



Gestion de la Fertilisation azotée des CIVE¹

Références pour le calcul de la dose totale prévisionnelle

Avant-propos

Les références proposées dans ce document ont été élaborées sur la base d'un certain nombre d'essais. La compilation de ces essais couplée à un exercice de modélisation a permis de proposer des références nationales appliquées à la méthode du bilan des CIVE.

Il convient à chaque région d'adapter cette approche à son contexte agronomique et pédoclimatique. S'il existe en région des références expérimentales ou de l'expertise, il est alors préférable d'utiliser ces données locales. Le cas échéant, les références de la plaquette COMIFER peuvent être utilisées. Par ailleurs, il est fortement recommandé d'évaluer les références produites avec des cas-types (sols, climat, itinéraires techniques) pratiqués dans chaque région.

¹ Culture Intermédiaire à Vocation Énergétique. Ce sont des cultures conduites en dérobé dont la valorisation énergétique est clairement identifiée au départ.

Partie 1

Contexte et enjeux

Les cultures intermédiaires à vocation énergétique (CIVE) sont des cultures implantées entre deux cultures principales de façon à rendre un certain nombre de services agroécologiques. Les CIVE sont conduites comme des dérobées avec une valorisation énergétique clairement identifiée au départ.

Les surfaces des CIVE sont amenées à augmenter, compte tenu du contexte de transition énergétique et du développement des unités de méthanisation. Le rendement méthanogène des CIVE est directement lié à la matière sèche produite. La fertilisation a un impact positif sur la production de biomasse des CIVE (projet RECITAL ; projet PAMPA ; Cartron S. et Levavasseur F., 2022). Cependant, sur un plan environnemental, la fertilisation azotée minérale ou organique entraîne des émissions qui sont à maîtriser pour garantir la durabilité de la production (Esnouf et al., 2021). Ajuster la dose d'azote est donc crucial pour assurer la durabilité des systèmes de culture intégrant des CIVE, en réduisant l'apport d'azote au strict nécessaire, sans constituer une limite au développement des CIVE et permettre d'améliorer la rentabilité de la production.

Le 7^e plan d'actions national « nitrates » (PAN 7), laisse la possibilité, pour les cultures intermédiaires exportées (CIE²), de dépasser le plafond de 100 kg d'azote efficace par hectare sur la période de culture, si l'on en démontre la pertinence par un calcul de dose totale prévisionnelle. D'où la nécessité de paramétrer au mieux la méthode du bilan prévisionnel du COMIFER, afin de l'adapter au cycle et à la gestion des CIE.

Dans ce cadre, les membres du COMIFER ont collaboré pour partager leur expertise, élaborant ainsi la présente plaquette dans le but d'assister les utilisateurs dans une gestion plus efficace de la fertilisation azotée des Cultures Intermédiaires à Vocation Énergétique (CIVE). Cette plaquette sert de guide aux praticiens et propose une synthèse des références existantes, obtenues à partir de CIVE cultivées en « espèces seules » car, à ce jour, il existe peu de données sur les mélanges d'espèces.

Ces références sont en grande partie transposables pour les CIE hormis les postes Pf et Pi qui doivent être adaptés à d'autres usages (Fourrage, Méteil ensilé ou récolté en grain...). Cela fera l'objet d'une communication complémentaire.

Équation paramétrée

Sur la période de culture des CIVE, l'équation suivante caractérise le bilan d'azote minéral :

$$X = [Pf - Pi + Rf - L] - [Ri + Mh + Mhp + Mr + Mpro1 + Mpro2 + Nirr + Xpro]$$

² Couvert végétal d'interculture exporté qui est soit récolté, soit fauché, soit pâturé.

Dans le cas où l'azote d'un Produit Résiduaire Organique (PRO) apporté avant l'ouverture du bilan et la fraction minérale d'un apport réalisé après l'ouverture du bilan sont comptabilisés ensemble selon le terme X_a , la simplification ci-dessous peut être utilisée :

$$X = [Pf - Pi + Rf - L] - [Ri + Mh + Mhp + Mr + Nirr] - X_a$$

Avec :

X : la dose d'azote à apporter à la CIVE

Pf : Quantité d'azote absorbé par la culture à la fermeture du bilan (Objectif de rendement (y) $\times$ Besoin par unité de production (b))

Pi : Quantité d'azote absorbé par la culture à l'ouverture du bilan

Rf : Quantité d'azote minéral dans le sol à la fermeture du bilan

L : Pertes par lixiviation du nitrate pendant l'ouverture du bilan

Ri : Quantité d'azote minéral dans le sol à l'ouverture du bilan

Mh : Minéralisation nette de l'humus du sol

Mhp : Minéralisation nette due à un retournement de prairie

Mr : Minéralisation des résidus de culture du précédent

$Mpro1$: Minéralisation nette de l'azote organique d'un PRO n°1 apporté avant l'ouverture du bilan

$Mpro2$: Minéralisation nette de l'azote organique d'un PRO n°2 apporté après l'ouverture du bilan

$Nirr$: Azote apporté par l'eau d'irrigation

$Xpro$: Azote de la fraction minérale d'un PRO apporté après la date d'ouverture du bilan

X_a : Azote de la fraction minérale et de la minéralisation de la fraction organique sur la durée du cycle cultural (effet azote direct d'un produit organique)

En fonction du système de culture et de l'historique spécifique de la parcelle, des simplifications peuvent être appliquées à certains éléments de l'équation du bilan d'azote minéral du sol (Mhp , $Mpro$, L , etc.) pour la rendre plus opérationnelle. Par ailleurs, l'utilisateur a la possibilité d'estimer ou de calculer d'autres paramètres (Mh , Mr , $Mpro$, etc.) en fonction des données disponibles localement ou par simulation à partir de modèles dynamiques. En plus, d'autres variables, comme Ri , sont des postes mesurables à la parcelle.

Les valeurs de références ou méthodes d'estimation des différents postes du bilan azoté des CIVE sont fournies dans la deuxième partie de ce document.

Périmètre du paramétrage

Une part importante de la variabilité des paramètres de l'équation du bilan est due au contexte pédologique, aux conditions météorologiques de l'année climatique et au type de culture. Pour les CIVE, la méthode proposée par le COMIFER est applicable dans toutes les régions car celle-ci prend en compte les spécificités de chacune d'entre elles en réadaptant les références locales diffusées dans les Arrêtés Référentiels Régionaux. Le paramétrage est valable uniquement pour les CIVE cultivées en « espèce pure ». Le cas des cultures associées fera l'objet de travaux complémentaires.

Validation des paramètres

Le paramétrage pour le calcul du bilan azoté des CIVE a été réalisé en combinant la synthèse de données d'essais et la modélisation. La modélisation (projet RECITAL) a permis d'avoir un premier jeu de données, fournissant des valeurs moyennes pour quelques postes de l'équation du bilan (rendement, b , P_i , R_i et M_h), ainsi que d'autres données comme les Jours Normalisés, utiles à l'estimation des postes liés à la minéralisation des matières organiques du sol. Les données de la modélisation ont ensuite été confrontées aux résultats des essais et aux pratiques de terrain. Cela a permis de réaliser les ajustements nécessaires afin de compléter et consolider les références.

Recommandations d'usage des références

De la même manière que la brochure du COMIFER sur le calcul de la dose d'azote totale avec la méthode du bilan prévisionnel, le présent document se présente comme un guide méthodologique. Il propose une méthode et des références pour raisonner le calcul de la dose totale prévisionnelle des CIVE et permettre la constitution de référentiels régionaux dans le cadre de la mise en œuvre de la Directive Nitrates.

Les périodes d'ouverture du bilan retenues pour ces CIVE sont :

- Pour les CIVE d'hiver : de la sortie de l'hiver à la date de récolte
- Pour les CIVE d'été : de la date de semis à la date de récolte.

Certains paramètres de l'équation du bilan des CIVE peuvent être estimés en remobilisant les références existant déjà dans les arrêtés référentiels régionaux (ex : M_h , M_r , etc.), afin de se rapprocher au mieux des conditions pédoclimatiques correspondant à la zone d'implantation de la CIVE. Selon les cas, un coefficient (cf. partie 2) doit être appliqué aux références locales (généralement conçues pour les cultures annuelles à cycles longs et complets) afin de les adapter aux CIVE ayant des cycles plus courts. Ainsi, pour les CIVE d'hiver il est recommandé de se référer au blé (ex : $M_h = 0,4 * M_h$ du blé) et pour les CIVE d'été, il est recommandé de se référer au maïs et au sorgho.

Il est également possible de réaliser une estimation de ces postes à travers l'utilisation de modèles dynamiques ou logiciels de calculs, qui sont déjà présents dans certains outils de calculs de la dose prévisionnelle d'azote.



Partie 2

Références pour le calcul du bilan azoté des CIVE

Les références ci-après sont des valeurs moyennes issues de l'expertise des contributeurs du COMIFER, et des résultats de la modélisation réalisée dans le cadre du projet RECITAL.

La précocité est définie par rapport à la date de récolte pour les CIVE d'hiver dont la finalité est d'être récoltée le plus tôt possible pour ne pas pénaliser le rendement de la culture suivante, tout en maximisant la production de biomasse.

Pour les CIVE d'été, c'est le raisonnement inverse. Leur précocité est définie par rapport à la date de semis, l'objectif étant de les semer le plus tôt possible après la récolte de la culture précédente afin de maximiser la production de biomasse.

CIVE d'hiver :

- Précoce : récolte avant fin avril
- Tardive : récolte après le 1^{er} mai

CIVE d'été :

- Précoce : semis avant fin juin
- Tardive : semis après le 1^{er} juillet

➤ Pf : besoins de la culture

L'estimation du besoin en azote implique la détermination de l'objectif de rendement et du besoin unitaire « b », exprimé en kilogrammes d'azote par unité de rendement.

Avec une bonne traçabilité des rendements antérieurs et la connaissance du potentiel de production selon la zone pédoclimatique, il est possible d'estimer l'objectif de rendement de la CIVE.

Rendements (t MS/ha) & besoins unitaires « b » (kg de N / t MS)

Le besoin unitaire correspond à la quantité d'azote nécessaire pour produire une tonne de matière sèche, en considérant à la fois la partie aérienne récoltée, les chaumes et le compartiment racinaire. Il s'exprime en kg N / t MS.

Les besoins unitaires des CIVE d'hiver « b » ont été estimés en partant de la courbe critique en azote du blé (Justes et al., 1997). La courbe critique ou courbe de dilution en azote du blé permet d'associer à chaque objectif de rendement une teneur en N pour un objectif d'indice de nutrition azotée. Ensuite, des mesures réalisées à la récolte sur des courbes de réponse à l'azote sur des CIVE, en expérimentation, ont permis d'évaluer au champ les indices de nutrition en azote des CIVE d'hiver. La validation avec les données de courbes

de réponse à l'azote a permis de proposer des valeurs de « b » selon différentes classes de rendement. Les objectifs de rendement sont déterminés en fonction de la précocité de la CIVE ou de son temps de présence.

Les besoins unitaires des CIVE d'été sont repris à partir des « b » du maïs et du sorgho diffusés par le COMIFER et basés sur les travaux historiques d'Arvalis, complétés par les travaux de l'INRAE (D. Plenet, 2000).

L'estimation du potentiel de rendement doit être cohérente avec la réussite de la culture suivante, afin de limiter sa perte de rendement, particulièrement sur les CIVE d'hiver.

Besoins unitaires des CIVE d'hiver

Objectif de rendement récolté (t MS/ha)	« b » kg N / t MS récoltée
≤ 6	25
]6 – 8]	22
]8 – 10]	19
]10 – 13]	18
> 13	16

Groupe de travail CIVE – COMIFER, 2024.

Besoins unitaires des CIVE d'été

Objectif de rendement récolté (t MS/ha)	« b » kg N / t MS récoltée
≤ 10	15
]10 – 14[	14
[14 – 18]	13
> 18	12

Groupe de travail CIVE – COMIFER, 2024.

Besoins forfaitaires en fonction de la durée du cycle

Il est également possible d'utiliser des besoins forfaitaires. Il est recommandé aux régions qui souhaitent utiliser cette approche de calculer les besoins forfaitaires en fonction des références de rendement disponibles localement et des valeurs de « b » correspondant à ces niveaux de rendement (cf. tableaux ci-dessus).

Par exemple, pour un seigle cultivé en CIVE d'hiver, le besoin forfaitaire pourrait s'estimer en multipliant le rendement moyen de la CIVE par le « b » correspondant à ce niveau de rendement. Les régions peuvent rester libres d'utiliser ce raisonnement.

Exemple pour CIVE d'hiver : 7 t MS/ ha * 22 = 154 ; soit un besoin forfaitaire de 154 Kg N /ha pour la classe de rendement]6 – 8].

➤ Pi : quantité d'azote absorbé en sortie d'hiver

Il y a une liaison étroite entre l'azote absorbé par la plante et la quantité de biomasse produite à l'ouverture du bilan. L'azote absorbé par le couvert en sortie d'hiver est donc variable en fonction de l'état de croissance de ce dernier. L'estimation de Pi peut ainsi se faire par pesée de la biomasse fraîche ou sèche : kg de biomasse par m² en sortie d'hiver transformé en quantité d'azote absorbé. Des teneurs existent par l'intermédiaire de la méthode MERCI : <https://methode-merci.fr/calculateur>.

Il est également possible d'estimer le Pi en reprenant la méthode décrite dans la brochure azote du COMIFER, pour les céréales d'hiver, sans plafonner la dose : 10 kg N/ha pour les trois premières feuilles du maître brin, augmentés de 5 kg N/ha par talle supplémentaire (**Groupe Azote, 2013, Calcul de la fertilisation azotée, guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales, Page 29**).

Cette approche, en l'état des connaissances, est généralisable aux céréales à paille. Pour les céréales à fort tallage, une expertise complémentaire est en cours.

➤ Rf : reliquats d'azote à la fermeture du bilan

À défaut de faire des mesures de reliquats à chaque fermeture du bilan, il est recommandé d'utiliser les références disponibles dans la brochure azote (**Groupe Azote, 2013, Calcul de la fertilisation azotée, guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales, Page 100**).

Les recommandations de la brochure azote permettent d'estimer la valeur du Rf en fonction du type de sol et sa profondeur. Sa profondeur d'estimation doit être identique à celle de mesure ou d'estimation de Ri.

Données de la brochure azote

Épaisseur du sol	Sol léger	Sol limoneux	Sol argileux	Sol calcaire
	Arg < 15%	15% < Arg < 30%	Arg > 30%	
	L < 45%	L > 45 %		
	CaCO ₃ < 10%	CaCO ₃ < 10%		CaCO ₃ > 40%
Sol superficiel (0 à 30 cm)	5	10	15	15
Peu profond (0 à 60 cm)	10	15	20	20
Profond (0 à 90 cm)	15	20	30	30
Très profond (0 à 120 cm)	20	30	40	40

Source : AZOBIL © INRA, 2012

➤ Mh : minéralisation de l'humus du sol

L'approche proposée pour le Mh est valable pour les **CIVE d'hiver**. Elle consiste à réaliser une estimation par rapport au Mh du blé tendre d'hiver, déjà défini dans tous les cas de figure (sols, ...).

Différents coefficients d'estimation du Mh sont calculés à partir de la moyenne des Jours Normalisés (JN). Dans un premier temps, les JN des CIVE d'hiver sont calculés dans quelques régions en fonction des périodes de récoltes (précoce et tardive). Dans un second temps, les JN du blé tendre d'hiver sont calculés dans les

mêmes régions à partir des informations sur la date de semis et la date de fin d'absorption d'azote par le blé. Le rapport entre les JN des CIVE et les JN du blé dans chaque région donne différents coefficients dont la moyenne permet de définir les coefficients d'estimation du Mh ci-dessous.

Coefficients d'estimation du Mh des CIVE d'hiver :

- **CIVE Précoce : $Mh = 0,4 * Mh \text{ du blé}$ (coefficient « blé »)**
 $Mh = 0,2 * Mh \text{ annuel}$ (coefficient « temps »)
- **CIVE tardive : $Mh = 0,6 * Mh \text{ du blé}$ (coefficient « blé »)**
 $Mh = 0,3 * Mh \text{ annuel}$ (coefficient « temps »)

Ces coefficients permettent aux utilisateurs de déterminer une valeur de Mh en se basant sur le Mh moyen du blé tendre ou le Mh moyen annuel (coefficient 'temps') selon des références régionales disponibles.

Les cumuls des jours normalisés entre la sortie de l'hiver et la récolte des CIVE d'hiver sont en moyenne de 18 jours pour les CIVE précoces et de 30 jours pour les CIVE tardives.

Dans le cas des **CIVE d'été**, de durées de cycle plus variables, il faudra déterminer régionalement la part de Mh à prendre en compte par rapport au Mh du Maïs.

Il est également possible pour les utilisateurs, notamment les éditeurs de logiciel de fertilisation, d'estimer le Mh à partir d'équations ou modèles telle que l'équation de minéralisation de la brochure azote.

➤ Mhp : Minéralisation due à un retournement de prairie

Même principe que le Mh, en utilisant les coefficients définis à partir des jours normalisés (ci-dessous) ou les coefficients établis régionalement pour les CIVE d'été.

CIVE d'hiver Précoce		CIVE d'hiver tardive	
Coefficient par rapport au blé	Coefficient « temps » (moyenne annuelle)	Coefficient par rapport au blé	Coefficient « temps » (moyenne annuelle)
0,4	0,2	0,6	0,3

➤ Xa - Mpro et Xpro : Minéralisation nette de l'azote organique d'un PRO

Le principe est identique pour la fourniture en N issue des PRO (Produits Résiduels Organiques), à la réserve près d'être vigilant sur la date d'apport du PRO (avant ou après la date d'ouverture du bilan) pour la fourniture en N minéral issu du PRO (N-NH₄).

S'il y a un apport organique après la date d'ouverture du bilan, et si le PRO est riche en azote ammoniacal (exemple : PRO de type II, d'après la typologie des PRO du 7^e PAN), on peut faire l'hypothèse que l'effet fertilisant est dû essentiellement à l'azote minéral, qui est immédiatement disponible, ne dépendant pas du temps. La récolte précoce ou tardive de la CIVE, par rapport à un blé, a moins d'impact, donc il y a peu d'effet de minéralisation du produit organique sur le long terme et dans ce cas, on peut faire l'approximation que $KeqN \text{ bilan CIVE} = KeqN \text{ bilan blé}$.

Si l'expression **Xa** est utilisée, mettant en œuvre des **keqN Bilan**, alors, pour un apport de PRO avant l'ouverture du bilan (avant l'hiver pour une CIVE d'hiver), on retrouve la règle énoncée précédemment :

$Xa_{CIVE} = 0,4 * Xa_{Blé}$ pour une CIVE précoce par exemple.

Si les expressions **Mpro** et **Xpro** sont utilisés, en général lors d'un bilan dynamique, alors on retrouve :

$Mpro1_{CIVE} = 0,4 * Mpro1_{Blé}$ pour un apport de PRO avant l'automne sur CIVE d'hiver.

Xpro s'applique ou ne s'applique pas selon la date d'apport du PRO par rapport à la date d'ouverture du bilan.

L'écriture réellement dynamique permet de prendre en compte précisément Mpro et Xpro.

Dans le cas d'apport PRO sur CIVE, la fraction minéralisée après la récolte de la CIVE devra être prise en compte dans le bilan de la culture implantée après la CIVE.

➤ Mr : Minéralisation des résidus de culture du précédent

Ce poste de l'équation prend en compte la minéralisation des résidus de la culture qui précède la CIVE.

Pour les **CIVE d'hiver**, si on se réfère à la brochure azote (*Groupe Azote, 2013, Calcul de la fertilisation azotée, guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales, Page 39, tableau 5*), en faisant l'hypothèse d'une absorption précoce par la CIVE d'hiver de l'azote fourni par Mr. La valeur du Mr pour cette CIVE peut être approchée par la différence entre la valeur du Mr pour une ouverture du bilan précoce et la valeur de Mr pour une ouverture du bilan en avril.

($Mr_{CIVE} = Mr_{\text{« ouverture du bilan en sortie d'hiver »}} - Mr_{\text{« ouverture du bilan début avril »}}$).

Nature du précédent	Mr (Kg N/ha)
Betterave	10
Carotte	10
Céréales pailles enfouies	-10
Céréales pailles enlevées ou brûlées	0
Colza	10
Endive	10
Féverole	10
Lin fibre	0
Luzerne (retournement fin été/début automne) : année n+1	10
Luzerne (retournement fin été/début automne) : année n+2	0
Maïs fourrage	0
Maïs grain	-10
Pois protéagineux	10
Prairie	0
Pomme de terre	10
Tournesol	-10
Ray-Grass dérobé	-10
Soja	10

Groupe de travail CIVE – COMIFER, 2024.

D'après ARVALIS – Institut du végétal et INRAE 2012 (COMIFER, Brochure azote, page 39)

Pour les CIVE d'été un travail est en cours. En attendant et par défaut il est recommandé de négliger la valeur du poste Mr ($Mr = 0$)

Contributeurs / Membres du sous-groupe de travail CIVE :

Nicolas DAGORN - Arvalis
Francesca DEGAN - Arvalis
Honorine GABRIEL – CA Grand-Est
David LEDUC – CA Pays de la Loire
Caroline LE ROUX – LDAR
Christine LE SOUDER – Arvalis
Fiona OBRIOT – LDAR
Odile TAUVEL – CA Normandie
Elise VANDERMEERSCH – CA Normandie

Autres contributeurs :

Nicolas FERRAND – CA Nouvelle Aquitaine
Charlotte JOURNEL – Agro Transfert – Ressources et Territoires
Alexandre WEIL – Precifield

Structures partenaires du projet RECITAL