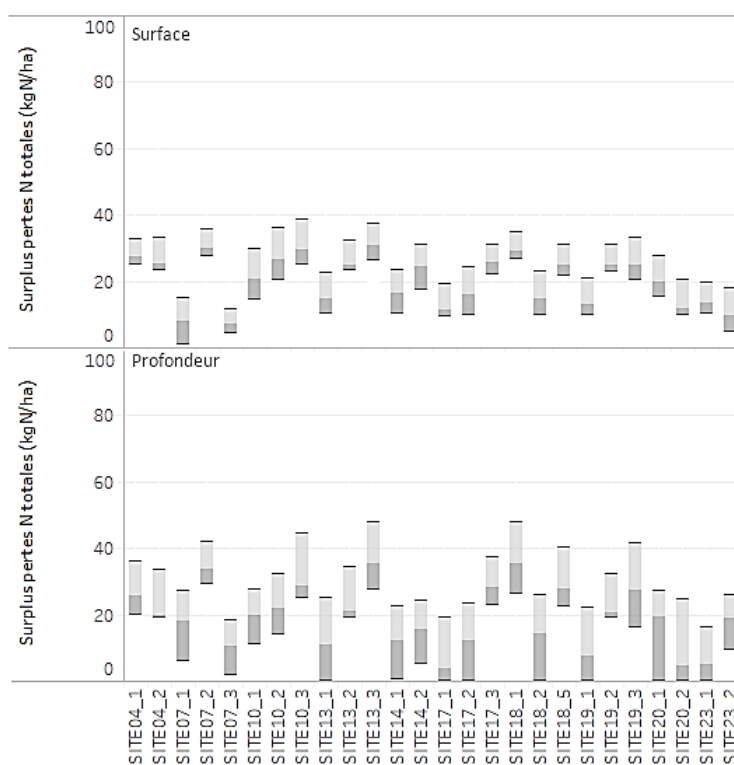


Figure 47 : Cumul d'azote perdu par lixiviation et par volatilisation pendant l'automne et l'hiver jusqu'au 15/03 suite à un apport de classe 8 en surface ou enfoui (borne inférieure : centile 25/borne centrale : médiane /borne supérieure : centile 75)

### Effet des pratiques de fertilisation identifiées comme favorables sur quelques sites-sols sélectionnés (annexes 6.8 et 6.9) :

L'effet des pratiques de fertilisation sur les pertes azotées a été analysé au travers de deux sites-sols qui se distinguent entre autres par la quantité d'azote qu'ils fournissent mais caractérisés par un climat similaire : les sols 10\_2 et 10\_3.



L'analyse des pertes détaillée en annexes 6.7 et 6.8 met en avant certaines pratiques plus à risque vis-à-vis des pertes azotées ou au contraire favorables à la limitation de ces pertes :

- Bien que les surplus restent de l'ordre de quelques kg d'azote, les apports de 60 uN non fractionnés au semis augmentent les pertes azotées soit par volatilisation pour des apports en surface soit par lixiviation pour des apports en profondeur. Le fractionnement avec une part de l'apport en végétation permet de limiter les pertes même si elles restent supérieures à celles des scénarios avec un apport unique de 30 uN. En cas de semis tardif, les apports de 60 uN fractionnés ou non peuvent générer des surplus de pertes globales (i.e. prenant en compte à la fois la volatilisation et la lixiviation) pouvant aller jusqu'à un tiers de l'azote apporté, tout comme lorsqu'ils sont épandus sur des sols à plus forte minéralisation (ex : site 10\_2).
- Dans le cas des apports de 30 uN, l'épandage en végétation favorise une limitation des pertes globales.
- Les apports en surface de fertilisants organiques de classe 6 génèrent des pertes plus importantes que pour les engrais minéraux simulés. Les apports en profondeur n'ont en revanche pas été testés dans l'étude. Les pertes sont essentiellement dues à une forte volatilisation. Sur les deux sites, ces pertes sont de l'ordre de 15 kgN/ha soit 25 % de l'azote apporté quand le fertilisant est apporté au semis mais pour des sols non basiques (pH<8), le risque de volatilisation pour des apports à la mi-octobre.

Remarque : les apports de 30 uN d'engrais minéral en janvier ne sont pas présentés sur ces graphiques mais génèrent des pertes par lixiviation négligeables et une volatilisation semblable à celle observée mi-octobre. Toutefois ces apports ne permettent pas de rendre le colza plus robuste dès l'automne.

#### **Analyse approfondie des dynamiques sur quelques sites**

Les dynamiques de la biomasse et des flux d'azote ont été examinées de manière approfondie sur deux sites-sols de l'échantillon. Ces sols ont été choisis afin d'analyser deux situations de croissance du colza relativement contrastées du fait de la variabilité de la fourniture d'azote par le sol : les sols 19\_2 dans le Loiret et 10\_2 dans l'Yonne ont été sélectionnés à partir des quartiles des surplus d'azote absorbé sur chaque site-sol. Ces deux sols se trouvent en outre dans des régions où le colza est fortement cultivé. Le sol 19\_2 (1<sup>er</sup> quartile ou centile 25) est un sol de 90 cm de profondeur et présentant une minéralisation à l'automne-hiver relativement importante par rapport aux autres sols de l'échantillon. Le sol 10\_2 (3<sup>ème</sup> quartile ou centile 75) est de même profondeur mais avec une plus faible fourniture d'azote.

L'analyse s'est focalisée sur les scénarios avec semis les plus précoces et reliquats initiaux faibles. Seuls des apports d'ammonitrate avant la fin d'année sont traités. Les résultats sur deux années (1998 et 2006) sont présentés dans les figures ci-dessous.

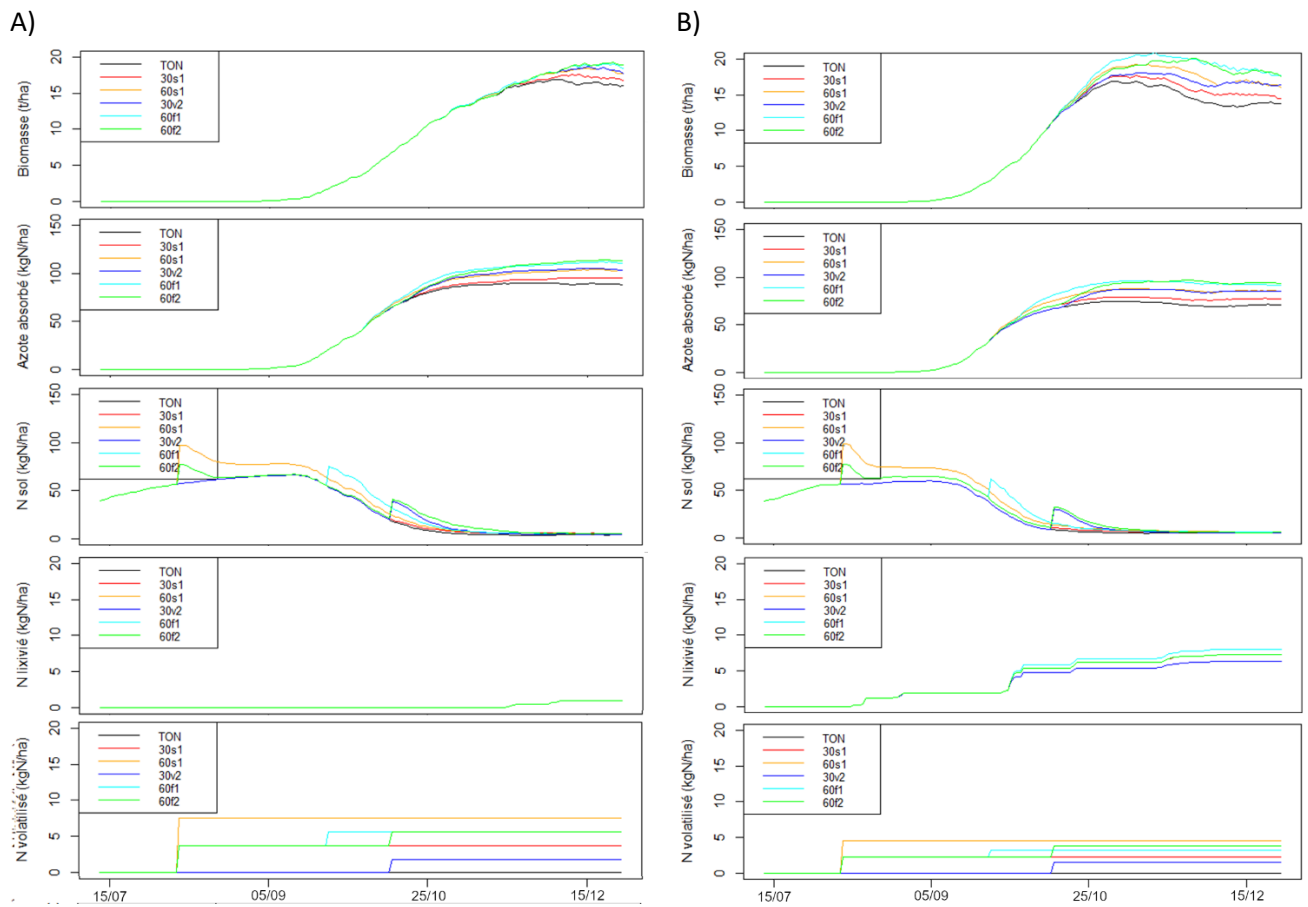


Figure 48 : Dynamiques d'accumulation de biomasse et flux d'azote dans les différents compartiments en 2006 pour le site 19\_2 (A) et 10\_2 (B)

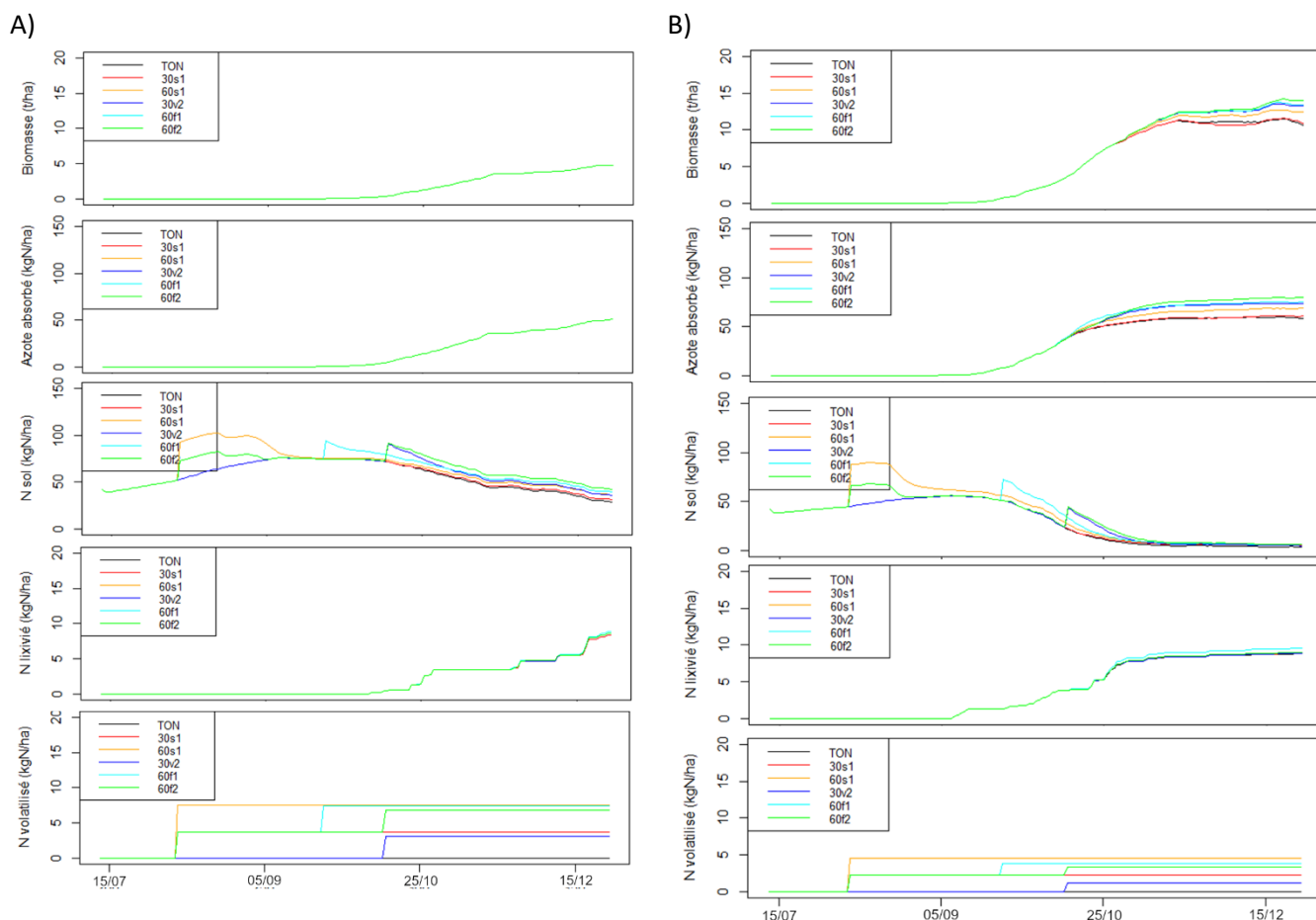


Figure 49 : Dynamiques d'accumulation de biomasse et flux d'azote dans les différents compartiments en 1998 pour le site 19\_2 (A) et 10\_2 (B)

Les conclusions suivantes ressortent de ces scénarios analysés de manière plus approfondie :

- Sur le sol de l'Yonne, les surplus de biomasse et d'azote absorbé apparaissent plus vite que dans le Loiret du fait d'une courbe de diminution de l'azote du sol plus infléchiée après semis du colza, pour laquelle les apports d'engrais minéraux permettent de pallier un manque plus rapide d'azote pour le colza. Comme le montre la figure 49 A, le sol du Loiret conserve certaines années un niveau d'azote disponible pour le colza important à relier avec son potentiel plus important de minéralisation. Dans ces cas-là, les surplus de biomasse sont alors nuls.
- Malgré des moindres surplus d'absorption, les quantités d'azote minéral dans le sol en entrée d'hiver sur le site 19\_2 (Loiret) sont faibles, les niveaux d'absorption cumulés en hiver restant comparables à ceux de l'autre site. Les faibles pertes par lixiviation qui en découlent, quelle que soit la pratique de fertilisation, sont accentuées par un drainage plus tardif que dans l'Yonne. En effet, sur ce dernier site bourguignon, le drainage commence alors que l'azote du sol n'a encore été que peu capté par le colza. Cependant les écarts de pertes avec le témoin restent faibles.
- On constate les mêmes dynamiques de pertes par volatilisation sur les deux sites avec des émissions essentiellement dans les 1ers jours suivant l'apport. Les pertes sont plus importantes sur le site 19\_2 du fait d'un pH plus élevé.
- Concernant les différentes pratiques de fertilisation testées, les constats sont proches sur les deux sites. Dans le cas d'un apport au semis, le colza atteint un plateau de croissance ou d'absorption à peu près en même temps que le témoin mais ce plateau est plus élevé et la

sénescence légèrement limitée. Un apport de 30 uN en végétation augmente également le niveau du plateau et semble permettre dans les exemples traités de retarder l'inflexion de la courbe, avec une croissance qui continue ou qui est relancée lors de l'apport. Cet effet est d'autant plus visible dans le cas d'un apport de 60 uN fractionné, bien qu'il puisse augmenter légèrement les pertes par rapport au témoin (de l'ordre de 2 kgN dans les exemples)

- Ces conclusions confortent les observations faites dans les essais de Terres Inovia. Toutefois contrairement à ce qui a été observé au champ, aucun écart de croissance entre modalités en début de végétation (entre mi-septembre et mi-octobre) n'est observé dans les simulations.

### Analyse de la portance des sols

La possibilité d'accéder au champ sans risque de tassement a été analysée au travers d'une comparaison entre l'humidité du jour sur les horizons 0-10 et 0-30 cm et des seuils d'humidité critique pour deux niveaux de contraintes (100 et 140 kPa) correspondant aux contraintes pouvant être exercées par les engins de fertilisation.

Les résultats ont été analysés en comptabilisant le nombre de jours par quinzaine non disponibles pour intervention du fait d'une faible portance. Pour des contraintes de 100 kPa, on constate qu'il ne semble pas y avoir de limite d'accès à la parcelle même en hiver sur la majorité des sites-sols étudiés en phase pour des parcelles cultivées avec du colza. En revanche sur certains sites-sols, tous caractérisés par des fortes teneurs en argile (>35%), l'accès à la parcelle peut être plus compliqué. La figure 50 présente la part de jours non disponibles par quinzaine pour quelques-uns de ces sols argileux répartis sur la France au travers des valeurs médianes et des centiles 25 et 75.

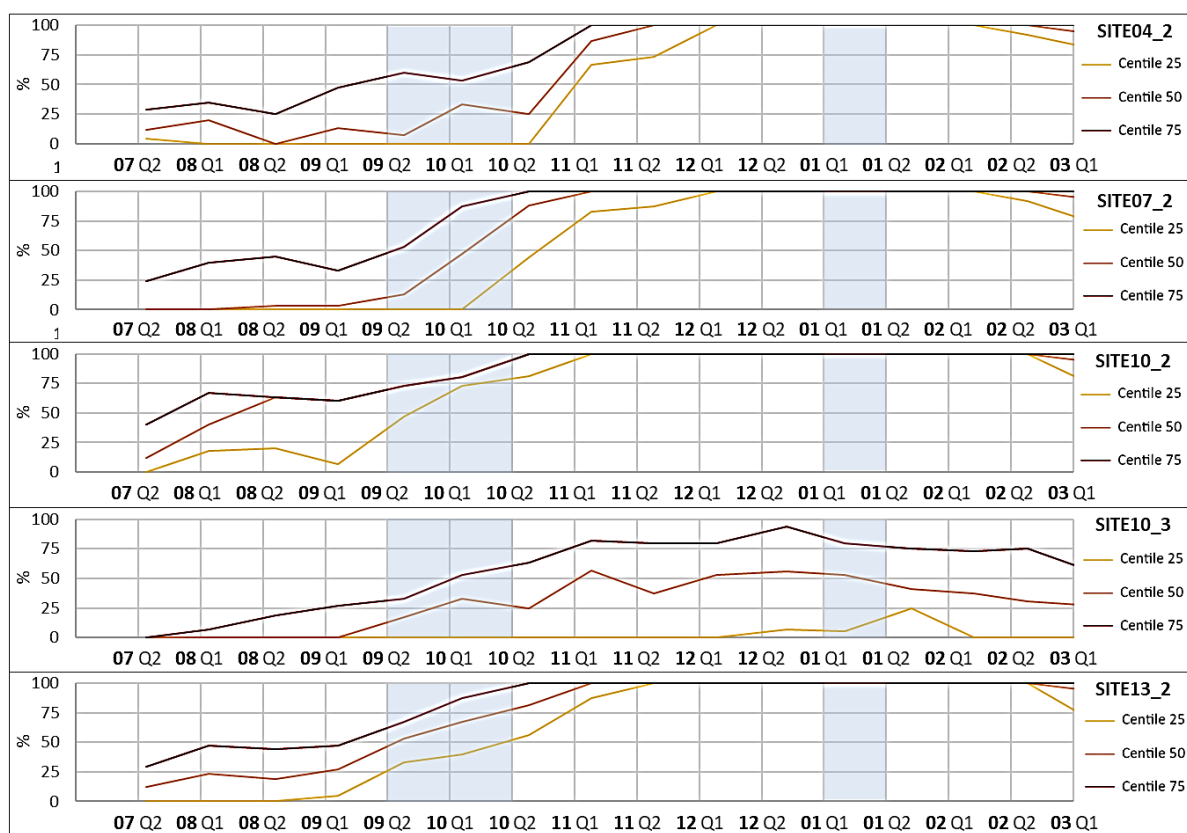


Figure 50 : Part de jours non disponibles par quinzaine en cas de contrainte exercée sur le sol de 100kPa – Focus sur quelques sols argileux

Les encadrés bleus correspondent aux périodes d'apport testées.

De manière générale sur ces sols argileux, environ une simulation sur deux présente un risque d'avoir plus de 50% des jours non disponibles sur ces sites en octobre et la parcelle est quasiment systématiquement impraticable en janvier. Ce risque est toutefois réduit pour des sites à plus faible pluviométrie (par exemple sol 04\_2 en Haute-Garonne) et des sols à teneurs importantes en éléments grossiers (par exemple le site 10\_3). En effet, les éléments grossiers favorisent la portance du sol, l'aération du sol, les capacités d'infiltration. Sur ces sites-sols, autour d'une année sur quatre présente moins de 50% de jours disponibles en octobre.

En cas de contraintes exercées plus fortes (140 kPa), ce qui peut être le cas pour certains engins d'épandage, la fenêtre de jours disponibles devient alors très limitée sur ces sols argileux pour les périodes d'apport en végétation les plus tardifs envisagés dans l'étude (octobre et janvier). La disponibilité sur les sols moins argileux est, pour ces niveaux de contraintes, également impactée bien qu'elle laisse tout de même une marge d'intervention à l'automne comme en témoignent les exemples illustrés sur la figure 51.

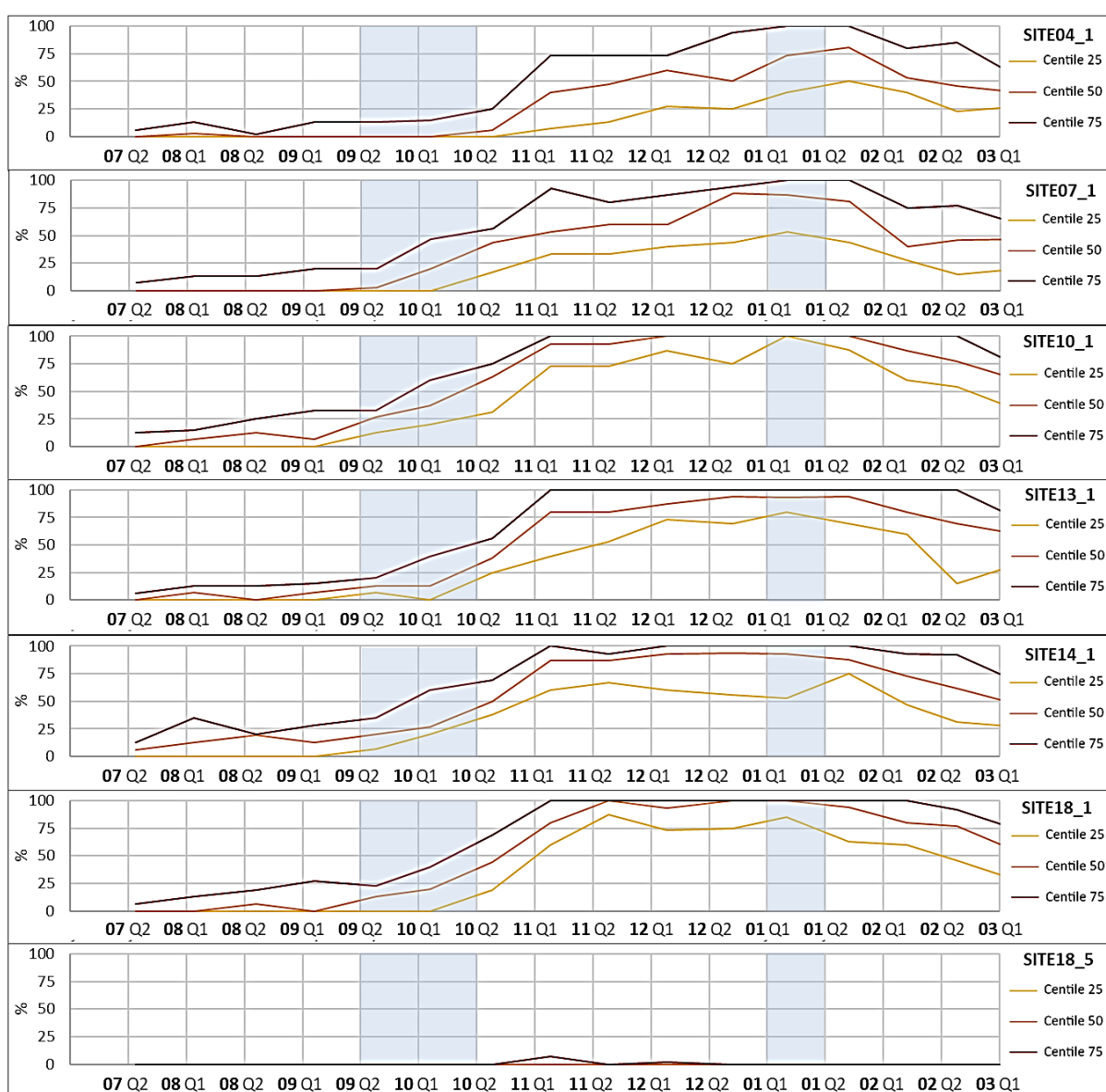


Figure 51 : Part de jours non disponibles par quinzaine en cas de contrainte exercée sur le sol de 140kPa – Focus sur quelques sols à teneur en argile inférieure à 35%.

En janvier, on constate plus de la moitié des simulations sur ces sols avec moins de 25% de jours disponibles sauf sur des sites avec une forte teneur en éléments grossiers comme c'est le cas du site-sol 18\_5.

### 3.6.2.3 Conclusions et discussions

Le jeu de simulations traité ici concerne la fertilisation minérale modérée (30 - 60 uN) à l'automne sur colza afin d'obtenir des colzas plus robustes dès l'hiver et limiter le risque lié aux ravageurs. Il a de plus été complété en 2<sup>ème</sup> phase de l'étude par des scénarios d'apport en végétation de fertilisant organique de classe 6 (à forte teneur en azote ammoniacal). Les limites identifiées dans les simulations de la phase 1 de l'étude (i.e. humidités initiales du sol surestimées, sols non représentatifs des sols majoritaires sous colza, dates de semis trop tardives) ont en outre fait l'objet d'adaptation du plan de simulation en deuxième phase. Les dates d'apport testées se trouvent en partie dans la période actuelle d'interdiction d'épandage des fertilisants de type III. L'analyse des simulations pour cette situation a montré que les apports d'automne peuvent augmenter la biomasse de la culture sans augmenter le risque de pertes azotées dans certaines conditions. Les points suivants synthétisent les constats faits pendant les deux phases de l'étude sur cette situation :

- Les **semis précoces** (ici semés avant la fin du mois d'août) permettent souvent d'assurer une meilleure valorisation du fertilisant apporté à l'automne. Dans le cas de semis réalisés après la période de recommandation, la fertilisation n'alimente pas ou peu la croissance de la culture à l'automne et en hiver. L'étude précédente (ACTA-ARTELIA 2012), avait également conclu pour des situations de fertilisation organique à l'automne à l'importance de semer tôt pour optimiser l'absorption et limiter le risque environnemental.
- De manière plus générale, **un retard de la levée limite la bonne valorisation de l'azote apporté** pour l'ensemble des pratiques de fertilisation testées. Dans les simulations, une faible pluviométrie sur le mois d'août (moins de 20 mm), générant des faibles niveaux d'humidité dans les premiers horizons de sols autour de la période de semis, a un impact fort sur les retards de levée. Cependant les simulations réalisées ne prennent pas en compte l'adaptation des pratiques selon les conditions climatiques et le type de sol observée dans la réalité et qui peut permettre de préserver l'humidité du sol malgré une faible pluviométrie. Il faut donc plutôt considérer ce facteur de pluviométrie comme un facteur de risque pour la levée qui peut toutefois être compensé par des bonnes pratiques. Un indicateur plus réaliste serait alors **l'humidité des premiers horizons dans les jours qui suivent le semis**.
- La disponibilité de l'azote liée soit au reliquat laissé par la culture précédente soit à la fourniture d'azote par le sol joue fortement sur les contributions de ces apports d'engrais au maintien de la croissance dynamique de la culture. Dans le cas de reliquats post-récolte plus élevés (ici 90 kgN/ha pour 90 cm de sol) et de sols profonds présentant une minéralisation répondant aux besoins du colza, le risque que les surplus de biomasse produits soient négligeables est important. En revanche, pour des **reliquats plus faibles** (ici 45 kgN/ha pour 90 cm de sol) et sur **des sols superficiels ou à faible minéralisation**, le colza produit plus de biomasse supplémentaire en automne et en hiver en cas de fertilisation. Dans notre échantillon, les sols qui minéralisaient peu étaient essentiellement caractérisés par une faible profondeur ou un pH acide.
- Certaines pratiques de fertilisation sont identifiées comme favorables de manière générale à une bonne valorisation de l'azote apporté :
  - o Une **fertilisation en végétation** y compris pour les fertilisants organiques de classe 6 bien que pour ces derniers le CAU demeure plus faible que les fertilisants minéraux mais peut dans ces conditions atteindre 50% ou plus. L'apport en végétation permet l'augmentation des niveaux de biomasse accumulée mais surtout retarde l'atteinte du

plateau de croissance. Plus l'apport est tardif à l'automne (ici 15/10) plus cette tendance est observée.

**L'apport en profondeur et en végétation d'engrais minéraux est à privilégier sur les sols basiques.**

- Un **apport au semis** (apport unique ou fractionné) s'il est effectué **en profondeur** (enfouissement immédiat ou injection).
- Un apport à adapter en fonction des stocks initiaux d'azote dans le sol du fait d'un constat fréquent de fertilisation plus favorable en cas de reliquats post-récolte plus faibles (ici de l'ordre de 45 kgN/ha) en particulier sur des sols qui fournissent déjà des quantités conséquentes d'azote.
- L'analyse des pertes azotées par lixiviation ou par volatilisation confirme que ces pratiques favorables à une bonne valorisation du fertilisant limitent également les pertes. Il faut par ailleurs noter que les pertes par lixiviation demeurent très modérées sur une grande majorité des scénarios simulés pour cette situation. Concernant la volatilisation, des apports en surface en particulier sur sols basiques peuvent toutefois provoquer des pertes importantes relativement à la dose apportée.
- On peut affiner avec l'analyse des pratiques moins favorables ou au contraire favorisant la limitation des pertes azotés :
  - Des **apports de 60 uN** non fractionnés au semis augmentent les pertes azotées soit par volatilisation pour des apports en surface soit par lixiviation pour des apports en profondeur. Le fractionnement avec **une part de l'apport en végétation permet de limiter les pertes** même si elles restent supérieures à celles des scénarios avec un apport unique de 30 uN. En cas de semis tardif, les apports de 60 uN fractionnés ou non peuvent générer des surplus de pertes globales (i.e. prenant en compte à la fois la volatilisation et la lixiviation) pouvant aller jusqu'à un tiers de l'azote apporté, tout comme lorsqu'ils sont épandus sur des sols à plus forte minéralisation.
  - Les **apports en surface de fertilisants organiques de classe 6** génèrent des pertes plus importantes que pour les engrais minéraux simulés. Les pertes sont essentiellement dues à une forte volatilisation pouvant aller jusqu'à 25 % de l'azote apporté sur des sols basiques. Sauf sur ces derniers types de sols, l'apport en végétation permet de limiter la volatilisation. Les apports en profondeur n'ont en revanche pas été testés dans l'étude mais pourraient constituer un levier intéressant pour limiter la volatilisation.
  - Dans le cas où l'apport (qu'il s'agisse d'un apport unique ou d'un apport fractionné) ne peut se faire qu'en surface, l'apport d'ammonitrate permet de limiter les pertes par rapport à la solution azotée du fait d'une moindre volatilisation.
- **Seules des doses de 30 uN et 60 uN ont été testées** : pour des doses plus élevées, il est difficile de tirer ici des conclusions mais l'augmentation de la dose apportée de 30 à 60 uN étant ressortie comme un des facteurs augmentant les pertes, il est vraisemblable que l'augmentation des doses au-delà de 60uN engendre des pertes plus conséquentes.

### 3.7 EPANDAGE DE FERTILISANTS AZOTES MINERAUX AU PRINTEMPS SUR CEREALES D'HIVER

#### 3.7.1 Contexte et objectifs

Les céréales représentent 50% de la SAU (Statistiques agricoles annuelles de 2018). Le blé tendre (près de 5Mha) et l'orge (1,8Mha) sont très majoritairement cultivés dans la moitié nord du pays tandis que le blé dur (350 000 ha) est surtout présent dans le sud, dans une partie du bassin parisien (Sud de la Beauce), en Vendée et Charente-Maritime. Les blés et orges sont majoritairement cultivés en tant que

cultures d'hiver mais les orges de printemps représentent tout de même plus de 500 000 ha de SAU. D'après l'enquête Pratiques culturales de 2011, les céréales à paille reçoivent majoritairement une fertilisation minérale (respectivement 87%, 92% et 86% des surfaces pour le blé tendre, le blé dur et l'orge) bien qu'une tendance à l'augmentation des apports d'engrais organiques soit observée. On constate cependant des disparités selon les régions avec des apports organiques plus fréquents dans les régions d'élevage. L'épandage de produits résiduaux organiques issus d'élevages avant l'implantation de blé est une pratique relativement courante dans ces régions.

Dans le 6<sup>ème</sup> programme d'actions nitrates, les cultures implantées à l'automne ou en fin d'été (autres que le colza) sont soumises aux interdictions d'épandage suivantes dans les zones vulnérables :

- Interdiction du 15 novembre au 15 janvier pour les fertilisants de type I
- Interdiction du 1<sup>er</sup> octobre au 31 janvier pour les fertilisants de type II (sauf dans certaines régions du sud de la France où l'épandage est à nouveau autorisé dès le 15 janvier)
- Interdiction du 1<sup>er</sup> septembre au 31 janvier pour les fertilisants de type III (sauf dans certaines régions du sud de la France où l'épandage est à nouveau autorisé dès le 15 janvier)

Concernant les céréales d'hiver, la précédente étude (ACTA-ARTELIA 2012) avait étudié à la fois l'effet d'un apport d'automne de différents types de produits organiques mais aussi celui des apports minéraux en sortie d'hiver sur les pertes par lixiviation :

- Pour les PRO à l'automne, les résultats de l'étude tendaient à montrer un faible impact du fumier de bovin sur la lixiviation avec toutefois une certaine variabilité selon les conditions climatiques. Les conclusions recommandaient par ailleurs préférentiellement un apport tardif par rapport à un apport de fin d'été. Les impacts sur la lixiviation étaient par contre importants pour les épandages à dose élevée d'azote (200 kgN tot/ha) de fumier de volaille ou pour des apports de lisier de porc.
- Pour l'étude d'impact d'un premier apport d'azote minéral précoce en sortie d'hiver, les résultats obtenus sur les simulations sur blé d'hiver ont montré un impact relativement faible voire presque nul sur la lixiviation d'azote dans les régions peu pluvieuses en hiver mais aussi une très forte variabilité annuelle en particulier sur les sites les plus pluvieux.

Dans le cadre de cette étude, l'objectif était de compléter l'analyse d'impact de la fertilisation minérale de sortie d'hiver et de printemps sur les pertes azotées à la fois par lixiviation et par volatilisation. Les scénarios élaborés s'intéressent d'un côté à l'effet d'un premier apport plus au moins précoce au tallage et de l'autre aux pertes (en particulier par volatilisation) pour des stades plus tardifs selon les conditions pédoclimatiques de la période, la dose et le type d'engrais minéral apporté.

### 3.7.2 Simulations de scénarios d'épandage de fertilisants azotés minéraux au printemps sur céréale d'hiver

#### 3.7.2.1 Plan de simulation et modalités testées

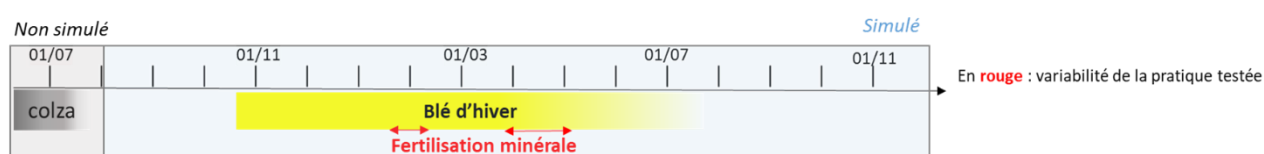
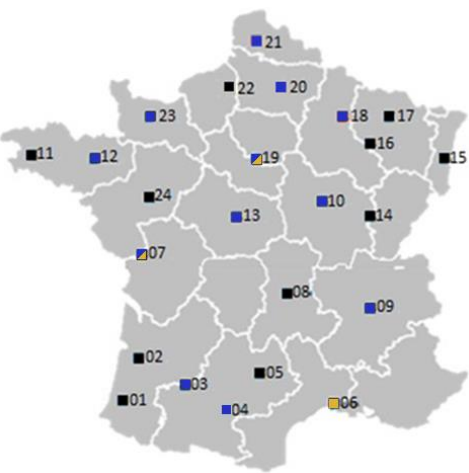


Figure 52: Schéma chronologique de la situation d'apport de fertilisants minéraux sur blé d'hiver



Pour ce plan de simulation, une gamme de conditions pédoclimatiques restreinte par rapport à l'échantillon initial de couples site-sol a été conservée. Sur les 24 sites, 13 ont été retenus selon la surface en blé dur ou tendre du département associé à chacun des sites (statistiques agricoles annuelles 2018) mais aussi dans le but de conserver une certaine variabilité des conditions pédoclimatiques testées. Des scénarios avec blé tendre ont été testés sur 11 sites différents tandis que 3 sites ont été retenus pour la culture du blé dur (voir carte ci-dessous). D'après les enquêtes Pratiques Culturelles de 2011, la fertilisation minérale est majoritairement fractionnée en deux ou trois apports (plutôt trois pour les blés). Ces fractionnements ont donc été repris dans l'élaboration des scénarios. Concernant les doses et les dates d'apport, le plan de simulation ne permet pas de reproduire des pratiques de pilotage de la fertilisation azotée (avec par exemple un réajustement de la dose en cours de campagne) ou un choix d'apport en fonction des prévisions météorologiques (précipitations par exemple). Les apports ont été fixés à des dates données (proches des stades de développement souhaités) et sur une gamme de dose pour chaque date afin d'en analyser l'effet sur les pertes azotées. Les apports de fertilisants azotés minéraux en profondeur n'étant que peu réalistes pour la fertilisation sur blé, seuls des apports en surface ont été simulés ici. Les modalités sont détaillées dans les tableaux 17 et 18. Environ 4000 scénarios sont simulés.

Tableau 17 : Modalités traitées pour la situation d'apport de fertilisants minéraux sur blé d'hiver

	Modalités testées	Détails
Pédoclimat	Années climatiques Sites et sols	<p>20 années climatiques 13 sites (sélectionnés à partir de l'échantillon initial de 24 sites sur les zones présentant des surfaces importantes en blé dur (jaune) ou en blé tendre (bleu) et afin de représenter une certaine variabilité pédoclimatique) 2 sols par site</p>  <p>Remarques :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pour les sites 07 et 19, des scénarios blé tendre et blé dur sont élaborés</li> <li>- Les sites noirs ne sont pas retenus pour cette situation</li> </ul>
Initialisation	Conditions de sols (Nsol et humidité)	<p>Une modalité fixée par site-sol pour caractériser les teneurs en eau et en azote en sortie d'hiver : les valeurs d'initialisations moyennes calculées par sol lors de la précédente étude de 2012 (et issues de l'étude Justes et al, 2012) après récolte d'un colza ont été reprises pour cette situation</p>

Culture	Variété/débouchés	Selon les surfaces cultivées dans le département associé à chaque site, un blé dur ou un blé tendre (parfois les deux) est implanté (voir carte ci-dessus)
Semis	Date de semis	Une modalité retenue : semis au 15/10
Récolte	Date de récolte	Une modalité calculée par le modèle STICS lorsque l'humidité des grains atteint 15%
Fertilisants azotés	Selon la typologie	2 types : <ul style="list-style-type: none"> <li>- Classe 7 (fertilisation minérale à plus faible risque de volatilisation ; ex : ammonitrate)</li> <li>- Classe 8 (fertilisation minérale à plus fort risque de volatilisation ; ex : solution azotée, urée)</li> </ul>
Pratiques d'apport	Quantité, dates, enfoui ou non	Dose et fractionnement : <ul style="list-style-type: none"> <li>- Témoin sans apport</li> <li>- 200 uN fractionnés en 2 apports (voir détails dans le tableau 18)</li> <li>- 200 uN fractionnés en 3 apports en testant une date de 1<sup>er</sup> apport précoce (15/01) ou plus tardive (15/02) et des doses différentes sur les deux premiers apports (voir détails dans le tableau 18)</li> </ul> Apport en surface uniquement

Tableau 18 : Détails des fractionnements testés dans les différents scénarios simulés

Dose totale – fractionnement	Tallage (15/01 ou 15/02)	Épi 1 cm (25/03)	Dernière feuille (01/05)
<b>Témoin</b>	0	0	0
<b>200 uN – 2 apports (im passe au tallage)</b>	0	160 uN	40 uN
<b>200 uN – 3 apports</b>	Précoce 40 uN	120 uN	40 uN
	Tardif 40 uN	120 uN	40 uN
	Précoce 80 uN	80 uN	40 uN
	Tardif 80 uN	80 uN	40 uN

### 3.7.2.2 Résultats de simulation et analyse

#### Croissance et absorption du blé d'hiver

Dans les scénarios simulés, on constate une levée du blé d'hiver entre fin octobre et début novembre. Elle peut s'avérer un peu plus tardive dans certaines situations avec une levée à la mi-novembre pour le site 06 dans le Gard pour l'année 2017. Les dates médianes de récolte simulées par le modèle s'étalent entre mi-juin pour des sites comme le site 06 (Gard) et fin-juillet pour les sites de la moitié nord de la France. Les rendements médians associés varient entre 58 q/ha (pour le blé dur sur le site 06) et 90q/ha par exemple pour du blé tendre en Ile-et-Vilaine (site 12), dans l'Indre (site 13), la Basse-

Normandie (site 23), le Pas-de-Calais (site 21) ou encore le Gers (site 03). Excepté le témoin sans azote, aucun écart significatif de rendement n'est observé d'une pratique de fractionnement à une autre. STICS simule des quantités totales d'azote absorbées par le blé variables d'un site à un autre comme le montre la figure 53 mais également entre les deux sols d'un même site, comme le montre également la Figure 54 au travers du coefficient apparent d'utilisation des engrais azotés apportés sur ces différents site-sols. Les écarts sont cependant plus conséquents pour les scénarios témoins du fait d'une forte variabilité des fournitures d'azote par le sol selon les conditions pédoclimatiques.

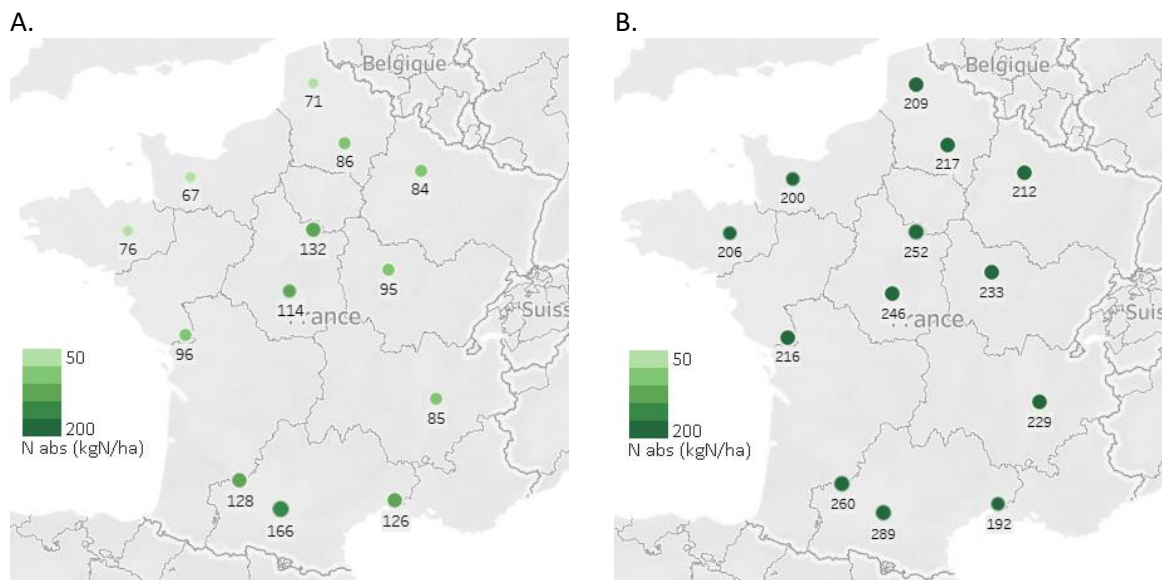


Figure 53 : Quantités médianes d'azote absorbé par le blé d'hiver (kgN/ha) sur la durée de son cycle selon le site pour les scénarios témoins sans azote (A) et pour les scénarios avec apports de fertilisants minéraux (B)

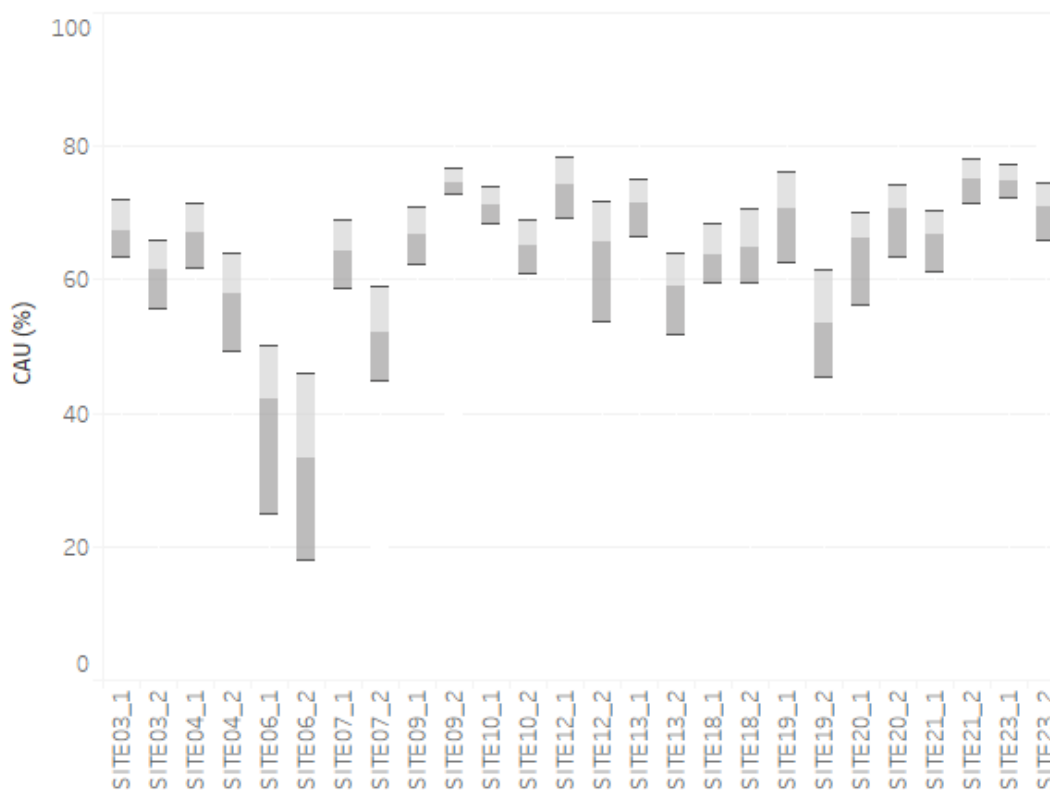


Figure 54 : Coefficient Apparent d'Utilisation des fertilisants azotés minéraux dans le cas des scénarios avec apport (borne inférieure : centile 25/borne centrale : médiane /borne supérieure : centile 75)

### Effet d'un apport minéral plus ou moins précoce au tallage sur les pertes azotées par lixiviation :

Avant d'analyser l'impact des apports de fertilisants en sortie d'hiver, la Figure 55 présente les pertes par lixiviation annuelle dans le cas des scénarios sans azote afin de mettre en avant la forte variabilité selon les sols et les conditions climatiques de la zone.

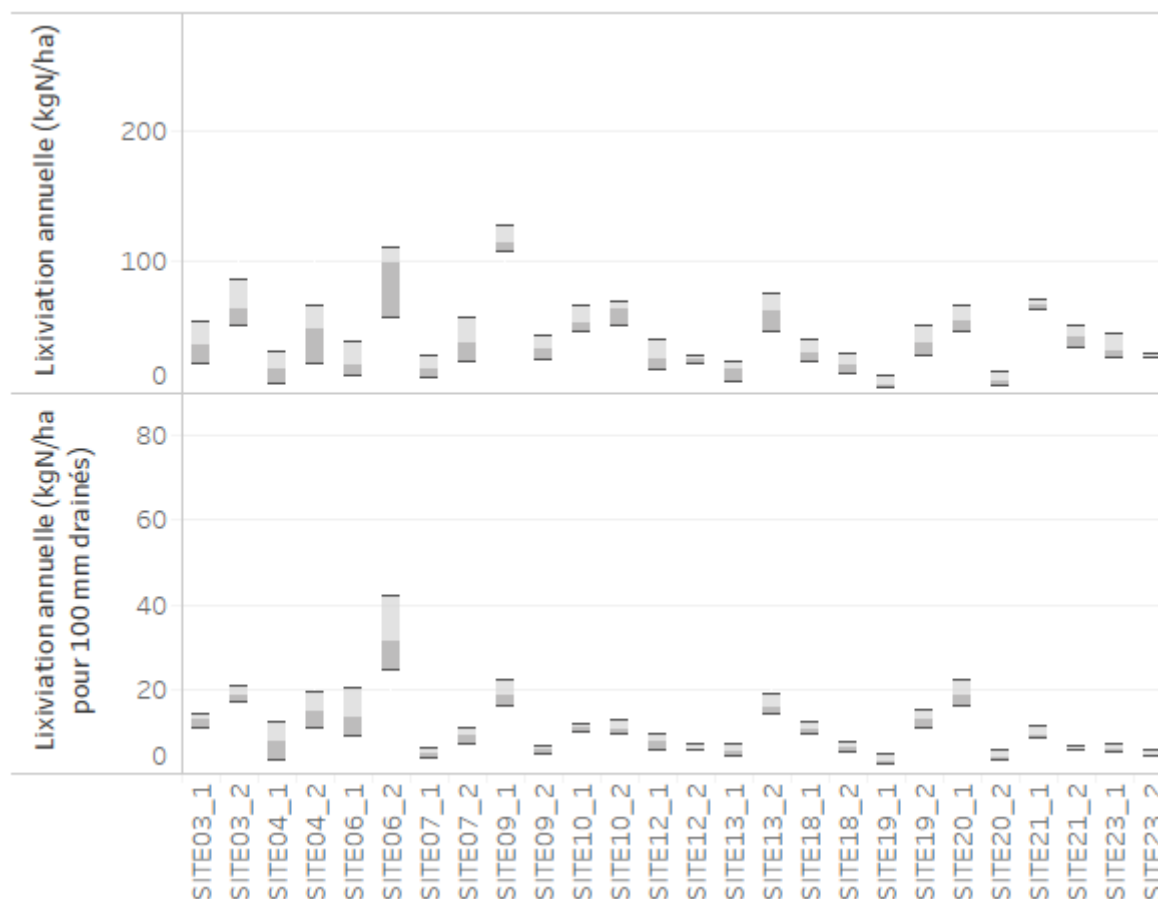


Figure 55 : Pertes annuelles par lixiviation pour les scénarios témoins sans azote (borne inférieure : centile 25/borne centrale : médiane /borne supérieure : centile 75)

En cas d'apport au 15/01 ou au 15/02 d'une dose de 40 ou 80 uN (pour un apport total sur le blé de 200 uN), aucune différence significative de pertes annuelles par lixiviation entre les pratiques de fertilisation testées n'est constatée (y compris à l'échelle d'un site-sol comme le montre la figure en annexe 7.1). Afin d'approfondir l'analyse et étudier les effets court terme de l'apport au tallage, les pertes par lixiviation ont été calculées plus spécifiquement sur la période du 15/01 au 25/03 (avant apport stade épi 1 cm). Comme le montre la figure 56, présentant les surplus de pertes par lixiviation sur cette période par rapport aux scénarios sans apport au tallage, les pertes supplémentaires sont négligeables dans la majorité des scénarios simulés. Les valeurs médianes sont en effet nulles et les centiles 75 inférieures à 1 kgN/ha pour l'ensemble des pratiques testées. En revanche, certaines conditions moins fréquentes semblent provoquer des pertes bien plus importantes pouvant aller jusqu'à 40 kgN/ha perdus (Figure 56 figure bas). L'effet de ces conditions extrêmes est de plus amplifié en cas d'apport de produit de classe 7 (en lien avec des pertes de volatilisation plus faibles : voir plus bas) et d'apport plus précoce, probablement lié à une occurrence plus importante des conditions les plus défavorables à une limitation des pertes.

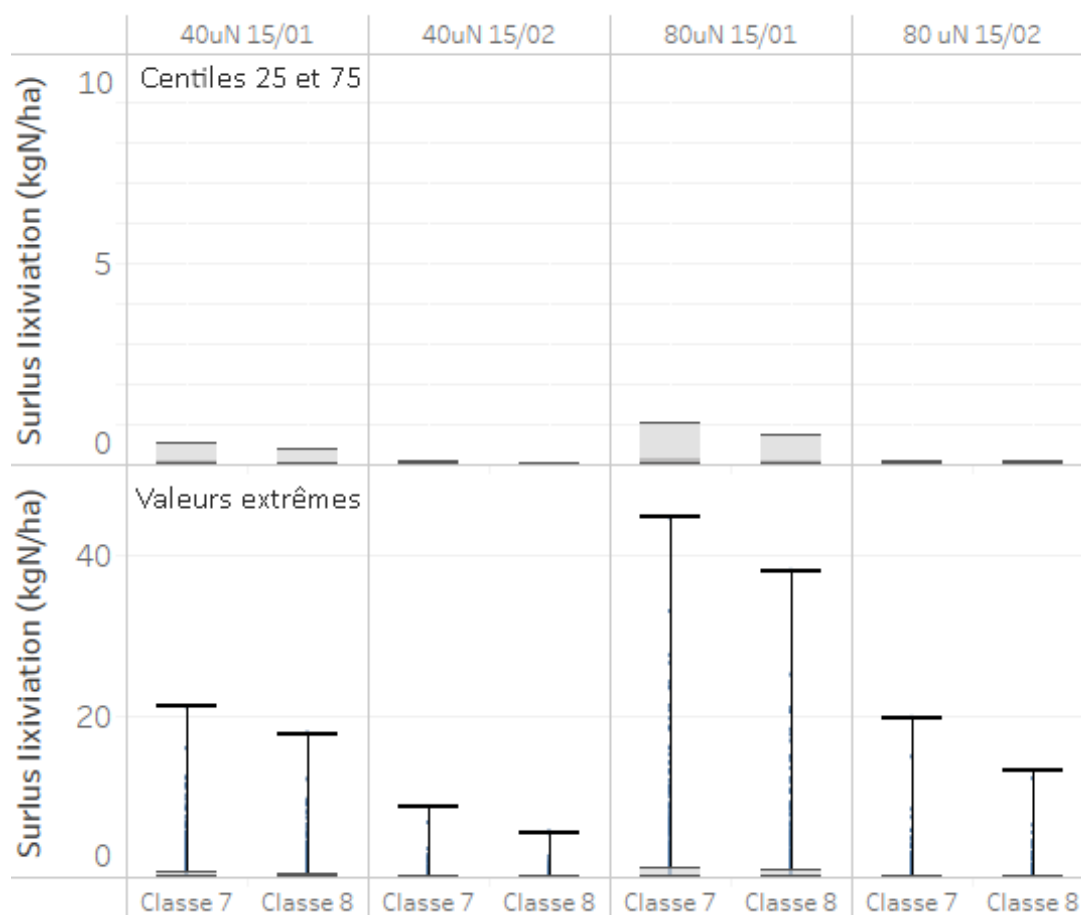


Figure 56 : Surplus de pertes par lixiviation entre le 15/01 et le 15/03 par rapport au témoin sans apport selon les pratiques de fertilisation au tallage (en haut : borne inférieure : centile 25/borne centrale : médiane /borne supérieure : centile 75 ; en bas : valeurs extrêmes)

Afin d'identifier les caractéristiques pédoclimatiques expliquant ces pertes extrêmes, les scénarios avec apport de 80 uN d'un fertilisant de classe 7 au 15/01 ont été étudiés de manière plus approfondie (car présentant la variabilité la plus importante) en analysant également différentes variables sur la période considérée :

- Les conditions d'humidité du sol à la date de l'apport au travers du taux de remplissage de la réserve utile (=1 si remplie)
- Les précipitations dans les 15 jours suivant l'apport
- L'absorption de la plante dans les 15 jours suivant l'apport
- Le reliquat d'azote minéral dans le sol juste avant apport

Remarque : les variables météorologiques ont été étudiées sur 15 jours afin de s'interroger sur la possibilité d'adapter l'apport pour limiter les risques de pertes par lixiviation en estimant les prévisions météorologiques (et en particulier les précipitations) sur les 15 jours à venir.

Les résultats de cette analyse détaillés dans le tableau ci-dessous et dans l'annexe 7.2 permettent d'identifier des conditions pédoclimatiques expliquant des surplus de pertes plus conséquents dans certains cas : il s'agit de sols présentant initialement de faibles reliquats d'azote dans le sol (de l'ordre de 20kgN dans l'échantillon de sols testés) pour lesquels l'apport d'engrais augmente fortement le pool d'azote potentiellement lessivable. Dans le cas où le taux de remplissage de la RU est déjà maximal lors de l'apport et qu'un cumul de pluie important a lieu dans les 15 jours suivant l'apport

(plus de 50 mm dans les simulations), on constate une augmentation importante des pertes suite à cet apport. Pour des sols avec des reliquats plus importants à la mi-janvier les pertes par lixiviation risquent de s'avérer importantes même en l'absence d'apport si de telles conditions d'humidité et de pluviométrie sont constatées. Seuls les sols peu drainants sur des sites ne présentant pas de périodes de précipitations extrêmes dans les 15 jours suivant l'apport conservent de faibles pertes sur l'ensemble des simulations.

Il faut en revanche noter la **faible absorption par le blé d'hiver pendant la deuxième moitié de janvier sur la majorité des sites sauf ceux du Gers, du Gard et de Vendée** pour lesquels on constate en valeur médiane de 5 à 30kgN/ha absorbés en 15 jours. Sur les autres sites, un apport au 15/01 ne semble pas en adéquation avec la reprise de croissance de la culture. Pour des apports à la mi-février, on constate une reprise de l'absorption sur l'ensemble des sites.

Tableau 19 : Analyse des conditions pédoclimatiques à risque en cas de fertilisation au 15/01

	Exemples	Analyse
Conditions pédoclimatiques à risque de lixiviation important sur la période du 15/01 au 25/03	Sites-sols 03_1 et 2 (Gers) Sites-sols 10_1 et 2 (Yonne) Site-sol 13_2 (Indre) Site-sol 23_1 (Basse-Normandie)	Ces combinaisons sites-sols présentent des pertes déjà importantes sur cette période même en l'absence de fertilisation avec des pertes médianes de plus de 20kgN/ha. Les surplus de pertes liés à un apport sont en revanche faibles. Dans l'échantillon de sols de l'étude, il s'agit principalement de sols présentant des reliquats d'azote minéral dans le sol avant apport élevés et un risque de drainage important du fait d'un taux de remplissage de 100% de la réserve utile et d'un risque de précipitations plus important que sur d'autres sites. Les analyses détaillées ont montré que pour des cumuls de précipitations de plus de 50 mm sur les 15 jours les pertes par lixiviation entre le 15/01 au 25/03 dépassent fréquemment 50kgN/ha y compris en absence d'apport.
Conditions pédoclimatiques à risque modéré de lixiviation sur la période du 15/01 au 25/03 mais dont les pratiques de fertilisation augmentent le risque	Site 09_1 (Isère) Site 12_2 (Ille-et-Vilaine) Site 21_1 (Marne) Site 23_2 (Basse-Normandie)	Pour ces combinaisons sites-sols, les pertes totales par lixiviation restent modérées mais des surplus de pertes importants suite à un apport peuvent survenir dans certaines conditions extrêmes (par exemple jusqu'à 45 kgN/ha supplémentaires perdus sur le site 01_1). Dans l'échantillon de sols de l'étude, ces forts surplus sont constatés pour des sols superficiels (60 cm) à faible réserve utile (<100mm) et présentant des reliquats d'azote minéral dans le sol avant apport faibles (de l'ordre de 20kgN). L'absorption d'azote par le blé dans les 15 jours qui suivent l'apport sur ces sites reste très faible. Pour des années où la réserve utile est remplie au 15/01 et plus de 50 mm de pluies cumulées surviennent dans les 15 jours suivant l'apport, l'eau drainée risque d'emporter les quantités d'azote apportées. Dans ces situations on dépasse bien souvent 10 kgN/ha supplémentaires perdus dans les simulations
Conditions pédoclimatiques à risque faible de lixiviation sur la période du 15/01 au 25/03 y compris en cas d'apport	Site-sol 06_1 (Gard) Site-sol 13_1 (Indre) Site-sol 19_1 (Loiret) Site-sol 20_2 (Marne)	Pour ces combinaisons sites-sols, les pertes totales par lixiviation les plus extrêmes ne dépassent pas 20 kgN/ha avec des valeurs médianes de moins de 5kgN/ha. Les surplus de pertes liés à un apport au 15/01 sont de plus négligeables quelles que soient les conditions climatiques de l'année. Il s'agit essentiellement de <b>sols peu drainants et profonds</b> situés sur des <b>sites à faible pluviométrie sur la deuxième quinzaine de janvier</b> . Sur ces sites, le cumul de pluie médian sur 15 jours est inférieur à 15 mm et les valeurs les plus extrêmes ne dépassent pas 70 mm, sauf sur le site du Gard. Cependant sur ce site la réserve utile du sol n'est fréquemment pas remplie au 15/01 contrairement aux autres sites.

### Effet des pratiques de fertilisation sur les pertes azotées par volatilisation :

A l'échelle de tous les sites et de toutes les années confondus, les pertes par volatilisation présentent des différences significatives selon le choix du type de fertilisant azoté minéral dans les simulations. Dans le cas d'un apport de classe 7 (un produit à plus faible risque de volatilisation du faible de sa plus faible proportion d'azote ammoniacal ou uréique comme par exemple de l'ammonitrate), les pertes médianes varient entre 8 et 9 kgN/ha selon le choix du fractionnement, soit des pertes de l'ordre de 4% de l'azote apporté (Figure 57). On constate en outre que le risque demeure modéré même dans des cas extrêmes comme en témoignent les valeurs de centile 75 de l'ordre de 15 kgN/ha et des valeurs les plus extrêmes du jeu de scénarios ne dépassant pas 24 kgN/ha. En cas d'apport de fertilisant de classe 8, les pertes par volatilisation sont caractérisées par des valeurs médianes entre 16 et 18 kgN/ha (environ 8.5% de l'azote apporté) et une plus forte variabilité (avec un risque de dépasser 30 kgN/ha volatilisés dans 25% des scénarios). Comme en témoignent les résultats détaillés ci-dessus, les écarts de pertes par volatilisation entre deux pratiques de fractionnement ne sont pas significatifs à cette échelle d'analyse, en particulier lorsque l'on compare les médianes. Il ressort tout de même des simulations une légère tendance à la hausse du risque de volatilisation pour un fractionnement en 3 apports avec un premier apport précoce (15/01) de 80 uN.

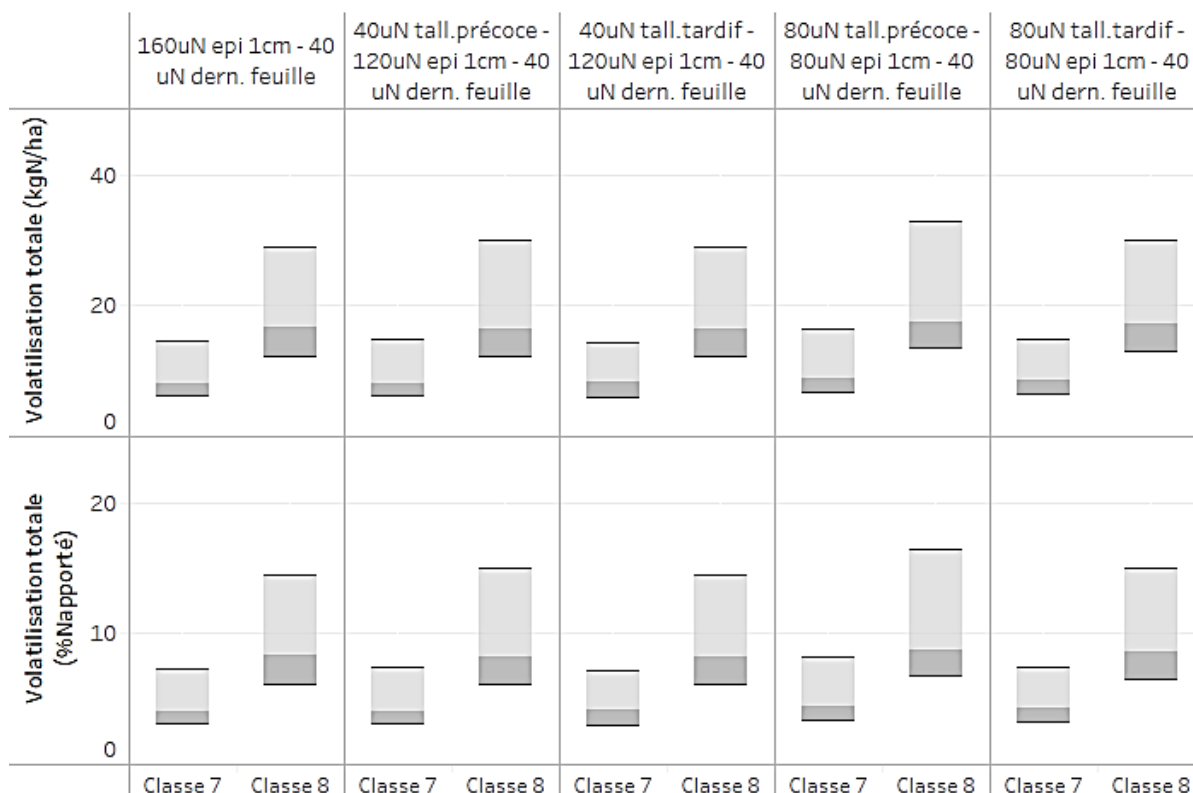


Figure 57 : Pertes totales par volatilisation liées à l'ensemble des apports de fertilisants azotés selon le choix de fractionnement et selon le type d'engrais apporté (borne inférieure : centile 25/borne centrale : médiane /borne supérieure : centile 75)

Pour affiner cette analyse des pertes par volatilisation selon les pratiques de fractionnement, les pertes ont été étudiées pour chaque apport (au stade tallage, au stade épi 1 cm et au stade dernière feuille étalée).

En cas d'apport au tallage, deux dates ont été testées (15/01 ou 15/02). L'analyse des résultats tous sites confondus (Figure 58 A) ne fait pas ressortir d'écart des quantités médianes volatilisées selon la précocité de l'apport au tallage mais une plus forte variabilité peut être observée en cas d'apport au



15/01 avec un risque de pertes plus importantes dans une partie des conditions pédoclimatiques, ce qui rejoint l'analyse faite précédemment à l'échelle de l'ensemble du cycle de la culture. Ces écarts restent toutefois faibles avec, par exemple pour des apports de 80 uN d'engrais de classe 8, des valeurs de centiles 75 respectivement de 18 et 15 kgN/ha en cas d'apport au 15/01 ou au 15/02. Les variables calculées pour cette étude ne permettent pas d'expliquer ces résultats bien qu'une tendance à la diminution des quantités volatilisées est observée quand les niveaux d'absorption dans les semaines qui suivent l'apport sont plus importants. Cette légère tendance à l'augmentation des pertes en janvier semble donc liée dans les simulations à un plus faible développement de la culture. Les principaux facteurs influençant les pertes à ce stade dans les simulations sont :

- La dose apportée avec des pertes doublées pour un apport de 80 uN par rapport à un apport de 40 uN même si les proportions par rapport à la dose totale apportée restent identiques. Les pertes médianes ne dépassent cependant pas 10% de l'azote apporté.
- Le choix du type d'engrais avec des pertes médianes également deux fois plus importantes en cas de fertilisation avec un produit de classe 8 : on constate des pertes de l'ordre de 9 % de l'azote apporté en cas d'apport de classe 8 avec en outre une variabilité des pertes plus importantes que la classe 7 avec 25% des scénarios présentant des pertes entre 20 et 30% de l'apport.

Dans le cas d'un apport effectué autour du stade épi 1 cm (fixé au 25/03 dans les simulations), les pertes par volatilisation sont impactées - pour ce qui est des pratiques – par la dose apportée à ce stade et le choix de l'engrais (Figure 58 B). Les pratiques de fertilisation précédentes n'influencent pas les pertes liées à cet apport. Tout comme au stade précédent, ce sont les effets de la dose et du choix du fertilisant qui impactent les niveaux de pertes. Il faut noter également que les pertes par volatilisation à ce stade sont légèrement plus faibles que pour une même dose apportée au tallage (par exemple ici 80 uN). On constate principalement une diminution de la valeur du centile 75 passant par exemple de 20 à 12% de l'azote apporté pour un engrais de classe 8. Cet effet est probablement lié dans les simulations à un faible développement du couvert au tallage par rapport au stade épi 1 cm. Ces résultats s'avèrent toutefois étonnants par rapport à la bibliographie existante mettant plus en avant une augmentation des risques de pertes par volatilisation pour des apports plus tardifs au printemps du fait de conditions plus sèches et plus chaudes.

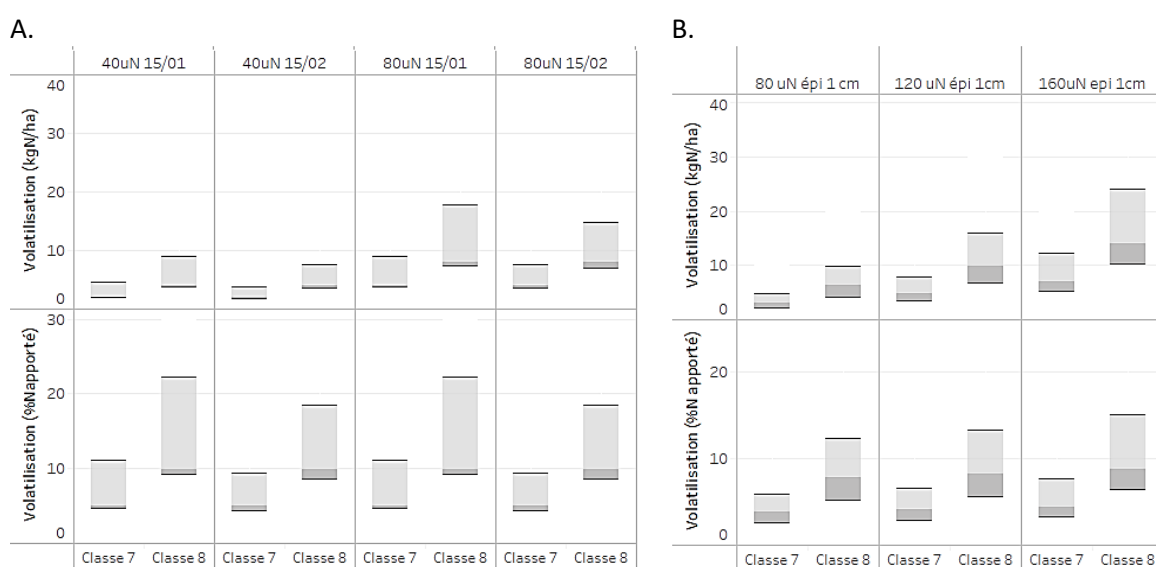


Figure 58 : Pertes totales par volatilisation suite à l'apport au tallage (A) ou au stade épi 1 cm (B) selon la dose apportée et le type d'engrais apporté (borne inférieure : centile 25/borne centrale : médiane /borne supérieure : centile 75)

Pour l'apport le plus tardif effectué autour du stade dernière feuille étalée (fixé au 01/05 dans les simulations), une unique dose a été testée (40 uN) pour des produits de classe 7 ou 8. Les résultats de simulation ne font pas ressortir d'écart de pertes par volatilisation selon les fractionnements précédant ce dernier apport. Seul l'effet du choix de l'engrais impacte les résultats de simulation avec des pertes médianes de l'ordre de 2% de l'azote apporté pour des apports de classe 7 et de 7% pour des apports de classe 8, qui sont en outre caractérisés à nouveau par un risque plus important selon les conditions pédoclimatiques (plus de 12% de pertes dans 25% des scénarios simulés). De la même manière que pour le stade épi 1 cm, les pertes par volatilisation à ce stade sont légèrement plus faibles que pour une même dose apportée au tallage (par exemple ici 40 uN) avec une diminution de la valeur du centile 75 du même ordre de grandeur (par exemple de 20 à 12% de l'azote apporté pour un engrais de classe 8).

Cette analyse apport par apport selon les choix de fractionnement est complétée par une analyse de la variabilité des pertes par volatilisation selon les conditions pédoclimatiques. Les résultats montrent un effet important du pH du sol sur les niveaux de pertes (voir détail en annexe 7.3) avec des quantités volatilisées négligeables pour des sols à pH <6 quel que soit le choix du fertilisant et au contraire des risques de volatilisation élevés quelle que soit la pratique pour des sols à pH >8. Concernant l'effet des conditions climatiques sur les pertes, l'analyse s'est essentiellement faite autour du cumul de précipitations dans les 15 jours qui suivent l'apport. Cependant cet indicateur ne s'est pas avéré pertinent pour distinguer différents niveaux de pertes selon la pluviométrie qui suit la date d'apport.

#### Analyse de la portance du sol

Les résultats précédents ont pu montrer que les apports en sortie d'hiver (y compris à la mi-janvier) généraient dans une très grande majorité de cas des pertes supplémentaires négligeables par rapport à des situations sans apport bien que la lixiviation totale puisse toutefois être déjà élevée en absence de fertilisation dans certaines conditions pédoclimatiques à risque. La pratique montre que l'accès à la parcelle n'est cependant pas toujours facile à la fin de l'hiver du fait d'une faible portance des sols et d'un risque d'enlèvement des engins mécaniques ou bien d'un tassement important du sol. Afin d'apporter quelques éléments à ce sujet pour les scénarios simulés, la portance des sols de l'échantillon a été évaluée pour deux niveaux de contraintes (100 et 140 kPa) entre octobre et mai. La méthode employée basée sur la comparaison des humidités journalières à des seuils d'humidités critiques selon la texture du sol est détaillée dans la partie méthodologique du document (Paragraphe 3.1).

Comme cela a déjà pu être constaté dans d'autres situations, pour des contraintes exercées de 100 kPa, seuls les sols argileux (>35% argile) semblent présenter un risque de très faible disponibilité pour intervenir sur la parcelle entre décembre et avril sans risquer de tasser le sol (Figure 59). Bien que l'effet des apports de sortie d'hiver sur les pertes azotées sur ces sols soit très faible, il est possible que la pratique demeure tout de même défavorable dans ces contextes.

Il faut noter cependant que les pratiques de travail du sol simulées dans STICS n'ont pas été adaptées au type de sol. Il est possible que le ressuyage du sol soit favorisé dans la réalité au printemps par des choix à long terme de l'agriculteur. Toutefois malgré une possible surestimation des jours indisponibles, le risque de tassement en janvier et février sur ces sols demeure important et en adéquation avec les retours de terrain sur sols argileux.

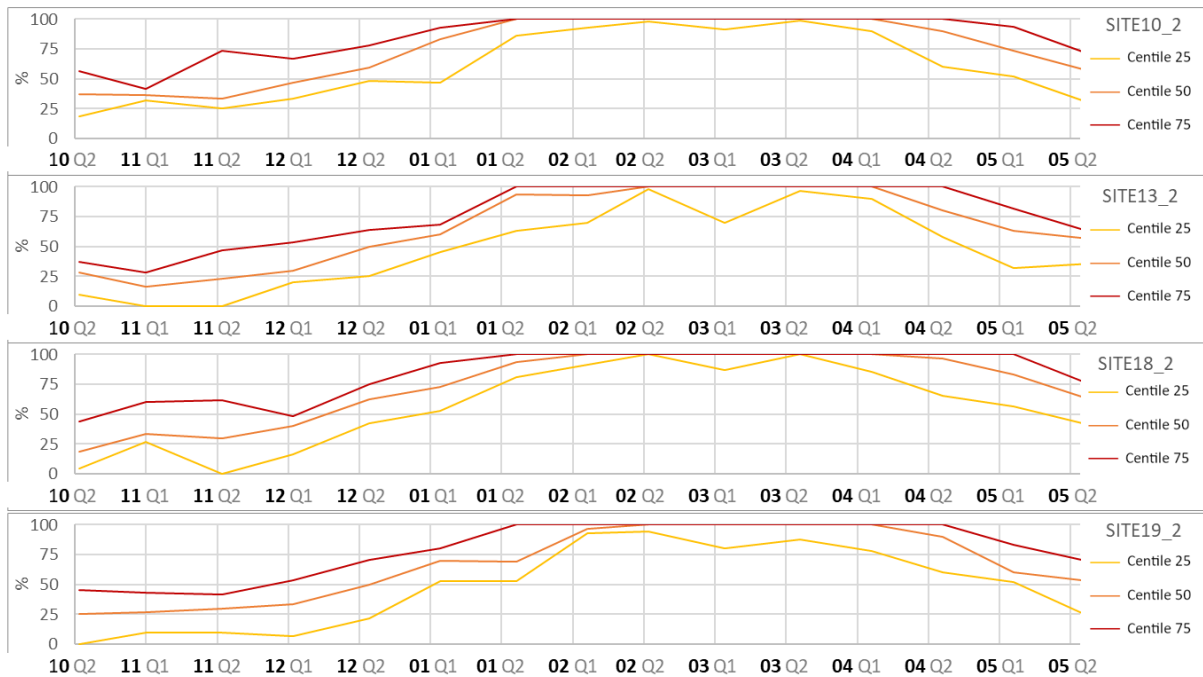


Figure 59 : Part de jours non disponibles par quinzaine du fait d'une portance insuffisante pour une contrainte exercée de 100kPa – Focus sur quelques sols argileux

Pour des contraintes plus élevées (140 kPa ici), ce qui peut être le cas pour des épandeurs d'engrais, les sols moins argileux de l'échantillon présentent en revanche un risque de tassement en cas d'intervention entre décembre et mars ou avril selon les sols. Pour les sols de la moitié sud caractérisés par une plus faible pluviométrie, le risque reste moindre et la fenêtre de jours disponibles pour accéder à la parcelle sans risque de tasser le sol ou de s'enliser laisse pour 50 à 75% des années 1 jour sur deux de disponible sur le mois de janvier. En février, cette fenêtre est en revanche rétrécie. Pour les sites de la moitié nord de la France, on constate un risque important d'avoir moins de 25% de jours d'intervention sans risque de tassement (Figure 60).

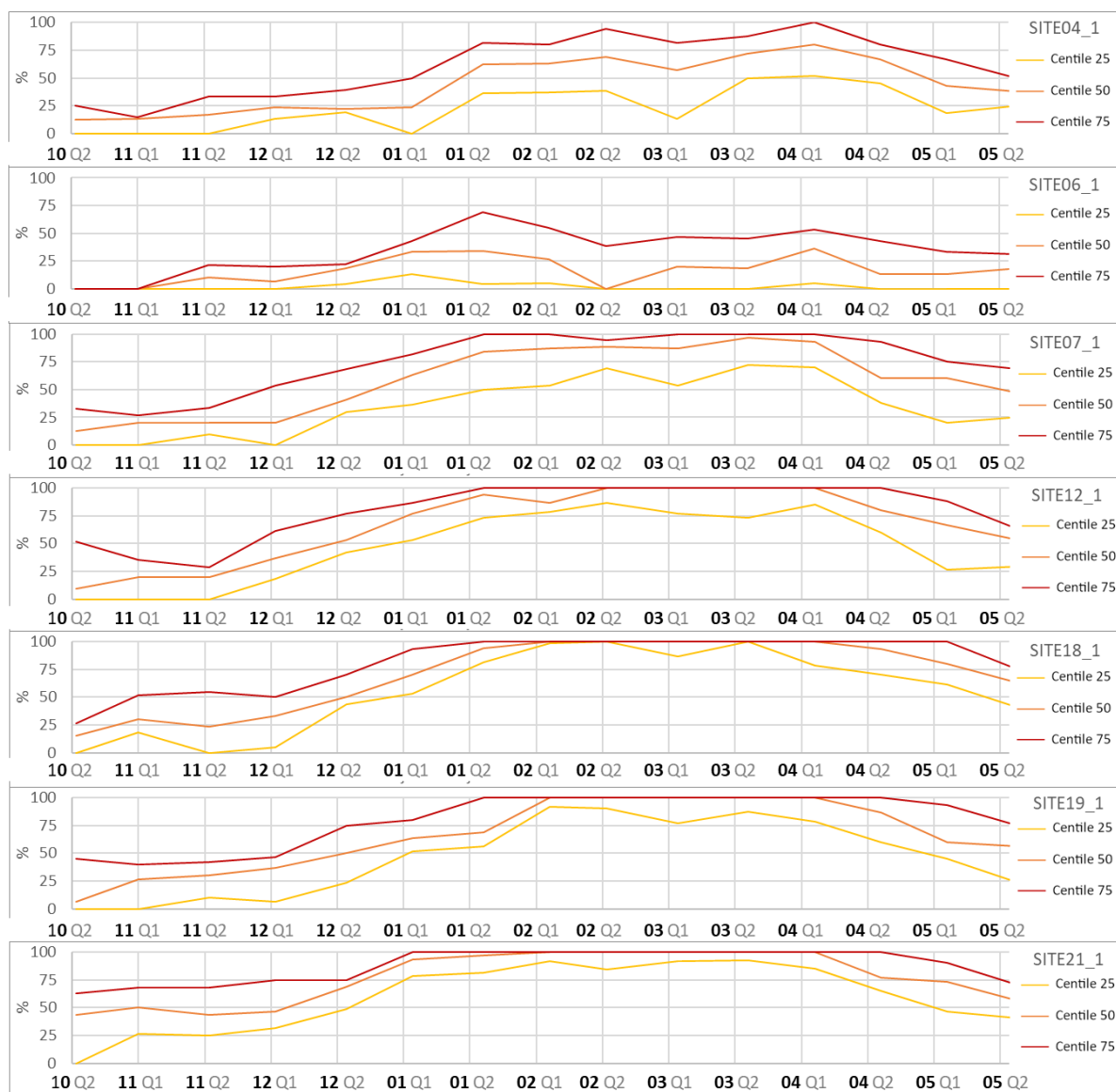


Figure 60 : Part de jours non disponibles par quinzaine du fait d'une portance insuffisante pour une contrainte exercée de 140kPa – Focus sur quelques sols à teneur en argile inférieure à 35%

### 3.7.2.3 Conclusions et discussions

L'étude de la fertilisation minérale sur céréales d'hiver au travers de l'exemple du blé d'hiver avait un objectif double :

- Analyser l'impact de la précocité d'un premier apport en fin d'hiver sur les pertes azotées et en particulier sur la lixiviation : afin d'identifier les conditions pédoclimatiques favorables ou non à un apport plus précoce à la mi-janvier
- Analyser l'impact sur les pertes azotées (et en particulier sur la volatilisation qui n'avait pas été étudiée dans la précédente étude de 2012) des apports plus tardifs selon les choix de fractionnement.

Les scénarios avec un apport à la mi-janvier se sont avérés présenter dans une très grande majorité de cas des **pertes supplémentaires négligeables par rapport à des situations sans apport**. La lixiviation totale peut toutefois être déjà élevée y compris en absence d'apport du fait de conditions pédoclimatiques à risque pour des sols à forts reliquats dans le sol et risque de drainage important.

Dans les analyses faites sur l'échantillon de sites et sols, les pertes par lixiviation à la mi-janvier devenaient plus extrêmes lorsque le sol avait atteint un taux de remplissage maximal de la RU lors de l'apport et des cumuls de précipitations dans les 15 jours qui suivent l'apport supérieures à 50 mm. Au-delà de cette analyse des risques de lixiviation, il faut noter que seuls trois sites (dans le Gers, le Gard et la Vendée) présentaient une reprise de l'absorption pendant la deuxième quinzaine de janvier. Sur les autres sites, un apport au 15/01 ne semble **pas en adéquation avec la reprise de croissance de la culture**.

Les interventions à la parcelle en **janvier et février** peuvent causer le tassement du sol voire l'enlèvement du matériel d'épandage : l'analyse de la portance des sols semble mettre en avant les **risques à cette période sur une majorité de sols en cas d'utilisation d'engins exerçant des contraintes de l'ordre de 140 kPa**. Des pressions plus faibles n'impactent en revanche que les sites les plus argileux (>35% d'argile).

Concernant l'analyse de l'effet de différentes pratiques de fractionnement sur les pertes, les simulations n'ont fait ressortir que **l'effet du choix du type de fertilisant avec une augmentation importante du risque de volatilisation pour des produits de classe 8** (à plus forte teneur en azote ammoniacal et uréique). En revanche la répartition des 200 uN totales apportées n'a pas impacté significativement les pertes par volatilisation globale sur la durée de la culture mais uniquement sur la **répartition des pics de volatilisation au printemps** avec une corrélation forte entre la dose apportée et les quantités volatilisées dans les 15 jours suivant cet apport.

L'analyse de la **variabilité des conditions pédoclimatiques** sur ces pertes par volatilisation n'a permis de mettre en avant que l'effet important du **pH du sol** sur les niveaux de pertes. Les indicateurs météorologiques testés ne se sont pas avérés pertinents pour affiner l'identification des conditions climatiques favorables à une limitation des pertes.

## 3.8 EPANDAGE DE FERTILISANTS AZOTES SUR CI EN INTERCULTURE COURTE

### 3.8.1 Contexte et objectifs

L'implantation d'une culture intermédiaire entre deux cultures alimentaires d'hiver est une pratique en expansion en particulier du fait du développement des cultures à vocation énergétique. Pendant cette interculture courte, la culture a au plus 3 mois pour produire une quantité suffisante de biomasse. Du fait de leur valorisation, les cultures intermédiaires à vocation énergétique (CIVE) d'été peuvent faire l'objet d'une fertilisation minérale ou organique, avec principalement l'utilisation de digestats de méthanisation. Actuellement, les cultures intermédiaires sur interculture courte en été ne sont pas considérées spécifiquement dans la réglementation des périodes d'épandage du programme d'actions nitrates.

Dans le cadre de cette étude, l'objectif était d'étudier l'effet d'un apport de fertilisant azoté minéral ou organique sur une culture intermédiaire en interculture courte sur l'absorption et la croissance de cette culture et sur les risques de pertes d'azote associées survenant pendant l'été ou pendant l'automne-hiver suivant. Bien que les scénarios de fertilisation aient été principalement construits par rapport aux pratiques sur CIVE d'été, la question a été élargie aux cultures intermédiaires de manière plus générale en considérant également le cas de l'implantation d'une culture intermédiaire piège à nitrate (CIPAN) en été.

### 3.8.2 Simulations de scénarios d'épandage de fertilisants azotés sur CI en interculture courte

#### 3.8.2.1 Plan de simulation et modalités testées

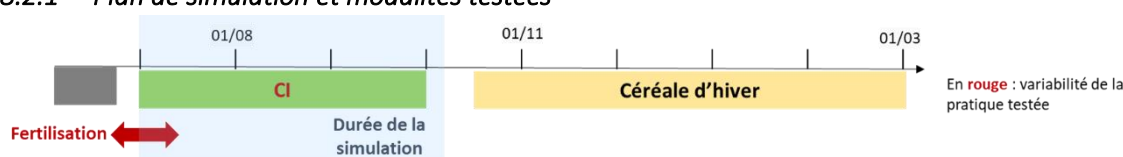
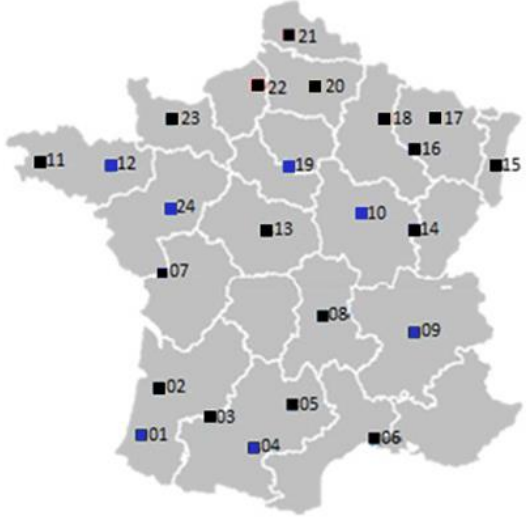


Figure 61 : Schéma chronologique de la situation d'apport de fertilisants azotés sur CI d'été

Bien que le sujet soit large, le temps de simulation et la durée contrainte de l'étude ont amené à sélectionner certains scénarios à traiter. Une gamme de conditions pédoclimatiques restreinte par rapport à l'échantillon initial de couples site-sol a été conservée. Sur les 24 sites, 7 ont été retenus par expertise. Cette sélection a été principalement faite en fonction des régions où les cultures à vocation énergétique sont développées ou présentent un potentiel de développement. L'intégration de scénarios avec CIPAN n'a été faite que plus tardivement dans le plan de simulation et la sélection de sites n'a pas été modifiée en conséquence. Il faut toutefois noter une variabilité pédoclimatique des sites choisis permettant de traiter la problématique dans diverses conditions. Le choix des cultures est également partiellement déterminé par les variétés déjà paramétrées dans le modèle STICS et leur capacité à produire suffisamment de biomasse dans les trois mois de culture. La diversité des classes de fertilisants retenus visent à prendre en compte la variabilité des dynamiques de minéralisation qui pourraient être observées en cas d'apport de digestats. En effet, bien qu'il s'agisse majoritairement d'apports de produits à libération rapide d'azote dans la pratique, la catégorie des digestats présente une très forte variabilité de comportements que l'on a cherché à prendre en compte ici. Les modalités sont détaillées dans le tableau 20. Environ 48 000 scénarios sont simulés.

Tableau 20 : Modalités traitées pour la situation d'apport de fertilisants azotés sur CI d'été

	Modalités testées	Détails
Pédoclimat	Années climatiques Sites et sols	<p><b>20 années</b> climatiques  <b>7 sites</b> sélectionnés à partir de l'échantillon initial de 24 sites (en <b>bleu</b> sur la carte)  <b>2 sols</b> par site (sols initiaux de l'échantillon)</p> 
Couvert	Espèces, date de semis, date de récolte, irrigation	<p>Espèces testées :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Sorgho fourrager (CIVE)</li> <li>- Moutarde (CIPAN)</li> </ul> <p>Semis : une modalité au 01/07  Récolte : une modalité au 25/09  Irrigation : seul le sorgho est irrigué sur les sites 01, 09, 19 et 24 (identifiés par expertise selon les pratiques actuelles) avec un apport de 35 mm à la levée</p>
Initialisation	Précédent Conditions de sols (Nsol et humidité)	<p>Culture précédente : céréale à paille  2 niveaux de stock d'azote minéral dans le sol au semis du couvert : 45kgN/ha et 90kgN/ha  Humidité fixée pour chaque site à partir des résultats de simulation de 2012 sur les conditions à la récolte d'une céréale d'hiver</p>
Fertilisants azotés	Selon la typologie	<p>5 classes de la typologie des fertilisants testés (soit 6 représentants) :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Fertilisants organiques : <ul style="list-style-type: none"> <li>o classes 3a et b</li> <li>o classe 5</li> <li>o classe 6</li> </ul> </li> <li>- Fertilisants minéraux : classes 7 et 8</li> </ul>

Pratiques d'apport	Quantités, dates, enfouï ou non	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Dose et fractionnement</u> : <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Témoin sans azote</li> <li>✓ 50 kgNtot/ha 15j après semis (et 15 j avant semis pour la classe 3)</li> <li>✓ 100 kgNtot/ha 15j après semis (et 15 j avant semis pour la classe 3)</li> <li>✓ 150 kgNtot/ha 15j après semis (et 15 j avant semis pour la classe 3)</li> </ul> </li> <li>• <u>Mode d'apport</u> : apport en surface ou en profondeur testé systématiquement</li> </ul> <p><i>Remarque : d'après les experts, les apports post-semis sont réalisés après une pluie efficace. Des tests préliminaires ont permis de vérifier l'occurrence de cet évènement en amont des dates d'apport fixées dans le plan de simulation : pour chaque site, dans plus de 75 % des années, au moins un épisode de pluie efficace est observé dans les 15 jours qui précèdent l'apport.</i></p>
--------------------	---------------------------------	---

Tableau 21 : Equivalences entre quantité d'azote totale et volumes apportés pour les différents produits organiques dans les simulations

Classe	Description produit	Volume (t/ha)*	Azote total (kgN/ha)*	Azote efficace (kgNeff/ha) sous CI
3	Produit à minéralisation lente et présentant une phase transitoire d'immobilisation	7.4	<b>50</b>	<i>L'azote disponible pendant la durée de la CI est calculé dans les simulations par la suite</i>
		14.8	<b>100</b>	
		22.2	<b>150</b>	
	Produit à minéralisation lente sans phase transitoire d'immobilisation	9.2	<b>50</b>	
		18.4	<b>100</b>	
		27.6	<b>150</b>	
5	Minéralisation importante et rapide	1.3	<b>50</b>	
		2.6	<b>100</b>	
		3.9	<b>150</b>	
6	Forte proportion d'azote minéral	8.8	<b>50</b>	
		17.6	<b>100</b>	
		26.4	<b>150</b>	

\*Ces valeurs ont un caractère indicatif car dépendantes du produit apporté et donc du représentant choisi dans les simulations pour chaque classe de produit (ex : fumiers de bovins pour la classe 3 et lisier de porcs pour la classe 6).

### 3.8.2.2 Résultats de simulation et analyse

#### Azote fourni par le fertilisant azoté pour la CI d'été

Dans le cas des classes d'engrais 7 et 8, l'azote est entièrement sous forme minérale et donc potentiellement entièrement disponible pour la culture pendant son cycle. Pour les classes 3, 5 et 6 également testées ici, il s'agit de fertilisants organiques qui libèrent de l'azote minéral avec des dynamiques différentes. Le plan de simulation ayant été construit à partir de doses d'azote total apporté, la figure ci-dessous indique les quantités d'azote minéral fourni par les différents fertilisants organiques pendant la durée de la culture intermédiaire selon la dose apportée.



Les quantités médianes d'azote efficace varient donc comme suit pour des apports d'azote total de 50 à 150 kgN :

- Pour la classe 3a, qui minéralise lentement et présente une phase transitoire préalable d'immobilisation, les quantités mises à disposition restent faibles : entre 6 et 18 kgN/ha selon la dose totale apportée (soit 12 % de la quantité totale d'azote apportée).
- Pour la classe 3b, présentant une minéralisation également progressive mais sans phase d'immobilisation initiale, les quantités médianes varient entre 13 et 37 kgN/ha (soit 25% de la quantité totale d'azote apportée).
- Pour la classe 5, qui se caractérise par une minéralisation rapide et importante, le fertilisant fournit entre 16 et 50 kgN/ha selon la dose apportée (soit 33% de la quantité totale d'azote apportée).
- Pour la classe 6, qui contient déjà initialement une forte proportion d'azote sous forme ammoniacale, les quantités d'azote efficace varient entre 32 et 97 kgN/ha (soit 65% de la quantité totale d'azote apportée).

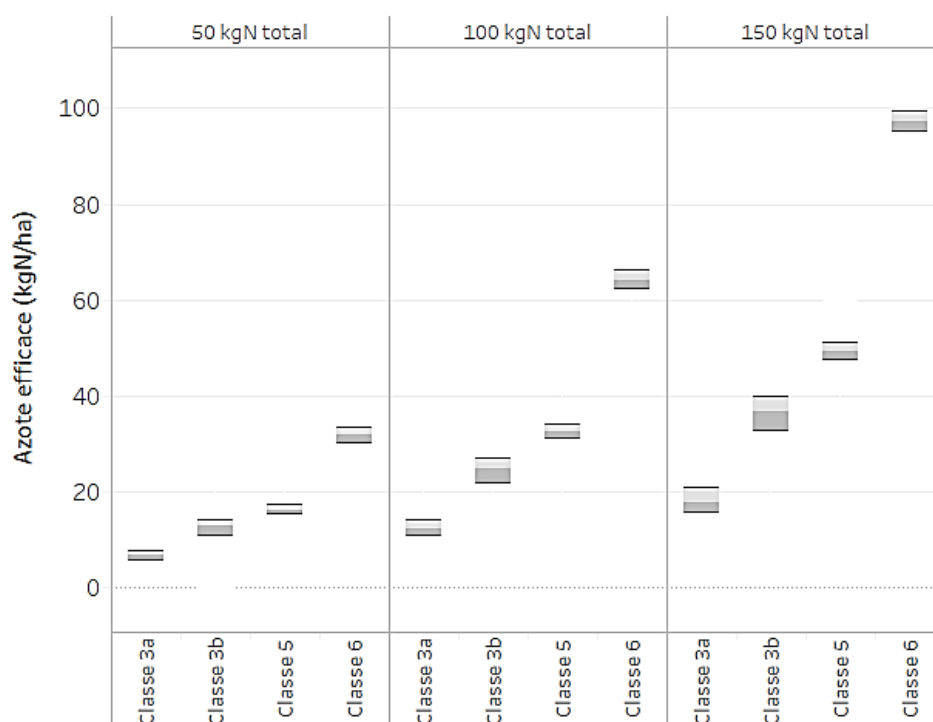


Figure 62 : Azote efficace disponible pour la culture intermédiaire selon la classe de fertilisant et la dose d'azote total apporté (les boîtes à moustaches présentent les centiles 25, 50 et 75)

Pour la classe 3, une part majoritaire de l'azote apporté sera minéralisé après récolte ou destruction de la CI, dont une partie à l'automne suivant. Le choix de la culture implantée à l'automne aura donc son importance pour capter cette quantité d'azote minéralisé et limiter les risques de pertes hivernales en cas d'apport de ce type de fertilisant en été. Dans une moindre mesure, ce constat s'applique également pour les produits de classe 5.

L'effet d'un apport avant ou après semis pour la classe 3 n'est pas détaillé sur la figure 62 car aucune minéralisation supplémentaire n'a été constatée dans les simulations en cas d'apport plus précoce. Il faut noter que STICS ne permet pas de distinguer la minéralisation d'un produit organique par rapport à un autre et calcule de manière globale la minéralisation des PRO et des résidus de culture. L'azote efficace des fertilisants est donc estimé en comparant les scénarios avec apport aux scénarios témoins.

Il semblerait cependant qu'en cas d'apport avant semis, l'immobilisation des résidus du précédent (céréale d'hiver) soit plus importante que dans les autres scénarios et limite donc sur cette courte période estivale la fourniture d'azote minéral provenant des fertilisants organiques.

### **Croissance et absorption des CI en interculture courte**

Pour des cultures de sorgho et de moutarde semées au 01/07, les dates médianes de levée simulées dans STICS sont similaires (10/07) mais une plus forte variabilité selon les conditions pédoclimatiques est observée dans le cas du sorgho. La levée a en effet tendance à être plus fréquemment retardée à la première quinzaine d'août en particulier sur les sites de Haute-Garonne et du Maine-et-Loire. Ces sites sont caractérisés par un cumul de précipitations pendant l'été plus faible que sur les autres sites étudiés pour cette situation.

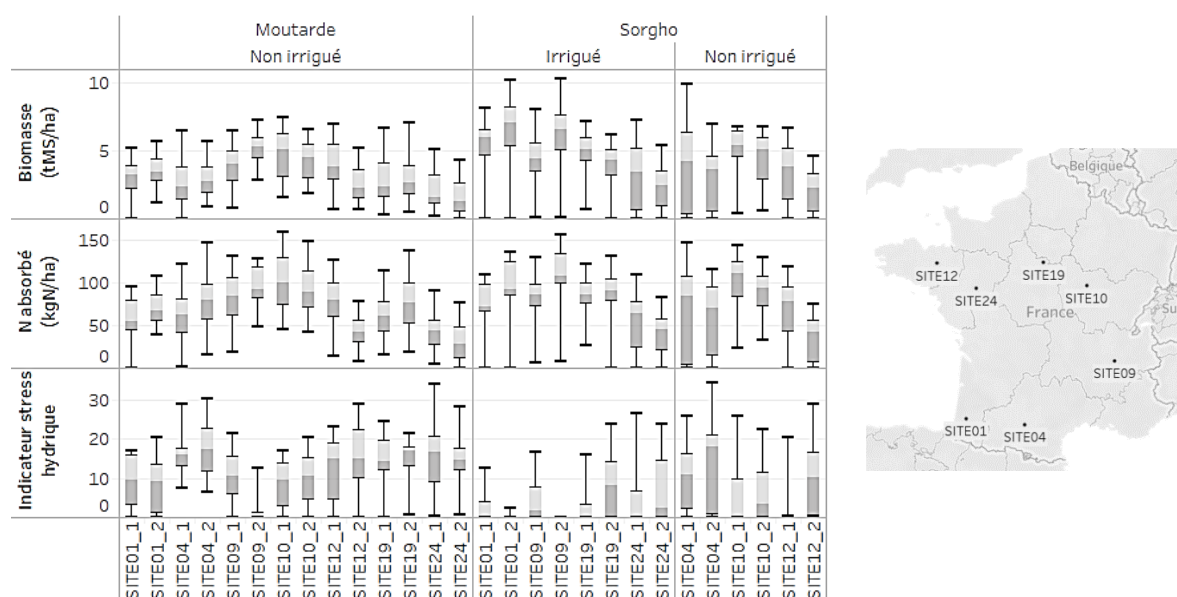


Figure 63 : Biomasse et azote accumulé par les cultures intermédiaires et indicateur de stress hydrique dans le cas des scénarios témoin sans fertilisant (les boxplots présentent les valeurs minimales et maximales ainsi que les valeurs de centiles 25, 50 et 75)

En absence d'apport de fertilisant (Figure 63), la biomasse et l'azote accumulé par les cultures sont très variables selon la CI, avec une croissance plus importante et une contrainte liée au stress hydrique plus faible pour le sorgho dans ces scénarios témoins, mais aussi selon le site et le type de sol considéré. Pour la moutarde par exemple, les quantités médianes absorbées jusqu'à destruction de la culture varient de 30 kgN/ha (sur le sol 24\_2 caractérisé par une faible épaisseur et faible réserve utile ainsi qu'un climat sec) à 100 kgN/ha (sur le sol 10\_1 profond et à forte réserve utile sur un des sites retenus les plus pluvieux en été avec plus de 200 mm en valeur médiane pendant la durée de la culture).

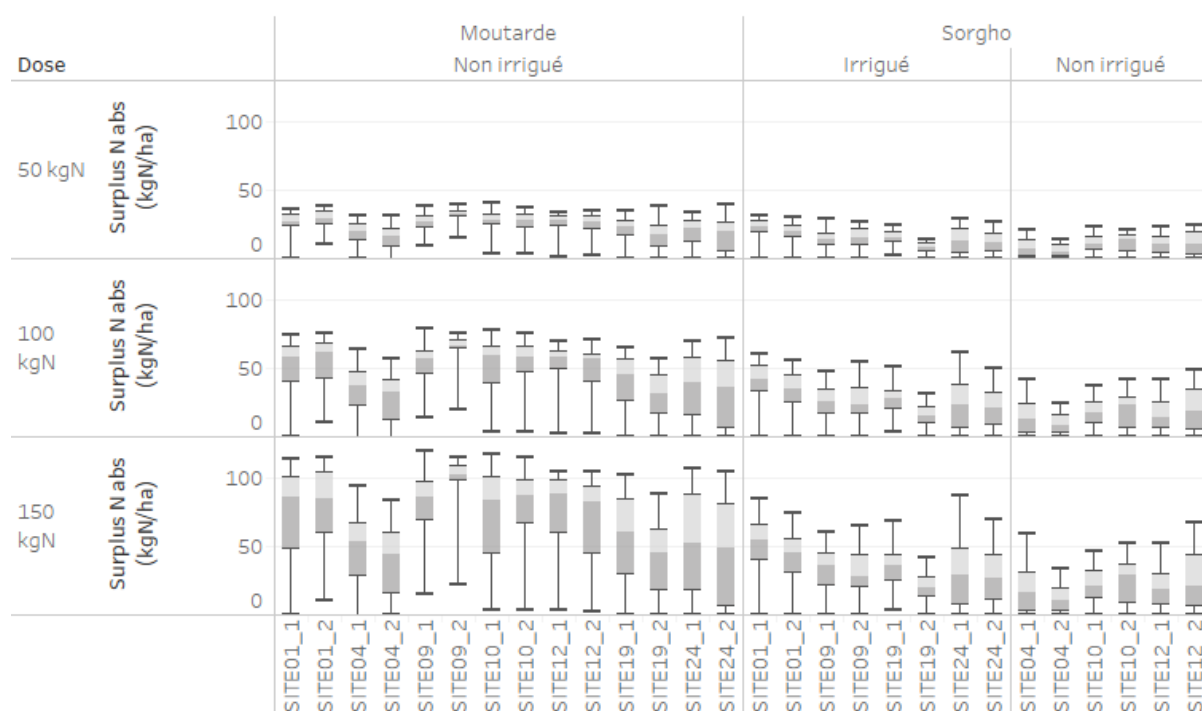


Figure 64 : Quantités supplémentaires d'azote absorbées par les CI selon les sites et la dose apportée au travers d'exemples de scénarios avec apport de fertilisant de classe 7 (les boxplots présentent les valeurs minimales et maximales ainsi que les valeurs de centiles 25, 50 et 75)

En cas d'apport de fertilisants azotés, les simulations mettent en avant les plus fortes capacités de la moutarde à capter l'azote supplémentaire apporté par rapport au sorgho et ce malgré le stress hydrique plus important qui avait été constaté dans les scénarios témoins. Comme le montre la figure 64 avec les surplus d'azote absorbé des scénarios avec apports de fertilisants de classe 7 par rapport aux scénarios témoin, la moutarde est capable d'absorber en valeur médiane environ 50% de l'azote minéral apporté y compris pour de fortes doses (ici 150 uN) alors que le sorgho absorbe autour de 20% de l'azote issu de la fertilisation et cette proportion diminue pour des apports plus importants. Cette efficacité présente toutefois une variabilité intersite importante en particulier pour des doses de plus de 100 kgN/ha. Différents facteurs peuvent être identifiés :

- Un stress hydrique plus important sur certains sites, qui limite la croissance de la culture et ses besoins en azote comme c'est le cas pour les deux sols du site 04 (Haute-Garonne)
- Un sol à forte fourniture d'azote sur la période estivale comme c'est le cas des sols 04\_2 et 19\_2 dans l'échantillon de l'étude avec une minéralisation médiane de 100 kgN/ha ou plus pendant la durée de la culture.

La figure 64 propose une analyse ciblée sur un apport de fertilisant de classe 7 mais la figure 65 permet d'élargir les conclusions à l'ensemble des pratiques testées. Elle montre à nouveau les plus fortes capacités de la moutarde à absorber des quantités d'apports plus importantes. Toutefois dans le cas des fertilisants organiques à faible teneur en azote ammoniacal, les écarts sont plus faibles entre les deux cultures voire non significatifs pour des fertilisants à minéralisation progressive (classes 3a et b). En effet, les quantités d'azote disponible pour la culture provenant de ces fertilisants restent inférieures à 50 kgN même pour des doses d'azote apporté de 150 kgN/ha et la moutarde comme le sorgho capte alors plus de 50% de cet azote disponible. Au-delà de 50kgN disponible pour la culture, l'efficacité d'absorption du sorgho baisse fortement, et d'autant plus en cas de reliquats d'azote dans le sol importants au semis (ici 90kgN pour 90 cm de sol)

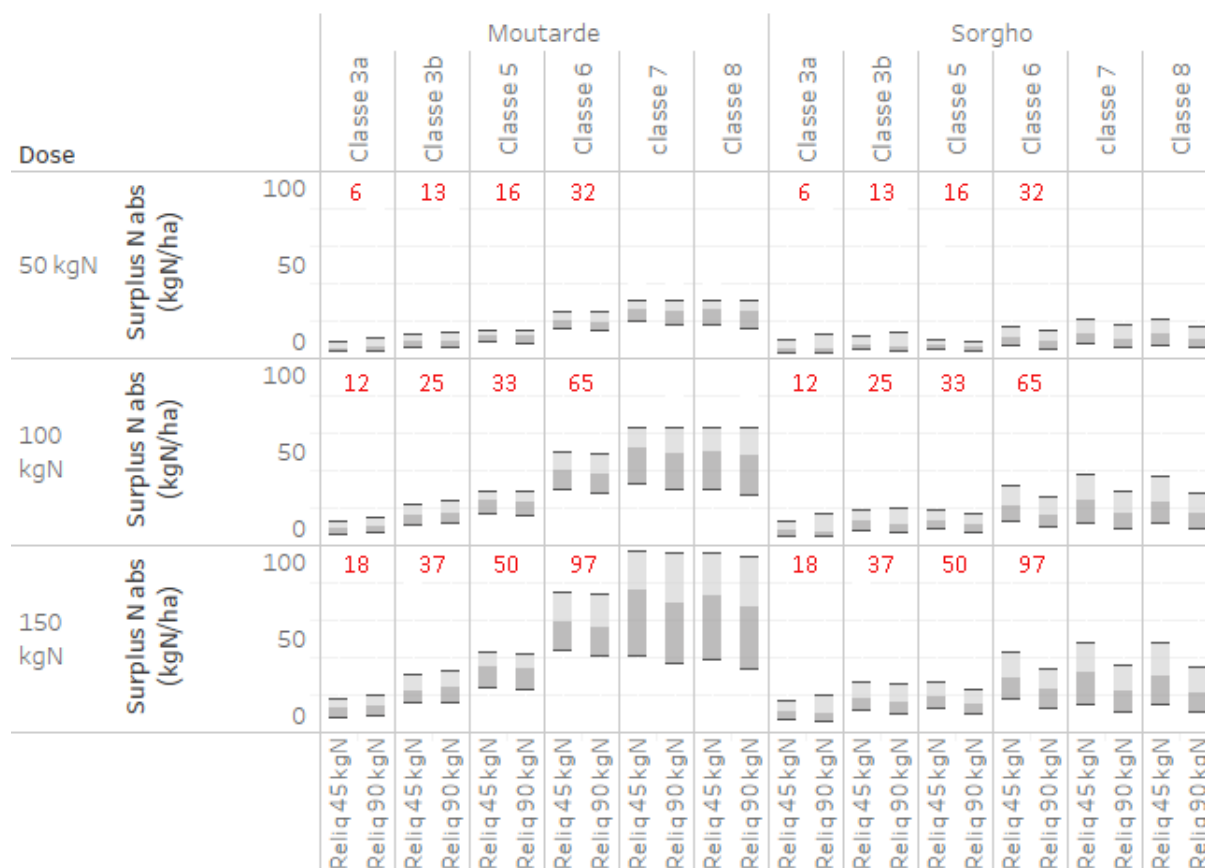


Figure 65 : Quantités supplémentaires d'azote absorbées par pratique de fertilisation et le reliquat initial dans le sol (les boxplots présentent les valeurs de centiles 25, 50 et 75) En rouge les quantités d'azote efficace dans le cas des fertilisants organiques

### Effet des pratiques d'apports sur les pertes azotées

Concernant lixiviation, les pertes à cette période sur les sites de l'échantillon sont très majoritairement faibles (Figure 66) avec des pertes médianes de moins de 3 kgN/ha (et des centiles 75 de moins de 8kgN/ha). Seul le site-sol 09\_1 affiche des risques de pertes plus importantes qui peuvent monter jusqu'à 50 kgN/ha dans les conditions climatiques les plus extrêmes. Il faut rappeler que ce site d'Isère est caractérisé par des cumuls de précipitations sur l'été plus importants que sur les autres sites avec des cumuls de 280 mm en valeur médiane qui peuvent atteindre près de 450 mm certaines années. Avec une minéralisation relativement importante, le sol 09\_1 est de plus peu profond et très drainant, expliquant les quantités d'eau drainée et d'azote entraîné par lixiviation.

En cas d'apport de fertilisants azotés en été sur les cultures intermédiaires, les surplus de lixiviation restent très faibles dans la très grande majorité des cas : quel que soit le choix du fertilisant ou la dose apportée, les pertes supplémentaires dans les situations les plus extrêmes ne dépassent pas 5kgN/ha. A nouveau, seul le site sol 09\_1 présente des surplus de pertes pouvant atteindre 30 kgN pour des apports de 150 kgN total, principalement sur les classes 7 et 8 pour des années marquées par une forte pluviométrie sur cette période. Les années 2002 et 2008 ressortent de l'identification des situations à risque sur ce site-sol avec des précipitations cumulées sur la période de culture de respectivement 370 et 450 mm.

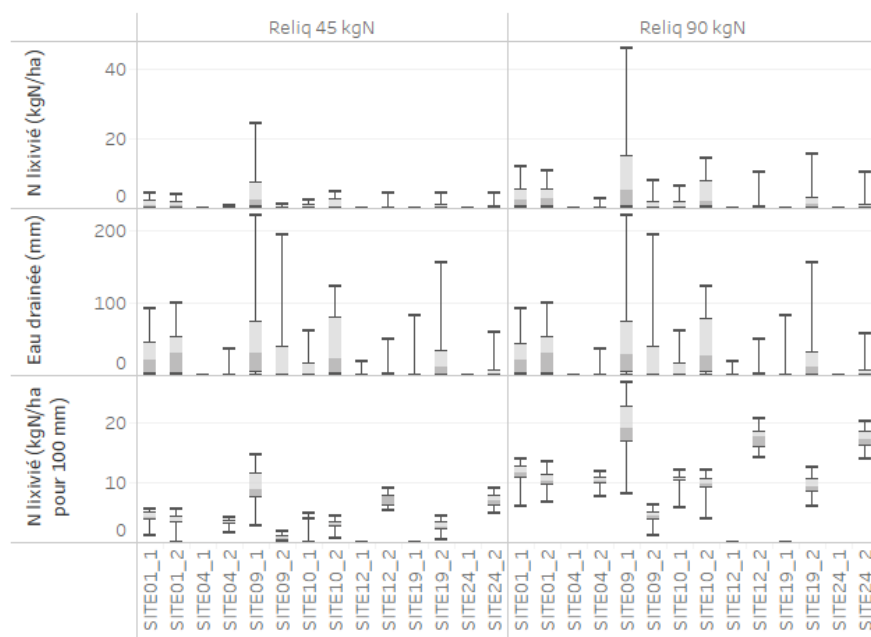


Figure 66 : Drainage et pertes par lixiviation par site-sol dans le cas des scénarios témoins (les boxplots présentent les valeurs minimales et maximales ainsi que les valeurs de centiles 25, 50 et 75)

Les pertes par volatilisation peuvent en revanche être plus conséquentes que les pertes par lixiviation selon les pratiques de fertilisation et les conditions pédoclimatiques. Aucun écart significatif n'est apparu entre les deux cultures intermédiaires testées. Comme cela avait déjà été constaté dans d'autres situations, les quantités volatilisées en cas d'apport dépendent fortement du pH du sol (*résultat non illustré pour cette situation*). Pour les sols à  $\text{pH} < 6$  dans l'échantillon de l'étude, les pertes par volatilisation sont nulles. Afin de se focaliser sur les situations plus à risque, les résultats présentés sur la figure 67 excluent les sols à  $\text{pH} < 6$ . Ils mettent en avant l'effet de la quantité apportée, du mode d'apport en surface ou en profondeur et du choix du fertilisant. Les facteurs de quantité et de classe de fertilisant sont à relier car la volatilisation dépend de la quantité d'azote minéral initialement apportée par le fertilisant en particulier quand cet azote est sous forme ammoniacale.

Dans le cas des classes 6 et 8, une proportion importante de l'azote est apportée sous forme ammoniacale. Pour la classe 6, entre 33 et 98 kN-NH<sub>4</sub>/ha sont épandus selon la dose totale apportée. Les pertes médianes simulées associées sont alors de 12 à 40 kgN/ha volatilisés en cas d'apport en surface (soit de l'ordre de 2% de l'azote total apporté) mais ne dépassent pas 10 kgN/ha si le fertilisant est enfoui lors de l'épandage. Pour la classe 8, la volatilisation médiane est plus faible mais les pertes les plus extrêmes observées sont équivalentes à celle de la classe 6 avec 25% de l'azote apporté.

Pour les classes 3 à 5, il faut rappeler que les représentants de chaque classe paramétrés dans STICS dans le cadre de cette étude ne représentent pas toute la variabilité au sein d'une classe en particulier concernant la teneur en azote ammoniacal ; mais la typologie élaborée distingue les classes 1 à 5 de la classe 6 du fait d'une teneur en azote ammoniacal inférieure à 40%. Les représentants paramétrés ici ont des teneurs entre 8 et 25%. Les pertes les plus extrêmes atteintes pour ces fertilisants sont de 25kgN/ha volatilisés pour des apports de 150 kgN<sub>tot</sub> en surface (soit 17% de cet apport total). Il faut noter que ces pertes sont de plus simulées sur les sols basiques ( $\text{pH} > 8$ ). De plus faibles pertes sont constatées sur sols à pH entre 6 et 8. L'apport en profondeur diminue fortement les pertes mais il peut être cependant difficile d'enfouir ces produits s'ils sont apportés 15 jours après semis. Bien qu'aucune différence sur les pertes n'ait été constatée entre un produit de classe 3 apporté 15 jours avant ou

après semis, l'apport avant semis peut toutefois faciliter l'enfouissement et diminuer le risque de pertes par volatilisation.

En ce qui concerne l'effet de la variabilité climatique, les indicateurs utilisés pour décrire les conditions climatiques dans les 15 jours qui suivent l'apport (dont le cumul de précipitations) n'ont pas permis d'apporter d'éléments complémentaires à cette analyse. Les résultats d'expérimentations menées ont cependant montré l'effet de la pluviométrie sur la diminution de la volatilisation et l'augmentation de l'efficacité de l'engrais. Dans des essais menés par Arvalis en 1995 et 1997 pour différentes formes d'engrais, le seuil de 20 mm de précipitations cumulées dans les 20 jours suivant l'apport permettait d'assurer une valorisation satisfaisante d'un apport d'engrais azoté que le sol soit sec ou humide au moment de l'apport.

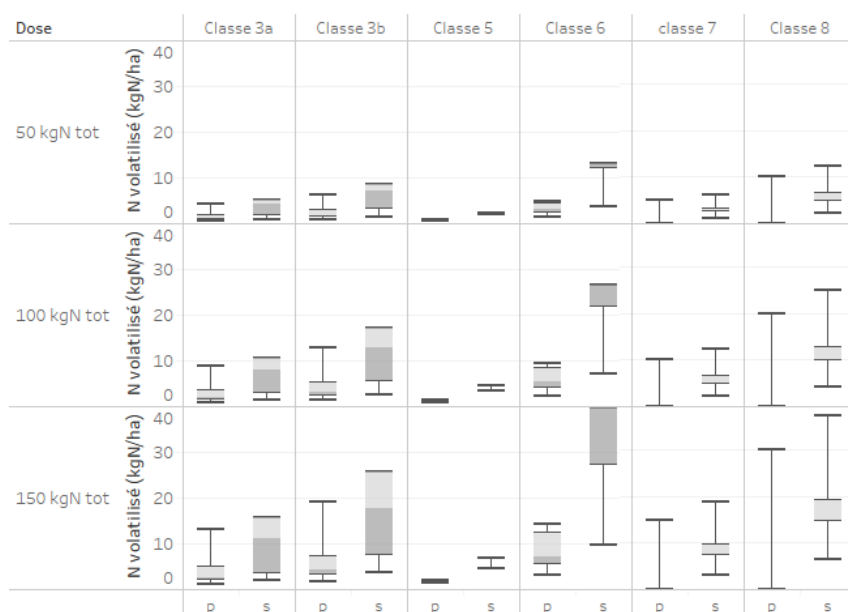


Figure 67 : Quantité d'azote volatilisé par pratiques de fertilisation sur les sites à pH du sol >6 (les boxplots présentent les valeurs minimales et maximales ainsi que les valeurs de centiles 25, 50 et 75)

### **Effet des pratiques d'apports sur les reliquats post-récolte et les risques de pertes à l'automne suivant**

Des premiers constats ont déjà pu être faits dans les paragraphes précédents au sujet des risques de pertes azotées après la récolte ou la destruction de la culture intermédiaire en fin d'été. Pour les classes 3 de fertilisants azotés et dans une moindre mesure la classe 5, une part importante de l'azote apporté n'a pas été minéralisé pendant la durée de la culture et sera donc mis à disposition de la culture suivante. Le choix de la culture suivante a donc son importance pour limiter les risques de pertes à l'automne. Des céréales d'hiver risqueraient par exemple de ne pas capter cet azote nouvellement minéralisé contrairement à un colza.

Outre les quantités minéralisées post-culture, les reliquats d'azote minéral laissés dans le sol par la culture intermédiaire sont importants selon les pratiques testées. La Figure 68 présente uniquement les surplus de reliquats post-récolte afin de s'affranchir en partie de la variabilité liée au type de sol. Dans le cas d'une moutarde implantée, l'augmentation du reliquat post-récolte reste faible pour des apports de 50 et 100 kgN tot (avec respectivement moins de 5 kgN et moins de 14 kgN en valeur médiane quel que soit le fertilisant). Elle peut toutefois être plus importante dans des conditions déjà évoquées précédemment (stress hydrique important sur le site, sol à forte fourniture d'azote de plus de 100 kgN sur la période). Pour des apports de 150 kgN tot, les surplus de reliquats dépassent 20 kgN

en valeur médiane pour les classes 7 et 8. Pour les scénarios avec implantation de sorgho, des surplus médians de plus de 20 kgN sont obtenus dès l'apport de 100 kgN tot pour les classes 6 et 8. Ces résultats rejoignent le constat de besoins plus faibles du sorgho par rapport à la moutarde.

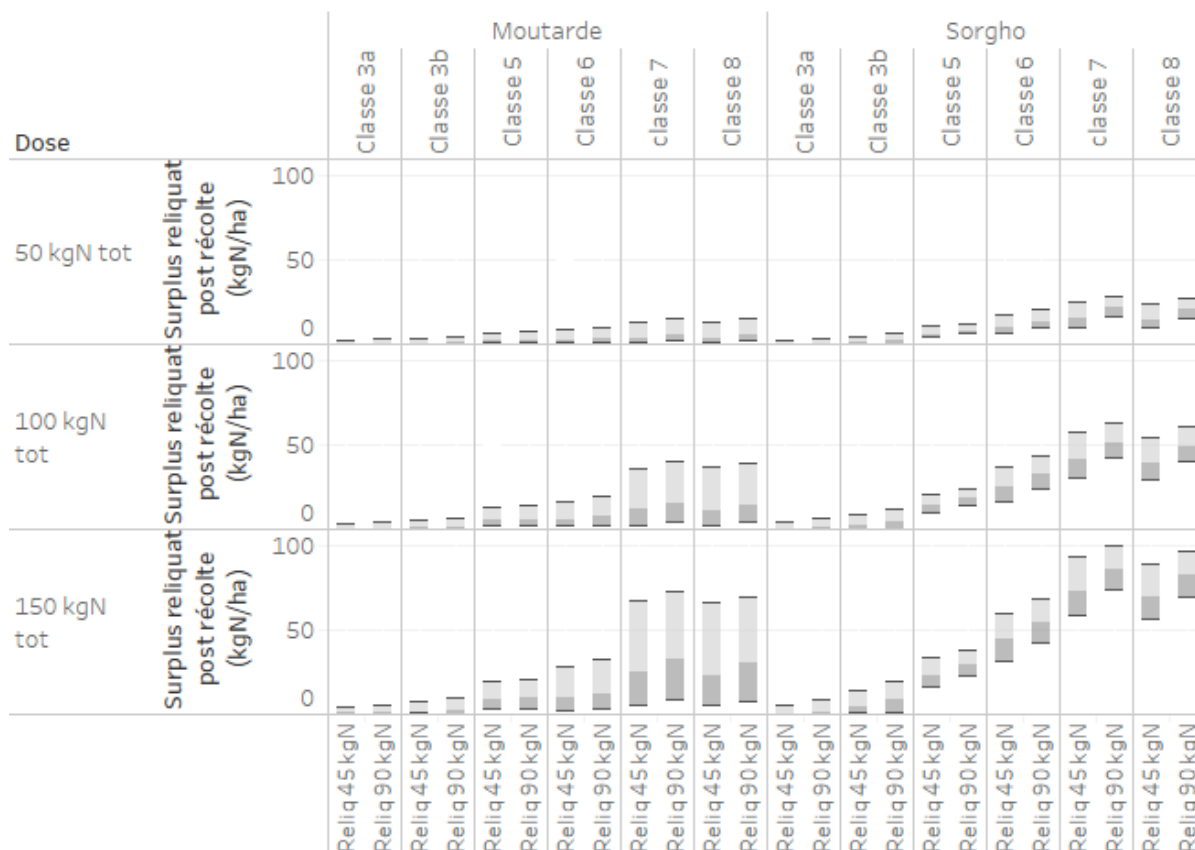


Figure 68 : Surplus d'azote minéral dans le sol à la récolte de la culture intermédiaire (les boxplots présentent les valeurs de centiles 25, 50 et 75)

### 3.8.2.3 Conclusions et discussions

Pour les apports d'engrais minéraux en été, des couverts à forte capacité d'absorption comme la moutarde sont plus à même d'absorber des doses de plus de 100 uN sauf pour des sols qui fournissent déjà plus de 100 kgN pendant l'été ou dans des contextes pédoclimatiques favorables à un stress hydrique important sur la culture. Le sorgho a des besoins en azote plus rapidement satisfaits par des reliquats initiaux élevés et des doses moyennes d'apport.

Dans le cas des classes 6 et 8, une proportion importante de l'azote est apportée sous forme ammoniacale et risque d'être volatilisée si le fertilisant est laissé en surface. Jusqu'à 25% de l'azote apporté peut être perdu. Pour les classes 3 à 5, du fait d'une teneur en azote ammoniacal inférieure à 40%, les pertes par volatilisation restent très modérées pendant l'été, y compris sur des sols à pH >8. L'apport en profondeur diminue fortement les pertes mais il peut être cependant difficile d'enfouir ces produits s'ils sont apportés 15 jours après semis. Bien qu'aucune différence sur les pertes n'ait été constatée entre un produit de classe 3 apporté 15 jours avant ou après semis, l'apport avant semis peut toutefois faciliter l'enfouissement et diminuer le risque de pertes par volatilisation.

Les pertes par lixiviation sont très majoritairement négligeables pendant la période estivale sauf dans certaines conditions pédoclimatiques qui ont pu être précisées dans l'analyse mais les pratiques d'épandage en été peuvent impacter les pertes par lixiviation à l'automne suivant. Les apports de 150 kgN tot en été sur CI semblent peu favorables sauf si la culture suivante est capable d'absorber des

quantités importantes d'azote dès l'automne. Ce constat s'applique à la fois aux fertilisants à minéralisation progressive qui vont minéraliser une part importante de l'azote qu'ils contiennent à l'automne suivant et aux produits à forte teneur en azote ammoniacal que le la CI ne valorisera que partiellement laissant des reliquats post-récolte élevés.

Dans le cas du sorgho, des apports de 100 kgN tot sont également défavorables pour des fertilisants minéraux ou à forte teneur en azote ammoniacal (classe 6, 7 et 8) du fait de besoins plus faibles de la culture par rapport à la moutarde. Les risques restent moindres pour des apports de fertilisants de classe 3 à 5 du fait des quantités disponibles pour la culture (N efficace entre 12 et 33 kgN/ha).

### 3.9 EPANDAGE DE PRINTEMPS DE FERTILISANTS AZOTES SUR CIVE ET DEROBES D'HIVER

#### 3.9.1 Contexte et objectifs

La question des cultures intermédiaires en interculture longue a déjà été en partie traitée dans une précédente situation (Paragraphe 3.2), qui s'intéressait principalement au cas d'un apport organique d'automne sur CIPAN. Le développement de la méthanisation et des cultures à vocation énergétique a conduit à s'intéresser plus spécifiquement aux pratiques de fertilisation sur CIVE d'hiver avec des cas d'apports minéraux ou organiques à l'automne ou en sortie d'hiver. La problématique a par ailleurs été élargie à d'autres couverts valorisés comme des dérobées. L'objectif est ici d'étudier l'effet d'un apport de fertilisant azoté à l'automne et/ou au printemps sur l'absorption de ce couvert, sur l'azote mis à disposition pour la culture suivante et sur les pertes (à la fois par lixiviation et par volatilisation) pendant le cycle de ces cultures intermédiaires.

#### 3.9.2 Simulations de scénarios d'épandage de fertilisants azotés sur CIVE et dérobées d'hiver

##### 3.9.2.1 Plan de simulation et modalités testées

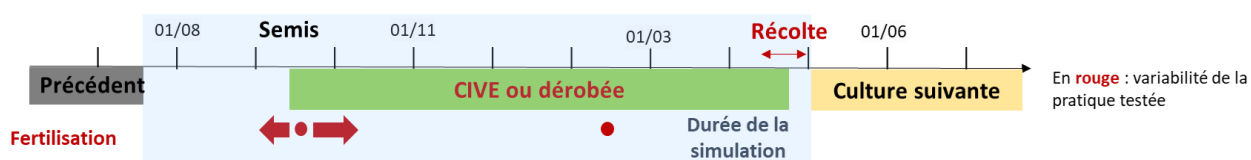


Figure 69 : Schéma chronologique de la situation d'apport de fertilisants azotés sur CIVE ou dérobées d'hiver

Bien que le sujet des CIVE et dérobées soit large, le temps de simulation et la durée contrainte de l'étude ont amené à sélectionner certains scénarios à traiter. Une gamme de conditions pédoclimatiques restreinte par rapport à l'échantillon initial de couples site-sol a été conservée. Sur les 24 sites, 10 ont été retenus par expertise. Cette sélection a été principalement faite en fonction des régions où les cultures à vocation énergétique sont développées ou présentent un potentiel de développement. L'intégration de cultures en dérobées n'a été faite que tardivement dans le plan de simulation et la sélection de site n'a pas été modifiée en conséquence. Il faut toutefois noter la présence de sites situés dans des zones d'élevage et une variabilité pédoclimatique des sites choisis permettant de traiter la problématique dans diverses conditions. Le choix des cultures est partiellement déterminé par les variétés déjà paramétrées dans le modèle STICS ainsi qu'à un certain nombre de tests préliminaires concernant les dynamiques de croissance de ces cultures. L'avoine rude n'a par exemple pas été retenue du fait de sa destruction par le gel dans 55% des simulations, ne rendant la variété paramétrée que peu adaptée à une exploitation en tant que CIVE d'hiver. Le seigle et le triticale ne sont par ailleurs pas présents dans la liste des cultures déjà paramétrées. Les modalités testées sont détaillées dans le tableau 22. Environ 53 000 scénarios sont simulés.



Tableau 22 : Modalités traitées pour la situation d'apport de fertilisants azotés sur CIVE ou dérobées d'hiver

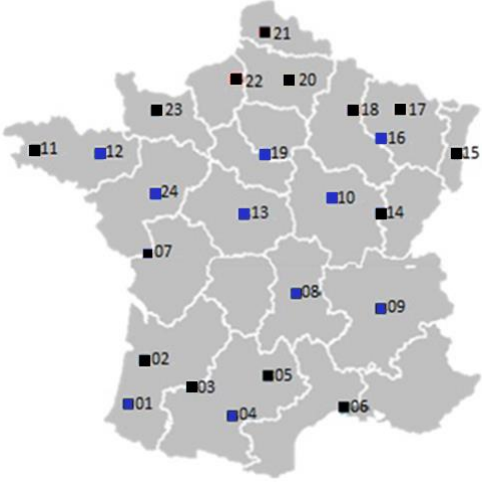
	Modalités testées	Détails
Pédoclimat	Années climatiques Sites et sols	<p>20 années climatiques</p> <p>10 sites retenus à partir de l'échantillon initial de 24 sites par expertise (présence de CIVE d'hiver ou potentiel ainsi que références disponibles) en <b>bleu</b> sur la carte</p> 
Couvert	Espèces, date de fin et destruction/récolte	<p>Espèces testées :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Orge d'hiver cultivée en CIVE</li> <li>- Ray-grass italien cultivé en dérobée</li> </ul> <p>Semis : une modalité au 15/09</p> <p>Récolte : deux modalités 10/04 - 05/05</p>
Initialisation	Conditions de sols (Nsol et humidité)	Azote minéral du sol et humidité à la récolte du précédent : fixés pour chaque site à partir des données de l'étude de 2012 pour un précédent céréale à paille
Fertilisants	Selon la typologie	<p>4 classes de la typologie des fertilisants testés (soit 5 représentants) :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Fertilisants organiques : <ul style="list-style-type: none"> <li>○ classes 3a et b</li> <li>○ classe 5</li> <li>○ classe 6</li> </ul> </li> <li>- Fertilisants minéraux : classes 7 et 8</li> </ul>
Pratiques d'apport	Quantité, dates, enfoui ou non	<p>Quantité et dates d'apport :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Témoin sans azote</li> <li>- 50 kgNtot/ha à l'ouverture du bilan (15/02)</li> <li>- 100 kgNtot/ha à l'ouverture du bilan (15/02)</li> <li>- Formes organiques : 25 kgN eff/ha au semis + 80 kgNtot/ha à l'ouverture du bilan (15/02)</li> </ul> <p>Mode d'apport : apport en surface ou en profondeur testé systématiquement</p>

Tableau 23 : Equivalences entre quantité d'azote, azote efficace pendant la durée du couvert et volumes apportés pour les différents produits organiques dans les simulations

Classe	Description produit	Volume (t/ha)*	Azote total (kgN/ha)*	Azote efficace (kgNeff/ha) sous CI
3	Produit à minéralisation lente et présentant une phase transitoire d'immobilisation	7.4	<b>50</b>	
		11.8	<b>80</b>	-
		14.8	<b>100</b>	-
		20	137	<b>25</b>
	Produit à minéralisation lente sans phase transitoire d'immobilisation	9.2	<b>50</b>	-
		14.8	<b>80</b>	-
		18.4	<b>100</b>	-
		20	108	<b>25</b>
5	Minéralisation importante et rapide	1.3	<b>50</b>	-
		1.8	70	<b>25</b>
		2.1	<b>80</b>	-
		2.6	<b>100</b>	-
6	Forte proportion d'azote minéral	7.5	43	<b>25</b>
		8.8	<b>50</b>	-
		14.1	<b>80</b>	-
		17.6	<b>100</b>	-

\* Ces valeurs ont un caractère indicatif car dépendantes du produit apporté et donc du représentant choisi dans les simulations pour chaque classe de produit (ex : fumiers de bovins pour la classe 3 et lisier de porcs pour la classe 6)

### 3.9.2.2 Résultats de simulation et analyse

#### **Azote fourni par le fertilisant azoté pour la CIVE ou dérobée d'hiver**

Dans le cas des classes d'engrais 7 et 8, l'azote est entièrement sous forme minérale et donc potentiellement entièrement disponible pour la culture pendant son cycle. Pour les classes 3, 5 et 6 également testées ici, il s'agit de fertilisants organiques qui libèrent de l'azote minéral avec des dynamiques différentes. Le plan de simulation ayant été construit à partir de doses d'azote total apporté ou de doses d'azote efficace, la figure ci-dessous indique les quantités d'azote minéral fourni par les différents fertilisants organiques pendant la durée de la culture intermédiaire selon la dose apportée.

Pour des apports de fertilisants à minéralisation lente (classe 3a et 3b) en sortie d'hiver, les quantités d'azote mises à disposition restent très faibles et dépendent essentiellement de l'azote minéral initialement contenu dans le fertilisant compris entre 15 et 25% de l'azote total pour les représentants de ces classes paramétrés dans STICS. Il faut cependant noter que dans la typologie proposée pour cette étude, les teneurs peuvent varier entre 0 et 40% d'azote minéral. La quantité d'azote disponible pour la CI d'hiver pourrait donc s'avérer un peu plus élevée mais il restera majoritairement disponible pour la culture suivante. Dans les scénarios où ces fertilisants sont apportés en grande partie dès le semis, on constate bien une augmentation de l'azote minéral disponible pour la CI en particulier pour les fertilisants de la classe 3b qui ne présentent pas de phase préalable d'immobilisation mais cette augmentation reste faible ramenée à la quantité totale d'azote apporté. Lorsqu'ils sont apportés en sortie d'hiver, les produits de classe 5, caractérisés par une minéralisation rapide, fournissent autour de 30% de l'azote total apporté avec le représentant paramétré dans STICS. Mais cette proportion peut

s'avérer plus élevée pour des produits à plus forte teneur en azote minéral (ici autour de 10%). On constate que l'azote mis à disposition provient majoritairement (70%) de la minéralisation d'azote organique contrairement aux produits de classe 3. En cas d'apport partiel du fertilisant au semis de la CI suivi d'un complément en sortie d'hiver, les quantités d'azote minéral fournies augmentent du fait de volumes plus importants épandus mais ramenée à la dose d'azote, cette augmentation reste à nouveau modérée (on passe de 30 à 33%).

Pour les produits de classe 6, pour lesquels l'azote est à plus de 40% sous forme minérale, l'azote disponible pour la CI d'hiver provient essentiellement de la part minérale initiale contenue dans le produit. Un apport en été-automne au semis ou en sortie d'hiver n'impacte pas la proportion d'azote mis à disposition.

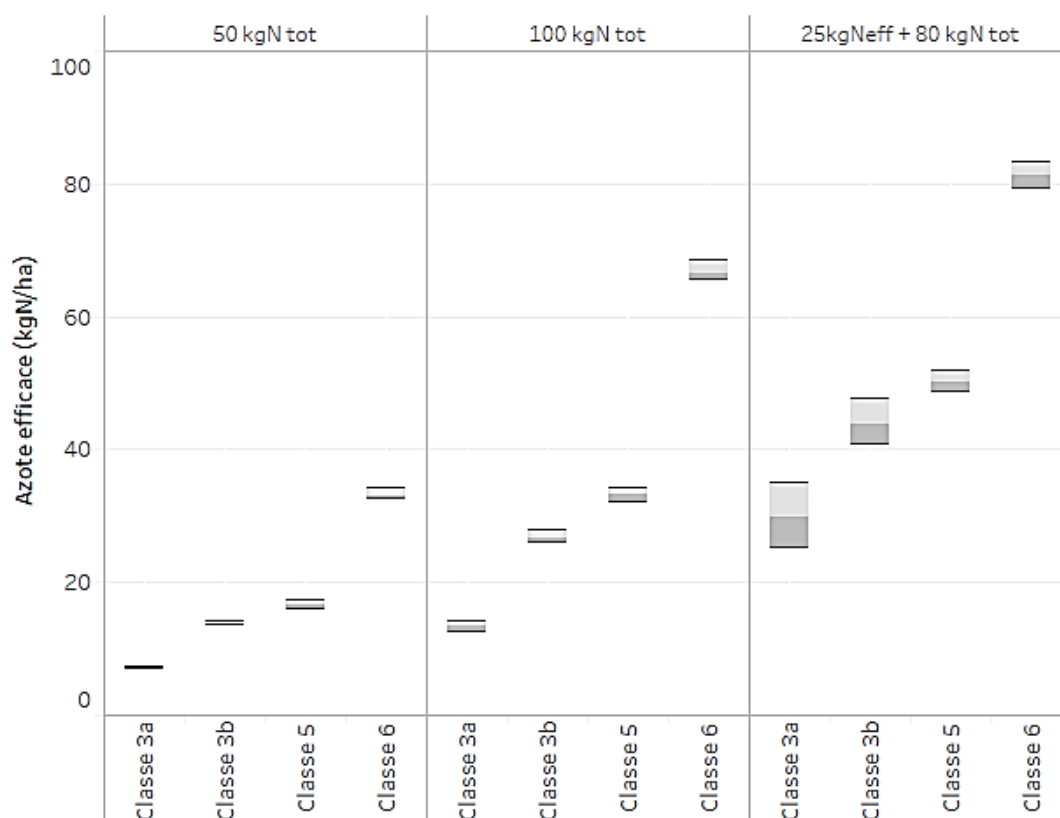


Figure 70 : Azote efficace disponible pour la culture intermédiaire selon la classe de fertilisant et la quantité de fertilisant apporté (les boxplots présentent les centiles 25, 50 et 75)

### **Croissance et absorption des CIVE et dérobées d'hiver**

De manière générale, en absence d'épandage de fertilisants, la biomasse et l'azote accumulés par l'orge d'hiver dans les simulations sont supérieurs à ceux du raygrass italien. L'orge absorbe en valeur médiane entre 91 et 100 kgN/ha selon la date de récolte (avril ou mai) alors que 66 à 72 kgN/ha sont absorbés par le raygrass. On constate par ailleurs une variabilité importante de croissance selon les sites et sols de l'échantillon avec un comportement relativement similaire des deux cultures comme le montre la figure 71 synthétisant les résultats pour les scénarios témoins.



Ces résultats sont complétés dans la suite du document par l'analyse des pertes azotées.

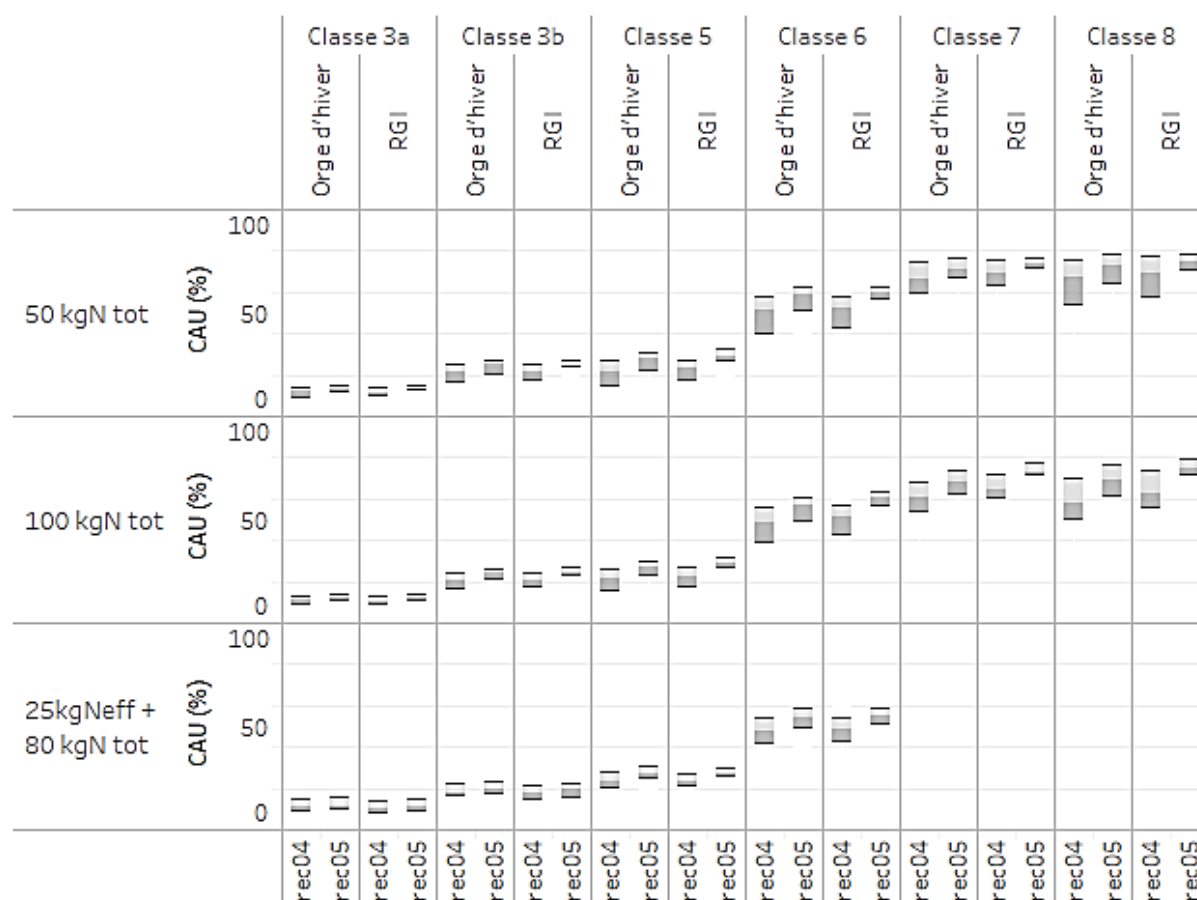


Figure 72 : Coefficient apparent d'utilisation (% N total apporté) selon la culture la classe de fertilisant, la dose et la date de récolte (les boxplots présentent les valeurs de centiles 25, 50 et 75)

**Effet des pratiques d'apports en fin d'été sur les pertes azotées**

Concernant la lixiviation hivernale, les pertes sont très variables d'un site à un autre comme cela a déjà pu être montré dans d'autres situations. La figure 73 illustre ces constats dans le cas des scénarios témoins.

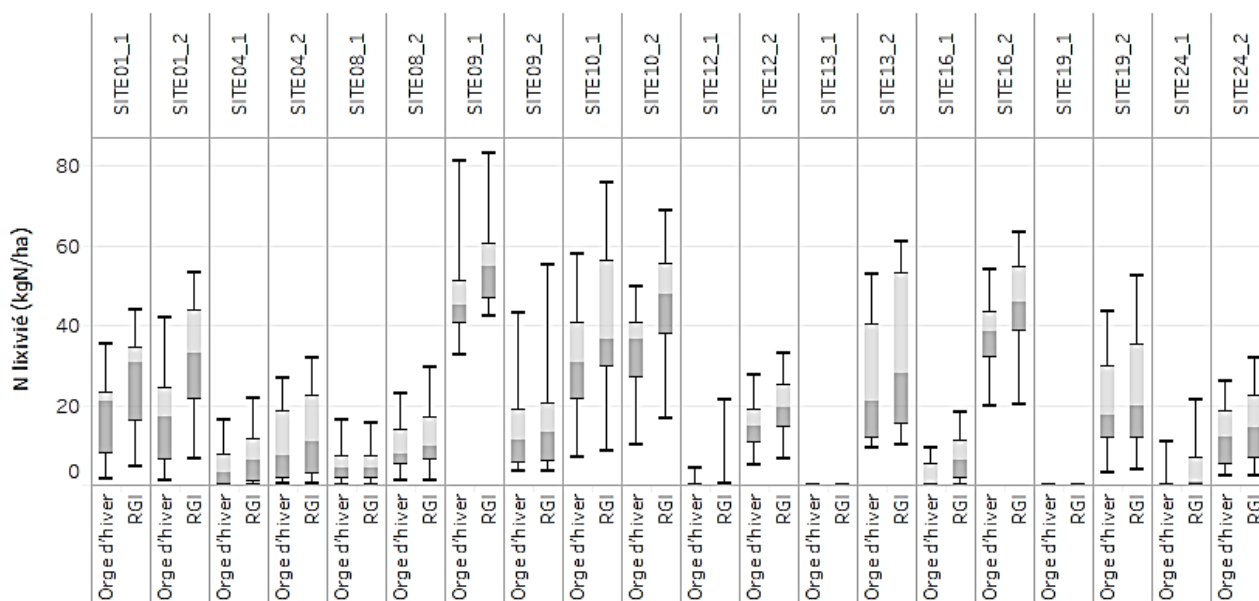


Figure 73 : Pertes par lixiviation entre le 01/10 et le 15/03 selon le site-sol et la culture en place en l'absence d'apport de fertilisant (les boxplots présentent les valeurs minimales et maximales ainsi que les valeurs de centiles 25, 50 et 75)

Les quantités lixiviées dépendent fortement des quantités d'azote dans le sol et minéralisé pendant la période ainsi que des précipitations et du caractère drainant du sol (résultats détaillés en annexe 9.2). Elles varient entre 0 et 50 kgN/ha en valeur médiane selon les sites-sols.

En cas d'apport de fertilisants organiques de classes 3, 5 ou 6 en fin d'été, une analyse des surplus de pertes par lixiviation a été effectuée. Les quantités d'azote supplémentaires perdues pendant l'hiver restent inférieures à 5kgN/ha dans la grande majorité des simulations mais on constate des combinaisons de pratiques et de conditions pédoclimatiques menant à des pertes supplémentaires de 10 à 25 kgN/ha.

- Elles concernent tout d'abord les sols et sites déjà identifiés lors de l'analyse des scénarios témoins comme à fort risque de lixiviation soit du fait des volumes de drainage élevés (comme les sols du site des Landes avec près de 500 mm de drainage en valeur médiane pendant l'hiver) ou moyens mais accompagnés d'une minéralisation de l'humus relativement importante (par exemple le site 09\_1 avec un drainage médian de 250 mm et une minéralisation basale de plus de 100 kgN/ha pendant l'interculture).
- Les années concernées sont également marquées par une absorption des couverts avant le 31/12 inférieure à la médiane d'absorption sur chacun de ces sites. Pour ces simulations avec faibles absorptions et niveaux de lixiviation importants, un retard à la levée ne semble pas être un facteur explicatif. Il s'agit plutôt d'une faible absorption liée aux conditions climatiques à l'automne et en hiver.
- Les apports de classe 3a ne sont pas concernés par ces situations à risque.

Les apports au semis génèrent également des pertes par volatilisation. Elles restent également généralement faibles de moins de 5kgN/ha en particulier pour des sols à  $\text{pH} \leq 6$  ou si le fertilisant est immédiatement enfoui. Toutefois pour des apports en surface sur des sol à  $\text{pH} > 6$ , la volatilisation peut dépasser 10 voire 15 kgN/ha. Comme le montre la figure 74, cette situation plus à risque concerne les apports de fertilisants de classes 3 et 6. La classe 5 génère une volatilisation moindre du fait des plus faibles volumes nécessaires pour mettre à disposition de la CI environ 25 kgN efficace et des teneurs en azote ammoniacal bien inférieures à celles de la classe 6. Pour les produits de classe 3, les pertes

par volatilisation peuvent s'avérer élevées du fait des volumes importants apportés mais si l'on ramène les pertes à la quantité d'azote total apporté, les pertes relatives sont deux fois moins importantes que pour la classe 6.

Le reste de la variabilité observée dépend de l'année climatique considérée. Les indicateurs utilisés pour décrire les conditions climatiques dans les 15 jours qui suivent l'apport (dont le cumul de précipitations) n'ont pas permis d'apporter d'éléments complémentaires à cette analyse. Les résultats d'expérimentations menées ont cependant montré l'effet de la pluviométrie sur la diminution de la volatilisation et l'augmentation de l'efficacité de l'engrais. Dans des essais menés par Arvalis en 1995 et 1997 pour différentes formes d'engrais, le seuil de 20 mm de précipitations cumulées dans les 20 jours suivant l'apport permettait d'assurer une valorisation satisfaisante d'un apport d'engrais azoté que le sol soit sec ou humide au moment de l'apport.

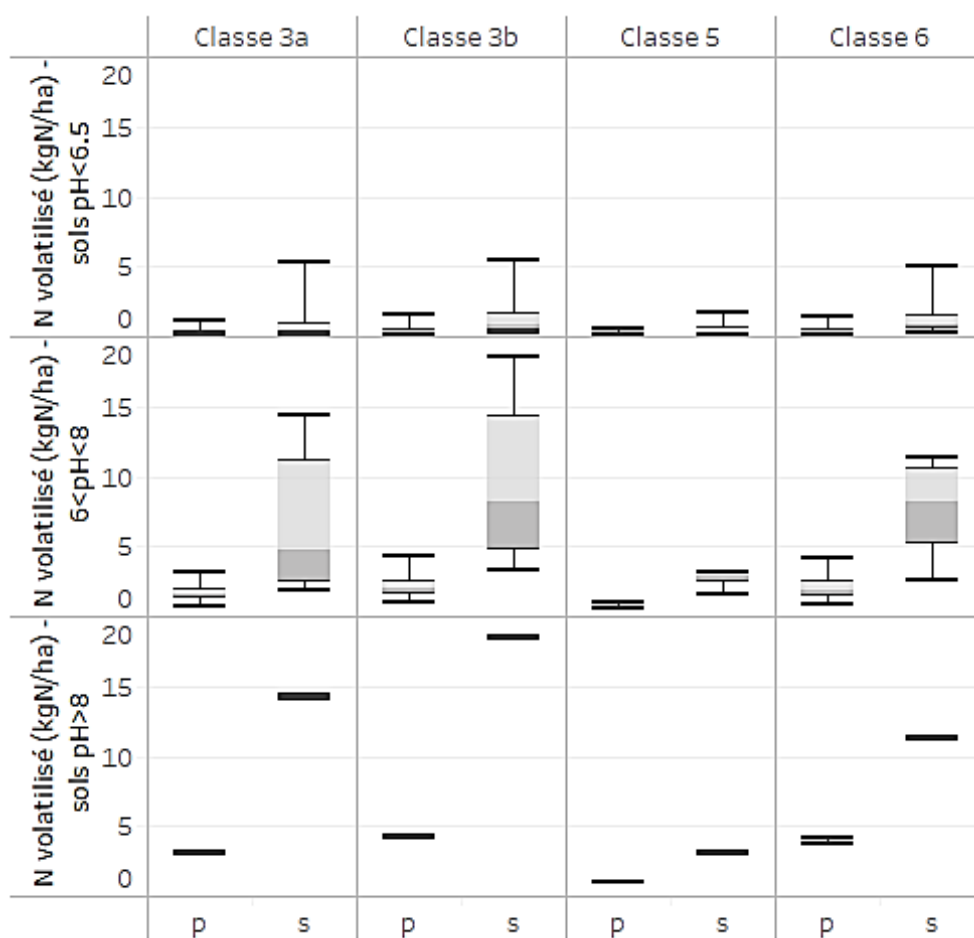


Figure 74 : Azote volatilisé suite à un apport de fertilisant organique au semis de la culture intermédiaire (les boxplots présentent les valeurs minimales et maximales ainsi que les valeurs de centiles 25, 50 et 75)

### Effet des pratiques d'apports en sortie d'hiver sur les pertes azotées

Après la mi-février et jusqu'à la récolte des cultures intermédiaires, les pertes par lixiviation des scénarios témoins sont faibles. Sur la majorité des sites, elles ne dépassent pas 5 kgN/ha pour 75% des simulations et les années les plus extrêmes n'atteignent pas plus de 10 kgN/ha. Seuls certains sites de la moitié nord de la France (10\_1, 13\_2 et 16\_1 et 19\_2) présentent quelques années avec des pertes de plus de 10kgN/ha.

En cas d'apport de fertilisant azoté au 15/02, les surplus de lixiviation sont négligeables (centiles 75 de moins de 1 kgN/ha sur l'ensemble des sites). Seul le site 09\_1 en Isère présente quelques années des pertes supplémentaires pouvant atteindre 20 kgN/ha en cas d'apport de 100 uN de fertilisants minéraux, en lien avec des fournitures d'azote importantes par le sol, une pluviométrie également importante dans le mois qui suit l'apport et une reprise de croissance encore limitée à cette période sur ce site.

Les pertes par volatilisation restent modérées dans la majorité des cas (Figure 75). En termes de leviers pour limiter les pertes par volatilisation, on peut faire les mêmes constats que pour les apports d'automne mais les apports en profondeur peuvent poser plus de problèmes techniques à ce stade de développement des cultures qu'au semis.

En cas d'apport non enfoui, les classes 3 à 5 génèrent des pertes médianes de l'ordre de 2 à 5% de l'azote total apporté. Pour ces classes, il faut rappeler que les représentants paramétrés dans STICS dans le cadre de cette étude ne représentent pas toute la variabilité au sein d'une classe, en particulier concernant la teneur en azote ammoniacal mais la typologie élaborée distingue les classes 1 à 5 de la classe 6 du fait d'une teneur en azote ammoniacal inférieure à 40%. Les représentants paramétrés ici ont des teneurs entre 8 et 25%. Les pertes les plus extrêmes atteintes pour ces fertilisants sont de 17kgN/ha volatilisés pour des apports de 100 kgN<sub>tot</sub> en surface en sortie d'hiver sur sol basique (soit 17% de cet apport total).

Dans le cas des classes 6 et 8, une proportion importante de l'azote est apportée sous forme ammoniacale. Les pertes médianes simulées pour la classe 6 varient, selon la dose apportée, de 4 à 7 kgN/ha volatilisés en cas d'apport en surface (soit de l'ordre de 7% de l'azote total apporté) mais peuvent dépasser 10 kgN/ha dans une part non négligeable de conditions pédoclimatiques. En revanche en cas d'apport enfoui, les quantités volatilisées restent inférieures à 10 kgN/ha même dans les contextes les plus favorables à ce phénomène. Pour la classe 8, les pertes par volatilisation médianes et extrêmes sont plus importantes et représentent respectivement 8 et 25 % de l'azote apporté en cas d'apport en surface. Du fait de teneurs plus faibles en azote ammoniacal, les fertilisants minéraux de classe 7 génèrent de plus faibles pertes par volatilisation : deux fois moins importantes dans le cas de l'ammonitrate, représentant utilisé dans les simulations pour cette classe.

On constate qu'en cas d'apport de fertilisants de classe 6 en sortie d'hiver plutôt qu'en automne, la proportion d'azote volatilisée par rapport à l'apport total diminue. Pour les classes 3 et 5, il n'y a en revanche pas de différences de pertes par volatilisation (ramenées à la dose) entre des apports de fin d'été et des apports de sortie d'hiver. Les fertilisants minéraux (classe 7 et 8) n'ont été apportés qu'en sortie d'hiver dans les scénarios élaborés : aucune comparaison automne/sortie d'hiver n'a été faite pour ces classes de produits.



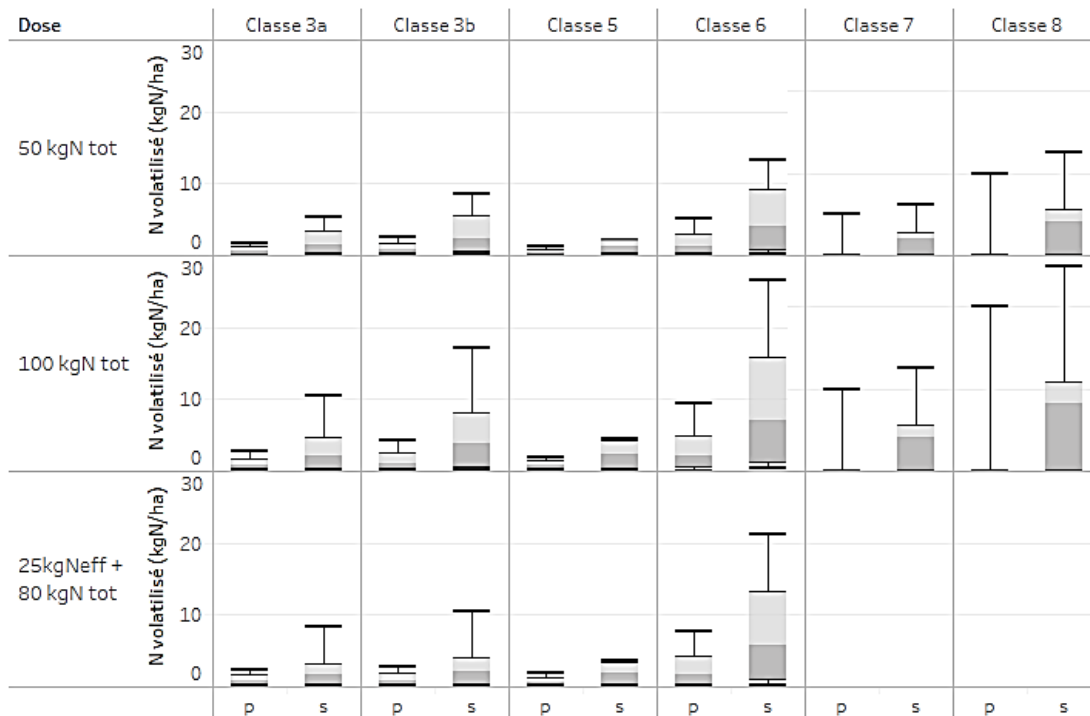


Figure 75 : Azote volatilisé suite à un apport de fertilisant en sortie d'hiver (les boxplots présentent les valeurs minimales et maximales ainsi que les valeurs de centiles 25, 50 et 75)

### L'azote dans le sol à la récolte de la CIVE ou de la dérobée

Entre mi-avril et début mai, à la récolte de la culture intermédiaire, les reliquats post-récolte simulés varient entre 10 et 50 kgN en valeur médiane selon les pratiques de fertilisation. On observe une variabilité importante autour de ces valeurs médianes selon la fourniture d'azote par les sols. Si l'on s'intéresse plus spécifiquement aux quantités supplémentaires d'azote minéral laissées dans le sol à la récolte de la CIVE ou de la dérobée, on constate des écarts importants selon les pratiques et la date de récolte de la culture (Figure 76). Dans le cas d'une récolte tardive à la mi-mai, les quantités supplémentaires restent modérées quelle que soit la pratique de fertilisation testée du fait d'une valorisation plus conséquente des apports pendant les dernières semaines d'exploitation. En revanche en cas de récolte plus précoce en avril, les apports de 100 kgN tot en sortie d'hiver de fertilisants minéraux ou organiques à forte proportion d'azote minéral (classe 6), laissent des surplus de reliquats élevés (plus de 20 kgN supplémentaires en valeur médiane) qui seront à prendre en compte pour la culture suivante. Les pratiques d'apports fractionnés entre l'automne et la sortie de l'hiver génèrent de faibles surplus de reliquats malgré des volumes plus importants apportés.

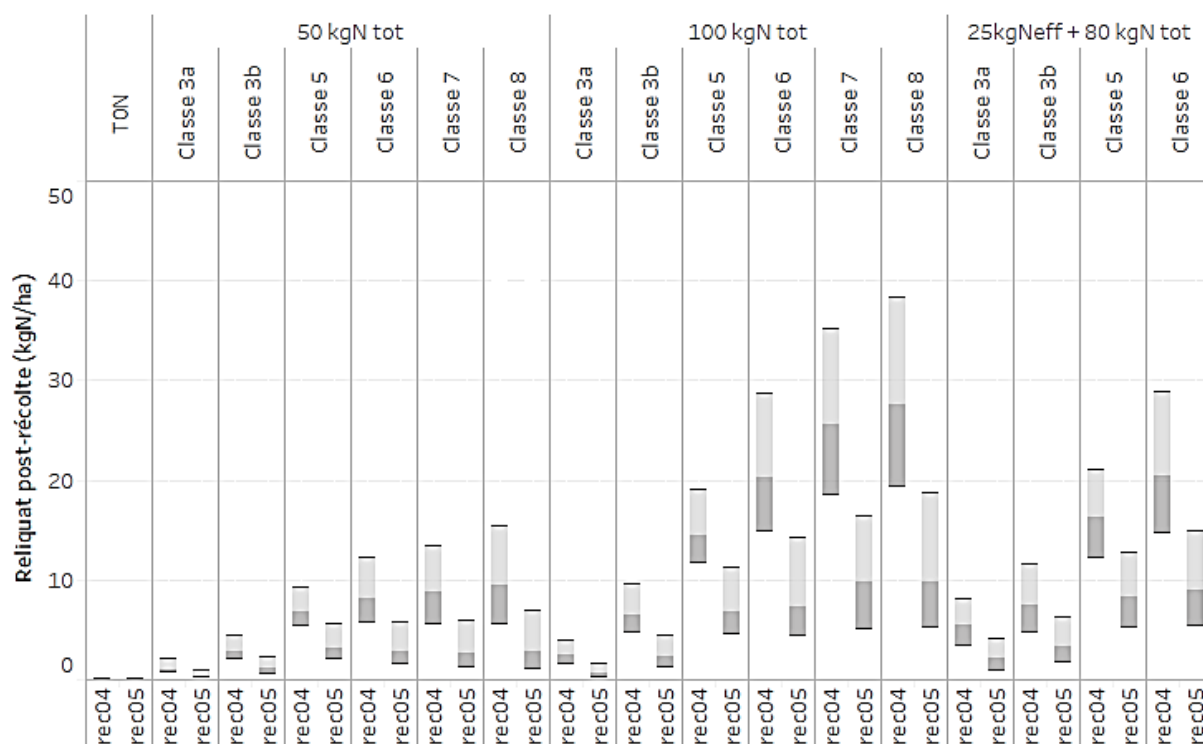


Figure 76 : Quantités d'azote minéral supplémentaires dans les sols à la récolte de la culture intermédiaire selon les pratiques de fertilisation et la date de récolte (rec04 : 10/04 ; rec05 : 05/05) (les boxplots présentent les valeurs de centiles 25, 50 et 75)

### 3.9.2.3 Conclusions et discussions

Les pratiques d'épandage de fertilisants azotés en deux apports dont un au semis de la CI et un en sortie d'hiver ont permis d'augmenter la croissance des cultures du fait d'une dose totale apportée plus conséquente. L'efficacité de ces apports sur l'absorption, évaluée au travers du CAU, s'est avérée identique aux scénarios d'apports uniques en sortie d'hiver pour les produits organiques à faibles teneurs en azote ammoniacal. En revanche, en cas d'un apport de classe 6, cette efficacité diminue accompagnée d'une augmentation de la proportion d'azote volatilisé en cas d'apport en surface. On constate en outre une faible absorption des cultures jusqu'à la mi-octobre qui augmente le risque de lixiviation en particulier pour cette classe de produits libérant très rapidement l'azote minéral. Les apports au semis facilitent en revanche l'enfouissement du fertilisant, limitant ainsi fortement les pertes par volatilisation.

Pour les apports de fertilisants à minéralisation lente (classe 3), il faut noter que, quelle que soit la période de l'apport, l'azote reste majoritairement disponible pour la culture suivante et non pour la culture intermédiaire. Pour que la CI d'hiver bénéficie de l'azote du fertilisant épandu, l'apport au semis permet tout de même une légère augmentation de l'azote disponible sous CI pour ces types de produits.

Les apports de fin d'été sur CIVE ou dérobées d'hiver semblent donc favorables pour les fertilisants à minéralisation progressive (classes 3 à 5) en particulier lorsqu'ils sont directement enfouis. Certaines conditions pédoclimatiques semblent toutefois à considérer avec plus de précautions comme les pédoclimats favorisant des volumes très importants de drainage hivernal (par exemple dans l'échantillon testé, les sols des Landes avec plus de 500 mm drainés dans 50% des cas) ou des sols à forte minéralisation qui couvrent déjà une grande partie des besoins des cultures. Dans ces conditions, une absorption faible à modérée de la culture peut mener à des pertes plus conséquentes. L'analyse n'a pas permis d'identifier des indicateurs climatiques précis pour expliquer les situations de faibles absorptions associées à une augmentation de la lixiviation mais elle a montré que la date de levée

n'est pas le facteur explicatif dans ce cas. Il s'agit plutôt des conditions de température et de rayonnement à l'automne favorisant le maintien de l'absorption de la culture.

Les apports uniques de sortie d'hiver sont plus favorables pour les fertilisants minéraux et de classe 6 sans générer des pertes par lixiviation importantes et avec des pertes par volatilisation plus faibles qu'en fin d'été. Des doses de 100kgN total ne sont en revanche que très partiellement valorisées par la culture si cette dernière est récoltée dès avril.

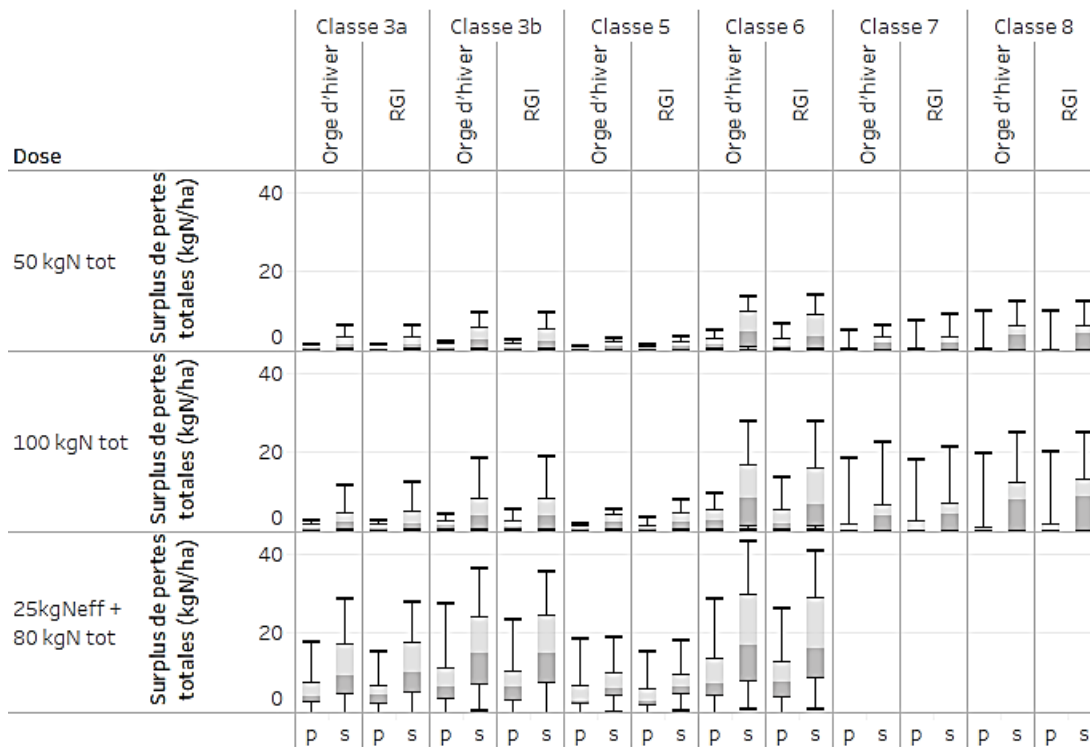


Figure 77 : Pertes totales par lixiviation et volatilisation sur le cycle cultures des CIVE et dérobées

### 3.10 ANALYSE GLOBALE ET DISCUSSIONS

#### 3.10.1 Analyse générale des différentes situations et mise en perspective

Les analyses réalisées à partir des 8 situations simulées et des références scientifiques complémentaires étudiées ont pour objectifs d'identifier des pratiques de fertilisation et en particulier des périodes plus favorables à la croissance des cultures et la limitation des pertes par lixiviation ou volatilisation en prenant également en compte d'autres modalités telles que les conditions pédoclimatiques ou encore les dates de semis. Les analyses des résultats de simulation se sont surtout focalisées sur l'étude des tendances d'évolution des valeurs médianes et centiles 25 et 75 d'un certain nombre d'indicateurs. Les valeurs extrêmes sont selon les situations traitées pour s'intéresser à l'effet de la variabilité climatique et l'identification de contextes pédoclimatiques extrêmes à risque. Pour s'affranchir d'une possible surestimation ou sous-estimation du modèle pour certains flux, les résultats sont principalement comparés les uns aux autres afin d'observer les écarts obtenus selon l'évolution des différentes modalités testées plutôt que de traiter les valeurs absolues simulées. Cette précaution a également été prise dans d'autres études comme dans (Graux et al. 2017) qui privilégie une comparaison des scénarios simulés. Cependant afin de donner quelques ordres de grandeurs de croissance des cultures et des niveaux de pertes, les variables de biomasse, d'absorption et de lixiviation sont présentées en valeurs absolues pour les scénarios témoins et permettent de positionner les surplus obtenus en cas d'apport par rapport à ces niveaux initiaux dans les différents contextes pédoclimatiques testés.

Dans chaque situation, toutes les modalités testées n'ont pas fait l'objet d'une analyse approfondie (par exemple différentes valeurs d'initialisation des teneurs en eau et en azote dans le sol, semis et destruction d'un couvert ...) mais elles permettent d'intégrer la variabilité des pratiques dans le jeu de scénarios testés et dans l'analyse des résultats de simulation.

Concernant les épandages d'automne et d'hiver, l'étude de 2012 avait déjà traité différentes situations (apports d'azote minéral en hiver sur céréales d'hiver, apports de fertilisants organiques à l'automne avant semis d'un blé ou d'un colza et sur prairie). Ces situations ont été en partie reprises dans cette étude afin d'apporter des éléments quant aux pertes par volatilisation ou pour tester des pratiques de fertilisation complémentaires (par exemples, une fertilisation minérale plus modérée sur colza ou une plus large gamme de conditions pédoclimatiques et de fertilisants sur prairie). En complément de ces situations adaptées et complétées, 5 situations supplémentaires ont été traitées. Elles concernent principalement l'étude des apports organiques et minéraux avant ou sur maïs ainsi que sur différents couverts en interculture longue ou courte, qu'ils soient destinés ou non à la valorisation.

Les simulations faites ont permis d'aborder la question des effets de pratiques de fertilisation sur les pertes azotées à l'échelle d'une parcelle et en considérant la variabilité temporelle. Cependant cela pourrait être complété en prenant en compte à la fois la variabilité spatiale et temporelle des pertes dues à la fertilisation azotée, permettant d'expliquer des phénomènes de concentration des polluants dans l'eau ou dans l'air à l'échelle d'un territoire. Dans le cas de la lixiviation, les pertes restent fortement liées au phénomène de drainage, principalement en automne et en hiver dans la majorité des régions, ce qui concentre les pertes sur ces périodes. L'impact sur la qualité de l'eau sur un territoire dépendra cependant également de nombreuses caractéristiques pédologiques, géologiques, hydrologiques et d'occupation du territoire. La répartition des exploitations selon leur orientation technico-économique fait apparaître des grandes zones d'élevage et de polyculture-élevage où les effluents sont fortement utilisés pour la fertilisation ainsi que des bassins de grandes cultures dans lesquels l'azote minéral de synthèse est pratiquement la seule ressource en azote exogène. La pression

en azote est donc fortement variable sur le territoire français avec des régions à forte pression en azote organique (principalement Bretagne, Pays de la Loire et Normandie) et des zones de grandes cultures présentant une pression en azote minéral de plus de 100kgN/ha (Bassin parisien, Centre, Alsace, Charentes) comme le montre la figure 78. Selon la zone où les pratiques de fertilisation sur une culture sont considérées, les impacts sur la qualité de l'eau du territoire seront également dépendants de la concentration de cette pratique ou au contraire d'une dilution sur le territoire. Par exemple, dans le cas du colza, l'effet d'un épandage organique à l'automne a été étudié. Les zones sur lesquelles le colza est le plus répandu (à l'ouest de la région Grand Est, Bourgogne-France Comté et Val de Loire et le nord de la Nouvelle-Aquitaine) correspondent à des zones à faibles pressions en azote organique (souvent inférieure à 25 kgN/ha de SAU) voire à faible pression en azote minéral également. Les pertes liées à des apports modérés à l'automne de fertilisants organiques à libération rapide d'azote se sont avérées plus élevées que pour des scénarios de fertilisation minérale mais ces pratiques restent certainement plus diluées sur ces territoires limitant son impact sur la qualité de l'eau à l'échelle d'un territoire.

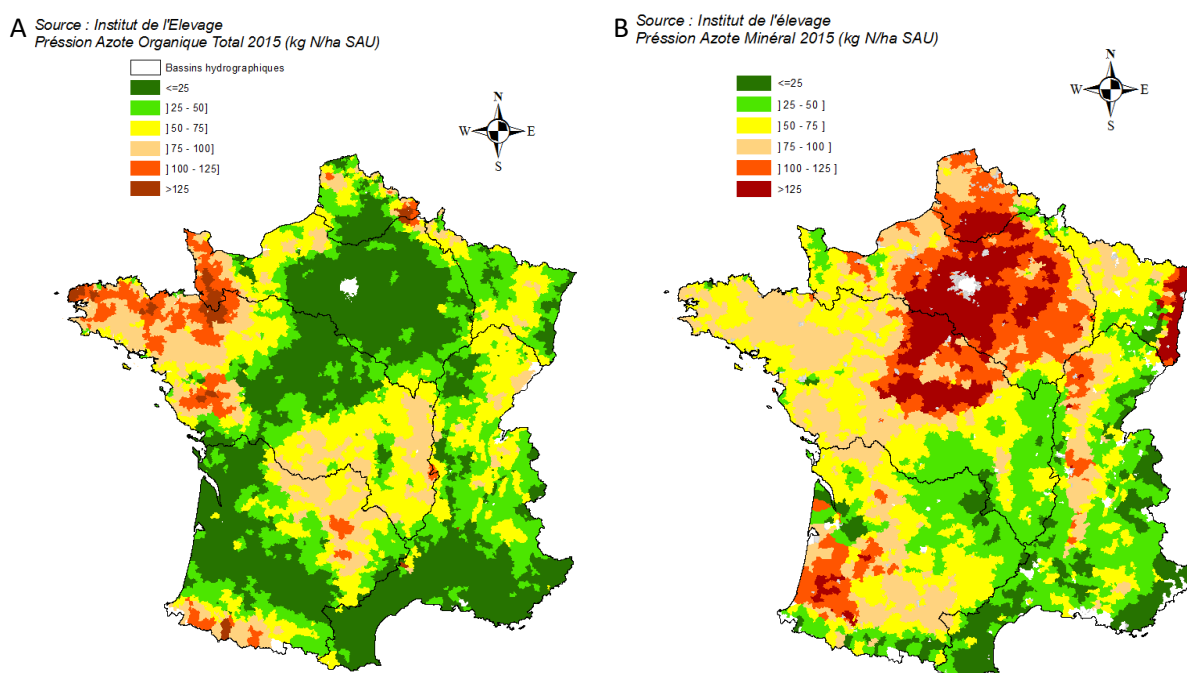


Figure 78 : Cartes des pressions en azote organique (A) et minéral (B) (Source : Idele)

Pour ce qui est de la volatilisation, une méthode a été récemment développée afin de modéliser la variabilité spatio-temporelle des émissions dues à la fertilisation azotée, l'outil CADASTRE\_NH3 (Ramanantenasoa et al. 2018). Cet outil s'appuie sur l'utilisation conjuguée de deux ressources : le modèle Volt'Air (modèle de prédiction des émissions ammoniacales au pas de temps horaire et à l'échelle parcellaire) et des données géoréférencées permettant de décrire des caractéristiques pédoclimatiques et des pratiques culturales sur un territoire. Une telle méthode a permis d'estimer les émissions annuelles à l'échelle de la France (270 Gg NH<sub>3</sub>) ou d'une région, d'une autre manière que les inventaires nationaux mais également de représenter la distribution spatio-temporelle de ces pertes. Ramanantenasoa et al. (2018) ont présenté cela au travers d'un exemple en région Rhône-Alpes pour l'année culturale 2005-06. La comparaison de la distribution sur l'année de la fertilisation azotée et des émissions ammoniacales simulées montre la concentration importante des émissions (avec des pics importants certains jours de plus de 100 tNH<sub>3</sub>.j<sup>-1</sup>) entre début février et le début de l'été certes liée à des concentrations plus favorables aux émissions mais aussi à une concentration des apports à la fois minéraux et organiques sur cette période. Entre septembre et décembre, des émissions sont également simulées mais à des niveaux bien plus faibles (<20 tNH<sub>3</sub>.j<sup>-1</sup>) y compris sur le mois de

septembre pour lequel les conditions climatiques restent probablement favorables à la volatilisation. Les cumuls des quantités apportées sur cette période sont par ailleurs bien moins importants qu'au printemps. Ces représentations mettent en avant l'effet d'une concentration des apports pendant une période relativement restreinte sur les pics d'émissions dans l'air à l'échelle d'une région mais aussi à l'échelle nationale.

### 3.10.2 Discussions sur les limites de l'étude (modèle, choix méthodologiques)

#### Les pratiques d'incorporation, d'injection et le matériel d'apport :

Il n'a pas été possible de distinguer dans STICS les apports selon le matériel utilisé (par exemple : injecteurs, pendillards ou buses palettes). Seules deux modalités très contrastées ont été analysées : un produit apporté et laissé à la surface du sol et un produit incorporé immédiatement à plus de 5 cm de profondeur. Les cas d'incorporation 24h après apport n'ont pas non plus été traités dans cette étude. Cependant d'autres travaux permettent de donner quelques ordres de grandeur sur l'effet des diverses méthodes d'apport. Concernant l'efficacité de l'incorporation en post-application à 24h sur la volatilisation, l'utilisation de l'outil CADASTRE\_NH3 donne des niveaux d'efficacité à 49% pour le lisier de porc et 23% pour le lisier de bovin. Smith et al (2009) ont quant à eux évalué une réduction des pertes de 42% et 31% en cas d'incorporation respectivement à 24h et 48h.

Les périodes d'épandage sont également déterminées par la disponibilité du matériel. Selon si l'agriculteur possède ou non ce matériel, le travail sera réalisé par l'agriculteur ou par un tiers. Ces éléments ont des effets importants sur les plages de jours disponibles pour les épandages. La question de la disponibilité des équipements est encore peu traitée dans la littérature malgré un rôle déterminant pour la capacité à utiliser des fertilisants organiques.

#### La variabilité pédoclimatique testée :

Bien que l'échantillon des 24 sites x 2 sols issu de la précédente étude permette de prendre en compte une certaine variabilité à l'échelle nationale des comportements combinés du sol et du climat, il ne permet pas de prendre en compte de manière assez fine la variabilité dans chaque région. De plus, dans le cas d'un échantillon de sols commun à tous les types de cultures testés, on constate parfois que ces sols ne sont pas toujours les meilleurs représentants des sols rencontrés pour une culture donnée. C'est le cas par exemple dans cette étude pour le colza et les prairies.

Les situations de ruissellement des pluies dans les zones à relief marqué, particulièrement intéressantes dans le cas des prairies, n'ont pas été traitées dans cette étude. Il conviendrait cependant de vérifier la capacité de STICS à prendre en compte ce facteur. En effet, l'étude sur les prairies françaises de 2017 avait déjà fait ressortir ces limites dans l'utilisation faite de l'outil, menant à des possibles surestimations de la production dans les zones de montagne.

#### Les fertilisants azotés dans les plans de simulation :

Afin de représenter les différentes classes proposées dans la typologie des fertilisants azotés (cf. section 2), un (parfois deux) représentant a été paramétré pour être utilisé dans les simulations réalisées avec le modèle STICS. Ce choix méthodologique comporte cependant des limites : la variabilité au sein d'une même classe n'est pas considérée ici. Il aurait pu être intéressant de proposer systématiquement deux représentants par classe, illustrant la gamme de variabilité qui existe au sein d'une classe mais ce travail n'a pas pu être fait compte tenu de sa lourdeur. Il faut noter en outre que le représentant de la classe 4 présentait une dynamique de minéralisation plus faible que ce qui était initialement envisagé et peut amener à sous-estimer le risque de pertes azotées pour cette classe.

### Le modèle STICS :

Pour cette étude, il a été décidé de mobiliser la version actuellement diffusée du modèle (v9.1) plutôt qu'une version de recherche en cours de validation. En effet, certains paramètres de cultures déjà présentes dans la v9.1 n'ont pas toujours été calibrés ou validés sur la version de recherche et pourraient entraîner une diminution de la fiabilité des résultats. Cependant ce choix n'a pas permis de prendre en compte certaines améliorations du modèle comme une meilleure modélisation de l'organisation de l'azote et des restitutions du carbone au sol (Beaudoin, comm. pers.) ou les dernières évolutions développées pour la modélisation des prairies dans le modèle et en particulier le pâturage.

Comme évoqués dans les objectifs pour cette nouvelle étude, la volatilisation a été prise en compte dans l'analyse des sorties du modèle. Bien que le formalisme décrivant ces émissions dans STICS ne soit pas aussi élaboré que dans d'autres modèles plus spécifiques comme par exemple Volt'Air, les résultats de simulation semblent dans l'ensemble cohérents avec les facteurs d'émissions de référence mais aussi avec les observations et les connaissances acquises sur les facteurs influençant la volatilisation. L'incorporation des fertilisants a par exemple fortement limité les émissions, ce qui est en accord avec la bibliographie bien que les taux d'abattement soient très variables (Smith et al. 2009). L'effet du pH du sol qui est ressorti comme fortement impactant dans les simulations réalisées, est également décrit dans la bibliographie et confirmé par les experts en particulier pour des engrais minéraux et pour des fertilisants organiques liquides. Le modèle Volt'Air y est également très sensible (Ramanantenasoa et al. 2019). Ce résultat serait cependant plus à nuancer concernant des fertilisants organiques solides : en effet, pour ce type de produits, qui ne se mélangent pas de la même manière au sol, la volatilisation dépendra plutôt du pH du produit.

Certaines propositions formulées dans l'avis du CST-GENEM n'ont en outre pas pu être réalisées dans cette étude :

- La remobilisation des simulations réalisées dans des études précédentes (Justes et al. 2012; Graux et al. 2017; Therond et al. 2017; Pellerin et al. 2019) : Le CST avait proposé de remobiliser les sorties des simulations STICS réalisées dans ces études pour les adapter à la problématique des périodes d'épandage ou pour lancer un nouveau plan de simulations ad hoc. Bien que la mobilisation de fichiers existants permette un gain de temps, ces sorties n'ont pas été réutilisées directement dans cette étude pour différentes raisons comme par exemple l'utilisation d'une version différente du modèle ou des objectifs éloignées avec l'étude actuelle (par exemple sur la question du stockage du carbone à long terme non traitée ici). Ces travaux ont cependant servi de base pour les choix faits dans le plan de simulation de chacune des 4 situations traitées (choix variétaux, choix de certaines pratiques...) permettant un gain de temps, certes plus faible qu'escompté.
- L'évaluation de l'incidence des périodes d'épandage sur la gestion des stocks d'effluents et inversement : ce travail nécessitait une analyse à l'échelle de l'exploitation ne pouvant être réalisée dans le temps imparti à cette étude, qui s'est concentrée sur de la modélisation à l'échelle de la parcelle.
- L'utilisation de plusieurs modèles pour relativiser et fiabiliser l'interprétation des résultats de simulations conditionnés, et potentiellement biaisés, par les hypothèses et les limites de chaque modèle : cette proposition n'a pas pu être retenue dans le temps contraint de l'étude. Toutefois, le CST n'avait pas identifié cette piste comme prioritaire du fait des nombreuses évaluations et validation déjà réalisées sur STICS.

### L'analyse de la portance des sols

Afin d'apporter quelques éléments complémentaires quant au risque de compaction des sols lors des interventions d'épandage dans la parcelle, la proportion de jours par quinzaine non disponibles du fait d'un risque de tassement a été évaluée pour une partie des situations pour lesquelles des apports en automne ou en hiver étaient simulés. La méthode employée s'appuie sur la comparaison journalière de l'humidité des premiers horizons de sols avec des seuils d'humidité critique selon la texture du sol. Cette méthode a été choisie du fait de la faisabilité dans le temps contraint de l'étude mais comporte toutefois quelques limites. Ces seuils ne sont calculés que pour 4 classes de textures différentes ce qui peut mener à des effets de seuil importants. On constate en effet une hausse très forte des jours à risque de tassement pour des sols à texture fine contrairement aux autres sols. Bien que la faible portance des sols argileux soit connue, il est possible que les écarts de portance entre classes de texture soient surestimés. Les valeurs d'humidité critique ont en outre été fixées au début des années 90 à partir de méthodes empiriques. Leur révision avec les méthodes de mesures et le matériel actuel pourrait mener à une évolution des seuils obtenus.

Ces premiers résultats qui apportent tout de même quelques éléments de réponse concernant les périodes et les sols les plus à risque pourraient être par la suite repris avec l'outil en cours de développement dans le cadre du projet J-Distas, piloté par Arvalis. Cet outil s'appuie sur le couplage de J-Dispo, modèle d'Arvalis de calcul de jours disponibles pour le passage des outils et Terranimo® (Stettler et al. 2014), modèle de détermination du risque de compaction du sol en fonction de la pression exercée et la résistance du sol. Ce dernier n'a pas pu être utilisé dans le cadre de l'étude car il ne permettait pas de calculer de manière journalière l'évolution de ce risque de tassement mais la fonction de pédotransfert utilisée dans le modèle pour le calcul de la résistance du sol intègre des travaux de recherche plus récents et devrait permettre d'obtenir des résultats plus précis que les classes d'humidités critiques utilisées pour cette présente étude. Les travaux du projet J-Distas pourraient permettre d'évaluer le nombre de jours disponibles pour lesquels le sol serait portant à partir du modèle hydrique de J-Dispo et du modèle de compaction de Terranimo®.

## 4 CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

---

Pour faire suite à la précédente étude de 2012 sur l'objectivation des périodes recommandées pour l'épandage des fertilisants azotés, cette nouvelle étude, dont ce rapport présente les résultats des phases 1 et 2 menées entre mars et novembre 2020, a cherché à développer une approche intégrée de l'ensemble des processus dans différents contextes pédoclimatiques, en prenant en compte l'impact des pratiques d'épandage sur l'eau et l'air mais aussi sur la croissance des cultures.

L'étude a permis de capitaliser un certain nombre d'informations venant compléter les premiers constats et conclusions de 2012. Le champ de l'étude étant vaste et la réalisation contrainte par le temps, il a été nécessaire de prioriser certaines situations à analyser, identifiées avec les experts et le comité de suivi. Il n'a donc pas été possible de traiter l'ensemble des cultures et pratiques de fertilisation à étudier concernant la problématique des périodes d'épandage et la définition des périodes conseillées ou déconseillées.

L'étude a toutefois permis de :

- Actualiser la typologie des fertilisants azotés à partir des connaissances sur les produits résiduels organiques (PRO) et sur les engrais minéraux, acquises depuis 2012 ;
- Apporter un certain nombre d'éléments de réponse quant aux impacts d'épandage d'automne-hiver mais aussi de printemps-été sur la croissance des cultures et les risques de



pertes azotées dans l'eau et dans l'air. Ces conclusions s'appuient à la fois sur l'analyse de références scientifiques et techniques mais également sur les résultats de simulation réalisées avec le modèle STICS.

Les simulations ont été analysées principalement au travers des résultats obtenus concernant la croissance et l'absorption des cultures mais aussi l'azote perdu par lixiviation et par volatilisation. D'autres variables ont également été étudiées afin d'approfondir la compréhension des déterminants (par exemple, des indicateurs de stress azoté et hydrique, des variables d'état du sol ...). Il en ressort des pratiques de fertilisation plus favorables par rapport à d'autres à la fois du point de vue des pertes cumulées d'azote volatilisé et lixivié mais aussi pour optimiser la valorisation du fertilisant par la culture, en fonction du pédoclimat de la situation considérée. Les pratiques les plus favorables mettent parfois en avant des périodes d'apport selon le fertilisant à privilégier mais il faut toutefois noter que les effets sur la volatilisation et la lixiviation sont parfois antinomiques, ce qui a mené à considérer un cumul des pertes globales. Les périodes les plus favorables sont en outre souvent dépendantes d'autres pratiques comme le fait d'épandre en surface ou d'incorporer immédiatement le produit ou de limiter la quantité d'apport mais aussi des conditions pédoclimatiques. L'échantillon de sites-sols de l'étude ne permet pas de cartographier les pratiques les plus favorables mais permet tout de même de prendre en compte une diversité de contextes et leur impact sur l'identification de ces pratiques les plus favorables. En cas d'apports d'automne ou d'hiver, un regard a également été porté sur la portance avant de nuancer la possibilité d'apporter sur ces périodes même si l'analyse de l'absorption et des pertes semblaient satisfaisantes.

## 5 REFERENCES :

- ACTA-ARTELIA. 2012. « Actualisation des connaissances permettant d'objectiver les variabilités des périodes recommandées pour l'épandage des fertilisants azotés en France. » Rapport 174 2277 / FBR. Ministères en charge de l'agriculture et de l'écologie MAAF et MEDDE.
- Arrêté du 11 octobre 2016 modifiant l'arrêté du 19 décembre 2011 relatif au programme d'actions national à mettre en œuvre dans les zones vulnérables afin de réduire la pollution des eaux par les nitrates d'origine agricole. s. d. Consulté le 7 septembre 2020.
- BOUTHIER, Alain, Robert TROCHARD, Virginie PARNAUDEAU, Bernard NICOLARDOT, et Virginie Rennes. 2009. « Cinétique de minéralisation nette de l'azote organique des produits résiduels organiques à court terme in situ et en conditions contrôlées ».
- Brisson, Nadine, Bruno Mary, Dominique Ripoche, Marie Hélène Jeuffroy, Françoise Ruget, Bernard Nicoulaud, Philippe Gate, Florence Devienne-Barret, Rodrigo Antonioletti, et Carolyne Durr. 1998. « STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn ».
- Citepa. 2020. « Inventaire des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France – Format Secten ».
- Clivot, Hugues, Bruno Mary, Matthieu Valé, Jean-Pierre Cohan, Luc Champolivier, François Piraux, François Laurent, et Eric Justes. 2017. « Quantifying in situ and modeling net nitrogen mineralization from soil organic matter in arable cropping systems ». *Soil Biology and Biochemistry* 111: 44-59.
- European Environment Agency (EEA). 2019. « EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2016: technical guidance to prepare national emission inventories ». *EEA-Report*.
- Foray, Sylvain. 2016. « Réglementation environnementale : son application dans les principaux pays laitiers de l'UE ». Ref n° 0016304002. Idele.
- . 2017. « Réglementation environnementale : son application dans les principaux pays laitiers de l'UE, en Australie et en Nouvelle-Zélande ». Réf. 0017304033. Institut de l'Élevage.
- Froment, MA, AG Chalmers, et KA Smith. 1992. « Nitrate leaching from autumn and winter application of animal manures to grassland ». *Aspects of applied biology*.
- Gault, J, M Guillet, F Guerber, C Hubert, F Paulin, et MC Soulié. 2015. « Analyse de la mise en œuvre de la directive nitrates par d'autres Etats membres de l'Union européenne ». *Rapport du Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt n 14123 et du Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie n 010012-01, 154 p.*
- Graux, Anne-Isabelle, Luc Delaby, Jean-Louis Peyraud, Eric Casellas, Philippe Faverdin, Christine Le Bas, Anne Meillet, Thomas Poméon, Helene Raynal, et Rémi Resmond. 2017. « Les prairies françaises: production, exportation d'azote et risques de lessivage ».
- Guét, Gabriel. 2003. *Mémento d'agriculture biologique: guide pratique à usage professionnel*. France Agricole Editions.
- Houot, Sabine, R Pierre, B Decoopman, R Trochard, J Gennen, et P Luxen. 2015. « Minéralisation de produits résiduels organiques: des sources d'azote variées ».
- Houot, Sabine, Marie-Noëlle Pons, Marilyns Pradel, Christine Aubry, Laurent Augusto, Rémi Barbier, Pierre Benoit, Hubert Brugère, Magali Casellas, et Alexandra Chatelet. 2014. « Valorisation des matières fertilisantes d'origine résiduelle sur les sols à usage agricole ou forestier. Impacts agronomiques, environnementaux, socio-économiques. »
- Jeuffroy, Marie-Hélène, et Christine Bouchard. 1999. « Intensity and Duration of Nitrogen Deficiency on Wheat Grain Number ». *Crop Science* 39 (5): 1385-93. <https://doi.org/10.2135/cropsci1999.3951385x>.
- Justes, Eric, N. Beaudoin, Patrick Bertuzzi, Raphaël Charles, Julie Constantin, Carolyne Dürr, Carole Hermon, et al. 2012. « Réduire les fuites de nitrate au moyen de cultures intermédiaires : conséquences sur les bilans d'eau et d'azote, autres services écosystémiques », janvier.

- Lashermes, G., B. Nicolardot, V. Parnaudeau, L. Thuriès, R. Chaussod, M.L. Guillotin, M. Linères, et al. 2010. « Typology of exogenous organic matters based on chemical and biochemical composition to predict potential nitrogen mineralization ». *Bioresource Technology* 101 (1): 157-64. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.08.025>.
- Lashermes, Gwenaëlle, Sabine Houot, Bernard Nicolardot, Virginie Parnaudeau, Bruno Mary, Thierry Morvan, Rémi Chaussod, Monique Lineres, Laure Metzger, et Laurent Thuriès. 2007. « Apport de matières organiques exogènes en agriculture: indicateur de potentialité de stockage de carbone dans les sols et définition de classes de disponibilité d'azote ». *Journée technique Retour au sol des produits résiduels organiques* 27.
- Leclerc, Blaise. 1989. « Cinétiques de minéralisation de l'azote des fertilisants organiques et teneurs en nitrate chez *Lactuca sativa* et *Daucus carota* ».
- Lefebvre, Marie-Pierre. 2010. « Spatialisation de modèles de fonctionnement hydromécanique des sols appliquée à la prévision des risques de tassement à l'échelle de la France ». Sciences agricoles, Université d'Orléans.
- Levasseur, Pascal, A Soulier, Hélène Lagrange, Robert TROCHARD, Sylvain Foray, A Charpiot, P Ponchant, et V Blazy. s. d. « Valorisation agronomique des effluents d'élevages de porcs, bovins, ovins, caprins, volailles et lapins ». Paris: RMT Elevage et Environnement.
- Levavasseur, Florent. 2017. « Modélisation avec STICS des systèmes de culture avec Produits Résiduels Organiques : limites du modèle de décomposition de la matière organique et perspectives ». Présenté à Séminaire STICS, octobre 17.
- Martin-Rosset, William, Michel Vermorel, Géraldine Fleurance, et P Doligez. 2013. « Evaluation et prévision de différentes sources de pollution issues de l'élevage et de l'utilisation du cheval ». In .
- Maynaud, Géraldine, Dominique Steyer, C Druilhe, C Ziebal, Julie Jimenez, Michel Torrijos, A-M Pourcher, et Nathalie Wéry. 2017. « Caractéristiques physico-chimiques et microbiologiques de digestats bruts et post-traités destinés à l'épandage agricole ».
- Möller, Kurt, et Torsten Müller. 2012. « Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: a review ». *Engineering in Life Sciences* 12 (3): 242-57.
- Nicolardot, Bernard, Sylvie Recous, et Bruno Mary. 2001. « Simulation of C and N mineralisation during crop residue decomposition: a simple dynamic model based on the C: N ratio of the residues ». *Plant and Soil* 228 (1): 83-103.
- Pellerin, Sylvain, Laure Bamière, Camille Launay, Raphaël Martin, Michele Schiavo, Denis Angers, Laurent Augusto, Jerome Balesdent, Isabelle Basile Doelsch, et Valentin Bellassen. 2019. « Stocker du carbone dans les sols français, quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût? »
- Protin, Pierre-Vincent. 2009. « Etude de la date du premier apport d'azote minéral sur prairie de graminée », 4.
- Ramanantenasoa, Maharavo Marie Julie, Sophie Générmont, Jean-Marc Gilliot, Carole Bedos, et David Makowski. 2019. « Meta-modeling methods for estimating ammonia volatilization from nitrogen fertilizer and manure applications ». *Journal of environmental management* 236: 195-205.
- Ramanantenasoa, Maharavo Marie Julie, Jean-Marc Gilliot, Catherine Mignolet, Carole Bedos, Etienne Mathias, Thomas Eglin, David Makowski, et Sophie Générmont. 2018. « A new framework to estimate spatio-temporal ammonia emissions due to nitrogen fertilization in France ». *Science of the Total Environment* 645: 205-19.
- Recous, S., D. Robin, D. Darwis, et B. Mary. 1995. « Soil Inorganic N Availability: Effect on Maize Residue Decomposition ». *Soil Biology and Biochemistry* 27 (12): 1529-38. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(95\)00096-W](https://doi.org/10.1016/0038-0717(95)00096-W).
- Ruget, Françoise, Sandra Novak, et S Granger. 2006. « Du modèle STICS au système ISOP pour estimer la production fourragère. Adaptation à la prairie, application spatialisée ». *Fourrages* 186: 241-56.

- Simon, JC, et L Le Corre. 1996. « Recueil de données–Site de Quimper Kerfily ». *Trente ans de lysimétrie en France, 1960-1990*, 205-28.
- Smith, E, R Gordon, C Bourque, A Campbell, Sophie Générmont, P Rochette, et M Mkhabela. 2009. « Simulated management effects on ammonia emissions from field applied manure ». *Journal of Environmental Management* 90 (8): 2531-36.
- Stettler, Matthias, Thomas Keller, Peter Weisskopf, Mathieu Lamandé, Poul Lassen, et Per Schjøning. 2014. « Terranimo®—a web-based tool for evaluating soil compaction ». *landtechnik* 69 (3): 132-38.
- Therond, O, M Tichit, A Tibi, F Accatino, L Biju-Duval, C Bockstaller, D Bohan, T Bonaudo, M Boval, et E Cahuzac. 2017. « Volet “écosystèmes agricoles” de l’Evaluation Française des Ecosystèmes et des Services Ecosystémiques ». *Rapport d’étude, Inra (France)*.
- Tomis, Vincent, Claire Turillon, et Anne Duparque. 2018. « Tassement des sols Prévenir et corriger leurs effets ». Résultats du projet Sol D’Phy 2012-2018.
- TROCHARD, Robert. 2016. « Digestats de méthanisation - Une stratégie de fertilisation à repenser ». *Perspectives Agricoles*, n° N°431 (mars): 39-41.
- Trochard, Robert, et Sabine Houot. 2017. « Produits résiduaire organiques : mieux connaître la valeur fertilisante », n° 449 (novembre): 57-59.
- Vandaele, D, A Lebreton, et B Faraco. 2010. « Agriculture et gaz à effet de serre: état des lieux et perspectives ». *Report, Réseau Action Climat–France*.
- Vaudour, Emmanuelle. 2014. « EFFETS DE L’APPORT DE PRODUITS RESIDUAIRE ORGANIQUES SUR LE STOCKAGE DU CARBONE, LES EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE ET LA LIXIVIATION DU NITRATE DANS LES SOLS AGRICOLES PERIURBAINS (PROSTOCK) ».
- Vertes, Françoise, J.C. Simon, L. Corre, et M.L. Decau. 1997. « Les flux d’azote au pâturage ». *II Etude des flux et de leurs effets sur le lessivage. Fourrages* 151 (janvier): 263-80.
- Vertes, Françoise, Jean-Claude Simon, F Laurent, et A Besnard. 2007. « Prairies et qualité de l’eau. Evaluation des risques de lixiviation d’azote et optimisation des pratiques ». *Fourrages* 192: 423-40.