

Spécificités des prairies dans STICS

Françoise Ruget

Description des formalismes

INTRODUCTION	3
AVANT COUPE : ASPECTS TECHNIQUES, défintion de PRATIQUES	4
1. déclenchement de coupe : possibilités de choix	4
2. conditions complémentaires pour déclencher la coupe	5
3. fertilisation classique, fertilisation associée aux coupes	5
À LA COUPE : fractions de la plante, évolutions des fractions entre coupes	5
1. compartiments de biomasse, quantités récoltable et récoltée, différents organes	5
a. définitions des fractions selon leur origine et leur état	5
b. exemples d'évolution des fractions	6
2. sénescence de la matière sèche néoformée et résiduelle	7
a. définitions	7
b. sénescence de la matière sèche néoformée	7
c. sénescence de la matière sèche résiduelle	7
d. évolution des fractions vivantes, sénescences, récoltables	8
3. matière sèche racinaire : mise en place d'une masse de racines	8
APRÈS COUPE	8
1. processus liés au redémarrage (repousse)	8
✓ généralités sur la physiologie	8
✓ mise en place de l'appareil foliaire : stade initial	8
✓ INN et teneur en azote après la coupe	9
✓ mortalité de racines à la coupe	9
2. retour au sol des parties mortes : feuilles, racines ou culture	11
✓ racines	11
✓ feuilles	11
✓ matière sèche résiduelle	11
✓ autres résidus de culture	11
EVOLUTIONS DU PEUPLEMENT AU COURS DE L'ANNÉE	11
1. évolution de la densité du couvert	12
a. dynamique de talles : mortalité estivale progressive en cas de forte sécheresse	12
b. caractérisation de la sécheresse	12
c. reprise après sécheresse	12
2. enchaînement	12
PARTICULARITÉS	13
1. densités de plantes et de talles	13
2. saturation de la photosynthèse par les forts rayonnements	13
CONCLUSION	14
BIBLIOGRAPHIE	15
DÉFINITION DES PRINCIPALES VARIABLES et des PARAMÈTRES spécifiques	17
a. signification des principales variables	17

b. paramètres spécifiques aux prairies, paramètres des coupes	17
---	----

INTRODUCTION

La prairie peut être naturelle, donc déjà installée lorsqu'on l'observe, ou être semée. Elle peut être mono ou plurispécifique, et être composée de graminées, de légumineuses, ou des deux. Ce qui est présenté ici considère la culture comme monospécifique¹ et s'adresse plutôt aux graminées, mais a aussi été appliqué jusqu'à présent à la luzerne².

Dans tous les cas (naturelle/semée, graminée/légumineuse), la culture met en place des organes aériens, feuilles qui captent le rayonnement, -puis tiges puis grains éventuellement- et des organes souterrains (racines), qui assurent l'alimentation de la plante en eau et en éléments minéraux, comme pour toutes les cultures.

A une ou plusieurs dates, une récolte d'une partie de la biomasse aérienne est effectuée (fauche, pâturage)³. Contrairement aux cultures annuelles, où la récolte signifie la mort de la plante, pour une prairie, il y a reprise de croissance après la récolte. Il est donc nécessaire de déterminer lors d'une coupe ce qui est exporté et qui correspond à la récolte et ce qui reste au sol (matière sèche résiduelle). Comme pour toutes les cultures, les feuilles vieillissent, jaunissent puis se détachent de la plante et tombent sur le sol. La sénescence a néanmoins deux aspects particuliers : d'abord, une importance potentiellement très grande, car la durée de pousse peut-être très longue par rapport à la durée de vie des feuilles, ensuite la nécessité de traiter séparément la durée de vie de la matière sèche nouvellement formée (dite néo-formée) et de la matière sèche résiduelle après coupe.

Il y a donc un certain nombre de formalismes communs entre les prairies et l'ensemble des cultures, et des formalismes nouveaux. Le but de cette notice est de présenter les spécificités des prairies. En principe, ne devraient donc être présentés ici que des formalismes spécifiques aux prairies (cultures pérennes récoltées partiellement en fauche ou pâture). Quelques formalismes communs seront néanmoins rappelés soit parce qu'ils revêtent une importance particulière, soit pour insister sur l'influence des options, soit comme simple citation de leur existence pour donner un panorama complet des formalismes en renvoyant au texte général (ils ne sont pas développés dans ce cas-là).

Dans la suite du texte, apparaîtront des noms de paramètres⁴ en bleu, et des noms de variables en bleu et en italique, sauf dans les équations où les couleurs et la typographie ne sont pas modifiées. En fin de document, l'annexe regroupe les paramètres nouveaux, les variables utilisées dans le texte et les variables de sortie supplémentaires.

Quelles sont les spécificités de la prairie et lesquelles sont reproduites ?

La simulation de prairies nécessite l'introduction de plusieurs spécificités par rapport aux cultures annuelles, généralement récoltées en une seule fois. Il faut donc tenir compte des nécessités de :

- faire un nombre variable de récoltes au cours de l'année
- faire redémarrer le couvert après la coupe
- éviter sa disparition totale au bout d'un cycle complet de végétation

Il faut aussi offrir les possibilités de :

- maintenir le couvert sur plusieurs années
- simuler les restitutions solides **et liquides** des animaux sur une parcelle pâturée, c'est-à-dire les apports d'azote organique et minéral associés aux fèces et pissats: ces formalismes seront disponibles dans la prochaine version (version 9)
- récolter à des dates choisies par l'utilisateur ou calculées automatiquement par le modèle (sommes de températures)
- récolter à des dates choisies par l'utilisateur ou calculées automatiquement par le modèle (sommes de températures)

Parallèlement, ces besoins ont nécessité de définir, dans des modules spécifiques :

- le déclenchement des coupes
- les fractions présentes et récoltables et ce qui reste sur le terrain après la coupe⁵

¹ ou à plusieurs espèces considérées comme ayant le même comportement (*cf.* définition des types fonctionnels, note 2 page suivante)

² de nouveaux formalismes ont été mis au point pour les cultures dont les réserves azotées souterraines jouent un rôle important (Strullu *et al.*, soumis), leur application est en cours de généralisation à toutes les cultures

³ on appelle récolte (ou utilisation ou exploitation) la "coupe", qu'elle soit faite par un outil ou un animal, donc qu'il s'agisse d'une fauche ou d'une pâture

⁴ paramètre = donnée d'entrée = constant dans une simulation (=une situation= un jeu de conditions)
variable = calculée par le modèle (d'état ou de sortie)

⁵ dans la description des pratiques appliquées dans le modèle, on utilisera le mot "coupe" (traduit par "cut" dans le logiciel), quel que soit le mode d'utilisation de l'herbe (fauche ou pâture)

- le report quotidien de coupe si l'une des conditions quantitatives de déclenchement de la coupe (quantité à récolter, quantité restante) n'est pas atteinte
- la possibilité d'associer une fertilisation à la coupe
- les modalités de reprise de croissance après coupe (stade phénologique pour courbe potentielle d'indice foliaire, mortalité racinaire à la coupe)
- la possibilité de spécifier qu'une utilisation est un pâturage pour prendre en compte les restitutions animales (urine et fèces) en cas de pâturage, en tant qu'apports de fertilisants : ces formalismes seront disponibles dans la prochaine version (version 9)

Les formalismes spécifiques aux prairies peuvent être groupés selon leur fonction : ceux concernant les pratiques et ceux concernant la croissance du couvert, plus précisément la reprise après coupe. Ces parties correspondent respectivement à des ajouts aux chapitres 6 et 3 du livre "Conceptual basis, formalisations and parametrization of the STICS crop model" (Brisson et al., 2008). Ils seront traités dans cet ordre car les pratiques déclenchent la coupe et les aspects physiologiques interviennent après la coupe.

L'usage du modèle est essentiellement orienté, dans ce document, vers l'estimation et l'analyse de la production, il s'intéresse donc surtout aux variables de production et fait un peu référence au bilan de C et N du sol, qui ont des propriétés particulières sous prairie, du fait de sa pérennité. Il n'est pas fait d'allusion au drainage et au lessivage, considérés comme similaires à ceux des autres cultures.

Aucune présentation ni aucun commentaire ne sont faits dans ce document concernant des estimations ou des valeurs de paramètres, même si les graphiques utilisent un jeu de paramètres précis, celui de Ruget et al. (2006)¹. Ce jeu de paramètres se réfère lui-même aux espèces d'un seul type fonctionnel (Diaz et Cabido, 1997), le type B².

Ce document est accompagné d'un manuel, nommé "manuel_pratique.docx", qui donne des explications sur les la mise en œuvre du modèle, tels que les emplacements des paramètres dans les fichiers, avec quelques valeurs de paramètres et leurs influences lorsqu'ils peuvent poser problème.'

AVANT COUPE : ASPECTS TECHNIQUES, définition de PRATIQUES

1. déclenchement de coupe : possibilités de choix

Pour chaque coupe, il s'agit de définir sa date et ce qui reste sur le terrain après la coupe. La coupe est tentée lorsqu'une date minimale est atteinte et elle n'est déclenchée que lorsque les conditions de quantités à laisser sur le terrain et à récolter sont remplies.

Pour la "date" de coupe, deux possibilités sont offertes, selon la nature du travail envisagé :

- si les dates de coupes calendaires sont connues, on utilise "calendrier en jours", les dates sont en numéro de jour de l'année³ (ou numéro de jour à partir du début de la première année de simulation en cas de simulations à cheval sur 2 ans, comme pour les cultures d'hiver)

- si on souhaite faire des coupes similaires dans des climats variables, les dates de coupes sont définies par des stades de développement, ou des intervalles en sommes de température soit à partir du début de la simulation pour la première, puis entre coupes (qui, au fond, correspondent à des stades, (cf. Duru et al., 1993 b, Theau et al., 1998). Ces critères permettent de définir des dates de coupes, qui s'adaptent automatiquement pour différentes années ou différents lieux.

Ce qui reste sur le terrain⁴ est défini par l'utilisateur, soit à partir de la hauteur du couvert restant après la coupe, soit à partir des valeurs de LAI et de biomasse restant sur le terrain après la coupe, dits respectivement LAI et biomasse résiduels (paramètres [laresiduel](#), [msresiduel](#)). Si la hauteur est renseignée, les LAI et biomasse résiduels

¹ , aux modifications de version du modèle près

² tel qu'il est défini par Duru et al. (2005) comme groupe d'espèces à stratégie de capture (plutôt que de conservation) et à recyclage d'organes lent (Cruz et al., 2002), ou bien de façon plus complète selon "leur préférence d'habitat et leur valeur d'usage", comme des espèces de "milieux fertiles,, d'assez grande taille, présentant une phénologie moyennement précoce, aptes à une fauche assez précoce et de qualité" (Cruz et al., 2010).

³ parfois improprement appelé jour julien

⁴ les critères utilisés pour définir la biomasse résiduelle dans les nouveaux formalismes représentant des réserves carbonées et azotées et identifiant expressément les racines. Ces critères se rapprochent des coupes à une hauteur choisie, à partir de laquelle sont calculées les fractions (indice foliaire et matière sèche) restantes, les coupes ne sont pas suivies de redémarrage immédiat (Strullu, soumis)

ne sont pas lus (même s'ils sont renseignés), et sont calculés par des équations¹ qui caractérisent la répartition de la matière sèche et du LAI en hauteur.

2. conditions complémentaires pour déclencher la coupe

La quantité récoltée (présent non sénescent - laissé sur le terrain) doit être supérieure à un minimum fixé par l'utilisateur. Ces conditions se traduisent, une fois la date, le stade ou la somme de température de coupe atteint(e), en conditions sur les fractions restante et récoltable. Il n'y a de coupe que si :

- le LAI est supérieur au LAI restant sur le terrain, dit au LAI résiduel (*laresiduel*) et
- la matière sèche présente (*masec(n)*) est supérieure à ce qui doit rester sur le terrain (*msresiduel*) et
- la quantité récoltable (*msrec_fou*²) est supérieure à la matière minimale que l'on accepte de récolter (*mscoupemini*). La modulation de ce critère par coupe permet de changer le seuil avec les saisons ou les décisions des agriculteurs, selon les besoins de récolte (petites quantités en cas de tension sur l'affouragement des troupeaux).

Ces critères permettent de repousser la coupe tant que les trois critères (LAI restant, quantité restante et a quantité à récolter) ne sont pas remplis. Les critères sont attachés à chacune des coupes, sauf *mscoupemini* qui a une valeur unique commune à toutes les coupes actuellement (il sera défini à chaque coupe dans la version 9).

3. fertilisation classique, fertilisation associée aux coupes

Comme pour les autres cultures, il est possible de faire des apports minéraux ou organiques classiques. Il est possible aussi, comme cela se fait dans la pratique, d'associer les fertilisations minérales aux coupes (paramètre *anitcoupe*), la fertilisation est alors liée à la coupe, qu'elle soit déclenchée à une date calendaire ou à une somme de températures ou retardée par une des conditions de coupe. L'apport est fait le lendemain de la coupe.

À LA COUPE : fractions de la plante, évolutions des fractions entre coupes

1. compartiments de biomasse, quantités récoltable et récoltée, différents organes

a. définitions des fractions selon leur origine et leur état

Les trois principales fractions de biomasse sont la biomasse présente sur la plante à un instant donné (*masec(n)*), la biomasse considérée comme utile (*mafruit*) et la biomasse récoltable (*msrec_fou*), elles sont définies et illustrées dans le paragraphe suivant.

1. *masec(n)* représente la biomasse aérienne totale présente sur la plante le jour n. Cette biomasse a deux origines : la fraction restant de la coupe précédente et la fraction néoformée, chacune des parties subissant une sénescence. Il faut noter que ce qui est sénescent et tombé après sénescence (*mafeuiltombe*) est déjà retiré de la biomasse aérienne, *masec(n)* est donc le cumul de ce qui a été maintenu à la coupe et de ce qui a été produit depuis, dont on a déjà retranché la fraction tombée au sol (donc qui a subi la sénescence et l'abscission). Elle est donc composée de :

- la biomasse résiduelle de la coupe précédente (*msresiduel(n-1)*) restée verte où *n-1* est le numéro de la pousse et de la coupe précédentes³,
- la biomasse néoformée depuis la coupe précédente (*masecneo*) et restée verte,
- les deux compartiments sénescents (le sénescent du résiduel (*msresjaune*) et la fraction non tombée du sénescent du néoformé *msneojaune*, assimilé à *mafeuiljaune*)

À la coupe suivante (*n*), on attribue directement à *masec(n)*, la valeur *msresiduel(n)*, c'est-à-dire la biomasse restant lors de la coupe qui vient d'être faite.

2. *mafruit* est la biomasse aérienne non sénescente, c'est-à-dire ce qui est vert seulement, considéré comme matière sèche utile⁴, le reste étant considéré comme non utile (sans valeur ou probablement perdu pendant la récolte), donc, contrairement aux autres cultures, *mafruit* est calculé comme *masec(n)-msneojaune-msresjaune*

¹ $msresiduel(i) = coefmshaut * (hautcoupe(i) - hautbase)$
 $laresiduel(i) = -1. / khaut * \log(1. - (hautcoupe(i) - hautbase) / hautmax))$

² nouvellement ajoutée en sortie

³ la première pousse se termine par la première coupe. Le numéro de pousse (*numcoupe*) augmente d'une unité le lendemain de la coupe. Le numéro de la repousse qui suit une coupe est donc toujours plus élevé que le numéro de la coupe qui vient d'avoir lieu.

⁴ la simplicité de ce choix peut être discutée en ce sens que les parties sénescentes sont effectivement récoltées, sans distinction. Le choix de ne pas les prendre en compte tient à ce qu'elles sont considérées comme pauvres (en eau, en sucres et en éléments minéraux) donc inutiles.

msneojaune et *msresjaune* étant respectivement les parties sénescentes (et non tombées) des fractions néoformées et résiduelles.

3. enfin, de la quantité présente et non sénescente (*mafruit*), on retire la fraction qui restera sur le terrain à la prochaine coupe (*msresiduel(n)*, n'étant le numéro de la coupe suivante), pour obtenir la partie réellement récoltable à la prochaine coupe (*msrec_fou*).

b. exemples d'évolution des fractions

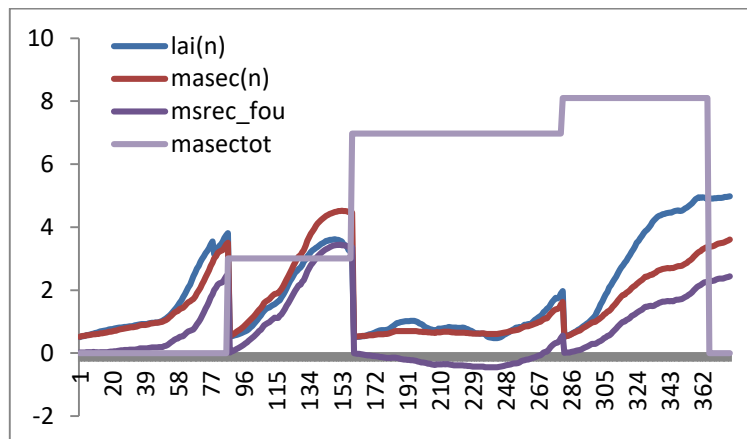


Figure 1. Évolution des fractions de matière sèche au cours d'une année exemple (Lusignan, 1991, mode d'exploitation à 4 coupes). a. Indice foliaire et principales variables de sortie. b. Évolution des composantes de la matière sèche présente (voir paragraphe sénescence)

La figure 1 présente l'évolution au cours d'une année des variables de la production d'herbe, les coupes provoquant des sauts de LAI et matière sèche. Elle présente l'indice foliaire (*lai(n)*), la matière sèche non tombée (*masec(n)*), la matière sèche récoltable (*msrec_fou*) et le cumul au cours de l'année de la matière sèche présente (*masectot*), illustrant les différences entre présent et récolté, et montrant le cumul annuel de production. La matière sèche récoltable (*msrec_fou*) croît chaque jour, indépendamment de la récolte réelle, elle devient négative quand ce qui est récoltable (ce qui est présent, non sénescent et "au-dessus" de ce qui reste sur le terrain) est inférieur à ce qui doit rester sur le terrain à la coupe suivante (*msresiduel(n)*) : cela se produit en période peu productive, où la sénescence est active, donc essentiellement en été sec.

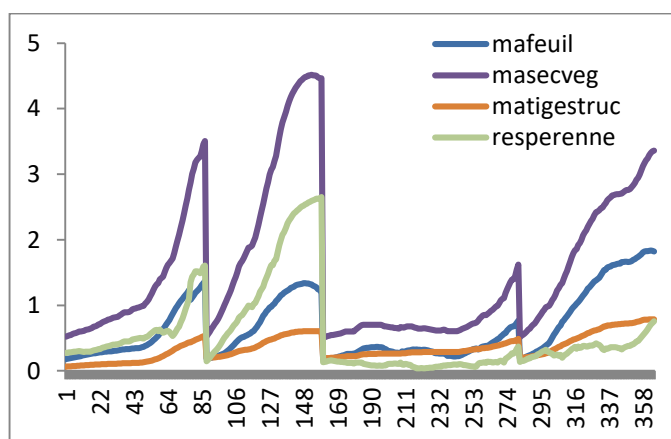


Figure 2. Répartition entre organes : feuilles, tige et réserves (une année).

La figure 2 représente la répartition entre les organes -feuilles, tiges et réserves- de la matière sèche, dont les équations de calcul sont rappelées en Annexe I. Les réserves représentent parfois une très forte partie de la matière présente, et provient en partie du coefficient de partition aux tiges (faible dans les fichiers distribués), et peut-être de son formalisme (répartition de la croissance quotidienne fixe entre feuilles et tige, cf. annexe, p 14, définition des principales variables).

2. sénescence de la matière sèche néoformée et résiduelle

a. définitions

La durée de vie d'une feuille (ou d'un élément de feuille) est le temps, généralement exprimé en somme de températures, après l'apparition de la feuille (ou de l'élément), au bout duquel la feuille (ou l'élément) sera sénescence. Le principe de la sénescence est donc celui de la disparition des éléments apparus après l'écoulement d'une certaine somme de températures, la durée de vie de feuilles, sénescence éventuellement accélérée par les stress (hydrique et azoté). Une partie seulement de la matière sèche devient sénescence (**ratiosen**), car une partie (**1-ratiosen**) est remobilisée (Duru et al., 1995). Pour toutes les plantes, la sénescence ne s'applique qu'aux feuilles. Le calcul de la sénescence s'appuie sur la disparition un jour donné de la matière sèche apparue une durée de vie de feuilles plus tôt, il utilise l'historique de l'apparition des surfaces. C'est ce qui s'applique pour la matière sèche néoformée.

Pour la matière sèche résiduelle, que ce soit en début de simulation ou en début de repousse, l'âge des feuilles est inconnu, le principe classique ne peut pas être appliqué. L'application de la notion de durée de vie de feuilles se traduit par le fait que toutes les feuilles présentes à une date donnée -hormis la partie remobilisée- doivent être sénescences au bout d'une durée de vie de feuilles, ce qui peut se traduire par le fait que tout ce qui est laissé sur le terrain le jour de la coupe aura disparu au bout d'une durée de feuilles. En l'absence d'informations précises sur les conditions d'apparition des feuilles (calendrier d'âge des feuilles), on estime une vitesse moyenne de sénescence de la matière sèche résiduelle, tout en préservant la partie remobilisée, de sorte qu'au bout de la période (une durée de vie de feuilles), la matière sèche initiale soit sénescence. Cette vitesse ne dépend que la température pendant la sénescence, alors que la vitesse de sénescence des parties néo-formées tient aussi compte du calendrier d'apparition du feuillage. De plus, ce calcul ne tient pas compte de la composition (feuilles-tiges), contrairement à ce qui se passe pour les parties néo-formées. La durée de vie utilisée est la durée de vie des premières feuilles (**durvieI**).

En général, à la coupe, la matière sèche résiduelle de la coupe précédente (**msresjaune=msresiduel(n-1)**) est entièrement sénescence, puisque l'intervalle entre coupes est souvent plus long que la durée de vie des feuilles et que la sénescence se produit en une durée de vie de feuilles¹. Cette expression est liée au fait que la matière sèche présente à un instant donné est nécessairement sénescence une durée de vie de feuilles plus tard, par définition de la durée de vie de feuilles.

b. sénescence de la matière sèche néoformée

Elle est semblable à celle des autres cultures.

c. sénescence de la matière sèche résiduelle

La vitesse de sénescence de la matière sèche résiduelle est considérée comme ne dépendant que de la température de la période présente, sans tenir compte du rythme d'apparition des surfaces de feuilles qui dépendent de la température subie par les feuilles pendant leur mise en place, comme c'est le cas pour les feuilles néo-formées :

$$\text{vitsenres} = \text{msresiduel} / \text{durvieI}$$

$$\text{dltamsressen} = \text{ratiosen} * \text{vitsenres} * \text{tdevelop}(n)$$

où **tdevelop(n)** est la somme de température journalière (air ou culture) exprimée en Q₁₀, pour que le vieillissement soit effectif même aux températures proches du seuil bas de température de développement (**tdmin**),

durvieF est la durée de vie des dernières feuilles

ratiodurvie est le rapport entre la durée de vie des premières feuilles et celle des dernières

$$\text{durvieI} = \text{ratiodurvie} * \text{durvieF}$$

Le fait d'introduire **ratiosen** dans le calcul de la sénescence quotidienne du résiduel signifie que la fraction de la matière sèche résiduelle, **ratiosen**, va être devenir sénescence, comme pour les parties néoformées.

¹ quantité sénescence (**ratiosen**) et quantité recyclée (**1-ratiosen**) sont complémentaires. Seul leur total dépend de la durée de vie des feuilles.

d. évolution des fractions vivantes, sénescentes, récoltables

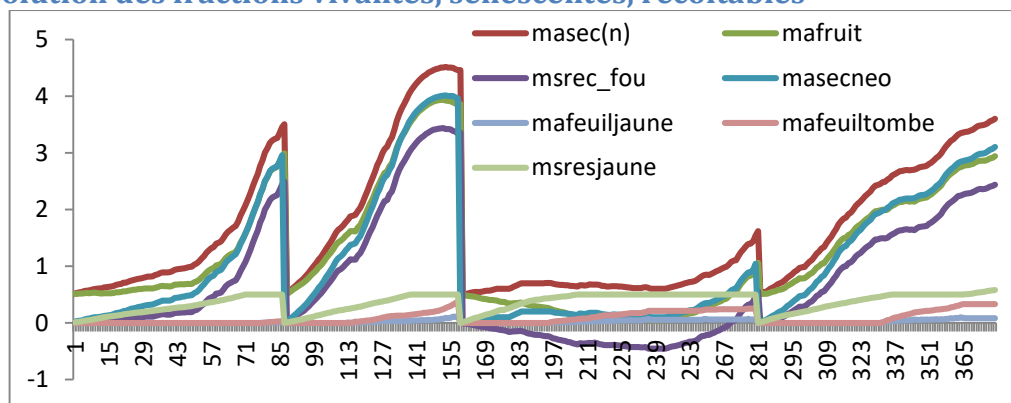


Figure 3. Évolution des fractions de matière sèche pendant une année, à 3 coupes (et 4 repousses)

La figure 3 présente l'évolution de la matière sèche non tombée (*masec(n)*) et ses fractions : la composante verte néoformée (*masecneo*) et les fractions sénescentes (voir paragraphe suivant *msneojaune* et *msresjaune*), ainsi que la matière sèche tombée (*mafeuiltombe*), qui est une proportion du néoformé sénescant (coefficient *abscission*).

3. matière sèche racinaire : mise en place d'une masse de racines

L'estimation de la matière sèche racinaire, semblable pour toutes les plantes, est rappelée ici en raison de l'importance qu'elle peut revêtir dans des cultures de longue durée.

Pour plus de précisions, voir le paragraphe "Les apports des résidus racinaires à la récolte ou à la fauche", dans le texte *Modifications_Formalismes_Parametrage_modulo_versus_v69.pdf*.

Le calcul de la matière sèche racinaire dépend des options d'enracinement choisies :

- en option profil-type :

Le calcul d'un poids de racines ne se fait qu'à la récolte, avec les paramètres *proprac* et *y0msrac*. Il n'y a pas de retour de racines au sol à la fauche.

$$\text{msrac} = \text{masec} * \text{proprac} + \text{y0msrac}$$

- en option densité vraie :

La croissance en densité des racines est modulée par l'environnement, entre autres la densité apparente du sol et son humidité. La matière sèche des racines peut croître sans tenir compte de la croissance de la plante, donc sans lien trophique, -la croissance en masse des racines est liée uniquement à l'allongement des racines et à leur longueur spécifique (ou massique : longueur par unité de masse)- ou au contraire en utilisant un lien trophique - la croissance en masse des racines est alors liée à la croissance quotidienne-, et ce, avec ou sans seuils. Cela conduit à des masses de racines qui peuvent varier sensiblement selon le paramétrage, ces quantités de racines auront une forte influence sur les restitutions de matière organique au sol par mortalité de racines.

Le pilotage de la densité racinaire par l'environnement peut conduire à des profils assez variés, y compris au sein d'une espèce, pour des conditions de milieu différentes (densité et humidité de sol). Ce formalisme favorise l'effet du milieu par rapport à l'effet génétique et peut rendre difficile la représentation des différences entre espèces à forme d'enracinement différent (fasciculée/pivotante).

APRÈS COUPE

1. processus liés au redémarrage (repousse)

✓ généralités sur la physiologie

Il y a trois variables essentielles à définir en début de repousse : la vitesse d'installation du LAI, le statut azoté du couvert, c'est-à-dire son indice de nutrition azotée (INN), tel qu'il est défini par Lemaire et Salette (1984) et la mortalité de racines à la coupe.

Peu d'études ont cherché à caractériser précisément les dynamiques de ces processus juste après la coupe. Les modalités de redémarrage sont donc choisies en combinant les connaissances sur ces processus et les principes de base du modèle, utilisés pour toutes les plantes et déjà actifs sur la première pousse.

✓ mise en place de l'appareil foliaire : stade initial

Pour la reprise de croissance des feuilles, les travaux sur la vitesse de croissance après défoliation montrent qu'en l'absence de stress, il n'y a pas de ralentissement des vitesses d'allongement de feuilles, pour les espèces tolérantes aux défoliations (Gastal et al., 2010), quelle que soit la hauteur de coupe. Cela n'est possible à

l'échelle du couvert que s'il possède des réserves suffisantes en C et N pour assurer cette reprise (Gastal et Lemaire, 2015).

Or, dans STICS, la croissance foliaire quotidienne est limitée, pour toutes les cultures, par une courbe potentielle (modèle PUTU, Singels et de Jager, 1991), qui agit de la levée à la fin d'apparition de feuilles. De forme sigmoïde, s'étalant de 0 à la vitesse maximale, cette courbe figure la limitation morphogénétique du développement de l'appareil foliaire au cours de l'installation de la plante.

Dans le cas de la prairie, le stade de développement de l'appareil foliaire, définissant sa vitesse potentielle, doit donc être défini chaque jour aussi bien au démarrage de la culture qu'après la coupe, pour situer l'état du couvert sur cette courbe potentielle. Au démarrage d'une simulation, il est possible de fixer le stade initial à **lev** (levée) - la vitesse initiale est alors nulle- ou à **amf** (accélération maximale de la croissance foliaire, généralement proche du point d'inflexion de la sigmoïde de croissance potentielle) -la vitesse vaut alors la moitié du maximum si **amf** correspond au point d'inflexion de la courbe (c'est-à-dire si $v_{\text{laimax}}=2^1$). À la coupe, le stade revient au stade **lev**, sauf si le stade initial a été fixé à **amf** car il n'est pas possible de revenir à un stade antérieur au stade initial, donc ce sera **amf**.

Pour atténuer les effets de la limitation morphogénétique introduite par le formalisme de Singels et de Jager (1991), et en raison de la forte contrainte que représente la courbe potentielle de croissance de l'indice foliaire aux stades initiaux, un paramètre supplémentaire (**dlaimin**) a été introduit, de façon à atténuer le ralentissement de croissance foliaire qui n'est pas observé dans la réalité lors d'expérimentations sur des feuilles jeunes et bien alimentées. Ce paramètre fixe une proportion minimale de vitesse de croissance par rapport au maximum accessible ($\text{dlaimaxbrut} \times \text{densité} \times \text{efdens}$), empêchant la croissance de redémarrer à sa valeur initiale 0 au stade **lev**. Le coefficient **dlaimin** n'est pas spécifique d'une repousse, il s'applique à toutes les repousses.

✓ **INN et teneur en azote après la coupe**

L'INN est un des facteurs limitants de la croissance : son calcul s'appuie sur la notion de courbe de dilution (Lemaire et Salette 1984), c'est-à-dire sur le fait que la teneur en azote de la plante diminue au cours de sa croissance, et en particulier, la teneur minimale pour assurer une croissance optimale (teneur critique) diminue quand la quantité de matière sèche présente augmente. La teneur critique est donc beaucoup plus forte aux faibles quantités de matière sèche (les tissus jeunes sont plus riches en azote) : après une coupe, la teneur critique est plus élevée qu'avant la coupe car la quantité de matière sèche restant sur le terrain est faible. Pour ne pas pénaliser fortement la reprise, on a choisi de maintenir l'indice de nutrition azoté, ce qui revient à augmenter la teneur en azote. Ce choix peut sembler irréaliste, si l'on s'en tient aux teneurs instantanées et locales (Delagarde, 2000), mais étant donnée la sensibilité de la production à l'INN, le maintien du statut azoté est préférable pour éviter un trop fort ralentissement de croissance. La très faible variation du statut est constatée dans les expérimentations de Duru *et al.* (1993a) sur prairies permanentes, la régularité du statut azoté est assurée par l'utilisation de réserves lorsqu'elles sont présentes (Gastal et Lemaire, 2015). L'augmentation de teneur impliquée par ce recalcul a généralement peu de conséquences sur la quantité totale d'azote présent dans le couvert (**QNplante**) étant donné la faible quantité de matière sèche en cause.

✓ **mortalité de racines à la coupe**

L'introduction de ce mécanisme est justifié par le lien morphogénétique connu entre talles et racines et qui peut se traduire par une mortalité de racines au moment des coupes de l'herbe, si ce lien est également fonctionnel : la disparition d'une fraction de la partie aérienne entraîne alors celle d'une partie des racines. Cela a des répercussions pour la vie ultérieure (ou la survie) du couvert et peut revêtir aussi une grande importance en terme de retour de matière organique au sol, dans le cas d'une culture exploitée fréquemment.

Le lien fonctionnel entre parties aériennes (talles ou feuilles) et racines est bien caractérisé pour l'émission des organes (Klepper *et al.*, 1984 ; Yang *et al.*, 1998), les connaissances sont plus restreintes quant à la sénescence des racines induite par les utilisations de l'herbe (défoliation). Les difficultés d'étude de l'évolution des racines viennent de la lourdeur des observations (destructives ou perturbatrices) des racines et de la difficulté de distinction certaine entre racines vivantes et mortes. De plus, des travaux récents montrent que les apparitions/sénescences de racines peuvent être différentes selon la profondeur d'observation dans le profil (Volder *et al.*, 2007, Wedderburn *et al.*, 2010, Pilon *et al.*, 2013), ainsi que l'effet de la saison (Wedderburn *et al.*, 2010, Pilon *et al.*, 2013). Enfin, Wedderburn *et al.* (2010) montrent aussi l'effet de la sécheresse sur les longueurs de racines, tous éléments qui confortent l'idée que l'observation des racines est délicate.

L'existence d'un lien entre intensité de défoliation et quantité de racines a été montrée par Deinum (1985). Diverses études s'accordent sur quelques facteurs qui interviennent sur la sénescence des racines et leur reprise de croissance après défoliation, il s'agit principalement l'intensité de défoliation, l'espèce et le statut azoté du couvert. Leur combinaison rend l'analyse difficile, les résultats peuvent même sembler contradictoires : Dawson *et al.*

¹ détails dans " manuel_pratique.docx "

(2000) montrent l'absence d'effet en cas de faible défoliation, tandis que Medina-Roldán & Bardgett (2011) montrent un effet croissant avec l'intensité de défoliation. Cependant, l'effet de l'intensité n'est significatif que pour certaines espèces et même il n'existe pas pour d'autres, ce que confirment Gastal et al. (2010).

Le rythme ou l'intensité de défoliation agit donc en interaction avec l'espèce et le statut azoté du couvert (Dawson et al. 2003, Gastal 2010) pour provoquer la mortalité de racines : certaines espèces, les espèces adaptées au pâturage en particulier, sont mieux adaptées à la défoliation que d'autres (Dawson et al., 2000 ; Gastal et al., 2010), les bonnes conditions de nutrition azotée réduisent aussi la mortalité des racines.

En résumé, la mortalité des racines augmente au fur et à mesure de l'augmentation de sévérité des défoliations (donc des coupes), mais l'intensité du lien dépend des situations, ce qu'expliquent Gastal et Lemaire (2015) en affirmant, avec Richards (1993), que la sénescence des racines est provoquée par la remobilisation de N et C, d'où l'importance du niveau trophique (C) et du statut azoté (N) du couvert.

Au total, il y a peu d'études ont tenté de construire une loi générale d'effet des pratiques sur la mortalité de racines à la coupe. Le seul chiffrage de masses de racines après défoliation comparé à la masse en l'absence de défoliation est celle de Mawdsley et Bardgett (1997), qui estiment les pertes à environ 20 % des racines présentes pour une défoliation intense (coupe à 4mm tous les jours durant 40 jours).

À partir de ces connaissances, une interprétation simple relie la durée de vie de racines à l'intensité de défoliation en rapport entre ce qui est laissé sur le terrain et ce qui est récolté. Ce rapport induit la mortalité de racines en raccourcissant leur durée de vie, par une exponentielle inverse, de telle sorte que l'effet soit particulièrement faible aux faibles défoliations, selon l'équation :

$$durvieracine = debsenrac * \left(1 - e^{-coefracoupe * \frac{msresiduel}{MS}}\right)$$

où MS peut être choisi entre 2 variables : le cumul annuel de production, ce qui accentue la mortalité au cours de l'année, ou la récolte présente, ce qui représente un lien fonctionnel ou trophique entre la proportion coupée et ce qui meure dans le sol.

Ce formalisme -spécifique des cultures coupées- agit seulement en option densité vraie.

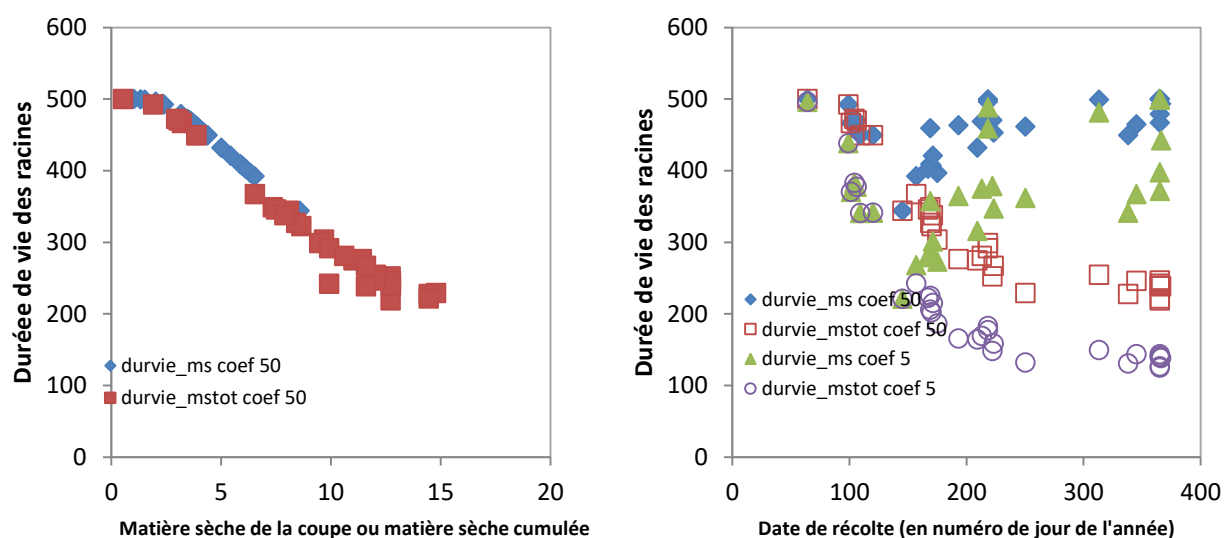


Figure 4. évolution de la durée de vie des racines en fonction de la matière sèche produite et au cours de l'année avec 2 variables pilote et 2 valeurs de *coefracoupe*.

L'effet du formalisme se traduit par le fait que plus la proportion laissée sur le terrain est forte (donc la proportion coupée faible), plus la mortalité est faible, c'est-à-dire moins la durée de vie est raccourcie (et réciproquement, si la proportion coupée est forte, la durée de vie est beaucoup raccourcie). Plus le coefficient *coefracoupe* est fort, moins la durée de vie est raccourcie.

La durée de vie des racines est moins raccourcie quand la variable de base du calcul est la matière sèche de la dernière coupe (*masec(n)*) que quand c'est le cumul annuel de production (*masectot*) (figure 4a). Quand la variable pilote est le cumul annuel de la production, plus on avance dans l'année, plus la durée de vie des racines est raccourcie, donc le risque de stress hydrique ou azoté élevé. La possibilité d'utiliser la production de la coupe en cours comme variable pilote permet de ne pas accentuer la sénescence au cours de l'année, mais seulement de l'accentuer en cas de pousse très productive et/ou longue. Au contraire, la durée de vie est très fortement affectée lorsque c'est la production cumulée qui est utilisée et que le coefficient est faible (figure 4b). Le raccourcissement

de la durée de vie a un fort impact sur la quantité totale de racines actives (*cumlrac*, longueur cumulée dans le profil, RAC sur la figure 4), semblables en début de simulation (elles seraient semblables en début de chaque année si elles n'étaient pas enchaînées) quelle que soit l'option choisie, sont différents en milieu d'année, avec des longueurs racinaires cumulées plus faibles quand la variable utilisée est *masectot* et que le coefficient *coefracoupe* est faible.

Les productions cumulées dans l'année jusqu'à la date d'observation ne sont pas toujours affectées. En particulier, elles le sont peu quand le coefficient *coefracoupe* est fort. Quand il est faible, les productions sont d'autant plus affectées qu'on utilise le cumul de production plutôt que la production de la repousse précédente.

L'absence d'effet systématique s'explique par le fait qu'en cas de racines abondantes (et/ou de mortalité faible), les racines sont toujours assez abondantes pour satisfaire les besoins en eau et en azote du couvert.

2. retour au sol des parties mortes : feuilles, racines ou culture

Les parties retournant au sol sont particulièrement importantes à bien considérer dans le cas des prairies, particulièrement celles de longue durée et celles peu fertilisées, dont la production se maintient néanmoins sur de longues durées.

✓ racines

On distingue comme résidus les racines (*msrac*) à la récolte et les racines mortes à la coupe (*msracmorte*).

$$\text{msracmorte} = \text{lracsentot} / \text{longsperac} * 100$$

Ce formalisme ne s'applique qu'aux racines en option densité vraie, donc il n'est pas tenu compte du retour de racines mortes au sol en option profil-type.

✓ feuilles

Il y a retour au sol de la matière organique morte des feuilles, de celle des talles mortes par sécheresse (module de dynamique de talles *dyntalle*), et de celle des feuilles gelées. Mais les feuilles sont le seul organe aérien dont des parties mortes (*mafeuiltombe*) retournent au sol. Leur quantité dépend non seulement de la vitesse de sénescence (liée à la durée de vie des feuilles) et de la proportion non recyclée (*ratiosen*), mais aussi de l'abscission (*abscission*, proportion de feuilles qui tombent). Dans cette estimation, les tiges et les réserves, dont la quantité est calculée une fois que feuilles et tiges ont reçu les assimilats correspondant à leur demande, n'ont pas de sénescence. De ce fait, les paramètres gérant la répartition entre organes, à savoir le rapport *tigefeuil* et la surface massique de feuilles, *sla*, permettant la conversion de la surface (*lai*) en masse (*mafeuil*), (*sla* elle-même comprise entre *slamin* (feuilles épaisses) et *slamax* (feuilles minces)), ont une forte influence sur la bonne estimation de cette fraction.

✓ matière sèche résiduelle

Les autres parties restant sur le terrain, la matière sèche résiduelle, ne sont pas retournées

✓ autres résidus de culture

Actuellement, l'ensemble de la production en peut pas être laissé sur le terrain après avoir été fauché. Des modifications permettant de laisser une fraction choisie (de 0 à 1) sur le terrain seront introduites prochainement (déjà présentes en version de travail).

Dans la version actuelle, les retours de matière organique sont donc incomplets par rapport à la réalité, au niveau des parties souterraines, et, éventuellement, des parties aériennes lorsqu'une grande partie du couvert meurt lors d'une repousse particulièrement longue.

De plus, les parties souterraines fournissent, en réalité, plus de matière organique que ce qui est considéré à la coupe : par rhizodéposition (= exsudats et litières racinaires), Balesdent *et al.*, (2011) estiment à près 30 % de la matière sèche attribuée aux racines, ce qui être retourné au sol. Il est probable qu'une meilleure prise en compte de tous le retours de matière organique au sol permettront d'éviter les problèmes de fort appauvrissement en matière organique que l'on rencontre sous prairie, lorsqu'elles sont cultivées pendant une longue série d'années. En effet, cet appauvrissement qui s'accompagne d'une forte chute de la productivité (divisée environ par 2 au bout de 20 ans, en cas de prairie fertilisée) et s'accroît dans le cas de prairies non fertilisées, jusqu'à descendre à un quart de la production initiale, empêche l'utilisation du modèle pour de longues séries d'années enchaînées.

EVOLUTIONS DU PEUPELEMENT AU COURS DE L'ANNÉE

La prairie est un milieu complexe et qui évolue beaucoup au cours de sa vie, en particulier en termes de densité de couvert et d'espèces (Duru et al., 1998). Aucune évolution de fréquence d'espèces n'a été envisagée en couvert à 2 espèces, le maximum possible actuellement, ni même de densité de couvert en fonction de l'âge de la prairie. Seuls deux comportements très simples ont été introduits : l'évolution de la densité de plantes par effet de sécheresse et la pérennité, représentée par la transmission des principales variables nécessaires d'une année à la suivante.

1. évolution de la densité du couvert

La densité du couvert n'est modifiée que dans 2 cas :

à la levée si celle-ci met trop longtemps (en cas de semis)

en cas de très forte sécheresse d'été, avec le module dynamique de talles, introduit pour simuler des situations très déficitaires, en conditions méditerranéennes ou semi-arides.

a. dynamique de talles : mortalité estivale progressive en cas de forte

sécheresse

La dynamique de talles a été introduite spécifiquement pour les prairies, en particulier pour simuler la mortalité estivale en cas de sécheresse (Ruget *et al.*, 2009) : elle s'appuie sur une description du couvert en nombre de talles et non nombre de plantes, pour pouvoir obtenir une mortalité progressive du couvert, composé d'un grand nombre de talles. Ce module est spécifiquement adapté à la sécheresse, car la mortalité n'est provoquée que par une sécheresse très forte (déficit hydrique de l'ordre de 300 à 500 mm), il se compose d'une partie mortalité et d'une partie reprise au retour des précipitations. Il est résumé rapidement ici car il a été décrit dans le document "Modifications_Formalismes_Parametrage_modulo_versus_v69.pdf".

b. caractérisation de la sécheresse

La sécheresse est caractérisée par le rapport entre l'évapotranspiration de l'apex et l'évapotranspiration potentielle du couvert, puisque c'est le manque d'arrivée d'eau à l'apex qui entraîne la mort de la talle. Lorsque la sécheresse est assez forte pour déclencher la mortalité, celle-ci s'applique à une population d'apex dont les indices de stress hydrique sont distribués selon une loi gamma, ce qui conduit à une mortalité distribuée dans le temps et non simultanée pour toutes les talles. Malgré cette distribution, les effets sont assez brutaux, la mortalité de l'ensemble du couvert n'est pas très étalée dans le temps.

Les quantités d'eau mises en jeu pour passer le seuil de mortalité sont très faibles, puisque c'est la transpiration de l'apex qui est en jeu. L'humidité du sol (qui dépend de la consommation antérieure du couvert) et l'accessibilité à l'eau pour la plante, donc principalement les paramètres de l'enracinement (colonisation du profil, rayon d'action des racines, et, dans une moindre mesure, potentiel hydrique de fermeture stomatique), jouent un grand rôle sur le déclenchement de la mortalité. Une bonne connaissance de l'enracinement (profondeur et densité de racines) de l'espèce à étudier est un atout pour réussir à reproduire son comportement.

Néanmoins, un défaut fréquemment observé, la réduction tardive de l'évapotranspiration du couvert lors de l'installation du stress hydrique, conduisant à une consommation d'eau qui se maintient au niveau potentiel même lorsque la sécheresse est déjà bien installée (la réduction de l'ETR n'est souvent observée que lorsque plus de 70 % de la réserve est déjà consommée) perturbe probablement le fonctionnement de ce formalisme, surtout si l'on ne s'intéresse pas seulement à la période de sécheresse sévère, mais à une évolution au cours de l'année.

c. reprise après sécheresse

La reprise a lieu après le retour des précipitations. Lorsque l'accroissement quotidien du LAI dépasse un seuil $\text{deltainet} > 0.03 * (\text{densite} / \text{MaxTalle})$

le tallage reprend à une vitesse quotidienne, $\text{VitReconsPeupl} * \text{densite} * \text{tempeff}$,

jusqu'à une densité maximum densitemax plus ou moins élevée selon le niveau auquel est tombée la densité de talles, jusqu'à un maximum

$$\text{densitemax} = \text{MaxTalle} * (-8e-7 * \text{densite}^2 + 1.9e-3 * \text{densite})$$

lui-même limité par le maximum initial.

2. enchaînement

Il est possible de simuler une prairie une ou plusieurs années successives, en démarrant la simulation l'année de semis de la prairie ou sur une prairie déjà en place. Pour démarrer la simulation l'année de semis d'une prairie et poursuivre la simulation les années suivantes sur la prairie en place, il n'y a aucune option à activer. Le passage se fait automatiquement si on indique des conditions de semis de la première année, qu'on paramètre une simulation pour plusieurs années de culture et qu'on indique qu'il s'agit d'une culture pérenne, donc sans option particulière.

Le modèle simule une prairie pérenne, en gardant en mémoire à la fin de chaque cycle cultural annuel toutes les caractéristiques du couvert végétal : LAI, fractions de matière sèche (différents organes et fractions vivantes, ou

sénescentes), teneur en azote. Les calendriers de mise en place des feuilles, eux, ne sont pas transmis, ce qui rend impossible le calcul de leur sénescence par les formalismes classiques.

Les choix possibles d'enchaînement sont multiples : pour le moment, l'enchaînement "séries d'années" est le plus complet (il manque le calendrier d'élaboration de la matière sèche pour poursuivre sa sénescence). L'enchaînement de type "succession de culture" ne contient pas la transmission de tous les éléments caractérisant la végétation, car il a été conçu pour être utilisé pour des cultures successives d'espèces différentes, donc ce sont les variables de sol (eau et azote) qui sont transmises.

Rappelons le risque de diminution de production, présenté au paragraphe précédent, risque qui se manifeste lorsqu'on simule un long enchaînement d'années et qui est lié à la prise en compte insuffisante de retours de matière organique au sol sous prairie.

PARTICULARITÉS

1. densités de plantes et de talles

La densité est généralement exprimée en nombre de plantes par hectare. Pour les graminées, on a introduit la densité de talles¹, pour tenter d'étaler la mortalité estivale du couvert en cas de sécheresse forte et prolongée.

Comme la densité intervient directement comme facteur multiplicatif dans le calcul de l'accroissement quotidien de LAI, ainsi qu'un facteur réduisant la surface par plante lors de l'augmentation de la densité, un fort changement du niveau de la densité, c'est-à-dire une multiplication par 10 à 20, a un effet fort sur l'indice foliaire. Les formalismes et/ou les paramètres d'effet de la densité ne sont pas assez robustes pour qu'un tel changement se fasse sans qu'une adaptation des paramètres de densité soit nécessaire (voir illustration dans manuel_pratique.docx). Il s'agit de **dlaimaxbrut**, auquel l'indice foliaire est directement proportionnel, et, de façon souhaitable, de **adens** et **bdens**, qui pilotent la forme de la courbe, donc le niveau moyen du facteur d'effet de la densité (**efdens**). Ces effets sont détaillés dans le document "manuel_pratique.docx")

2. saturation de la photosynthèse par les forts rayonnements

La production journalière est limitée par la saturation de la photosynthèse, réduisant l'efficacité réelle de conversion du rayonnement

$$f_{\text{pari}} = e_{\text{bmax}} - (\text{coefb} * \text{raint})$$

donc le niveau de rayonnement incident agit sur l'efficacité de conversion réelle, sous forme d'une parabole orientée vers le bas (voir dans "manuel_pratique.docx"). En raison de cette expression, l'optimum de la production se situe à un rayonnement d'autant plus bas que l'efficacité maximale est faible, ce qui est le cas de graminées fourragères. L'exemple ci-dessous (figure 5) illustre la réduction de l'efficacité de conversion (**ef(fpari)**) aux rayonnements interceptés journaliers "forts" (**raint**).

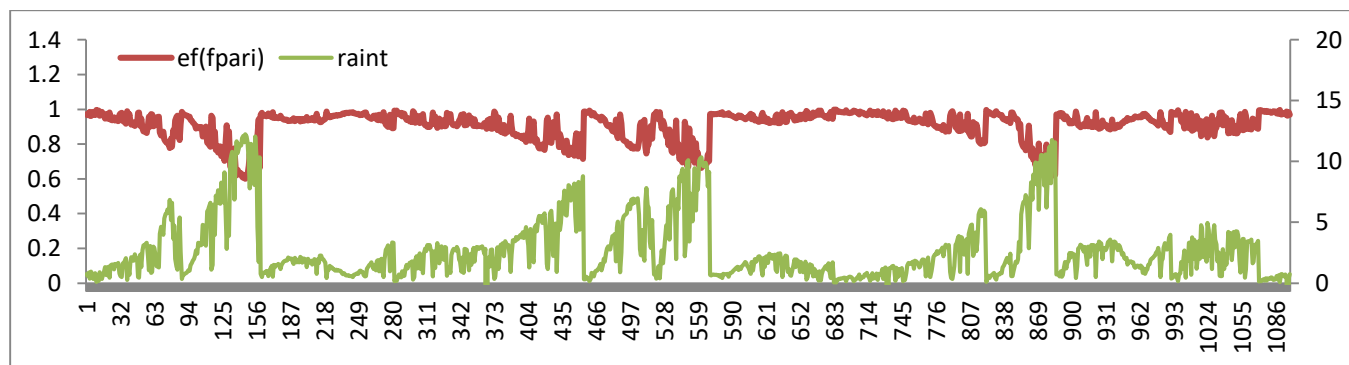


Figure 5. exemple d'évolution des valeurs des efficacités selon le rayonnement intercepté, pour $e_{\text{bmax}}=2.5$, axe de gauche, courbe rouge, efficacité de conversion du rayonnement intercepté, rapportée à son maximum (e_{bmax}), axe de droite, courbe verte, niveau de rayonnement intercepté

¹ Dans les premières versions de JAVAstics, on a distribué¹ 2 fichiers plante, grass_plt.xml et grass_till_plt.xml, où les valeurs de **dlaimaxbrut** correspondaient soit à une densité de plantes, soit à une densité de talles. Seules les valeurs correspondant aux densités de talles sont maintenant distribuées. Cependant, il n'y a pas eu de nouvelle calibration lors de ce changement, les 2 choix sont possibles, selon l'usage qui est fait du modèle.

CONCLUSION

En résumé, du point de vue des formalismes physiologiques, quelques-uns ont été introduits spécifiquement pour les cultures coupées plusieurs fois au cours de leur vie : possibilité de redémarrage après coupe (sans intervention explicite de réserves), mortalité de racines à la coupe et mortalité de tiges.

La possibilité de décrire les pratiques spécifiques aux cultures coupées a également été ajoutée : hauteur de coupe (ou quantité restant au sol), choix de la date de coupe (date ou somme de température), quantité disponible pour la récolte. Ces choix permettent soit de reproduire au plus près les pratiques et décisions des agriculteurs : dates d'utilisation de l'herbe, quantité laissée au sol, quantité minimale à récolter, soit de définir des dates de coupes en fonction du climat.

Sur le plan physiologique, la possibilité de reprise du couvert après coupe est un point indispensable : les propriétés de reprise (vitesse de mise en place d'indice foliaire, statut azoté et mortalité de racines liées à la coupe) ont été bâties à partir de connaissances antérieures, sans mettre en jeu de composante trophique de façon à conserver des comportements aussi robustes que ceux des plantes annuelles. Un point très important pour pouvoir simuler des productions dans des conditions ressemblant aux conditions du terrain, avec des durées de pousse variées (quelques semaines à plusieurs mois) est l'introduction et la simulation soignée de la sénescence des feuilles et de la perte de matière sèche associée.

Enfin, en raison la durée de vie des prairies s'étalant généralement sur plusieurs années, il était nécessaire de ne pas terminer le cycle d'une prairie comme celui d'une plante annuelle : quand le redémarrage n'est pas assuré par une coupe, la solution actuelle est de jouer sur un paramètre en allongeant la phase de mise en place des feuilles.

Les aptitudes du modèle sont liées à ses formalismes, mais leur évaluation ne peut être faite qu'en donnant des valeurs aux paramètres, c'est pourquoi ce texte ne contient pas de description des aptitudes du modèle dans des conditions de climat, de sol et de pratiques variées, aptitudes, en partie présentées dans Ruget et al. (2006) et dans Coucheney et al. (2015), qui seront détaillées dans un article en préparation.

Les prochains points d'amélioration seront l'extension des espèces simulées, en s'appuyant sur les notions de type fonctionnel, pour proposer des paramètres par groupe d'espèces plutôt que par espèce, et l'amélioration du bilan de matière organique sous prairie, de façon à mieux reproduire un des services écosystémiques importants que rendent les prairies.

BIBLIOGRAPHIE

- BALESDENT J., DERRIEN D., FONTAINE S., KIRMAN S., KLUMPP K., LOISEAU P., MAROL C., NGUYEN C., PÉAN M., PERSONENI E. ROBIN C., 2011. Contribution de la rhizodéposition aux matières organiques du sol, quelques implications pour la modélisation de la dynamique du carbone, *Étude et Gestion des Sols*, 18, 3, 201-216.
- BRISSON N., LAUNAY, M., MARY B., BEAUDOIN N., 2008. Conceptual basis, formalisations and parametrization of the STICS crop model, 297p., Ed QUAE
- COUCHENEY, E., BUIS, S., LAUNAY, M., CONSTANTIN, J., MARY, B., GARCIA DE CORTAZAR ATAURI, I., RIPOCHE, D., BEAUDOIN, N., RUGET, F., ANDRIANARISOA, K.-S., LE BAS, C., JUSTES, E., LÉONARD, J. (2015). Accuracy, robustness and behavior of the STICS soil–crop model for plant, water and nitrogen outputs: Evaluation over a wide range of agro-environmental conditions in France. *Environmental Modelling and Software*, 64, 177-190. DOI : 10.1016/j.envsoft.2014.11.024
- CRUZ P., DURU M., THEROND O., THEAU J.P., DUCOURTIEUX C., JOUANY C., AL HAJ KHALED R., ANSQUER P., 2002. Une nouvelle approche pour caractériser les prairies naturelles et leur valeur d'usage, *Fourrages*, 172, 335-354.
- CRUZ P., THEAU J.-P., LECLOUX E., JOUANY C., DURU M., 2010. Typologie fonctionnelle de graminées fourragères pérennes : une classification multitraits, *Fourrages*, 201, 11-17.
- DAWSON LA, GRAYSTON SJ, PATERSON E., 2000. Effects of grazing on the roots and rhizosphere of grasses. in *Grassland ecophysiology and grazing ecology*, ed G. Lemaire, A. de Moraes, C. Nabinger, PC de F Carvalho, CAB international, 61-84.
- DAWSON L. A., THORNTON B., PRATT S. M. and PATERSON E., 2003. Morphological and topological responses of roots to defoliation and nitrogen supply in *Lolium perenne* and *Festuca ovina*, *New Phytologist*, 161 : 811–818. www.newphytologist.org
- DEINUM, B., 1985. Root mass of grass swards in different grazing systems, *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 33, 4, 377-384
- DELAGARDE, R; PEYRAUD, JL; DELABY, L; FAVERDIN, P., 2000. Vertical distribution of biomass, chemical composition and pepsin - cellulase digestibility in a perennial ryegrass sward: interaction with month of year, regrowth age and time of day , *Animal Feed Science and Technology* , 84, 49-68.
- DIAZ S. and CABIDO M., 1997. Plant functional types and ecosystem functions in relation to global change. *Journal of Vegetation Science* 8,. 463–474.
- DURU M., COLOMB B., CRANSAC Y., FARDEAU J.C., JULIEN J.L., ROZIERE M., 1993 a. Pédoclimat, fertilisation et croissance des prairies permanentes au printemps. 1- Variabilité de la nutrition minérale, *Fourrages*, 133, 23-41.
- DURU M., JUSTES E., LANGLET A., TIRILLY V., 1993 b. Comparaison des dynamiques d'apparition et de mortalité des organes de fétuque élevée, dactyle et luzerne (feuilles, tiges et tiges), *Agronomie*, 13, 237-252.
- DURU M., DUCROCQ H., TIRILLY V., 1995. Modelling growth of cocksfoot (*Dactylis glomerata* L.) and tall fescue (*Festuca Arundinacea* Schreb.) et the end of spring in relation to herbage nitrogen status, *Journal of Plant Nutrition*, 18, 2033-2047
- DURU M., BALENT G., GIBON A., MAGDA D., THEAU J.P., CRUZ P., JOUANY C., 1998. Fonctionnement et dynamique des prairies permanentes. Exemple des Pyrénées centrales, *Fourrages*, 153, 97-113.
- DURU M, TALLOWIN J, CRUZ P., 2005. Functional diversity in low input grassland farming systems: characterisation, effect and management. In: Lillak R, Viiralt R, Linke A, Geherman V (eds) *Integrating efficient grassland farming and biodiversity*, vol 10. EGF, Tartu, 199–210.
- GASTAL F., DAWSON L.A., THORNTON B., 2010. Responses of plant traits of four grasses from contrasting habitats to defoliation and N supply *Nutr Cycl Agroecosyst* (2010) 88:245–258, DOI 10.1007/s10705-010-9352-x
- GASTAL F., LEMAIRE G., 2015. Defoliation, Shoot Plasticity, Sward Structure and Herbage Utilization in Pasture: Review of the Underlying Ecophysiological Processes *Agriculture* **2015**, 5, 1146-1171; doi:10.3390/agriculture5041146
- KLEPPER, B; BELFORD, RK; RICKMAN, RW, 1984. Root and Shoot Development in Winter-Wheat, *Agronomy Journal*, 76, 1, 117-122
- LEMAIRE G. et SALETTE J. , 1984. Relation entre dynamique de croissance et dynamique de prélèvement d'azote pour un peuplement de graminées fourragères. I. Étude de l'effet du milieu, *Agronomie*, 4 (5), 423-430.
- MAWDSLEY, J.L. and BARDGETT, R.D. (1997) Continuous defoliation of perennial ryegrass (*Lolium perenne*) and white clover (*Trifolium repens*) and associated changes in the microbial population of an upland grassland soil. *Biology and Fertility of Soils* 24, 52–58.

MEDINA-ROLDAN E; BARDGETT, R D., 2011. Plant and soil responses to defoliation: a comparative study of grass species with contrasting life history strategies *PLANT AND SOIL* Volume: 344 Issue: 1-2 Pages: 377-388 Published: JUL 2011

PILON R., PICON-COCHARD C., BLOOR J. M. G., REVAILLOT S., KUHN E., FALCIMAGNE R., BALANDIER P., SOUSSANA J.-F., 2013. Grassland root demography responses to multiple climate change drivers depend on root morphology, *Plant Soil* 364:395–408 DOI 10.1007/s11104-012-1371-8

RICHARDS, J.H. Physiology of plants recovering from defoliation. In *Proceedings of the XVII International Grassland Congress*, Palmerston North, New Zealand, 8–21 February 1993; New Zealand Grassland Association: Palmerston North, New Zealand, 1993; pp. 85–94.

RUGET F., NOVAK S., GRANGER S., 2006. Du modèle STICS au système ISOP pour estimer la production fourragère. Adaptation à la prairie, application spatialisée. *Fourrages*, 186, 241-256.

RUGET F., SATGER S., VOLAIRE F., and LELIEVRE F., 2009. Modeling Tiller Density, Growth, and Yield of Mediterranean Perennial Grasslands with STICS, *Conference Information: 1st International Workshop on Summer Dormancy in Grasses - Coping with Increasing Aridity and Heat under Climate Change*, Date: APR 06-08, 2009 Samuel Roberts Nobel Fdn Ardmere OK, *Crop Sci.* 49:2379-2385.

SINGELS A., de JAGER J.M., 1991., Refinement and validation of the PUTU wheat crop growth model 2. Leaf area expansion, *South African Journal of Plant and Soil*, 8:2, 67-72.
<http://dx.doi.org/10.1080/02571862.1991.10634582>

STRULLU Loïc; BEAUDOIN Nicolas; THIÉBEAU Pascal; JULIER Bernadette; MARY Bruno; RUGET Françoise; RIPOCHE Dominique; LOUARN Gaëtan, Simulation of alfalfa biomass, N accumulation and reserve remobilisation under contrasting management with the STICS model, soumis.

THEAU J.P., COLENO F.C., DURU M., RAUZY Y., 1998. L'utilisation de l'herbe pâturée et fauchée en référence au potentiel de production des prairies, *Fourrages*, 156, 589-601.

VOLDER A., GIFFORD R M . and EVANS J R ., 2007. Effects of elevated atmospheric CO₂, cutting frequency, and differential day/night atmospheric warming on root growth and turnover of *Phalaris swards* *Global Change Biology* (2007) 13, 1040–1052, doi: 10.1111/j.1365-2486.2007.01321.x

WEDDERBURN ME, CRUSH JR, PENGELLY WJ & WALCROFT JL., 2010. Root growth patterns of perennial ryegrasses under well-watered and drought conditions, *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 53:4, 377-388, DOI: 10.1080/00288233.2010.514927

YANG JZ, MATTHEW C, ROWLAND RE 1998. Tiller axis observations for perennial ryegrass (*Lolium perenne*) and tall fescue (*Festuca arundinacea*): number of active phytomers, probability of tiller appearance, and frequency of root appearance per phytomer for three cutting heights. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 41: 11_17.

ANNEXE

DÉFINITION DES PRINCIPALES VARIABLES et des PARAMÈTRES spécifiques

Pour les variables, il s'agit essentiellement d'un rappel synthétique concernant leurs définitions et leurs relations entre elles. Certaines ne sont utilisées que pour les cultures fauchées, d'autres sont générales, mais revêtent un intérêt particulier pour les plantes qui repoussent après coupe (fauchées ou pâturées).

a. signification des principales variables

variables globales, liées aux fractions récoltées

masec = cumul de dltams¹ - mafeuiltombe

mafruit² = masec - msresjaune - msneojaune

msrec_fou = masec - msneojaune - msresjaune - msresiduel

masectot = cumul de masec(n) = tout ce a été produit et n'est pas tombé après sénescence

répartition entre organes aériens feuilles, tiges, réserves

pour rappel (car semblable aux autres cultures), définition des variables

masecveg = masec³

mafeuil = masecveg / (tigefeuil + 1)

mafeuilverte = min(laiajour / slamax * 100, (masecveg - mafeuiljaune))

matigestruc⁴ = matigestruc + max(tigefeuil * (mafeuil - mafeuilp), 0.)

où mafeuilp est mafeuil de la veille (précédent)

L'accroissement de la tige se fait à travers la répartition de la croissance quotidienne selon le rapport tige feuille : il s'agit d'une évolution progressive, puisque c'est l'accroissement quotidien qui est géré par un paramètre de répartition. La priorité est donnée aux feuilles pour les monocotylédones, et aux tiges pour les dicotylédones masecveg est réparti entre mafeuil, matigestruc et resperenne, qui est la fraction restante. La fraction resperenne correspond en partie aux réserves carbonées de la version "réserves", réserves qui sont réparties entre aérien et souterrain.

fractions sénescentes

variables

dltamstombe = dltamsen * abscission

mafeuiltombe = mafeuiltombe + dltamstombe

mafeuiljaune = mafeuiljaune + dltamsen - dltamstombe

mafeuiljaune = msneojaune

paramètres

vitsenres : vitesse de sénescence des parties laissées sur le terrain lors de la coupe (parties résiduelles)

b. paramètres spécifiques aux prairies, paramètres des coupes

Pour mémoire, les paramètres d'initialisation, communs avec les cultures installées, sont rappelés en note. ⁵

stadecoupedf : stade phénologique de coupe

julfauche : jour de coupe en numéro de jour de l'année

tempfauche : somme de température pour chercher à déclencher la première coupe ou entre coupes

hautcoupe : hauteur de coupe (cm)

laresiduel : indice foliaire résiduel

msresiduel : matière sèche résiduelle (t/ha)

mscoupemini : matière sèche récoltable minimale pour déclencher la coupe une fois la date atteinte

anitcoupe : apport d'azote à la coupe (kg N/ha) du même engrais que celui apporté aux autres apports

¹ accroissement quotidien de matière sèche

² définition différente de celle de cette variable pour les autres cultures

³ sauf particularité de récolte partielle masecveg = masec - pdsfruittot / 100

⁴ matigestruc ne contient pas de réserves

⁵ rappel paramètres initiaux : masec0 et lai0, QNplante0, zrac0, resperenne0 et magrain0, densinitial(1) à (5)