

**CF2 – Système légumier de monoculture de chou-fleur en Bretagne avec leviers de réduction des pertes azotées**

Intitulé du cas-type	Système légumier en Bretagne : monoculture de chou-fleur avec leviers de réduction des pertes azotées
Localisation	Bretagne
Type de sol	Limon
Type de climat	Série climatique 1996-2016
Rotation	Chou-fleur hâtif – Chou-fleur tardif
Pratiqué ou prototype	Prototype
N° Cas-types comparables	CF1
Contact	Denis LE HIR, Chambre Régionale d’Agriculture de Bretagne

**I. Contexte**

**a. Localisation et présentation générale du SdC**

La région Bretagne est connue pour ses problèmes de pollutions des eaux de rivière par les nitrates, conséquence de la forte concentration d'élevages. Les exploitations légumières spécialisées (près de 30 000 ha de légumes frais cultivés sur la côte Nord) sont également source de pertes d'azote en raison d'une minéralisation importante et régulière, notamment en période de drainage, et, parfois, d'une sur-fertilisation sécuritaire de la part des producteurs.

Malgré des surfaces en baisse, le chou-fleur reste la première production légumière bretonne avec près de 14 000 ha cultivés en 2017. Le chou-fleur d'hiver, récolté de janvier à début juin soit plus de cinq mois après plantation, représente 64 % de la production (Source Agreste).

Dans les exploitations légumières en agriculture conventionnelle, les besoins azotés sont couverts essentiellement par l'apport d'engrais minéraux et par l'import d'effluents d'élevage (fumiers ou lisiers) issus d'exploitations présentes dans ou en bordure de la zone légumière. La valorisation des couverts végétaux en tant que source d'azote est recherchée par les agriculteurs biologiques mais l'utilisation de légumineuses est restreinte dans les CIPAN implantées avant l'hiver à hauteur de 20 % ; le Coco de PAIMPOL est la seule légumineuse récoltée (autour de 700 ha).

Le système de cultures présenté est la succession de cultures mise en place en 2017 et 2018 par un producteur légumier de PLOUGOURVEST (29) dans le cadre du programme Breizhlégum'eau. Ce programme avait pour objectif de faire évoluer les pratiques des producteurs afin de réduire l'impact des cultures légumières sur la ressource en eau dans les bassins versants côtiers (pollution par les nitrates et pollution par les substances actives phytosanitaires).

La parcelle est située dans le bassin versant Horn Amont : des actions sont menées auprès des agriculteurs afin d'améliorer leurs pratiques pour ramener le taux de nitrates au-dessous de la norme de 50 mg/l et faire disparaître les échouages d'ulves sur les plages bordant l'embouchure. Dans cette partie du bassin versant, la fertilisation azotée est plafonnée à 170 kg N total/ha/an en présence de cultures légumières dans la rotation (140 kg N total/ha/an sinon).

**b. Climat**

La zone légumière du Nord de la Bretagne est caractérisée par un climat océanique doux et humide. Les précipitations sont réparties sur l'année pour un cumul moyen de 874 mm (Graphique 1). Le drainage (Graphique 2) reste concentré sur l'automne et l'hiver (octobre à mars). La lame drainante atteint en moyenne 500 mm en sol nu.

La douceur des températures (Graphique 1) favorise une minéralisation régulière tout au long de l'année, y compris en hiver où, si elle est ralentie par la baisse des températures, la minéralisation libère de l'azote sujet à la lixiviation. Le nombre de jours de gel est réduit, notamment en zone côtière. La minéralisation baisse également en été quand l'eau disponible dans le sol devient limitante.

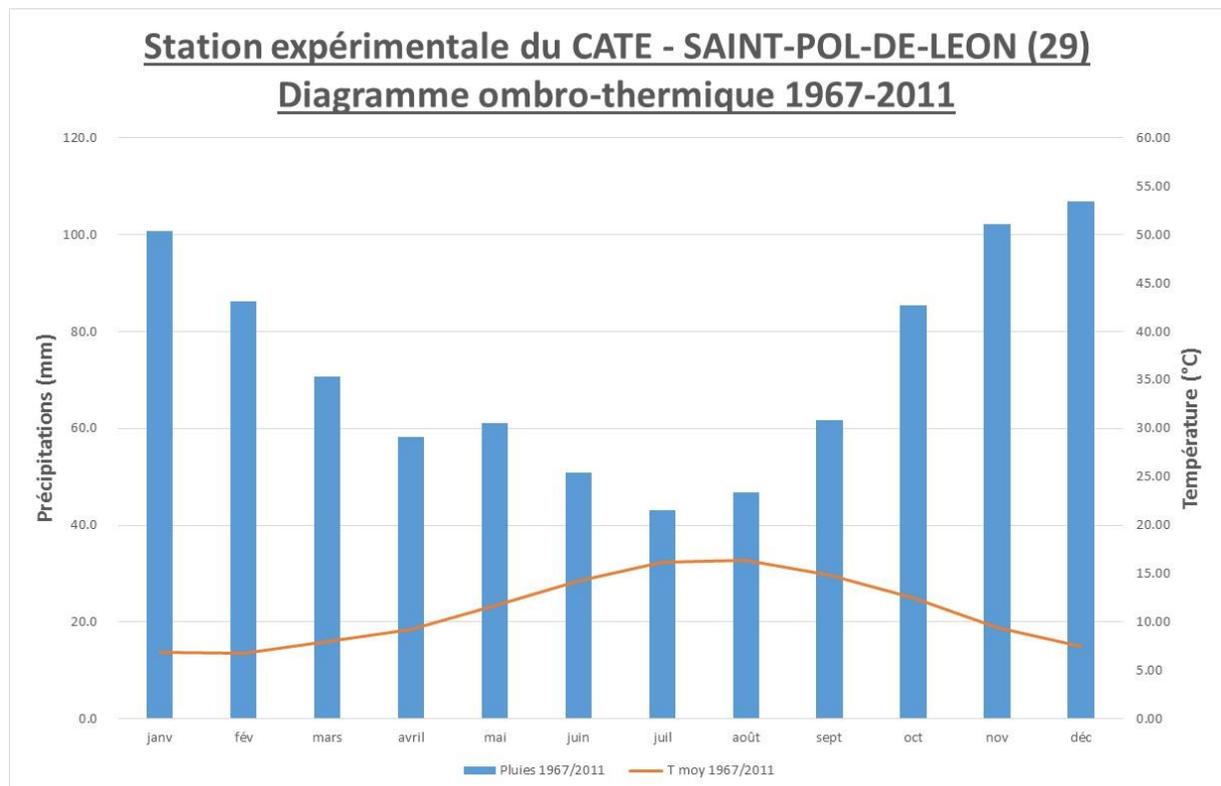


Figure 1 : Répartition annuelle des précipitations à SAINT-POL-DE-LEON (29).

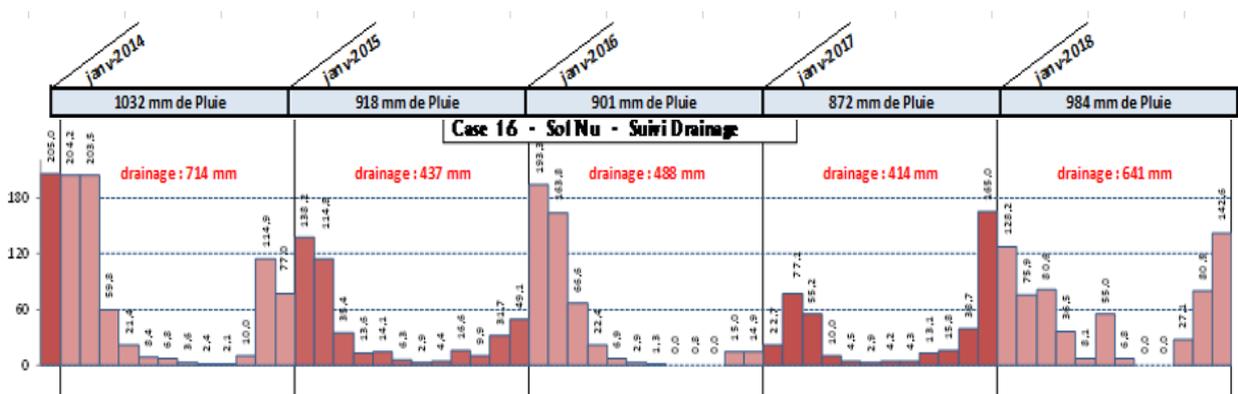


Figure 2 : Drainage mesuré en caselles lysimétriques sur la station expérimentale légumière et horticole du CATE à SAINT-POL-DE-LEON de 2014 à 2018.

**c. Sol sur lequel est « testé » le SdC :**

Les sols du littoral Nord breton sont formés majoritairement de limons éoliens profonds. Le pH est maintenu à un niveau élevé pour limiter les risques de Hernie des crucifères sur la culture de chou-fleur. La minéralisation est élevée dans ces sols en raison de la faible teneur en argiles et en carbonates, du pH élevé et de la répétition des interventions sur le sol (labour pour l’incorporation des résidus de culture, binages et buttages). Malgré l’arrêt de l’élevage sur ces exploitations spécialisées en production légumière, le taux de matière organique reste convenable grâce à l’apport régulier d’amendements organiques. Ces limons restent néanmoins très sensibles à la battance du fait de la régularité des précipitations.

Tableau 1 : principales caractéristiques du sol.

Profondeur (cm)	Argile (%)	Limons (%)	Sables (%)	Densité apparente	Cailloux (%)	Norg (%)	MO (%)	C/N	pH <sub>eau</sub>
0-25	14,8	68,1	17,0	1,4	0	0,179	2,71	8,8	7,2
25-90	14,8	68,1	17,0	1,4	0				

**II. Le système de culture**

La succession culturale présentée ici correspond à la modalité « Basses fuites d’azote » évaluée sur cette exploitation (Tableau 2).

Tableau 2 : itinéraire technique de chaque culture et couverts végétaux de la rotation.

Culture	Implantation et travail du sol	Stratégie de fertilisation	Irrigation	Récolte (date, destruction et gestion des couverts) et niveau de rendement
<b>Chou-fleur d’hiver hâtif</b>	Plantation en mini-mottes début juillet (12 000 plants/ha). Avant plantation : déchaumage, labour puis préparation superficielle. 3 binages à 10 jours d’intervalle à partir de la fin juillet. Buttage définitif à la mi-novembre.	150 kg/ha de sulfonitrate d’ammoniaque (26 % N) fin novembre.		Récolte en 2 à 5 passages à partir de la mi-janvier. Rendement : 8 000 têtes/ha. Destruction des résidus de culture (outil rotatif à axe horizontal) mi-février.
<b>Couvert Avoine – Féverole</b>	Semis du couvert (semoir à céréales) mi-février après broyage des résidus.			Destruction par déchaumage début juin. 2,5 tMS/ha produites et 80 uN/ha mobilisées.
<b>Chou-fleur d’hiver tardif</b>	Plantation en mini-mottes début août (12 000 plants/ha). Avant plantation, après déchaumage du couvert : labour puis préparation superficielle. 3 binages à 10 jours d’intervalle à partir du 20 août. Buttage définitif mi-novembre.			Récolte en 2 à 5 passages à partir de début avril. Rendement : 8 000 têtes/ha.

3 leviers ont été testés pour limiter les fuites d’azote.

Pour limiter la quantité de nitrates présents dans le sol à l’automne, les apports d’effluents d’élevage ont été supprimés. Ce choix ne pénalise pas à court terme l’alimentation azotée du chou-fleur car dans cette succession de cultures de choux, la minéralisation des résidus du chou-fleur précédent et la minéralisation basale de l’humus du sol couvrent les besoins de la culture à l’automne.

## CF2 – Systèmes légumier de monoculture de chou-fleur en Bretagne avec leviers de réduction des pertes azotées

Pour compenser les pertes de matière organique et d'azote par le système, un mélange Avoine + Féverole a été semé dans l'interculture entre la récolte du Chou-fleur hâtif terminée début février et la plantation du Chou-fleur tardif en juillet suivant. Ce couvert permet aussi de limiter l'accumulation d'azote minéral dans la solution du sol dans l'interculture entre le Chou hâtif et le Chou tardif (une mesure de Matières Azotées Totales a été faite sur le couvert dans le cadre de l'essai ; 80 kg N/ha avaient été mobilisés). Les drainages à forte concentration en nitrates constatés occasionnellement à cette période de l'année pourront être atténués, voire évités. A voir les conséquences sur la dynamique de minéralisation à l'automne, l'alimentation du chou-fleur et les pertes d'azote non mobilisé. Enfin, une impasse a été réalisée sur la refertilisation minérale du Chou-fleur tardif en sortie hiver. Les pratiques de travail du sol n'ont pas été modifiées. Elles correspondent aux pratiques majoritaires des producteurs légumiers bretons.

### III. Résultats attendus en termes de pertes d'azote

La performance environnementale du système de cultures modélisé sera évaluée grâce au tableau ci-dessous.

Tableau 3 : Tableau des seuils de satisfaction croisés, pertes de nitrate x pertes d'ammoniac.

Seuils de pertes	Volatilisation d'ammoniac : > 10 % des apports (kg N pour 100 kg N apportés)	Volatilisation d'ammoniac : 5 % à 10 % des apports (kg N pour 100 kg N apportés)	Volatilisation d'ammoniac : < 5 % des apports (kg N pour 100 kg N apportés)
Lixiviation de nitrate : < 5 kg N/100 mm de lame d'eau drainante		Haute performance azotée (HPN)	Haute performance azotée (HPN)
Lixiviation de nitrate : 5 à 10 kg N/100 mm de lame d'eau drainante			Haute performance azotée (HPN)
Lixiviation de nitrate : > 10 kg N/100 mm de lame d'eau drainante			

Légende :

 Haute performance azotée (HPN)

 Performance azotée partielle

 Basse performance azotée

Dans notre région où la teneur en nitrates des eaux de surface est un problème environnemental important, l'attention sera focalisée sur les pertes du système en nitrates.

### IV. Présentation des simulations réalisées avec Syst'N®

Nous avons simulé une rotation bisannuelle Chou-fleur d'hiver hâtif – Chou-fleur d'hiver tardif. Le retour du chou-fleur sur une parcelle est fréquent en zone légumière mais la monoculture de chou-fleur est une situation rare. Cette simulation n'est pas représentative des rotations mises en place en zone légumière. Elle a pour objectif de tester des leviers pour améliorer la performance environnementale de la fertilisation azotée du chou-fleur.

Les données utilisées pour la simulation sont les pratiques testées sur une exploitation du réseau Breizhlégum'eau. Dans chacune des 25 exploitations du réseau, des reliquats azotés ont été mesurés mensuellement sur une parcelle divisée en deux : une partie où les exploitants ont conduit les cultures selon leurs pratiques habituelles et une seconde partie où étaient testées des pratiques alternatives. Cette succession a été simulée en boucle sur une série de 21 années climatiques (1996-2016) mesurées sur la station expérimentale du CATE à SAINT-POL-DE-LEON, à quelques kilomètres de la parcelle.

La simulation sur une longue durée permet valider sur une échelle de temps supérieure les résultats enregistrés lors de l'expérimentation au champ. Le choix du couvert d'interculture (Légumineuse fourragère) et la date de destruction (5 juin) ont été recalés pour correspondre à la quantité d'azote mobilisée par le couvert lors de l'expérimentation au champ (80 kg N/ha).

## V. Evaluation des pertes d'azote

### a. Présentation des résultats moyens du système de culture :

Les flux d'azote moyens à l'échelle du système de culture sont présentés dans le Tableau 4.

Tableau 4 : Flux moyens d'azote total simulés à l'échelle du champ cultivé, calculés sur l'ensemble de la rotation ou succession, ramené à l'année.

<b>a</b>	<b>Entrées d'azote (kgN/ha/an)</b>	<b>a1</b> : Apport: fertilisation minérale	21
		<b>a2</b> : Apport: fertilisation organique	0
		<b>a3</b> : Fixation biologique d'azote	7
<b>b</b>	<b>Sorties d'azote (kgN/ha/an)</b>	<b>b1</b> : Exportation par les récoltes	42
		<b>b2</b> : Exportation par les résidus de cultures exportés de la parcelle	58
<b>c</b>	Minéralisation de l'azote du sol et des résidus de culture (kgN/ha/an)		317
<b>d</b>	<b>Pertes d'azote moyennes annuelles (kgN/ha/an)</b>	<b>d1</b> : Protoxyde d'azote (N <sub>2</sub> O)	0,3
		<b>d2</b> : Ammoniac (NH <sub>3</sub> )	1
		<b>d3</b> : Nitrate lessivé (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	39
		<b>d4</b> : Nitrate ruisselé (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	0
<b>e</b>	Lame d'eau drainante annuelle (mm d'eau/an)		412

A partir des flux simulés et présentés dans le Tableau 4 nous sommes en mesure de calculer des indicateurs de performances azoté de cette situation culturale (Tableau 5).

Tableau 5 : Indicateurs retenus pour évaluer les performances azotées de la situation culturale.

<b>a-b</b>	Bilan apparent : Entrées – Sorties par exportation (kgN/ha/an)	-72
<b>a - (b+d)</b>	Variation du stock d'azote total dans le sol (kgN/ha/an)	-112
<b>(d3*100)/e</b>	Pertes d'azote par lixiviation pour 100 mm de lame d'eau drainante (kgN/100 mm)	9
<b>(d3*100*4.43)/e</b>	Pertes de nitrates par lixiviation pour 100 mm de lame d'eau drainante (kgNO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /100 mm) ou concentration moyenne en nitrate (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) sous le profil (mgNO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /l)	42
<b>d2/(a1+a2)</b>	Pertes d'azote sous forme d'ammoniac (NH <sub>3</sub> ) en % des apports totaux	5

Les entrées d'azote sont constituées par l'apport d'engrais minéral sur le Chou hâtif (41 kg N/ha) et la fixation symbiotique d'azote réalisée par le couvert. Le cycle du couvert étant court et l'azote disponible étant important, le couvert ne fixe qu'une quinzaine d'unités d'azote, tout en mobilisant 80 unités au total. Ces entrées sont alors en moyenne de 28 kg N/ha/an.

Ce sont 277 kg N/ha/an qui sont mobilisés en moyenne par les choux, dont 100 kg N/ha sont exportées à la récolte. Le couvert absorbe 78 kg N/ha selon la simulation (après recalage).

Le bilan apparent est négatif de 72 kg/ha/an du fait de la restriction des entrées d'azote et la baisse du stock d'azote dans le sol est alors de 112,3 kg N/ha/an malgré des pertes limitées à hauteur de 41,3 kg N/ha/an. Les pertes sont supérieures aux apports minéraux et représentent 196 % des apports minéraux réalisés.

## CF2 – Systèmes légumier de monoculture de chou-fleur en Bretagne avec leviers de réduction des pertes azotées

Les pertes d'azote par volatilisation d'ammoniac sont faibles (1 kg/ha/an) ; elles sont consécutives aux apports de sulfonitrate d'ammoniaque en fin de culture du Chou hâtif. Les pertes par dénitrification sous forme de N<sub>2</sub>O s'élèvent en moyenne à 0,3 kg N/ha/an ; elles sont continues sur la succession. Dans les lignes qui suivent, nous concentrerons notre propos sur les pertes d'azote nitrrique par lixiviation, préoccupation environnementale prioritaire dans notre situation. Ces pertes s'élèvent à 39 kg N/ha/an pour une lame drainante de 412 mm, soit une concentration moyenne de 42 mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/l sous le profil.

### b. Dynamiques et pertes azote : sorties graphiques Syst'N®

#### i. Périodes à risque de lixiviation

Les pertes indiquées sur la Figure 3 sont des moyennes calculées pour chaque culture les années climatiques sur lesquelles la culture concernée est présente.

Les deux trimestres novembre-décembre-janvier et février-mars-avril restent logiquement les périodes principales de pertes d'azote par lixiviation (Figure 3). La lame drainante est peu modifiée par l'implantation du couvert. A l'automne et l'entrée de l'hiver, les cultures de chou couvrent le sol. Même sur le trimestre février-mars-avril, après la récolte du Chou-fleur hâtif, la couverture du sol par le couvert impacte peu la lame drainante, en raison de son faible développement probablement.

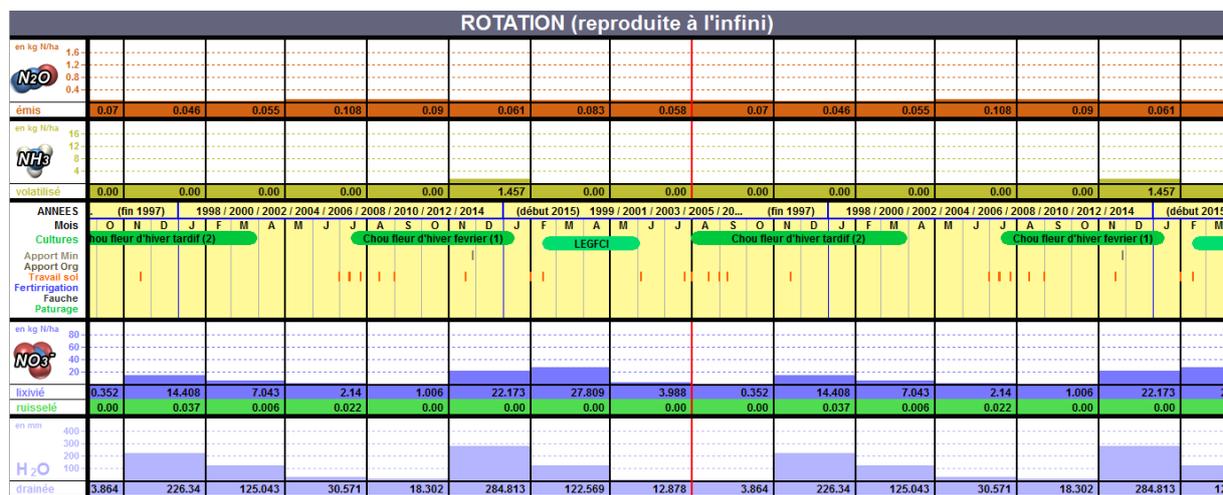


Figure 3 : Dynamique moyenne des pertes azotées dans la succession.

**N.B. : l'ensemble des Figures présentées ci-après sont disponibles au téléchargement sous format image (png) pour une meilleure lisibilité et plus grande facilité d'utilisation de ces Figures pour le conseil ou la formation.**

Selon les années, il y a quelques périodes de drainage précoce à l'automne (trimestre août-septembre-octobre) ou tardif au printemps (trimestre mai-juin-juillet). La lame et les pertes d'azote sont faibles à modérées. Les concentrations restent dans la norme de potabilité lors des drainages d'automne. Par contre, la concentration dépasse par trois fois les 100 mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/l lors des drainages de printemps, chaque fois sous le couvert implanté après le Chou-fleur hâtif (Figure 4).

CF2 – Systèmes légumier de monoculture de chou-fleur en Bretagne avec leviers de réduction des pertes azotées

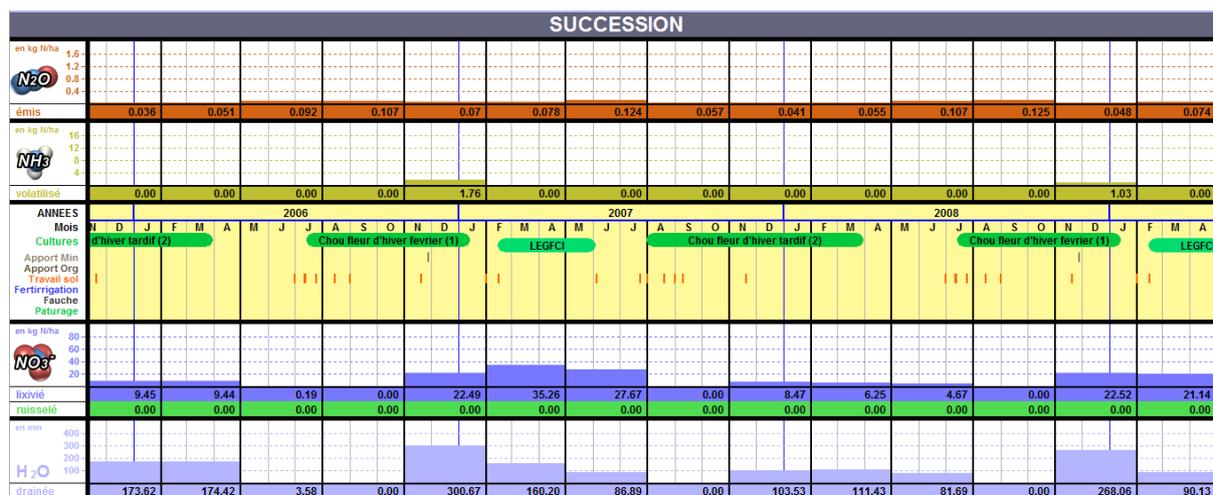


Figure 4 : Drainages de printemps après Chou-fleur hâtif en 2007 et après Chou-fleur tardif en 2008.

ii. Variation inter-annuelle des pertes par lixiviation

Le Tableau 6 illustre la variabilité inter annuelle des pertes et de la lame drainante sur les 19 années de simulation complète sur les deux trimestres ciblés. Les pertes varient de 12 à 91 kg N/ha et la lame drainante de 183 à 708 mm.

Tableau 6 : Répartition des pertes et des lames drainantes annuelles en période hivernale par classes

	Pertes (kg N/ha/an)				Lame drainante (mm)			
	< 25	25 à 50	50 à 75	> 75	< 300	300 à 400	400 à 500	> 500
Chou-fleur hâtif	2	3	4	1	2	3	4	1
Chou-fleur tardif	8	1	0	0	3	4	1	1

iii. Variation inter-cultures des pertes par lixiviation

Le Tableau 7 détaille, par trimestre, les pertes moyennes d'azote nitrique et les lames drainantes sous les différentes cultures.

Tableau 7 : Comparaison des pertes et des lames drainantes moyennes sous les deux cultures.

Trimestre	Chou-fleur hâtif				Chou-fleur tardif			
	novembre décembre janvier	février mars avril			novembre décembre janvier	février mars avril		
Pertes N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (kg N/ha)	22	28			14	7		
Lame drainante (mm)	285	123			226	125		

Les pertes sous le Chou-fleur tardif sont inférieures de 60 % aux pertes sous le Chou-fleur hâtif. Sur le trimestre novembre-décembre-janvier, les pertes sont inférieures sous le Chou-fleur tardif par rapport au Chou-fleur hâtif. Cette différence est en partie due à la variation inter-annuelle de lame drainante. On observe dans l'Onglet « Azote Plante/sol » (Figure 5) que l'absorption du Chou-fleur tardif est plus lente que celle du Chou-fleur hâtif mais elle est suffisante pour absorber un maximum d'azote avant le démarrage du drainage hivernal : la diminution de l'azote minéral du sol (Courbe N Min.) est régulière, sans accélération provoquée par un drainage. Dans les deux cas, l'azote lixiviable reste à un niveau bas jusqu'à la refertilisation de fin de cycle pour le Chou hâtif ou la fin de culture

CF2 – Systèmes légumier de monoculture de chou-fleur en Bretagne avec leviers de réduction des pertes azotées

pour le Chou tardif. Les plantes absorbent au fur et à mesure l'azote minéralisé. Les pertes sont alors limitées.

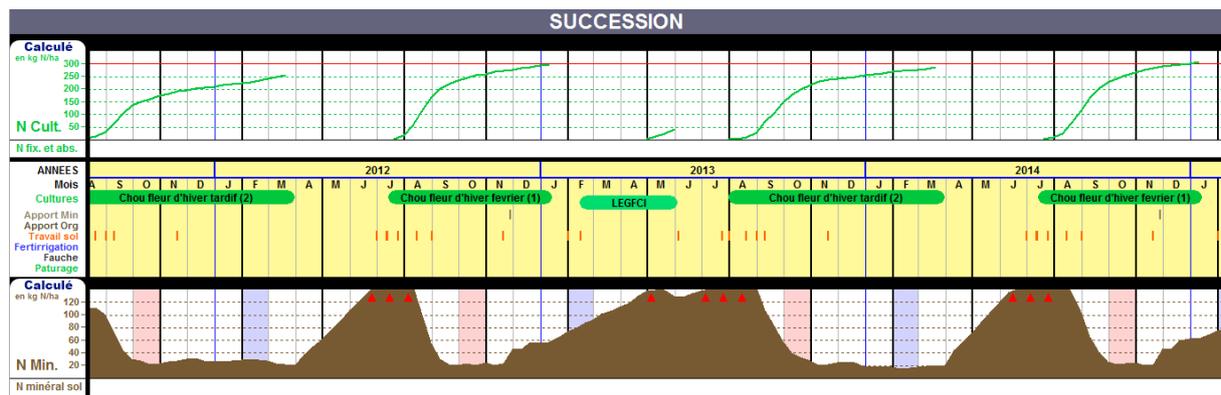


Figure 5 : Simulation de la dynamique de l'azote sur les années 2012 à 2014.

Les pertes sous le Chou-fleur hâtif restent également supérieures sur le trimestre février-mars-avril malgré l'implantation du couvert. Les lames drainantes sont pourtant équivalentes. La Figure 5 montre que l'azote s'accumule dans le sol dès la fin de la culture. Bien que les températures soient suffisantes pour relancer la minéralisation au printemps, l'activité du couvert est insuffisante pour piéger rapidement l'azote présent dans le sol (seulement une cinquantaine de kilogrammes d'azote est mobilisé par le couvert au printemps 2013 selon la simulation).

D'une manière générale, on constate sur la Figure 5 que, dans cette succession, le niveau d'azote minéral disponible dans le sol est assez bien valorisé. En période de drainage, l'azote disponible reste peu élevé mais la minéralisation continue du sol permet l'alimentation des cultures. L'azote qui s'accumule au printemps et en été est absorbé à l'automne par les cultures de chou-fleur, fortes consommatrices d'azote.

## VI. Discussion des résultats – diagnostic sur les performances azotées et les pertes

### a. Comparaison de la simulation aux reliquats mesurés

La Figure 6 positionne sur la courbe N Min. de l'azote minéral du sol simulée par Syst'N les reliquats mesurés sur l'exploitation dans le cadre du réseau Breizhlégum'eau. Ces mesures ont été faites de 2017 à 2019, années non disponibles dans la simulation. Elles sont représentées par des petits carrés rouges, à ne pas confondre avec les triangles rouges qui indiquent que les données sont supérieures à l'intervalle retenu pour la représentation graphique. Les reliquats sont comparés aux données simulées sur les années 2008 à 2010, proches de la moyenne sur la lame drainante et les pertes.

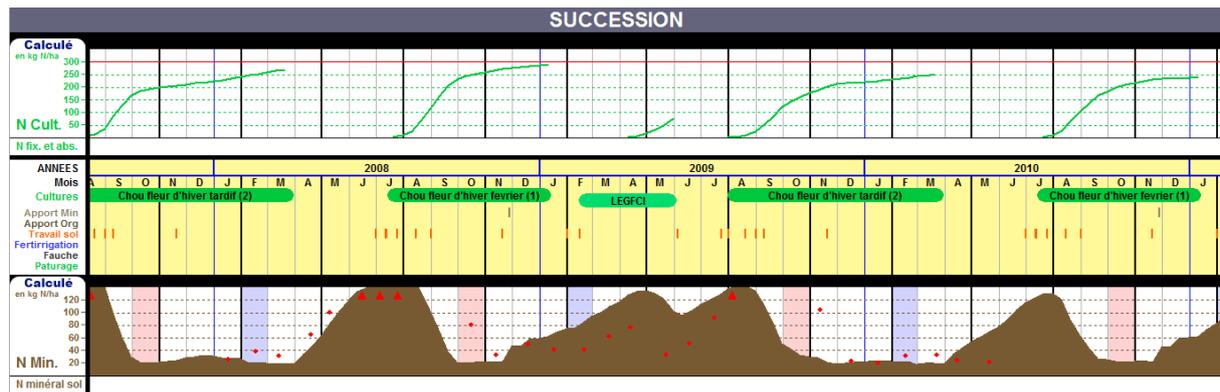


Figure 6 : Comparaison des valeurs mesurées (2017-2019) à des valeurs simulées.

On peut observer que la dynamique simulée de l'azote suit la dynamique des reliquats mesurés. On retrouve le bas niveau des reliquats en hiver, la reprise de la minéralisation au printemps jusqu'au pic précédant l'implantation du Chou-fleur hâtif, la chute de l'azote minéral à l'automne, une augmentation de l'azote minéral à la refertilisation du Chou-fleur hâtif, la reprise de la minéralisation au printemps, la chute de l'azote minéral avec l'augmentation des prélèvements du couvert, la relance de la minéralisation après la destruction du couvert puis la rechute de l'azote minéral après l'implantation du Chou tardif.

Par contre, il y a des différences sur les ordres de grandeur. Les écarts constatés entre la simulation « 2009 » et les mesures 2018 sont dues à l'hiver tardif vécu en 2018 qui a pénalisé la reprise de l'activité du sol au printemps. Par contre, nous pouvons constater, sans pouvoir l'expliquer, que les pics d'azote estivaux mesurés sont supérieurs à la simulation (pas visible sur l'Image 4 car les valeurs sont supérieures au plafond de la représentation graphique). Ceci entraîne un épuisement plus précoce du stock d'azote du sol à l'automne dans la simulation par rapport aux mesures enregistrées : nous observons dans l'année 2009, par exemple, que le niveau d'azote dans le sol est bas dès la fin septembre alors qu'il ne chute que courant novembre dans le suivi terrain. Cette remarque est valable en 2008 également. Cette baisse plus précoce de l'azote disponible dans le sol pourrait également être due à une surestimation de l'absorption automnale d'azote, problème rencontré dans la simulation de la culture de colza.

Nous pouvons alors supposer que, comme la simulation sous-estime l'azote disponible dans le sol avant le démarrage du drainage, elle sous-estime les pertes d'azote nitrique dans le système de culture étudié.

### b. Diagnostic sur les performances azotées

Les pertes simulées par Syst'N dans cette succession Chou-fleur d'hiver hâtif – Chou-fleur d'hiver tardif s'élèvent à un total de 41 kg N/ha/an, dont 39 kg d'azote nitrique lixivié entraîné sous le profil par une lame d'eau à une concentration moyenne de 42 mg NO<sub>3</sub>-/l (soit 9,5 kg N/100 mm de lame d'eau

CF2 – Systèmes légumier de monoculture de chou-fleur en Bretagne avec leviers de réduction des pertes azotées

drainante) et 1 kg N/an volatilisé (4,8 % des apports totaux). Au regard des performances attendues (Tableau 8), ce système de cultures peut être qualifié de système à Haute Performance Azotée.

Tableau 8 : Seuils de satisfaction des pertes en nitrates et en ammoniac du cas-type CF2.

Seuils de pertes	Volatilisation d'ammoniac : > 10 % des apports (kg N pour 100 kg N apportés)	Volatilisation d'ammoniac : 5 % à 10 % des apports (kg N pour 100 kg N apportés)	Volatilisation d'ammoniac : < 5 % des apports (kg N pour 100 kg N apportés)
Lixiviation de nitrate : < 5 kg N/100 mm de lame d'eau drainante			
Lixiviation de nitrate : 5 à 10 kg N/100 mm de lame d'eau drainante			<b>9,5 kg N/100 mm de lame d'eau drainante 4,8 kg N pour 100 kg N apportés</b>
Lixiviation de nitrate : > 10 kg N/100 mm de lame d'eau drainante			

Légende :

 **Haute performance azotée (HPN)**

 Performance azotée partielle

 Basse performance azotée

### c. Diagnostic des leviers utilisés

En comparant ces résultats avec ceux obtenus dans les cas-type CF1, nous pouvons dire que les leviers mis en place (suppression des apports d'effluents organiques, introduction d'une culture intermédiaire entre le Chou-fleur hâtif et le Chou-fleur tardif, impasse sur la refertilisation du Chou tardif) ont permis de réduire les pertes d'azote nitrique. Nous allons essayer d'évaluer l'effet de chaque levier, pris individuellement.

#### i. Suppression des apports d'effluents organiques

La suppression des apports d'effluents organique a participé à la diminution de l'azote minéral du sol, sensible à la lixiviation lors des premiers drainages. Cette baisse de la disponibilité d'azote à l'automne ne semble pas préjudiciable quantitativement à l'absorption des cultures qui mobilisent près de 300 kg N/ha/an. Ce constat serait à confirmer au champ par une notation sur les calibres récoltés. Par contre, l'arrêt des amendements organiques induit (voir Tableau 5) une diminution du stock d'azote total du sol (112 kg N/ha/an). En l'absence d'apport organique, les choux valorisent l'azote issu de la minéralisation de la Matière Organique du sol pour faire face à leurs besoins. Les pertes d'azote sous forme nitrique sont limitées. Mais le taux de Matière Organique du sol diminue du fait de la minéralisation. La fertilité de la parcelle est engagée sur le long terme. Pour la maintenir sans augmenter l'azote minéral lixiviable, il conviendrait d'utiliser des amendements organiques compostés libérant moins d'azote minéral que les effluents d'élevage bruts.

#### ii. Mise en place d'un couvert Avoine + Féverole dans l'interculture Chou hâtif – Chou tardif

La présence du couvert après le Chou-fleur hâtif n'a pas d'effet sur la réduction des pertes en sortie hiver (sauf hiver moins humide). Le choix du couvert est peut-être à revoir pour avoir une captation plus rapide de l'azote disponible.

Son effet sur la durée est en revanche très positif. En réorganisant de l'azote minéral, il diminue l'azote disponible dans le sol à l'implantation du Chou-fleur tardif sans porter préjudice à l'absorption d'azote

par le chou-fleur (à confirmer également au champ en notant l'impact sur les calibres). Les pertes par lixiviation sont réduites. On observe alors une diminution générale du flux d'azote disponible par enchaînement : diminution de l'azote absorbé par le Chou-fleur tardif, diminution de la minéralisation des résidus, diminution de l'azote absorbé par le Chou-fleur hâtif.

Il faudrait donc affiner les règles de décision sur le choix du couvert pour améliorer le piégeage de l'azote au printemps. Le mélange Graminées + Légumineuses (ici simulé avec un couvert de légumineuses fourragères) s'implante lentement et capte tardivement l'azote présent dans le sol. Il fixe peu d'azote atmosphérique (15 kg N selon la simulation), ce qui motivait la présence d'une légumineuse dans le mélange. La priorité est de capter l'azote disponible dans le sol. En fonction de la stratégie de fertilisation, on pourrait choisir entre un couvert à C/N faible à la destruction, restituant rapidement l'azote piégé pour la culture suivante, ou un couvert à rapport C/N plus élevé pour alimenter le stock de Matière Organique stable du sol.

### **iii. Impasse sur la refertilisation du Chou-fleur tardif**

La pratique habituelle de l'exploitant est un premier apport systématique de 40 uN/ha, parfois complété par un second apport (sans indication sur la règle de décision). Dans cette modalité « Basses fuites », le choix de l'impasse a été maintenu malgré les faibles teneurs en azote du sol (31 kg N/ha au 16/02/2019) en comptant sur un surplus de minéralisation lié aux résidus du couvert.

Dans la simulation, le Chou-fleur tardif mobilise en moyenne autour de 300 kg N/ha, ce qui reste dans l'ordre de grandeur des mobilisations généralement observées au champ ; on observe dans l'Onglet « Azote Plante/Sol » (Figure 5) que, si l'azote disponible dans le sol reste modéré en fin de cycle sortie hiver (courbe N Min.), la plante absorbe au fur et à mesure l'azote minéralisé (courbe N Cult.). Mais, au champ, la précocité, le calibre et la qualité des choux ont été pénalisés par la moindre disponibilité de l'azote dans le sol, en comparaison avec le témoin « Pratiques du producteur » présent dans la même parcelle.

La différence de pertes d'azote nitrique sur le trimestre février-mars-avril entre Chou-fleur hâtif et Chou-fleur tardif est due essentiellement à la fin de la culture du Chou hâtif qui arrête d'absorber l'azote disponible dans le sol. L'impasse sur la refertilisation du Chou-fleur tardif a donc un effet plutôt neutre pour l'environnement mais pénalise les résultats technico-économiques (calibre, qualité).

## VII. Conclusion

Dans cette succession Chou-fleur d'hiver hâtif – Chou-fleur d'hiver tardif, nous avons testé trois leviers pour améliorer les performances environnementales : suppression des apports d'effluents organiques, mise en place d'un couvert Avoine + Féverole dans l'interculture Chou hâtif – Chou tardif et impasse sur la refertilisation du Chou-fleur tardif.

Les pertes d'azote ont été réduites à un niveau acceptable de 41 kg N/ha/an, dont 39 kg par lixiviation de l'azote nitrique pour une lame drainante de 412 mm soit moins de 10 kg N/100 mm de lame d'eau drainante. Ce système de cultures peut être qualifié de système à Haute Performance Azotée selon la grille établie.

L'implantation d'un couvert entre le Chou-fleur hâtif et le Chou-fleur tardif est probablement le levier le plus efficace pour réduire les pertes d'azote. Toutefois, son effet n'est pas nécessairement celui attendu. Les pertes restent importantes sous le couvert car son développement est trop lent pour piéger tout l'azote lixiviable en sortie hiver. En revanche, à moyen terme, la réorganisation de l'azote sous forme organique réduit le flux d'azote libre dans le sol à l'automne et les pertes par lixiviation.

La suppression des apports d'effluents d'élevage participe à la maîtrise des pertes d'azote. Mais cette pratique entraîne la chute du taux de Matière Organique des sols. L'apport d'amendements organiques compostés est alors nécessaire pour maintenir la fertilité du sol sans fournir au sol de l'azote minéral qui se trouverait en excès à l'automne.

L'impasse sur la refertilisation minérale en fin de cycle du Chou tardif n'a pas eu d'effet significatif sur la réduction des pertes dans la réduction des pertes d'azote mais a pénalisé la qualité de la récolte.