



**DETERMINATION DE L'AZOTE EFFICACE ET DU  
COEFFICIENT D'EQUIVALENCE ENGRAIS  
  
DE PRODUITS RESIDUAIRES ORGANIQUES**

*REALISE PAR :*



**LABORATOIRE LCA**

1 rue Samuel Champlain - ZI Chef de Baie

17074 LA ROCHELLE Cedex 09

Tel : 05.46.43.45.45

**JUIN 2012**

# SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES .....	4
LISTE DES TABLEAUX .....	5
CONTEXTE REGLEMENTAIRE ET CADRE DE L'ETUDE .....	6
GLOSSAIRE ET LISTE DES ABREVIATIONS .....	7

## PARTIE 1 : METHODOLOGIE

<b>1. PRESENTATION DE L'OUTIL .....</b>	<b>9</b>
1.1 CHOIX D'AZOFERT® ET PRINCIPE GÉNÉRAL .....	9
1.2 MODULE « PRODUITS ORGANIQUES » .....	10
1.3 NOTION DE « JOURS NORMALISÉS » .....	10
<b>2. PRESENTATION DE LA DEMARCHE .....</b>	<b>11</b>
2.1 HYPOTHÈSES DE DÉPART : CULTURES ET CLIMAT MOYEN .....	11
2.2 MISE EN ÉQUATION DES CINÉTIQUES DE MINÉRALISATION DU N ORGANIQUE .....	12
2.3 CALCUL DU POURCENTAGE D'AZOTE ORGANIQUE MINÉRALISÉ .....	12
2.4 CALCUL DES JOURS NORMALISÉS .....	12
2.4.1 <i>Cas A : épandage de printemps, avant semis d'une culture de printemps.</i>	13
2.4.2 <i>Cas B : épandage de fin d'été, avant semis d'une culture d'automne .....</i>	14
2.4.3 <i>Cas C : épandage de fin d'été, avant CIPAN suivie d'une culture de printemps .....</i>	15
2.4.4 <i>Logigramme de la démarche .....</i>	16
<b>3. SITUATIONS SIMULEES.....</b>	<b>17</b>
3.1 CLIMATS ET TYPES DE SOLS .....	17
3.1.1 <i>Définition des zonages agro-climatiques.....</i>	17
3.1.2 <i>Climat moyen des zones climatiques (graphiques).....</i>	19

3.1.3	<i>Description des types de sols de l'étude</i> .....	22
3.1.4	<i>Résumé des situations pédoclimatiques simulées</i> .....	23
3.2	PRODUITS RÉSIDUAIRES ORGANIQUES .....	24
3.2.1	<i>Mise en équation des cinétiques de minéralisation</i> .....	25
3.2.1.1	Passage des jours normalisés des cinétiques « laboratoire » aux jours normalisés à 15°C .....	25
3.2.1.2	Coefficients descriptifs de la minéralisation des PRO .....	26
3.2.2	<i>Représentation des cinétiques modélisées ; comparaison aux mesures en laboratoire</i> .....	27
3.2.3	<i>Représentation graphique des cinétiques des 10 PRO de l'étude</i> .....	30
<b>PARTIE 2 : RESULTATS</b>		
1.	<b>DETERMINATION DES TEMPS NORMALISES</b> .....	<b>32</b>
1.1	PRÉSENTATION DES SITUATIONS CULTURALES .....	32
1.2	RÉSULTATS DES CALCULS DES TEMPS NORMALISÉS .....	34
1.3	INTERPRÉTATION .....	35
1.3.1	<i>Influence de l'itinéraire technique</i> .....	35
1.3.2	<i>Influence du type de sol</i> .....	36
1.3.3	<i>Influence de la zone climatique</i> .....	36
1.4	UTILISATION .....	36
2.	<b>AZOTE EFFICACE ET COEFFICIENT D'EQUIVALENCE ENGRAIS (EN POURCENTAGE DE L'AZOTE TOTAL DES PRODUITS) : CAS DES BOUES CHAULÉES DE FILTRE PRESSE</b> .....	<b>37</b>
3.	<b>AZOTE EFFICACE ET EQUIVALENCE ENGRAIS POUR 170 KG D'AZOTE TOTAL APPORTES PAR LES PRODUITS : CAS DES BOUES CHAULÉES DE FILTRE PRESSE</b> .....	<b>40</b>
<b>PARTIE 3 : CONCLUSION</b> .....		
<b>ANNEXES : TABLEAUX DES RESULTATS COMPLETS</b> .....		

## LISTE DES FIGURES

<i>Figure 1 : Données climatiques réelles et moyennes d'Azofert® (Source : manuel Azofert®)</i>	9
<i>Figure 2 : Epandage de printemps avant culture de printemps et Coefficient d'équivalence engrais</i>	13
<i>Figure 3 : Epandage de fin d'été avant culture d'automne et Coefficient d'équivalence engrais</i>	14
<i>Figure 4 : Epandage de fin d'été avant CIPAN suivie de culture de printemps. Coefficient d'équivalence engrais et Coefficient d'azote efficace</i>	15
<i>Figure 5 : Présentation synthétique de la démarche de calcul des coefficients d'efficacité en fonction des dates d'épandage et des cultures</i>	16
<i>Figure 6 : Zonage climatique de la France</i>	17
<i>Figure 7 : Présentation du zonage climatique de l'étude</i>	18
<i>Figure 8 : Graphiques des données climatiques moyennes des six zones de l'étude</i>	20
<i>Figure 9 : cinétiques modélisées (après mise en équation des PRO). Comparaison aux points de mesure en laboratoire (carrés rouges).</i>	27
<i>Figure 10 : cinétique de minéralisation de l'azote organique des 10 PRO de l'étude</i>	30
<i>Figure 11 : coefficient d'équivalence engrais sur la période du bilan et sur tout le cycle, d'une boue de filtre presse chaulée épandue au printemps avant betterave</i>	47
<i>Figure 12 : coefficient d'équivalence engrais sur la période du bilan et sur tout le cycle, d'une boue de filtre presse chaulée épandue en fin d'été avant colza</i>	48
<i>Figure 13 : coefficient d'azote efficace et d'équivalence engrais sur la période du bilan et sur tout le cycle, d'une boue de filtre presse chaulée épandue en fin d'été avant betterave précédée d'une moutarde (CIPAN)</i>	48

## LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1 : Caractéristiques des sols de l'étude</i> .....	22
<i>Tableau 2 : Les différentes situations pédoclimatiques de l'étude (couples CLIMAT x SOL)</i> .....	23
<i>Tableau 3 : Présentation des 10 PRO de l'étude. Nature des produits et source des données.</i> .....	24
<i>Tableau 4 : Correspondance des jours à 28°C et des jours à 15°C</i> .....	25
<i>Tableau 5 : Résultat de la mise en équation des cinétiques de minéralisation des PRO. Détermination des coefficients <math>a_N</math>, <math>b_N</math>, <math>k</math> et <math>l</math>.</i> .....	26
<i>Tableau 6 : Description des itinéraires techniques de l'étude</i> .....	33
<i>Tableau 7 : Résultat des calculs des temps normalisés en fonction des itinéraires techniques</i> .....	34
<i>Tableau 8 : Coefficients d'azote efficace et coefficients d'équivalence engrais, par zonage climatique, par type de sol et par itinéraire technique (en % du N total). Cas des boues chaulées filtre presse.</i> .....	38
<i>Tableau 9 : Quantités d'azote efficace et équivalence engrais, par zonage climatique, par type de sol et par itinéraire technique (pour 170 kg d'azote total apporté). Cas des boues chaulées filtre presse.</i> .....	41
<i>Tableau 10 : Valeurs moyennes du Coefficient d'Azote Efficace et des Coefficients d'Equivalence Engrais, exprimées en pourcentage de l'azote total des produits. Tableau de synthèse par produit.</i> .....	45

## CONTEXTE REGLEMENTAIRE ET CADRE DE L'ETUDE

Afin d'affiner le conseil agronomique fourni à leurs partenaires agriculteurs, les membres du SYPREA ont réalisé des cinétiques de minéralisation de l'azote contenu dans différents produits (boues urbaines, boues industrielles, compost boues et compost déchets verts).

Le SYPREA souhaitait faire établir à partir des références dont il dispose, les coefficients d'azote efficaces, les coefficients d'équivalence engrais de différents produits épandus en été (pour une culture d'automne ou CIPAN) et les coefficients d'équivalence engrais des différents produits épandus au printemps et ce pour différents types de sols français. Ces notions rejoignent celle d'azote efficace des produits organiques mentionnée dans l'arrêté ministériel du 19 décembre 2011 relatif au programme d'action national à mettre en œuvre dans les zones vulnérables afin de réduire la pollution des eaux par les nitrates d'origine agricole. Cet arrêté national fait référence à la méthode du bilan d'azote minéral du sol prévisionnel et au document le plus récent détaillant cette méthode : le Guide méthodologique « Calcul de la fertilisation azotée » du COMIFER<sup>1</sup>.

La prestation, confiée au laboratoire LCA, consistait dans :

- la saisie des données dans un logiciel adapté aux objectifs de l'étude
- la compilation des données
- l'édition des coefficients d'azote efficace et des coefficients d'équivalence engrais, pour 10 types de produit, pour différents types de sol, par zone agro-climatique et pour un épandage en été et au printemps
- l'extrapolation des quantités d'azote efficace et quantités d'azote équivalent en engrais sur une base d'un apport de 170 kg d'azote total à l'hectare pour chaque produit
- la présentation, en conclusion, d'un tableau reprenant pour chaque type de produit, les données suivantes (tirées du Guide du COMIFER) :

Type de produits	Cultures concernées	Période d'apport	Coefficient d'azote	Coefficient d'équivalence engrais	
				Keq sur la période bilan	Keq sur tout le cycle
	Culture de printemps	Printemps	Sans objet		
	Culture de printemps	Eté-Automne avant CIPAN			
	Culture d'automne	Fin d'été	Sans objet		

**Ce rapport présente la méthode employée, et les résultats obtenus.**

<sup>1</sup> Guide téléchargeable sur : <http://www.comifer.asso.fr/index.php/publications.html>

## GLOSSAIRE ET LISTE DES ABREVIATIONS

Les termes et abréviations utilisés dans ce document sont définis ci-dessous :

- **Azote efficace** : somme de l'azote présent dans un fertilisant azoté sous forme minérale et de l'azote sous forme organique minéralisable pendant le temps de présence de la culture en place ou de la culture implantée à la suite de l'apport. Pour les fertilisants de type I et II, le total des apports avant et sur la CIPAN ou la dérobée est limité à 70 kg d'azote efficace/ha (Arrêté du 19 décembre 2011).
- **Bilan azoté** : bilan de masse du stock d'azote minéral du sol sur la profondeur exploitée par les racines de la culture, sur une période de temps donnée (Source : Guide « Calcul de la fertilisation azotée » du COMIFER). Il est décrit par l'équation : Etat final – Etat initial = Entrées – Sorties. L'état initial correspond à celui à la « date d'ouverture » du bilan, et l'état final à celui à la « date de fermeture » du bilan. La période du bilan n'est pas prédéterminée et peut s'appliquer à la totalité ou seulement à certaines étapes du cycle cultural. Il est généralement réalisé sur la partie du cycle de développement au cours de laquelle s'exprime l'essentiel des besoins de la culture, par exemple pour les cultures d'hiver du milieu de l'hiver (mesure du reliquat azoté) à la récolte. Mais il peut être réalisé aussi sur une partie seulement du cycle de développement.
- **CIPAN** : Culture Intermédiaire Pièges à Nitrates. L'arrêté du 19 décembre 2011, définit la CIPAN comme « culture se développant entre deux cultures principales et qui a pour but de limiter les fuites de nitrates. Sa fonction principale est de consommer les nitrates produits lors de la minéralisation post-récolte et éventuellement les reliquats de la culture principale précédente. Elle n'est ni récoltée, ni fauchée, ni pâturée. »
- **Coefficient d'Azote Efficace** : cette notion est abordée dans le Guide méthodologique « Calcul de la fertilisation azotée » du COMIFER, et reprise pour les besoins de l'étude. Il s'agit de la fraction d'azote des PRO efficace pour une CIPAN, lors d'un épandage de fin d'été. Le Coefficient d'Azote Efficace n'est donc calculé que dans le cas d'un épandage avant CIPAN. Il correspond à un Coefficient d'Equivalence Engrais sur la période entre l'épandage et la destruction de la CIPAN. L'azote restant à minéraliser après cette période est potentiellement utilisable par la culture à fertiliser. Le Guide du COMIFER rappelle que « les apports de PRO réalisés avant CIPAN + cultures de printemps ne sont pas autorisés dans toutes les régions. Quand cette pratique est permise, il faut veiller à ajuster la quantité d'azote « efficace » apporté par le PRO à la capacité d'absorption du CIPAN ».
- **Coefficient d'Equivalence Engrais (Keq)** : défini dans le Guide méthodologique « Calcul de la fertilisation azotée » du COMIFER, le Coefficient d'Equivalence Engrais minéral (nom complet), ou Keq, représente le « rapport entre la quantité d'azote apporté par un engrais minéral (le plus souvent de l'ammonitrate) et la quantité d'azote total apporté par le PRO qui permet la même absorption d'azote ». Comme le rappelle le Guide du COMIFER, les coefficients déjà publiés, par exemple pour les engrais de ferme, ont le plus souvent été calculés sur la base de mesures d'azote absorbé à maturité, lors d'expérimentations au champ. Dans notre étude, il est assimilé à la fraction de l'azote total du PRO minéralisable lors de cinétiques de minéralisation réalisées en conditions contrôlées de laboratoire. Le Guide du COMIFER distingue deux périodes de calcul du Keq, en fonction de la période d'épandage et de la culture réceptrice : pour des PRO apportés avant l'ouverture du bilan sur des cultures d'automne (blé, colza...), une partie du Keq n'est pas comptabilisée dans le bilan (à la date d'ouverture du bilan, une partie de l'azote minéralisé par le PRO se retrouve dans le reliquat azoté, dans l'azote déjà absorbé dans la culture, ou perdu par lixiviation ou perte gazeuse).
  - o **Keq sur la période du bilan (Keq bilan)** : correspond au Keq calculé sur la période du bilan (de la mesure du reliquat azoté à la récolte)
  - o **Keq sur tout le cycle (Keq cycle)** : correspond au Keq calculé entre le semis et la récolte de la culture principale (fermeture du bilan azoté)
- **Fertilisant azoté** : au sens de l'arrêté du 19 décembre 2011, « toute substance contenant un ou des composés azotés épandue sur les sols afin d'améliorer la croissance de la végétation ». Les PRO sont considérés comme des fertilisants azotés.

# PARTIE 1 :

# METHODOLOGIE



## 1. PRESENTATION DE L'OUTIL

### 1.1 CHOIX D'AZOFERT® ET PRINCIPE GENERAL

Dans son Guide méthodologique pour le calcul de la fertilisation azotée, le COMIFER présente et explique le calcul des différents termes du bilan azoté, selon les diverses approches utilisées en France. L'emploi d'un « bilan dynamique », prenant en compte le climat réel passé et utilisant des projections climatiques fréquentielles, est décrit par les auteurs du Guide un moyen de disposer d'une estimation plus pertinente de la dose d'engrais azoté par rapport à l'utilisation d'un bilan prévisionnel « statique ». L'approche dynamique est incontournable dans le cadre de notre étude, qui doit permettre de comparer, à travers des simulations, différents climats et plusieurs périodes d'épandage.

L'outil utilisé est AZOFERT®. Développé par l'INRA et le LDAR pour répondre à la demande croissante en matière de productions de qualité et de protection de l'environnement, ce logiciel repose sur un bilan dynamique, avec une prise en compte des réelles spécificités pédoclimatiques locales. Basé sur un bilan prévisionnel complet, il estime, avant l'apport d'engrais, tous les termes du bilan azoté sur la profondeur d'enracinement de la culture et sur une période couvrant le cycle de développement de cette culture. Il simule au cours du temps la fourniture d'azote par le sol et par les différentes sources organiques (résidus de la culture précédente, résidus de cultures intermédiaires, produits organiques exogènes divers).

Les données climatiques réelles de l'année sont renseignées par décade. Elles servent à estimer l'état de décomposition des différentes sources d'azote organique (résidus du précédent ou des CIPAN, produits organiques) à la date du reliquat. Pour la période allant de la date du reliquat à la récolte, le logiciel utilise les données climatiques moyennes décadaires renseignées par l'utilisateur.

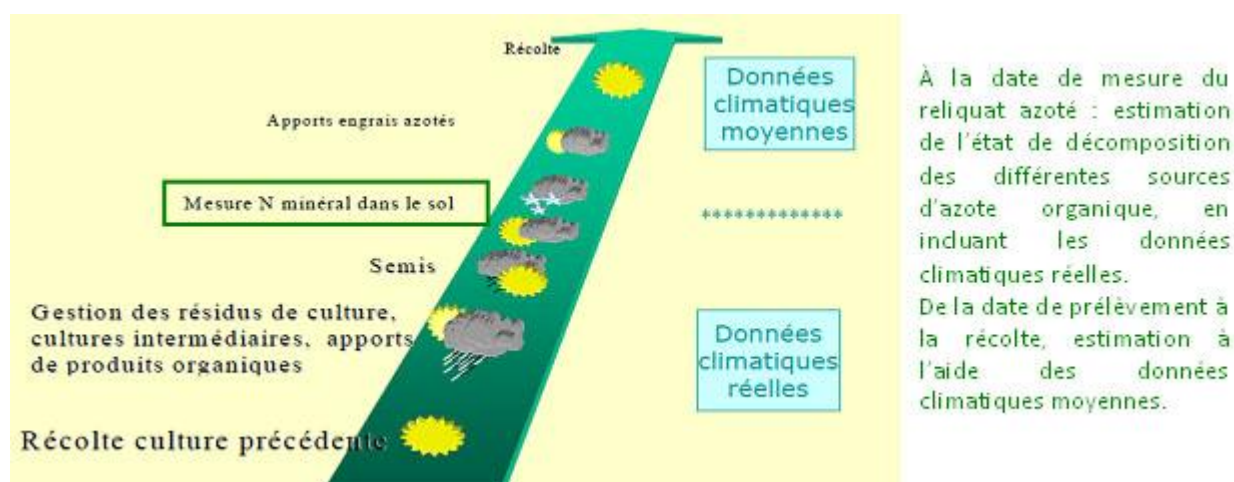


Figure 1 : Données climatiques réelles et moyennes d'Azofert® (Source : manuel Azofert®)

## 1.2 MODULE « PRODUITS ORGANIQUES »

AZOFERT® comporte un module spécifique d'estimation des fournitures d'azote par les produits organiques. La minéralisation « apparente » de l'azote organique contenu dans le produit organique est décrite par une cinétique dont l'équation est la suivante (Nicolardot et al, 2001) :

$$N = N_0 (a_N - b_{Ne^{-kt}} - c_{Ne^{-lt}})$$

Avec :

- $N$  : quantité d'azote minéralisé au temps  $t$
- $N_0$  : quantité d'azote contenu dans le produit organique à la date d'apport
- $a_N, b_N, c_N, k, l$  : coefficients décrivant la cinétique de minéralisation, établis à partir des études d'incubations sur des produits organiques en conditions de laboratoire. Ils sont référencés par rapport à un temps normalisé.
- $t$  : temps

## 1.3 NOTION DE « JOURS NORMALISES »

Le temps pris en considération dans le logiciel n'est pas un temps calendaire, mais un temps dit normalisé. Il est utilisé pour intégrer, par décade, les variations de température et d'humidité du sol. Ces deux paramètres influencent en effet de façon importante l'activité biologique du sol et donc la vitesse de minéralisation des produits organiques.

Ainsi, on détermine le nombre de « jours normalisés » (JN) sur la période du cycle ou du bilan, de la façon suivante :

$$JN = 1 * f(T) * g(H)$$

Où :

- le facteur « température »,  $f(T)$ , est décrit par la loi de Van't Hoff. Seules les températures moyennes décadaires supérieures à 15°C sont « efficaces ». Ce facteur est plafonné à 30°C pour les températures supérieures à 30°C.
- le facteur « humidité »,  $g(H)$ , est décrit par une autre équation. Il varie linéairement avec la teneur en eau du sol entre l'humidité au point de flétrissement et l'humidité à la capacité au champ du sol. La teneur en eau est estimée à l'aide d'un bilan hydrique.

Le nombre de jours normalisés d'un itinéraire technique dépend donc du climat (température, précipitations, ETP), et du type de sol (humidité à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent,...).

## 2. PRESENTATION DE LA DEMARCHE

En bref :

- 1- Calcul des jours normalisés pour les différentes situations retenues, via le moteur d'AZOFERT®
- 2- Mise en équation des cinétiques de minéralisation des produits, sous la forme suivant :

$$N = N_0 (a_N - b_N e^{-kt} - C_N e^{-lt})$$

- 3- Intégration des jours normalisés calculés au point 1 ci-dessus, dans les équations de cinétiques du point 2, pour chaque situation pédoclimatique et chaque itinéraire technique retenu
- 4- Calcul du Coefficient d'Azote Efficace et du Coefficient d'Equivalence Engrais

### 2.1 HYPOTHESES DE DEPART : CULTURES ET CLIMAT MOYEN

Afin de ne pas créer d'effet « année », l'étude a été menée avec des **données climatiques moyennes décennales**, pour la période avant et après reliquat (et pour la période allant de l'épandage de fin d'été au semis de la culture de printemps, avec ou sans CIPAN). Les résultats de l'étude sont donc à replacer dans une situation climatique moyenne de la région.

Les jours normalisés sont une **variable de sortie intermédiaire** du moteur d'interprétation d'AZOFERT®. Pour accéder à cette variable, il est toutefois nécessaire de disposer de certaines données d'entrées :

- Nature et date de récolte du précédent (interviennent pour l'initialisation du bilan hydrique utilisé pour la fonction  $g(H)$  définie au 1.3. Dans cette étude, le précédent est un blé d'hiver, récolté le 15 juillet.
- Nature, date de semis et date de récolte de la culture à fertiliser (interviennent pour le bilan hydrique, qui prend en compte l'évapotranspiration par le couvert végétal, ainsi que pour le calcul de la durée du cycle). Dans cette étude, la culture à fertiliser est :
  - o une betterave ou un maïs ensilage (selon les régions : cf Tableau 6, page 33), semés le 15 mars et récoltés le 15 septembre, dans le cas de cultures de printemps ;
  - o un colza d'hiver semé le 1<sup>er</sup> septembre et récolté le 1<sup>er</sup> juillet, dans le cas de cultures d'automne ;
- Nature du CIPAN : il s'agit d'une moutarde, semée le 1<sup>er</sup> septembre et détruite le 15 novembre.

## 2.2 MISE EN EQUATION DES CINETIQUES DE MINERALISATION DU N ORGANIQUE

LCA dispose d'un catalogue de produits organiques déjà paramétrés, fourni par l'INRA-LDAR avec le logiciel. Pour les PRO dont SYPREA a fourni les cinétiques, il convient d'ajuster les mesures réalisées à l'équation suivante en tenant compte de la notion de temps normalisé :  $N = N_0 (a_N - b_{Ne^{-kt}} - C_{Ne^{-lt}})$

## 2.3 CALCUL DU POURCENTAGE D'AZOTE ORGANIQUE MINERALISE

Le calcul des quantités d'azote minéralisées, pour chaque produit, pour chaque situation pédoclimatique et pour chaque modalité d'apport, se fait par application de l'équation ci-dessus, où « t » correspond aux jours normalisés trouvés au point 2.1. Ce calcul a été effectué dans un tableur de type Excel. Connaissant les teneurs en azote organique et en azote total des produits, il est possible de déterminer le pourcentage d'azote minéralisé, exprimé en pourcentage de l'azote organique ou de l'azote total. **Dans cette étude, les résultats sont exprimés par rapport à l'azote total apporté par les PRO.**

## 2.4 CALCUL DES JOURS NORMALISES

Les nombres de jours normalisés servent à décrire les différentes dates d'épandage et les cultures implantées après l'apport de PRO.

Trois cas sont présentés :

- Epandage de printemps, avant une culture de printemps : cas A
- Epandage de fin d'été, avant une culture d'automne : cas B
- Epandage de fin d'été, avant CIPAN suivie d'une culture de printemps : cas C

Chaque cas est caractérisé par des nombres de jours normalisés spécifiques, explicités ci-après. Selon les situations, la période du bilan peut correspondre ou non à la période du cycle.

### 2.4.1 CAS A : EPANDAGE DE PRINTEMPS, AVANT SEMIS D'UNE CULTURE DE PRINTEMPS

Ce cas peut être décrit selon la Figure 2.

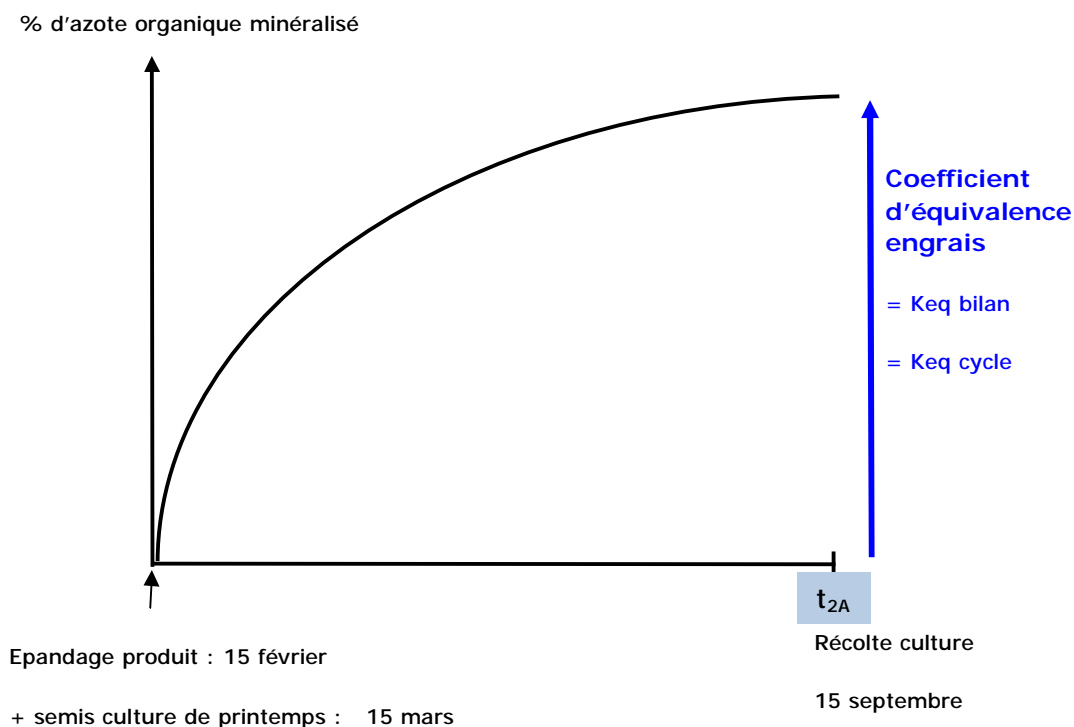


Figure 2 : Epanchage de printemps avant culture de printemps et Coefficient d'équivalence engrais

Dans ce cas, la période du bilan correspond à la période du cycle. Par conséquent, le coefficient d'équivalence engrais (Keq) sur la période du bilan est égal au Keq sur tout le cycle.

Cette situation requiert un seul calcul du nombre de jours normalisés. Il s'applique sur la période allant de la date d'épandage, qui correspond à la date d'ouverture du bilan (15 février), à la date de récolte (15 septembre). Nous appelons «  $t_{2A}$  » le nombre de jours normalisés correspondant.

## 2.4.2 CAS B : EPANDAGE DE FIN D'ETE, AVANT SEMIS D'UNE CULTURE D'AUTOMNE

Ce cas est décrit par la Figure 3.

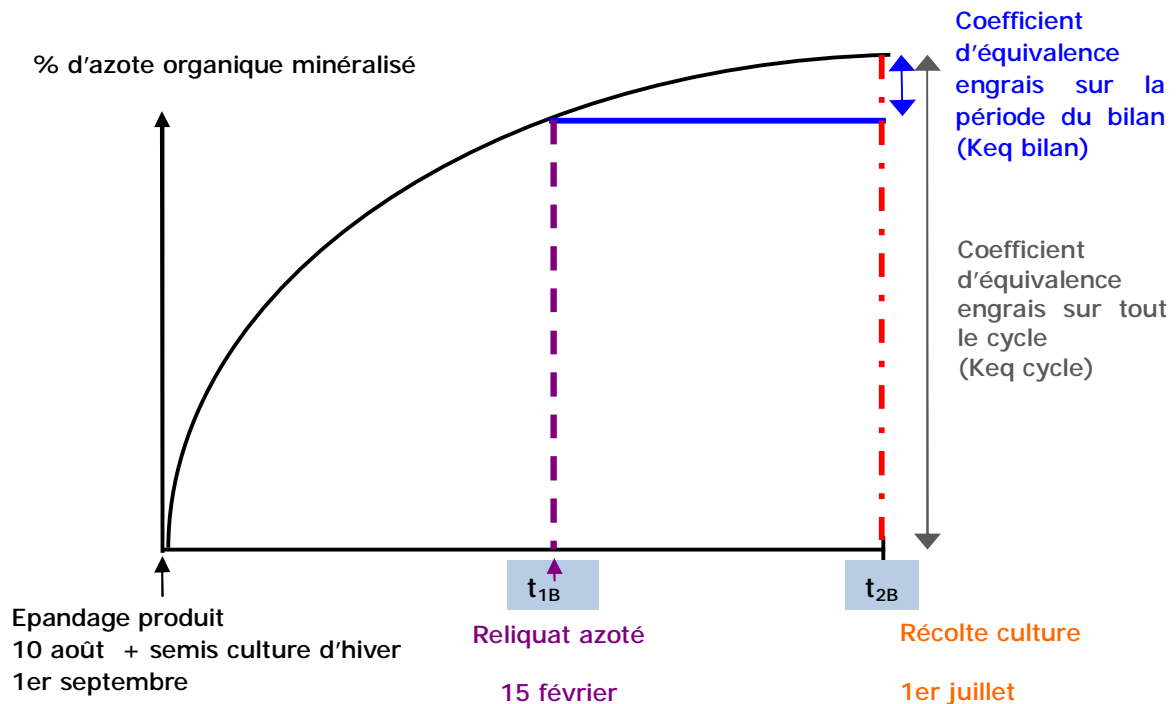


Figure 3 : Epandage de fin d'été avant culture d'automne et Coefficient d'équivalence engrais

Dans ce cas, la période du bilan ne correspond pas à la période du cycle.

Cette situation est décrite par deux nombres de jours normalisés («  $t_{1B}$  » et «  $t_{2B}$  »), qui représentent :

- la période allant de la date d'épandage (10 août) à la date de récolte (1er juillet). Le nombre de jours normalisés sur cette période ( $t_{2B}$ ) sert directement au calcul du Coefficient d'Equivalence Engrais sur tout le cycle.
- la période allant de la date d'épandage (10 août) à la date du reliquat azoté (date d'ouverture du bilan : 15 février). Le nombre de jours normalisés sur cette période ( $t_{1B}$ ) sert au calcul du Coefficient d'Equivalence Engrais sur la période du Bilan. En effet, le nombre de jours normalisés sur la période du bilan correspond à la différence «  $t_{2B} - t_{1B}$  ».

### 2.4.3 CAS C : EPANDAGE DE FIN D'ETE, AVANT CIPAN SUIVIE D'UNE CULTURE DE PRINTEMPS

Ce cas est illustré par la Figure 4.

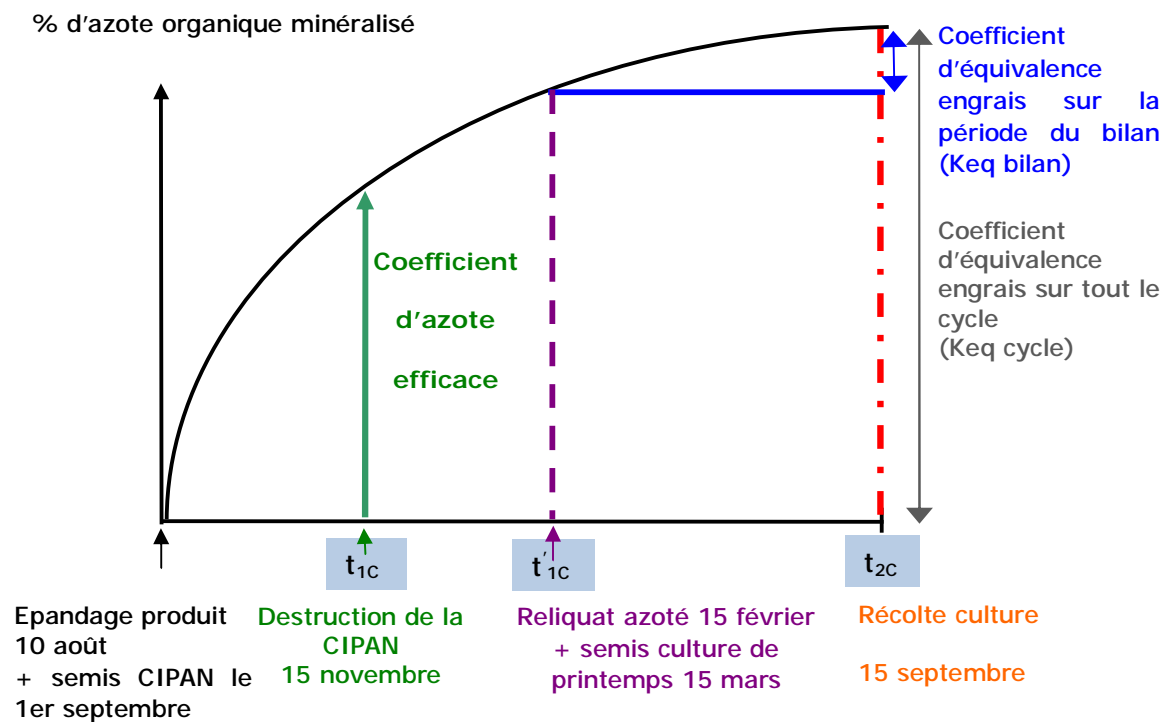


Figure 4 : Epandage de fin d'été avant CIPAN suivie de culture de printemps. Coefficient d'équivalence engrais et Coefficient d'azote efficace

Dans ce cas la période du bilan ne correspond pas à la période du cycle.

Cette situation est décrite par trois valeurs de jours normalisés :

- Période allant de la date d'épandage (10 août) à la date de destruction du CIPAN (15 novembre) : le nombre de jours normalisés de cette période («  $t_{1c}$  ») sert au calcul du Coefficient d'Azote Efficace.
- Période allant de la date d'épandage (10 août) à la date de récolte (date de fermeture du bilan : 15 septembre) : le nombre de jours normalisés de cette période («  $t_{2c}$  ») est utilisé pour calculer directement le Coefficient d'Equivalence Engrais sur tout le cycle (Keq cycle).
- Période allant de la date d'épandage (10 août) à la date du reliquat azoté (date d'ouverture du bilan : 15 février). Le nombre de jours normalisés sur cette période ( $t'_{1c}$ ) sert au calcul du Coefficient d'Equivalence Engrais sur la période du Bilan. En effet, le nombre de jours normalisés sur la période du bilan correspond à la différence «  $t_{2c} - t'_{1c}$  ».

## 2.4.4 LOGIGRAMME DE LA DEMARCHE

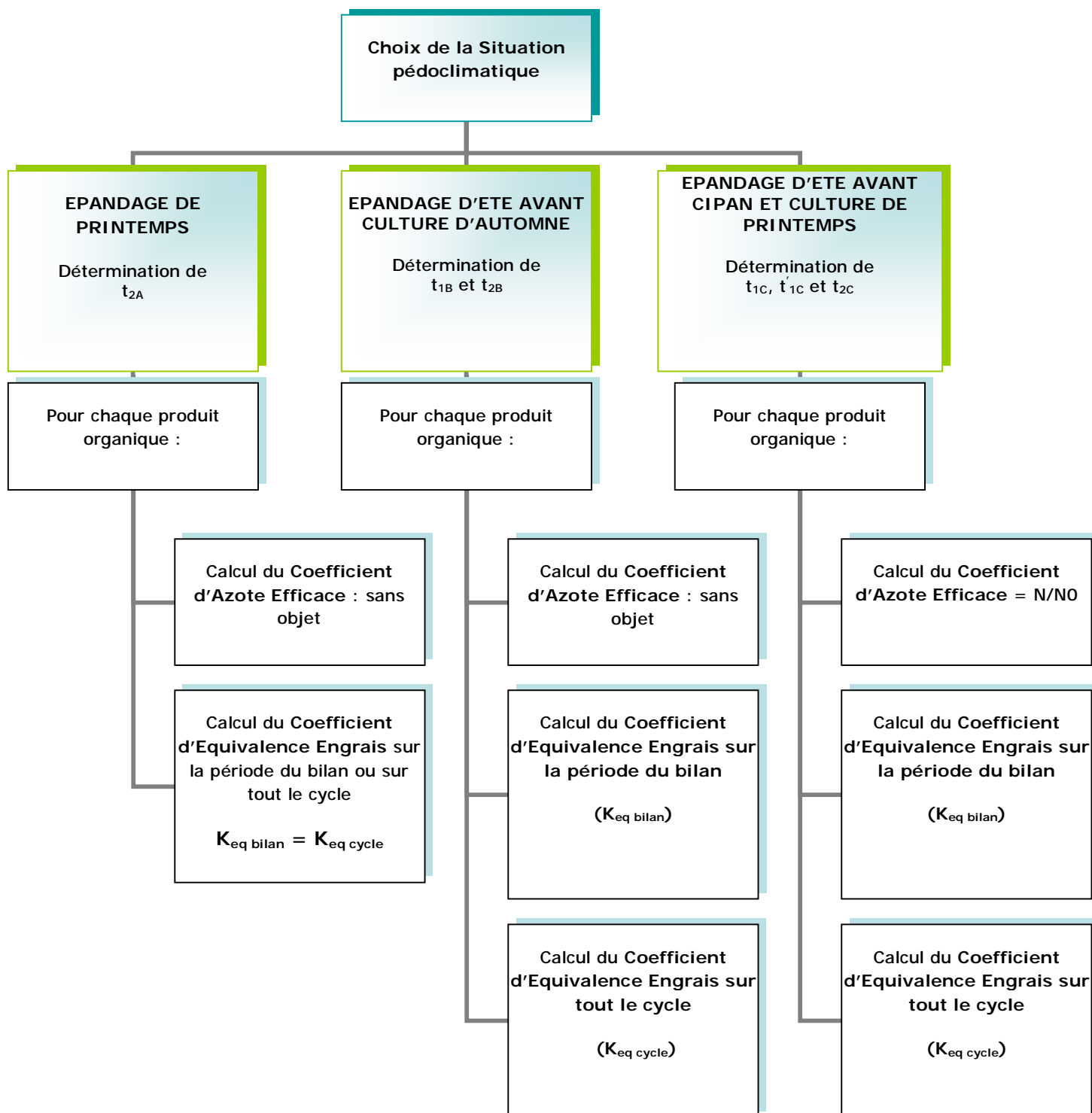


Figure 5 : Présentation synthétique de la démarche de calcul des coefficients d'efficacité en fonction des dates d'épandage et des cultures



### 3. SITUATIONS SIMULEES

#### 3.1 CLIMATS ET TYPES DE SOLS

##### 3.1.1 DEFINITION DES ZONAGES AGRO-CLIMATIQUES

Dans le cadre de cette étude, le territoire français est partagé en six grandes zones agro-climatiques. Ces zones s'appuient sur les enregistrements de données climatiques réalisées par Météo France depuis plus de trente ans.

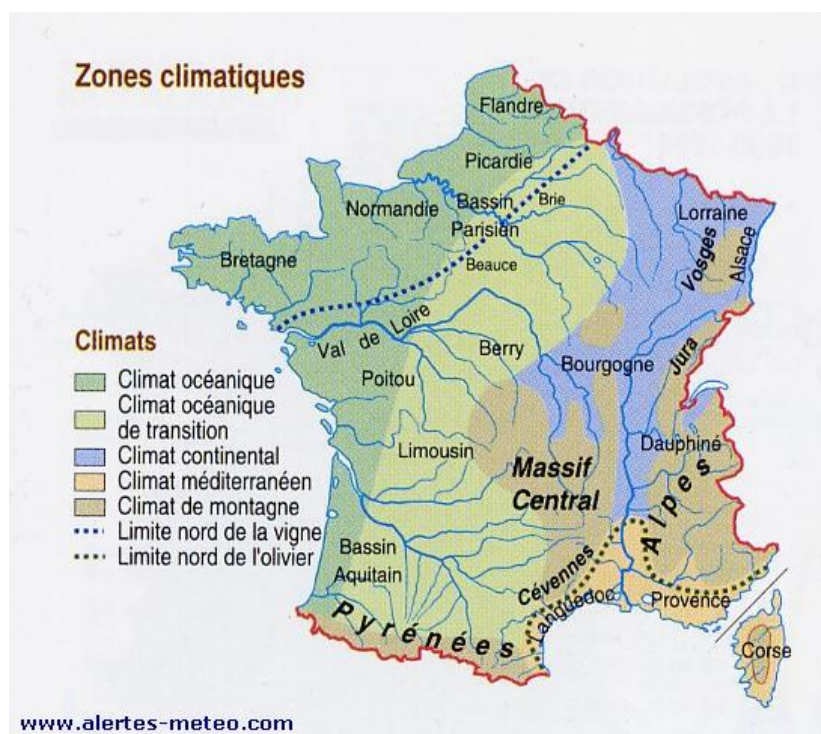


Figure 6 : Zonage climatique de la France

Le zonage de l'étude a été défini par LCA, en lien avec Météo France, sur la base des cartes Météo France des températures moyennes annuelles, du niveau des précipitations, et de l'insolation. Chaque zone correspond à un « domaine de paramétrage (DP) », défini par ses données climatiques.

La Figure 7 présente les zones climatiques de l'étude.

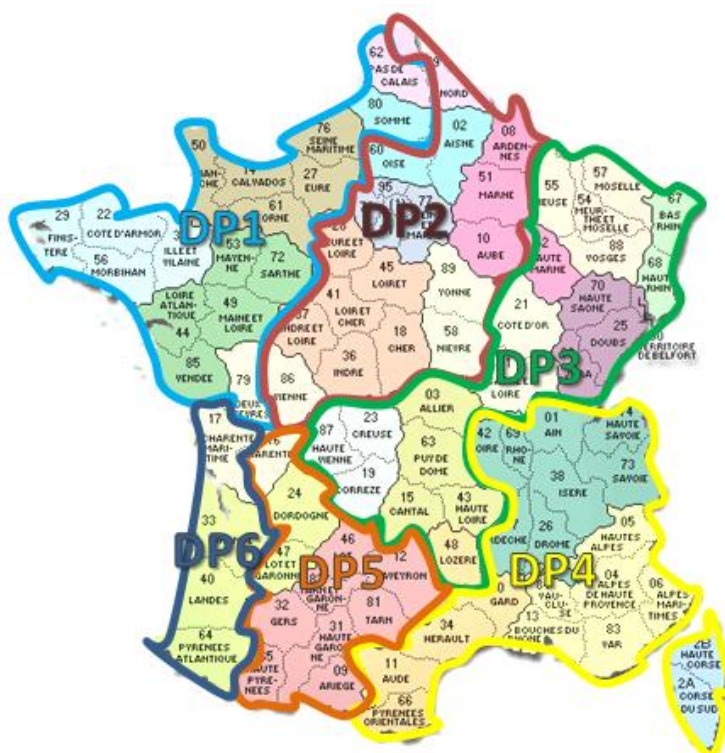


Figure 7 : Présentation du zonage climatique de l'étude

Les zones climatiques et leur station météorologique de référence sont les suivantes :

- DP1 : Climat océanique Bretagne Normandie. Station de Caen - Carpiquet (14).
- DP2 : Climat océanique plus ou moins altéré du Centre, Bassin Parisien et Nord. Station de Trappes (78).
- DP3 : Climat à tendances continentales de Bourgogne, Alsace-Lorraine et Auvergne. Station de Dijon - Longvic (71).
- DP4 : Climat méditerranéen de Rhône-Alpes et Méditerranée. Station de Carpentras (84).
- DP5 : Climat océanique plus ou moins altéré du Midi-Pyrénées. Station de Toulouse - Blagnac (31).
- DP6 : Climat océanique du littoral Centre-Ouest et Sud-Ouest. Station de Bordeaux – Mérignac (33).

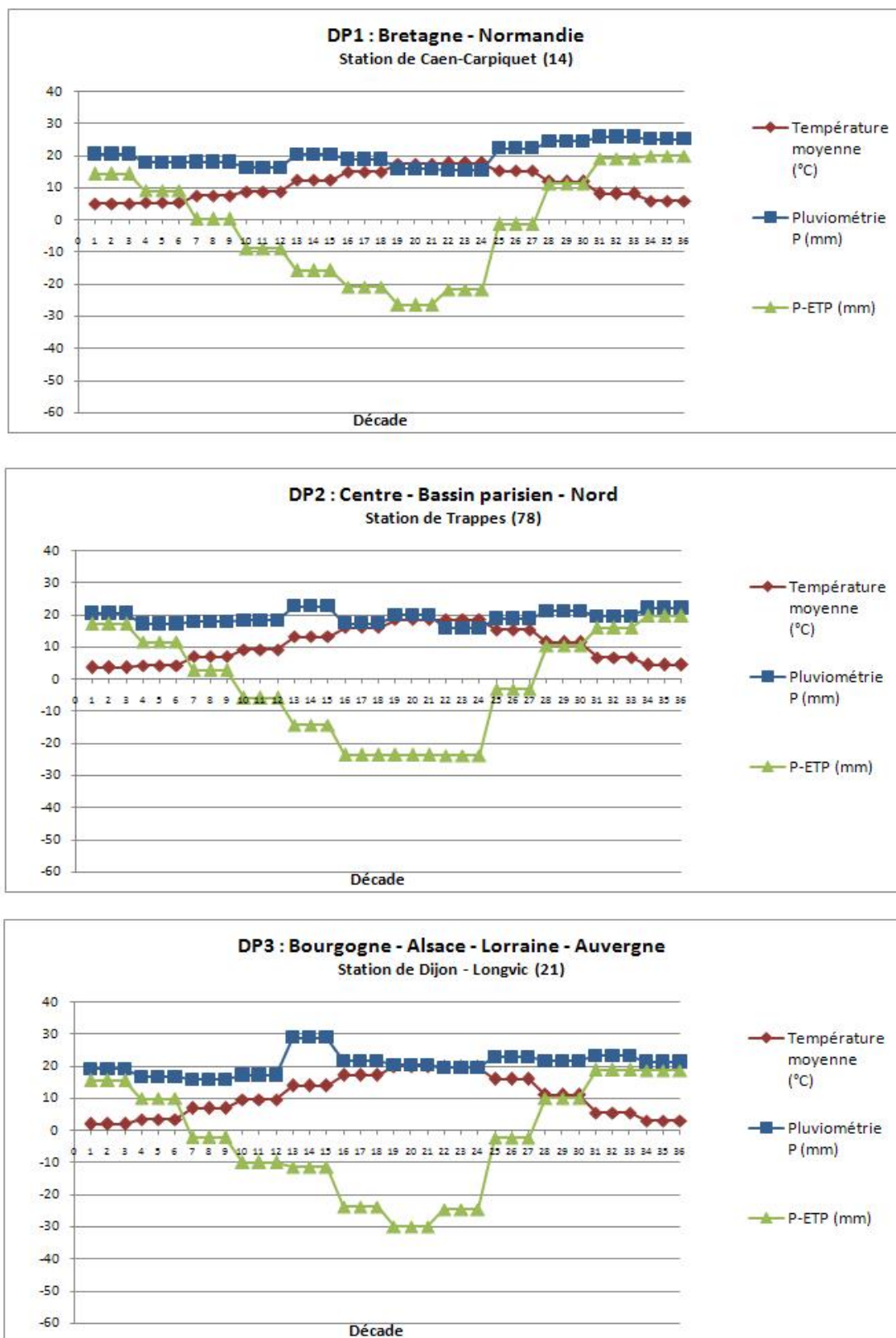
### 3.1.2 CLIMAT MOYEN DES ZONES CLIMATIQUES (GRAPHIQUES)

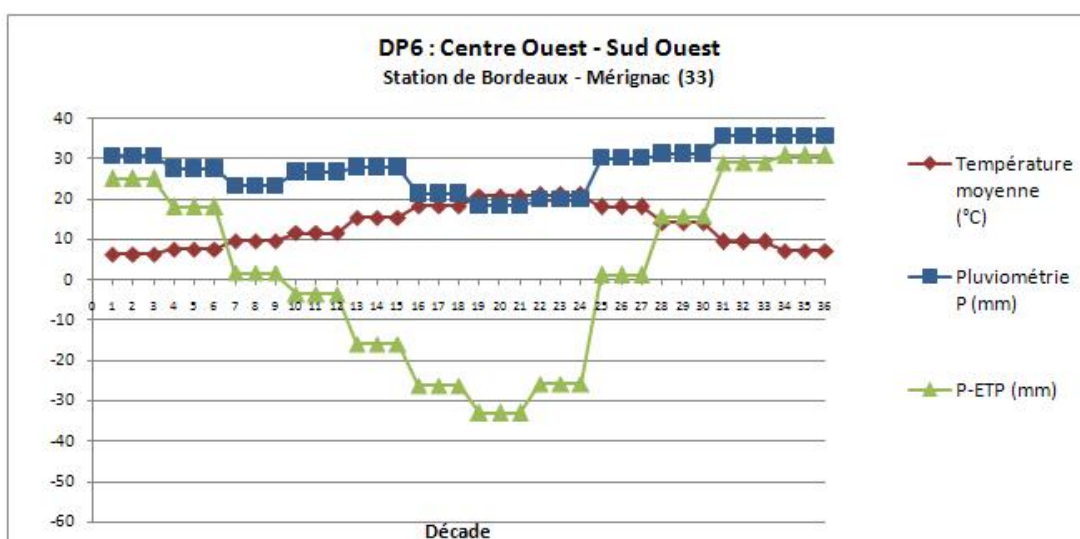
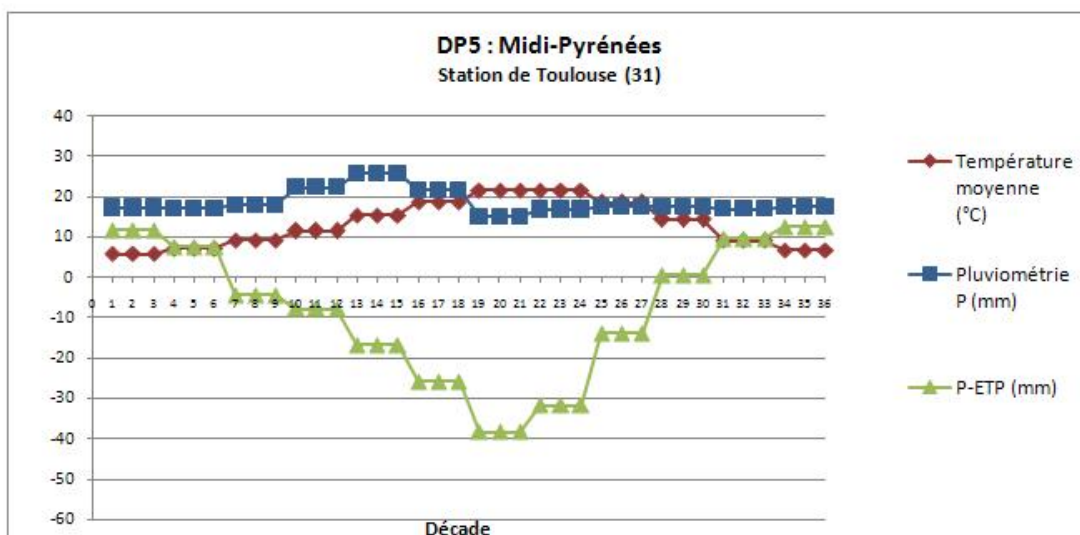
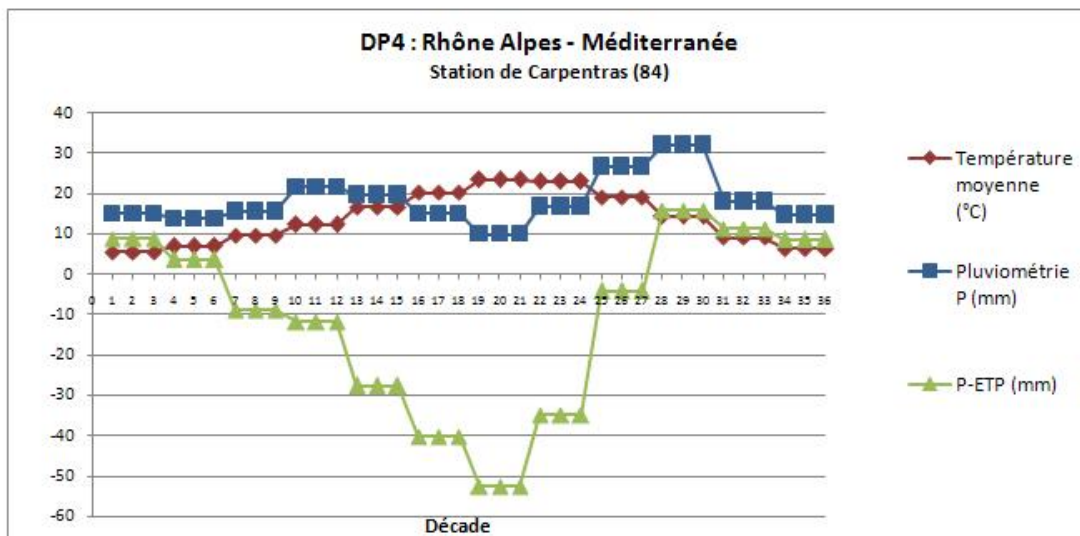
Les graphiques suivants (Figure 8) présentent les températures moyennes, les précipitations moyennes (« P ») et le calcul de la différence entre les précipitations et l'évapotranspiration potentielle de Penman (« ETP »). Le terme « P-ETP » permet de visualiser les périodes de déficit hydrique dans l'année, ainsi que leur intensité.

Le pas de temps des calculs est décadaire. Toutefois, les fiches climatiques moyennes de Météo France ne fournissant que des valeurs moyennes mensuelles, chaque mois est caractérisé par 3 décades identiques au niveau des données climatiques.

L'ETP Penman et le rayonnement global ont également été renseignés pour chaque station. Ces données servent dans le calcul du bilan hydrique d'Azofert<sup>®</sup>, qui fait intervenir un modèle de croissance végétale.

Figure 8 : Graphiques des données climatiques moyennes des six zones de l'étude







### 3.1.3 DESCRIPTION DES TYPES DE SOLS DE L'ETUDE

Afin d'évaluer l'effet du type de sol sur la fourniture d'azote des PRO, l'étude est menée sur 6 types de sols :

- limon battant
- limon argileux
- sol argilo-limoneux
- craie
- sol sableux
- sol argilo-calcaire

La modalité « craie » n'est utilisée que dans les régions où ce sol est représenté (DP1, DP2 et DP3).

Les principales caractéristiques de ces sols sont présentées dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Caractéristiques des sols de l'étude

Caractéristiques	Limon battant	Limon argileux	Argilo-limoneux	Sableux	Argilo-calcaire	Craie
Argile (g/kg)	170	230	400	60	280	100
Sable (g/kg)	80	70	100	800	130	100
Calcaire (g/kg)	10	10	10	10	220	610
pH	7.8	7.8	7.8	7.5	8.1	8.3
Carbone (g/kg)	10.1	11	10	9	16	17
Azote total (g/kg)	1.1	1.2	1	0.9	1.7	1.6
Humidité à la capacité au champ (%)	23	27	32	8	33	24
Humidité au point de flétrissement (%)	10	13	19	3	20	8
Eau utile (mm/cm de sol)	1.8	2	1.9	0.7	1.8	2.1
Profondeur potentielle d'enracinement (cm)	120	120	90	90	70	90

Les caractéristiques des sols susceptibles d'influencer les résultats des simulations, à travers le calcul des jours normalisés, sont celles qui ont une influence sur l'humidité de l'horizon labouré : teneur en argile, en sable, humidités au champ et au point de flétrissement.

Le Tableau 1 montre que les sols de l'étude permettent de disposer d'un panel assez large de valeurs d'humidité à la capacité au champ (8 à 33 %) et au point de flétrissement permanent (3 à 20 %). Par conséquent, les valeurs d'eau utile varient de 0,7 à 2,1 mm/cm de sol. Ces gammes de valeurs permettent d'englober un grand nombre de types de sols français, et de représenter les situations extrêmes.

Note : les teneurs en calcaire et la valeur du pH peuvent avoir une influence sur l'efficacité de l'azote des PRO : sur les sols de pH supérieur à 8.5, une partie de l'azote ammoniacal des produits peut se volatiliser. Dans notre étude, les sols présentent un pH inférieur à cette valeur. La teneur en calcaire et le pH des sols ne vont donc pas influencer les résultats.

### 3.1.4 RESUME DES SITUATIONS PEDOCLIMATIQUES SIMULEES

Tableau 2 : Les différentes situations pédoclimatiques de l'étude (couples CLIMAT x SOL)

Situations	DP1 : Climat océanique Bretagne Normandie	DP2 : Climat océanique plus ou moins altéré du Centre, Bassin Parisien et Nord	DP3 : Climat à tendances continentales de Bourgogne, Alsace-Lorraine et Auvergne	DP4 : Climat méditerranéenne de Rhône-Alpes et Méditerranée	DP5 : Climat océanique plus ou moins altéré du Midi-Pyrénées	DP6 : Climat océanique du littoral Centre-Ouest et Sud-Ouest	Nombre total de situations pédoclimatiques
SOL 1	Limon battant	Limon battant	Limon battant	Limon battant	Limon battant	Limon battant	
SOL 2	Limon argileux	Limon argileux	Limon argileux	Limon argileux	Limon argileux	Limon argileux	
SOL 3	Argilo-limoneux	Argilo-limoneux	Argilo-limoneux	Argilo-limoneux	Argilo-limoneux	Argilo-limoneux	
SOL 4	Sableux	Sableux	Sableux	Sableux	Sableux	Sableux	
SOL 5	Argilo-calcaire	Argilo-calcaire	Argilo-calcaire	Argilo-calcaire	Argilo-calcaire	Argilo-calcaire	
SOL 6	Craie	Craie	Craie				
<b>TOTAL sols</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>33</b>

### 3.2 PRODUITS RESIDUAIRES ORGANIQUES

Le nombre de produits testés est de 10, pour chaque situation pédoclimatique.

Les produits résiduels organiques de l'étude ont été fixés par le SYPREA, qui a fourni les données descriptives de 8 des 10 PRO de l'étude. Les caractéristiques des deux autres produits sont issues du paramétrage par défaut utilisé par le LCA.

Le Tableau 3 suivant présente les PRO de l'étude, et les sources des données.

Pour les produits fournis par SYPREA, les cinétiques de minéralisation réalisées en conditions contrôlées de laboratoire étaient jointes. Ces courbes sont présentées dans la partie 3.2.2 de ce rapport, où elles sont comparées au résultat de la mise en équation des cinétiques, nécessaire à la réalisation de l'étude (cf chapitre 2.2).

Tableau 3 : Présentation des 10 PRO de l'étude. Nature des produits et source des données.

Type de produit	Source	Abréviation	Matière sèche en g/kg brut	N total en g/kg brut	N-NH4 en g/kg brut	N organique en g/kg brut	Rapport C/N <sub>total</sub>
Boue urbaine liquide	SYPREA	BULSYP	35	3.4	0.4	3	3.7
Boue de papeterie	SYPREA	BOPASYP	654	2.2	0.1	2.2	44
Boue de laiterie (liquide)	LCA	BLSYP	60	5.4	1	4.4	3.6
Compost NF U44-051	SYPREA	NF44051SYP	581	8.5	0.1	8.4	15
Boue urbaine déshydratée chaulée	LCA	BUDCH	370	11.7	0.7	11	5.7
Compost NF U44-095	SYPREA	NF44095SYP	635	18.1	2.1	15.7	8.0
Eaux de conserverie	INRA (Azofert)	EAUC	-	0.34	0.18	0.16	11.8
Boue solide d'IAA prod acides aminés	SYPREA	BIAASYP	455	11.8	0.8	11	4.7
Boue urbaine filtre presse chaulée	SYPREA	BUFPCHSYP	402	12.77	0.13	12.64	5.8
Boue urbaine séchée	SYPREA	BSECHSYP	811	42.22	1.22	41	5.7



### 3.2.1 MISE EN EQUATION DES CINETIQUES DE MINERALISATION

#### 3.2.1.1 PASSAGE DES JOURS NORMALISES DES CINETIQUES « LABORATOIRE » AUX JOURS NORMALISES A 15°C

*Rappel : l'objectif est de retracer les courbes des PRO et de les ajuster à l'équation suivante en tenant compte de la notion de temps normalisé :  $N = N_0 (a_N - b_N e^{-kt} - C_N e^{-lt})$*

Seules les températures moyennes décadaires supérieures à 15°C sont « efficaces » et le facteur « température »,  $f(T)$ , est décrit par la loi de Van't Hoff (cf chapitre 1.3).

Les cinétiques de minéralisation de l'azote réalisées par les laboratoires (selon la méthode normalisée XP U44-163), sont menées à une température constante de 28°C. Afin de mettre en équation ces cinétiques, il convient de calculer l'équivalence entre les « jours à 28°C » du laboratoire, et les « jours à 15°C » de l'équation utilisée par Azofert.

Selon la loi de Van't Hoff :  $f(T) = e^{K*(T_{moy} - T_{réf})}$ , avec  $T_{réf} = 15°C$  et  $K$  (coefficient de Van't Hoff) = 0,115.

Lors des cinétiques de minéralisation au laboratoire,  $T_{moy} = 28°C$ .

L'application numérique de la formule donne alors :  $f(T) = e^{0,115*(28-15)} = 4,46$ .

Une journée à 28°C correspond donc à 4,46 journées à 15°C, et 91 jours à 28°C (soit la durée des cinétiques de laboratoire) équivalent à 406 jours à 15°C.

On utilise alors les correspondances présentées au Tableau 4 pour le paramétrage des équations.

Tableau 4 : Correspondance des jours à 28°C et des jours à 15°C

Nombre de jours à 28°C (cinétique laboratoire)	Nombre de jours à 15°C (simulations)
0	0
7	31
14	62
21	94
28	125
49	219
70	312
91	406

### 3.2.1.2 COEFFICIENTS DESCRIPTIFS DE LA MINÉRALISATION DES PRO

Les coefficients descriptifs de la minéralisation des 8 produits fournis par SYPREA, selon l'équation «  $N = N_0 (a_N - b_N e^{-kt} - c_N e^{-lt})$  », ont été déterminés selon la méthode suivante :

- le coefficient  $a_N$  correspond au taux de minéralisation de l'azote organique du produit à l'issue de l'essai. En effet, à  $t = 406$  jours, les termes «  $e^{-kt}$  » et «  $e^{-lt}$  » tendent vers zéro et  $N/NO = a_N$ .
- à l'origine ( $t = 0$ ), où  $N = NO$ , l'équation devient  $N = NO = NO (a_N - b_N - c_N)$ , car les exponentielles sont égales à 1. D'où :  $b_N + c_N = a_N$ .
- les autres coefficients ( $k$  et  $l$ ) ont été déterminés par des essais répétées, afin de correspondre aux mesurées réalisées. On a pu observer que l'un des termes ( $b_N e^{-kt}$  par exemple) doit décrire le comportement du produit peu après son incorporation, alors que l'autre terme ( $c_N e^{-lt}$ ) décrira la vitesse avec laquelle la cinétique tendra vers son asymptote à plus long terme.

Les résultats sont présentés au Tableau 5.

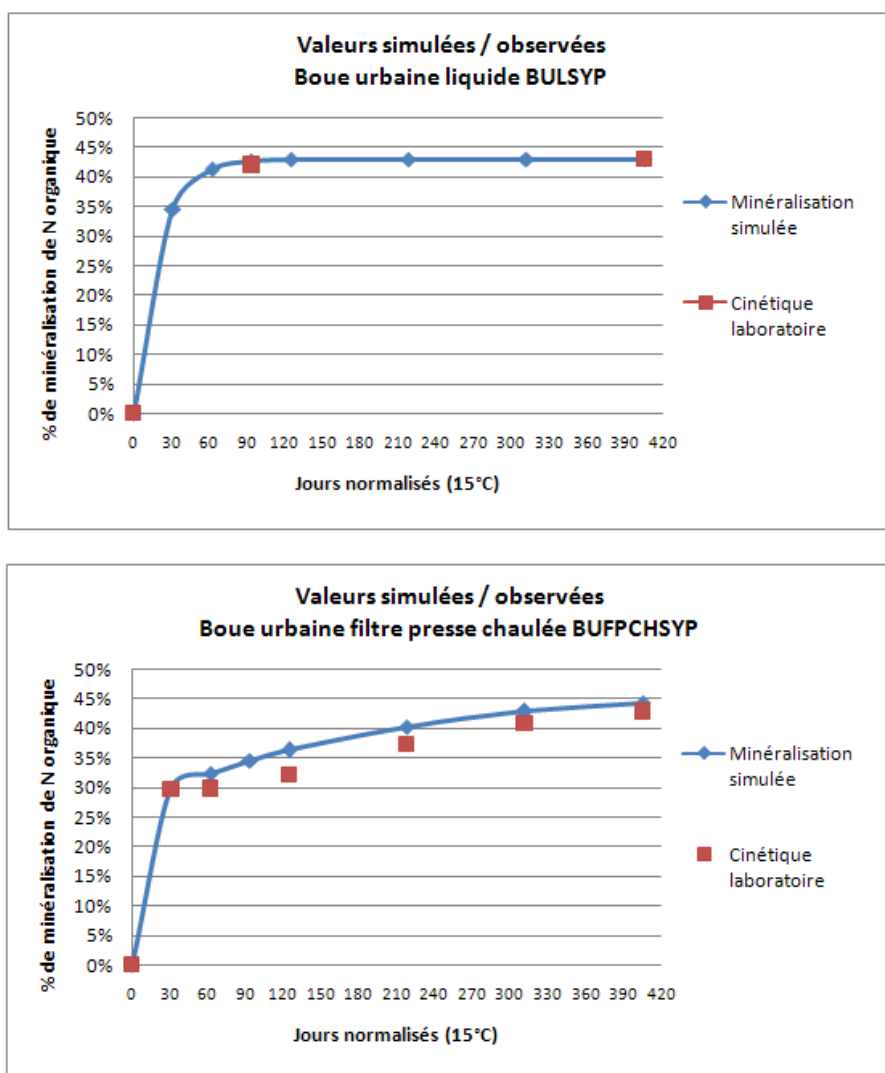
Tableau 5 : Résultat de la mise en équation des cinétiques de minéralisation des PRO. Détermination des coefficients  $a_N$ ,  $b_N$ ,  $k$  et  $l$ .

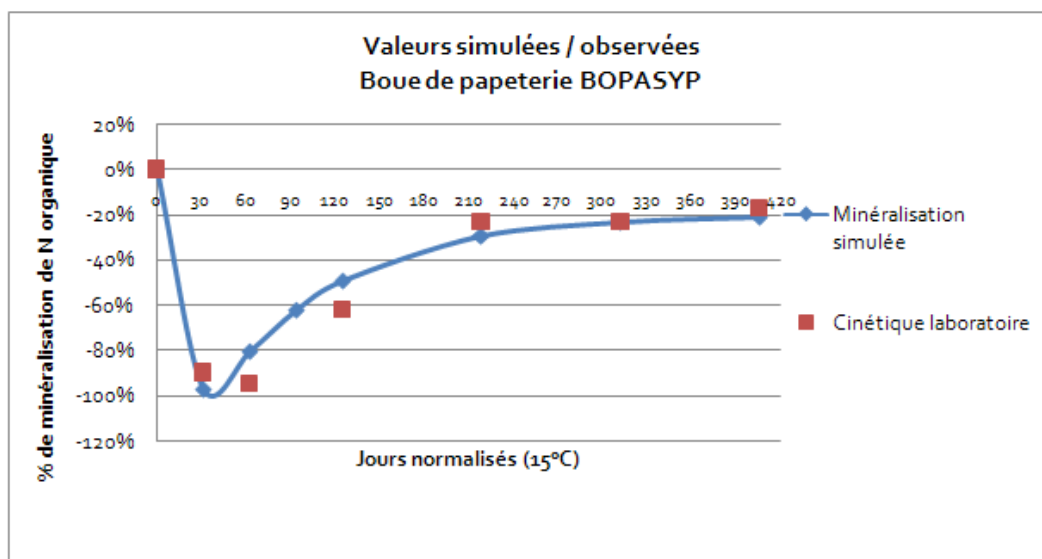
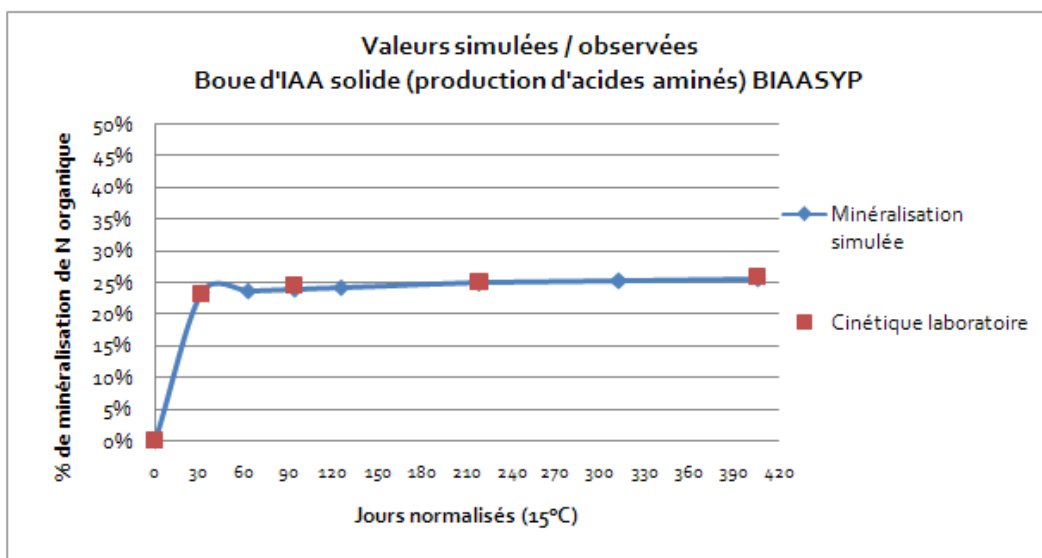
Type de produit	Source	Abréviation	k	l	$a_N$	$b_N$	$c_N$
Boue urbaine liquide	SYPREA	BULSYP	0.86	0.05	0.43	0.03	0.4
Boue de papeterie	SYPREA	BOPASYP	0.08	0.012	-0.2	-1.5	1.3
Boue de laiterie (liquide)	SYPREA	BLSYP	0.86	0.0121	0.25	0.08	0.17
Compost NF U44-051	SYPREA	NF44051SYP	0	0.05	0.062	0	0.065
Boue urbaine déshydratée chaulée	LCA	BUDCH	0.86	0.003	0.43	0.23	0.21
Compost NF U44-095	SYPREA	NF44095SYP	0.4	0.004	0.067	0.017	0.05
Eaux de conserverie	INRA (Azofert)	EAUC	0.06	0.004	1	0	1
Boue solide d'IAA prod acides aminés	SYPREA	BIAASYP	0.86	0.004	0.262	0.23	0.032
Boue urbaine filtre presse chaulée	SYPREA	BUFPCHSYP	0.2	0.005	0.47	0.27	0.2
Boue urbaine séchée	SYPREA	BSECHSYP	0.07	0.004	0.45	0.13	0.32

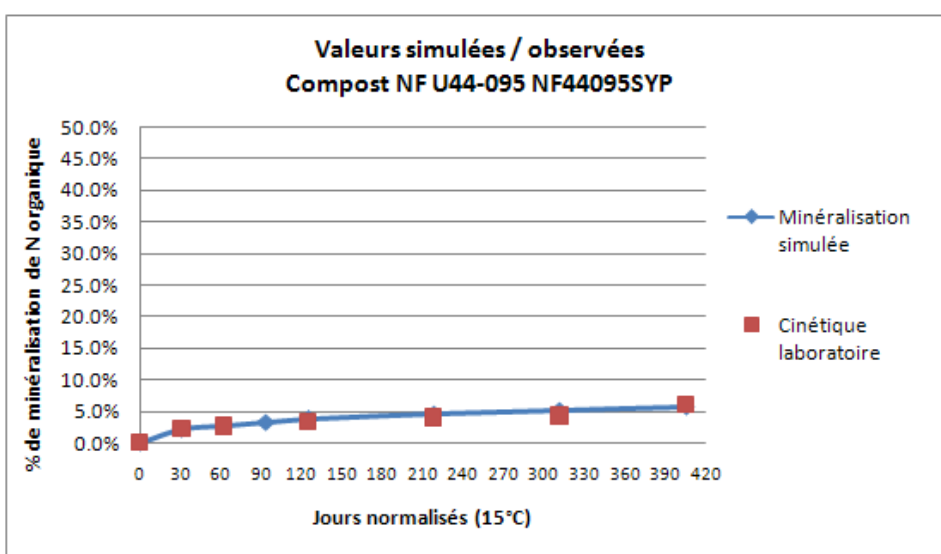
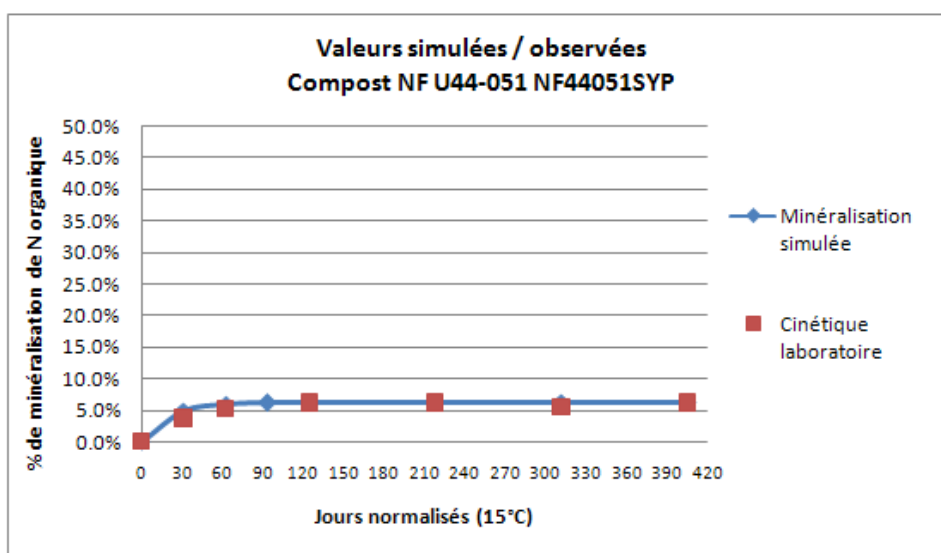
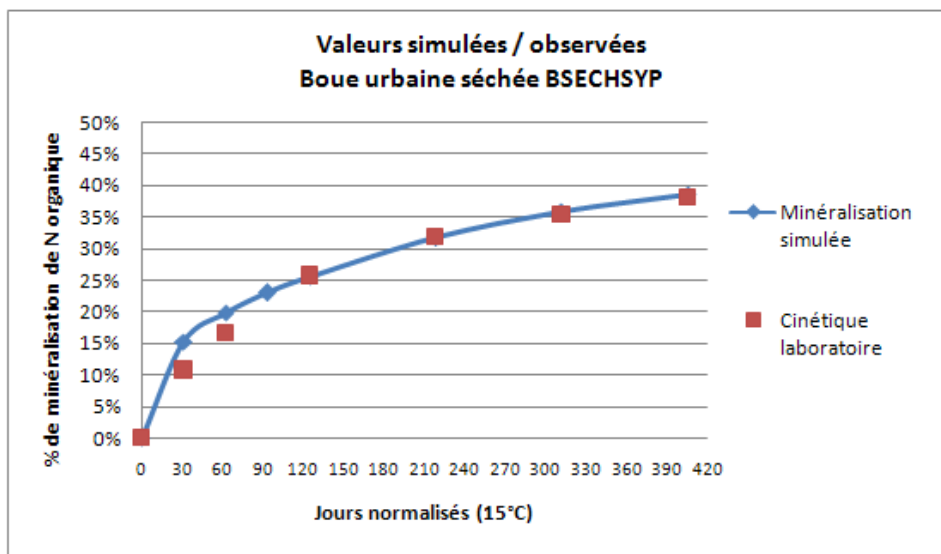
### 3.2.2 REPRESENTATION DES CINÉTIQUES MODÉLISÉES ; COMPARAISON AUX MESURES EN LABORATOIRE

Les graphiques de la Figure 9 présentent, pour des jours normalisés à 15°C, les courbes issues de la mise en équation des PRO fournis par SYPREA, pour chaque date équivalente à un dosage au laboratoire (J7, J14, J21, J28, J49, J70 et J91 à 28°C). A titre de comparaison, les points de mesures réalisées au laboratoire sont présentés en rouge (source : SYPREA).

Figure 9 : cinétiques modélisées (après mise en équation des PRO). Comparaison aux points de mesure en laboratoire (carrés rouges).





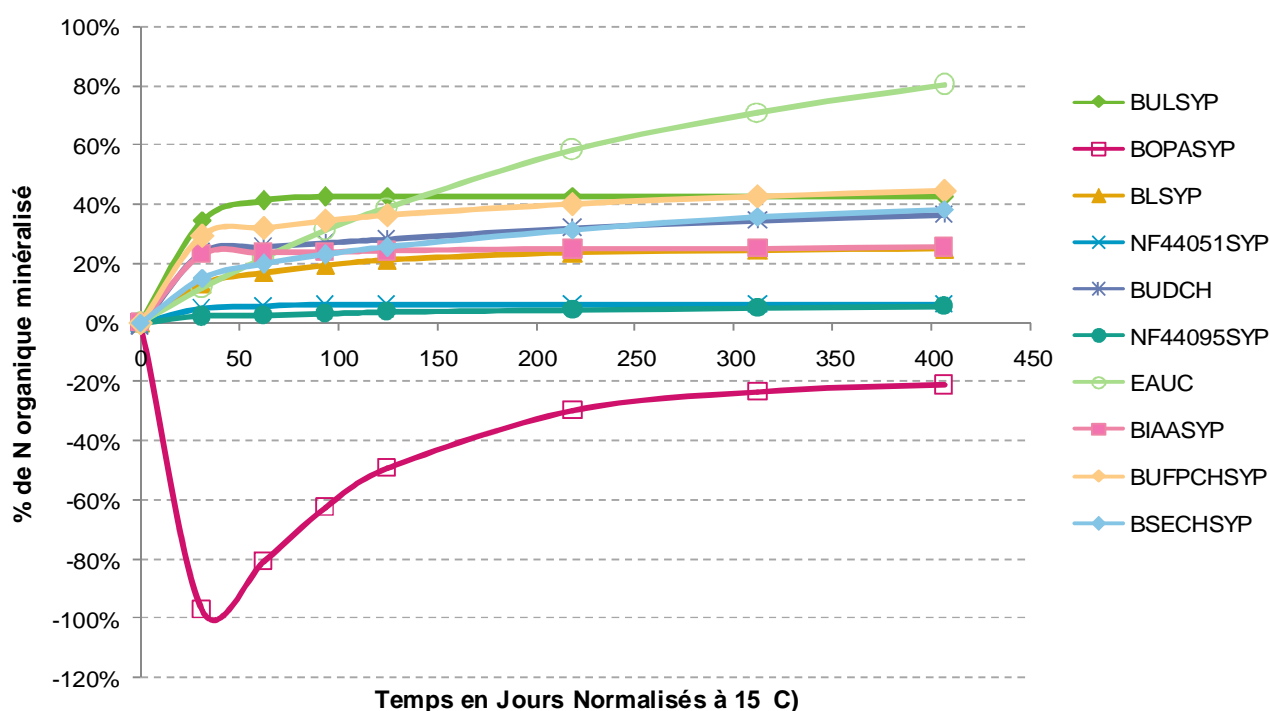


La Figure 9 montre que le type d'équation «  $N = N_0 (a_N - b_N e^{-kt} - c_N e^{-lt})$  » est globalement bien adapté à l'allure des cinétiques de minéralisation des PRO. La modélisation des cinétiques n'induit pas d'écart supérieur à 5% sur le taux de minéralisation de l'azote organique à une date donnée. Cet écart semble acceptable compte-tenu de l'incertitude et de la répétabilité de la mesure en laboratoire.

### 3.2.3 REPRESENTATION GRAPHIQUE DES CINETIQUES DES 10 PRO DE L'ETUDE

La Figure 10 rassemble les cinétiques modélisées des 10 produits de l'étude. Elle illustre le panel de produits et la variabilité de leur comportement vis-à-vis de la mise à disposition de l'azote organique qu'ils contiennent.

Figure 10 : cinétique de minéralisation de l'azote organique des 10 PRO de l'étude



## PARTIE 2 :

## RESULTATS

## 1. DETERMINATION DES TEMPS NORMALISES

Rappel :

- $t_{2A}$  est le nombre de jours normalisés entre l'épandage d'un produit organique au printemps et la récolte d'une culture de printemps (du 15 février au 15 septembre), soit de l'ouverture à la fermeture du bilan dans le cas d'une culture de printemps.
- $t_{1B}$  est le nombre de jours normalisés entre l'épandage d'un produit organique en fin d'été et la mesure du reliquat azoté (du 10 août au 15 février suivant), soit de l'épandage à l'ouverture du bilan dans le cas d'une culture d'automne.
- $t_{2B}$  est le nombre de jours normalisés entre l'épandage d'un produit organique en fin d'été et la récolte d'une culture d'automne (du 10 août au 1<sup>er</sup> juillet suivant), soit de l'épandage à la fermeture du bilan dans le cas d'une culture d'automne.
- $t_{1C}$  est le nombre de jours normalisés entre l'épandage d'un produit organique en fin d'été et la destruction d'un CIPAN (du 10 août au 15 novembre), soit de l'épandage à la destruction du CIPAN.
- $t'_{1C}$  est le nombre de jours normalisés entre l'épandage d'un produit organique en fin d'été avant CIPAN et la mesure du reliquat azoté (du 10 août au 15 février) soit de l'épandage à l'ouverture du bilan dans le cas d'une culture de printemps précédée d'un CIPAN.
- $t_{2C}$  est le nombre de jours normalisés entre l'épandage d'un produit organique en fin d'été et la récolte d'une culture de printemps après CIPAN (du 10 août de l'année « N » au 15 septembre de l'année « N+1 »), soit de l'épandage à la fermeture du bilan dans le cas d'une culture de printemps précédée d'un CIPAN.

Le nombre de jours normalisés entre la mesure du reliquat azoté en sortie hiver (date d'ouverture du bilan) et la récolte (date de fermeture du bilan) est déduite des formules «  $t_{2B} - t_{1B}$  » ou «  $t_{2C} - t'_{1C}$  », selon les cas.

### 1.1 PRESENTATION DES SITUATIONS CULTURALES

Les valeurs des temps normalisés dépendent de la culture à fertiliser (qui va influencer le bilan hydrique décadaire).

Le Tableau 6 présente les situations culturelles simulées.



Tableau 6 : Description des itinéraires techniques de l'étude

Zone agro-climatique	DP1, DP2, DP3 <sup>1</sup>	DP4, DP5, DP6 <sup>2</sup>
SOL 1	<i>Limon battant</i>	<i>Limon battant</i>
SOL 2	<i>Limon argileux</i>	<i>Limon argileux</i>
SOL 3	<i>Argilo-limoneux</i>	<i>Argilo-limoneux</i>
SOL 4	<i>Sableux</i>	<i>Sableux</i>
SOL 5	<i>Argilo-calcaire</i>	<i>Argilo-calcaire</i>
SOL 6	<i>Craie</i>	-
<b>Cas A :</b>  <b>Epandage le 15 février avant culture de printemps</b>	Précédent : Blé d'hiver récolté le 15 juillet  Culture à fertiliser : <b>Betterave sucrière</b> semis le 15 mars récolte le 15 septembre	Précédent : Blé d'hiver récolté le 15 juillet  Culture à fertiliser : <b>Maïs ensilage</b> semis le 15 mars récolte le 15 septembre
<b>Cas B :</b>  <b>Epandage le 10 août avant culture d'automne</b>	Précédent : Blé d'hiver récolté le 15 juillet  Culture à fertiliser : <b>Colza d'hiver</b> semis le 1 <sup>er</sup> septembre récolte le 1 <sup>er</sup> juillet	Précédent : Blé d'hiver récolté le 15 juillet  Culture à fertiliser : <b>Colza d'hiver</b> semis le 1 <sup>er</sup> septembre récolte le 1 <sup>er</sup> juillet (juillet)
<b>Cas C :</b>  <b>Epandage le 10 août avant CIPAN suivie de culture de printemps</b>	Précédent : Blé d'hiver récolté le 15 juillet  <b>CIPAN : Moutarde</b> semis le 1 <sup>er</sup> septembre destruction le 15 novembre  Culture à fertiliser : <b>Betterave sucrière</b> semis le 15 mars récolte le 15 septembre	Précédent : Blé d'hiver récolté le 15 juillet  <b>CIPAN : Moutarde</b> semis le 1 <sup>er</sup> septembre destruction le 15 novembre  Culture à fertiliser : <b>Maïs ensilage</b> semis le 15 mars récolte le 15 septembre

<sup>1</sup> Moitié Nord de la France (au Nord d'une ligne La Rochelle / Lyon, cf la Figure 7 en p.17 )

<sup>2</sup> Moitié Sud de la France

## 1.2 RESULTATS DES CALCULS DES TEMPS NORMALISES

Tableau 7 : Résultat des calculs des temps normalisés en fonction des itinéraires techniques

Zone climatique	Type de sol	Temps normalisé (en jours)				
		t <sub>2A</sub>	t <sub>1B</sub>	t <sub>2B</sub>	t <sub>1C</sub> <sup>3</sup>	t <sub>2C</sub>
<b>DP1</b>	Limon battant	106	77	127	79	165
Bretagne - Normandie	Limon argileux	89	77	114	79	145
	Argilo-limoneux	94	103	133	107	169
	Sableux	78	48	98	50	122
	Argilo-calcaire	62	77	98	79	122
	Craie	114	77	131	79	175
<b>DP2</b>	Limon battant	137	71	125	72	184
Centre - Bassin parisien - Nord	Limon argileux	116	71	121	73	163
	Argilo-limoneux	140	105	147	108	207
	Sableux	91	41	102	43	126
	Argilo-calcaire	88	70	106	72	134
	Craie	147	71	127	73	195
<b>DP3</b>	Limon battant	133	78	130	80	187
Bourgogne - Alsace - Lorraine - Auvergne	Limon argileux	110	78	117	80	162
	Argilo-limoneux	135	117	148	120	210
	Sableux	89	41	91	43	125
	Argilo-calcaire	76	78	99	79	132
	Craie	143	78	135	80	200
<b>DP4</b>	Limon battant	136	60	91	62	176
Rhône - Alpes - Méditerranée	Limon argileux	109	60	81	62	153
	Argilo-limoneux	103	76	94	79	162
	Sableux	117	41	82	42	153
	Argilo-calcaire	79	60	77	62	129
<b>DP5</b>	Limon battant	249	61	123	63	286
Midi - Pyrénées	Limon argileux	225	61	107	63	255
	Argilo-limoneux	248	91	130	91	319
	Sableux	150	39	97	40	184
	Argilo-calcaire	183	61	86	63	210
<b>DP6</b>	Limon battant	250	102	177	104	351
Centre Ouest - Sud Ouest	Limon argileux	249	102	174	105	348
	Argilo-limoneux	245	136	203	140	379
	Sableux	202	65	145	67	244
	Argilo-calcaire	246	102	169	104	343
<b>Moyenne</b>		144	75	121	77	200
<b>Valeur minimale</b>		62	39	77	40	122

<sup>3</sup> La valeur de t<sub>1C</sub> est égale à celle de t<sub>1C</sub> à l'issue des calculs. Seule la valeur de t<sub>1C</sub> est indiquée dans ce tableau.

## 1.3 INTERPRETATION

La Figure 10 (: cinétique de minéralisation de l'azote organique des 10 PRO de l'étude, présentée en p. 30) montre que, pour la plupart des PRO de l'étude, la minéralisation de l'azote atteint un plateau lorsque le temps normalisé approche de la valeur de 60 environ. Quatre produits font exception et poursuivent leur évolution au-delà de la valeur de 60 jours normalisés : la boue de papeterie, la boue séchée, la boue liquide de laiterie et l'eau de conserverie.

Il est donc intéressant de positionner les mesures des temps normalisés  $t_{2A}$ ,  $t_{1B}$ ,  $t_{2B}$ ,  $t_{1C}$  et  $t_{2C}$  par rapport à cette valeur de 60 jours.

### 1.3.1 INFLUENCE DE L'ITINERAIRE TECHNIQUE

Le Tableau 7 montre que :

- dans le « Cas A » d'un épandage de printemps avant une culture de printemps, les temps normalisés sont tous supérieurs à 62, avec une valeur moyenne de 144 jours. Ceci signifie que tout l'azote minéralisable des PRO sera minéralisé pendant la durée de la culture, qui correspond à la période du cycle et du bilan (à l'exception des boues de papeterie, de la boue séchée, de la boue liquide de laiterie et l'eau de conserverie).
- dans le « Cas B » d'un épandage de fin d'été avant une culture d'automne, les valeurs des temps normalisés de  $t_{1B}$  sont plus faibles (valeur minimale : 39 ; valeur moyenne : 75). La minéralisation de l'azote avant l'ouverture du bilan dépend donc davantage des produits et des situations pédoclimatiques que dans le cas précédent. La contribution du PRO restant à venir à partir de la date d'ouverture du bilan dépendra donc aussi de ces facteurs.
- dans le « Cas C » d'un épandage de fin d'été avant CIPAN, les valeurs des temps normalisés de  $t_{1C}$  sont très proches des valeurs de  $t_{1B}$ . Comme dans le cas d'un épandage de fin d'été avant une culture d'automne, les fournitures d'azote au CIPAN dépendent des produits et des situations pédoclimatiques. L'azote restant à minéraliser après l'ouverture du bilan, pour la culture de printemps, dépendra donc aussi de ces facteurs.

### 1.3.2 INFLUENCE DU TYPE DE SOL

Selon le Tableau 7, dans une zone climatique donnée et pour un même itinéraire technique, les écarts entre les jours normalisés peuvent atteindre 20 à 80 jours en fonction du type de sol. Ce résultat montre l'influence du type de sol sur la vitesse de minéralisation des PRO. Comme indiqué au paragraphe précédent, l'écart entre les produits sera d'autant plus important si les jours normalisés sont proches de 60 jours ou inférieurs (cas d'un épandage d'été, avant l'ouverture du bilan par exemple).

### 1.3.3 INFLUENCE DE LA ZONE CLIMATIQUE

Les valeurs les plus faibles des jours normalisés sont observées dans la zone Bretagne – Normandie (DP1), tandis que la zone Centre-Ouest et Sud-Ouest (DP6) présente les valeurs les plus élevées. L'écart entre les jours normalisés peut être important, certaines valeurs pouvant passer du simple au double.

Ainsi, dans le cas d'un épandage de printemps sur limon battant, la valeur de  $t_{2A}$  est de 106 jours normalisés dans le DP1 contre 250 jours dans le DP6.

Il est donc évident que la zone climatique aura une influence sur les coefficients d'efficacité de l'azote (tant que les valeurs de jours normalisés restent faibles).

## 1.4 UTILISATION

Les valeurs trouvées au Tableau 7 ont été directement intégrées aux équations des cinétiques de minéralisation des 10 PRO de l'étude, décrites par les coefficients du Tableau 5 : **Résultat de la mise en équation des cinétiques de minéralisation des PRO. Détermination des coefficients aN, bN, k et l.** Les Coefficients d'Azote Efficace<sup>4</sup>, et les Coefficients d'Equivalence Engrais ( $K_{eq\ bilan}$ ,  $K_{eq\ cycle}$ ) ont ensuite été calculés de la façon suivante :

- $K_{eq} = N_{\text{minéralisé}} / N_{\text{total}}$  du PRO.  $K_{eq\ bilan}$  s'applique à la période reliquat - récolte, tandis que  $K_{eq\ cycle}$  intègre tout le cycle depuis le semis (notamment de la CIPAN).
- Coefficient d'azote efficace =  $N_{\text{minéralisé}} / N_{\text{total}}$  du PRO, calculé entre la date d'épandage du produit et la destruction du CIPAN.

---

<sup>4</sup> Ces coefficients ont été calculés par rapport au N organique initialement apporté par les produits, puis par rapport au N total (ajout de l'azote ammoniacal initial). Seuls les résultats exprimés par rapport au N total des produits sont présentés dans ce rapport, par analogie aux coefficients présentés dans le Guide du COMIFER.

## 2. AZOTE EFFICACE ET COEFFICIENT D'EQUIVALENCE ENGRAIS (EN POURCENTAGE DE L'AZOTE TOTAL DES PRODUITS) : CAS DES BOUES CHAULEES DE FILTRE PRESSE

Le Tableau 8 présente pour exemple les coefficients d'azote efficace et les coefficients d'équivalence engrais ( $K_{eq\ bilan}$  et  $K_{eq\ cycle}$ ), par zone climatique, par type de sol et pour un épandage en été et au printemps, pour un type de produit donné : les boues chaulées de filtre presse.

Les résultats obtenus pour les autres PRO sont repris en Annexe 1.

Tableau 8 : Coefficients d'azote efficace et coefficients d'équivalence engrais, par zonage climatique, par type de sol et par itinéraire technique (en % du N total). Cas des boues chaulées filtre presse.

Situation climatique	Cultures concernées	Période d'apport	Type de sol	Coefficient d'azote efficace	Coefficient d'Equivalence Engrais	
					Keq bilan	Keq cycle
DP1 : Bretagne - Normandie	Culture d'automne	Fin d'été	Argilo-calcaire		1.4%	34.4%
			Argilo-limoneux		1.6%	36.3%
			Craie		3.2%	36.3%
			Limon argileux		2.3%	35.3%
			Limon battant		3.0%	36.0%
			Sableux		3.4%	34.4%
	Culture de printemps	Eté-automne avant CIPAN	Argilo-calcaire	33.2%	2.6%	35.8%
			Argilo-limoneux	34.9%	3.1%	38.0%
			Craie	33.2%	5.1%	38.3%
			Limon argileux	33.2%	3.7%	36.9%
			Limon battant	33.2%	4.7%	37.8%
			Sableux	31.1%	4.7%	35.8%
		Printemps	Argilo-calcaire		32.0%	32.0%
			Argilo-limoneux		34.1%	34.1%
			Craie		35.3%	35.3%
			Limon argileux		33.8%	33.8%
			Limon battant		34.9%	34.9%
			Sableux		33.1%	33.1%
DP2 : Centre, Bassin parisien et Nord	Culture d'automne	Fin d'été	Argilo-calcaire		2.3%	34.9%
			Argilo-limoneux		2.2%	37.0%
			Craie		3.4%	36.0%
			Limon argileux		3.1%	35.7%
			Limon battant		3.3%	35.9%
			Sableux		4.2%	34.6%
	Culture de printemps	Eté-automne avant CIPAN	Argilo-calcaire	32.7%	3.7%	36.4%
			Argilo-limoneux	35.0%	4.5%	39.5%
			Craie	32.7%	6.3%	39.1%
			Limon argileux	32.8%	5.0%	37.8%
			Limon battant	32.7%	5.9%	38.7%
			Sableux	30.5%	5.5%	36.0%
		Printemps	Argilo-calcaire		33.8%	33.8%
			Argilo-limoneux		36.7%	36.7%
			Craie		37.0%	37.0%
			Limon argileux		35.5%	35.5%
			Limon battant		36.5%	36.5%
			Sableux		34.0%	34.0%
DP3 : Bourgogne, Alsace-Lorraine et Auvergne	Culture d'automne	Fin d'été	Argilo-calcaire		1.4%	34.5%
			Argilo-limoneux		1.6%	37.1%
			Craie		3.3%	36.4%
			Limon argileux		2.4%	35.5%
			Limon battant		3.1%	36.2%
			Sableux		3.6%	34.0%
	Culture de printemps	Eté-automne avant CIPAN	Argilo-calcaire	33.2%	3.1%	36.3%
			Argilo-limoneux	35.6%	4.0%	39.6%
			Craie	33.2%	6.0%	39.2%
			Limon argileux	33.2%	4.5%	37.7%
			Limon battant	33.2%	5.5%	38.7%
			Sableux	30.5%	5.4%	35.9%
		Printemps	Argilo-calcaire		33.0%	33.0%
			Argilo-limoneux		36.4%	36.4%
			Craie		36.8%	36.8%

Situation climatique	Cultures concernées	Période d'apport	Type de sol	Coefficient d'azote	Coefficient d'Equivalence Engrais			
					Keq bilan	Keq cycle		
DP4 : Rhône-Alpes et Méditerranée	Culture d'automne	Fin d'été	Limon argileux		35.1%	35.1%		
			Limon battant		36.3%	36.3%		
			Sableux		33.8%	33.8%		
			Argilo-calcaire		1.2%	33.1%		
			Argilo-limoneux		1.1%	34.1%		
			Limon argileux		1.4%	33.3%		
	Culture de printemps	Eté-automne avant CIPAN	Limon battant		2.1%	33.9%		
			Sableux		3.0%	33.4%		
			Argilo-calcaire	32.0%	4.1%	36.1%		
			Argilo-limoneux	33.2%	4.6%	37.7%		
			Limon argileux	32.0%	5.3%	37.3%		
			Limon battant	32.0%	6.3%	38.3%		
		Printemps	Sableux	30.5%	6.8%	37.3%		
			Argilo-calcaire		33.2%	33.2%		
			Argilo-limoneux		34.7%	34.7%		
			Limon argileux		35.1%	35.1%		
			Limon battant		36.5%	36.5%		
			Sableux		35.5%	35.5%		
DP5 : Midi- Pyrénées	Culture d'automne	Fin d'été	Argilo-calcaire		1.7%	33.6%		
			Argilo-limoneux		2.2%	36.2%		
			Limon argileux		3.0%	34.9%		
			Limon battant		3.9%	35.8%		
			Sableux		4.1%	34.3%		
			Culture de printemps	Eté-automne avant CIPAN	Argilo-calcaire	32.0%	7.5%	39.6%
	Argilo-limoneux	34.0%			8.5%	42.5%		
	Limon argileux	32.1%			8.9%	41.0%		
	Limon battant	32.0%			9.7%	41.8%		
	Sableux	30.3%			8.3%	38.6%		
	Printemps	Argilo-calcaire				38.6%	38.6%	
		Argilo-limoneux			40.8%	40.8%		
		Limon argileux			40.1%	40.1%		
		Limon battant			40.8%	40.8%		
		Sableux			37.2%	37.2%		
		DP6 : Centre-Ouest et Sud-Ouest		Culture d'automne	Fin d'été	Argilo-calcaire		3.4%
	Argilo-limoneux						2.9%	39.3%
	Limon argileux					3.6%	38.2%	
Limon battant			3.7%			38.3%		
Sableux			4.7%			37.0%		
Culture de printemps	Eté-automne avant CIPAN		Argilo-calcaire			34.8%	8.2%	43.0%
			Argilo-limoneux	36.7%	6.8%	43.5%		
			Limon argileux	34.8%	8.3%	43.1%		
			Limon battant	34.8%	8.3%	43.1%		
			Sableux	32.3%	8.3%	40.7%		
			Printemps	Argilo-calcaire		40.7%	40.7%	
	Argilo-limoneux				40.7%	40.7%		
	Limon argileux				40.8%	40.8%		
	Limon battant				40.9%	40.9%		
	Sableux				39.3%	39.3%		

### 3. AZOTE EFFICACE ET EQUIVALENCE ENGRAIS POUR 170 KG D'AZOTE TOTAL APPORTES PAR LES PRODUITS : CAS DES BOUES CHAULEES DE FILTRE PRESSE

Le Tableau 9 présente pour exemple les coefficients d'azote efficace et les coefficients d'équivalence engrais ( $K_{eq\ bilan}$  et  $K_{eq\ cycle}$ ), extrapolés sur une base d'apport de 170 kg d'azote total à l'hectare, par zone climatique, par type de sol et pour un épandage en été et au printemps, pour un type de produit donné : les boues chaulées de filtre presse.

Les résultats obtenus pour les autres PRO sont repris en Annexe 2.



Tableau 9 : Quantités d'azote efficace et équivalence engrais, par zonage climatique, par type de sol et par itinéraire technique (pour 170 kg d'azote total apporté). Cas des boues chaulées filtre presse.

Situation climatique	Cultures concernées	Période d'apport	Type de sol	Azote efficace	Equivalence Engrais	
					Keq bilan	Keq cycle
DP1 : Bretagne - Normandie	Culture d'automne	Fin d'été	Argilo-calcaire		2	59
			Argilo-limoneux		3	62
			Craie		5	62
			Limon argileux		4	60
			Limon battant		5	61
			Sableux		6	59
	Culture de printemps	Eté-automne avant CIPAN	Argilo-calcaire	56	4	61
			Argilo-limoneux	59	5	65
			Craie	56	9	65
			Limon argileux	56	6	63
			Limon battant	56	8	64
			Sableux	53	8	61
		Printemps	Argilo-calcaire		54	54
			Argilo-limoneux		58	58
			Craie		60	60
			Limon argileux		57	57
			Limon battant		59	59
			Sableux		56	56
DP2 : Centre, Bassin parisien et Nord	Culture d'automne	Fin d'été	Argilo-calcaire		4	59
			Argilo-limoneux		4	63
			Craie		6	61
			Limon argileux		5	61
			Limon battant		6	61
			Sableux		7	59
	Culture de printemps	Eté-automne avant CIPAN	Argilo-calcaire	56	6	62
			Argilo-limoneux	59	8	67
			Craie	56	11	66
			Limon argileux	56	8	64
			Limon battant	56	10	66
			Sableux	52	9	61
		Printemps	Argilo-calcaire		57	57
			Argilo-limoneux		62	62
			Craie		63	63
			Limon argileux		60	60
			Limon battant		62	62
			Sableux		58	58
DP3 : Bourgogne, Alsace-Lorraine et Auvergne	Culture d'automne	Fin d'été	Argilo-calcaire		2	59
			Argilo-limoneux		3	63
			Craie		6	62
			Limon argileux		4	60
			Limon battant		5	61
			Sableux		6	58
	Culture de printemps	Eté-automne avant CIPAN	Argilo-calcaire	56	5	62
			Argilo-limoneux	61	7	67
			Craie	56	10	67
			Limon argileux	57	8	64
			Limon battant	56	9	66
			Sableux	52	9	61
		Printemps	Argilo-calcaire		56	56
			Argilo-limoneux		62	62
			Craie		63	63

Situation climatique	Cultures concernées	Période d'apport	Type de sol	Azote efficace	Equivalence Engrais			
					Keq bilan	Keq cycle		
DP4 : Rhône-Alpes et Méditerranée	Culture d'automne	Fin d'été	Limons argileux		60	60		
			Limons battants		62	62		
			Sableux		58	58		
			Argilo-calcaire		2	56		
			Argilo-limoneux		2	58		
			Limons argileux		2	57		
	Culture de printemps	Eté-automne avant CIPAN	Limons battants		4	58		
			Sableux		5	57		
			Argilo-calcaire	54	7	61		
			Argilo-limoneux	56	8	64		
			Limons argileux	54	9	63		
			Limons battants	54	11	65		
		Printemps	Sableux	52	12	63		
			Argilo-calcaire		56	56		
			Argilo-limoneux		59	59		
			Limons argileux		60	60		
			Limons battants		62	62		
			Sableux		60	60		
DP5 : Midi- Pyrénées	Culture d'automne	Fin d'été	Argilo-calcaire		3	57		
			Argilo-limoneux		4	61		
			Limons argileux		5	59		
			Limons battants		7	61		
			Sableux		7	58		
			Culture de printemps	Eté-automne avant CIPAN	Argilo-calcaire	54	13	67
	Argilo-limoneux	58			15	72		
	Limons argileux	54			15	70		
	Limons battants	54			17	71		
	Sableux	51			14	66		
	Printemps	Argilo-calcaire				66	66	
		Argilo-limoneux			69	69		
		Limons argileux			68	68		
		Limons battants			69	69		
		Sableux			63	63		
		DP6 : Centre-Ouest et Sud-Ouest		Culture d'automne	Fin d'été	Argilo-calcaire		6
	Argilo-limoneux						5	67
	Limons argileux					6	65	
Limons battants			6			65		
Sableux			8			63		
Culture de printemps	Eté-automne avant CIPAN		Argilo-calcaire			59	14	73
			Argilo-limoneux	62	12	74		
			Limons argileux	59	14	73		
			Limons battants	59	14	73		
			Sableux	55	14	69		
			Printemps	Argilo-calcaire		69	69	
	Argilo-limoneux				69	69		
	Limons argileux				69	69		
	Limons battants				69	69		
	Sableux				67	67		

## PARTIE 3 :

## CONCLUSION

Dans le cadre de l'application de l'arrêté du 19 décembre 2011 relatif au programme d'action national à mettre en œuvre dans les zones vulnérables afin de réduire la pollution des eaux par les nitrates d'origine agricole, la SYPREA a souhaité définir pour 10 PRO la notion d'Azote Efficace et d'Equivalence Engrais sur tout le cycle cultural et sur la période du bilan azoté.

Ces coefficients, définis dans le Guide méthodologique pour le calcul de la fertilisation azotée du COMIFER, ont été déterminés par l'utilisation d'un outil de simulation dynamique (AZOFERT®), dans 6 types de climat et sur 5 à 6 types de sols, représentatifs des sols français. Les calculs sont basés sur la détermination du nombre de Jours Normalisés écoulés sur la période du bilan et du cycle cultural. Trois modalités d'apport ont été testées :

- épandage de printemps avant une culture de printemps
- épandage de fin d'été avant une culture d'automne
- épandage de fin d'été avant CIPAN suivie d'une culture de printemps

**Le Tableau 10, présente les valeurs moyennes obtenues par produit, au format utilisé par la brochure COMIFER « Calcul de la fertilisation azotée ».**

Dans ce tableau, lorsque l'écart entre les valeurs minimales et maximales des coefficients est inférieur à 0.02 par rapport à la valeur moyenne, seule la valeur moyenne a été affichée. Il s'agit de produits dont la cinétique de minéralisation de l'azote atteint rapidement un maximum puis se stabilise. **Le potentiel de minéralisation de l'azote de ces produits s'exprime complètement sur la culture semée après l'épandage et ne varie pas, ou peu, dans les différents contextes pédoclimatiques.** Les produits dans ce cas sont la boue urbaine liquide, la boue liquide de laiterie, la boue solide d'IAA (production d'acides aminés), et les deux composts (NF U44-051 et NF U44-095). Pour ces PRO, une même valeur moyenne peut être utilisée dans toutes les situations pédoclimatiques.

Pour les autres PRO, en fonction du climat ou du type de sol, les coefficients d'efficacité de l'azote peuvent varier de plus ou moins 0.02 autour de la valeur moyenne. Les écarts entre les situations extrêmes peuvent atteindre 10% du potentiel de minéralisation. **Pour ces produits, les valeurs minimales et maximales sont indiquées dans le Tableau 10.** Ainsi, à titre d'exemple, le Coefficient d'Equivalence Engrais de la boue urbaine séchée sur la période du bilan, peut varier selon les situations pédoclimatiques de 20 à 30% pour une culture de printemps, après un épandage de fin d'hiver. Les autres produits dans ce cas sont les boues urbaines chaulées (de filtre presse ou déshydratée), la boue de papeterie et l'eau de conserverie. Pour ces PRO, il convient d'adapter le coefficient à la situation pédoclimatique. Ces produits sont aussi caractérisés par une cinétique de minéralisation plus progressive, et auront un effet sur la culture suivante (ou culture de printemps après CIPAN).

A raison d'un apport de 170 kg/ha d'azote total, la réalisation de l'épandage de tous les PRO avant et sur CIPAN respecte les prescriptions de l'arrêté du 19 décembre 2011.

Tableau 10 : Valeurs moyennes du Coefficient d'Azote Efficace et des Coefficients d'Equivalence Engrais, exprimées en pourcentage de l'azote total des produits. Tableau de synthèse par produit.

Type de produit	Cultures concernées	Période d'apport	Coefficient d'azote efficace	Coefficient d'équivalence engrais	
				Keq bilan <sup>5</sup>	Keq cycle
Boue urbaine liquide (réf. SYPREA)	Culture de printemps	Printemps	Sans objet	0.38	0.38
	Culture de printemps	Eté-automne avant CIPAN	0.37	0.01	0.38
	Culture d'automne	Fin d'été	Sans objet	0.01	0.38
Boue urbaine filtre presse chaulée (réf. SYPREA)	Culture de printemps	Printemps	Sans objet	0.30 – 0.40	0.30 – 0.40
	Culture de printemps	Eté-automne avant CIPAN	0.30 – 0.35	0.05 – 0.10	0.35 – 0.45
	Culture d'automne	Fin d'été	Sans objet	0.03	0.35 – 0.40
Boue urbaine déshydratée chaulée (réf. LCA)	Culture de printemps	Printemps	Sans objet	0.25 – 0.30	0.25 – 0.30
	Culture de printemps	Eté-automne avant CIPAN	0.20 – 0.30	0.05	0.25 – 0.35
	Culture d'automne	Fin d'été	Sans objet	0.02	0.25 – 0.30
Boue urbaine séchée (réf. SYPREA)	Culture de printemps	Printemps	Sans objet	0.20 – 0.30	0.20 – 0.30
	Culture de printemps	Eté-automne avant CIPAN	0.15 – 0.25	0.05 – 0.15	0.25 – 0.35
	Culture d'automne	Fin d'été	Sans objet	0.02 – 0.07	0.20 – 0.30
Boue de papeterie (réf. SYPREA)	Culture de printemps	Printemps	Sans objet	-0.25 à -0.80	-0.25 à -0.80
	Culture de printemps	Eté-automne avant CIPAN	-0.40 à -0.90	-0.20 à -0.60	-0.20 à -0.50
	Culture d'automne	Fin d'été	Sans objet	-0.10 à -0.35	-0.30 à -0.70
Boue de laiterie (réf. LCA)	Culture de printemps	Printemps	Sans objet	0.17	0.17
	Culture de printemps	Eté-automne avant CIPAN	0.15	0.04	0.19
	Culture d'automne	Fin d'été	Sans objet	0.02	0.17
Boue d'IAA prod acides aminés (réf. SYPREA)	Culture de printemps	Printemps	Sans objet	0.23	0.23
	Culture de printemps	Eté-automne avant CIPAN	0.22	0.01	0.23
	Culture d'automne	Fin d'été	Sans objet	< 0.01	0.23
Eau de conserverie (réf. Azofert)	Culture de printemps	Printemps	Sans objet	0.10 – 0.30	0.10 – 0.30
	Culture de printemps	Eté-automne avant CIPAN	0.07 – 0.20	0.05 – 0.20	0.23
	Culture d'automne	Fin d'été	Sans objet	0.02 – 0.10	0.10 – 0.25
Compost NF U44-051 (réf. SYPREA)	Culture de printemps	Printemps	Sans objet	0.06	0.06
	Culture de printemps	Eté-automne avant CIPAN	0.06	< 0.01	0.06
	Culture d'automne	Fin d'été	Sans objet	< 0.01	0.06
Compost NF U44-095 (réf. SYPREA)	Culture de printemps	Printemps	Sans objet	0.03	0.03
	Culture de printemps	Eté-automne avant CIPAN	0.03	0.01	0.04
	Culture d'automne	Fin d'été	Sans objet	< 0.01	0.03

<sup>5</sup> Dans le cas d'un épandage de printemps, le Keq bilan et le Keq cycle sont équivalents.

Selon les simulations réalisées, l'influence du pédoclimat et de l'itinéraire technique peuvent conduire à des écarts 8 à 17 unités (exprimées en azote efficace ou en équivalent engrais sur la période du bilan) pour un même produit épandu sur la base d'un apport total de 170 unités d'azote par hectare.

Le calcul des coefficients présentés dans les tableaux des Annexes 1 et 2 mettent en évidence diverses influences :

- **Effet global des zones climatiques : cet effet est différent selon l'itinéraire technique, mais il est sensible (de l'ordre de 5%).**
  - o Dans le cas d'un épandage de printemps avant culture de printemps, on peut observer un écart de 6% sur le  $K_{eq}$  entre la région « Rhônes-Alpes – Méditerranée DP4 », qui présente les valeurs les plus faibles et le « Centre Ouest – Sud Ouest DP6 », dans lequel les valeurs sont globalement plus élevées. Le déficit hydrique de la première région explique certainement ce phénomène.
  - o Dans le cas d'un épandage de fin d'été avant culture d'automne, l'écart peut être de 8% sur le  $K_{eq}$ , entre la région présentant les plus faibles températures (Bretagne – Normandie DP1) et le Centre Ouest - Sud Ouest DP6.
  - o Dans le cas d'un apport avant CIPAN, l'écart est globalement de 4% sur le CIPAN, avec un coefficient d'azote efficace globalement plus faible dans le DP4 et plus fort dans le DP6. Sur l'ensemble du cycle, le  $K_{eq}$  le plus faible est observé dans le DP1.
- **Effet global du type de sol : 2 à 7% d'écart de  $K_{eq}$  entre les sols.**
  - o Pour tous les itinéraires techniques, les sols sableux présentent des taux de minéralisation plus faibles que les sols plus « équilibrés ». Les valeurs les plus élevées sont simulées dans les sols argilo-limoneux.
  - o Les sols argilo-calcaires semblent présenter des valeurs plus faibles dans le cas des épandages de fin d'hiver...
  - o Ces effets sont observés dans les 6 zones climatiques. Toutefois, ils sont amplifiés dans deux d'entre-elles : les régions « Centre – Bassin parisien – Nord » (DP2) et « Bourgogne – Alsace – Lorraine – Auvergne » (DP3).

*Dans le cadre de cette étude, le module de simulation de la dégradation des produits organiques est utilisé dans un système fermé. Les résultats de l'étude ne tiennent pas compte de la lixiviation des nitrates, ni de la volatilisation d'azote ammoniacal. Les coefficients d'azote efficace et d'équivalence engrais se trouvent de ce fait surestimés.*

## EXEMPLE D'UTILISATION DES COEFFICIENTS D'EQUIVALENCE ENGRAIS ET D'EFFICACITE DE L'AZOTE : APPLICATION AU CAS DE LA BOUE CHAULEE DE FILTRE PRESSE (BUFPCHSYP)

Les graphiques ci-dessous reprennent en conclusion, pour le cas d'une boue de filtre presse chaulée épandue en zone agroclimatique du Centre – Bassin parisien – Nord, et en sol limono-argileux, les coefficients obtenus dans le cas d'épandage au printemps, en fin d'été avant une culture d'automne ou de printemps (précédée d'une CIPAN).

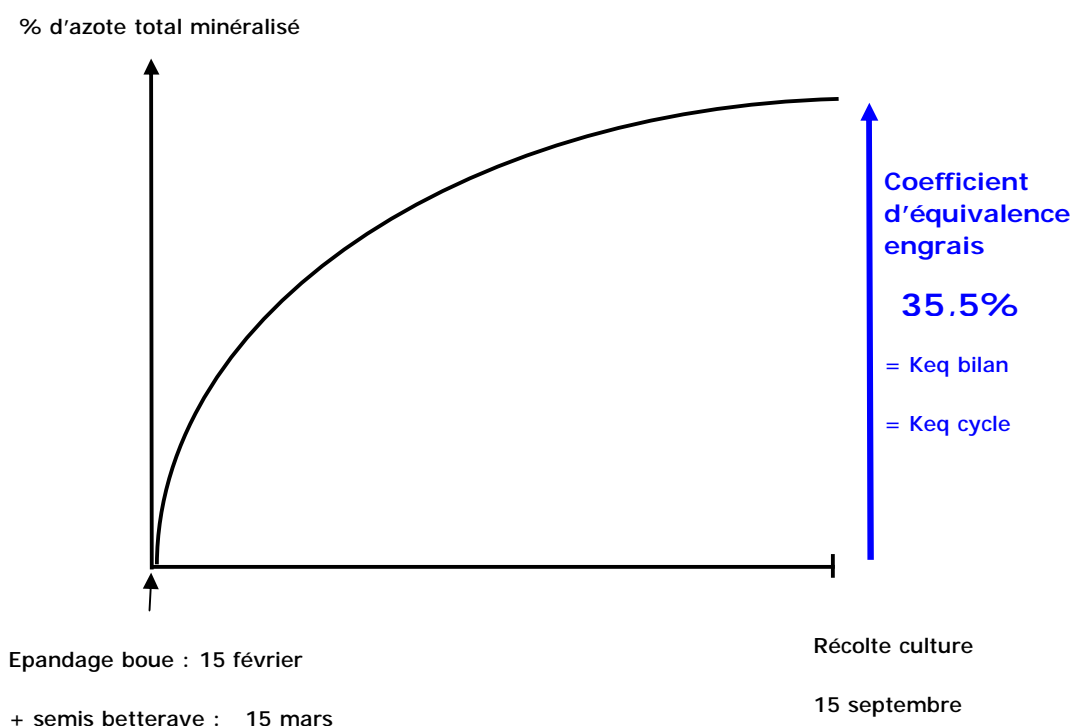


Figure 11 : coefficient d'équivalence engrais sur la période du bilan et sur tout le cycle, d'une boue de filtre presse chaulée épandue au printemps avant betterave

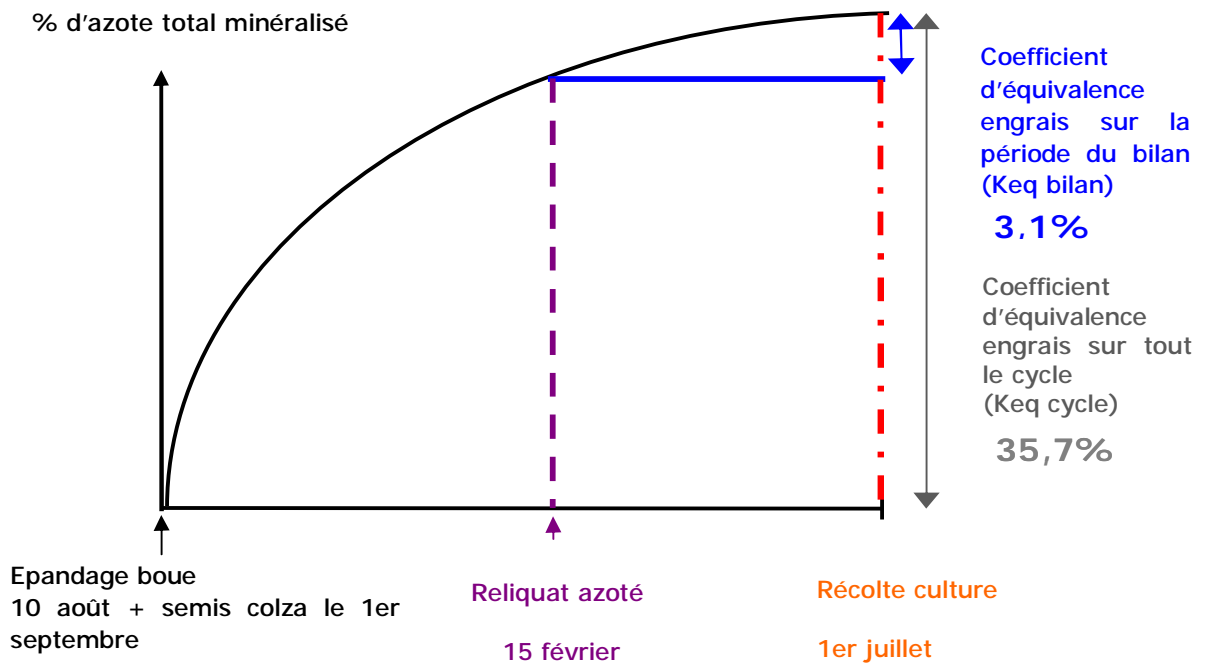


Figure 12 : coefficient d'équivalence engrais sur la période du bilan et sur tout le cycle, d'une boue de filtre presse chaulée épanchée en fin d'été avant colza

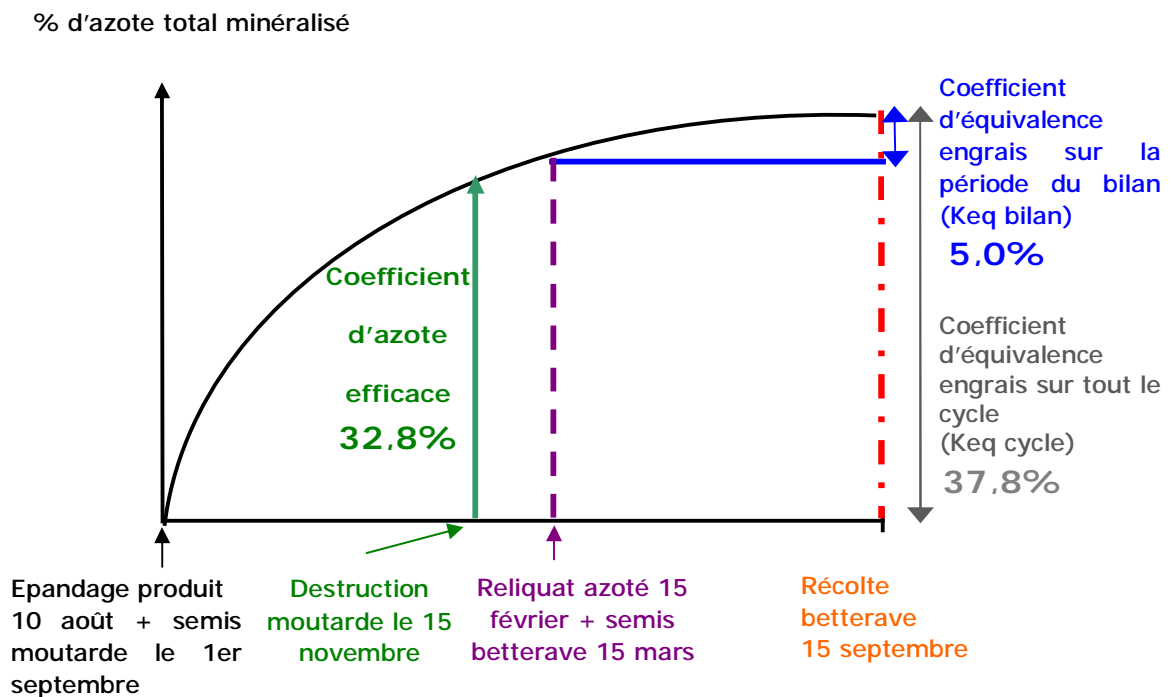


Figure 13 : coefficient d'azote efficace et d'équivalence engrais sur la période du bilan et sur tout le cycle, d'une boue de filtre presse chaulée épanchée en fin d'été avant betterave précédée d'une moutarde (CIPAN)



# ANNEXES

ANNEXE 1 : COEFFICIENTS D'AZOTE EFFICACE ET COEFFICIENTS D'EQUIVALENCE ENGRAIS, PAR PRODUIT, PAR ZONE CLIMATIQUE, PAR TYPE DE SOL ET PAR ITINERAIRE TECHNIQUE (EN % DU N TOTAL DES PRO)

ANNEXE 2 : COEFFICIENTS D'AZOTE EFFICACE ET COEFFICIENTS D'EQUIVALENCE ENGRAIS, PAR PRODUIT, PAR ZONE CLIMATIQUE, PAR TYPE DE SOL ET PAR ITINERAIRE TECHNIQUE (POUR 170 KG DE N TOTAL APPORTE PAR LES PRO)