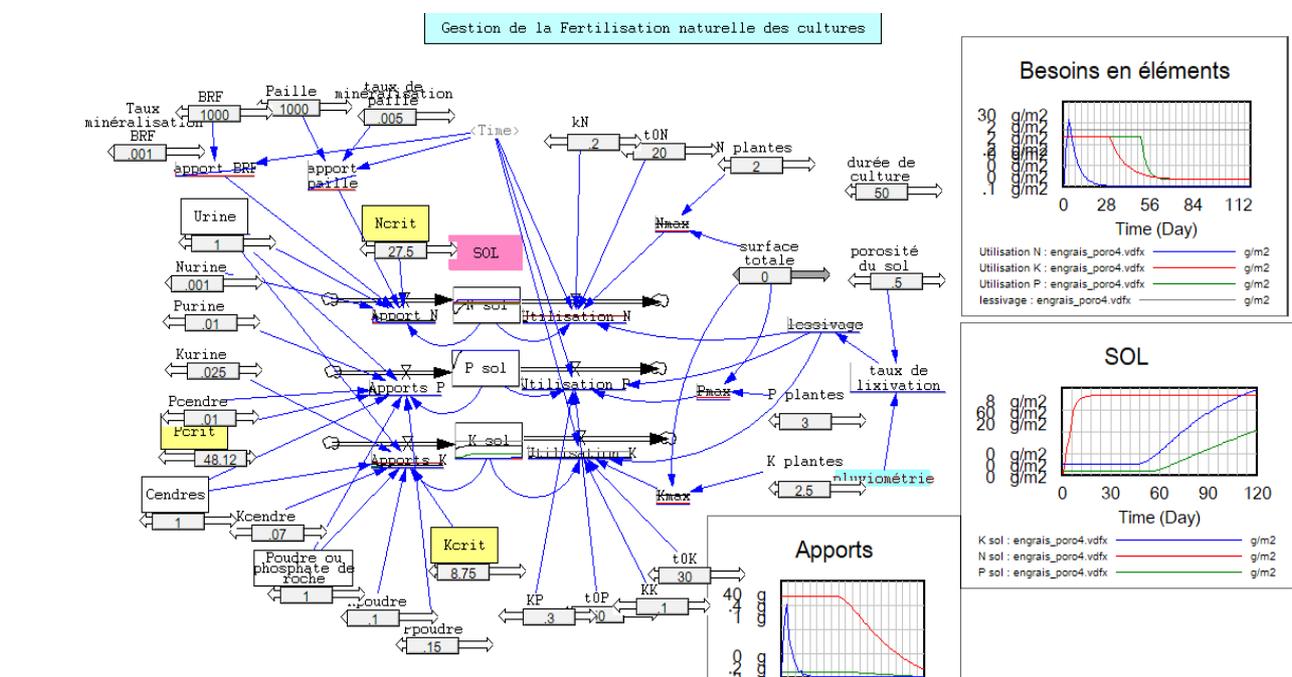


FICHE FERTILISATION NATURELLE 3 bis: Modélisation et simulation avec Vensim

Il est tout à fait possible de modéliser les proportions adéquates d'urine, de cendres, de poudre d'os ou de phosphate de roche pour obtenir un engrais NPK adapté à différentes cultures (comme les laitues, tomates, blettes, radis) en utilisant un outil de modélisation dynamique comme Vensim. Vensim permet de construire des modèles de systèmes complexes avec des stocks (levels) et flux (flows), qui sont adaptés pour représenter des systèmes dynamiques tels que les nutriments dans le sol.

Le modèle proposé est exploitable avec le visualiseur de modèles numériques est proposé au téléchargement ([Model Reader](#)). il permet d'ouvrir un modèle et de lancer des simulations en modifiant les paramètres . Il ne permet pas de construire ni de modifier un modèle, pour cela il faut utiliser la [version PLE](#) qui est gratuite. Cette version permet d'adapter et de corriger le modèle proposé pour des cultures.



I Structure du modèle dans Vensim

1. Stocks (levels) pour N, P, K :

Les "levels" représenteront les quantités d'azote (N), de phosphore (P), et de potassium (K) dans l'engrais en fonction des composants utilisés (urine, cendres, poudre d'os/phosphate de roche). Chaque élément aura son propre stock pour N, P, et K, modélisé par des équations.

- Stock N (Azote)
- Stock P (Phosphore)
- Stock K (Potassium)

2. Flows (flux d'entrée) :

Les composants comme l'urine, les cendres et la poudre d'os seront modélisés comme des flux entrant dans chaque stock. Ces flux seront proportionnels à la concentration en N,

P, K de chaque source. Par exemple, l'urine enrichit principalement en N, tandis que les cendres et la poudre d'os enrichissent en P et K.

3. Paramètres pour les cultures :

Vous pouvez modéliser les besoins en NPK des différentes cultures (laitue, tomate, blette, radis) sous forme de variables d'équation qui influenceront la quantité d'engrais nécessaire. Chaque culture aura des besoins spécifiques en NPK.

Exemple de modèle sous Vensim :

1. Urine (U) :

- Urine est riche en N (azote) et contient des quantités plus faibles de P (phosphore) et K (potassium) .

| | N en g/l | NH4 en g/l | NO3 | Urée | créatinine | A urique | P | K | apport l/m2 | dilution | NaCl en g/l |
|--|-------------|------------|-----|------|------------|----------|-----|------|--|----------|-------------|
| urine | 9 | | | | | | | | | | |
| urine | 15 | 0,5 | | 0 | 12 | 1,2 | 0,6 | | 120 | 3 | 0,05 |
| sol opti | 2 | 0,01 | | 0,05 | | | | | | | |
| cendres | | | | | | | | 0,01 | | 0,1 | |
| poudre de Phosphate | | | | | | | | 0,1 | | | |
| besoins /m2 en g | 20 | | | | | | 0,8 | | 3 | | |
| apports en urine en litres/m2 | 2 | | | | | | | | | | |
| besoin en N en g/mois | | | | | | | | | | | |
| salade | 2 | | | | | | | | | | |
| besoin en g/j | 0,05 | | | | | | | | | | |
| besoin en g/plante | 3 | | | | | | | | | | |
| un m ² de laitue soit en moyenne. | 6 L d'urine | | | | | | | | 0,1 à 0,15 L d'urine par jour par m ² | | |

- Pour chaque litre d'urine appliqué :

$$N_{urine} = 10 \text{ g/L}, \quad P_{urine} = 1 \text{ g/L}, \quad K_{urine} = 2.5 \text{ g/L}$$

- Le flux de N, P, et K depuis l'urine est donné par l'équation :

$$\text{Flux } N_{urine} = U \times 10 \text{ g/L}$$

$$\text{Flux } P_{urine} = U \times 1 \text{ g/L}$$

$$\text{Flux } K_{urine} = U \times 2.5 \text{ g/L}$$

où (U) est la quantité d'urine appliquée en litres.

2. Cendres de bois (C) :

- Les cendres apportent principalement du P et du K .

- Pour chaque kg de cendres appliqué :

$$P_{cendres} = 10 \text{ g/kg}, \quad K_{cendres} = 50 \text{ g/kg}$$

- Le flux de P et K depuis les cendres est donné par :

$$\text{Flux } P_{cendres} = C \times 10 \text{ g/kg}$$

$$\text{Flux } K_{cendres} = C \times 50 \text{ g/kg}$$

où (C) est la quantité de cendres appliquée en kg.

3. Poudre d'os ou phosphate de roche (O) :

- La poudre d'os ou le phosphate de roche est riche en P .
- Pour chaque kg de poudre appliqué :

$$P_{\text{poudre}} = 150 \text{ g/kg}$$

- Le flux de P depuis la poudre est donné par :

$$\text{Flux } P_{\text{poudre}} = O \times 150 \text{ g/kg}$$

où (O) est la quantité de poudre appliquée en kg.

4. Besoins en NPK des cultures :

Pour modéliser les besoins spécifiques des différentes cultures, chaque culture aura une équation définissant ses besoins en fonction du temps et de l'élément NPK.

- Laitue :

$$N_{\text{laitue}} = 2 \text{ g/m}^2, \quad P_{\text{laitue}} = 0.5 \text{ g/m}^2, \quad K_{\text{laitue}} = 2 \text{ g/m}^2$$

- Tomate :

$$N_{\text{tomate}} = 3 \text{ g/m}^2, \quad P_{\text{tomate}} = 0.8 \text{ g/m}^2, \quad K_{\text{tomate}} = 3.5 \text{ g/m}^2$$

- Blette :

$$N_{\text{blette}} = 2.5 \text{ g/m}^2, \quad P_{\text{blette}} = 0.6 \text{ g/m}^2, \quad K_{\text{blette}} = 2.8 \text{ g/m}^2$$

- Radis :

$$N_{\text{radis}} = 1.5 \text{ g/m}^2, \quad P_{\text{radis}} = 0.4 \text{ g/m}^2, \quad K_{\text{radis}} = 1.8 \text{ g/m}^2$$

5. Équilibrage des proportions :

En fonction des besoins en NPK des différentes cultures, vous pouvez ajuster les proportions de chaque composant (urine, cendre, poudre d'os) pour atteindre un équilibre proche des 30 % N, 20 % P, 20 % K pour l'engrais final.

Par exemple, pour ajuster les apports en NPK pour les tomates :

$$\text{Besoin total en NPK (tomate)} = N_{\text{tomate}} : P_{\text{tomate}} : K_{\text{tomate}} = 3 : 0.8 : 3.5$$

Le modèle calculera ensuite les proportions optimales de chaque composant pour s'approcher de ces valeurs.

Conclusion :

Ce modèle peut être simulé dans Vensim pour observer comment chaque composant (urine, cendres, poudre d'os) contribue aux niveaux de N, P et K, et comment ces niveaux évoluent en fonction des besoins des cultures. Les équations établissent les flux d'entrée des éléments nutritifs et permettent d'optimiser les proportions des différents composants pour répondre aux besoins spécifiques des cultures maraîchères.

Pour intégrer la durée des cultures et les cycles de cultures sur une année dans un

modèle Vensim, il est possible de modéliser la dynamique de l'absorption des nutriments par les plantes en fonction du temps, tout en prenant en compte la période de croissance de chaque culture et les rotations ou cycles de plantation sur une saison. Voici comment structurer le modèle en fonction du temps et des cycles de cultures .

1. Définir la période de croissance pour chaque culture

Chaque culture a une durée spécifique de croissance. Par exemple :

- Laitue : 6 à 8 semaines (environ 50 jours)
- Tomate : 90 à 120 jours
- Blette : 60 à 90 jours
- Radis : 25 à 30 jours

Ces périodes de croissance influencent l'absorption des nutriments (N, P, K) au cours du temps. Le modèle doit donc ajuster les stocks de NPK en fonction de la durée de croissance de chaque culture.

2. Modéliser la consommation de NPK au fil du temps

Dans Vensim, les stocks (levels) de N, P, et K diminueront à mesure que les cultures absorberont les nutriments. La consommation dépendra de la croissance des plantes pendant leur période de culture, donc il est nécessaire de modéliser cette consommation de manière dynamique.

Consommation des nutriments en fonction du temps : On peut modéliser la consommation en tant que flux sortant des stocks N, P, et K, représentant l'absorption par les plantes au cours du temps.

Par exemple, si une laitue consomme 2 g/m² de N, et que la période de croissance est de 50 jours, la consommation quotidienne de N serait :

$$\text{Consommation quotidienne de N (laitue)} = \frac{2 \text{ g/m}^2}{50 \text{ jours}} = 0.04 \text{ g/m}^2/\text{jour}$$

Ce flux serait appliqué chaque jour de la croissance des laitues.

Pour chaque culture (généralisation) :

- Pour la culture (X) de durée (Dx) :

$$\text{Consommation journalière de N}_X = \frac{\text{Besoin total de N}}{D_X}$$

$$\text{Consommation journalière de P}_X = \frac{\text{Besoin total de P}}{D_X}$$

$$\text{Consommation journalière de K}_X = \frac{\text{Besoin total de K}}{D_X}$$

Ces équations décrivent les flux d'absorption des nutriments par les plantes au fil du

temps pendant leur période de croissance.

3. Rotations et cycles des cultures

Si plusieurs cycles de cultures sont prévus sur une année (par exemple, des rotations entre laitues, radis, tomates, etc.), cela peut être modélisé en Vensim en prenant en compte les périodes de culture successives. Chaque cycle ajoutera une nouvelle demande en NPK dans le sol, et il faudra ajuster les stocks d'engrais disponibles.

Intégration des cycles dans Vensim :

- Stock NPK total dans le sol : Représente la quantité de N, P, et K disponibles au début de chaque cycle de culture.
- Rotation des cultures : Chaque nouvelle culture commence à une date définie après la fin de la précédente. Les flux de consommation de N, P, et K pour chaque culture sont activés uniquement pendant leur période de croissance.

Exemple pour une année avec rotations de laitue et radis :

- Cycle 1 : Laitue (mars à avril, 50 jours)
Pendant ces 50 jours, les laitues absorbent du N, P, et K quotidiennement. Une fois la récolte terminée, un nouveau cycle commence.
- Cycle 2 : Radis (mai, 30 jours)
Pendant les 30 jours, les radis absorbent les nutriments, et ainsi de suite.

Ces cycles se répètent jusqu'à la fin de l'année, avec des cultures différentes à chaque fois.

4. Prise en compte de la saisonnalité et des ajouts d'engrais

Entre chaque cycle, il est possible de réapprovisionner le sol avec de l'engrais pour rétablir les niveaux de N, P, et K. Ces ajouts peuvent être modélisés comme des flux entrants qui augmentent les stocks de N, P, et K dans le sol au début ou pendant chaque cycle de culture.

Exemple de réapprovisionnement en engrais :

- Ajout d'urine et de cendres avant chaque cycle : définir des flux entrants représentant la quantité d'urine, de cendres ou de poudre d'os ajoutée avant le début de chaque nouvelle culture.
- Par exemple, ajoutez 3 litres d'urine avant chaque plantation de laitue :

$$\text{Ajout } N_{\text{urine}} = 3 \times 10 \text{ g/L} = 30 \text{ g}$$

et cela serait ajouté au stock N du sol.

5. Modélisation en temps continu

Vensim permet de modéliser en temps continu. Chaque jour, le modèle met à jour les niveaux de N, P, et K dans le sol en fonction des flux entrants (apports d'engrais) et des flux sortants (absorption par les cultures). Les équations se présentent comme suit :

Flux entrants (apports d'engrais) :

$$\text{Flux entrant N} = \text{apport d'urine} \times 10 \text{ g/L}$$

$$\text{Flux entrant P} = (\text{apport de cendres} \times 10 \text{ g/kg}) + (\text{apport de poudre d'os} \times 150 \text{ g/kg})$$

$$\text{Flux entrant K} = \text{apport de cendres} \times 50 \text{ g/kg}$$

Flux sortants (absorption par les cultures) :

$$\text{Flux sortant N} = \sum_{\text{cultures}} \frac{\text{Besoin total de N}}{\text{durée de croissance}}$$

$$\text{Flux sortant P} = \sum_{\text{cultures}} \frac{\text{Besoin total de P}}{\text{durée de croissance}}$$

$$\text{Flux sortant K} = \sum_{\text{cultures}} \frac{\text{Besoin total de K}}{\text{durée de croissance}}$$

6. Simuler plusieurs scénarios

En ajustant les variables comme les quantités d'engrais (urine, cendres, phosphate de roche) et la fréquence des cycles de culture, vous pouvez simuler différents scénarios :

- Quelle quantité d'engrais faut-il ajouter pour répondre aux besoins d'une culture spécifique ?
- Quel est l'effet d'un excès ou d'un manque de nutriments sur une période de plusieurs cycles ?
- Comment les rotations de cultures influencent-elles l'équilibre NPK du sol au fil du temps ?

Conclusion

En modélisant les besoins en NPK, les périodes de croissance, et les cycles de cultures dans Vensim, nous pouvons optimiser les apports d'engrais (urine, cendres, poudre d'os, etc.) en fonction des besoins des différentes cultures maraîchères tout au long de l'année. Cette approche permet d'anticiper les variations des niveaux de nutriments dans le sol et d'ajuster les apports d'engrais de manière précise pour éviter les carences ou excès.

Dans la réalité, les besoins en N, P, et K d'une plante varient au cours de son cycle de vie, en fonction de ses stades de croissance (germination, croissance végétative, floraison, fructification, etc.). Pour intégrer ces variations dans un modèle Vensim, il est possible de représenter les besoins en nutriments comme des fonctions du temps qui tiennent compte des différents stades de développement de la plante. Voici comment ajuster le modèle pour prendre en compte cette variabilité dans le temps.

1. Stades de croissance des plantes

Chaque culture a des besoins différents en fonction de ses stades de croissance. Par exemple :

- Stade de germination : Faible demande en NPK
- Stade de croissance végétative : Forte demande en azote (N)

- Stade de floraison ou fructification : Forte demande en phosphore (P) et en potassium (K)

Exemple pour la tomate :

- Germination (0 à 10 jours) : Très faible demande en nutriments
- Croissance végétative (10 à 50 jours) : Forte demande en azote
- Floraison et fructification (50 à 120 jours) : Forte demande en phosphore et potassium

2. Modéliser les besoins en NPK comme des fonctions du temps

Dans Vensim, les besoins en N, P, et K pour chaque culture peuvent être modélisés comme des fonctions dépendantes du temps, ce qui permet d'ajuster la consommation de nutriments en fonction des différents stades de développement de la plante.

a. Modélisation des besoins en NPK sur un cycle de culture

Pour une plante donnée (par exemple, une tomate), les besoins en N, P, et K peuvent être représentés par des courbes qui varient avec le temps.

Fonction pour l'azote (N) :

- $N(t)$ représente la quantité d'azote absorbée par la plante à un moment donné t de son cycle de croissance. Cette fonction peut être définie par une combinaison de segments pour les différents stades de croissance.

Exemple :

$$N(t) = \begin{cases} N_{\text{germination}} & \text{si } t \in [0, 10] \\ N_{\text{végétatif}} & \text{si } t \in [10, 50] \\ N_{\text{fructification}} & \text{si } t \in [50, 120] \end{cases}$$

- Pendant la germination (0 à 10 jours) : $N(t)$ est très faible.
- Pendant la croissance végétative (10 à 50 jours) : $N(t)$ augmente fortement.
- Pendant la floraison et la fructification (50 à 120 jours) : $N(t)$ peut rester constant ou légèrement diminuer.

Fonction pour le phosphore (P) et le potassium (K) :

De manière similaire, les besoins en P et K sont plus élevés pendant la floraison et la fructification :

$$P(t) = \begin{cases} P_{\text{germination}} & \text{si } t \in [0, 10] \\ P_{\text{végétatif}} & \text{si } t \in [10, 50] \\ P_{\text{fructification}} & \text{si } t \in [50, 120] \end{cases}$$

$$K(t) = \begin{cases} K_{\text{germination}} & \text{si } t \in [0, 10] \\ K_{\text{végétatif}} & \text{si } t \in [10, 50] \\ K_{\text{fructification}} & \text{si } t \in [50, 120] \end{cases}$$

Les courbes de ces besoins peuvent être représentées sous forme de segments linéaires, de fonctions exponentielles ou de fonctions de type sigmoïde pour modéliser les périodes de forte absorption.

3. Intégrer les fonctions de consommation dans Vensim

En fonction des fonctions définies ci-dessus, nous pouvons modéliser le flux sortant des nutriments en fonction du temps et des besoins de chaque culture.

Exemple : Flux de consommation d'azote pour une culture de tomate
Le flux de consommation d'azote sera défini par l'équation :

$$\text{Flux sortant N} = N(t) \times \text{surface plantée (m}^2\text{)}$$

Cela signifie que, pour chaque jour du cycle de croissance, la plante consommera une certaine quantité d'azote en fonction de la phase de croissance.

Flux de consommation de phosphore et potassium
De même, les flux pour le phosphore et le potassium sont :

$$\text{Flux sortant P} = P(t) \times \text{surface plantée (m}^2\text{)}$$

$$\text{Flux sortant K} = K(t) \times \text{surface plantée (m}^2\text{)}$$

Ces flux seront dynamiquement ajustés en fonction du jour (t) dans le cycle de croissance de la culture.

4. Modélisation des cycles de cultures multiples sur une année

Si plusieurs cycles de cultures sont prévus sur une année, ces fonctions dynamiques de besoins en NPK devront être répétées pour chaque cycle, en fonction des dates de début et de fin de chaque culture. Chaque cycle pourra être modélisé de manière indépendante avec ses propres besoins en fonction du temps.

5. Gestion des apports en NPK (engrais) sur la durée

Pour maintenir un équilibre des stocks de NPK dans le sol, il faut également modéliser les apports d'engrais en fonction des stades de croissance des plantes. Par exemple :

- Pendant la croissance végétative, nous pourrions ajuster les flux entrants d'azote pour répondre à la demande croissante.
- Pendant la floraison/fructification, les apports en P et K devraient être augmentés.

6. Équations de base pour les flux dans Vensim

- Stock N (azote dans le sol) :

$$dN/dt = \text{apports N} - \text{consommation N par les cultures}$$

- Stock P (phosphore dans le sol) :

$$dP/dt = \text{apports P} - \text{consommation P par les cultures}$$

- Stock K (potassium dans le sol) :

$$dK/dt = \text{apports K} - \text{consommation K par les cultures}$$

Les apports peuvent être modélisés comme des flux entrants basés sur l'ajout d'engrais (urine, cendres, poudre d'os, etc.), tandis que les flux sortants sont modifiés selon les besoins de chaque culture au fil du temps.

7. Visualiser et ajuster les scénarios

Vensim permet de simuler ces équations sur plusieurs cycles de culture, en ajustant les apports d'engrais en fonction des besoins temporels de chaque culture. Nous pouvons visualiser :

- L'évolution des stocks de N, P, et K dans le sol au fil du temps.
- Les moments où l'ajout d'engrais est nécessaire pour éviter une carence ou un excès de nutriments.
- L'impact des besoins spécifiques des cultures à chaque stade de développement.

Conclusion

En modélisant les besoins en NPK comme des fonctions du temps, vous pouvez représenter plus fidèlement les variations des besoins nutritionnels des plantes au cours de leur cycle de vie. Cela nous permet de mieux ajuster les apports d'engrais naturels (urine, cendres, poudre d'os) en fonction des stades de croissance des cultures (laitues, tomates, radis, etc.) et d'éviter les excès ou les carences en nutriments tout au long de l'année.

Pour modéliser les variations des besoins en nutriments (N, P, K) au cours du temps avec des fonctions sigmoïdes, l'idée est d'utiliser des fonctions qui représentent une montée progressive (phase de forte absorption) suivie d'une stabilisation (phase de faible absorption). Les fonctions sigmoïdes sont parfaites pour modéliser ce type de comportement car elles augmentent progressivement, atteignent un plateau, et se stabilisent.

II Utiliser ces fonctions pour modéliser les besoins en N, P, K des plantes dans Vensim.

1. Fonction sigmoïde de base

La forme générale d'une fonction sigmoïde est la suivante :

$$f(t) = \frac{L}{1 + e^{-k(t-t_0)}}$$

- (L) : le maximum que la fonction peut atteindre (besoin maximal en N, P, ou K).
- (k) : le taux de croissance de la fonction, déterminant la rapidité avec laquelle la plante passe d'une faible absorption à une forte absorption.
- (t₀) : le moment où la fonction commence à augmenter rapidement (le point d'inflexion), correspondant souvent à une phase critique dans la croissance de la plante (comme la transition entre la germination et la croissance végétative).

- (t) : le temps (généralement en jours) au cours du cycle de croissance de la plante.

2. Modélisation du besoin en azote (N)

Prenons l'exemple de la tomate, qui a un besoin en azote particulièrement élevé pendant sa phase de croissance végétative. Voici comment une fonction sigmoïde peut modéliser ce besoin.

$$N(t) = \frac{N_{\max}}{1 + e^{-k_N(t-t_{0N})}}$$

- N_{\max} : Le besoin maximal en azote, atteint pendant la phase de croissance végétative.
- k_N : Le taux d'absorption, déterminant à quelle vitesse la plante augmente sa demande en azote.
- t_{0N} : Le moment où le besoin en azote commence à augmenter significativement (par exemple, à partir de la fin de la germination).

Exemple concret pour la tomate :

- Germination (0 à 10 jours) : Faible besoin en azote.
- Croissance végétative (10 à 50 jours) : Forte absorption d'azote.
- Floraison/fructification (50 à 120 jours) : Stabilisation ou légère diminution du besoin en azote.

Paramètres possibles :

- $N_{\max} = 3 \text{ g/m}^2$ (par exemple)
- $k_N = 0.2$ (croissance moyenne du besoin)
- $t_{0N} = 20 \text{ jours}$ (augmentation significative des besoins à partir du 20ème jour)

La fonction devient alors :

$$N(t) = \frac{3}{1 + e^{-0.2(t-20)}}$$

Cette fonction augmentera rapidement après 20 jours, atteignant un plateau autour de 3 g/m², reflétant la forte absorption d'azote pendant la phase végétative.

3. Modélisation du besoin en phosphore (P) et en potassium (K)

Les besoins en phosphore et en potassium augmentent souvent plus tard dans le cycle, surtout pendant la floraison et la fructification.

Fonction sigmoïde pour le phosphore :

$$P(t) = \frac{P_{\max}}{1 + e^{-k_P(t-t_{0P})}}$$

- (P_{\max}) : Le besoin maximal en phosphore, atteint pendant la floraison/fructification.
- (k_P) : Le taux de croissance du besoin en phosphore.
- (t_{0P}) : Le point d'inflexion, correspondant au moment où le besoin en phosphore commence à augmenter (par exemple, autour de 50 jours).

Exemple :

- $P_{\max} = 1.5 \text{ g/m}^2$
- $k_P = 0.3$
- $t_{0P} = 60 \text{ jours}$ (le besoin en P commence à croître pendant la phase de fructification)

La fonction devient :

$$P(t) = \frac{1.5}{1 + e^{-0.3(t-60)}}$$

Cette fonction modélise une absorption plus tardive du phosphore, correspondant à la phase de floraison.

Fonction sigmoïde pour le potassium (K) :

De même, pour le potassium, qui est essentiel pour le développement des fruits et le renforcement des tissus, le modèle peut être similaire :

- (K_{\max}) : Le besoin maximal en potassium.
- (k_K) : Le taux de croissance du besoin en K.
- (t_{0K}) : Le moment où le besoin en K commence à croître.

4. Combinaison des besoins en N, P, et K sur une culture

Vous pouvez combiner ces trois fonctions pour modéliser l'évolution des besoins en N, P, et K au fil du temps pour une culture donnée.

Pour une culture de tomates, par exemple :

- $N(t)$ modélise une absorption rapide pendant la phase végétative.
- $P(t)$ et $K(t)$ modélisent une absorption tardive pendant la floraison et la fructification.

Les équations pour chaque nutriment peuvent être ensuite utilisées dans Vensim pour modéliser les flux de consommation des nutriments en fonction du temps.

5. Impact sur le modèle Vensim

Dans le modèle Vensim, ces fonctions sigmoïdes seront utilisées pour modéliser les flux

sortants de N, P, et K à chaque moment t dans le cycle de culture. Par exemple :

Ces flux seront dynamiquement ajustés en fonction du jour t dans le cycle de croissance de chaque culture, permettant de refléter fidèlement les périodes de forte et faible absorption des nutriments par la plante.

6. Ajustement des paramètres

Les paramètres peuvent être ajustés en fonction des caractéristiques spécifiques de chaque culture et de leur période de croissance. Par exemple :

- Les laitues auront des besoins en N principalement pendant les premières semaines de croissance.
- Les tomates auront des besoins en N élevés pendant la phase végétative, suivis de forts besoins en P et K pendant la fructification.

Conclusion: Les fonctions sigmoïdes permettent de modéliser de manière réaliste les besoins en nutriments des plantes au cours de leur cycle de vie. En ajustant les paramètres des fonctions sigmoïdes, nous pouvons représenter les périodes de forte et faible absorption des nutriments et les intégrer dans un modèle Vensim pour mieux planifier l'apport en NPK pour chaque culture au fil du temps.

Pour modéliser les flux sortants de N, P, et K sous Vensim, il est nécessaire d'écrire les équations des flux basées sur les fonctions sigmoïdes que nous avons définies précédemment.

1. Définir les paramètres et les variables dans Vensim

Avant d'écrire les équations des flux, il est important de définir quelques paramètres pour chaque nutriment (N, P, K) qui vont influencer les besoins des plantes au cours du temps. Voici les paramètres essentiels à définir dans Vensim pour chaque nutriment.

a. Paramètres à définir :

- N_{max} : Besoin maximal en azote (g/m^2).
- P_{max} : Besoin maximal en phosphore (g/m^2).
- K_{max} : Besoin maximal en potassium (g/m^2).
- k_N, k_P, k_K : Taux de croissance de la fonction sigmoïde (pour N, P, K respectivement).
- t_{0N}, t_{0P}, t_{0K} : Points d'inflexion pour N, P, K (moment où les besoins commencent à augmenter).

Ces paramètres doivent être déclarés comme des constantes dans Vensim, en fixant des valeurs spécifiques selon la culture (laitue, tomate, radis, etc.).

b. Variables dynamiques :

- Temps "t" : Le temps en jours (une variable temporelle standard dans Vensim).
- Surface plantée "surface" : La surface totale de la culture (en m^2).

2. Écrire les équations des flux sortants dans Vensim

Dans Vensim, nous allons utiliser des formules sigmoïdes pour représenter l'évolution des besoins en N, P, et K dans les flux sortants. Chaque flux sera une fonction du temps et des besoins en nutriments de la culture.

Sous Vensim , il faut définir ce flux dans l'interface en suivant ces étapes :

1. Créez une variable de stock pour Azote (par exemple, NSol), représentant la quantité d'azote disponible dans le sol.
2. Ajoutez une variable de flux sortant pour Azote . Nommons-la Flux N .

Où :

- N_max : le besoin maximal en azote.
- $\exp(-k_N * (TIME - t0N))$: la fonction sigmoïde appliquée au temps t , qui est ici représenté par `TIME` (la variable de temps de Vensim).
- `Surface` : la surface cultivée en m² (vous pouvez la définir comme une constante ou une variable dans Vensim).

b. Flux sortant de phosphore

De manière similaire, pour le flux de phosphore, utilisez l'équation sigmoïde suivante :
Sous Vensim , procédez ainsi :

1. Créez une variable de stock pour Phosphore (par exemple, PhosphoreSol).
2. Créez un flux sortant pour Phosphore nommé Flux P . L'équation sera :
$$\text{Flux P} = P_max / (1 + \exp(-k_P * (TIME - t0P))) * \text{Surface}$$

c. Flux sortant de potassium

Enfin, pour le potassium, utilisez l'équation sigmoïde suivante :

Sous Vensim :

1. Créez une variable de stock pour Potassium (par exemple, PotassiumSol).
2. Créez un flux sortant pour Potassium nommé Flux K . L'équation sera :
$$\text{Flux K} = K_max / (1 + \exp(-k_K * (TIME - t0K))) * \text{Surface}$$

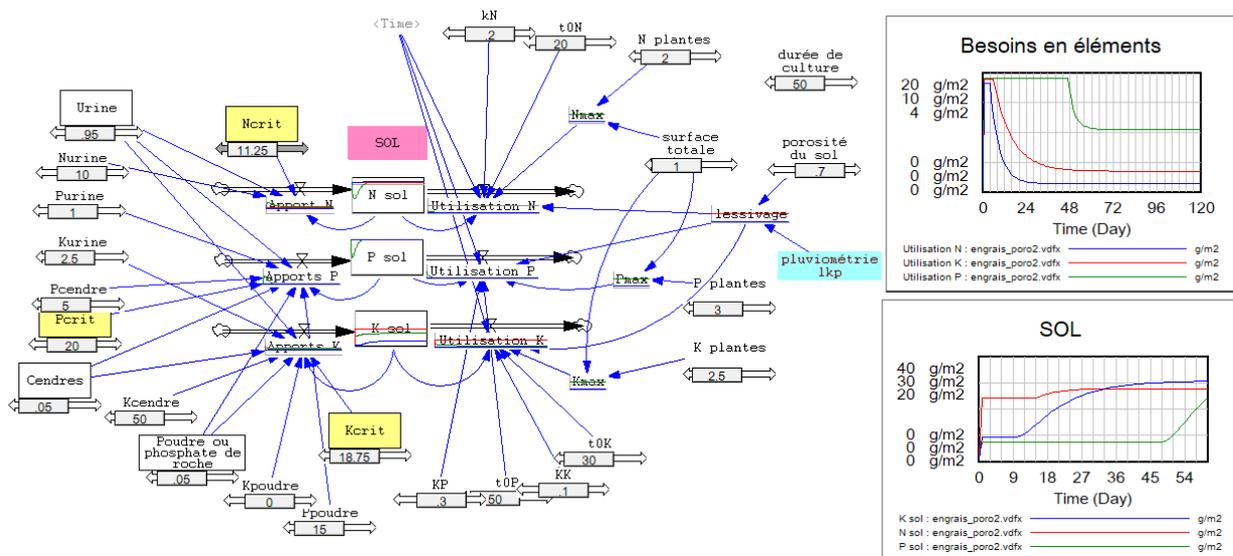
3. Gérer les cycles de culture sur l'année

Pour prendre en compte plusieurs cycles de culture sur une année, nous pouvons modéliser des cycles répétitifs pour les flux sortants de N, P, et K. Avec des périodes de culture et de repos (par exemple, en hiver), nous pouvons ajuster les fonctions sigmoïdes pour qu'elles ne soient actives que pendant certaines périodes.

Cela pourrait se faire en définissant une variable de cycle qui contrôle la période active de culture . Par exemple, un cycle de 120 jours pour une culture de tomate pourrait être modélisé en activant les flux seulement pendant ces jours-là.

4. Visualisation et simulation

- Après avoir défini les flux, visualiser les courbes des stocks d'azote, phosphore, et potassium dans le sol au fil du temps.
- Les flux sortants de N, P, et K devraient montrer des pics pendant les périodes de forte absorption, et des phases de stabilisation.
- on peut ajuster les paramètres pour chaque culture en fonction des observations réelles des besoins de la plante.



Conclusion: En utilisant ces équations sigmoïdes sous Vensim pour les flux sortants de N, P, et K, vous pouvez modéliser de manière réaliste les besoins en nutriments des cultures au fil du temps. Chaque flux est modulé par une fonction dépendant du temps, qui permet de représenter à la fois les périodes de forte absorption des nutriments et celles de moindre besoin. Cette approche vous permet d'optimiser les apports d'engrais naturels tout au long des cycles de croissance des cultures.

Les valeurs "max" devraient effectivement refléter les besoins totaux des plantes sur la surface cultivée, mais ces besoins doivent être ajustés en fonction de plusieurs facteurs environnementaux et agronomiques, tels que la pluviométrie, la texture du sol, la porosité, le pH, et la vulnérabilité au lessivage.

Ce sont les besoins unitaires de chaque plante par m², et "surfaceplante" est la surface cultivée de chaque culture. Cela donne une première approximation des besoins théoriques.

Cependant, dans le cadre d'un modèle réaliste, ces besoins théoriques seront ensuite modulés par des facteurs environnementaux comme la pluviométrie, la texture du sol, etc.

II Intégration de la Pluviométrie et lixivation

La pluviométrie est un facteur clé dans le lessivage des nutriments, en particulier pour l'azote. Un excès de pluie peut entraîner le lessivage des nitrates dans les couches profondes du sol, les rendant indisponibles pour les plantes.

- Relation avec la pluviométrie : En période de forte pluie, une partie des nutriments appliqués, en particulier les formes mobiles comme les nitrates (NO₃⁻), peut être perdue par lessivage. Cela signifie que même si Nmax est correctement calculé pour une culture donnée, l'efficacité de l'utilisation de l'azote sera réduite.

Sous Vensim, vous pouvez modéliser cela en intégrant un facteur de lessivage qui augmente en fonction de la quantité de pluie, diminuant ainsi la disponibilité réelle de N. Par exemple, vous pouvez moduler les flux de sortie d'azote par un facteur Lpluie qui dépend de la pluviométrie :

Où L_{pluie} est une fonction croissante de la pluviométrie. Le lessivage affecte principalement l'azote sous forme de nitrate, mais dans des conditions extrêmes, il peut aussi entraîner la perte d'autres nutriments.

3. Texture du sol

La texture du sol (proportion de sable, limon, et argile) influence la rétention d'eau et des nutriments, et donc la disponibilité des éléments nutritifs pour les plantes. Un sol sableux, par exemple, a une capacité de rétention faible et est plus sujet au lessivage des nutriments.

- Sol sableux : Plus sujet au lessivage. Il retient mal l'eau et les nutriments, donc vous devrez probablement ajuster N_{max} et K_{max} pour tenir compte des pertes potentielles.
- Sol argileux : Meilleure rétention des nutriments, mais peut poser des problèmes de drainage. Les besoins en fertilisation peuvent être réduits car les nutriments restent plus longtemps disponibles dans le sol.

Dans Vensim, vous pourriez introduire une variable liée à la texture du sol, T_{sol} , qui ajuste les coefficients de disponibilité des nutriments. Par exemple, pour un sol sableux, la disponibilité réelle en N serait plus faible :

4. Porosité du sol et pH du sol

La porosité affecte la rétention d'eau et d'air dans le sol. Un sol très poreux laisse passer plus facilement l'eau, ce qui peut entraîner un lessivage rapide des nutriments.

- Relation avec le lessivage : Plus le sol est poreux, plus il est vulnérable au lessivage. Comme pour la texture, la porosité peut être modélisée dans Vensim en influençant la vitesse de perte des nutriments. Vous pouvez définir une relation entre la porosité du sol et les coefficients de lessivage pour ajuster la quantité de nutriments qui reste disponible.

Par exemple, un sol très poreux augmenterait la vitesse de fuite des nutriments en cas de pluie :

$$N_{\text{disponible}} = N_{\text{apporté}} \times (1 - L_{\text{pluie}}) \times \text{porosité}_{\text{sol}}$$

Le pH du sol influence la disponibilité des nutriments, notamment le phosphore. Un pH trop bas (acide) ou trop élevé (alcalin) réduit la disponibilité de certains éléments nutritifs, en particulier le phosphore qui est plus facilement bloqué (ou "fixé") dans des sols acides ou alcalins.

- pH acide (< 6) : Le phosphore a tendance à se lier à l'aluminium et au fer, ce qui réduit sa disponibilité. Il faudra potentiellement augmenter les apports en phosphore.
- pH alcalin (> 7.5) : Le phosphore se lie au calcium et devient moins disponible. Le potassium peut aussi être moins accessible dans ces conditions.

Dans Vensim, vous pouvez ajouter un coefficient d'ajustement basé sur le pH, C_{pH} , qui modifie la disponibilité du phosphore et du potassium :

$$P_{\text{disponible}} = P_{\text{apporté}} \times C_{pH}$$

6. Intégration dans Vensim

En résumé, vous pouvez modéliser ces relations dans Vensim en intégrant des facteurs de correction pour chaque flux de nutriment (N, P, K), basés sur la pluviométrie, la texture du sol, la porosité, et le pH. Les équations générales pour chaque flux sortant pourraient alors ressembler à ceci :

Azote (N)

$$N_{\text{disponible}}(t) = N_{\text{apporté}}(t) \times (1 - L_{\text{pluie}}) \times \text{facteur}_{\text{texture}}(T_{\text{sol}}) \times \text{porosité}_{\text{sol}}$$

Phosphore (P)

$$P_{\text{disponible}}(t) = P_{\text{apporté}}(t) \times C_{pH}$$

Potassium (K)

$$K_{\text{disponible}}(t) = K_{\text{apporté}}(t) \times (1 - L_{\text{pluie}}) \times \text{porosité}_{\text{sol}} \times C_{pH}$$

Conclusion

- les valeurs "max" doivent être ajustés en fonction de la somme des besoins des cultures, mais également des conditions environnementales.
- La pluviométrie influence le lessivage, principalement pour l'azote.
- La texture du sol et la porosité modifient la capacité du sol à retenir les nutriments.
- Le pH affecte particulièrement la disponibilité du phosphore et du potassium.

Ces facteurs peuvent être modélisés sous Vensim via des fonctions ajustant la disponibilité réelle des nutriments en fonction des caractéristiques du sol et des conditions climatiques.

Vous avez raison de souligner l'importance d'équilibrer le stock de N , P , et K dans le sol et de maintenir un équilibre entre les flux entrants et flux sortants . Si les flux entrants sont inopérants ou mal équilibrés, le modèle pourrait rapidement dériver, menant à un épuisement ou à une accumulation excessive de nutriments, ce qui est non optimal pour les cultures.

Je vais clarifier comment modéliser cet équilibre dans Vensim et m'assurer que les flux entrants sont bien actifs et équilibrés avec les flux sortants pour un stock de NPK stable dans le sol.

1. Contexte : l'équilibre NPK dans le sol

L'objectif est de maintenir une balance entre :

- Les flux entrants de nutriments (engrais organiques tels que urine, cendres, poudre d'os, etc.).
- Les flux sortants qui représentent l'absorption des nutriments par les plantes, les pertes par lessivage, volatilisation, et autres processus.

L'équilibre doit se traduire par :

$$\text{Stock de NPK dans le sol} = \text{Flux entrants} - \text{Flux sortants}$$

Sur une période donnée (généralement un cycle de culture), les flux entrants doivent être à peu près égaux aux flux sortants pour maintenir un stock stable dans le sol. Si les flux entrants sont trop faibles, les plantes risquent de manquer de nutriments, et si les flux entrants sont trop élevés, des excès de nutriments peuvent causer des déséquilibres et affecter la croissance.

2. Modélisation des flux entrants dans Vensim

Les flux entrants peuvent provenir de diverses sources, comme les apports d'urine, de cendres, de poudre d'os ou de phosphate de roche. Ces apports doivent être modélisés comme des flux entrants dans le modèle pour chacun des nutriments (N,P et K).

a. Flux entrants d'azote (N)

Par exemple, pour modéliser les apports en azote via l'urine :

$$\text{Flux entrant d'azote} = N_{\text{urine}} \times \text{quantité d'urine}$$

Cette équation doit être intégrée dans Vensim comme un flux entrant dans le stock d'azote dans le sol.

b. Flux entrants de phosphore (P)

Pour les apports en phosphore à partir de la poudre d'os ou de phosphate de roche :

Où :

- P source est la concentration de phosphore dans la source appliquée.
- "quantité appliquée" est la masse de la source ajoutée au sol.

Sous Vensim, cela sera défini comme un flux entrant dans le stock de phosphore.

c. Flux entrants de potassium (K)

Pour les apports de potassium à partir des cendres :

Où :

- Kcendres est la concentration de potassium dans les cendres.
- {quantité de cendres} est la masse de cendres ajoutée.

Cela sera aussi défini comme un flux entrant dans le stock de potassium.

3. Modélisation de l'équilibre dans Vensim

Dans Vensim, chaque stock de N, P, et K devrait être lié à :

- Un flux entrant provenant des engrais organiques (urine, cendres, etc.).
- Un flux sortant correspondant à l'absorption par les plantes, les pertes par lessivage, volatilisation, etc.

Pour garantir un équilibre, il faut veiller à ce que la somme des flux entrants compense les pertes dues à l'absorption par les plantes et autres pertes naturelles.

a. Stock d'azote dans le sol

L'équation pour le stock d'azote dans le sol serait la suivante :

Dans Vensim :

- Le flux entrant d'azote est calculé à partir de l'apport en urine ou autres sources organiques.
- Le flux sortant d'azote inclut :
 - L'absorption par les plantes, modélisée par une fonction sigmoïde (voir plus haut).
 - Les pertes par lessivage, volatilisation, etc., modulées par des facteurs comme la pluviométrie, la texture et la porosité du sol.

b. Stock de phosphore dans le sol

L'équation pour le stock de phosphore dans le sol est similaire :

- Le flux entrant de phosphore est basé sur les apports de poudre d'os ou de phosphate de roche.
- Le flux sortant de phosphore est lié à l'absorption par les plantes et aux pertes liées au pH du sol.

c. Stock de potassium dans le sol

De manière identique, le stock de potassium est modélisé ainsi :

Les flux entrants sont basés sur les apports de cendres, et les flux sortants sur l'absorption par les plantes et le lessivage.

4. Équilibrer les flux entrants et sortants

Pour que les flux entrants équilibrent les flux sortants, vous devez ajuster la quantité d'engrais apportée en fonction des besoins réels des plantes, qui varient au cours du temps. Voici quelques étapes à suivre pour équilibrer les flux dans Vensim :

a. Adapter les apports en fonction des besoins

Les apports en nutriments doivent être ajustés en fonction des besoins des cultures. Par exemple, pour l'azote, la quantité d'urine appliquée doit correspondre aux besoins en azote de la culture, moins les pertes par lessivage et autres processus. Cela pourrait être modélisé sous forme d'une boucle de rétroaction.

b. Modéliser l'ajustement dynamique des apports

Dans Vensim, vous pouvez modéliser une rétroaction négative qui ajuste les flux entrants en fonction des niveaux de stock dans le sol. Par exemple, si le stock d'azote devient trop faible par rapport aux besoins des plantes, la quantité d'urine appliquée (flux entrant) pourrait être augmentée. Inversement, si le stock est trop élevé, les apports pourraient être réduits.

c. Suivi des niveaux de stock au fil du temps

Grâce à la simulation, vous pourrez observer comment les stocks de N, P, et K évoluent au cours du temps. Si les niveaux chutent trop, vous devrez augmenter les flux entrants, et si les stocks s'accumulent trop, il faudra diminuer les apports pour éviter une saturation du sol.

Conclusion

L'objectif est de maintenir un équilibre entre les flux entrants (apports d'engrais) et les flux sortants (absorption par les plantes, pertes par lessivage, etc.). Pour cela :

- Il faut modéliser correctement les flux entrants pour chaque nutriment en fonction des apports d'urine, de cendres, de poudre d'os, etc.
- Les flux entrants doivent être ajustés dynamiquement pour correspondre aux besoins des plantes tout en tenant compte des pertes environnementales (lessivage, volatilisation, etc.).
- Les stocks de N, P, et K dans le sol doivent être surveillés et stabilisés à un niveau optimal via une rétroaction négative sur les apports.

Avec ces ajustements, vous pourrez obtenir un modèle où les flux entrants et sortants sont bien équilibrés et fonctionnels dans Vensim.

D'après les équations que vous avez partagées, il semble que certaines des valeurs ou des équations ne soient pas bien ajustées, ce qui pourrait expliquer les résultats non réalistes. Nous allons analyser les points critiques du modèle pour ajuster les équations afin de rendre le modèle plus cohérent.

1. Analyse des Apports

- $\text{Apport N} = (\text{Urine} \times \text{Nurine}) \times \left(1 + \frac{\text{Ncrit} - \text{Nsol}}{\text{Ncrit}}\right)$
- $\text{Apports K} = (\text{Urine} \times \text{Kurine} + \text{Cendres} \times \text{Kcendre} + \text{Kpoudre} \times \text{Poudre}) \times \left(1 + \frac{\text{Kcrit} - \text{Ksol}}{\text{Kcrit}}\right)$
- $\text{Apports P} = (\text{Purine} \times \text{Urine} + \text{Cendres} \times \text{Pcendre} + \text{Ppoudre} \times \text{Poudre}) \times \left(1 + \frac{\text{Pcrit} - \text{Psol}}{\text{Pcrit}}\right)$

Cependant, si les valeurs des critères critiques (Ncrit), (Pcrit), (Kcrit)) et des stocks initiaux (Nsol), (Psol), (Ksol)) sont très éloignées des besoins, cela pourrait entraîner des apports disproportionnés. Une solution est de limiter l'amplitude de la fonction de rétroaction pour éviter des apports trop élevés.

2. Revoir les stocks initiaux et critiques

Les valeurs critiques (Ncrit), (Pcrit), (Kcrit)) définissent à quel moment les apports doivent être ajustés. Si ces seuils sont très bas par rapport aux besoins des plantes, la rétroaction

pourrait générer des apports démesurés. Il serait utile de fixer des valeurs réalistes pour ces critères.

Proposition d'ajustement :

- Réduire l'écart entre N_{crit} , P_{crit} , K_{crit} et les stocks initiaux.
- Limiter la rétroaction pour ne pas dépasser un facteur multiplicatif raisonnable (par exemple, limiter le terme à une plage raisonnable (par exemple, 0 à 2)).

$$\left(1 + \frac{N_{crit} - N_{sol}}{N_{crit}}\right)$$

3. Correction de l'utilisation des nutriments

Les équations des flux sortants représentent la consommation des plantes en fonction du temps. Elles suivent une courbe sigmoïde, ce qui est cohérent pour représenter les besoins croissants et décroissants des plantes au fil de leur développement.

- Utilisation N : $Utilisation\ N = \frac{N_{max}}{1 + \exp(-kN \times (\text{Time} - t0N))}$
- Utilisation P : $Utilisation\ P = \frac{P_{max}}{1 + \exp(-KP \times (\text{Time} - t0P))}$
- Utilisation K : $Utilisation\ K = \frac{K_{max}}{1 + \exp(-KK \times (\text{Time} - t0K))}$

Les paramètres KN , KP , KK doivent être ajustés avec soin pour correspondre aux cycles de croissance réels des plantes.

Proposition :

- Ajuster $t0N$, $t0P$, $t0K$ pour correspondre aux phases critiques de développement des plantes.
- Ajuster kN , KP , KK pour que la sigmoïde atteigne le pic au moment de la demande maximale en nutriments, correspondant à la période de croissance maximale de la plante.

4. Vérification des unités

Certaines variables n'ont pas d'unités définies (par exemple, $\backslash(N_{crit}\backslash)$, $\backslash(P_{crit}\backslash)$, $\backslash(K_{crit}\backslash)$). Il est important de vérifier que les unités de toutes les variables sont cohérentes dans les équations pour éviter des incohérences dans les calculs. Assurez-vous que tous les flux et stocks sont exprimés en $\backslash(g/m^2)\backslash$.

5. Réglage de la rétroaction

Actuellement, la rétroaction est basée sur une proportionnalité directe avec le stock dans le sol. Si cette relation est trop agressive, elle peut produire des apports massifs. Une solution consiste à limiter la fonction de rétroaction, par exemple :

$$f(N_{sol}) = 1 + \frac{N_{crit} - N_{sol}}{N_{crit}} \quad \text{limité entre 0 et 2}$$

Cela signifie que les apports ne peuvent jamais être moins que 100 % ni plus que 200 % des apports de base.

6. Modélisation du lessivage et des pertes

Pour rendre le modèle encore plus réaliste, nous intégrons les pertes dues au lessivage en fonction de la pluviométrie, de la texture du sol, et du pH. Cela permettra de modéliser la disparition des nutriments non seulement par absorption des plantes, mais aussi par des mécanismes de perte naturelle.

- Ajoutez un terme de flux sortant supplémentaire représentant le lessivage pour chaque nutriment :

- Lessivage N = facteur pluviométrie \times Nsol \times porosité du sol
- Lessivage P = facteur pluviométrie \times Psol \times porosité du sol
- Lessivage K = facteur pluviométrie \times Ksol \times porosité du sol

Conclusion intermédiaire

- Apports : Ajuster les valeurs critiques pour modérer les apports et limiter la rétroaction.
- Stocks initiaux : Ajuster les stocks initiaux pour correspondre aux réalités des sols.
- Utilisation des plantes : Ajuster les sigmoïdes pour correspondre aux besoins réels des plantes.
- Pertes : Intégrer les pertes par lessivage.

En suivant ces ajustements, notre modèle devrait devenir plus cohérent et donner des résultats plus réalistes pour la gestion des apports en N, P, K.

Les valeurs négatives dans un modèle de dynamique des nutriments du sol, comme les concentrations en (N), (P), ou (K), ne sont pas réalistes et indiquent un problème dans les équations ou dans la gestion des flux entrants et sortants. Voici quelques points pour diagnostiquer et corriger ce problème dans notre modèle :

1. Accumulation et Flux Incohérents

Les valeurs négatives dans les stocks de nutriments comme (Nsol), (Psol), et (Ksol) peuvent provenir d'un déséquilibre entre les flux entrants (apports) et flux sortants (utilisation, lessivage).

Vérification des équations d'intégration :

Les équations pour les stocks sont des intégrales cumulatives des flux :

- $N_{sol} = \int (\text{Apport N} - \text{Utilisation N})$
- $P_{sol} = \int (\text{Apports P} - \text{Utilisation P})$
- $K_{sol} = \int (\text{Apports K} - \text{Utilisation K})$

Si à un moment donné les flux sortants (utilisation des plantes, lessivage) sont supérieurs aux flux entrants (apports), les stocks peuvent devenir négatifs.

Solutions :

1. Limiter les flux sortants : Introduire une condition qui empêche les flux sortants d'être plus élevés que le stock de nutriments dans le sol.

- Par exemple, pour l'utilisation de N :

$$\text{Utilisation N} = \min \left(\frac{N_{max}}{1 + \exp(-kN \times (\text{Time} - t_{0N}))}, N_{sol} \right)$$

Cela garantit que la quantité de nutriments prélevée par les plantes ne dépasse jamais la quantité disponible dans le sol.

2. Empêcher les valeurs négatives dans les stocks :

- Assurez-vous que les stocks N_{sol} , P_{sol} , et K_{sol} ne descendent jamais en dessous de zéro :

$$N_{sol} = \max(0, \text{INTEG}(\text{Apport N} - \text{Utilisation N}))$$

Cette approche permet d'éviter des valeurs négatives, en bloquant le stock à zéro si les prélèvements sont supérieurs aux apports.

2. Apports Inadéquats ou Mal Calibrés

Les apports en nutriments (Apport N), (Apports P), (Apports K) doivent être réalistes et calibrés pour compenser les flux sortants. Si les apports sont trop faibles par rapport aux besoins des plantes ou aux pertes naturelles (par exemple, le lessivage), les stocks peuvent diminuer trop rapidement.

Solutions :

- Vérifier les valeurs d'apports en fonction de la culture et du sol.

- Ajuster les rétroactions qui régulent les apports en fonction du stock actuel dans le sol.

3. Gestion des Pertes Naturelles (Lessivage)

Le lessivage peut entraîner une diminution rapide des nutriments dans le sol, surtout en cas de forte pluviométrie ou de sols très poreux. Si ce processus n'est pas bien calibré, il peut épuiser rapidement les stocks de nutriments et conduire à des valeurs négatives.

Solutions :

- Modéliser les pertes par lessivage de manière plus réaliste, en limitant ces pertes en fonction des caractéristiques du sol (texture, porosité) et des apports pluviométriques.

- Ajouter une limite supérieure aux pertes pour éviter des flux excessifs.

4. Initialisation des Stocks

Si les valeurs initiales des stocks dans le sol (N_{sol}), (P_{sol}), (K_{sol}) sont trop basses, le modèle peut rapidement conduire à des valeurs négatives. Assurez-vous que les stocks initiaux sont suffisamment élevés pour soutenir la croissance des plantes pendant un certain temps, surtout si les flux entrants sont retardés.

5. Vérification des Unités et des Paramètres

Des erreurs dans les unités ou une mauvaise calibration des paramètres peuvent provoquer des écarts non souhaités. Par exemple, si les apports sont sous-estimés en raison d'unités incorrectes, le modèle pourrait consommer plus de nutriments qu'il n'en reçoit.

Solutions :

- Vérifier que toutes les unités sont cohérentes dans vos équations.
- Ajuster les paramètres tels que N_{crit} , P_{crit} , et K_{crit} pour correspondre aux besoins réels des cultures.

Exemple de Réajustement des Équations

$$N_{sol} = \max \left(0, \int (\text{Apport N} - \text{Utilisation N}) \right)$$

De même pour les autres stocks (P_{sol}) et (K_{sol}), en ajustant les équations pour ne pas descendre en dessous de zéro.

Conclusion

Les valeurs négatives dans le sol indiquent un déséquilibre entre les apports et les sorties. En ajustant les flux, en modélisant correctement les pertes et en évitant les rétroactions excessives, vous pouvez stabiliser les concentrations de nutriments et éviter ces anomalies.

Stock d'azote N_{sol} :

$$N_{sol}(t) = N_{sol}(t - 1) + \text{Flux entrant N} - \text{Flux sortant N}$$

Stock de phosphore P_{sol} :

$$P_{sol}(t) = P_{sol}(t - 1) + \text{Flux entrant P} - \text{Flux sortant P}$$

Stock de potassium K_{sol} :

$$K_{sol}(t) = K_{sol}(t - 1) + \text{Flux entrant K} - \text{Flux sortant K}$$

Pour intégrer une rétroaction du stock de nutriments dans le sol vers les flux entrants dans Vensim afin de compenser les pertes, nous devons modéliser un système de régulation qui ajuste dynamiquement les apports en nutriments en fonction des besoins réels du sol.

L'idée est que lorsque le stock d'un nutriment spécifique N, P, ou K diminue en dessous d'un seuil critique, le système ajuste les apports pour compenser les pertes dues à l'absorption des plantes, au lessivage, à la volatilisation, etc.

Voici les étapes pour modéliser cette rétroaction dans Vensim.

1. Définir les stocks (levels) de nutriments

Dans Vensim, chaque nutriment dans le sol (N, P, et K) sera représenté par un stock ou un level. Ce stock représente la quantité de chaque nutriment disponible dans le sol à un moment donné.

Ces équations représentent l'évolution des stocks en fonction du temps (t) , où chaque stock évolue selon la différence entre les flux entrants (les apports d'engrais) et les flux sortants (l'absorption par les plantes et les pertes).

2. Définir les flux entrants:

Flux entrant d'azote $F_{N \text{ in}}$:

$$F_{N \text{ in}}(t) = f(N_{\text{sol}}(t), N_{\text{critique}}, N_{\text{maximum}})$$

Flux entrant de phosphore $F_{P \text{ in}}$:

$$F_{P \text{ in}}(t) = f(P_{\text{sol}}(t), P_{\text{critique}}, P_{\text{maximum}})$$

Flux entrant de potassium $F_{K \text{ in}}$:

$$F_{K \text{ in}}(t) = f(K_{\text{sol}}(t), K_{\text{critique}}, K_{\text{maximum}})$$

La fonction $f()$ est une fonction de rétroaction basée sur les niveaux de stock des nutriments. Elle peut être une fonction linéaire ou une fonction non linéaire (comme une sigmoïde) qui ajuste les apports en fonction du stock.

3. Forme de la rétroaction

La fonction de rétroaction peut prendre différentes formes, mais un modèle simple est une rétroaction proportionnelle :

$$f(N_{\text{sol}}(t), N_{\text{critique}}, N_{\text{maximum}}) = F_{N \text{ base}} \times \left(1 + \frac{N_{\text{critique}} - N_{\text{sol}}(t)}{N_{\text{critique}}} \right)$$

- N_{critique} est le niveau minimal de stock d'azote que vous souhaitez maintenir dans le sol.
- $F_{N \text{ base}}$ est le flux de base d'azote (l'apport standard).
- Si $N_{\text{sol}}(t)$ est inférieur à N_{critique} , la fonction augmente le flux entrant pour compenser la baisse.
- Si $N_{\text{sol}}(t)$ est supérieur à N_{critique} , la fonction réduit les apports pour éviter un excès.

Nous pouvons utiliser une fonction similaire pour (P) et (K).

4. Modélisation du flux sortant

Le flux sortant inclut l'absorption par les plantes et les pertes par lessivage, volatilisation, etc.

$$F_{N\text{ out}}(t) = \text{Absorption des plantes } N(t) + \text{Lessivage } N(t)$$

Le flux sortant peut être modélisé comme une fonction du temps pour représenter les besoins variables des plantes et les conditions environnementales (pluviométrie, porosité du sol).

5. Boucle de rétroaction dans Vensim

La boucle de rétroaction est le mécanisme par lequel le stock de nutriments dans le sol influence les flux entrants. Si le stock de (N_{sol}), (P_{sol}), ou (K_{sol}) descend en dessous d'un certain seuil (disons (N_{critique})), cela déclenche une augmentation des apports en engrais pour compenser.

Voici un exemple de boucle de rétroaction pour l'azote :

1. Stock d'azote N_{sol} influence le flux entrant $F_{N\text{ in}}$:

- Si N_{sol} est faible, $F_{N\text{ in}}$ augmente.
- Si N_{sol} est élevé, $F_{N\text{ in}}$ diminue.

2. Stock d'azote N_{sol} est influencé par $F_{N\text{ in}}$ et $F_{N\text{ out}}$:

- $N_{\text{sol}} = N_{\text{sol}}(t - 1) + F_{N\text{ in}} - F_{N\text{ out}}$.

Dans Vensim, cela se modélise comme une boucle de rétroaction négative où le level du stock affecte les flux entrants, qui eux-mêmes influencent le stock.

6. Simulation dans Vensim

Pour simuler cette rétroaction dans Vensim :

- Créer un stock pour chaque nutriment N, P, K.
- Ajouter les flux entrants qui sont ajustés dynamiquement en fonction du niveau du stock.
- Ajouter les flux sortants représentant l'absorption et les pertes.
- Connecter les flux entrants aux stocks pour créer une boucle de rétroaction.

les stocks se stabilisent au fil du temps grâce à l'ajustement automatique des apports en fonction des besoins des plantes et des conditions environnementales.

7. Critique et Analyse des Apports

Les apports en NNN, PPP et KKK sont ajustés par une fonction de rétroaction proportionnelle :

- Apport N = (Urine × Nurine) × $(1 + \frac{N_{crit} - N_{sol}}{N_{crit}})$
- Apports K = (Urine × Kurine + Cendres × Kcendre + Kpoudre × Poudre) × $(1 + \frac{K_{crit} - K_{sol}}{K_{crit}})$
- Apports P = (Purine × Urine + Cendres × Pcendre + Ppoudre × Poudre) × $(1 + \frac{P_{crit} - P_{sol}}{P_{crit}})$

Cependant, si les valeurs des critères critiques (N_{crit} , P_{crit} , K_{crit}) et des stocks initiaux (N_{sol} , P_{sol} , K_{sol}) sont très éloignées des besoins, cela pourrait entraîner des apports disproportionnés. Une solution est de limiter l'amplitude de la fonction de rétroaction pour éviter des apports trop élevés.

Revoir les stocks initiaux: Les valeurs critiques (N_{crit} , P_{crit} , K_{crit}) définissent à quel moment les apports doivent être ajustés. Si ces seuils sont très bas par rapport aux besoins des plantes, la rétroaction pourrait générer des apports démesurés. Il serait utile de fixer des valeurs réalistes pour ces critères.

Proposition d'ajustement :

- Réduire l'écart entre N_{crit} , P_{crit} , K_{crit} et les stocks initiaux.

$$(1 + \frac{N_{crit} - N_{sol}}{N_{crit}})$$

- Limiter la rétroaction pour ne pas dépasser un facteur multiplicatif raisonnable (par exemple, limiter le terme à une plage raisonnable (par exemple, 0 à 2)).

Correction de l'utilisation des nutriments: Les équations des flux sortants représentent la consommation des plantes en fonction du temps. Elles suivent une courbe sigmoïde, ce qui est cohérent pour représenter les besoins croissants et décroissants des plantes au fil de leur développement.

- Utilisation N : $Utilisation\ N = \frac{N_{max}}{1 + \exp(-k_N \times (Time - t_{0N}))}$
- Utilisation P : $Utilisation\ P = \frac{P_{max}}{1 + \exp(-K_P \times (Time - t_{0P}))}$
- Utilisation K : $Utilisation\ K = \frac{K_{max}}{1 + \exp(-K_K \times (Time - t_{0K}))}$

Les paramètres k_N , K_P , K_K doivent être ajustés avec soin pour correspondre aux cycles de croissance réels des plantes.

Proposition :

- Ajuster t_{0N} , t_{0P} , t_{0K} pour correspondre aux phases critiques de développement des plantes.
- Ajuster k_N , K_P , K_K pour que la sigmoïde atteigne le pic au moment de la demande maximale en nutriments, correspondant à la période de croissance maximale de la

plante.

Si à un moment donné les flux sortants (utilisation des plantes, lessivage) sont **supérieurs** aux flux entrants (apports), les stocks peuvent devenir négatifs.

Solutions :

a Limiter les flux sortants : Introduire une condition qui empêche les flux sortants d'être plus élevés que le stock de nutriments dans le sol.

• Par exemple, pour Utilisation N Utilisation N :
$$\text{Utilisation N} = \min\left(\frac{N_{max}}{1 + \exp(-kN \times (\text{Time} - t_{0N}))}, N_{sol}\right)$$

$$\text{Utilisation N} = \min(1 + \exp(-kN \times (\text{Time} - t_{0N}))N_{max}, N_{sol})$$

Cela garantit que la quantité de nutriments prélevée par les plantes ne dépasse jamais la quantité disponible dans le sol.

b Empêcher les valeurs négatives dans les stocks :

- Assurez-vous que les stocks N_{sol} , P_{sol} , et K_{sol} ne descendent jamais en dessous de zéro :

$$\text{Utilisation N} = \min\left(\frac{N_{max}}{1 + \exp(-kN \times (\text{Time} - t_{0N}))}, N_{sol}\right)$$

Cette approche permet d'éviter des valeurs négatives, en bloquant le stock à zéro si les prélèvements sont supérieurs aux apports.

$$N_{sol} = \max(0, \text{INTEG}(\text{Apport N} - \text{Utilisation N}))$$

Voici un exemple de modification pour éviter des valeurs négatives dans le stock d'azote N_{sol} :

- Avant :

$$N_{sol} = \int (\text{Apport N} - \text{Utilisation N})$$

- Après :

$$N_{sol} = \max\left(0, \int (\text{Apport N} - \text{Utilisation N})\right)$$

Équation pour les stocks de nutriments (exemple avec N_{sol})

Si l'on veut que le stock N_{sol} ne descende jamais en dessous de zéro, nous utilisons la syntaxe suivante :

- $\text{INTEG}(\text{Apport N} - \text{Utilisation N}, \text{Nsol_initial})$: Cela représente l'intégration des flux entrants et sortants avec une condition initiale (Nsol_initial).
- $\text{MAX}(0, \dots)$: Assure que la valeur ne descend jamais en dessous de zéro.

Exemple complet pour l'azote Nsol :

$$\text{Nsol} = \text{MAX}(0, \text{INTEG}(\text{Apport N} - \text{Utilisation N}, \text{Nsol_initial}))$$

$$\text{Utilisation N} = \text{MIN}(\text{Nsol}, \text{Nmax} / (1 + \text{EXP}(-kN * (\text{TIME} - t0N))))$$

Conclusion

Avec une rétroaction dynamique, vous pouvez modéliser un système équilibré où les apports de N, P, et K sont ajustés automatiquement en fonction des besoins du sol. Cette rétroaction vous permet de maintenir un stock stable de nutriments, garantissant une fertilisation adéquate sans accumulation excessive ou épuisement des nutriments.

III Les apports de matières organiques

1 Diversité des apports:

Les apports d'azote via la matière organique comme les BRF (Bois Raméal Fragmenté) ou la paille dépendent de plusieurs facteurs, dont la composition de la matière organique, le type de sol, et les conditions climatiques qui influencent la minéralisation.

Apports d'azote par type de matière organique :

1. Bois Raméal Fragmenté (BRF) :

- Le BRF a un faible rapport C/N (carbone/azote) d'environ **30-80**, ce qui signifie qu'il est riche en carbone par rapport à l'azote.
- Pour chaque kg de BRF, il peut apporter entre **0,5 et 1 g d'azote/m²**. Cependant, l'azote est principalement immobilisé au début du processus de décomposition, car les micro-organismes l'utilisent pour décomposer le carbone contenu dans le BRF.
- **Délai de minéralisation** : 1 à 2 ans avant que l'azote ne soit disponible pour les plantes, le BRF étant un matériau très lignifié.

2. Paille :

- La paille de céréales a un rapport C/N de **50 à 100**, ce qui est également relativement élevé. Elle apporte environ **0,5 à 2 g d'azote/m²/kg** de paille.
- **Délai de minéralisation** : La paille se décompose plus rapidement que le BRF, avec un délai de minéralisation variant entre **6 et 12 mois**, selon les conditions (température, humidité, aération du sol).

Facteurs influençant la minéralisation :

- **Climat** : Un climat chaud et humide favorise une décomposition plus rapide et donc

une minéralisation plus rapide.

- **Type de sol** : Un sol riche en matière organique et bien aéré accélère la minéralisation. Dans un sol argileux et mal drainé, la décomposition est plus lente.
- **Rapport C/N** : Plus le rapport est élevé, plus la minéralisation sera lente, car les micro-organismes consomment d'abord l'azote pour décomposer le carbone.

Stratégie pour optimiser l'apport d'azote :

- Combiner des matières à faible rapport C/N (comme le compost ou le fumier) avec des matières à haut rapport C/N (paille ou BRF) pour éviter une carence temporaire en azote, qui pourrait pénaliser les cultures.

Cela permet de fournir un apport progressif d'azote tout au long du cycle de culture, en fonction de la décomposition de la matière organique et des besoins des plantes.

2 Intégration dans Vensim

Pour intégrer les apports de matière organique (BRF, paille) et leurs délais de minéralisation dans Vensim, il est possible d'utiliser des "levels" et des "delays" . Une approche suggérée :

a. Modélisation des Apports de Matière Organique (MO)

Les apports d'azote via la matière organique doivent être représentés par une variable qui tient compte de la quantité de BRF ou de paille ajoutée au sol.

- Apport MO (kg/m²) : Cette variable représente la quantité de matière organique appliquée sur la surface du sol. Vous pouvez l'ajuster en fonction des apports annuels en BRF ou paille.

b. Modélisation de la Minéralisation (Délai de Libération d'Azote)

La minéralisation des matières organiques prend du temps, en fonction de leur rapport C/N. Vensim permet de simuler cela avec un retard à la minéralisation à l'aide de la fonction `DELAY`.

- Minéralisation d'Azote : Utilisez un flux pour simuler la libération progressive de l'azote dans le sol, en fonction du délai de minéralisation.

Exemples d'équations dans Vensim :

Apport_Azote_MO = DELAY(Apport_MO * Contenu_N_Azote, Temps_Minéralisation)

- `Apport_MO` est la quantité de matière organique apportée.

- `Contenu_N_Azote` est le pourcentage d'azote dans la matière organique (ex. 0,001 pour 1 g d'azote/kg de BRF).

- `Temps_Minéralisation` est le délai de minéralisation, par exemple 1-2 ans pour le BRF, 6-12 mois pour la paille.

c. Utilisation de LOOKUP pour les Différents Matériaux

Les délais et les taux de minéralisation varient en fonction du matériau (paille, BRF, etc.).

Utiliser des tables LOOKUP pour ajuster les délais de minéralisation :

$\text{Temps_Minéralisation} = \text{LOOKUP}(\text{Material_Type}, [(\text{BRF}, 365), (\text{Paille}, 180)])$

Cette approche permet d'adapter les délais de minéralisation à différents types de matières organiques.

d. Intégration avec le Stock d'Azote dans le Sol

Le flux de minéralisation contribue à l'enrichissement du stock d'azote dans le sol :

$\text{N_sol} = \text{INTEG}(\text{Apport_Azote_MO} + \text{Apport_N_Urine} - \text{Utilisation_N}, \text{N_sol_initial})$

- `Apport_Azote_MO` est l'azote libéré de la matière organique.
- `Apport_N_Urine` représente l'azote apporté par l'urine ou d'autres engrais.
- `Utilisation_N` est la consommation d'azote par les cultures.

e. Simulation sur la Durée d'un Cycle de Culture

En fonction de la durée du cycle de culture et des apports réguliers de matière organique, le modèle doit prévoir l'évolution des stocks de NPK au fil du temps. Nous ajustons les apports pour les cycles annuels ou saisonniers en fonction de l'intensité des apports de MO.

Ces étapes permettent de prendre en compte les délais de minéralisation des différents types de matière organique dans le temps, en simulant l'effet sur les flux d'azote et les besoins des cultures.

Tu as raison, `DELAY` n'est pas une fonction standard dans Vensim. Pour intégrer un délai de minéralisation dans ce modèle, il faut utiliser une combinaison de stocks (ou levels) et de flux pour simuler le processus de minéralisation progressive des matières organiques.

3 Modélisations sous Vensim

a. Modéliser l'Apport de Matière Organique (MO)

La matière organique est ajoutée au sol, mais sa minéralisation prend du temps avant que l'azote ne soit disponible pour les plantes.

- Apport MO (kg/m²) : Cette variable représente l'apport initial de matière organique (BRF ou paille).

b. Création d'un Stock pour la Matière Organique

Créer un stock représentant la matière organique non minéralisée dans le sol, qui va diminuer avec le temps à mesure qu'elle se décompose.

Exemple : $\text{MO_non_minéral} = \text{INTEG}(\text{Apport_MO} - \text{Flux_de_minéralisation}, \text{MO_initial})$

- `Apport_MO` est la quantité de matière organique appliquée chaque année (ou selon la fréquence choisie).
- `Flux_de_minéralisation` représente le flux de matière organique minéralisée chaque jour ou mois.

c. Flux de Minéralisation

Le flux de minéralisation dépend du type de matière organique (BRF, paille) et de son délai de décomposition. Nous modélisons cela comme un pourcentage de la matière organique non minéralisée qui se décompose chaque jour, avec un taux de minéralisation ajusté par un coefficient.

Exemple :

$$\text{Flux_de_minéralisation} = \text{MO_non_minéral} * \text{Taux_minéralisation}$$

Où :

- `Taux_minéralisation` est une fraction de la matière organique qui se décompose par unité de temps. Par exemple, pour un BRF, tu pourrais avoir un taux de 0,001 par jour (soit 1% de la matière organique qui se décompose tous les 10 jours).
- Pour la paille, ce taux pourrait être plus élevé (0,005, par exemple, selon une décomposition plus rapide).

d. Azote Libéré via la Minéralisation

Une fois la matière organique minéralisée, l'azote devient disponible dans le sol. Le flux d'azote libéré par la décomposition peut être représenté par :

$$\text{Azote_libéré} = \text{Flux_de_minéralisation} * \text{Pourcentage_Azote}$$

Où :

- `Pourcentage_Azote` est la teneur en azote de la matière organique (par exemple, 0,5 à 1 g d'azote par kg de BRF, ou 0,5 à 2 g d'azote par kg de paille).

e. Stock d'Azote dans le Sol

L'azote minéralisé alimente le stock d'azote dans le sol, qui peut ensuite être utilisé par les plantes.

Exemple :

$$\text{N_sol} = \text{INTEG}(\text{Azote_libéré} - \text{Utilisation_N}, \text{N_initial})$$

e. Lookup pour Différents Types de MO

Pour moduler les taux de minéralisation en fonction du type de matière organique (BRF, paille), on utilise un tableau de conversion avec une fonction lookup dans Vensim.

Exemple de table Lookup :

$$\text{Taux_minéralisation} = \text{LOOKUP}(\text{Material_Type}, [(BRF, 0.001), (Paille, 0.005)])$$

Cela permet de modéliser des processus de décomposition distincts pour chaque type de matière organique.

Cette approche permet de simuler le processus de minéralisation avec des délais ajustés pour chaque type de matière organique. Le flux d'azote libéré s'accumule dans le sol et alimente les besoins des cultures, tandis que la matière organique se décompose progressivement au fil du temps.

La fonction `DELAY FIXED` de Vensim peut être très utile pour modéliser la minéralisation

des matières organiques (MO) avec un délai fixe. Elle permet de retarder l'effet d'un flux sur un niveau (stock) pendant un certain temps, ce qui est idéal pour simuler le temps de décomposition nécessaire avant que l'azote (ou d'autres nutriments) ne devienne disponible pour les plantes.

Comment utiliser `DELAY FIXED` dans ce contexte :

4 Simulations sous Vensim

a. Définition de la fonction :

La fonction `DELAY FIXED` s'écrit sous la forme suivante :

...

DELAY FIXED(input, delay time, initial value)

...

- `input` : Le flux qui entre dans le système, comme les apports de matière organique.
- `delay time` : Le temps de retard, qui peut être défini en fonction de la durée de minéralisation pour chaque type de matière organique.
- `initial value` : La valeur initiale avant que le délai ne soit écoulé.

b. Application pour la minéralisation de la matière organique :

Si tu veux modéliser la minéralisation de la matière organique avec un délai avant que l'azote soit disponible pour les plantes, tu peux utiliser la fonction `DELAY FIXED` pour simuler ce délai.

Exemple :

Azote_libéré = DELAY FIXED(Flux_de_minéralisation, Temps_Minéralisation, 0)

- `Flux_de_minéralisation` représente l'apport initial de matière organique.
- `Temps_Minéralisation` est la durée (par exemple, 180 jours pour la paille ou 365 jours pour le BRF).
- `0` signifie que tant que le délai n'est pas écoulé, l'apport d'azote dans le sol est nul.

c. Flux de Minéralisation :

Le flux de minéralisation peut être représenté comme une proportion de la matière organique restante dans le sol. Cela se combine avec le délai fixé pour modéliser la libération progressive de l'azote :

Flux_de_minéralisation = MO_non_minéralisée * Taux_minéralisation

4. Avantages de `DELAY FIXED` :

- Elle permet de fixer un délai strict avant que l'azote soit libéré dans le sol.
- Elle est adaptée aux scénarios où l'on sait que la libération d'azote est retardée de manière régulière (comme pour la minéralisation progressive des matières organiques).

Exemple complet dans Vensim :

pour modéliser l'apport de BRF (qui met environ 1 an à se décomposer et libérer de l'azote), nous pourrions écrire quelque chose comme :

Apport_MO = 10 ; (10 kg/m² de BRF ajouté)

Taux_minéralisation = 0.001 ; (0.1% de décomposition par jour)

Azote_libéré = DELAY FIXED(Apport_MO * Taux_minéralisation, 365, 0)

...

Cela signifie que le flux d'azote libéré par la décomposition commence après 365 jours et est basé sur le taux de minéralisation appliqué.

Résumé : `DELAY FIXED` est une fonction très adaptée pour simuler des délais fixes dans la libération de nutriments, notamment pour des processus comme la minéralisation de matières organiques. Elle permet d'introduire des délais réalistes dans le modèle pour mieux simuler la dynamique de la décomposition et de l'apport en azote dans le sol.

5 Actions complémentaires

Pour intégrer correctement les apports d'azote organique, tels que le BRF (bois raméal fragmenté) et la paille, dans ton modèle Vensim, voici quelques suggestions en se basant sur la synthèse de ces équations :

1. Utilisation de la fonction `DELAY FIXED` :

Pour utiliser correctement la fonction `DELAY FIXED` et modéliser le délai de minéralisation des matières organiques. Cela permet de simuler la libération progressive de l'azote au fil du temps. Par exemple :

$$\begin{aligned} \text{apport BRF} &= \text{DELAY FIXED}(\text{BRF} * \text{Taux minéralisation BRF}, 120, 0) \\ \text{apport paille} &= \text{DELAY FIXED}(\text{Paille} * \text{taux de minéralisation paille}, 60, 0) \end{aligned}$$

Ces équations indiquent que le BRF se minéralise sur 120 jours avec un taux de 0,1 %, tandis que la paille se décompose plus rapidement, sur 60 jours avec un taux de 0,5 %. Cela correspond aux caractéristiques biologiques des différents types d'apports organiques.

2. Incorporation des apports dans l'azote total du sol (`N sol`) :

L'azote provenant de la minéralisation des apports organiques est ensuite intégré dans l'équation du stock d'azote dans le sol :

$$N \text{ sol} = \text{INTEG}(\text{MAX}(0, (\text{Apport N} - \text{Utilisation N})), 1)$$

Cette formule fait appel aux apports en azote, mais aussi à l'utilisation par les plantes. Le terme `MAX(0, ...)` garantit qu'il n'y ait pas de valeurs négatives pour l'azote du sol.

3. Apport N et facteur de correction :

Ajouter un terme qui ajuste les apports en fonction de la différence entre le niveau critique d'azote (`Ncrit`) et le stock actuel dans le sol (`N sol`). Cela simule l'absorption plus ou moins efficace de l'azote selon la demande des plantes :

$$\text{Apport N} = (\text{Urine} * \text{Nurine} + \text{apport BRF} + \text{apport paille}) * (1 + (\text{Ncrit} - \text{N sol}) / \text{Ncrit})$$

Ce facteur permet d'ajuster dynamiquement la quantité d'azote disponible pour les plantes, en fonction de la concentration actuelle dans le sol.

4. Observation des concentrations :

Si la minéralisation des apports organiques n'est pas perceptible dans les

concentrations d'azote, plusieurs points sont à vérifier :

- Le taux de minéralisation est-il réaliste ? Par exemple, le BRF se décompose très lentement (taux de 0,1 % par jour), ce qui peut rendre difficile l'observation de ses effets sur de courtes périodes.
- La consommation par les plantes est-elle trop élevée ? Si les plantes absorbent rapidement l'azote libéré, il se peut que l'augmentation de `N sol` soit masquée.
- Pertes par lessivage : Le lessivage pourrait également entraîner une perte d'azote avant qu'il ne soit absorbé par les plantes, surtout si la porosité du sol est élevée et la pluviométrie importante.

5. Recommandation : Tester plusieurs scénarios :

- Apports en BRF et paille : Simuler différentes quantités de BRF et de paille pour voir comment elles affectent les niveaux d'azote dans le sol.
- Taux de minéralisation : Essayer de réduire ou d'augmenter le taux de minéralisation et d'observer les effets sur la concentration d'azote.
- Effet du lessivage : Modifier la fonction de lessivage en fonction de la porosité du sol et de la pluviométrie pour mieux évaluer son impact sur les pertes d'azote.

Exemple de visualisation dans Vensim :

Créer des graphes pour suivre :

- `N sol` (stock d'azote dans le sol)
- `apport BRF` et `apport paille` (pour voir la libération d'azote)
- `Utilisation N` (pour suivre la consommation par les plantes)
- `lessivage` (pour visualiser les pertes)

En modifiant ces paramètres, on devrait pouvoir mieux comprendre et ajuster le modèle pour faire ressortir l'effet des apports organiques.

D'après l'équation proposée :

$$(\text{Urine} * \text{Nurine} + \text{apport BRF} + \text{apport paille}) * (1 + (\text{Ncrit} - (\text{Urine} * \text{Nurine} + \text{apport BRF} + \text{apport paille})) / \text{Ncrit})$$

l'apport de N soit déterminé uniquement par les flux d'urine, BRF, et paille, en les modulant par une fonction basée sur (Ncrit), sans prendre en compte la variation du (N sol(t)) (la quantité d'azote dans le sol à un instant donné). Cela pourrait conduire à une situation où l'apport de N reste déconnecté de la dynamique réelle du sol, comme les pertes, l'absorption par les plantes, et la lixiviation.

Problèmes à résoudre :

1. Pas de rétroaction avec (N sol) :

- En l'absence de (N sol(t)), l'apport reste uniquement dépendant de la quantité initiale d'azote dans les entrées (urine, BRF, paille), sans prendre en compte ce qui est réellement disponible dans le sol au fur et à mesure de l'évolution du modèle.

2. Incohérence possible avec les flux réels :

- La quantité d'apport en N pourrait être surestimée, car on ajoute tous les flux bruts sans inclure les pertes par lixiviation, absorption, ou immobilisation dans le sol.

Améliorations proposées:

Pour intégrer la dynamique réelle de $(N \text{ sol}(t))$, nous pourrions réécrire l'équation en y incluant $(N \text{ sol}(t))$, comme suit :

$$\text{Apport N} = (\text{Urine} * \text{Nurine} + \text{apport BRF} + \text{apport paille}) * (1 + (\text{Ncrit} - N \text{ sol}) / \text{Ncrit})$$

Cela permettrait de moduler l'apport en fonction de la quantité d'azote disponible dans le sol, prenant en compte l'évolution de $(N \text{ sol}(t))$. Cela permet aussi une rétroaction plus réaliste, puisque si $(N \text{ sol})$ augmente trop, l'apport serait automatiquement réduit, et vice versa.

Points à vérifier :

1. Le rôle de $(N \text{ sol})$: Assurez-vous que la dynamique de $(N \text{ sol}(t))$ soit bien intégrée, avec l'effet des pertes par lixiviation et absorption.
2. Les valeurs de (N_{crit}) : Vérifiez que (N_{crit}) soit bien calibré, car il agit comme un régulateur des apports.
3. Visualisation des flux : Il peut être utile de visualiser séparément les apports d'urine, BRF, paille, et $(N \text{ sol})$ pour comprendre les contributions de chaque flux.

IV Disponibilité

Les éléments tels que le phosphore (P) et le potassium (K), provenant de sources comme les cendres et la poudre de phosphate, peuvent devenir disponibles de manière plus progressive et lente dans le sol. Leur solubilisation dépend de nombreux facteurs, notamment la composition chimique du sol, le pH, et les processus biologiques et chimiques qui permettent leur libération.

* Phosphore (P) :

- Le phosphore, en particulier celui provenant de sources comme la poudre d'os ou les phosphates de roche, est peu soluble et devient disponible lentement dans le sol. La disponibilité du phosphore est souvent limitée par des interactions avec les minéraux du sol, ce qui peut le rendre moins accessible pour les plantes.
- De plus, les besoins en phosphore des plantes augmentent au fur et à mesure de leur croissance, en particulier pendant les phases de développement racinaire et de fructification. Ces besoins suivent souvent une courbe exponentielle, similaire aux besoins en azote.

Potassium (K) :

- Le potassium est souvent plus mobile dans le sol que le phosphore, mais sa disponibilité peut également être progressive selon la source (ex. cendres, roches). La disponibilité du potassium est également affectée par des facteurs comme la lixiviation, surtout en sols sableux ou très perméables.
- Les plantes ont des besoins en potassium croissants à mesure qu'elles se développent, en particulier pendant les phases de floraison et de fructification. Comme pour le phosphore et l'azote, les besoins en potassium augmentent de manière exponentielle au fur et à mesure que la plante approche de sa maturité.

Adaptation du Modèle :

Pour refléter cette dynamique dans votre modèle Vensim :

- a. Solubilisation progressive : Vous pourriez modéliser la solubilisation de ces nutriments avec des délais ou des fonctions de relâchement exponentielles similaires à ce que vous avez fait pour la minéralisation des matières organiques.

- Exemple : Utilisez une fonction de solubilisation qui diminue progressivement la quantité de P ou K disponible, simulant une libération lente à partir des cendres ou des phosphates.

``vensim

Apport P = DELAY FIXED(Sources de P * taux de solubilisation, délai, 0)

``

b. Courbe exponentielle des besoins : Vous pouvez modéliser les besoins en P et K de la même manière que pour l'azote, avec une augmentation exponentielle des besoins en fonction du temps et du stade de développement de la plante.

- Exemple : Pour modéliser cela, vous pouvez ajuster les équations pour que les besoins en P et K suivent une fonction exponentielle du temps ou en fonction d'un indicateur de développement des plantes (comme vous l'avez fait pour (N)) :

Utilisation P = MIN(P sol, (Pmax / (1 + EXP(-KP * (Time - t0P))))))

``

Voici quelques pistes pour le stock de matière organique n'est pas initialisé correctement ou que la fonction EXP() est mal appliquée, cela peut générer un comportement opposé. :

$$\text{EXP}(-k \times t)$$

- **Vérifiez le signe du taux de décomposition** : Assurez-vous que le terme exponentiel soit décroissant, c'est-à-dire que soit utilisé avec un coefficient $k > 0$ $k > 0$ pour assurer une décroissance.
- **Incorporer la soustraction correcte** : Lorsque la matière organique est décomposée, il faut s'assurer que les apports soient soustraits du stock initial à chaque pas de temps. Par exemple : BRF restant = BRF restant(t - dt) - Apport N BRF * dt

IV La lixivation ou lessivage

Le **lessivage** (ou lixiviation) est le processus par lequel les nutriments dissous dans le sol sont transportés par l'eau (comme les précipitations ou l'irrigation) vers des couches plus profondes du sol ou sont évacués hors du système racinaire.

Dans le modèle, le lessivage est pris en compte dans les formules d'utilisation des nutriments, par exemple :

Utilisation N = MIN(N sol, ((Nmax/1+EXP(-kN*(Time-t0N)))*lessivage))

- **Si la surface est de zéro** : Même si les plantes n'absorbent pas directement les nutriments, ceux-ci peuvent toujours être lessivés par l'eau, ce qui signifie qu'ils sont emportés hors de la zone racinaire et ne restent pas dans le sol. Cela peut entraîner une utilisation de nutriments liée au flux d'eau plutôt qu'à la demande des plantes.
- **Le rôle de la fonction lessivage** : Si la pluviométrie est élevée et la porosité du sol importante, le taux de lessivage sera plus élevé. Cela peut continuer à réduire les stocks de nutriments dans le sol, même si la surface cultivée est nulle.

Modélisation dans Vensim :

Ajuster tes formules de manière à ce que l'utilisation des nutriments via le lessivage soit indépendante de la culture, mais conditionnée par la pluviométrie et la porosité :

le lessivage est effectivement un processus qui peut se produire indépendamment des plantes. Ajuster l'influence des **paramètres comme la pluviométrie et la porosité du sol**, qui déterminent l'intensité du lessivage.

Relation Pluviométrie lessivage: exemple lookup

pluviométrie_lkp ((0,0)-(800,1]), (50,0.1), (120,0.2), (600,0.8), (800,1))

$N_{sol} = \text{INTEG}(\text{Apport N} - \text{Utilisation N} - \text{Lessivage N}, \text{Initial N sol})$

Avec Lessivage N défini séparément et dépendant de la pluviométrie et de la porosité du sol. Cela garantirait que les nutriments sont correctement soustraits du stock dans le sol en raison des pertes par lixiviation.

Points à vérifier :

1. **Problème avec l'apport brutal** : Si les apports sont brutalement injectés dans le sol (ce que vous semblez indiquer), cela peut expliquer pourquoi la concentration de nutriments ne semble pas augmenter progressivement, mais plutôt subitement. Vous pourriez vérifier si les délais dans les fonctions de minéralisation sont correctement paramétrés pour refléter une décomposition progressive et non instantanée.
2. **Utilisation des apports directs** : Dans la formule d'**Apport N**, l'intégration de la quantité de nutriments se fait en fonction d'un terme comme $(1 + (N_{crit} - N_{sol}) / N_{crit})$. Cela ajuste l'apport en fonction de la concentration actuelle dans le sol, mais il semble que cela interfère avec l'intégration dans le stock de nutriments, en affectant directement l'utilisation.
3. **Impact du lessivage** : Le lessivage devrait uniquement affecter les stocks dans le sol après que les nutriments y sont accumulés. Si les apports influencent directement l'utilisation sans s'intégrer correctement dans le stock du sol, alors le lessivage ne fonctionnera pas correctement. Le lessivage doit être soustrait uniquement des nutriments disponibles dans le sol, et non des apports.

Modélisation de la décomposition exponentielle

Une approche possible consiste à modéliser la décomposition de la matière organique à l'aide de l'équation exponentielle suivante :

$$\text{Stock restant} = \text{Stock initial} \times e^{-k \times t}$$

- **Stock initial** : représente la quantité initiale de matière organique (BRF ou paille).
- **kkk** : le taux de décomposition (une constante qui représente la vitesse à laquelle la

matière organique se décompose).

- **ttt** : le temps écoulé depuis le début de la décomposition.

Implémentation dans Vensim

Dans Vensim, vous pouvez utiliser cette équation pour simuler la décomposition de la matière organique. Le terme k peut être ajusté en fonction de la durée souhaitée pour que le stock de matière organique atteigne 0. Par exemple, pour une décomposition sur 120 jours, k peut être calculé comme :

$$k = \frac{\ln(2)}{T_{1/2}}$$

Où $T_{1/2}$ est la demi-vie de la matière organique, c'est-à-dire le temps nécessaire pour

$T_{1/2}$

que la moitié du stock se décompose.

Exemple de fonction dans Vensim

Voici un exemple d'implémentation de la décomposition exponentielle pour un apport de BRF sur 120 jours :

Taux de décomposition BRF = 0.01 ~ 1/jour {taux exponentiel, ajuster selon la vitesse souhaitée}

BRF restant = BRF initial * EXP(-Taux de décomposition BRF * Temps)

Apport N BRF = BRF initial - BRF restant ~ g/m²

Nous pouvons utiliser une logique similaire pour la paille et les autres matières organiques.

V. Intégrer un amendement et le pH du sol dans le modèle

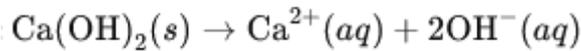
Adapter la disponibilité et l'utilisation de ces nutriments en fonction de leur libération dans le sol et des besoins variables des plantes.

1 Amendement calcaire en zone acide:

Le temps nécessaire pour dissoudre 1 kg de Ca(OH)₂ dans une solution acide, comme une solution de pH 6, dépend de plusieurs facteurs :

1. La solubilité de la chaux (Ca(OH)₂) : Elle est relativement faible dans l'eau pure, autour de 1,73 g/L à 20°C. Cependant, dans une solution acide, la dissolution est plus rapide en raison de la réaction avec les ions H⁺.
2. La température : Une température plus élevée accélérera la dissolution.
3. L'agitation : Si la solution est agitée, la dissolution sera plus rapide.
4. La concentration initiale de la solution en acide (pH 6) : Puisque le pH 6 est légèrement acide, la chaux réagira avec les ions H⁺ présents dans la solution pour former de l'eau et du calcium soluble sous forme de Ca²⁺.

Réaction : La dissolution se fait selon l'équation suivante :



Dans un milieu acide (pH 6), les ions OH^- produits par la dissociation du Ca(OH)_2 réagiront avec les ions H^+ présents dans la solution pour former de l'eau. Ce processus accélère la dissolution de la chaux.

Estimation du temps de dissolution dans un réservoir de stockage d'eau pour l'arrosage ou le goutte à goutte :

- Si vous ajoutez la chaux dans une solution bien agitée et à température ambiante, la dissolution complète de 1 kg de chaux peut prendre quelques heures, voire une journée complète, en fonction de l'acidité résiduelle et de la saturation de la solution en ions Ca^{2+} .
- En l'absence d'agitation ou à basse température, ce temps peut augmenter considérablement.

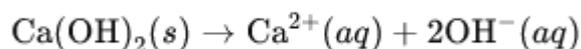
Pour une dissolution plus rapide, augmenter l'acidité (en abaissant le pH) ou la température peut aider, mais cela dépend aussi de la quantité d'acide disponible pour réagir avec la chaux.

Pour estimer le temps nécessaire à la dissolution de 1 kg de chaux hydraulique (Ca(OH)_2) dans 1 m³ d'eau avec un pH de 6 à 15°C, plusieurs éléments doivent être pris en compte.

Considérations :

a. Solubilité du Ca(OH)_2 : À 15°C, la solubilité de la chaux dans l'eau est d'environ 1,59 g/L. Dans 1 m³ (1000 L), environ 1,59 kg pourrait théoriquement se dissoudre à saturation dans de l'eau pure. Toutefois, la présence d'ions H^+ dans une solution légèrement acide (pH 6) accélère la dissolution, car l'acide réagit avec les ions OH^- pour former de l'eau.

b. Réaction avec l'acidité de l'eau : Dans une solution à pH 6, l'excès d'ions H^+ réagit avec l' OH^- formé par la dissociation de la chaux, rendant la dissolution plus rapide qu'en eau pure. La réaction libère des ions Ca^{2+} :



Les ions OH^- réagissent ensuite avec H^+ pour produire de l'eau :



c. Température : À 15°C, la dissolution sera plus lente que dans de l'eau plus chaude, car l'agitation thermique est réduite. Cependant, la réaction avec les ions H^+ pourrait compenser partiellement cet effet.

d. Agitation : En l'absence d'agitation, la dissolution serait relativement lente. L'agitation accélérerait le processus en facilitant le contact entre la chaux et les ions H^+ .

Estimation du temps de dissolution :

Dans ces conditions (pH 6, 1 m³ de solution, 15°C, et en supposant une agitation modérée), la dissolution de 1 kg de chaux pourrait prendre plusieurs heures. Sans agitation, le processus pourrait prendre plus de temps, peut-être une journée entière, car une partie de la dissolution dépend de la saturation locale autour des particules de chaux.

Cependant, la présence d'ions acides accélère la dissolution par rapport à une solution neutre ou basique.

Pour calculer un temps plus précis, il serait nécessaire de connaître :

- Le taux de dissolution basé sur la surface de la chaux exposée.
- La concentration exacte en H⁺ dans la solution (qui influence la vitesse de réaction avec la chaux).

Conclusion :

Sans agitation, la dissolution complète d'1 kg de chaux dans un milieu à pH 6 pourrait prendre jusqu'à une journée. Avec agitation, ce processus serait accéléré et pourrait se faire en quelques heures.

Pour calculer le pH après la dissolution totale de 1 kg de chaux hydraulique (Ca(OH)₂) dans 1 m³ d'eau à un pH initial de 6, il est nécessaire de prendre en compte la solubilité de la chaux et sa dissociation dans l'eau.

a Solubilité du Ca(OH)₂ :

À 15°C, la solubilité du Ca(OH)₂ est d'environ 1,59 g/L. Cela signifie qu'en théorie, dans 1 m³ d'eau, environ 1,59 kg de Ca(OH)₂ pourrait se dissoudre avant que la solution soit saturée. Toutefois, la réaction avec les ions H⁺ dans la solution acide (pH 6) permettrait de dissoudre tout le kilogramme, car l'acidité consomme les ions OH⁻ produits.

b. Dissociation du Ca(OH)₂ :

La dissolution du Ca(OH)₂ produit des ions hydroxyle (OH⁻), qui augmentent le pH :

Ainsi, 1 mole de Ca(OH)₂ produit 2 moles d'ions OH⁻. Le pKa du Ca(OH)₂ est élevé, ce qui signifie qu'il tend à augmenter fortement le pH dans une solution aqueuse.

c. Calcul de la concentration en OH⁻ :

La masse molaire du Ca(OH)₂ est 74,09 g/mol, donc 1 kg (1000 g) de Ca(OH)₂ correspond à :

Puisque chaque mole de Ca(OH)₂ produit 2 moles d'ions OH⁻, la quantité d'ions OH⁻ produite sera :

$$\frac{1000 \text{ g}}{74,09 \text{ g/mol}} \approx 13,5 \text{ mol}$$

Puisque chaque mole de Ca(OH)₂ produit 2 moles d'ions OH⁻, la quantité d'ions OH⁻ produite sera :

$$13,5 \times 2 = 27 \text{ mol}$$

Dans 1 m³ d'eau (soit 1000 L), la concentration en ions OH⁻ sera :

$$\frac{27 \text{ mol}}{1000 \text{ L}} = 0,027 \text{ mol/L}$$

4. Calcul du pOH et pH :

Le pOH est donné par :

$$\text{pOH} = -\log[\text{OH}^-] = -\log(0,027) \approx 1,57$$

Le pH est lié au pOH par la relation :

$$\text{pH} = 14 - \text{pOH} = 14 - 1,57 \approx 12,43$$

Conclusion sur la neutralisation de l'acidité de votre eau de stockage et d'arrosage :
Après dissolution complète de 1 kg de chaux hydraulique dans 1 m³ d'eau initialement à pH 6, le pH final de la solution serait d'environ 12,43 indiquant une solution fortement basique.

Pour amender un sol à pH 6 et le rendre plus neutre (pH autour de 6,5 à 7), il est conseillé d'ajouter de la chaux (CaCO₃ ou Ca(OH)₂), mais la quantité exacte dépend de plusieurs facteurs, dont la texture du sol (sableux, limoneux, argileux), le type de chaux utilisé et l'objectif visé.

Voici des recommandations générales basées sur des types de sols :

1. Sols sableux : environ 150 à 250 g/m².
2. Sols limoneux : environ 300 à 500 g/m².
3. Sols argileux : environ 500 à 800 g/m².

Ces quantités sont approximatives et visent à augmenter le pH de 0,5 à 1 unité. Plus le sol est acide et lourd (argileux), plus la quantité de chaux à ajouter sera importante.

Autres considérations :

- Analyse de sol : Il est toujours recommandé de réaliser une analyse de sol précise pour déterminer le besoin exact en amendement.
- Chaux vive ou chaux éteinte : La chaux vive (CaO) est plus puissante que la chaux éteinte (Ca(OH)₂), donc des doses plus faibles sont nécessaires si vous utilisez de la chaux vive.
- Fractionnement : Il est souvent préférable d'ajouter la chaux progressivement (sur plusieurs saisons) plutôt que d'appliquer une grande quantité en une seule fois.

Cela permet de limiter les perturbations de l'équilibre biologique du sol et d'éviter une sur-correction du pH.

Pistes à explorer :

a. Déséquilibre entre apports et utilisations :

Si les apports (comme les cendres, BRF, engrais verts, etc.) sont fixes ou augmentent proportionnellement à la surface, mais que les utilisations ne suivent pas la même logique,

cela peut conduire à une accumulation des nutriments dans le sol.

- Vérifiez que les apports (par m^2) diminuent proportionnellement si la surface cultivée augmente.

- Assurez-vous que la lixiviation (les pertes de nutriments dues à la pluie) soit correctement modélisée en fonction de la surface et de la porosité du sol.

b. Lixiviation et perte de nutriments :

Le taux de lixiviation dans votre modèle est basé sur la pluviométrie et la porosité du sol, mais est-ce que cette équation prend bien en compte la quantité de nutriments disponibles dans le sol ? Si les apports en nutriments augmentent sans une perte correspondante due à la lixiviation ou à l'utilisation par les plantes, cela pourrait provoquer une accumulation dans le sol.

- Ajustez le taux de lixiviation pour qu'il dépende aussi de la quantité de nutriments disponibles (N sol, P sol, K sol).

c. Effet de saturation du sol :

Les concentrations critiques (Ncrit, Kcrit, Pcrit) sont des seuils au-delà desquels les plantes ne peuvent plus utiliser efficacement les nutriments. Si les concentrations dans le sol dépassent ces valeurs critiques, les plantes n'absorbent pas toute la quantité disponible, ce qui pourrait entraîner une accumulation. Vérifiez si les valeurs critiques sont bien prises en compte et ajustez-les si nécessaire pour mieux modéliser les besoins des cultures.

d. Apports sous-estimés ou utilisations sous-modélisées :

Si les apports sont en réalité plus élevés que prévu (par exemple, une sous-estimation de la minéralisation du BRF, de la paille, ou des apports des engrais verts), cela pourrait aussi conduire à une accumulation dans le sol. Assurez-vous que les fonctions exponentielles que vous utilisez pour la décomposition des matières organiques soient bien calibrées.

e. Surface totale influençant les apports mais pas l'absorption :

Assurez-vous que la surface totale influence à la fois les apports et les utilisations de manière cohérente. Par exemple, si la surface cultivée double, les apports devraient doubler, mais les besoins des plantes (et donc l'absorption) devraient également augmenter proportionnellement.

Pistes à explorer :

- Calibration des taux de minéralisation et de lixiviation : Si ces taux sont trop faibles, les nutriments peuvent s'accumuler dans le sol.

En ajustant ces éléments, vous devriez voir une diminution des concentrations dans le sol si les apports ne sont pas suffisants pour compenser les utilisations.

Pour simuler cette périodicité d'apports dans Vensim, il est possible d'utiliser une fonction périodique ou de modéliser un apport discontinu. Une approche pour modéliser des apports mensuels :

la fonction "pulse" dans Vensim pour modéliser des apports périodiques. La fonction "`PULSE(TIME, interval)`" crée un apport ponctuel à une fréquence définie par l'intervalle. Voici comment l'adapter au modèle pour l'apport d'urine, par exemple une fois par mois (tous les 30 jours) :

Apport Urine = Urine * Nurine * PULSE(TIME, 30)

...

Cela signifie que l'apport d'urine se fait tous les 30 jours, de manière ponctuelle. Pour ajuster la quantité d'urine apportée à chaque période, vous pouvez modifier la valeur de `Urine` pour qu'elle corresponde à la quantité totale appliquée par apport ponctuel.

Autre solution : une approche où l'urine est appliquée pendant une période spécifique chaque mois, nous pouvons utiliser la fonction `PULSE TRAIN`, qui permet de définir une série de pulses. Par exemple :

Apport Urine = Urine * Nurine * PULSE TRAIN(TIME, début, durée, interval)

Cela permettra de distribuer l'urine pendant une période définie (par exemple, pendant quelques jours) tous les mois. Ajustez les paramètres début, durée, et interval en fonction de la fréquence et de la durée d'application.

Avantages de cette méthode :

- a. Réalisme : Modéliser l'apport d'urine en pulses reflète mieux la réalité si les apports sont faits à intervalles réguliers, par exemple une fois par mois.
- b. Simulation dynamique : Cette méthode permet de mieux visualiser l'impact d'un apport intermittent sur la dynamique des nutriments dans le sol, et comment ils sont absorbés ou perdus entre les apports.

Cela devrait aider à mieux représenter les variations des apports en nutriments dans le modèle et ajuster l'impact sur les concentrations dans le sol en conséquence.

a. Modifier les pulses ou les apports continus :

- Revoir les paramètres de pulse, par exemple en augmentant les fréquences ou les quantités d'urine, ou en vérifiant que les autres apports (comme les engrais verts) sont bien distribués tout au long de la simulation.

b. Ajuster les taux de minéralisation :

- Si la minéralisation est trop rapide, les nutriments seront disponibles trop vite, ce qui pourrait surcharger le sol en nutriments et réduire rapidement les besoins des plantes. Tu pourrais ajuster ces taux pour ralentir la libération des nutriments dans le sol.

c. Limiter l'accumulation dans le sol :

- Ajuste les mécanismes de lessivage pour que les nutriments non utilisés ne s'accumulent pas dans le sol indéfiniment. Cela permettra de simuler un épuisement plus naturel des ressources, forçant les plantes à maintenir leurs besoins plus constants.

Ces ajustements devraient t'aider à retrouver une dynamique plus cohérente entre les apports de nutriments et les besoins des plantes.

Source de la confusion. Dans le modèle, est exprimé comme flux de sortie n'est pas l'utilisation réelle des nutriments par les plantes, mais plutôt leurs besoins ou demandes de nutriments.

Explication des concepts :

a. Besoins des plantes :

- Cela représente la quantité de nutriments que les plantes aimeraient avoir, en fonction de leur stade de croissance et des niveaux critiques de nutriments (N_{crit} , K_{crit} , P_{crit}). Si les nutriments dans le sol (N_{sol} , K_{sol} , P_{sol}) sont suffisamment disponibles, les besoins des plantes diminueront.

- Ces besoins peuvent être ajustés dans ton modèle par des fonctions comme $(1 + (N_{crit} - N_{sol}) / N_{crit})$, qui ajustent la demande des plantes en fonction de la différence entre le niveau critique et la disponibilité réelle.

b. Utilisation réelle des nutriments :

- Cela représente ce que les plantes absorbent réellement du sol. Cela est limité par ce qui est disponible dans le sol et les besoins des plantes. Si le sol contient peu de nutriments, les plantes n'en utiliseront que la quantité disponible.

Différences clé :

- Besoins (ou demandes) sont influencés par les nutriments disponibles dans le sol et l'état des plantes, et sont plus dynamiques.

- Utilisation est la quantité effectivement extraite du sol par les plantes, qui dépend à la fois des besoins et de la disponibilité dans le sol.

Dans ce modèle, si le flux de sortie exprime les besoins des plantes, il est logique que ces besoins diminuent lorsque les niveaux de nutriments dans le sol augmentent. Les plantes n'ont pas besoin de demander plus de nutriments lorsqu'elles en ont déjà suffisamment à disposition.

Pour modéliser l'utilisation réelle des nutriments, il faudra probablement revoir certaines équations pour que le flux de sortie soit proportionnel à la quantité effectivement absorbée par les différentes espèces de plantes, plutôt qu'à leur demande totale.

Cela peut aussi expliquer pourquoi on observe que les apports massifs initiaux provoquent une baisse des besoins, car les nutriments sont déjà présents en quantité suffisante dans le sol, réduisant la demande des plantes.