

Modéliser l'impact de la sécheresse sur la production fourragère par le modèle STICS

Françoise Ruget¹, Nadine Brisson²

CSE (1) et Agroclim (2), Bâtiment climat, INRA, Site Agroparc, F-84914 Avignon cedex 9 ;
francoise.ruget@avignon.inra.fr

Résumé

Les effets de la sécheresse sur la production fourragère peuvent être estimés par les modèles de culture tels que STICS, et ce, à différentes échelles spatiales correspondant à différents degrés de précision de renseignement des entrées du modèle. STICS, dans sa version 3, de 1998, est employé depuis début 2000 pour estimer des variations interannuelles de production de petites zones géographiques nommées régions fourragères. Pour cet usage, il est muni d'un jeu de paramètres construit à partir de multiples situations de plaine au printemps et en été, et alimenté par une base de données caractérisant le sol et les pratiques (fauches ou pâturages, fertilisation), ainsi que le climat dont le référentiel est modifié périodiquement (par exemple l'introduction de l'année 2003 modifie le positionnement relatif des années sèches). Cet outil donne de bonnes estimations des variations interannuelles de production, y compris pour les années très sèches que nous avons connues récemment. Cependant, si les estimations sur l'ensemble de l'année sont satisfaisantes, les dynamiques annuelles le sont nettement moins, en particulier pour ce qui concerne la reprise après sécheresse, généralement trop tardive. En s'approchant des processus grâce à des ajouts ou des raffinements de fonctions, on espère améliorer les estimations pendant l'ensemble de la période estivale, qu'elle soit légèrement productive ou non productive. Dans ce dernier cas, on cherchera à mieux représenter les processus d'entrée en période non productive, de survie et de redémarrage au retour des pluies, y compris d'éventuelles mortalités de talles observées de plus en plus fréquemment sur le terrain. Un certain nombre de nouveaux processus ont été introduits ou sont en cours de formalisation et doivent être paramétrés, testés, validés pour élargir la zone d'utilisation possible du modèle aux conditions méditerranéennes ainsi qu'aux périodes futures. Par ailleurs, l'ajout de fonctions plus mécanistes, plus sensibles aux effets du milieu et nécessitant des données d'entrée plus précises doit être étudié soigneusement avant leur utilisation dans des applications spatialisées.

1. Introduction : besoins nationaux et locaux d'estimation, méthodes et outils disponibles

La production fourragère a un statut particulier en raison de la dépendance directe de la vie des troupeaux par rapport à cette ressource, qui s'échange peu à cause de son fort volume et de sa faible valeur financière : 95% de la production est autoconsommée. C'est pourquoi cette ressource donne lieu à des estimations très attendues, car sa variabilité interannuelle peut remettre en cause l'équilibre des exploitations d'élevage où la fourniture de fourrages doit correspondre au plus près aux besoins des troupeaux.

Les estimations nationales ou régionales classiques des ressources fourragères sont le résultat d'avis d'experts, se déplaçant sur le terrain, avec les risques de subjectivité que cela entraîne et la difficulté de réaliser une intégration spatiale fiable, mais aussi avec la qualité liée à la connaissance du terrain qui permet la prise en compte de certains événements climatiques rares ou localisés. Les estimations classiques du SCEES, donnant lieu à la publication des résultats nationaux de la Statistique Agricole Annuelle (SAA), sont faites par cette méthode de synthèse d'observations de terrain réparties dans toute la France.

Les modèles de fonctionnement de culture peuvent aussi fournir de telles estimations, puisqu'ils ont les qualités d'objectivité et d'immédiateté. Mais ces qualités sont assorties du risque d'estimations fausses, qu'elles soient biaisées (formalismes, paramétrage) ou dispersées (données d'entrée approximatives) : les sorties de modèles ne sont utiles que si on peut leur accorder une certaine confiance.

Les modèles permettant d'estimer la production des prairies sont nombreux. LINGRA (SCHAPENDONK *et al.*, 1998) et ses versions plus récentes LINGRA-CC (RODRIGUEZ *et al.*, 1999) et GrazeGro (BARRETT *et al.*, 2005), ainsi que PASIM (RIEDO *et al.*, 1998), ont été construits pour estimer la production de pousses sur des durées relativement courtes et sont donc particulièrement adaptés à la simulation de systèmes intensifs : ils sont calés et validés dans des conditions de coupes nombreuses (4 à 6 coupes par an) qui excluent les pertes de matière sèche par sénescence. Dans les modèles dont le but est de gérer l'alimentation des troupeaux (modèle australien : GrassGro (MOORE *et al.*, 1997), américain : SPUR (WIGHT et SKILES, 1987), français : Sépatou (CROS *et al.*, 2004)), ou des effluents d'élevage (danois : FASSET (JACOBSEN *et al.*, 1998)), la simulation du fonctionnement du couvert est assez simple (petit nombre d'équations et de paramètres), ce qui n'empêche pas de donner de bonnes estimations dans des conditions assez restreintes. Parfois, la simplicité des processus est surmontée par l'existence de paramètres de calage très efficaces (MCCALL et BISHOP-HURLEY, 2003). Mais ces modèles comme les modèles purement statistiques (TRNKA *et al.*, 2006) ont un domaine d'utilisation peu extensible. Le modèle de JOUVEN *et al.* (2006) est un des premiers exemples d'introduction des notions de traits fonctionnels caractérisant les types de prairie dans des modèles physiologiquement assez simples. Pour la plupart de ces modèles, le but n'est pas une large possibilité d'utilisation spatiale (pas d'échelle régionale), ni une grande gamme de climats.

2. Rappel des principes de STICS-ISOP

Le modèle STICS (version 3, qui sera nommée ici STICS-ISOP : BRISSON *et al.*, 1998) a pour but de représenter les effets du climat, des propriétés du sol (propriétés hydriques et capacités de minéralisation) et des pratiques agricoles sur la production de la culture et les consommations en eau et en azote associées, et ce pour un nombre important de cultures, principalement les cultures annuelles mais aussi les cultures pérennes comme les cultures fourragères et la vigne .

On peut schématiser le fonctionnement du modèle en disant qu'à un fonctionnement « primaire », qui ne fait intervenir que la température et le rayonnement pour définir une production dite « potentielle », s'appliquent des stress hydrique et azoté qui permettent d'estimer une production « réelle ». La prise en compte des stress hydrique et azoté passe par la simulation des fournitures d'eau et d'azote par le sol. Ces stocks sont accessibles par l'intermédiaire des racines (y compris les nodules des légumineuses) ; il est donc nécessaire de simuler la mise en place et le fonctionnement du système racinaire.

2.1. La version générique de base

– Production primaire

L'ensemble du calendrier de la culture est piloté par le module de développement, dont le rôle est de définir les différentes périodes du cycle. Ce calendrier, combiné à un effet direct de la température sur l'expansion foliaire, assure la dynamique potentielle de l'indice foliaire, capteur d'énergie, et donc moteur de fabrication de matière végétale. Le développement dépend essentiellement de la température, mais peut être affecté par la photopériode et les besoins en froid de la plante. La production quotidienne primaire est estimée comme le produit du rayonnement intercepté (par le couvert) par une efficacité de conversion, dépendant principalement de la température et secondairement du niveau de rayonnement (saturation).

– Stress hydrique et azoté

Le niveau des stress est estimé par confrontation entre offre et demande, aussi bien pour l'eau que pour l'azote. La demande en eau est estimée à partir de l'ETP Penman, tandis que la demande en azote est estimée à partir des courbes de dilution maximales de l'azote dans un couvert végétal en fonction de sa biomasse (les tissus jeunes sont riches en azote ; ils le sont de moins en moins en vieillissant : LEMAIRE et GASTAL, 1997). Pour les légumineuses, une partie de la demande peut être couverte par la fixation symbiotique. Les capacités d'absorption d'eau et d'azote de la plante dépendent de l'enracinement de la culture (colonisation du profil racinaire) et de la disponibilité en eau ou en azote dans le sol. Les stress agissent principalement sur la mise en place de l'indice foliaire qui détermine la quantité d'énergie absorbée et la conversion de l'énergie absorbée en matière sèche.

Le sol est un réservoir d'eau, d'azote minéral (localisés dans 5 horizons de sol au plus) et d'azote organique (dans l'horizon de surface). Les processus de minéralisation de l'humus et des apports organiques (résidus de culture, fumures organiques...) sont simulés à partir du modèle LIXIM (MARY *et al.*, 1999) incorporé dans STICS. La minéralisation dépend des conditions climatiques (température et humidité du sol) et de facteurs permanents du sol (teneurs en argile et en calcaire).

C'est l'ensemble de ces fonctions relatives à l'offre (enracinement, absorption d'eau, absorption d'azote) et aux capacités de la plante de s'adapter au déficit hydrique (rétroaction sur l'indice foliaire et la biomasse *via* les indices de stress) qui permet de prendre en compte l'effet des contraintes sur la production, ainsi que d'estimer les consommations et les fuites d'eau (drainage) et d'azote (lessivage).

2.3. Spécificités de la prairie et de l'application ISOP

– Fonctions

STICS a été adapté à la prairie (RUGET *et al.*, 1998 ; RUGET *et al.*, 2006) par des ajouts de fonctions physiologiques et de fonctionnalités prenant en compte :

- l'existence de techniques spécifiques : les fauches qui peuvent être déclenchées à des stades, dates ou sommes de température assez variables selon les systèmes fourragers mis en œuvre. La fauche peut-être retardée tant qu'une certaine quantité récoltable n'est pas atteinte. A chaque fauche (ou pâturage), un nouveau calendrier de développement est calculé, déterminant ainsi une cinétique de redémarrage ;

- la notion de biomasse récoltable qui exclut la composante sénescence ;

- la sénescence du couvert, basée sur le principe de la « durée de vie » (DURU *et al.*, 1995 ; CROS *et al.*, 2004) appliquée à la biomasse: disparition progressive de biomasse à partir d'une certaine somme de température. Cette notion n'est appliquée qu'à la biomasse mais pas à l'indice foliaire ;

- la possibilité de tenir compte d'une proportion de légumineuses pour la couverture des besoins en azote.

Signalons par ailleurs l'importance de la minéralisation de l'azote organique du sol, plus intense qu'en sol de grande culture à cause de la quantité d'humus sous prairie et des apports de fumure organique, souvent seul source d'azote minéral (pratiques de fertilisation minérale faible).

– Paramètres

Par convention, nous désignons par données d'entrée les variables qui caractérisent les situations locales et par « paramètres » celles qui ne varient pas dans l'ensemble d'un jeu de simulation (par exemple, la France entière). Climat et caractéristiques permanentes de sol, conditions initiales et caractéristiques techniques sont donc des données d'entrée, tandis que les paramètres caractérisent principalement la physiologie de la plante. La qualité des estimations provenant du modèle dépend de l'exactitude des processus simulés dans le modèle et de la précision des paramètres et données d'entrée.

Les principaux paramètres « plante » réestimés spécifiquement pour la prairie, ou qui pourraient l'être pour distinguer des espèces, concernent la mise en place d'indice foliaire (durées des phases, seuils de températures et vitesse de mise en place) ; l'efficacité de conversion du rayonnement (efficacité maximale, seuils de température), la sénescence (somme de température de début et vitesse de sénescence) ; les besoins en azote (travaux de LEMAIRE et SALETTE, 1984 ; LEMAIRE et DENOIX, 1987).

Le fichier plante utilisé dans l'application ISOP caractérise une prairie standard moyenne qui peut émettre des feuilles toute l'année (pas de blocage lié à la montée à graine). Ce paramétrage robuste, qui permet de maintenir le couvert vivant, même si aucune coupe n'a eu lieu, caractérise un fonctionnement multispécifique où une espèce peut prendre le relais d'une autre et où, au sein d'une espèce, les talles filles « végétatives » prennent le relais des talles qui sont montées et qui ont été décapitées par la fauche ou le pâturage. De ce fait, on n'atteint jamais le stade de fin d'émission de feuilles.

Ce jeu de paramètres a été construit sur 91 situations réparties en France et sur plusieurs années, avec ou sans irrigation et fertilisation, à différentes saisons, et validé sur 177 situations (RUGET *et al.*, 2006).

3. Intérêts et insuffisances de STICS-ISOP

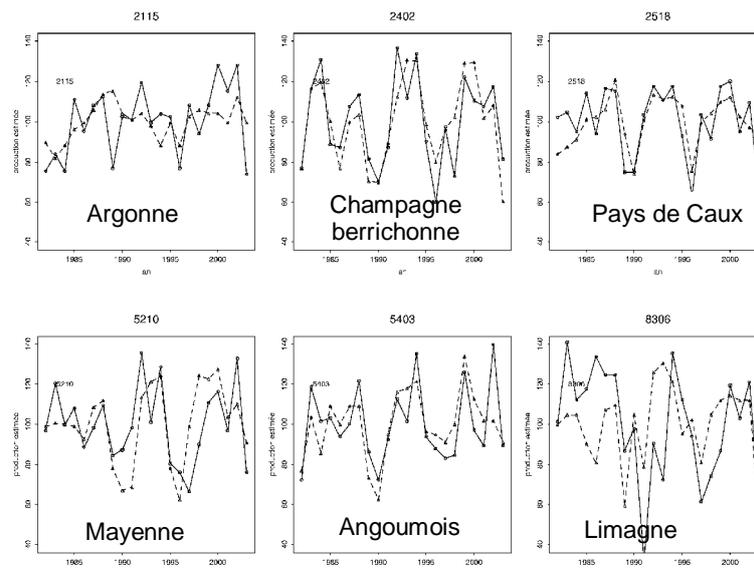
Le système ISOP (RUGET *et al.*, 2001 ; RUGET *et al.*, 2006) estime la variabilité interannuelle de production pour chaque région fourragère et l'évolution au cours de l'année de cette production, en valeur relative par rapport à la production « normale » de la même zone à la même date. Le modèle est alimenté par une base de données climat - sol - techniques construite spécifiquement (collaboration SCEES-INRA CSE et INFOSOL-Météo-France).

3.1. La variabilité de la production annuelle

En moyenne nationale sur 20 ans (de 1984 à 2003), selon les statistiques du SCEES, le rendement des prairies françaises est de 5 t/ha de MS avec des valeurs variant entre années de 3,6 à 6,1 t/ha (chiffres SAA, SCEES), ce qui correspond à un rapport amplitude/moyenne de 0,5. Les estimations ISOP donnent des valeurs absolues un peu plus élevées (moyenne nationale 6,7 ; minimum interannuel 3,8 ; maximum 9,2 t/ha), ce qui correspond, à cause des maxima plus élevés, à une variabilité plus forte (amplitude/moyenne de 0,8).

A l'échelle régionale (Figure 1), en valeur rapportée à la moyenne régionale, les estimations du modèle sont généralement proches des estimations des experts. Elles donnent de très grandes amplitudes de productions régionales : l'amplitude interannuelle de production se situe majoritairement entre 50 et 100% de la moyenne, avec quelques rares valeurs plus faibles, par exemple dans les montagnes régulièrement arrosées, et quelques valeurs plus élevées dans des zones sèches, souvent peu productives, essentiellement à cause des années très sèches 1989, 1990, 1996 et 2003.

FIGURE 1 – Exemples de variabilité interannuelle relative régionale, de 1982 à 2003, pour quelques régions fourragères.



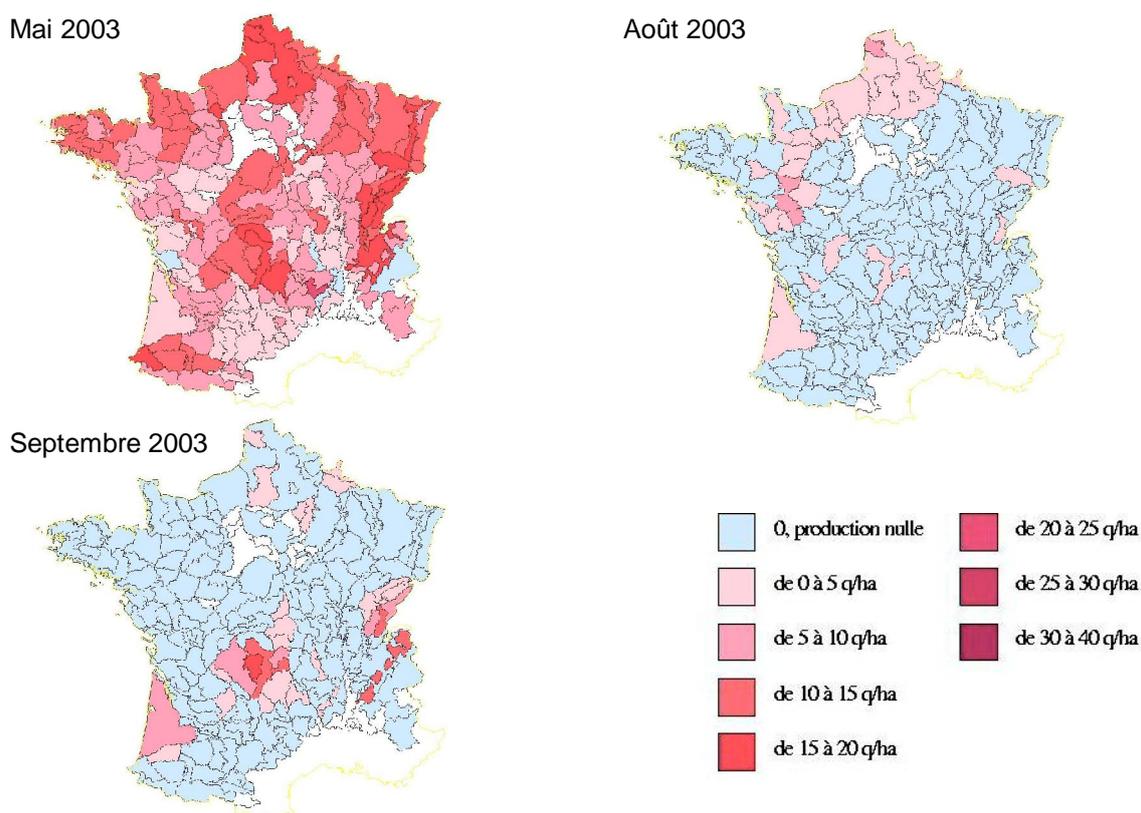
3. 2. La variabilité de production entre régions

Les intensités de sécheresse sont souvent très différentes selon les régions, et ISOP le montre de façon tout à fait satisfaisante. Les zones touchées par la sécheresse sont différentes selon les années : celle de 1996 a affecté principalement la moitié nord de la France, tandis que celle de 1989 a affecté toute la France, mais surtout le Sud-Ouest. Les années 1990 et 1991 ont respectivement affecté la moitié ouest et le quart nord-est de la France. ISOP montre bien ces différences.

3.3. La variabilité de production au cours de l'année

Les grandes tendances semblent simulées correctement par ISOP, en particulier à l'échelle régionale ; l'entrée en sécheresse paraît assez fiable, en particulier en 2003 et en 2005. En effet, en 2003 par exemple (Figure 2), les cartes de productions mensuelles nationales font apparaître des valeurs très faibles dès le mois de mai sur une grande partie de la France ainsi que l'arrêt quasi général de croissance en août, ce qui correspond bien aux observations locales. Cependant, la reprise très faible en septembre est contraire aux observations.

FIGURE 2 – Cartes de productions mensuelles des mois de mai , août et septembre 2003.



Ainsi la période estivale non productive et la reprise ne sont pas simulées de façon précise par STICS-ISOP. Différentes causes peuvent expliquer de mauvaises estimations au moment de la reprise. D'abord, selon l'indice foliaire restant au début de la période sèche, deux cas contraires peuvent être simulés :

- En période sèche, l'absence de sénescence de l'indice foliaire peut conduire, si aucune coupe n'intervient, à des conditions de reprise très favorables dès le retour des pluies d'automne puisque le feuillage est déjà en place. Ceci est plausible pour des périodes de sécheresse courtes mais certainement non valable pour des périodes plus longues où il peut y avoir détérioration d'une partie du couvert végétal.

- Au contraire, si une fauche intervient, les reprises simulées sont trop lentes (exemple de 2003), empêchées par les limitations d'indice foliaire par son calendrier de développement et les rétroactions des stress hydrique et azoté sur la croissance foliaire. Cela peut provenir d'un manque de réactivité de la simulation au retour à des conditions meilleures (persistance de l'indice de stress azoté en particulier).

Ensuite, d'autres points méritent attention et révision :

- Le paramétrage du sol, tel qu'il est proposé dans le système ISOP, peut engendrer une surconsommation de l'eau par évaporation directe, nous indiquant l'intérêt d'une revisite des fonctions de pédotransfert à partir de la carte pédologique.

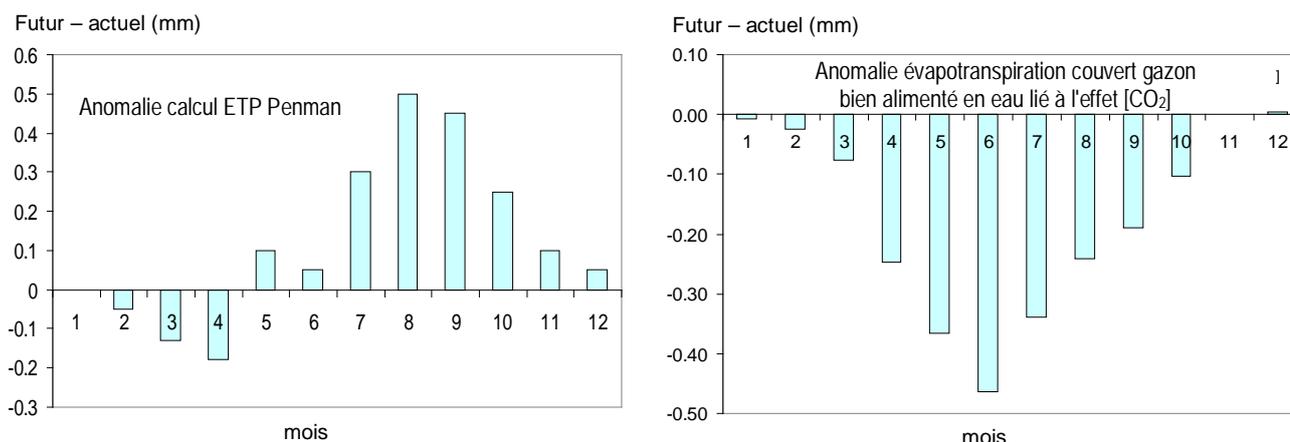
- L'absence de prise en compte des réserves carbonées et surtout azotées pour la reprise est également une source importante d'erreur du modèle.

Ces dysfonctionnements justifient la modélisation de plusieurs processus physiologiques de façon plus mécaniste. Si le modèle, dans une version simple, à nombre de paramètres relativement faible, est capable de donner une bonne estimation de la variation interannuelle de production régionale, il n'est pas toujours satisfaisant pour ce qui est de la reprise après sécheresse.

4. Mieux prendre en compte l'impact de la sécheresse sur la production et la survie des prairies : vers un modèle plus général géographiquement et dans le temps

L'impact de la sécheresse sur la prairie comporte plusieurs composantes. La première, à court terme, concerne la physiologie de la plante et sa capacité à réagir instantanément à la sécheresse atmosphérique et édaphique par les jeux plus ou moins coordonnés de la fermeture stomatique et de l'absorption racinaire. La seconde, à moyen terme, concerne la mise en adéquation de la morphologie de la plante avec une situation de manque d'eau au niveau de ses surfaces d'échange aériennes et racinaires : réduction de l'indice foliaire, stimulation de l'exploration du sol par les racines. La troisième peut être rangée dans le « long terme » puisqu'elle a trait au caractère pérenne de la plante fourragère et concerne la capacité de la plante à pouvoir survivre dans des conditions adverses de sécheresse afin de rétablir, quand les conditions s'améliorent, une colonisation de l'espace la plus complète possible. Enfin, il existe une dernière composante qui agit à toutes ces échelles temporelles et s'appuie sur la liaison intime qui existe entre l'eau et l'azote à la fois dans le sol et dans la plante. Ainsi, le déficit en eau de l'agrosystème va d'abord agir sur le statut azoté des plantes car l'azote minéral devient moins mobile dans le sol ; de plus, la minéralisation de la matière organique du sol, source très importante d'azote minéral dans les systèmes prairiaux, est fortement ralentie par la sécheresse. A l'intérieur de la plante, il existe également des interactions entre stress hydrique et azoté, qu'il est important de bien analyser (GONZALES-DUGO, 2006). Si la version 3 de STICS traite les effets du stress sur la physiologie et la morphologie, ainsi que certains éléments des interactions eau x azote, certains autres aspects avaient été délaissés, rendant notamment peu fiables les simulations dans des conditions de sécheresse intense et durable, telles que celles rencontrées en climat méditerranéen. Ces trois dernières années, des avancées ont été incorporées dans le modèle STICS (Brisson *et al.*, 2006) ou sont en cours d'incorporation (projet CEAPC du programme national PNBC, projet européen PERMED). Nous proposons de les expliciter en reprenant la classification énoncée en termes de temps de réponse, incorporant les aspects liés à l'azote. Jusqu'à présent, la variabilité génétique n'avait été prise en compte qu'à travers le développement phénologique et foliaire ; d'autres pistes pouvant être explorées seront mentionnées dans la description des formalismes ci-après.

FIGURE 3 – Calcul des anomalies mensuelles d'ETP (formule de Penman) entre climat actuel et futur (scénario A2 d'ARPEGE-Climat) dans le Bassin de la Seine (a) et anomalie liée uniquement à l'effet de l'augmentation de la résistance stomatique simulée par STICS (ETP : ETR d'un couvert de fétuque bien alimentée en eau et maintenue à un LAI de l'ordre de 3). Données du projet GICC-Seine (DUCHARNE *et al.*, 2004).



4.1. Impact sur la physiologie

– Calcul des besoins en eau de la plante

Les besoins en eau d'une prairie bien développée correspondent à la définition de l'ETP, et les termes empiriques de la formule de Penman (fonction de vent) ont été ajustés, dans les années 70,

sur la consommation en eau de couverts de fétuque bien alimentés. Par la suite, des études ont montré qu'il était important d'introduire les spécificités de la plante de façon plus mécaniste en faisant appel à un formalisme de type résistif (PENMAN-MONTEITH). Nous sommes allés un peu plus loin (modèle de SHUTTLEWORTH et WALLACE explicité dans BRISSON *et al.*, 1998) de façon à tenir compte i) des déterminismes différents des besoins pour l'eau directement évaporée par le sol par rapport à l'eau de transpiration et ii) de la dynamique de l'indice foliaire et de la hauteur du couvert. Ainsi, à l'estimation des besoins en eau par forçage de l'ETP (ISOP), il est possible de substituer ce nouveau mode de calcul qui nécessite de fournir les variables de vent et d'humidité.

Ce formalisme présente également l'avantage de permettre la prise en compte de la régulation stomatique liée à l'augmentation de la teneur en CO₂ de l'atmosphère, à l'origine d'une meilleure efficacité de l'eau. Si l'on considère les impacts du changement climatique, cet effet physiologique est antagoniste de l'augmentation de la demande évaporatoire consécutive au réchauffement. Nous avons ainsi pu montrer que, selon la période de l'année, ces deux effets se compensaient (Figure 3).

– La fermeture stomatique et l'absorption d'eau

La fermeture stomatique, liée au déficit hydrique édaphique, intervient de façon très indirecte dans STICS-ISOP comme modulateur du seuil de réserve en eau du sol en deçà duquel le rapport transpiration réelle/transpiration potentielle (ou indice de stress stomatique) s'écarte de 1. C'est le potentiel de fermeture stomatique qui intervient, au même titre que la profondeur racinaire, le niveau de la demande climatique et le rayon des racines, dans le calcul de ce seuil. Une analyse de sensibilité montre qu'une variation de ce potentiel entre -0,5 et -2,5 MPa (BRISSON, 1998) peut faire varier ce seuil de 25 à 45% de la réserve utile, toutes choses égales par ailleurs. Il pourrait donc être intéressant de tenir compte de cette propriété stomatique dans le paramétrage génétique.

L'absorption d'eau totale, égale à la transpiration réelle, résulte du calcul précédent. Elle affecte l'ensemble de la zone racinaire de façon proportionnelle à la quantité de racines efficaces présentes, en excluant les couches de sol trop sèches, de teneur en eau inférieure au point de flétrissement. La densité efficace de racines (de 0,5 cm/cm³) est faible par rapport aux densités classiquement rencontrées sous prairie. Ainsi, la densité racinaire sous prairie n'est pas vraiment un facteur limitant de l'absorption d'eau et d'azote, contrairement à la profondeur explorée par le système généralement faible mais très variable selon les espèces. Aussi, la croissance du front racinaire est-elle un paramètre génétique très discriminant.

– Interactions avec le stress azoté

- Indice de stress instantané : meilleure réactivité de la plante à la levée des stress

Dans STICS-ISOP c'est l'indice de nutrition N (INN) tel que défini par LEMAIRE et GASTAL (1997) qui, lorsqu'il est inférieur à 1, limite le fonctionnement des plantes. Contrairement aux indices de stress hydrique, comme par exemple l'indice stomatique mentionné précédemment, l'INN est un indicateur « d'état » et non un indicateur de « flux ». Un nouvel indice de stress azoté, de type « flux », a été proposé dans la dernière version de STICS s'appuyant sur les travaux de DEVIENNE-BARRET *et al.* (2000). Il correspond au rapport entre absorption réelle et absorption « critique », permettant de couvrir les besoins métaboliques. Nous avons pu montrer que cet indice était plus réactif à la levée des stress, et en particulier du stress hydrique, et se rapproche de l'INN calculé sur les parties fonctionnelles de la plante.

- Interactions entre stress

Au sein de la plante, les simplifications imposées par la modélisation nous obligent à combiner les stress hydrique et azoté de façon simple : multiplication ou minimum des stress. Nous avons pu tester, dans le cadre du projet CEAPC (RAMON, 2005), que les deux formalismes étaient équivalents à cause de la liaison édaphique entre déficit en eau et en azote et des rétroactions qui, en limitant la croissance de la plante, limitent les stress.

4.2. Impact sur le développement et la croissance

Des formalismes, présents mais activés ou non auparavant, peu importants en conditions tempérées, deviennent très utiles en conditions chaudes et/ou sèches.

– La durée de vie foliaire

Sur le principe de la sénescence de la matière sèche, déjà introduite dans la version 3, la notion de durée de vie a été appliquée aux feuilles, ce qui donne les outils pour une simulation plus réaliste de la réduction d'indice foliaire en dehors de la phase de disparition du couvert en fin de cycle reproducteur. Cela implique, pour la cohérence des calculs, que la sénescence de matière sèche (avec retour des feuilles à la litière) est calculée à partir de la sénescence foliaire et de la surface spécifique des feuilles.

– La température de culture plutôt que celle de l'air comme pilote du développement

Le développement peut être piloté par la température de la culture, elle-même calculée à partir d'un bilan d'énergie simplifié de la culture. Celui-ci intègre le statut hydrique du couvert puisque la température de la culture est maintenue proche de celle de l'air tant que la transpiration est potentielle et s'en éloigne lorsque la plante se trouve en conditions sèches et qu'elle ne dispose plus d'assez d'eau pour maintenir sa température au niveau de celle de l'air. Ainsi, en conditions sèches, le développement et la croissance sont accélérés jusqu'à un optimum thermique.

– Les optimums et extrêmes thermiques

Jusqu'à présent, développement et croissance n'étaient pas limités aux températures élevées (jamais rencontrées). Dans un souci d'application en conditions plus chaudes actuelles (zones méditerranéennes) ou futures (changement climatique), nous avons introduit des limitations des fonctions de croissance et développement aux températures élevées : au-delà de l'optimum, les phénomènes sont ralentis jusqu'à s'annuler à une température définissant un nouveau seuil d'arrêt des processus de développement (durées de stades, durée de vie des feuilles) et croissance (de l'indice foliaire).

– Expansion et sénescence foliaire

Le premier effet du stress hydrique est de réduire l'expansion foliaire, ce qui permet en retour de limiter ce stress par un ajustement des besoins en eau à l'offre par l'intermédiaire de la variable LAI. A l'instar de la fermeture stomatique, cet effet dépend dans le modèle d'un potentiel de turgescence, seuil qui peut varier selon les espèces et variétés, définissant l'intensité de l'adaptation morphologique à la sécheresse (Voltaire *et al.*, 1998). En revanche, contrairement à d'autres espèces, la sénescence foliaire des plantes fourragères ne semble pas accélérée par le stress hydrique, ce qui justifie, pour le moment, le non-emploi de cette fonction.

– Croissance et turn-over racinaire (réservoir d'azote)

Dans STICS-ISOP, c'est le profil de densité racinaire efficace qui est simulé, ce qui semble assez pertinent pour les couverts prairiaux, compte tenu des fortes densités rencontrées. Sur ces densités, le type de sol joue finalement assez peu, ce qui évite, même dans un souci d'amélioration, d'employer un formalisme plus élaboré de densité racinaire fonction de la densité du sol. Il y aurait cependant un avantage à simuler la dynamique réelle du système racinaire, telle que le permet le modèle STICS actuel : prendre en compte la mortalité racinaire à la coupe, source de fragilité potentielle du couvert en cas de forte sécheresse mais également réservoir d'azote (après minéralisation) pour la reprise.

Le stress hydrique n'a que peu d'impact sur la croissance racinaire, ce qui tend à le favoriser par rapport au feuillage qui, lui, subit de plein fouet la sécheresse.

4.3. Sécheresse, arrêt de végétation, reprise et survie

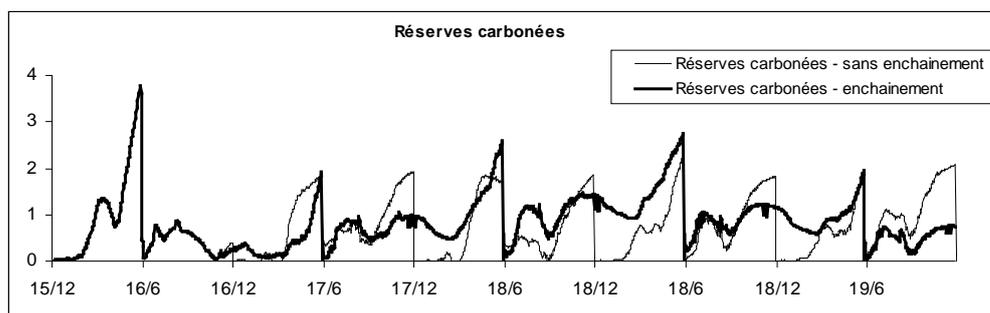
– L'arrêt de végétation

Il peut être la conséquence "simple" de la sécheresse, -et ce cas peut être traité dès maintenant, car l'absence d'eau induit un arrêt de la croissance,- ou le résultat d'une dormance (Voltaire *et al.*, 2006), et ce point ne sera pas intégré dans l'immédiat.

– La prise en compte des réserves

Les réserves sont calculées dans STICS comme le complémentaire entre d'une part la biomasse accumulée et d'autre part la croissance structurale des feuilles et des tiges, ce qui nécessite un dimensionnement plus ou moins implicite de ces compartiments (proportion tige/feuilles en matière sèche structurale et limites haute et basse de la surface spécifique, DURU *et al.*, 1987). Les réserves ne sont pas localisées et peuvent être remobilisées quand le potentiel de croissance ne peut être satisfait par les assimilats néoformés. On trouve des valeurs de stockage de l'ordre de 2 t/ha et la conservation de ces valeurs d'une année sur l'autre (Figure 4) est importante. Dans l'exemple présenté, la période estivale comme le démarrage printanier apparaissent comme des périodes consommatrices de réserves carbonées et azotées.

FIGURE 4 – Calcul de la dynamique des réserves d'une prairie de fétuque à Montpellier de 1994 à 2003 en faisant l'hypothèse (trait fin) que les réserves sont réinitialisées à chaque début d'année ou (trait gras) qu'elles ne sont pas réinitialisées.



– La mortalité des talles

Lorsque la sécheresse se prolonge, les réserves peuvent ne pas être suffisantes pour permettre la survie de l'ensemble du peuplement de talles. Une étude est en cours, dans le cadre du projet européen PERMED, qui devrait permettre de proposer un formalisme pour la mortalité des talles, basé sur le concept source/puits et l'épuisement des réserves qui empêcherait le redémarrage ou la mortalité de fractions du couvert après sécheresse .

Conclusion

Si l'introduction de ces formalismes ouvre de très larges possibilités supplémentaires en termes de situations qui peuvent être simulées, elle nécessite le calage de paramètres nouveaux, voire la réévaluation de paramètres dont la signification a été modifiée par l'ajout de ces fonctionnalités nouvelles. C'est le cas de la sénescence de matière sèche qui ne s'applique plus qu'à une petite fraction de la matière sèche présente, ainsi que des formalismes qui régissent la demande des organes (surface spécifique et proportion tige/feuilles en matière sèche structurale), qui ont une action importante sur le ralentissement de croissance et la sénescence sur pied, essentielle à estimer en repousse longue. L'introduction de processus nouveaux doit permettre de mieux simuler le comportement des couverts soumis à des sécheresses intenses et durables ou à des températures très élevées, mais nécessite l'usage d'expérimentations spécifiques, dont certaines sont déjà en cours.

Références Bibliographiques

- BARRETT P.D., LAIDLAW A.S., MAYNE C.S. (2005) : "GrazeGro : a European herbage growth model to predict pasture production in perennial ryegrass swards for decision support". *Europ. J. Agronomy*, 23, 37-56.
- BRISSON N. (1998) : "An analytical solution for the estimation of the critical available soil water fraction for a single layer water balance model under growing crops", *Hydrology And Earth System Sciences* 2 (2-3), 221-231.
- BRISSON N., MARY B., RIPOCHE D., JEUFRROY M.H., RUGET F., NICOUILLAUD B., GATE P., DEVIENNE-BARRET F., ANTONIOLETTI R., DÜRR C., RICHARD G., BEAUDOIN N., RECOUS S., TAYOT X., PLÉNÉT D., CELLIER P., MACHET J.-M., MEYNARD J.M., DELÉCOLLE R. (1998) : "STICS : a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parametrization applied to wheat and corn", *Agronomie*, 18, 311-346.

- BRISSON N., WERY J., BOOTE K.W. (2006). "Fundamental concepts of crop models illustrated by a comparative approach". In "Working with crop models", D. Wallach, D. Makowsky, J.J. Jones Eds. Elsevier : 261-284.
- CROS M.J., DURU M., GARCIA F., MARTIN-CLOUAIRE R. (2004) : "Simulating management strategies: the rotational grazing example", *Agricultural Systems*, 80, 23-42.
- DEVIIENNE-BARRET F., JUSTES E., MACHET J. M., MARY B. (2000) : "Integrated control of nitrate uptake by crop growth rate and soil nitrate availability under field conditions?" *Ann Bot* 2000 86: 995-1005.
- DUCHARNE A. *et al.*, (24 auteurs) (2004). "Influence du changement climatique sur le fonctionnement hydrologique et biogéochimique du bassin de la Seine". Rapport GICC.60pp.
- DURU M. (1987) : "Croissance hivernale et printanière de prairies permanentes pâturées en montagne. I. Écophysologie du dactyle", *Agronomie*, 7 (1), 41-50.
- DURU M., DUCROCQ H., TIRILLY V. (1995) : "Modelling growth of cocksfoot (*Dactylis glomerata* L.) and tall fescue (*Festuca arundinacea* Schreb.) at the end of spring in relation to herbage nitrogen status", *J. Plant Nutrition*, 18, 2033-2047.
- GONZALEZ-DUGO M.-V. (2006) : "Effet du déficit hydrique sur la nutrition azotée chez les graminées fourragères", Thèse soutenue le 31 mars 2006, Université de Poitiers, 179 p.
- JACOBSEN B.H., Petersen B.M., Berntsen J., Boye C., Sorensen C.G., Sogaard H.T., Hansen J.P. (1998) : "An integrated economic and Environmental Farm Simulation Model FASSET", Report n°102, Danish Institute of Agricultural and Fisheries Economics, Copenhagen, Denmark.
- JOUVEN M., CARRÈRE P., BAUMONT R. (2006) : "Model predicting dynamics of biomass, structure and digestibility of herbage managed permanent pastures. I. Model description". *Grass and Forage Science*, 61, 112-124.
- LEMAIRE G., SALETTE J. (1984) : "Relation entre dynamique de croissance et dynamique de prélèvement d'azote pour un peuplement de graminées fourragères. I. Etude de l'effet du milieu", *Agronomie*, 4, 423-430.
- LEMAIRE G. DENOIX A. (1987) : "Croissance estivale ne matière sèche de euplements de fétuque élevée (*Festuca Arundinacea* Schreb.) et de datyle (*Dactylis Glomerata* L.) dans l'Ouest de la France." *Agronomie*, 7(6), 373-380 et 381-389.
- LEMAIRE G., GASTAL F. (1997) N uptake and distribution in Plant canopies In : G.LEMAIRE (ed), *Diagnosis of the Nitrogen Status in Crop*. Springer-verlag, berlin, 3-43.
- MARY B., BEAUDOIN N., JUSTES E., MACHET J.M. (1999) : "Calculation of nitrogen mineralization and leaching in fallow soil using a simple dynamic model", *European Journal of Soil Science* 50 (4): 549-566.
- MCCALL D.G., BISHOP-HURLEY G.J. (2003) : "A pasture growth model for use in a whole-farm dairy production model". *Agric. Syst.*, 76, 1183-1205.
- MOORE A. D., DONNELLY J.R., FREER M. (1997) : "GRAZPLAN : decision support systems for Australian grazing enterprises. III. Pasture growth and soil moisture submodels, and the GrassGro DSS". *Agric. Syst.*, 55, 535-582.
- RAMON 2005 à compléter !!**
- RIEDO M., GRUB A., ROSSET M., FUHRER J. (1998) : "A pasture simulation model for dry matter production, and fluxes of carbon, nitrogen, water and energy", *Ecol. Modelling*, 105, 141-183.
- RODRIGUEZ D., VAN OIJEN M., SCHAPENDONK A. H. M. C. (1999) : "LINGRA-CC : A sink-source model to simulate the impact of climate change and management on grassland productivity". *New Phytol.*, 144, 359-368.
- RUGET F., DELÉCOLLE R., TIERS N., RABAUD V., DURU M., GASTAL F., DONET I. (1998) : "Estimating alarm situations on grassland production at regional scale", 7th ICCTA, *Computer Technology in Agricultural management and risk prevention*, Firenze, Italia, 15-18 November 1998, abstract, 130.
- RUGET F., DELECOLLE R., LE BAS C., DURU M., BONNEVIALE N., RABAUD V., DONET I., PERARNAUD V., PANIAGUA S. (2001) "L'estimation régionale des productions fourragères." *Colloque Ager-Mia*, 31 août 2000, Cirad, Montpellier, 263-282.
- 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.
- SCHAPENDONK A.C.H.M., STOL W., VAN KRAALINGEN D.W.G., BOUMAN B.A.M. (1998) : "LINGRA, a source/sink model to simulate grassland productivity in Europe", *Eur. J. Agron.*, 9, 87-100.
- TRNKA M., EITZINGER J., GRUSZCZYNSKI G., BUCHGRABER K., RESCH R., SCHAUMBERGER A. (2006) : "A simple statistical model for predicting herbage production from permanent grassland", *Grass & Forage Sci.*, 61, 253-271.
- VOLAIRE F, NORTON M. (2006) Summer dormancy in perennial temperate grasses, *Ann. Bot.* 98, 927-933.
- VOLAIRE F, THOMAS H, LELIÈVRE F (1998) Survival and recovery of perennial forage grasses under prolonged Mediterranean drought - I. Growth, death, water relations and solute content in herbage and stubble *New Phytologist* 140 439-449.
- WIGHT J.R., SKILES J.W. (1987) : "SPUR: Simulation of production and Utilization of rangelands. Documentation and User Guide (ARS 63), USDA, Wight J.R. and Skiles J.W. Eds.