

Du modèle STICS au système ISOP pour estimer la production fourragère. Adaptation à la prairie, application spatialisée

F. Ruget¹, S. Novak², S. Granger³

Fournir des informations objectives sur le rendement des prairies françaises, tel est l'enjeu du dispositif ISOP mis en place par le SCEES. Ce dispositif combine l'utilisation d'un modèle de culture (STICS) et des données relatives au climat, aux sols et aux pratiques sur prairies pour prédire la variabilité interannuelle de la production fourragère à l'échelle de petites régions.

RÉSUMÉ

Après une rapide présentation du modèle de culture STICS et de son adaptation à la prairie, les données d'entrée nécessaires à la mise en œuvre du modèle sont décrites ainsi que les conditions de la calibration des paramètres "plante" pour adapter le modèle à des prairies plurispécifiques. Une validation multilocale a été réalisée sur 3 lieux distincts. Ensuite, une présentation sommaire de la construction du système ISOP décrit l'origine des données d'entrée et leur adaptation pour représenter les conditions régionales de production fourragère en France. Quelques exemples de la variabilité locale interannuelle illustrent la qualité des estimations d'ISOP, en prenant celles du SCEES comme référence.

MOTS CLÉS

Méthode d'estimation, modélisation, prairie permanente, prairie temporaire, production fourragère, variations annuelles

KEY-WORDS

Annual variations, estimation method, forage production, ley, permanent pasture, setting-up of models

AUTEURS

1 : Institut National de Recherche Agronomique, Unité Climat, Sol et Environnement

2 : Chambre d'Agriculture de Saône-et-Loire (Agronomie Gestion de l'espace et Environnement)

3 : Etablissement National d'Enseignement Supérieur Agronomique de Dijon

CORRESPONDANCE

F. Ruget, INRA, Domaine Saint Paul, F-84914 Avignon cedex 9 ; ruget@avignon.inra.fr

Introduction

En raison de la difficulté à disposer d'une information objective sur les variations de niveau de production des prairies en France, le SCEES (Service Central d'Enquêtes et Études Statistiques, Bureau des Statistiques Végétales et Forestières) a coordonné la mise en place du dispositif **ISOP** (Information et Suivi Objectif des Prairies), qui **vise à modéliser la production fourragère** de manière à :

- caractériser la variabilité interannuelle de production des prairies ;
- fournir des estimations objectives de rendement à l'échelle de petites régions françaises.

Le dispositif ISOP, décrit dans le bulletin *Agriste* (DONET et al., 2001), repose sur le modèle générique de culture STICS. Le passage du modèle STICS à l'estimation spatialisée de production de prairies consiste en deux étapes principales : (i) la mise au point d'un jeu satisfaisant de paramètres, adapté aux prairies permanentes ; (ii) la conception et la constitution d'une base de données permettant d'alimenter le modèle pour obtenir des estimations régionales.

Par ailleurs, l'outil ISOP, donnant lieu à des estimations mensuelles distribuées aux DDAF (Direction de l'Agriculture et de la Forêt), a attiré l'attention des utilisateurs, ingénieurs et techniciens de terrain, qui cherchent aussi à estimer la variabilité interannuelle et spatiale de la production fourragère. C'est pourquoi l'équipe SAGE (Service Agronomie, Gestion de l'espace et Environnement) de la Chambre d'Agriculture de Saône-et-Loire a voulu tester cet outil et ses résultats locaux en vue de l'utiliser à une échelle plus fine que la région fourragère, permettant d'orienter des choix de parcelles ou de techniques. Cette utilisation fera l'objet d'un deuxième article.

Cet article a pour but de **présenter STICS-prairie et son application spatialisée dans ISOP**. Il montre donc sommairement les données nécessaires pour utiliser le modèle, la qualité de la calibration locale (correspondant au résultat de la première étape) et, de façon détaillée, la manière dont sont construites les données d'entrée pour obtenir des estimations régionales (deuxième étape), ainsi que quelques éléments de validation spatiale.

Le modèle de fonctionnement de culture STICS : adaptation à la prairie

STICS est un modèle de fonctionnement des cultures (BRISSON et al., 1998) à pas de temps journalier. Son principal objectif est de simuler : (i) les conséquences des variations du milieu, en particulier l'effet du climat, des propriétés hydriques du sol et de ses capacités de minéralisation, sur la production de la culture et les consommations en eau et azote associées ; (ii) les effets des pratiques agricoles (des techniques instantanées au système de culture) sur la production d'une parcelle agricole. En particulier, il est apte à expliquer des

variations entre parcelles, mais aussi entre années ou entre régions. Les variables d'entrée sont donc relatives au climat, au sol et au système de culture. Les variables de sortie sont relatives à la production (quantité), à l'environnement et à l'évolution des caractéristiques du sol sous l'effet de la culture. Une évaluation globale, pour le blé et le maïs, en est présentée dans l'article de BRISSON *et al.* (2002).

1. Principes de l'adaptation à la prairie

La version 3 de STICS a été adaptée à la prairie (TIERS, 1998 ; RUGET *et al.*, 1998, 1999) **par des ajouts de fonctions physiologiques et de fonctionnalités** prenant en compte :

- la sénescence du couvert, basée sur le principe de la durée de vie d'une feuille (DURU *et al.*, 1995 ; CROS *et al.*, 2004) et modélisée par la disparition progressive de matière sèche à partir d'une certaine somme de température, en fonction de sa vitesse de mise en place et de la température pendant la sénescence ;

- l'existence de plusieurs exploitations (nommées coupes) à des dates, des sommes de températures ou des stades choisis ;

- les conditions de redémarrage après coupe : tandis que l'indice foliaire et la matière sèche résiduels ou, à défaut, la hauteur de coupe (permettant de calculer ces variables) sont choisis par l'utilisateur, l'état azoté et le stade de développement (avant ou après "montaison") du couvert sont définis dans le modèle (conservation de la quantité d'azote présente et du stade au même indice foliaire) ;

- la possibilité d'associer les fertilisations directement aux coupes ;

- la proportion de légumineuses : elles sont considérées, de façon simplificatrice pour cette version, comme des plantes autosuffisantes en azote, donc exclues du bilan azoté.

- la présence d'une quantité minimale de matière sèche nécessaire pour autoriser la récolte.

Une fonction non prépondérante pour d'autres cultures prend de l'importance pour les prairies : il s'agit de la fonction de minéralisation de l'azote organique du sol. La teneur en azote organique, plus grande que dans les sols de grandes cultures, et les pratiques (fertilisation généralement faible) donnent une importance toute particulière à cette fonction, qui conditionne le statut azoté, donc la production des prairies. La minéralisation dépend, outre de facteurs permanents (teneur en azote organique, argile et calcaire), des conditions climatiques (température et humidité du sol).

Les sorties du modèle ont été adaptées pour que :

- les bilans de fonctionnement de la culture (matière sèche produite, eau et azote consommés), habituellement effectués à la fin de la culture, puissent être édités pour chaque repousse ;

- la matière sèche restant sur la prairie (matière sèche "résiduelle") puisse être prise en compte pour accéder par différence à une quantité réellement récoltable, correspondant à la pratique de fauche ou pâturage à quelques centimètres du sol.

2. Mise en œuvre du modèle

Les **paramètres d'entrée** (plante, climat, sol, techniques, conditions initiales) permettent de choisir les conditions d'exécution du modèle. **Certains sont indépendants de la culture** comme les paramètres de sol ou les paramètres climatiques. Le sol est caractérisé par des informations par couche (épaisseur, humidités pondérales à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent, densité apparente) et des informations de la couche de surface ou de la zone labourée (teneur en argile, calcaire et azote organique). Les paramètres climatiques utilisés sont les températures minimales et maximales, les précipitations, le rayonnement et l'ETP, tous en valeurs journalières.

Les paramètres spécifiques aux prairies (culture pérenne, avec plusieurs coupes) caractérisent :

- les techniques : ils décrivent les dates des coupes ainsi que les pratiques de fertilisation qui y sont associées ;
- les conditions d'initialisation : la plupart du temps, le couvert est considéré comme déjà implanté ; il est alors nécessaire de définir la date et les conditions dans lesquelles commence la culture, c'est-à-dire (i) la teneur en eau et en azote dans chaque couche de sol, (ii) l'indice foliaire, la matière sèche aérienne et l'indice de nutrition azotée INN (LEMAIRE et SALETTE, 1984) au début de la culture ;
- les conditions de réinitialisation après une coupe : les variables caractérisant l'état de culture, comme ci-dessus (indice foliaire, matière sèche résiduelle et azote dans la plante), sont choisies par l'utilisateur.

3. Données observées utilisées pour la calibration et la validation

Nous disposons de données observées dans un grand nombre de situations en France (régions et années diverses), pour les principales saisons (sauf l'hiver), pour différents niveaux de contrainte hydrique ou azotée, différentes espèces (ou associations) et différentes durées de repousse après une coupe.

Les lieux qui ont servi à **la calibration** (tableau 1) sont Lusignan, Toulouse, Rennes, Mirecourt, Saint-Laurent-de-la-Prée. Les conditions printanières (régularisation de fin d'hiver, coupe précoce (déprimage) ou tardive (étêtage)) sont particulièrement étudiées ; les repousses d'été, irriguées ou non, sont utilisées ainsi qu'une repousse d'automne à Lusignan. Les pousses les plus longues durent jusqu'à 100 jours. Même en cas de fertilisation faible, les INN moyens sont relativement élevés par rapport à ceux de la pratique agricole. Enfin, certaines pratiques, non prises en compte par le modèle (disposition du semis et, pour cette version, fertilisation d'automne ou fumure organique), peuvent provoquer une variabilité des mesures qui n'est pas représentée par le modèle.

Ce jeu de données présente une grande variabilité de climats, de sols et une assez bonne variabilité de pratiques (fertilisation, irrigation) mais les régimes de défoliation sont assez homogènes (fauche

	Années	Saison	Conditions de printemps	Utilisation	Nombre	Irrigation	Espèce
Toulouse*	92, 95, 96	Printemps	Non perturbé, régulé, déprimé	Calibration	10	Non	Dactyle
	89, 90, 92, 95 96	Printemps	Non perturbé, déprimé, étêté	Validation	30	Non	Dactyle, fétuque en 89, 90
	90, 92	Eté	-	Calibration	10	Non	Dactyle
	89, 90, 92, 94	Eté	-	Validation	23	Non	Dactyle
* Dans ces expérimentations, certains traitements ne sont pas pris en compte dans la version de STICS utilisée (v3.4) : l'espèce (un seul jeu de paramètres "plante") et des conditions rencontrées à Toulouse (semis en rang ou à la volée, fertilisation d'hiver, fertilisation organique)							
Lusignan	79 à 84, 87	Printemps	Non perturbé, étêté en 87	Calibration	12	Non	Fétuque
	79 à 90 sauf 86	Printemps	Non perturbé, étêté en 87	Validation	16	Oui / non	Fétuque
	87, 88	Eté	-	Calibration	12	Non	Fétuque
	79 à 90 sauf 86	Eté	-	Validation	52	Non	Fétuque, dactyle en 84, 85
	88	Automne	-	Calibration	3	Non	Fétuque
	88	Automne	-	Validation	3	Non	Fétuque
Mirecourt	83 à 88	Printemps	Non perturbé, déprimé, étêté	Calibration	29	Non	Prairie naturelle
	83 à 88	Printemps	Non perturbé, déprimé, étêté	Validation	53	Non	Prairie naturelle
Rennes	86 et 87	Toute l'année	Non perturbé	Calibration	7	Non	RGA fétuque
Saint-Laurent-de-la-Prée	89 à 93	Printemps	Non perturbé	Calibration	8	Non	Prairie naturelle

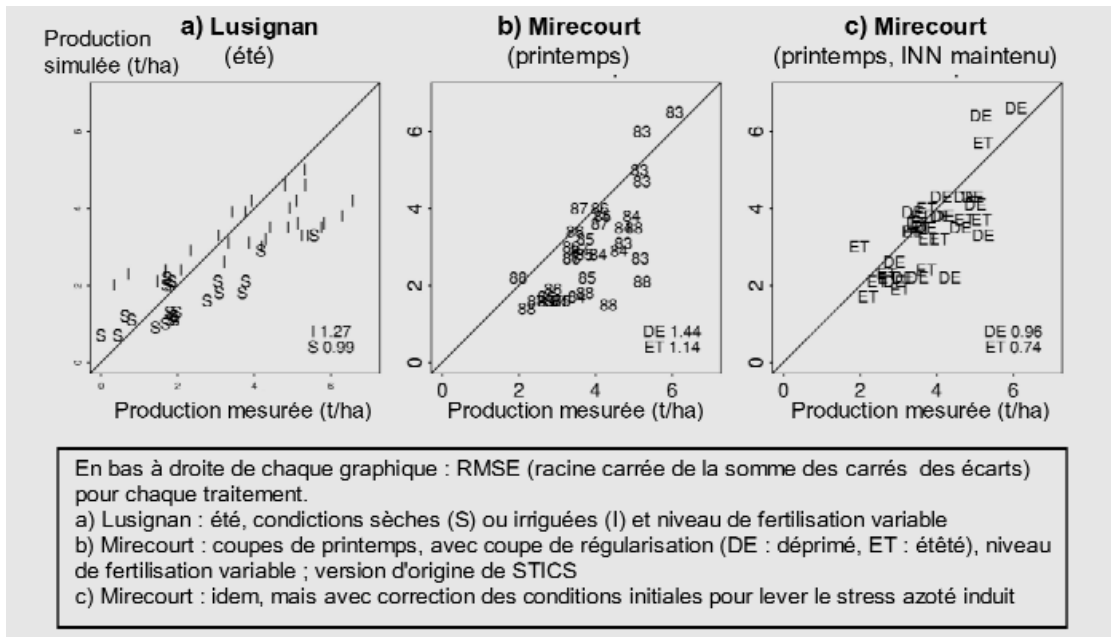
TABLEAU 1 : Principales caractéristiques des expérimentations ayant servi à la calibration ou à la validation du modèle.

TABLE 1 : Main characteristics of the experiments used for the calibration or validation of the model.

assez rase) ; la nature des espèces est peu variée : les espèces étudiées sont principalement la fétuque, le dactyle et le ray-grass, c'est-à-dire des espèces à stratégie de capture et peu adaptées à la défoliation. Ces derniers points nuisent certainement à la représentativité du paramétrage pour la plupart des prairies permanentes qui sont exploitées de façon variée (le pâturage provoque des défoliations progressives par le haut) et qui sont riches en espèces adaptées à la défoliation et à stratégie de conservation (DURU *et al.*, 1998).

La validation est réalisée dans les mêmes lieux, sur des jeux d'années et de situations plus nombreux que la calibration. La validation montre que les premières ou deuxièmes coupes de printemps, les repousses d'été avec ou sans irrigation sont relativement bien simulées (figure 1a, Lusignan), ainsi que les effets de niveaux de nutrition azotée. Le fait de négliger les effets d'espèce (à Toulouse, l'espèce n'est pas représentée) augmente un peu la dispersion des estimations sans biaiser nettement les résultats, ce qui permet d'accepter l'hypothèse de simulation d'une association prairiale par une graminée moyenne.

Les repousses de printemps (après déprimage ou étêtage seulement à Mirecourt (figure 1b), et dans les autres lieux) sont généralement plus mal estimées que les premières coupes et font apparaître un fort stress azoté en début de repousse. Une analyse du fonctionnement du modèle à cette période permet d'expliquer et de corriger cette difficulté. En effet, la version de STICS présente dans ISOP



fonctionne sur l'hypothèse du maintien de la concentration d'azote dans les parties résiduelles lors de la coupe. Or le principe de la courbe de dilution implique qu'aux faibles niveaux de matière sèche (après coupe), la teneur critique est beaucoup plus élevée qu'à forte matière sèche : on passe donc, pour une même teneur, d'un couvert non stressé à un couvert stressé. Dans cette formulation, la coupe induit presque toujours un stress, d'autant plus important que la matière sèche résiduelle est faible et donc que la coupe est rase.

Une hypothèse alternative consiste à considérer que c'est le statut azoté, c'est-à-dire l'indice de nutrition azotée (et non la teneur en azote), qui est stable et c'est donc cette variable qui est maintenue constante au moment de la coupe. Ce fonctionnement du modèle, qui reflète des processus physiologiques réels (remobilisation d'azote à partir des racines et des gaines), conduit à des valeurs simulées après coupe plus proches des valeurs observées (figure 1c) : aucun stress n'est induit par la coupe. De plus, la production après coupe devient moins sensible à la valeur attribuée à la matière sèche résiduelle, souvent mal connue en expérimentation et difficile à connaître pour des estimations spatialisées, car liée au contexte ou aux pratiques de l'année.

En conclusion, **la version de STICS utilisée pour ISOP** (figée en octobre 1998) **est bien calée pour des pousses de printemps ou d'été, avec des coupes fréquentes ou espacées** (intervalles entre coupes de 30 à 100 jours). Les facteurs limitants bien pris en compte sont ceux des conditions expérimentales généralement étudiées, climat et capacités hydriques du sol, ce qui correspond aux connaissances les plus confirmées. Le stress azoté est également pris en compte, mais les conditions de test sont en manque d'azote beaucoup plus modéré que celui de la pratique agricole. Les prairies représentées sont les prairies herbacées, pour la plupart semées, ce qui constitue une limite importante par rapport aux prairies permanentes.

FIGURE 1 : Validation multi-locale de STICS-prairie : exemples à Lusignan (a) et Mirecourt (b : version d'origine de STICS, et c : avec correction des conditions initiales pour lever le stress azoté induit).

FIGURE 1 : Multi-local validation of STICS for grassland : examples from Lusignan (a) and Mirecourt (b : original STICS version, and c : after correction for the induced nitrogen stress).

Dans les versions plus récentes, des formalismes nouveaux permettent de prendre en compte les fertilisations d'hiver, le gel sur feuillage, les excès d'eau (anoxie), la présence d'azote ammoniacal ou la fraction minéralisable de l'azote organique. L'extension des conditions d'application du modèle (hiver, couverts plurispécifiques, climats de montagne ou méditerranéens) est un objectif actuel.

Le système ISOP : estimation spatialisée des productions

Ce chapitre a pour but de décrire la mise en forme des données d'entrée réalisée pour accéder à une estimation des productions régionales.

1. Choix fondamentaux : prise en compte des types de prairie, variables de sortie

La construction d'ISOP a d'abord nécessité des réflexions générales sur la façon d'exprimer la demande du SCEES et d'y répondre en utilisant un modèle de culture.

■ Expression de la demande en termes de modèle

Dans les statistiques agricoles, les types de prairie sont définis par la présence de légumineuses et l'âge de la prairie (encadré 1), pour des raisons de productivité, probablement en lien avec la dérive floristique observée dans les prairies anciennes. La demande du SCEES concerne la production de chacun des types de prairie, donc elle doit être transcrite en termes de fonctionnement de culture. En termes écophysiologiques, les légumineuses peuvent être identifiées grâce à leur comportement vis-à-vis de l'azote. L'effet de l'âge, qui se traduit par la dérive floristique, provient essentiellement de la fertilisation (DURU *et al.*, 1998) ce qui nous a conduits à formuler **l'hypothèse que la différence de productivité entre prairies permanentes et temporaires peut être représentée à travers le mode d'exploitation (fertilisation)**. Du point de vue des paramètres caractéristiques du couvert, aucune différence ne sera faite entre prairies permanentes et temporaires. Les prairies artificielles (essentiellement la luzerne pure en France), qui représentent une faible surface et n'interviennent pas dans les questions de survie des troupeaux en cas de sécheresse, ne sont pas traitées actuellement dans ISOP.

ISOP est destiné à fournir une estimation de production récoltable par région fourragère et par type de prairie, en faisant plus porter l'accent sur la variabilité interannuelle d'une région que sur la variabilité moyenne entre régions. Pour situer l'estimation par rapport à la production "normale" de la région, elle est **rapportée à une référence**, la moyenne de la production sur la période 1982-1996 (15 ans) de la variable analysée pour la même zone (région fourragère).

- Les prairies artificielles (code 46) : Semées en légumineuses fourragères pures ou en mélange de légumineuses (trèfle, sainfoin, lotier, minette...). Généralement fauchées, leur durée peut aller théoriquement jusqu'à 10 ans ; elles sont toujours composées de plus de 80% de légumineuses semées.

- Prairies temporaires (code 47) : Semées depuis moins de 6 ans en graminées fourragères (ray-grass d'Italie ou hybride, ray-grass anglais, dactyle, fétuque, fléole...) pures ou associées à des légumineuses. Exploitable en fauche et/ou pâture. Leur flore est composée d'au moins 20% de graminées semées.

- Prairies permanentes productives (code 48) : D'origine semée (prairies temporaires de 6 ans et plus) ou d'origine naturelle (très anciennes prairies ou prairies artificielles semées depuis plus de 10 ans). Leur productivité est estimée supérieure à 1 500 unités fourragères / ha. Exploitable en fauche et/ou en pâture.

■ Choix du modèle STICS pour bâtir le système spatialisé ISOP

Il existe **plusieurs modèles disponibles**. LINGRA (SCHAPENDONK *et al.*, 1998), relativement proche du modèle hollandais WOFOST mais adapté aux cultures pérennes, est assez élaboré sur le plan des fonctions écophysiological (fonctionnement des feuilles comme source et puits en même temps), mais il ne contient pas de module de nutrition azotée et le choix des techniques culturales est limité. Il est particulièrement adapté à la simulation de pousses courtes en conditions intensives. PASIM (RIEDO *et al.*, 1998), modèle mécaniste, est également adapté à la simulation de pousses courtes, car il est calé et validé dans des conditions de coupes nombreuses (4 à 6 coupes par an), qui excluent l'existence de sénescence.

Le modèle STICS présente divers avantages concernant l'écophysiologie de la culture. Il **prend en compte** deux phénomènes fréquents lorsque le mode d'exploitation n'est pas intensif : (i) **les stress et en particulier le stress azoté** ; (ii) **la sénescence des tisons en cas de repousses longues**.

Ces fonctions correspondent aux conditions de la pratique agricole souvent rencontrées pour les prairies (AFPF, 1984 ; DONET *et al.*, 2001). De plus, ce modèle permet de simuler aussi bien des situations expérimentales, pour le calage -ce que font la plupart des modèles-, que des situations agricoles (situations à coupes plus ou moins espacées). Il permet de tenir compte de quantités laissées au sol variables et distingue les différentes fractions (matière sèche néoformée, résiduelle et leur sénescence).

Il n'est pas exigeant en données d'entrée et, en particulier, ne nécessite pas de données qui pourraient n'être disponibles qu'à l'échelle de la parcelle, ce qui est un atout pour l'utilisation spatiale. Enfin, l'accès aux fichiers sources (code informatique du modèle) permet de modifier et d'adapter celui-ci aux besoins et aux informations disponibles. Par exemple, l'INN initial a été introduit dans le modèle parce qu'il fournit une bonne caractérisation de l'état de la culture au printemps et qu'il est accessible à partir d'observations de terrain. La possibilité d'adaptation du modèle est un atout important pour la réussite d'une utilisation nouvelle.

ENCADRÉ 1 : **Caractérisation des 3 types de prairies retenus par les statistiques françaises.**

INSERT 1 : **Characteristics features of the 3 types of grasslands retained by French statistics.**

■ Champ spatial d'application d'ISOP

Le **découpage en régions fourragères** s'appuie sur le travail d'expertise réalisé par HENTGEN (1982), visant à définir des régions homogènes du point de vue des modes d'exploitation et des niveaux de production. Les régions fourragères sont constituées d'ensembles de communes pouvant appartenir à plusieurs départements ; elles correspondent grossièrement à des régions naturelles tout en étant moins nombreuses que les petites régions naturelles du SCEES.

Différentes zones (encadré 2) sont exclues du champ d'application d'ISOP :

- les parcours et alpages, les surfaces en herbe peu productives ; seules les prairies dont la production est supérieure à 1 500 Unités Fourragères sont donc modélisées ;

- les zones d'altitude supérieure à 1 000 m, dans la mesure où l'estimation des paramètres climatiques à partir de postes météorologiques est peu fiable à ces altitudes ;

- les bordures méditerranéennes, en raison de l'absence de demande de la part du SCEES (pas d'enquêtes, pas de tests spécifiques du modèle en conditions très sèches) ;

- pour chaque type de prairie, les zones où ce type de prairie représente moins de 7 000 hectares, car les informations obtenues par sondage ne seraient plus représentatives.

2. Mise en œuvre du modèle : données d'entrée, agrégations

Les **sources d'informations** sont (i) le réseau des stations synoptiques et automatiques de Météo-France, (ii) la carte des sols de France au millionième (KING *et al.*, 1994) et (iii) l'enquête nationale Fourrages réalisée par le SCEES en 1998 (SCEES, 2000), comme elle l'avait été en 1982 (SCEES, 1984 ; AFPP, 1984).

La constitution de la base de données d'entrée du modèle est décrite de façon plus détaillée dans diverses publications (PÉRARNAUD *et al.*, 1997 ; RUGET *et al.*, 1998 ; DONET *et al.*, 1999).

Les **12 départements** hors du champ de l'enquête Prairies 1998 sont les Alpes-Maritimes, l'Aude, les Bouches-du-Rhône, la Corse, le Gard, l'Hérault (pourtour méditerranéen), Paris, le Var, le Vaucluse, les Hauts-de-Seine, la Seine-Saint-Denis et le Val-de-Marne (petite ceinture parisienne).

Par ailleurs, compte tenu de la non représentativité de certaines prairies (surfaces inférieures à 7 000 ha), **18 régions fourragères** ont été exclues : les régions de la couronne parisienne (numéros 1101, 1103, 1108), la vallée de la Seine et le pays d'Othe (2107 et 2619), la Beauce (2408), le Thymerais (2412), le Richelais (2416), le plateau d'Evreux (2514), le Senonais (2622), la région de Tarascon sur Ariège (7305), la plaine de Valence (8206), la basse vallée de l'Ardèche (8210), la moyenne vallée du Rhône (8218), la montagne de la Lens et le désert du Diois (8227), la région de Villefort en Lozère (9101), le Briançonnais (9309), le Bochaine (9312).

ENCADRÉ 2 : **Zones exclues de l'estimation ISOP.**

INSERT 2 : **Zones excluded from the ISOP estimation.**

Les données d'entrée ne sont pas toutes disponibles à la même résolution. A **chaque entité région x type de prairie** sont attribuées, selon le niveau d'information accessible :

- des variables définies par région fourragère : il s'agit du climat (182 climats), ainsi que de quelques variables d'entrée (proportion de légumineuses) et conditions d'initialisation (indice de nutrition azotée) ;

- des variables non localisées à l'intérieur de la région, mais à valeurs multiples (modes d'exploitation et sols) et affectées de pondérations représentant l'importance de chacune ; les modes d'exploitation et les types de sols ont été réduits à 5 valeurs au maximum pour chaque variable ;

- des variables définies pour toute la France, faute d'informations suffisantes : la teneur en azote organique du sol, les paramètres caractérisant la plante, le couvert étant considéré comme monospécifique et constitué d'une graminée moyenne ; les paramètres sont donc identiques pour les prairies temporaires et permanentes, quelle que soit la composition floristique.

■ Données climatiques

Pour la période actuelle, les valeurs quotidiennes des paramètres utilisés proviennent de 300 stations pour le rayonnement et l'ETP, d'environ 1 100 pour les températures et les précipitations (réseau synoptique). Pour la série historique, qui permet de calculer la référence, le nombre de postes est variable. Une série climatique est calculée pour chaque région fourragère par interpolation. La méthode utilisée est la pondération par l'inverse du carré de la distance au point d'estimation, appliquée à chaque paramètre climatique au centre de gravité de la région, à partir des données disponibles sur les cinq stations les plus proches, jour par jour. Cette méthode a été choisie après une étude préalable portant sur une région fourragère, tenant compte de la qualité des résultats (proximité entre résultats d'interpolation et mesures au même point) et de la facilité de mise en œuvre.

■ Données pédologiques

Elles sont estimées à partir des informations contenues dans la carte des sols de France au millionième, qui est la seule couverture complète de la France (KING *et al.*, 1994 ; JAMAGNE *et al.*, 1995). Les caractéristiques des sols sont transformées en variables d'entrée de STICS, par l'intermédiaire de règles de pédotransfert, analogues à celles déjà utilisées dans d'autres exemples de spatialisation (BRISSEON *et al.*, 1992 ; RUGET *et al.*, 1995) et réactualisées par Christine LE BAS (INRA, Orléans).

Ces cartes de sols ne localisent pas des sols mais des associations de sols. En l'absence d'informations, l'hypothèse est faite que la prairie est présente sur tous les sols, proportionnellement à leur fréquence régionale. Pour limiter le nombre de simulations, seuls les sols les plus fréquents par région fourragère sont pris en compte, en veillant à toujours représenter au moins cinquante pour cent des sols de la zone, ce qui oblige à conserver cinq à six sols.

■ Données techniques : enquête réalisée par le SCEES, transformation en données d'entrée du modèle

Le SCEES a adapté l'enquête prévue sur les prairies, de façon à recueillir les informations concernant l'irrigation, la fertilisation et le nombre de coupes, informations nécessaires pour définir les modes d'exploitation. Les résultats de l'enquête sont publiés indépendamment (SCEES, 2000). Le **plan de sondage** a été établi à l'échelle de la région fourragère en fonction de l'importance des surfaces en prairie. L'échantillon se compose d'environ 35 parcelles par type de prairie pour chaque région fourragère où ce type existe, soit au total 8 643 enquêtes.

La transformation des réponses individuelles en caractéristiques régionales se décompose en deux parties : définition de modes d'exploitation (à partir de l'ensemble des enquêtes), puis attribution de modes d'exploitation à chaque région fourragère. Les surfaces irriguées sont très faibles, donc aucune irrigation ne sera simulée.

Le **mode d'exploitation des prairies** est représenté par une schématisation des modes d'utilisation (pâture, ensilage, foin) fondée sur les dates de coupe (date de première coupe et fréquence des coupes ultérieures) et le niveau de fertilisation azotée. Les dates de coupe sont exprimées en sommes de température, de façon à respecter la variabilité des dates entre différentes zones en France. Le pâturage est considéré comme une coupe réalisée le jour où le troupeau est mis dans la parcelle. L'enchaînement des utilisations définit des séquences d'utilisation. Malgré la grande diversité de ces séquences, on définit **30 modes d'exploitation**, en regroupant les séquences puis les niveaux de fertilisation les plus ressemblants. Par des jeux de réattribution aux classes les plus proches et les plus fréquentes, appliqués aux modes d'utilisation puis aux niveaux de fertilisation, on a abouti à des proportions de chaque mode dans chaque région fourragère.

■ Conditions initiales

La date de début de culture choisie est une date calendaire fixe, le 1^{er} février. Cette valeur est choisie car, dans toutes les régions, on peut considérer que les cumuls régissant le développement des principales graminées prairiales peuvent commencer à partir de cette date (DURU, 1987).

Les conditions initiales au printemps sont définies selon différentes modalités : l'INN, déduit d'informations provenant de l'enquête (observations spécifiques), est défini pour chaque région (tous types de prairie confondus), tandis que l'indice foliaire et la matière sèche sont les mêmes le 1^{er} février pour toutes les régions.

Pour les conditions initiales après coupe, indice foliaire et matière sèche résiduels, des valeurs leurs sont attribuées de façon identique, quels que soient la région, la saison ou le type de prairie.

■ Estimation régionale

Comme les informations sur le sol et les techniques ne sont représentatives que pour l'ensemble de la région, la seule hypothèse possible pour combiner sols et techniques est que, dans chaque région, la prairie et les techniques sont présents sur tous les sols proportionnellement à leurs fréquences régionales. Les modes d'exploitation et les types de sols sont donc combinés systématiquement, ce qui représente 6 399 simulations. **La production d'une entité région x type de prairie correspond à la moyenne pondérée des différentes estimations** réalisées pour cette entité.

■ Fonctionnement pratique d'ISOP

Le modèle, muni de paramètres caractérisant la plante adaptés aux prairies de plusieurs années, est alimenté par la base de données agropédoclimatiques (climat, sol, conditions techniques) construite à

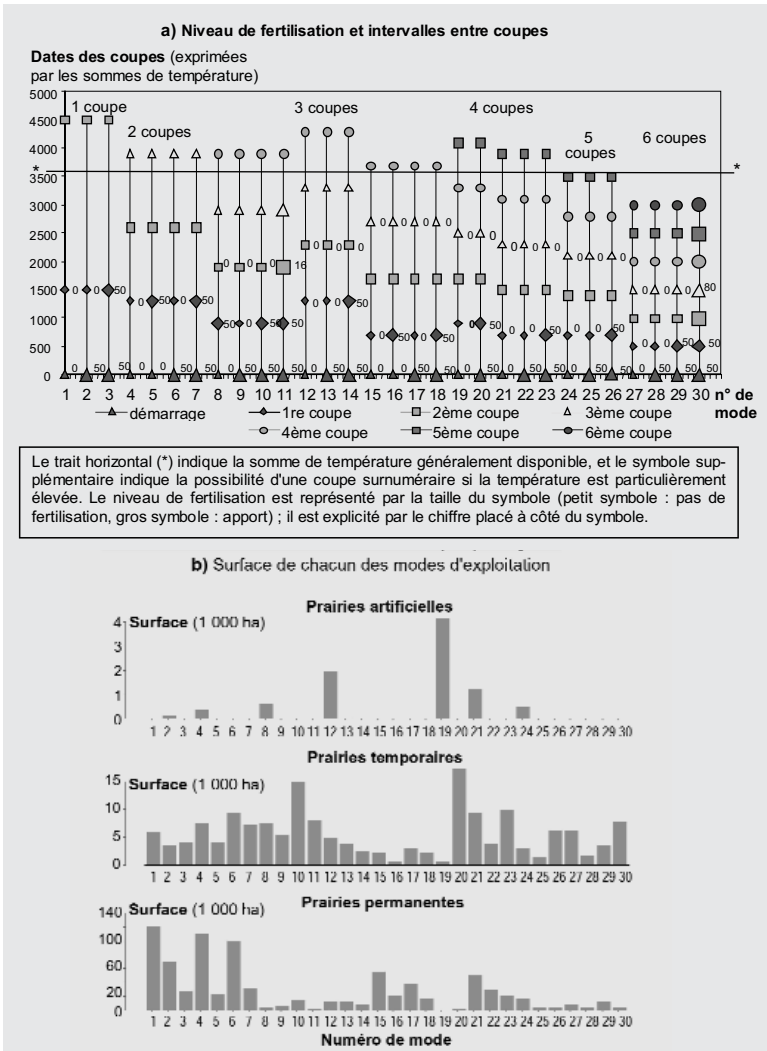


FIGURE 2 : Présentation des 30 modes d'exploitation utilisés dans ISOP (a) selon le niveau de fertilisation et les intervalles entre coupes et (b) répartition nationale selon le type de prairie.

FIGURE 2 : Presentation of the 30 management methods used by ISOP according to fertilisation level and to intervals between cuts (a) and national distribution according to pasture type (b).

cet effet et archivée sous Oracle. Sur le plan informatique, la spatia-
lisation est gérée par une interface entre la base de données et le
modèle. L'ensemble du système est hébergé à Météo-France, où il est
exécuté chaque 20 du mois, de mars à octobre.

3. Résultats : pratiques culturales selon les types de prairie, validation d'ISOP

■ Types de prairie et modes d'exploitation

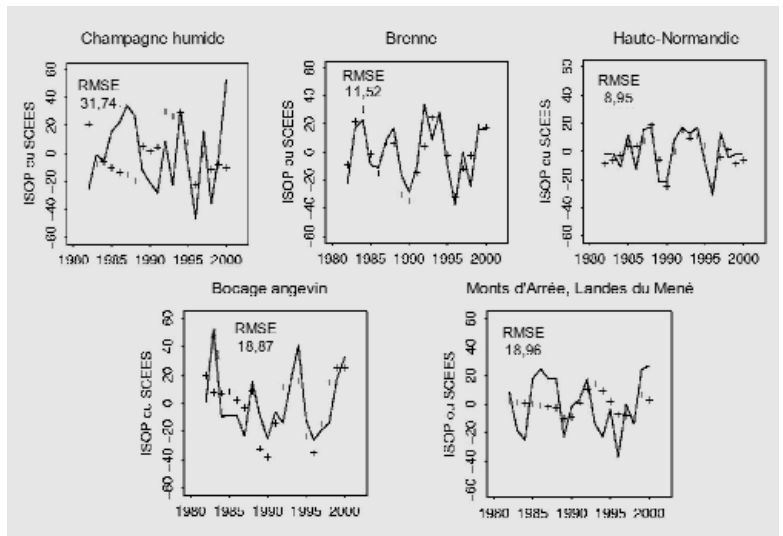
La représentation des 30 modes d'exploitation définis à partir des
combinaisons "date de première utilisation, intervalle entre utilisations,
fertilisation" (figure 2a) ainsi que leur représentativité en surface
(figure 2b) font apparaître : (i) qu'un grand nombre de combinaisons
de dates de coupes ont été définis ; (ii) que les modes d'exploitation les
plus fréquents sont différents selon les types de prairie (moins de coupes
et moins de fertilisation en prairies permanentes qu'en prairies
temporaires, pas de fertilisation en prairies artificielles). **Ce résultat,**
conforme aux attentes, **permet d'accepter l'hypothèse de représen-**
tation des types de prairie par les modes d'exploitation.

■ Validation régionale : comparaison des productions estimées par ISOP et par les experts du SCEES

La demande du SCEES portant sur l'évolution interannuelle des
rendements relatifs, la validation doit être faite par comparaison des
résultats obtenus habituellement par les experts du SCEES aux
résultats d'ISOP. La comparaison montre (non présenté) de **fortes dif-**
férences de qualité d'estimation entre régions fourragères (coeffi-
cient r^2 par région entre les deux méthodes compris entre 0 et 0,6
selon les régions). Cette variabilité (illustrée en partie sur la figure 3)
peut provenir de différentes sources. Pour ce qui est de l'estimation

FIGURE 3 : Comparaison
de quelques exemples
de séries temporelles
d'estimations SCEES et
ISOP (écart à la moyenne
sur 15 ans (1982-1998),
en %).

FIGURE 3 : Comparison
of a few examples of
yearly sequences of
estimations by SCEES
and by ISOP (deviations
from mean over 15 years
(1982-1998), %).



ISOP, de mauvaises estimations peuvent avoir leur origine dans les incertitudes du modèle lui-même, mais aussi dans les incertitudes de ses données d'entrée (sol, modes d'exploitation) et de la mauvaise prise en compte de certains facteurs (hétérogénéité régionale du climat, en particulier due à l'altitude).

Conclusion

Le bulletin *Agrreste Conjoncture Prairies*¹ provoque souvent des réactions régionales, favorables ou non, qui marquent l'intérêt des professionnels pour ISOP et permet surtout de créer des conditions d'enrichissement de cet outil.

L'ensemble des choix réalisés dans la construction du système ISOP (espèces assimilées à une graminée moyenne, type de prairie représenté par les techniques) est conforté par la satisfaction globale des utilisateurs. Pour étendre cet outil à d'autres régions ou pays, ou le réactualiser, se pose la question du niveau de précision nécessaire pour les données d'entrée de façon à obtenir des estimations fiables de variabilité interannuelle, en particulier pour les modes d'exploitation.

Le système ISOP est orienté vers l'obtention d'un suivi à une échelle régionale. Pour utiliser le modèle au niveau des exploitations agricoles, ce qui est l'objet de l'article suivant, la qualité du paramétrage de l'enracinement (modèle) et des caractéristiques de sol (données d'entrée) sont essentielles, à cause de l'importance des stress hydrique et azoté. Il est donc nécessaire de donner des valeurs précises aux variables climatiques et aux paramètres de sol pour estimer des potentiels de production à l'échelle d'une exploitation.

Accepté pour publication, le 18 novembre 2005

Remerciements : Les auteurs remercient l'ensemble des personnes de l'INRA qui ont participé aux discussions et qui ont fourni des données pour la calibration et la validation, ainsi que leurs partenaires du SCEES et de Météo-France.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AFPF (1984) : *La prairie française en 1982, Fourrages*, 100, 185 p.
- BRISSON N., KING D., NICOUILLAUD B., RUGET F., RIPOCHE D., DARTHOUT R. (1992) : "A crop model for land suitability evaluation: a case study of the maize crop in France", *Eur. J. Agron.*, 1, 3, 163-175.
- BRISSON N., MARY B., RIPOCHE D., JEUFFROY M.H., RUGET F., NICOUILLAUD B., GATE P., DEVIENNE-BARRET F., ANTONIOLETTI R., DÜRR C., RICHARD G., BEAUDOIN N., RECOUS S., TAYOT X., PLÉNET 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.

¹ : publié chaque mois d'avril à octobre et accessible sous forme d'abonnement ou sur le site du Ministère de l'Agriculture (<http://www.agreste.agriculture.gouv.fr>)

- BRISSON N., RUGET F., GATE P., LORGEOU J., NICOUILLAUD B., TAYOT X., PLÉNÉT D., JEUFFROY M.-H., BOUTHIER A., RIPOCHE D., MARY B., JUSTES E. (2002) : "STICS : a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. II. Evaluation with comparison to actual experiment", *Agronomie*, 22,69-92.
- CROS M.J., DURU M., GARCIA F., MARTIN-CLOUAIRE R. (2004) : "Simulating management strategies: the rotational grazing example", *Agricultural Systems*, 80, 23-42.
- DONET I., CLASTRE P., RUGET F. (1999) : "GIS assessment of the grassland yield variability over France: soil types, management of interpolation reference points, and aggregation of outputs through a GIS", *19th ESRI Int. user conference*, San Diego, California, July 26-30, 1999, n° 250.
- DONET I., LE BAS C., RUGET F., RABAUD V. (2001) : "Informations et suivi objectif des prairies. Guide d'utilisation", *Agrreste. Chiffres et données*, 134, 55 p.
- DURU M. (1987) : "Croissance hivernale et printanière de prairies permanentes pâturées en montagne. I. Écophysiologie 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.
- 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.
- HENTGEN A. (1982) : "Une méthode pour améliorer la connaissance de la production disponible des surfaces herbagères au niveau national", *Fourrages*, 92, 15-49.
- JAMAGNE M., HARDY R., KING D., BORNAND M. (1995) : "La base de données géographique des sols de France", *Étude et gestion des sols*, vol. 2, n°3, 153-172.
- KING D., DAROUSSIN J., TAVERNIER R. (1994) : "Development of a soil geographic database from the soil map of the European Communities", *CATENA*, 21, 37-56.
- 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.
- PÉRARNAUD V., DONET I., RUGET F., DELÉCOLLE R. (1997) : "Estimation of the year-to-year variability of grassland production in France", *3rd Europ. Conf. on Applications of Meteorology*, 23-26 September 1997, Lindau, Deutschland, session 5: Non-real time applications of Meteorology, *Annalen der Meteorologie*, 35, Deutscher Wetterdienst, 188-190.
- 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.
- RUGET F., NICOUILLAUD B., LORGEOU J., BRISSON N., GATE P., RIPOCHE D., KING D., DELÉCOLLE R., DAROUSSIN J., NGONGO L., CLASTRE P. (1995) : *Délimitation de zones aux potentialités équivalentes en France et dans la Communauté Européenne pour optimiser les réseaux d'expérimentation des variétés. Blé et maïs*, Ruget F. éd., INRA Avignon, 52 p., 30 fig., 17 planches.
- 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., DURU M., GASTAL F. (1999) : "Adaptation of an annual crop model (STICS) to a perennial crop : grassland", *Int. Symp. modelling cropping systems*, Lleida, 21-23 June 1999, 111-112.
- SCEES (1984) : *Les prairies en 1982, Collections de statistique agricole*, étude 233, 71 p.

- SCEES (2000) : *Les prairies en 1998, Agreste, Chiffres et données Agriculture*, 128, 73 p.
- 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.
- TIERS N. (1998) : *Participation à la modélisation de la production fourragère à l'échelle nationale. Rapport d'activité*, 38 p.+annexes, INRA, Bioclimatologie, Avignon.

SUMMARY

Use of the ISOP system, based on the STICS model, for the assessment of forage production. Adaptation to grassland and spatialized application

The ISOP (Information et Suivi Objectif Prairie) system was set up in order to give information on the production of grasslands at the level of small regions in France. The variability among years of the yield is predicted taking into account the climate and the soils conditions. The ISOP system involves a crop model (STICS) which was adapted for grassland, in order to predict the forage yield and use it for spatial estimations. The main input data necessary for the model are described. The calibration of plant parameters was made using many species or permanent grasslands. The local validation of this calibration for three locations, and under different conditions, is presented.

The setting-up of the ISOP system requires some input data relative to space ; the origin of these data and their adequacy to represent spatial values is explained and justified. The ISOP results are compared with the statistical estimations made by SCEES, a statistical office of the French Ministry of Agriculture. Lastly, some examples of local variability among years are presented, as an illustration of the suitability of the ISOP estimations as compared with the SCEES estimations.