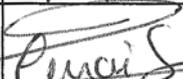
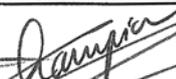


IRSNINSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Etude régionalisée de l'impact d'une pollution radioactive accidentelle sur une prairie permanente

Vanessa DURAND (stagiaire)
Catherine MERCAT-ROMMENS

DIRECTION DE L'ENVIRONNEMENT
ET DE L'INTERVENTION
Service d'Etude et de Surveillance
de la Radioactivité
dans l'Environnement

Demandeur					
Référence de la demande					
Numéro de la fiche programme					
<p>Projet SENSIB :</p> <p>Etude régionalisée de l'impact d'une pollution radioactive accidentelle sur une prairie permanente</p> <p>Laboratoire d'Etudes Radioécologiques Continentales et Marines</p> <p>Rapport DEI/SESURE 2006-01</p>					
	Réservé à l'unité		Visas pour diffusion		
	Auteur(s)	Vérificateur*	Chef du SESURE	Directeur DEI	Directeur Général de l'IRSN
Noms	C. MERCAT	P. RENAUD	N. LEMAITRE	D. CHAMPION	J. REPUSSARD
Dates	02/06/06	02/06/06	20/06/06	26/06/06	
Signatures					

HISTORIQUE DES MODIFICATIONS

Version	Date	Auteur	Pages ou paragraphes modifiés	Description ou commentaires
0	08/12/2005	Catherine MERCAT	Emission initiale	
	13/03/2006	Catherine MERCAT		Prise en compte relecture P. RENAUD
	24/05/2006	Vanessa DURAND		Prise en compte relecture N. LEMAITRE

LISTE DES PARTICIPANTS

Nom	Organisme
Vanessa DURAND	Stagiaire IRSN / DEI / SESURE / LERCM
Catherine MERCAT	IRSN / DEI / SESURE / LERCM

LISTE DE DIFFUSION

Nom	Organisme
J. REPUSSARD	IRSN/DIR
M. BRIERE	IRSN/DIR
M. BOUVET	IRSN/DSDRE
J. LEWI	IRSN/DESTQ
MP BIGOT	IRSN/COM
F. SOULET	DESTQ/DISCT/CRIS
D. CHAMPION	DEI/DIR
D. BOULAUD	DEI/DIR
B. DUFER	DEI/DIR
JM PERES	DEI/SARG
JC GARIEL	DEI/SECRE
P. DUBIAU	DEI/SESUC
JP. MAIGNE	DEI/SIAR
MC. ROBE	DEI/STEME
P. CALMON	DEI/SECRE/LME
B. DESCAMPS	DEI/SESURE/LESE
P. CUENDET	DEI/SESURE/LVRE
P. RENAUD	DEI/SESURE/LERCM

RESUME

L'objectif de cette étude consiste à évaluer la sensibilité de l'amont de la filière laitière vis-à-vis d'un rejet radioactif accidentel. Il s'agit de savoir si un dépôt uniforme et ponctuel entraînerait une contamination identique de l'herbe issue d'une prairie permanente à l'échelle du territoire national. Pour cela l'étude s'est appuyée sur le modèle ASTRAL, un code de calcul développé par l'IRSN qui permet d'évaluer le transfert des radionucléides dans la chaîne alimentaire terrestre suite à une émission atmosphérique accidentelle. La voie de transfert d'ASTRAL sur laquelle l'étude s'est concentrée est le transfert du dépôt au lait, *via* l'ingestion d'herbe de pâture. La sensibilité de cette voie de transfert dépend des paramètres de captation, de rendement, des quantités quotidiennement ingérées par les vaches laitières et des dates de mise à l'herbe. La méthodologie a donc consisté à régionaliser ces paramètres en exploitant notamment des données de terrain. Le logiciel STICS, développé par l'INRA d'Avignon a été ensuite utilisé. Ce modèle propose un suivi au pas de temps journalier de l'indice foliaire, variable à laquelle on a pu corréliser la captation, ainsi que la production de biomasse fraîche (rendement).

MOTS-CLES : Rejet accidentel, contamination agricole, herbe de pâture, prairies permanentes, vache laitière, sensibilité radioécologique, SENSIB, régionalisation.

ABSTRACT

The objective of this study consists in evaluating the sensitivity of the first part of the die grass-milk with respect to an accidental radioactive discharge. We want to know if a single uniform deposit would involve a contamination of the grazing grass identical on the scale of the own territory. The study was based on the ASTRAL model, a computer code developed by the IRSN which makes it possible to evaluate the transfer of the radionucléides in the terrestrial food chain following an accidental atmospheric emission. The way of transfer of ASTRAL on which the study focused is the transfer of the deposit to milk, via the grazing grass ingestion. The sensitivity of this way of transfer relies on several parameters: captation, yield, cows food rates and dates of setting to grass. Methodology thus consisted in regionalizing these parameters. The software STICS, developed by the INRA of Avignon was then used. This model proposes a daily follow-up of the leaf area index which has been correlated with capitation and with the production of fresh biomass (yield).

KEY-WORDS: Accidental discharges, agricultural contamination, grazing grass, permanent meadows, cows, radioecological sensitivity, SENSIB, regionalization.

Sommaire

1 INTRODUCTION	5
2 METHODOLOGIE	7
2.1 PRESENTATION DU MODELE ASTRAL	7
2.1.1 <i>Typologie ASTRAL des productions agricoles végétales</i>	7
2.1.2 <i>Contamination de l'herbe de pâture</i>	8
2.1.2.1 Mode de calcul de l'activité dans l'herbe de pâture	8
2.1.2.2 Paramètres susceptibles d'être régionalisés	9
2.1.2.2.1 La proportion de dépôt sec : <i>Kr</i>	9
2.1.2.2.2 Le rapport de captation par temps sec : <i>RCs</i>	9
2.1.2.2.3 Le rapport de captation par temps humide : <i>RCh</i>	11
2.1.2.2.4 Le rendement cultural : <i>Rdt</i>	11
2.1.2.2.5 Autres paramètres	11
2.2 PRESENTATION DU LOGICIEL STICS-PRAIRIE	12
2.2.1 <i>Généralités sur STICS</i>	12
2.2.2 <i>Hypothèses de travail</i>	13
2.2.2.1 Hypothèse sur l'indice foliaire	13
2.2.2.2 Hypothèse sur la date de récolte (pâture par l'animal).....	13
2.2.2.3 Hypothèse sur la fertilisation azotée minérale	13
2.2.3 <i>La croissance aérienne et la sénescence foliaire</i>	13
3 TYPOLOGIES DES EXPLOITATIONS AGRICOLES.....	15
3.1 CHOIX DES REGIONS-TEST.....	15
3.2 CHOIX DES EXPLOITATIONS-TYPE.....	16
3.2.1 <i>Région Lorraine</i>	16
3.2.2 <i>Région Rhône-Alpes</i>	18
3.2.3 <i>Région Normandie</i>	18
3.3 LIMITES DE LA TYPOLOGIE CHOISIE	20
4 DESCRIPTIONS DES SIMULATIONS REALISEES AVEC STICS.....	21
4.1 DONNEES D'ENTREE NECESSAIRES AU MODELE	21
4.1.1 <i>Les fichiers plantes et les fichiers techniques</i>	21
4.1.2 <i>Les fichiers climatiques</i>	22
4.1.2.1 Températures minimales et maximales journalières	23
4.1.2.2 Précipitations	23
4.1.2.3 Rayonnement global	23
4.1.2.4 L'évapotranspiration potentielle.....	24
4.1.3 <i>Le fichier pédologique</i>	26
4.2 CALCUL DE L'INDICE FOLIAIRE ET SORTIES DU MODELE	27
4.2.1 <i>Bilan de simulation</i>	27

4.2.2 Calcul de l'indice foliaire..... 27

5 RECONSTITUTION DES PARAMETRES D'ASTRAL AVEC LES RESULTATS DE STICS 30

5.1 ETUDE DU RAPPORT DE CAPTATION PAR TEMPS SEC RCS 30

5.1.1 Mode de calcul..... 30

5.1.2 Résultats : les courbes de RCS 30

5.1.3 Intégration de la variabilité des caractéristiques des sols 32

5.2 ETUDE DU RAPPORT DE CAPTATION PAR TEMPS DE PLUIE RCh 33

5.2.1 Mode de calcul..... 33

5.2.2 Résultats : les courbes de RCh 34

5.3 ETUDE DE LA DATE DE CONSOMMATION DE L'HERBE DAT_R..... 35

5.4 ETUDE DU RENDEMENT RDT..... 37

5.4.1 Résultats obtenus à la suite de STICS..... 37

5.4.2 Comparaison entre les valeurs d'ASTRAL, celles de l'enquête et celles de STICS 38

5.5 LE FACTEUR DE TRANSFERT DIRECT 39

6 CONCLUSION 42

6.1 INTERETS ET LIMITES DU TRAVAIL 42

6.2 PERSPECTIVES 43

7 BIBLIOGRAPHIE 45

Liste des tableaux

TABLEAU 1 : TYPOLOGIE DES PRODUCTIONS AGRICOLES VEGETALES EN FONCTION DES 3 GROUPES (CALMON ET MOURLON, 2003).....	7
TABLEAU 2 : CARACTERISTIQUES DES 3 REGIONS-TEST (DONNEES CD-ROM AGRESTE 2000)	15
TABLEAU 3 : DATES ET RATIONS ALIMENTAIRES DES VACHES LAITIERES AU COURS DE L'ANNEE DANS LES 3 REGIONS-TEST (INSTITUT DE L'ELEVAGE ET RABAUT, 2000).....	19
TABLEAU 4 : DESCRIPTIF DES PARAMETRES TECHNIQUES MODIFIES POUR LES SIMULATIONS SOUS STICS.....	21
TABLEAU 5 : TEMPERATURES MINIMALES ET MAXIMALES JOURNALIERES	23
TABLEAU 6 : VALEURS JOURNALIERES CLIMATIQUES PRISES EN COMPTE DANS LES SIMULATIONS SOUS STICS	25
TABLEAU 7 : VALEURS DES PARAMETRES PEDOLOGIQUES NECESSAIRES POUR LES SIMULATIONS (BASE DE DONNEES DE L'AFES) 26	
TABLEAU 8 : COMPARAISON DES VALEURS DE CERTAINS PARAMETRES PEDOLOGIQUES ENTRE LES SOLS DES REGIONS CONSIDEREES ET CELUI DE STICS	33
TABLEAU 9 : COMPARAISON DES DATES DE PATURAGE DES VACHES LAITIERES ENTRE LES PREVISIONS DE L'INSTITUT DE L'ELEVAGE ET ASTRAL	36
TABLEAU 10 : COMPARAISON DES RENDEMENTS CULTURAUX DES PRAIRIES DANS CHACUNE DES REGIONS ETUDIEES	38
TABLEAU 11 : COMPARAISON DES VALEURS DE RCS TABULEES DANS ASTRAL A CELLES RECALCULEES AVEC LES DONNEES DE STICS.....	39
TABLEAU 12 : COMPARAISON DES VALEURS DE FTDH TABULEES DANS ASTRAL A CELLES RECALCULEES AVEC LES DONNEES DE STICS.....	40

Liste des figures

FIGURE 1 : LE PATURAGE TOURNANT (SOLTNER, 1990).....	17
FIGURE 2 : EVOLUTION DE L'INDICE FOLIAIRE SELON LES STATIONS EN FONCTION DU TEMPS	28
FIGURE 3 : COURBE THEORIQUE DE REPOUSSE DE L'HERBE, ET PRODUCTION TOTALE D'HERBE A L'HECTARE A DEUX SAISONS DIFFERENTES (SOLTNER, 1990).....	29
FIGURE 4 : EVOLUTION TEMPORELLE DU RAPPORT DE CAPTATION PAR TEMPS SEC SELON LES REGIONS ETUDIEES.....	31
FIGURE 5 : EVOLUTION TEMPORELLE DU RAPPORT DE CAPTATION RCs EN INTEGRANT LA VARIABILITE DES SOLS	32
FIGURE 6 : VARIABILITE SAISONNIERE DES PRECIPITATIONS JOURNALIERES ENTRE LES TROIS SITES ETUDIES.....	34
FIGURE 7 : EVOLUTION DU RAPPORT DE CAPTATION PAR TEMPS DE PLUIE DURANT LA PERIODE DE PATURAGE	34
FIGURE 8 : EVOLUTION TEMPORELLE DE LA BIOMASSE FRAICHE AERIENNE (TMS/HA) EN FONCTION DE LA DATE.....	37
FIGURE 9 : COMPARAISON DES VALEURS DE RENDEMENT (KG FRAIS/M ²) ENTRE ASTRAL ET LES DONNEES REGIONALES ISSUES DE STICS.....	38
FIGURE 10 : COMPARAISON DES VALEURS DE FTDS SELON ASTRAL ET POUR LES TROIS SITES ETUDIES AVEC LE RENDEMENT ISSU D'ASTRAL ET AVEC LES RENDEMENTS DES REGIONS CALCULES AVEC STICS.....	41
FIGURE 11 : COMPARAISON DES VALEURS DE FTDH SELON ASTRAL ET POUR LES TROIS SITES ETUDIES AVEC LE RENDEMENT ISSU D'ASTRAL ET AVEC LES RENDEMENTS DES REGIONS CALCULES AVEC STICS.....	41

1 INTRODUCTION

Les conséquences d'une pollution d'origine industrielle pour l'homme et l'environnement dépendent non seulement de l'importance et de la nature de celle-ci, mais également de l'environnement qui la reçoit (conséquences plus ou moins pénalisantes suivant les caractéristiques du milieu touché et suivant l'usage qu'en fait l'homme). Les différents milieux présentent donc des sensibilités différentes vis-à-vis de la pollution : la sensibilité du milieu agricole par exemple, sera déterminée par les caractéristiques du sol, des plantes cultivées et des animaux d'élevage. Dans le cadre des études radioécologiques de terrain menées par le LERCM (Laboratoire d'Etudes Radioécologiques dans les Milieux Continentaux et Marins) de l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, un projet transversal dénommé SENSIB a été lancé depuis septembre 2003 (*Mercat-Rommens et Renaud, 2003*). L'objectif de ce projet, dans lequel s'insère l'étude, est de créer un outil normalisé qui permette de représenter et de comparer sur une même échelle de valeurs la sensibilité des différents milieux vis-à-vis d'une pollution radioactive et ainsi d'obtenir une classification des différents environnements sur la base de leurs caractéristiques intrinsèques (hauteur de précipitations, pratiques d'affouragement, type de sol...).

Cette étude porte exclusivement sur le volet agricole du projet. Il s'agit de participer à l'élaboration d'une méthode de classement des surfaces agricoles en fonction de leur sensibilité aux pollutions atmosphériques radioactives. En effet, après la phase accidentelle pendant laquelle des radionucléides ont pu être rejetés dans l'environnement, il convient d'analyser et d'estimer ce qui se produirait dans la phase suivante, dite post-accidentelle. Il s'agit dans un premier temps, d'identifier les facteurs susceptibles d'augmenter ou de diminuer les conséquences d'une telle pollution, de les caractériser et de les hiérarchiser afin d'en déduire un système d'indices de sensibilité. L'objectif de l'étude consiste à étudier la sensibilité de la filière laitière vis-à-vis d'un rejet accidentel de radioactivité. Il s'agit de savoir si un dépôt uniforme et ponctuel entraînerait une contamination identique de cette production à l'échelle du territoire national. Pour cela, l'étude s'appuie sur le modèle ASTRAL (Assistance Technique en Radioprotection post-Accidentelle), un code de calcul développé par l'IRSN qui permet d'évaluer le transfert des radionucléides dans la chaîne alimentaire terrestre suite à une émission atmosphérique accidentelle. On cherche donc à évaluer l'effet de la régionalisation des paramètres du modèle ASTRAL sur l'activité massique des produits agricoles, en l'occurrence pour cette étude, les fourrages issus d'une prairie permanente, soumise à un dépôt atmosphérique accidentel. Il s'agit de déterminer la concentration en ^{137}Cs dans le fourrage au moment de son ingestion par l'animal. Le champ d'étude a été restreint à l'herbe et au transfert foliaire car cette voie de transfert est prépondérante par rapport à la voie racinaire durant la première année suivant l'accident. Afin d'identifier les paramètres qui seraient susceptibles d'influencer significativement les transferts des contaminants dans la chaîne alimentaire, le logiciel STICS-Prairie (Simulateur multidisciplinaire pour des Cultures Standard appliqué à la prairie) de l'INRA-Avignon a été

utilisé. Ce modèle propose en effet un suivi au pas de temps journalier de l'indice foliaire, variable qui a pu être corrélée à certains paramètres radioécologiques d'ASTRAL.

Le couplage entre le modèle de transfert de radionucléides dans la chaîne alimentaire ASTRAL et le modèle de culture STICS permet par ailleurs de confronter les valeurs de paramètres génériques utilisées dans ASTRAL aux valeurs issues de STICS qui prennent en compte certaines sources régionales de variabilité : conditions météorologiques, type de sol, système de culture. Ce type de couplage constitue une voie d'amélioration de la connaissance des paramètres utilisés en radioécologie.

De plus, l'étude de la variabilité régionale des paramètres d'ASTRAL est aussi l'occasion d'un recueil et d'une analyse des pratiques culturelles françaises associées aux prairies permanentes et à la conduite des troupeaux de vaches laitières sur ce type de prairies et constitue donc une acquisition de connaissance qui peut être utile dans le cadre d'autres travaux, que ce soit pour le projet SENSIB ou pour d'autres projets.

2 METHODOLOGIE

2.1 Présentation du modèle ASTRAL

ASTRAL est un code de calcul qui permet d'évaluer le transfert des radionucléides dans la chaîne alimentaire terrestre suite à une émission atmosphérique accidentelle. Cet outil d'aide à la décision en cas de contamination radioactive importante de l'environnement se compose principalement d'un module de calcul qui fait appel à des bases de données géographiques et radioécologiques (paramètres de transferts). Ce modèle de radioprotection permet d'évaluer l'impact de dépôts de radioactivité sur les productions agricoles (activités massives), les ressources agronomiques (surfaces et quantités concernées) et sur les populations (doses) des zones touchées par un éventuel accident.

2.1.1 Typologie ASTRAL des productions agricoles végétales

Les principales productions agricoles répertoriées par le Ministère de l'Agriculture, telles que présentées dans la Base de Données Agricoles (Fache, 1995) ont été regroupées en une typologie comprenant 3 groupes et couvrant 15 « classes ASTRAL ». Les critères de regroupement sont l'appartenance à une famille agronomique, l'appartenance à une unité radioécologique (certains éléments de familles ou de variétés agronomiques différentes présentent des similitudes vis-à-vis des transferts de radioactivité et peuvent être assimilés), les pratiques agricoles (calendriers agricoles...) et la destination. Ces trois groupes sont présentés dans le tableau 1.

Groupe	CLASSE ASTRAL	Descriptif de la catégorie	Principales cultures concernées
Grandes cultures	Céréales homme hiver	Céréales semées en hiver, pour la consommation humaine	<u>Blé tendre</u> , dur, seigle
	Céréales homme printemps	Céréales semées au printemps, pour la consommation humaine	<u>Orge</u> , blé dur et tendre
	Céréales animaux hiver	Céréales semées en hiver, pour l'alimentation animale (affouragement ou ensilage)	<u>Orge-escourgeon</u> , triticale, avoine
	Céréales animaux printemps	Céréales semées au printemps, pour l'alimentation animale (affouragement ou ensilage)	<u>Maïs</u> , orge, avoine, sorgho
	Racines et tubercules	Racines et tubercules de grande culture destinées à l'alimentation humaine ou animale	<u>Pomme de terre</u> , <u>Betterave</u>
	Oléagineux d'hiver	Oléagineux d'hiver (alimentation animale ou industrie)	<u>Colza d'hiver</u>
	Oléagineux printemps	Oléagineux de printemps (alim. animale ou industrie)	<u>Tournesol</u> , soja
	Ensilage maïs	Maïs d'ensilage destiné à l'alimentation animale	<u>Maïs d'ensilage</u>
	Graines protéagineuses	Protéagineux de printemps	<u>Pois</u> , féverole
	Foin d'hiver	Graminées et légumineuses destinées à l'alimentation animale et fanées à l'automne	Luzerne, fétuque, dactyle, trèfle incarnat et violet d'hiver, ray-grass d'Italie.
Foin printemps	Cultures de graminées et légumineuses destinées à l'alimentation animale et fanées au printemps	Luzerne, fétuque, dactyle, trèfle d'Alexandrie et violet de printemps	
Produits maraichers	Légumes feuille	Cultures maraichères dont les feuilles sont consommées	Salade, chou, épinard, céleri, poireau...
	Légumes fruit	Cultures maraichères dont les fruits sont consommés	Tomate, petit pois, haricot, courgette...
	Légumes racine	Cultures maraichères dont les racines ou tubercules sont consommés, et assimilés	Carotte, radis, navet
Prairie permanente	Herbe pâture	Surfaces toujours en herbe (pâturage, pacages)	

Tableau 1 : typologie des productions agricoles végétales en fonction des 3 groupes (Calmon et Mourlon, 2003).

L'examen des spécificités agronomiques des productions considérées a conduit à prévoir des traitements différents pour les groupes cités. Nous nous sommes intéressés au troisième groupe qui intègre les surfaces toujours en herbe (pâturage et pacages).

2.1.2 Contamination de l'herbe de pâture

2.1.2.1 Mode de calcul de l'activité dans l'herbe de pâture

Les équations ci-dessous sont tirées de la modélisation d'ASTRAL (*Renaud et al., 1997a* et *Calmon et Murlon, 2003*). L'activité dans l'herbe se calcule de la manière suivante :

$$Cv(t) = Cv_{fol}(t) + Cv_{rac}(t)$$

Cv : Concentration du végétal à la récolte (Bq.kg⁻¹ frais)

Cv_{fol} : Concentration due au transfert foliaire (Bq.kg⁻¹ frais)

Cv_{rac} : Concentration due au transfert racinaire (Bq.kg⁻¹ frais)

t : Temps écoulé à partir du dépôt

La date de récolte (date de consommation par l'animal) correspond à la date d'étude. Les transferts foliaire et racinaire sont considérés simultanément. Mais leurs contributions respectives varient en fonction du délai dépôt-consommation par l'animal (élimination du dépôt direct et prise en compte progressive du transfert sol-plante). Comme nous l'avons dit précédemment, le champ d'étude a été limité au transfert foliaire car cette voie de transfert est prépondérante par rapport à la voie racinaire durant la première année suivant l'accident. La contamination est alors calculée selon l'équation suivante :

$$Cv_{fol}(t) = \frac{Dr}{Rdt_v} \times [Kr.RCs_{v,r,DatD} + (1-Kr).RCh_{v,r,DatD,Hp}] \times [a.e^{-(\lambda_{bw} + \lambda_r).t} + (1-a).e^{-(\lambda_L + \lambda_r).t}]$$

Dr : Dépôt total du radionucléide r sur l'ensemble du sol et des végétaux (Bq.m⁻²)

Kr : Proportion du dépôt sec dans le dépôt total

Rdt_v : Rendement cultural du végétal v (kg frais.m⁻²) au moment du dépôt

RCs, RCh : Rapports de captation par temps sec et par temps de pluie

a : Pondérateur de décroissance

λ_{bw} : Constante de décroissance par croissance biologique et lessivage des feuilles (j⁻¹)

λ_L : Constante de décroissance long terme (j⁻¹)

λ_r : Constante de décroissance radioactive (j⁻¹)

Dat_D : Date de dépôt

Hp : Hauteur de précipitation (mm)

t : Temps à partir du dépôt (j)

v et r : Végétal et radionucléide considérés

Ainsi, pour l'herbe, l'activité au temps t après le dépôt est déterminée par la contamination initiale en prenant en compte les conditions météorologiques lors du dépôt, la décroissance radioactive et la croissance du végétal (dilution de l'activité).

2.1.2.2 Paramètres susceptibles d'être régionalisés

2.1.2.2.1 La proportion de dépôt sec : Kr

Le paramètre Kr correspond à la proportion de dépôt sec par rapport au dépôt total. Il est susceptible d'être régionalisé puisqu'il varie en fonction de l'intensité de précipitation au moment du dépôt. Cependant, on ne peut travailler de façon prédictive sur les facteurs climatiques en situation accidentelle. Il s'agit en effet d'un facteur de risque, lié exclusivement à l'événement. On fixera donc Kr égal à 1 (dépôt intégralement sous forme sec) ou 0 (dépôt intégralement sous forme humide) au cours des simulations par ASTRAL.

2.1.2.2.2 Le rapport de captation par temps sec : RCs

Le rapport de captation, encore dénommé facteur d'interception, est défini comme le rapport sans dimension entre l'activité fixée par la végétation et l'activité totale déposée sur 1 m^2 . Dans le modèle ASTRAL, la valeur de la captation dépend uniquement de la surface développée par le couvert végétal au moment du dépôt, indépendamment de l'état physiologique de la plante (activité photosynthétique, sénescence...). Il correspond à la fraction de l'activité totale déposée qui est interceptée par la partie aérienne des végétaux.

Chamberlain (1970) a proposé une modélisation du rapport de captation par dépôt sec d'un végétal herbacé ou à l'état herbacé, comme fonction du rendement de biomasse (kg/m^2) de ce végétal. Cette expression permet, s'y l'on exprime de manière linéaire l'évolution du rendement de biomasse en fonction du temps durant la croissance du végétal herbacé, d'obtenir une expression du rapport de captation comme fonction du temps *via* ce rendement de biomasse :

$$RCs = 1 - e^{-\mu R}$$

μ : Constante d'interception ou coefficient de captation ($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ frais ou sec)

R : Rendement de biomasse aérienne (kg frais ou sec. m^{-2})

Le programme RESSAC de l'IRSN (Maubert *et al.*, 1991) avait notamment pour objectif de généraliser cette équation à d'autres cultures. Les résultats des expérimentations menées en France dans le cadre de ce programme ont conduit à l'utilisation de la formule de Chamberlain modifiée :

$$RCs = S \times (1 - e^{-\mu R})$$

S : Coefficient de saturation (s.d). C'est la fraction maximale de dépôt captée par une culture donnée quelle que soit sa biomasse, soit $S = RC_{max}$. Pour une culture donnée, S dépend de la géométrie du couvert et de la densité de plantation. Ce modèle a été largement validé pour l'herbe de pâture et les légumes-feuilles.

Le rapport de captation par temps sec peut être estimé grâce à l'indice foliaire, défini comme la surface susceptible de capter les aérosols, c'est-à-dire la surface de feuille par unité de surface de sol. On considère donc l'ensemble des surfaces des feuilles, cumulées entre les étages de végétation, par unité de surface du sol (m^2 feuilles/ m^2 sol), indépendamment de leur activité photosynthétique. Cette définition diffère donc de celle agronomique qui considère uniquement la surface des feuilles vertes.

Un modèle allemand, ECOSYS-87, qui a été testé suite à l'accident de Tchernobyl dans le cadre de programmes internationaux (Müller et Pröhl, 1993), propose un mode de calcul du dépôt sur la plante et du dépôt total, dont le rapport équivaut à la captation, qui utilise l'indice foliaire. Des études de comparaison entre les prédictions d'ECOSYS-87 et des mesures effectuées dans différents sites européens ont donné des résultats satisfaisants (Renaud et al., 1997b). ECOSYS postule qu'un dépôt radioactif sur une surface quelconque s'évalue par le produit d'une vitesse de dépôt par une concentration de radionucléides dans l'air et que la vitesse de dépôt sur la plante dépend de son développement foliaire. La variable choisie pour caractériser le stade de la plante est l'indice foliaire :

$$Ad_i = Vg_i \times Ca \qquad Vg_i = Vg_{i \max} \times (LAI_i / LAI_{i \max})$$

Ad_i : Dépôt sec sur la plante i ($Bq.m^{-2}$)

Vg_i : Vitesse de dépôt sur la plante i ($m.s^{-1}$)

Ca : Concentration dans l'air de l'activité intégrée dans le temps ($Bq.s.m^{-3}$)

$Vg_{i \max}$: Vitesse de dépôt maximale sur la plante i ($m.s^{-1}$)

LAI_i : Leaf Area Index ou indice foliaire de la plante i

$LAI_{i \max}$: Indice foliaire maximal de la plante i

En exprimant de la même façon le dépôt total (Ad_t), on déduit des deux équations, l'expression suivante du rapport de captation :

$$RCs = \frac{Ad_i}{Ad_t} = \frac{LAI_i / LAI_{i \max}}{(LAI_i / LAI_{i \max}) + (Vg_s / Vg_{i \max})}$$

Avec :

$$Ad_t = (Vg_s + Vg_i) \times Ca$$

Vg_s : Vitesse de dépôt sur le sol ($m.s^{-1}$), constante pour tout type de plante

On fait l'hypothèse que le couvert végétal n'est pas au même stade à un temps t donné sur l'ensemble du territoire français. Nous allons donc pouvoir modifier le paramètre radioécologique d'ASTRAL, le rapport de captation par temps sec, par l'utilisation du paramètre agronomique LAI , ce qui nous permettra de prendre en compte la *variabilité* régionale. Certains facteurs vont pouvoir être pris en considération, notamment les conditions climatiques et topographiques, et également la conduite du troupeau laitier car ils influent directement sur l'indice foliaire.

2.1.2.2.3 Le rapport de captation par temps humide : RCh

Dans le cas d'un dépôt humide, les travaux d'Angeletti et Levi (1977), suivis de ceux d'Hoffman (1989) ont montré que l'interception est essentiellement corrélée à la biomasse et à la hauteur d'eau contaminée précipitée. L'équation permettant de calculer RCh est la suivante :

$$RCh = \left(LAI \times \frac{S_2}{P} \right) \times \left[1 - 2^{-\left(\frac{P}{3S_2} \right)} \right]$$

LAI : Leaf Area Index ou indice foliaire

S_2 : Coefficient de saturation (mm), dépend du radionucléide et du végétal

P : Quantité d'eau (mm)

L'efficacité de la captation lors d'un dépôt humide est inversement proportionnelle à la hauteur de précipitation. En effet, la pluie entraînant le lessivage des aérosols déposés sur les feuilles, la captation s'en trouve diminuée.

De même que pour le rapport de captation sec, le rapport de captation humide RCh va être estimé avec le LAI en intégrant la *variabilité* des conditions culturales.

2.1.2.2.4 Le rendement cultural : Rdt

Le rendement cultural ou rendement de biomasse aérienne correspond à la masse du végétal en kg frais au moment de la récolte et plus particulièrement, à la date d'ingestion des animaux, par m^2 de sol (Renaud *et al.*, 1997a). Il respecte la définition du « rendement agronomique » dans la mesure où la partie comestible de l'herbe correspond à la biomasse aérienne. Ce paramètre agronomique varie fortement d'une région à l'autre, notamment entre une région de plaine et une région de montagne. C'est pourquoi, il est également susceptible d'être régionalisé.

2.1.2.2.5 Autres paramètres

L'évolution de la concentration durant les jours suivant le dépôt est modélisée par une décroissance exponentielle à deux compartiments l'un régissant l'élimination rapide à court terme λ_{bw} (qui rend compte des phénomènes de lessivage des feuilles et de croissance biologique de l'herbe) et l'autre λ_L l'élimination à long terme. Cette décroissance est atténuée au bout d'un certain temps par la remise à disposition de la plante de la radioactivité fixée dans le mat de prairie (couche organique intermédiaire comprise entre la partie chlorophyllienne du végétal et le premier horizon minéral du sol).

Le paramètre a , qualifié de pondérateur de décroissance, détermine la fraction de l'activité initialement retenue sur l'herbe qui diminuera dans le temps avec l'une et l'autre des deux constantes de décroissance.

La régionalisation de ces trois paramètres (\square_{bw} , \square_L et a) ne fait pas partie de l'objet de l'étude. Ces paramètres prennent donc les valeurs déterminées à partir des expérimentations effectuées par l'IPSN (Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire) dans le cadre du programme TRAVAC (Réal et al., 1995), à savoir, respectivement 6.10^{-2} j^{-1} pour \square_{bw} (période biologique d'environ 12 jours), 7.10^{-3} j^{-1} pour \square_L (période biologique d'environ 100 jours) et 0,99 pour a : la décroissance de l'activité est majoritairement due à la croissance biologique de l'herbe et au lessivage des feuilles.

2.2 Présentation du logiciel STICS-Prairie

2.2.1 Généralités sur STICS

STICS est un modèle de croissance des cultures à pas de temps journalier (Brisson et al., 2002). Ses variables d'entrées sont relatives au climat, au sol et au système de culture. Ses variables de sorties sont relatives à la production (quantité et qualité), à l'environnement et à l'évolution des caractéristiques du sol sous l'effet de la culture. STICS a été conçu comme un outil de simulation opérationnel en conditions agricoles. Son principal objectif est de simuler les conséquences des variations du milieu et du système de culture sur la production d'une parcelle agricole. Ce modèle dynamique simule le comportement du système sol-culture au cours d'une année. La culture est appréhendée globalement par sa biomasse aérienne et sa teneur en azote, son indice foliaire ainsi que le nombre et la biomasse (et leur teneur en azote) des organes récoltés. Ainsi, les organes végétatifs (feuilles, ramifications ou talles) ne sont pas individualisés. Le sol est assimilé à une succession de couches horizontales, chacune de ces couches étant caractérisée par sa réserve en eau, en azote minéral et en azote organique. Les interactions entre le sol et la culture sont assurées par les racines, celles-ci étant définies par une distribution de densité racinaire dans le profil de sol. Le modèle simule le bilan de carbone, le bilan d'eau et le bilan d'azote du système et permet de calculer à la fois des variables agricoles (rendement, consommations d'intrants) et des variables environnementales (pertes d'eau et de nitrate) dans diverses situations agricoles.

STICS est organisé en modules et chaque module fait appel à un certain nombre de sous-programmes (ou sous-modules) traitant de mécanismes spécifiques. Un premier ensemble de trois modules traite de l'écophysiologie des parties aériennes des plantes (développement, croissance aérienne, élaboration du rendement), un second ensemble de quatre modules traite du fonctionnement du sol en interaction avec les parties souterraines des plantes (croissance racinaire, bilan hydrique, bilan azoté, transferts). A l'interface se trouve un module de gestion des interactions entre les techniques culturales et le système sol-culture, qu'il s'agisse des apports d'eau, d'engrais ou du microclimat. Les stades simulés sous STICS diffèrent des stades agronomiques classiques, comme dans la plupart des modèles. En effet, ce sont des stades de croissance plutôt que des stades de genèse d'organes,

correspondant à des changements trophiques ou morphologiques de la culture. Ils sont notamment utilisés pour simuler le LAI.

2.2.2 Hypothèses de travail

2.2.2.1 Hypothèse sur l'indice foliaire

On cherche à obtenir des parcours d'indice foliaire en intégrant la *variabilité* régionale des conditions culturales, c'est-à-dire, en intégrant le climat et les différents modes de conduite des prairies permanentes (prairies naturelles, herbages et pâtures) afin de recalculer les paramètres radioécologiques. On suppose donc que la valeur de l'indice foliaire de la prairie varie selon les régions à une date donnée. S'il en est ainsi, les rapports de captation par temps sec et par temps de pluie varieront également.

2.2.2.2 Hypothèse sur la date de récolte (pâture par l'animal)

La date de récolte, qui correspond ici à la date de consommation par l'animal, est utilisée pour calculer le délai dépôt-consommation dans le modèle ASTRAL. Ainsi, dans le cas où les dates de consommation de l'herbe seraient différentes selon la région considérée, les valeurs extraites des tables de paramètres par le code de calcul seraient donc variables pour une même date de dépôt. Les dates de consommation de l'herbe, et plus particulièrement les dates de mise à l'herbe, de total pâturage et de rentrée en stabulation, permettraient d'intégrer l'effet du site dans l'estimation de la contamination du lait.

2.2.2.3 Hypothèse sur la fertilisation azotée minérale

La fertilisation azotée minérale est également prise en compte à l'aide du logiciel agronomique STICS. En effet, la fertilisation conditionne la pousse de l'herbe et le rendement : un apport au printemps, après une première exploitation par le pâturage ou une première fauche précoce, cherche à profiter au maximum de l'aptitude de l'herbe à la pousse, en vue de deux autres pâturages. Il est nécessaire de prolonger le stade du tallage et la formation des feuilles par un apport azoté, pour avoir une production d'herbe de qualité, objectif de l'éleveur laitier qui recherche la qualité et un rendement maximum de lait (Soltner, 1990). La connaissance des fréquences de fertilisation et des doses moyennes d'azote minéral apporté sur les prairies permet également d'intégrer l'effet du site dans l'estimation de la contamination.

2.2.3 La croissance aérienne et la sénescence foliaire

Le modèle STICS respecte la définition agronomique de l'indice de surface foliaire, qui ne prend en compte que la surface cumulée des feuilles vertes par unité de surface de sol. Par ailleurs, il propose plusieurs options pour calculer la variable de sortie qui nous intéresse

désignée par *LAI (n)*. L'option sélectionnée par défaut, « LAI-net direct », simule directement le *LAI* comme le bilan net entre la croissance et la sénescence des feuilles. La sénescence naturelle est dans ce cas implicite. Elle utilise deux stades phénologiques spécifiques : entre les stades « indice foliaire maximal » et « début de sénescence », l'indice foliaire est constant. Par contre, du début de sénescence au stade « LAI nul », l'indice foliaire décroît linéairement en fonction du temps physiologique. L'autre option possible prend en compte la sénescence de façon explicite en utilisant le concept de durée de vie naturelle des feuilles, donc en prenant en compte le stress hydrique ou azoté. Comme pour l'étude précédente (*Delboe et Mercat-Rommens, 2005*), on choisit l'option *LAI-net* donnée par défaut par rapport à celle du *LAI-brut* dans la mesure où cette dernière demande plusieurs valeurs de paramètres qui ne sont pas nécessaires pour cette étude. La croissance foliaire est donc estimée pour nos simulations à partir du calcul de l'indice de croissance foliaire net ($m^2/plante/jours$), d'après les stades phénologiques uniquement. Cet indice décrit une courbe sigmoïde en fonction du temps, qui tend vers une asymptote caractéristique de l'espèce, et dont le point d'inflexion se situe à la fin de la phase juvénile. Cet indice est ensuite multiplié par la température effective du couvert, puis par la densité de plantation combinée avec un facteur de résistance à la compétition inter-plante et enfin, par les indices de stress azoté et hydrique.

L'option *LAI-net* sélectionnée représente donc l'indice foliaire du couvert en croissance retranché de celui des feuilles sénescentes. Ce qui signifie, qu'au moment de la récolte (coupe par le pâturage de l'animal), le *LAI* devient nul dans la mesure où toutes les feuilles sont alors sénescentes. Pour tenir compte du fait que la captation, qui ne dépend que de la surface physique déployée par le couvert indépendamment des fonctions physiologiques et photosynthétiques des feuilles, n'est pas nulle au moment de la pâture, nous avons additionné le *LAI (n)* des feuilles vertes et celui des feuilles jaunes, le *LAI_{sen}*.

Afin de pouvoir estimer le rendement de la pâture, on sélectionne également le calcul de la matière sèche aérienne totale en $t.ha^{-1}$, « masec(n) », ainsi que la matière fraîche aérienne en $t.ha^{-1}$, « mafrais ».

3 TYPOLOGIES DES EXPLOITATIONS AGRICOLES

L'évaluation de la radioactivité quotidiennement ingérée repose sur les quantités de fourrages consommées qui varient selon la période de l'année. C'est pourquoi les calendriers d'affouragement régionaux sont des données essentielles pour estimer au mieux les concentrations dans le lait de vache. L'étude cherche donc à définir des exploitations-type susceptibles de représenter les principaux systèmes de production et de fonctionnement français en catégorisant les exploitations à partir des informations sur les rations, les calendriers fourragers, le type de complémentation et les quantités de concentrés données, etc. L'étude s'est donc attachée dans un premier temps à recenser ces cas-type en procédant à une enquête sur l'utilisation des prairies permanentes dans chacune des régions considérées. L'Institut de l'Elevage fournit en partie des cas-type d'exploitations agricoles et les études réalisées par Agreste (*Rabaut, 2000*) donnent des compléments d'informations sur les pratiques culturelles d'utilisation des prairies dans l'ensemble des régions fourragères françaises.

3.1 Choix des régions-test

L'effet de la régionalisation est étudié pour trois régions-test. Le choix des régions-test s'est effectué par rapport au climat (océanique, continental, montagnoux), à la topographie, au pourcentage de surface toujours en herbe, à la production laitière et au nombre de têtes de vaches dans la région. En effet, on souhaite avoir des régions représentatives des variétés climatiques et topographiques susceptibles d'entraîner de grandes variations de productivité entre régions à l'échelle nationale. C'est pourquoi, les régions-test retenues sont la Normandie, la Lorraine et la région Rhône-Alpes. Ces régions font partie du « croissant laitier français » et comportent de grandes surfaces de prairies permanentes par rapport aux autres régions françaises. Les différentes caractéristiques des régions-test sont regroupées dans le tableau 2.

Régions	Surface toujours en herbe (ha)	Vaches laitières (nombre de têtes)	Production laitière (% de la production française)	Climat	Topographie
Normandie	835 338	656 084	16	Océanique humide	Plaine
Lorraine	464 241	219 589	5	Continental	Relief de pente moyenne
Rhône-Alpes	759 274	306 712	7	Montagnoux et/ou méditerranéen	Reliefs montagnoux

Tableau 2 : caractéristiques des 3 régions-test (données CD-ROM Agreste 2000)

On s'efforce donc de caractériser la *variabilité* des paramètres *RCs*, *RCh* et *Rdt*, selon les régions de production et les pratiques culturelles, et de tester la pertinence des valeurs

tabulées dans ASTRAL. On suppose donc l'existence d'une *variabilité* des parcours de LAI en fonction du climat et des pratiques, des dates de mise à l'herbe et de consommation de l'herbe, du rendement cultural et des quantités de fourrages consommées.

3.2 Choix des exploitations-type

On s'est attaché à définir des exploitations-type susceptibles de représenter au mieux les principaux systèmes de production et de fonctionnement rencontrés dans les régions-test et à rechercher l'ensemble des caractéristiques concernant les rations et les calendriers fourragers.

L'Institut de l'Élevage, et plus particulièrement le Pôle d'Expérimentation et de Progrès Bovins Lait, fournit, pour chaque région française, un document méthodologique sur la gestion des prairies et la conduite du pâturage ainsi qu'un référentiel pour les techniciens de l'élevage. Ces documents présentent plusieurs types d'exploitations pour chacune des régions considérées. L'enquête de terrain réalisée par Agreste en 1997-1998 (*Rabaut, 2000*) sur l'ensemble des prairies des régions fourragères françaises fournit également des données sur les différents modes de conduite des prairies (fertilisation, nombre de coupes, mode d'exploitation, irrigation, etc.). Elle donne donc les paramètres d'entrée du modèle : fertilisation azotée, mode d'exploitation des prairies (fauche, pâture, mixte) et la fréquence des coupes. On s'intéresse aux prairies permanentes uniquement pâturées (la pâture représente plus de 50 % de l'exploitation des prairies).

3.2.1 Région Lorraine

Sur les exploitations d'élevage de l'Est de la France, les « surfaces toujours en herbe » (parcelles non labourables, prairies permanentes, prairies temporaires rentrant dans une rotation) sont importantes. Selon *Rabaut (2000)*, le rendement des prairies dans cette région avoisine les 65 qMS/ha (= quintaux de matière sèche par hectare). Au regard des différentes informations fournies par l'Institut de l'Élevage, le pâturage intensif avec la fermeture des silos de maïs pendant 3 mois semble le plus courant dans la région. La fertilisation azotée est généralement apportée en deux fois : 50 unités la première quinzaine de mars et 50 autres la 2^{ème} quinzaine de mai voire la première de juin. Seuls 30 à 35 ares sont accessibles par vache laitière au regard des effectifs de vaches au printemps, la surface de pâturage accessible aux animaux devient donc limitante en fin d'été. L'ouverture du silo de report de maïs est alors nécessaire pour bien démarrer les lactations, les vêlages étant groupés sur les mois d'août à novembre.

En Lorraine, le mois d'avril est très froid et humide. La mise à l'herbe se fait donc progressivement avec une ration mixte fourrage conservé-pâturage. En effet, la date de mise à l'herbe est souvent liée au climat de l'année, à la portance de la parcelle et à l'âge des animaux : une mise à l'herbe trop précoce en conditions humides et sur des sols peu portants peut limiter la pousse de mai. On peut considérer que fin avril, les vaches pâturent jour et

nuit et sont nourries exclusivement à l'herbe, sans apport de concentré (Tableau 3). Chaque vache a alors besoin de 30 ares. Elles séjournent 3 à 5 jours sur la prairie puis sont déplacées sur une parcelle voisine, selon le principe du pâturage tournant (Figure 1) : les prairies sont divisées en parcelles, chacune recevant le troupeau sur une durée variable selon la saison.

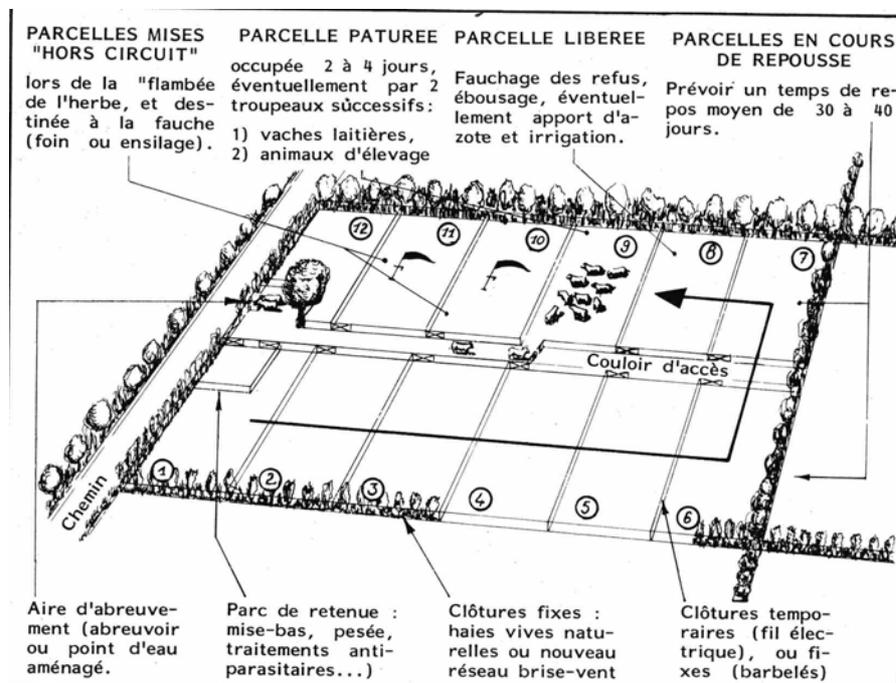


Figure 1 : le pâturage tournant (Soltner, 1990)

En début d'été, la récupération des repousses et la baisse de l'effectif permet d'accéder à une surface plus importante par vache traite, les vaches tarées étant conduites sur des parcelles éloignées. Elles séjournent 4 à 6 jours sur la parcelle. En fin d'été, la complémentation fourrage sous forme d'ensilage de maïs s'avère nécessaire. Elle peut parfois représenter l'essentiel de la ration en cas de sécheresse. Dès la mi-septembre, les vaches ne sortent à l'herbe que pendant la journée. La rentrée définitive s'effectue autour du 15 octobre. La ration hivernale est majoritairement composée d'ensilage de maïs avec incorporation d'ensilage d'herbe et de foin.

L'exploitation représentative de cette région-test est une exploitation moyenne de 90 ha de Surface Agricole Utile (SAU), composée d'une quarantaine d'hectares de prairies permanentes (et 13 ha de maïs fourrager). Le troupeau de vaches laitières (VL) est alors composé d'une quarantaine de Prim'Holstein avec une productivité d'environ 7500 kg lait/VL (soit un quota d'environ 260 000 L). Les vêlages des laitières sont groupés sur les mois d'août à novembre ; les tarissements débutent en juillet. Les effectifs prévus en vaches traites sont donc minimaux sur les mois de juillet à septembre.

3.2.2 Région Rhône-Alpes

Le choix s'est orienté vers une exploitation-type en milieu montagnard à une altitude supérieure à 700 m. Un système fourrager « tout herbe » ou en majorité toute herbe, avec prairies naturelles fortement majoritaires par rapport aux prairies temporaires, a été choisi (Tableau 3). Le rendement des prairies permanentes est estimé en moyenne à 40 qMS/ha selon (Rabaut, 2000). L'azote minéral sur les prairies fertilisées est apporté généralement en deux fois à raison de 25 unités par apport.

L'exploitation-type retenue peut se trouver dans les secteurs de montagnes herbagères, avant-pays de Savoie, Haute-Savoie, Haut-Bugey, Monts du Forez et Pilat, Moyenne et Haute montagne des Alpes du Nord. L'exploitation représentative de cette région-test est une exploitation d'une cinquantaine d'hectares de SAU (hors alpage) avec 85 à 90 % de prairies naturelles (composées à 30 % de Trèfle blanc, associé au Ray-grass). De même que pour la Lorraine, le système de pâturage est le système tournant avec des parcelles pâturées le jour et la nuit de surfaces équivalentes car c'est le plus répandu (ou parfois, mais plus rarement, il s'agit du pâturage continu sur gazon court). En moyenne, il s'agit de 5 à 7 parcelles au printemps et le double l'été. Les vaches laitières y séjournent 3 à 5 jours par parcelle voire plus (10 à 15 jours l'été). Pour que les réserves aient eu le temps de s'accumuler, la prairie doit connaître entre deux pâturages un temps de repos variable selon la saison, le type de sol, le climat et la région : pour la région Rhône-Alpes, 3 à 5 semaines sont nécessaires en début de saison, 2 à 3 semaines en pleine période de végétation et 4 à 6 semaines en été et arrière saison. En été, le délai entre deux passages peut augmenter sans pénaliser la qualité de l'herbe. Les vaches laitières sont maintenues dans les parcelles jusqu'à ce que la hauteur de l'herbe descende jusqu'à 5 cm environ (le fait de pâturer « ras » favorise le tallage, la densité et améliore la qualité de l'herbe pour le passage suivant). Néanmoins, les délais de retour sur les parcelles dépendent de plusieurs facteurs notamment du nombre de parcelles de prairies accessibles aux vaches laitières et donc des choix de l'éleveur. En région Rhône-Alpes, la mise à l'herbe a lieu le plus tôt possible, généralement début avril, pour éviter les débordements par l'herbe dans les premières semaines du printemps. Le foin est séché en grange et l'exploitation bénéficie d'une autonomie fourragère totale. Le cheptel de vaches laitières est composé d'une trentaine de Montbéliardes et de Tarines (chargement de 1 UGB/ha), avec 100 000 à 200 000 litres de quota. Le lait est destiné aux filières Tomme, Emmental de Savoie, Beaufort ou Reblochon. Les vêlages sont par ailleurs étalés de septembre à mars : la production laitière est donc plus importante pendant les mois de mars-avril.

3.2.3 Région Normandie

De la même façon que pour les régions précédentes, nos choix se sont orientés vers les exploitations ayant un maximum de surface en prairies permanentes. Celle retenue compte une SAU de 80 ha avec notamment une cinquantaine d'hectare de prairies naturelles et 9 de maïs fourrager. Le système considéré est un système « herbe et maïs » avec foin (Tableau 3).

Le mode de pâturage qui domine dans la région est également le pâturage tournant, sur 6 à 8 parcelles : les vaches séjournent en moyenne 3 à 5 jours sur chaque parcelle durant la période de pâturage. Ce type de pâturage divise les prairies pour améliorer l'utilisation de l'herbe et sa repousse (Figure 1). Les temps de repos doivent permettre à l'herbe de reconstituer des réserves capables d'assurer une bonne repousse, de faire sa « flambée de croissance » dont dépendra le rendement prairial et d'atteindre une valeur nutritive (valeur énergétique et valeur azotée) correcte et des matières minérales afin de fournir, aux vaches qui pâturent, une herbe équilibrée. Ce temps de repos varie selon la saison : selon (Soltner, 1990) pour le Nord-Ouest de la France, il est de 25 à 30 jours en avril, 14 à 18 en mai, de 20 à 25 en juin-juillet, de 35 à 45 de juillet à septembre et de 50 à 60 de septembre à novembre. Le délai de retour des vaches laitières sur la pâture prend en compte, outre le temps de repos, le temps de passage du troupeau, le chargement et le nombre de parcelles accessibles aux vaches laitières durant la période de pâturage. Le rendement des prairies avoisine les 70 qMS/ha. Ce chiffre peut être corrélé à une exploitation intensive des prairies notamment avec une fertilisation azotée accrue (110 kgN/ha). Le troupeau de vaches laitières est composé d'une trentaine de Prim'Holstein (chargement à 1,4 UGB/ha), avec un quota de 220 000 litres. Les vêlages ont lieu entre le 15 août et le 31 octobre.

Les données acquises et nécessaires aux paramètres d'entrée du modèle pour les 3 régions-test sont regroupées dans le tableau 3.

Région	EA-type en Normandie	EA-type en Lorraine	EA-type en Rhône-Alpes
Rendement (qMS/ha)	70	65	40
Fertilisation N minérale	110 kgN/ha	100 kgN/ha	50 kgN/ha
Date de mise à l'herbe	15 mars	15 avril	01 avril
Ration de base	15kgMS d'herbe	8kgMS d'herbe et 7 d'ensilage de maïs	10kgMS d'herbe et 5 de foin
Date de total pâturage	15 avril	01 mai	15 avril
Ration de base	15kgMS d'herbe 15/07 : 8kgMS d'ensilage de maïs et 7 d'herbe	15kgMS d'herbe 01/08 : 5kgMS d'ensilage de maïs et 10 d'herbe	15kgMS d'herbe
Date de rentrée hivernale	01 octobre	15 septembre	15 octobre
Ration de base	7kgMS d'herbe et 8 d'ensilage de maïs	8kgMS d'herbe et 7 d'ensilage de maïs	10kgMS d'herbe et 5 de foin
Date de totale stabulation	15 octobre	15 octobre	01 novembre
Ration de base	13.5kgMS d'ensilage de maïs et 0.5 de foin	13kgMS d'ensilage de maïs et 1 de foin	7.5kgMS de foin et 7.5 de regain
Temps de séjour sur la prairie	3 à 5j	3 à 5j	5 à 10j
Intervalle avant retour sur la prairie (printemps, début été et fin d'été)	2 à 4 semaines 3 à 6 semaines 5 à 8 semaines	2 à 4 semaines 4 à 6 semaines 5 à 8 semaines	3 à 5 semaines 4 à 6 semaines 6 à 8 semaines

Tableau 3 : dates et rations alimentaires des vaches laitières au cours de l'année dans les 3 régions-test (Institut de l'Elevage et Rabaut, 2000)

Le tableau 3 donne également les temps de séjour des vaches laitières sur la prairie ainsi que l'intervalle avant le retour des ruminants sur la parcelle durant la période de pâturage respectivement pour la Normandie, la Lorraine et la région Rhône-Alpes. Notons que le temps de pâturage est divisé en trois périodes. La première, notée « printemps », s'échelonne des mois de mars à juin, la seconde, « début été », correspond aux mois de juin à août et la dernière, « fin d'été » s'échelonne des mois d'août à novembre.

3.3 Limites de la typologie choisie

Les résultats obtenus à partir de l'enquête des prairies effectuée par Agreste (*Rabaut, 2000*) et du recensement des cas-type fourni par l'Institut de l'Élevage sont représentatifs des situations des régions fourragères françaises et donc des régions administratives par agrégation des régions fourragères. Néanmoins, il faut être conscient d'une *variabilité* climatique et pédologique à l'intérieur de chacune des régions qui n'a pas été prise en compte. Les cas-type recensés ne sont représentatifs réellement qu'à l'échelle locale et plus grossièrement à l'échelle régionale.

Par ailleurs, les rendements sont donnés à titre indicatif : ils sont définis comme somme de deux rendements. En effet, le rendement de pâture est estimé, à chaque passage, à partir de la durée de séjour des animaux sur la parcelle, du nombre d'animaux présents (possibilité d'erreur sur le chargement à l'hectare) et de la consommation journalière théorique de chaque catégorie d'animaux. Il ne correspond donc pas à la production effective de la prairie. Le rendement de fauche est estimé à chaque coupe.

Enfin, l'enquête d'Agreste (*Rabaut, 2000*) ne s'est intéressée qu'aux prairies permanentes productives, c'est-à-dire aux prairies semées de 6 ans et plus et aux prairies naturelles. Les surfaces peu productives ainsi que les parcours et les alpages, présents essentiellement en Rhône-Alpes, ont été exclus du champ de l'enquête.

4 DESCRIPTIONS DES SIMULATIONS REALISEES AVEC STICS

4.1 Données d'entrée nécessaires au modèle

Le logiciel téléchargé à partir du site Internet de l'INRA d'Avignon donne accès à plusieurs fichiers d'entrée qui proposent une base de paramètres indispensables pour faire tourner le modèle. Il importe de modifier certaines de ces valeurs par défaut afin de tester plusieurs scénarios.

4.1.1 Les fichiers plantes et les fichiers techniques

Ces fichiers récapitulent, pour chaque espèce disponible sous STICS, les paramètres physiologiques ou témoignant de pratiques culturales reflétant des cas-type.

On a utilisé le fichier plante correspondant à l'herbe, c'est-à-dire, le fichier « prairie.plt ». Il résume les caractéristiques physiologiques des graminées fourragères, notamment la fétuque et le dactyle, graminées des prairies de longue durée. Nous avons gardé les valeurs données par défaut des paramètres dans ce fichier puisque d'une part, l'étude s'intéresse à une production de prairies permanentes multispécifiques et que d'autre part, la flore d'un bon herbage se compose de 65 à 75 % de graminées (Soltner, 1990).

On a cependant modifié certaines valeurs des paramètres figurant dans le fichier technique « prairie.tec » en intégrant les résultats issus de l'enquête décrite précédemment et effectuée dans les régions-test : pas de dates de semis puisqu'il s'agit de prairies permanentes, et pas d'irrigation. On n'a modifié que les paramètres cités dans le tableau 4.

Nom du paramètre (Signification)	Valeur rentrée pour les simulations					
	Normandie		Lorraine		Rhône-Alpes	
irecbutoir (Jour de récolte butoir)	j288 - 15 octobre		j288 - 15 octobre		j305 - 01 novembre	
julape, qté (Jour julien de fertilisation et quantité apportée)	j80 - 21 mars	55	j74 - 15 mars	50	j74 - 15 mars	25
	j146 - 26 mai	55	j146 - 26 mai	50	j157 - 6 juin	25
julfauche (Jour julien de la « fauche » (pâturation par l'animal))	j74 - 15 mars		j105 - 15 avril		j91 - 01 avril	
	j105 - 15 avril		j140 - 20 mai		j125 - 05 mai	
	j140 - 20 mai		j160 - 9 juin		j152 - 1 juin	
	j160 - 9 juin		j200 - 19 juillet		j186 - 5 juillet	
	j200 - 19 juillet		j240 - 28 août		j236 - 24 août	
	j240 - 28 août		-		j300 - 27 octobre	

Tableau 4 : Descriptif des paramètres techniques modifiés pour les simulations sous STICS

Les dernières dates de récolte (irecbutoir), ou pâture par les animaux, correspondent à la rentrée hivernale du troupeau de vaches laitières en stabulation. Pour ce qui concerne la fertilisation, deux apports d'engrais azotés ont lieu sur les parcelles fertilisées. Un premier apport a lieu en fin d'hiver, plus particulièrement en mars, pour activer le départ en végétation en vue d'une première exploitation. Un second apport est réalisé généralement après la première exploitation, afin de profiter au maximum de l'aptitude de l'herbe à la pousse et obtenir une production fourragère abondante. Néanmoins, il faut retenir que 16 % des éleveurs normands, 30 % des lorrains et 51 % en région Rhône-Alpes ne fertilisent jamais leurs parcelles de prairies permanentes (*Rabaut, 2000*). Un troisième apport peut également avoir lieu au printemps en cas de pâturage estival. Pour les simulations le premier apport a lieu en mars, avant la mise à l'herbe, en Lorraine et en Rhône-Alpes, et après une première pâture en Normandie en raison d'une mise à l'herbe plus précoce. Le second apport a lieu fin mai sur les prairies normandes et lorraines et début juin sur le pâturage alpin, en raison des dates de passage et de séjour des vaches. Enfin, concernant les techniques particulières de la culture, il faut tenir compte de la « fauche », et plus exactement de l'exploitation d'une parcelle de prairie par le pâturage des vaches. Les dates de pâturage de la parcelle prairiale ont été calculées pour chacune des régions à partir des dates de mise à l'herbe, du temps de passage du bétail et de la période de repos qui varie selon la saison et selon le nombre de parcelles accessibles au troupeau, donc des choix de l'éleveur. Au regard des données collectées dans les régions, on considère que le troupeau de vaches laitières fait 5 à 6 passages sur une même parcelle de prairie. En outre, il est à noter que les parcelles uniquement pâturées correspondent à 57 % des prairies permanentes en Normandie, 32 % en Lorraine et à 43 % en région Rhône-Alpes. L'exploitation directe par les animaux implique une pâture en cours de montaison (déprimage ou étêtage), quand la masse d'herbe a au minimum 15 cm de haut.

4.1.2 Les fichiers climatiques

Des données climatiques propres aux sites concernés par la simulation sont nécessaires. Ces données doivent être journalières et porter sur une année calendaire. Les paramètres suivants doivent être renseignés sous forme de colonne : l'année, le mois, le jour dans le mois, le jour Julien correspondant (de 1 à 365), les températures minimales et maximales journalières, le rayonnement global journalier, l'évapotranspiration et les précipitations journalières.

Les données climatiques utilisées sont celles du CD-ROM « Le Climat de la France » de Météo France. Il s'agit de normales trentenaires, c'est-à-dire de moyennes mensuelles établies sur une période de trente ans (1961-1990), et qui constituent des références. Elles sont extraites de la base de données climatologique au 20 novembre 1998. Notre simulation porte sur une période de 11 mois (1^{er} février au 31 décembre) : on ne rentre donc qu'un seul fichier climatique pour chacune des régions. On a choisit d'utiliser les données des stations

les plus représentatives, c'est-à-dire, Caen pour la Normandie, Metz pour la Lorraine et Bourg St Maurice pour la région Rhône-Alpes.

4.1.2.1 Températures minimales et maximales journalières

Le CD-ROM de Météo France nous donne uniquement des valeurs mensuelles. On a supposé que la température minimale journalière est identique à la température minimale mensuelle et on effectue la même approximation pour la température maximale journalière. Les données acquises sur les températures pour les trois sites considérés sont présentées dans le tableau 5.

Mois	Températures minimales journalières (°C)			Températures maximales journalières (°C)		
	Metz	Bourg St Maurice	Caen	Metz	Bourg St Maurice	Caen
Janvier	-1,1	-4,4	1,8	4,0	4,1	7,3
Février	-0,5	-3,2	1,9	6,2	6,4	8,0
Mars	1,7	-0,8	3,2	9,9	9,8	10,5
Avril	4,3	2,6	4,9	13,9	13,5	12,7
Mai	8,0	6,3	7,7	18,3	18,2	16,3
Juin	11,2	9,3	10,4	21,6	21,8	19,2
Juillet	12,9	11,4	12,3	23,8	25,0	21,6
Août	12,7	11,1	12,3	23,4	24,1	21,7
Septembre	9,9	8,6	10,6	20,2	21,0	19,7
Octobre	6,5	4,7	7,9	14,7	16,1	15,9
Novembre	2,4	-0,2	4,6	8,3	9	10,9
Décembre	-0,1	-3,4	2,7	4,9	4,6	8,1

Tableau 5 : températures minimales et maximales journalières

4.1.2.2 Précipitations

De même que pour les températures, on ne dispose que d'un cumul de valeurs mensuelles moyennes sur le CD-ROM de Météo France. On a appliqué la même approximation que précédemment : les précipitations sont réparties régulièrement dans le mois à partir de la moyenne mensuelle. Les données sont présentées dans le tableau 6.

4.1.2.3 Rayonnement global

Le rayonnement global correspond à l'éclairement énergétique d'une surface horizontale unitaire pendant une période donnée. C'est la somme du rayonnement solaire direct (fraction du rayonnement solaire incident qui atteint directement le sol), lequel varie avec la hauteur du soleil au-dessus de l'horizon, et du rayonnement diffusé par le ciel,

provenant de l'ensemble de l'hémisphère supérieur. On le mesure à l'aide d'un pyranomètre et il s'exprime en $\text{calories.cm}^{-2}.\text{j}^{-1}$. On cherche donc à obtenir les valeurs de rayonnement global mensuel, voire journalier si possible, à Metz, Bourg St Maurice et Caen, considérées comme représentatives des sites choisis. Cependant ces valeurs ne sont pas données directement par Météo France : on ne dispose que de la durée d'insolation (temps durant lequel l'intensité du rayonnement solaire direct dépasse un seuil fixé à 120 W.m^{-2}) et de la fraction d'insolation qui est le rapport de la durée d'insolation quotidienne à la durée théorique du jour (durée comprise entre l'heure de lever et l'heure de coucher du soleil). La durée d'insolation ne permet pas de calculer correctement le rayonnement global, car le seuil de 120 W.m^{-2} est trop élevé et ne permet pas de tenir compte de l'ensemble du rayonnement.

En revanche, on peut calculer le rayonnement global grâce à la fraction d'insolation et aux valeurs de radiation solaire directe (*Site Internet de l'Université de Picardie Jules Verne*):

$$R_g = I_{ga} \cdot (0,18 + 0,62 \cdot \frac{h}{H}) \quad \text{avec} \quad \frac{h}{H} = \frac{\alpha \times 0,2 + \beta \times 0,5 + \gamma \times 0,8}{\text{nbre jours (mois)}}$$

R_g : Rayonnement global ou radiation d'onde courte mensuelle ou décadaire ($\text{cal.cm}^{-2} .\text{j}^{-1}$)

h : Durée réelle d'insolation (heure.mois^{-1})

H : Durée d'insolation maximum possible (heure.mois^{-1})

α : Nombre de jours pour un mois donné où $h/H \leq 0,2$

β : Nombre de jours où $0,2 \leq h/H \leq 0,8$

γ : Nombre de jours où $h/H \geq 0,8$

I_{ga} : Radiation solaire en l'absence d'atmosphère ($\text{cal.cm}^{-2} .\text{j}^{-1}$)

On a considéré la fraction d'insolation journalière comme égale à la valeur mensuelle.

Cette méthode a été décrite et validée dans l'étude précédente concernant le blé d'hiver (*Delboe et Mercat-Rommens, 2005*).

4.1.2.4 L'évapotranspiration potentielle

L'évapotranspiration potentielle (ETP) est le pouvoir évaporant de l'atmosphère sur un sol avec couvert végétal disposant de l'eau en abondance. C'est la quantité d'eau que cède une culture en pleine croissance couvrant totalement un sol largement pourvu d'eau par transpiration des plantes et évaporation du sol. Elle dépend donc du stade végétatif, de la plante, et des conditions climatiques (la valeur limite de l'évapotranspiration potentielle est fonction de l'énergie disponible). L'ETP est aussi une mesure climatique, dont la valeur est établie à partir de relevés météorologiques selon des formules plus ou moins complexes impliquant des variables météorologiques mesurables. Il est à noter que l'ETP correspond à une valeur moyenne tous couverts végétaux confondus et l'ETP moyenne annuelle est essentiellement dépendante de la latitude en France. Le site de Météo France propose une carte qui donne les valeurs spatialisées d'ETP annuelles à l'échelle nationale. Comme pour le précédent paramètre, on ne peut pas utiliser seulement cette carte et se contenter de ces

valeurs moyennées puisque la variabilité saisonnière de l'évapotranspiration est un facteur important du développement végétatif.

On propose d'utiliser la formule de Turc, trouvée sur le site Internet de l'université de Picardie Jules Verne (cours de Jacques Beauchamp) et utilisée dans la précédente étude (*Delboe et Mercat-Rommens, 2005*). En effet, on a calculé précédemment les valeurs journalières de rayonnement solaire, et on dispose des valeurs de températures moyennes sur le CD-ROM « Le climat de la France ».

$$ETP = k \cdot \left(\frac{T}{T+15} \right) \cdot (Rg + 50)$$

T : Température mensuelle moyenne (°C)

k : Coefficient égal à 0,37 pour le mois de février et 0,4 pour les autres mois

Rg : Radiation solaire globale (cal.cm⁻².j⁻¹)

De la même façon que pour le rayonnement global, cette méthode a été validée dans (*Delboe et Mercat-Rommens, 2005*).

Les données acquises pour ces trois derniers paramètres sont regroupées dans le tableau 6.

Mois	Précipitations (mm.j ⁻¹)			Rayonnement global (kwh.m ⁻² .j ⁻¹)			Evapotranspiration potentielle (mm.j ⁻¹)		
	Metz	Bourg St Maurice	Caen	Metz	Bourg St Maurice	Caen	Metz	Bourg St Maurice	Caen
Janvier	2,05	3,13	2,05	2,6	4	2,9	0,15	-	0,42
Février	2,06	3,49	2,06	5,3	6,5	5,5	0,41	0,3	0,65
Mars	2,04	2,77	1,82	7,9	8,7	8,1	1,06	0,94	1,22
Avril	1,78	2,03	1,52	11,5	12,4	12	1,99	1,97	2,0
Mai	2,22	2,20	1,88	14	13,9	14	2,92	2,80	2,77
Juin	2,4	2,49	1,74	15,44	15,5	15,44	3,58	3,48	3,40
Juillet	1,98	2,40	1,54	14,64	15,6	14,5	3,58	3,76	3,41
Août	2,02	2,38	1,50	12,32	13,6	12,5	2,53	3,29	3,0
Septembre	1,99	2,11	2,05	9,41	10,4	9,6	2,22	2,39	2,25
Octobre	2,05	2,38	2,18	5,49	6,7	5,8	1,17	1,36	1,32
Novembre	2,22	3,16	2,83	3,10	4,5	3,5	0,50	0,56	0,70
Décembre	2,35	3,45	2,23	2,12	3,5	2,4	0,21	0,08	0,42

Tableau 6 : Valeurs journalières climatiques prises en compte dans les simulations sous STICS

4.1.3 Le fichier pédologique

Ce fichier fournit plusieurs descriptifs de types de sols, notamment le « sol-prairie » qui est utilisé pour les simulations. L'influence du type de sol sur les valeurs du LAI et sur celles du rapport de captation a été ensuite prise en compte. Pour cela, il importe de modifier certains paramètres par défaut pour représenter les sols des régions considérées, notamment ceux dont la valeur est susceptible d'influer sur celle du LAI, les autres conservant leur valeur par défaut. Les paramètres modifiés sont donnés dans le tableau 7 et ont été renseignés d'après le site Internet de l'INRA d'Orléans qui dispose d'une base de données de l'Association Française pour l'Etude des Sols (AFES). Cette base regroupe des données concernant les teneurs en argile, en sables, en limons, en calcaire total, le pH et la texture (selon la norme du GEPPA) d'horizons de surface de sols cultivés, prélevés dans l'ensemble des cantons français entre 1990 et 1994. On a moyenné les valeurs cantonales en les pondérant selon le nombre d'analyses effectuées afin d'avoir des valeurs moyennes pour les sites considérés.

Les autres paramètres ont été renseignés à partir des notices du logiciel STICS qui donnent un tableau des ordres de grandeur des caractéristiques hydriques des sols et de leur masse volumique en fonction de leur texture. En effet, ces dernières nous permettent d'obtenir les valeurs des humidités à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent, de l'albédo et de l'évaporation en sol nu (Tableau 7).

Paramètres	Signification	Influence sur la valeur du LAI	Valeurs rentrées pour la simulation		
			Normandie	Lorraine	Rhône-Alpes
argi (texture selon GEPPA)	Teneur en argile de la couche de surface (%)	Calcul du bilan hydrique	18 (limons sableux)	32 (limons argilo-sableux)	19 (sables limoneux)
pH	Potentiel hydrogène (s.d)	Calcul du bilan azoté	6,6	6,75	7,1
albédo	Albédo du sol nu à l'état sec (s.d)	Module de rayonnement	0,18	0,18	0,25
qo	Paramètre d'évaporation en sol nu (mm)	Calcul du bilan hydrique	9	12	9
HCCF	Humidité à la capacité au champ de la terre fine des horizons (g.g ⁻¹)	Calcul du bilan hydrique	20	27,1	12,1
HMINF	Humidité au point de flétrissement permanent de la terre fine des horizons (g.g ⁻¹)	Calcul du bilan hydrique	8,9	12,8	5

Tableau 7 : valeurs des paramètres pédologiques nécessaires pour les simulations (Base de données de l'AFES)

Les valeurs d'humidité à la capacité au champ et au point de flétrissement peuvent paraître plus ou moins faibles et non concordantes avec la texture des sols. En effet, les textures des sols en Rhône-Alpes et en Normandie ont des teneurs en argile proches et présentent des

valeurs d'humidité très différentes qui sont plus importantes pour les sols normands moins riches en argile que ceux des sols alpins. On aurait pu s'attendre à des valeurs d'humidité plus fortes pour les sols riches en argile, comme c'est le cas pour les sols en Lorraine, que pour des sols plus pauvres. Ceci peut être dû au mode de renseignement des paramètres du sol : pour des ordres de grandeur des horizons non travaillés, STICS se reporte aux travaux de Jamagne et al. (1977).

4.2 Calcul de l'indice foliaire et sorties du modèle

4.2.1 Bilan de simulation

Après avoir intégré tous les paramètres d'entrée du modèle et renseigné les fichiers d'exécution, le modèle peut être lancé. Les fichiers de sortie sont de deux types :

- les fichiers de bilan de simulation : le fichier « bprairie.sti » fournit le bilan de la simulation sous forme de deux pages de texte et le fichier « rapport.sti » donne une synthèse de toutes nos simulations sous la forme d'une ligne par simulation. Les variables de sorties propres à chaque module du logiciel sont explicites.
- les fichiers dynamiques nommés « prairie.sti » et « prairie.st2 », donnent les valeurs journalières d'une ou des variable(s) de sortie que l'on a choisie(s), c'est-à-dire pour notre étude, l'indice foliaire des feuilles vertes ou $LAI(n)$, celui des feuilles sénescentes ou LAI_{sen} , la matière sèche aérienne récoltée « masec(n) » ainsi que la matière fraîche « mafrais ».

L'imprécision des données climatiques, égales pour tous les jours d'un même mois, nous a conduits à modifier certains paramètres d'initialisation. En effet, à l'issue des premiers essais de simulation, STICS précisait que le LAI restait inférieur au LAI résiduel : la croissance de l'herbe était trop faible pour pouvoir envisager les dates de première pâture telles que définies précédemment. Le modèle n'effectuait donc qu'une seule coupe dont la date correspondait à la date de récolte butoir. Les dates de pâturage et de fertilisation étaient donc décalées par le logiciel : la mise à l'herbe était par exemple repoussée de 15 jours pour la Lorraine à plus d'un mois pour la Normandie. Afin de pouvoir respecter les dates effectives de mise à l'herbe dans les régions-test, le LAI initialement donné par défaut à 0,5 a été augmenté à 2. Ce qui nous a permis d'effectuer nos simulations en respectant le rythme et le mode d'exploitation des prairies ainsi que les pratiques de fertilisation propres à chacune des régions (Tableau 4).

4.2.2 Calcul de l'indice foliaire

Afin de parvenir à des parcours d'indice foliaire pour les trois sites considérés, on additionne les valeurs des LAI ($LAI(n)$ et LAI_{sen}) au pas de temps journalier et on obtient la

figure 2 qui présente l'évolution de l'indice foliaire en fonction du climat et des pratiques de fertilisation.

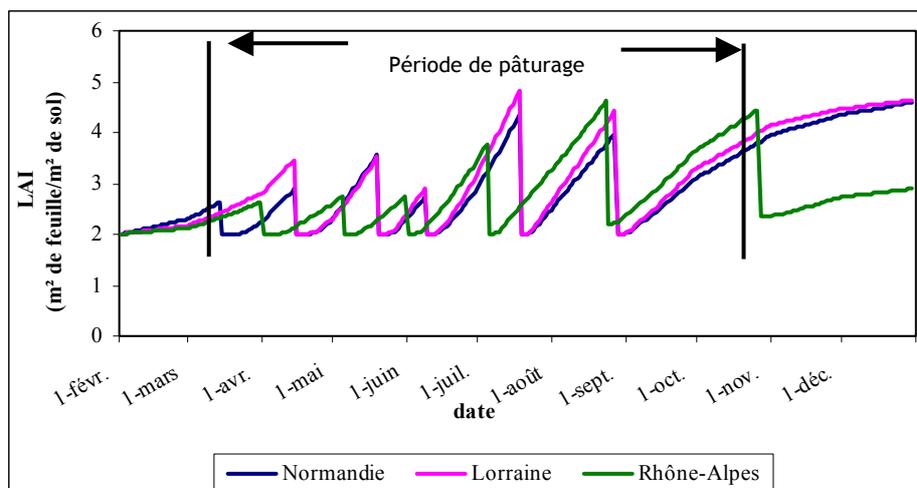


Figure 2 : évolution de l'indice foliaire selon les stations en fonction du temps

Le pâturage des prairies correspond aux chutes des valeurs de l'indice foliaire. Elles sont suivies par un plateau qui coïncide avec la période de reconstitution des réserves permettant à la prairie d'assurer sa repousse et de faire sa « flambée de croissance » dont dépendra le rendement. En effet, comme le montre la figure 3, extraite de (Soltner, 1990), la « flambée de croissance » correspond à la reprise d'activité de l'herbe et à l'émission des talles, généralement forte chez les graminées prairiales comme le dactyle ou la fétuque. Le tallage est la base de la production fourragère : le producteur cherche donc à le prolonger et fait pâturer ces vaches de façon à ce qu'elles suppriment les apex, afin d'obtenir des repousses uniquement feuillues. C'est pourquoi, les pâtures sont plus ou moins rapprochées l'une de l'autre, en fonction du temps de repos et des caractéristiques climatiques de la région.

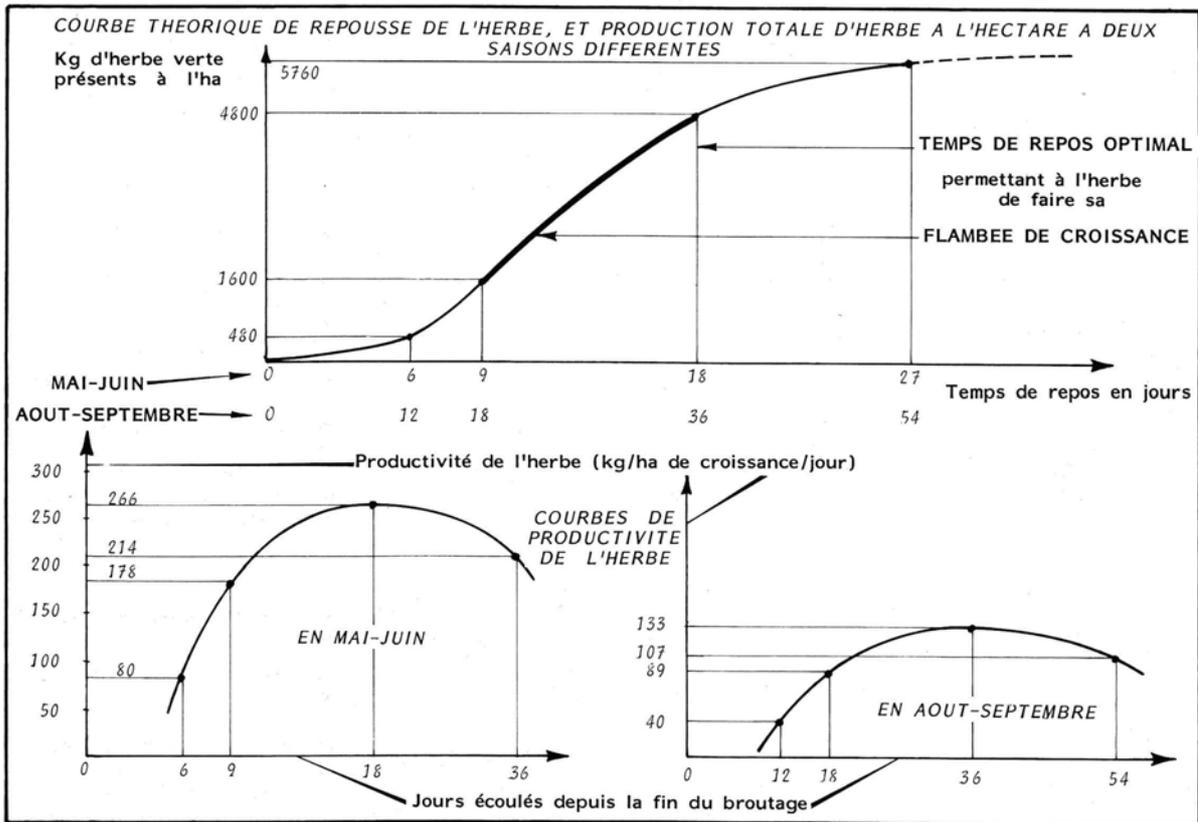


Figure 3 : courbe théorique de repousse de l'herbe, et production totale d'herbe à l'hectare à deux saisons différentes (Soltner, 1990)

La figure 2 montre que le climat induit un décalage des cycles végétatifs d'une dizaine de jours entre les régions pour le premier pâturage. Ensuite, la durée du second cycle est équivalente dans la mesure où la « flambée de croissance » est rapide pour les variétés étudiées. Le climat intervient également dans la repousse estivale : il peut induire jusqu'à quatre semaines de décalage entre les régions, notamment pour les derniers passages des vaches. Ceci confirme l'intervalle des dates de mise à l'herbe et de rentrée hivernale obtenues à la suite de l'enquête effectuée dans les régions-test étudiées (*Institut de l'Elevage, communication personnelle*).

Les pratiques de fertilisation, notamment les quantités d'azote minéral apportées sur les parcelles prairiales fertilisées, ont un impact sur l'évolution de l'indice foliaire. En effet, le tallage est notamment augmenté par une nutrition soutenue dans la mesure où la fumure azotée limite la concurrence nutritive entre talles épis et talles herbacées. Les différences entre les régions considérées se ressentent majoritairement en début de période de pâturage et en fin de l'été, comme on peut le voir sur la figure 2 avec le parcours du LAI de la région Rhône-Alpes, où la quantité d'azote à chaque apport est divisée de moitié par rapport aux deux autres sites : le LAI reste beaucoup plus faible que ceux des autres et la croissance après les premières pâtures est moins marquée que pour les deux autres régions, qui en outre sont relativement proches l'une de l'autre en raison d'une quantité d'apport semblable (Tableau 8).

On peut remarquer que le *LAI* en fin d'année reste supérieur pour les trois régions à la valeur initiale de février. Les courbes auront tendance à stagner voir à diminuer en raison notamment de la régression des talles herbacées. Néanmoins, on peut envisager une fauche de la prairie en Normandie et en Lorraine en fin d'été afin de faire du regain. Ce qui réduirait le *LAI*.

L'utilisation du modèle STICS nous permet alors de voir que globalement les parcours d'indice foliaire sont similaires en termes de valeurs entre les trois régions considérées particulièrement en raison de pratiques d'exploitation proches. Les différences dans ces parcours apparaissent sous la forme d'un décalage entre les dates de pâture et donc des cycles végétatifs qui peut atteindre plus d'un mois.

5 RECONSTITUTION DES PARAMETRES D'ASTRAL AVEC LES RESULTATS DE STICS

5.1 Etude du rapport de captation par temps sec RCs

5.1.1 Mode de calcul

Les simulations effectuées sous STICS nous donnent des valeurs d'indice foliaire au pas de temps journalier. Pour reconstituer le rapport de captation par temps sec utilisé dans ASTRAL, on applique la formule développée dans le modèle ECOSYS-87 (Müller et Pröhl, 1993) et évoquée précédemment :

$$RCs = \frac{Ad_i}{Ad_t} = \frac{LAI_i / LAI_{i\max}}{(LAI_i / LAI_{i\max}) + (Vg_s / Vg_{i\max})}$$

Les vitesses de dépôt dépendent respectivement de l'indice foliaire au moment du dépôt et au maximum de développement foliaire. Néanmoins, en l'absence de relation corrélant $Vg_{i\max}$ et $LAI_{i\max}$, on a considéré ce paramètre comme constant. Le modèle ECOSYS-87 donne, pour un dépôt de radionucléides sous forme d'aérosols, la valeur de $1,5 \text{ mm.s}^{-1}$ pour $Vg_{i\max}$ pour l'herbe. De même, la vitesse au sol Vg_s est considérée comme constante pour tout type de plante et prend la valeur de $0,5 \text{ mm.s}^{-1}$ (Müller et Pröhl, 1993).

5.1.2 Résultats : les courbes de RCs

On obtient alors la courbe suivante (Figure 4). La période de pâture effective des vaches laitières commence le 15 mars pour la région la plus précoce (Normandie) et se termine le 1^{er} novembre pour la plus tardive (Rhône-Alpes). En effet, avant le 15 mars, les vaches ne pâturent pas l'herbe fraîche. Le risque de contamination du lait par l'herbe est donc nul. Et il en est de même après le 1^{er} novembre : les vaches sont rentrées en stabulation et ne sortent plus. Elles ne consomment plus d'herbe fraîche.

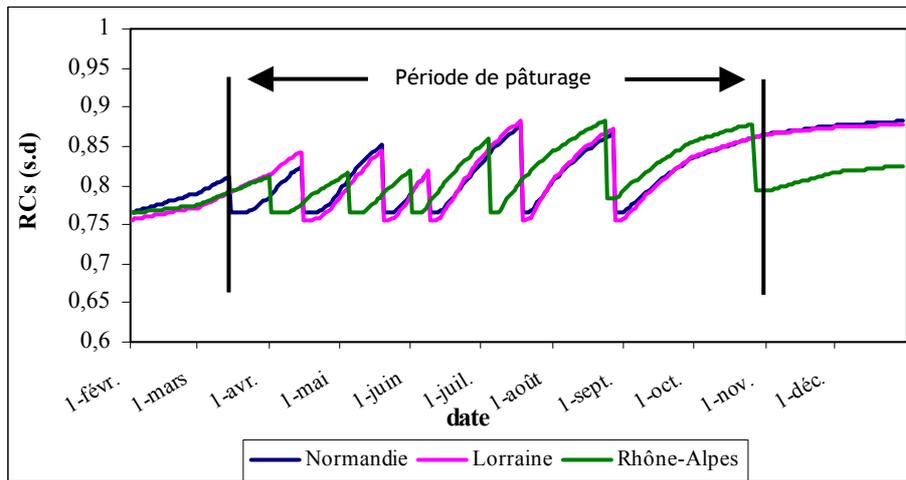


Figure 4 : évolution temporelle du rapport de captation par temps sec selon les régions étudiées

La figure 4 donne l'évolution du RCs en fonction de la date : les courbes présentent la même allure que les parcours d'indice foliaire obtenus précédemment, avec des diminutions des valeurs de RCs à chaque pâturage, suivies par des plateaux.

On peut remarquer tout d'abord que le rapport de captation sec est maximal à chaque pâturage, quel que soit le site. Les courbes sont relativement similaires pour les trois stations malgré le décalage dû aux dates de pâturage qui diffèrent selon la région, comme on l'a vu pour les LAI . Pendant la période de pâturage, RCs peut varier de 0,7 (minimum) à près de 0,9 (maximum). Dans le cadre du programme RESSAC (Maubert et al., 1991) dont l'objectif était d'étudier les facteurs de transferts sol- plante et d'établir un modèle de migration des radionucléides dans les sols, le rapport de captation par temps sec utilisé, calculé d'après l'équation de Chamberlain modifié, est de 0,9. Cette valeur est relativement cohérente avec les résultats obtenus à la suite des simulations sous STICS, puisque durant la période de pâturage des vaches laitières qui s'échelonnent effectivement du 15 mars au 1^{er} novembre, les valeurs de RCs varient entre 0,75 et 0,88.

Signalons que le RCs n'est jamais nul en raison de l'existence d'un indice foliaire résiduel : les vaches, à la différence des chèvres par exemple, ne pâturent pas ras. Il reste donc de la biomasse aérienne après 5 jours de pâturage sur la parcelle. Il est cependant plus faible au moment de la mise à l'herbe. Les courbes sont ensuite marquées par des plateaux à la suite du passage des vaches sur les parcelles de prairies : au niveau du 20 mars pour la Normandie, début avril pour la région alpine et fin avril pour la Lorraine. On retrouve, comme on l'avait remarqué dans le cas du LAI , des valeurs en fin d'année supérieures à celles de février. L'impact des quantités d'azote minéral apportées se remarque également mais plus légèrement que pour les parcours de LAI : les valeurs de RCs restent en effet plus faibles en début de période de pâturage pour la région Rhône-Alpes et en dessous des deux autres régions.

La reconstitution du rapport de captation RCs avec le LAI en intégrant la *variabilité* des conditions culturales révèle que la valeur du RCs varie d'environ 30 % entre les régions étudiées. L'intérêt de régionaliser la courbe RCs semble limité du fait des écarts relativement

faibles entre les valeurs de RCs pour les trois régions. Cependant la régionalisation permet de rendre compte de décalages entre les cycles végétatifs de l'ordre d'un mois.

5.1.3 Intégration de la variabilité des caractéristiques des sols

Les simulations précédentes ont été réalisées pour un sol de prairie avec les valeurs des paramètres pédologiques données par défaut dans STICS. On peut supposer que le rapport de captation RCs varie en fonction des caractéristiques du sol et notamment selon sa réserve hydrique. L'influence des paramètres pédologiques a été étudiée pour chacune des régions avec les valeurs du tableau 7. Les bilans de simulations obtenus sont présentés sur la figure 5. Elle présente l'évolution du rapport de captation durant la période de pâturage en utilisant le sol par défaut d'une part et en intégrant la *variabilité* des sols d'autre part.

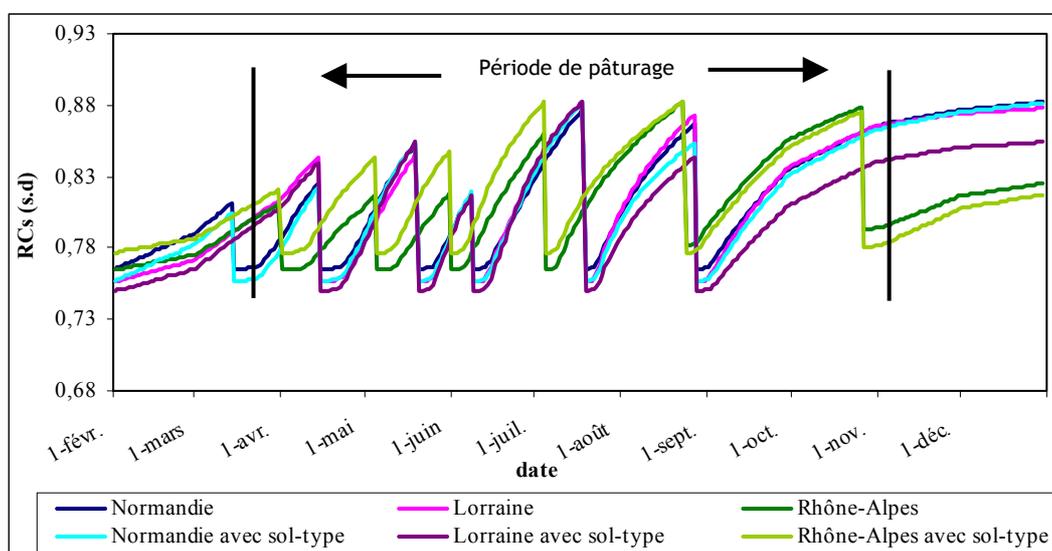


Figure 5 : évolution temporelle du rapport de captation RCs en intégrant la variabilité des sols

La figure 5 montre que les caractéristiques hydriques du sol spécifiques à chacune des régions ne modifient que peu l'allure des courbes du rapport de captation. La différence est un peu plus marquée pour la région Rhône-Alpes : les caractéristiques des sols alpins semblent contribuer à diminuer ou à augmenter très légèrement les valeurs du rapport de captation par temps sec. En effet, au 1^{er} mai dans le cas de la région Rhône-Alpes, le rapport de captation sec vaut 0,80 lorsque les caractéristiques du sol sont prises par défaut et 0,84 lorsque les caractéristiques des sols alpins sont utilisées. Les différences sont beaucoup plus faibles pour les deux autres régions : en Normandie, on trouve des écarts de 0,004 entre les valeurs du rapport de captation. On remarque encore que les valeurs obtenues en fin d'année ne correspondent pas à celles du début d'année car on n'a pas tenu compte des fauches intervenant après la saison de pâturage.

Le tableau 8 ci-après permet de comparer les caractéristiques des sols régionaux considérés avec celles du sol de prairie données par défaut sous STICS. La signification des différents paramètres est explicitée dans le tableau 7. Les valeurs du tableau 8 sont d'une

part des valeurs moyennes pour les régions considérées et, d'autre part, issues des notices du logiciel. Néanmoins, contrairement au logiciel qui différencie trois horizons de sol de prairie, les valeurs des paramètres hydriques des sols régionaux sont identiques pour les trois horizons considérés.

La réserve hydrique des sols, localisée dans la tranche superficielle, est la quantité d'eau du sol dont la végétation peut disposer pour assurer son alimentation en eau en l'absence de précipitation. La distribution de la pluviométrie mensuelle sur l'ensemble du mois est certainement à l'origine de l'écart entre la réserve hydrique du sol de STICS (180 mm) et celle des sols des régions étudiées qui varie entre 71 et 143 mm (Tableau 8). C'est ce qui peut justifier les légères différences observées sur la figure 5.

Les courbes de rapport de captation par temps sec, réalisées à la suite des simulations effectuées sous STICS en intégrant les caractéristiques des sols régionaux, étant globalement semblables à celles obtenues avec le sol pris par défaut, la *variabilité* des sols a été négligée pour la suite de l'étude.

Paramètres	Sols de prairie			
	Normandie	Lorraine	Rhône-Alpes	STICS
argi (%)	18	32	19	29
calc (%)	2	4	4	1
pH	6,6	6,75	7,1	7
albédo (s.d)	0,18	0,18	0,25	0,20
qo (s.d)	9	12	9	12
HCCF (g.g ⁻¹)	20	27,1	12,1	32, 34, 36
HMINF (g.g ⁻¹)	8,9	12,8	5	14, 16, 18
Réserve Utile (mm)	111	143	71	180

Tableau 8 : comparaison des valeurs de certains paramètres pédologiques entre les sols des régions considérées et celui de STICS

5.2 Etude du rapport de captation par temps de pluie RCh

5.2.1 Mode de calcul

Comme on l'a vu précédemment, l'équation tirée du modèle des travaux d'Angeletti et Levi (1977) et ceux d'Hoffman (1989) est utilisée pour reconstituer le rapport de captation par temps humide, *RCh* :

$$RCh = \left(LAI \times \frac{S_2}{P} \right) \times \left[1 - 2^{-\left(\frac{P}{3S_2} \right)} \right]$$

Le modèle ECOSYS-87 (Müller et Pröhl, 1993) propose la valeur de 0,2 mm pour le coefficient de saturation S_2 . Cette valeur est donnée pour caractéristique du césium, zirconium, ruthénium, tellure, plutonium, niobium, manganèse et zinc pour l'herbe, les

céréales et le maïs. Pour ce qui concerne les précipitations (P), on rappelle l'utilisation du CD-ROM du Climat de la France qui propose des données mensuelles de précipitations que nous avons réparties régulièrement dans le mois. Ces données sont à l'origine des paliers sur le graphe de la figure 6 qui présente l'évolution temporelle de la pluviométrie dans les régions étudiées.

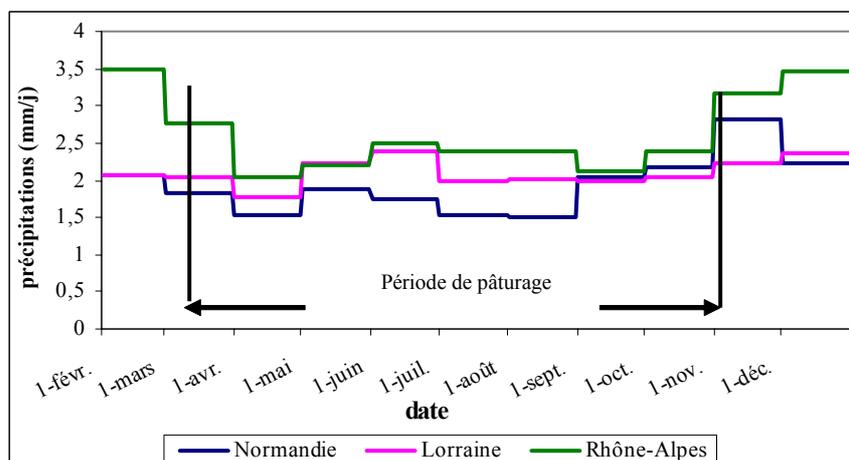


Figure 6 : variabilité saisonnière des précipitations journalières entre les trois sites étudiés

D'après la figure 6, on peut voir que la *variabilité* des précipitations peut atteindre un facteur 1,5 pendant la période de pâturage des vaches laitières et un facteur 2 en dehors de cette période. On retrouve par ailleurs les caractéristiques des climats étudiés : le climat montagnard avec ses précipitations importantes et le climat semi-continental caractérisé par des étés pluvieux avec souvent des pluies orageuses.

5.2.2 Résultats : les courbes de RCh

Les parcours d'indice foliaire obtenus pour chacun des sites sous STICS et les valeurs des précipitations permettent d'établir les courbes de rapport de captation par temps humide en fonction de la date (Figure 7).

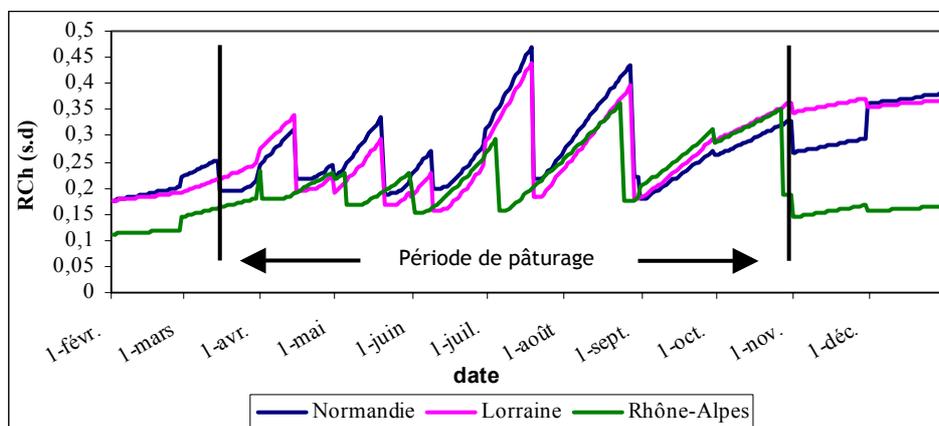


Figure 7 : évolution du rapport de captation par temps de pluie durant la période de pâturage

La figure 7 montre l'effet des pratiques culturales et notamment le type d'exploitation de la prairie qui est un fort facteur de *variabilité* du paramètre *RCh*. Cette *variabilité* peut atteindre un facteur 4 entre la région Rhône-Alpes et la Normandie sur les valeurs de *RCh* à un instant *t* donné durant la période de pâturage.

L'effet du climat et plus particulièrement des précipitations est également important. En effet, ces figures mettent en évidence les écarts de valeurs du rapport de captation dus uniquement aux pluies durant la période de pâturage, notamment au niveau des plateaux observés sur les courbes d'indice foliaire. La *variabilité* des précipitations régionales peut atteindre un facteur 3 (entre les régions Normandie et Rhône-Alpes) sur les valeurs de *RCh* durant la période de pâturage des vaches laitières. Or, c'est sur cette période que le lait de vache est sensible à la contamination de l'herbe de pâture. Lorsque les pluies sont plus importantes, comme c'est le cas en région Rhône-Alpes et globalement en climat de montagne, le *RCh* est plus faible. Ceci confirme le fait que la pluie entraîne le lessivage des aérosols déposés sur les feuilles. Le rapport de captation par temps humide peut varier de 0,11 (minimum) pour la région Rhône-Alpes à 0,47 (maximum) pour la Normandie durant la période de pâturage effective des vaches. Néanmoins, les valeurs de *RCh* restent plus faibles que celles du *RCs*. On peut noter également l'écart entre les valeurs de fin d'année et celles de février pour les trois régions, que l'on a vu sur la figure 2 correspondant à l'évolution de l'indice foliaire.

Il semble plus intéressant de régionaliser l'allure de la courbe du rapport de captation par temps humide que celle du *RCs*. En effet, la régionalisation permet de rendre compte d'une part, de décalages entre les cycles de différentes régions, que l'on retrouve dans le cas de *RCs*, et d'autre part de différences dans l'ampleur des transferts liées à la *variabilité* climatique. Il serait néanmoins nécessaire d'améliorer les données pluviométriques, c'est-à-dire obtenir des données réellement journalières, afin d'affiner la régionalisation et l'étude de *RCh*.

5.3 Etude de la date de consommation de l'herbe Dat_R

Les dates de consommation de l'herbe propres à chaque simulation dans STICS ont été reportées sur le tableau 7. Le modèle ASTRAL, selon (Renaud et al., 1997) propose différentes dates de l'année, l'interpolation se faisant suivant la date de dépôt. C'est pourquoi, les valeurs des paramètres radioécologiques (*RCs*, *RCh*, *FTds* et *FTdh*) sont fournies à ces dates (Tableaux 11 et 12), contrairement aux grandes cultures ou aux cultures maraîchères pour lesquelles les valeurs sont données en fonction du délai avant la récolte. On peut donc comparer les dates fournies selon ASTRAL avec celles retenues à la suite de l'enquête effectuée et des valeurs fournies par l'Institut de l'Elevage, c'est-à-dire avec les dates effectives dans les régions (Tableau 9).

Source	Dates de pâturage		
	Normandie	Lorraine	Rhône-Alpes
Enquête Prairies (<i>Institut de l'Elevage</i>)	15 mars	15 avril	01 avril
	15 avril	20 mai	05 mai
	20 mai	09 juin	01 juin
	09 juin	19 juillet	05 juillet
	19 juillet	28 août	24 août
	28 août	-	27 octobre
ASTRAL	15 mars 1 ^{er} mai 15 septembre 01 novembre		

Tableau 9 : comparaison des dates de pâturage des vaches laitières entre les prévisions de l'Institut de l'Elevage et ASTRAL

Les dates prévues par ASTRAL semblent ne pas tenir compte des facteurs rentrant dans l'exploitation du pâturage puisque les dates de pâture sont espacées de 3 à 5 mois. La situation représentée dans le modèle ASTRAL correspond alors plutôt à une exploitation libre par les vaches laitières sur de grandes surfaces d'herbe mais ce cas de figure est dans la pratique relativement rare en France. En effet, la pratique du libre pâturage limite la production des prairies permanentes et ne tire pas le meilleur parti des efforts coûteux d'amélioration de la culture de l'herbe apportés par l'exploitant. Les vaches gaspillent de l'herbe, abondante au printemps, laissent de nombreux refus, surpâtent l'herbe tendre et accentuent l'arrêt de végétation d'été : la production reste saisonnière. La situation représentée dans le modèle ASTRAL peut aussi correspondre à une parcelle de prairie pâturée et fauchée aux dates fixées dans le modèle ASTRAL.

La mise à l'herbe dans ASTRAL est relativement précoce et coïncide avec les données de l'enquête. Il en est de même pour la date de rentrée hivernale : la dernière pâture selon ASTRAL a lieu au 1^{er} novembre qui correspond à la date de rentrée en stabulation de l'enquête régionale la plus tardive. On retrouve également ces deux extrêmes dans (*Calmon, 1996*).

La *variabilité* des dates de pâture est grande du fait de nombreux facteurs qui l'influencent et interagissent entre eux. En effet, on rappelle que, outre la *variabilité* des dates de mise à l'herbe, il faut tenir compte du temps de passage des animaux sur la parcelle de prairie, du temps de repos qui varie selon la région et la saison, et du nombre de parcelles destinées à la pâture. Selon (*Soltner, 1990*), le nombre de parcelles (N) mises à la disposition des vaches dépend du temps de repos (T) entre chaque pâturage, du temps de séjour des animaux (t) sur la parcelle et du nombre de groupes d'animaux (n) se succédant éventuellement sur la parcelle (de 1 à 3) : $N = T/t + n$. On ne peut donc pas donner d'estimation précise de pâture au jour près, les choix des éleveurs laitiers, le nombre de parcelles pâturées, les aléas agricoles et climatiques n'étant pas prévisibles. Ceci explique en

outre la plage des dates données par l'Institut de l'Elevage, entre la date de mise à l'herbe et le pâturage total (jour et nuit).

5.4 Etude du rendement Rdt

5.4.1 Résultats obtenus à la suite de STICS

Outre le *LAI*, on s'est attaché à obtenir comme variable de sortie sous STICS, la matière sèche aérienne totale et la matière fraîche aérienne, exprimées en t/ha, de façon à pouvoir quantifier le rendement dans chacune des régions étudiées. La figure 8 qui présente l'évolution temporelle de la matière fraîche, illustre les résultats des simulations effectuées. La biomasse fraîche est, en effet, seule représentée dans la mesure où ce paramètre est pris en compte dans le modèle ASTRAL.

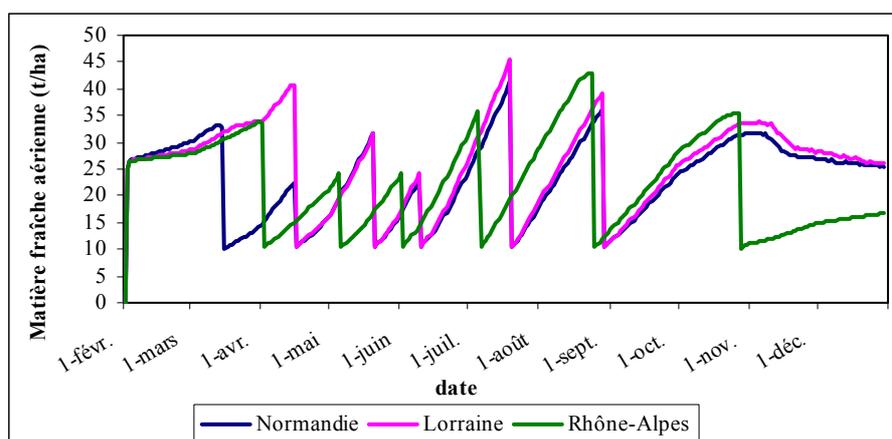


Figure 8 : évolution temporelle de la biomasse fraîche aérienne (tMS/ha) en fonction de la date

L'allure de la courbe de la figure 8 est cohérente avec la courbe de *LAI* obtenues précédemment. Le décalage des pâtures de la prairie observé dans le bilan de simulation se retrouve également sur ces figures, le pâturage des prairies correspondant aux chutes des valeurs de la biomasse aérienne. Comme dans le cas de l'indice foliaire, le climat intervient dans le rendement des prairies et donc dans leur exploitation.

D'autre part, les pratiques de fertilisation, particulièrement les quantités d'azote minéral apportées sur les parcelles prairiales fertilisées, ont un impact sur l'évolution du rendement de l'herbe. En effet, elles conditionnent la pousse et notamment la « flambée de croissance » comme on l'a vu dans le cas de l'indice foliaire.

Cette figure montre l'importance de prendre en compte le rendement des prairies de chacune des régions afin d'estimer le plus réellement possible la contamination radioactive de l'herbe de pâturage en intégrant les caractéristiques régionales.

5.4.2 Comparaison entre les valeurs d'ASTRAL, celles de l'enquête et celles de STICS

Le modèle ASTRAL utilise une seule valeur de rendement culturel pour l'herbe de pâture et pour toute l'année. Le tableau 10 permet de comparer les valeurs de biomasse fraîche aérienne obtenues à la suite des résultats fournis par l'Institut de l'Élevage en amont de l'étude avec celles résultant des simulations sous STICS et celle selon ASTRAL.

Région	Biomasse aérienne fraîche (kg/m ²)		
	Enquête	STICS	ASTRAL
Normandie	3,50	2,31	0,70
Lorraine	3,25	2,58	
Rhône-Alpes	2,00	2,20	

Tableau 10 : comparaison des rendements cultureux des prairies dans chacune des régions étudiées

Les valeurs données dans le cadre de STICS correspondent aux moyennes obtenues sur la période de simulation (1^{er} février au 1^{er} novembre) et non sur toute l'année contrairement aux valeurs issues de l'enquête. En effet, on rappelle que ces dernières sont définies comme somme de deux rendements : le rendement de pâture, estimé à chaque passage, à partir de la durée de séjour des animaux sur la parcelle, du nombre d'animaux présents et de la consommation journalière théorique de chaque catégorie d'animaux et le rendement de fauche, estimé à chaque coupe. Il est donc normal que les valeurs de l'enquête soient supérieures à celles de STICS, particulièrement pour la Normandie et la Lorraine.

La figure 9 montre la comparaison entre les valeurs régionales de rendement en kg/m² issues des simulations sous STICS et la valeur tabulée sous ASTRAL.

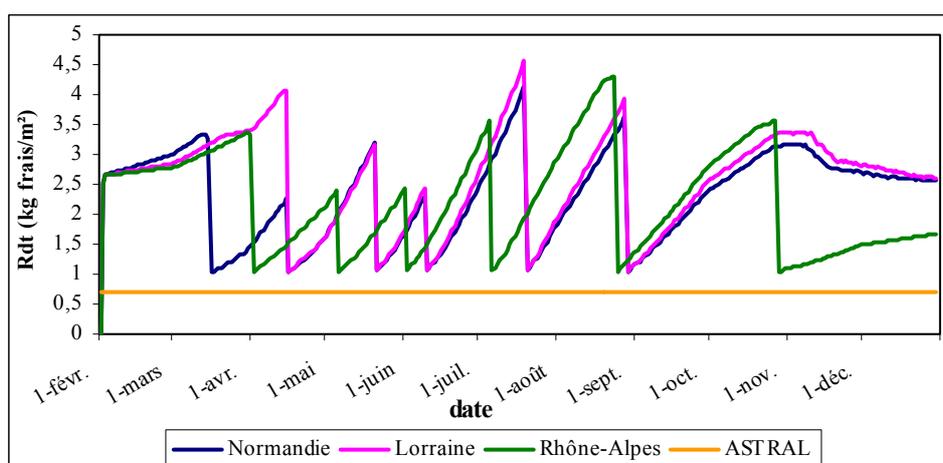


Figure 9 : comparaison des valeurs de rendement (kg frais/m²) entre ASTRAL et les données régionales issues de STICS

La différence entre les valeurs d'ASTRAL, de STICS et celles de l'enquête de l'Institut de l'Élevage peut atteindre un facteur 5 à 6. Néanmoins, on n'est pas en mesure de donner

l'origine des écarts observés entre les valeurs proposées dans la présente étude et celle d'ASTRAL car le mode d'obtention de la valeur du rendement cultural utilisée dans ASTRAL n'est pas précisé.

5.5 Le facteur de transfert direct

FTds représente le facteur de transfert de la contamination radioactive de l'air à la partie consommée de la plante dans le cas d'un dépôt sec. Ce facteur couvre les phénomènes d'interception, de translocation et de remise en suspension (*Renaud et al., 1997*). La partie comestible de l'herbe correspondant à la biomasse aérienne, le facteur de transfert direct dépend du rendement de la culture et du rapport de captation. Le tableau 11 présente alors les valeurs du facteur de transfert direct par temps sec, *FTds*, utilisées dans ASTRAL pour un rendement cultural de 0,7 kg frais/m² avec les valeurs pour les trois sites étudiés calculées par la relation suivante :

$$FTds = RCs / Rdt$$

Il a été calculé en prenant en compte respectivement les rendements de matières fraîches pour la Normandie, la Lorraine et la région Rhône-Alpes donnés au temps t. Les écarts entre les valeurs de rendements issues de STICS et le rendement utilisé dans ASTRAL sont la principale source des écarts des valeurs de *FTds* (voir paragraphe 5.4 sur les rendements).

Date	Facteur de transfert direct par temps sec <i>FTDs</i> (m ² /kg frais)			
	Normandie	Lorraine	Rhône-Alpes	ASTRAL
15 mars	0,24	0,25	0,26	2
01 mai	0,50	0,49	0,38	0,8
15 septembre	0,48	0,46	0,42	0,8
01 novembre	0,27	0,26	0,73	2

Tableau 11 : comparaison des valeurs de *RCs* tabulées dans ASTRAL à celles recalculées avec les données de STICS

Les valeurs d'ASTRAL sont supérieures d'un facteur 2 aux valeurs issues de STICS durant la période du 1^{er} mai au 15 septembre et d'un facteur 8 du 1^{er} novembre au 1^{er} mai, excepté pour la région Rhône-Alpes pour laquelle la valeur d'ASTRAL n'est supérieure que d'un facteur 3. Ceci en raison des dates de pâturage et de rentrée hivernale. En effet, les troupeaux normands et lorrains sont rentrés depuis le 15 octobre et n'ont pas pâturés les repousses de la parcelle depuis le 28 août. Le rendement à l'hectare, plus important que pour celle de la région Rhône-Alpes où la dernière pâture a lieu deux mois après, contribue à diminuer la valeur de *FTds*, malgré des valeurs de *RCs* plus élevées.

De même que pour le temps sec, on peut utiliser le facteur de transfert par temps humide, *Ftdh*. Il s'agit du facteur de transfert de l'air à la plante par temps humide. Il est égal au rapport *RCh/Rdt*, pour pouvoir comparer les valeurs obtenues à celles d'ASTRAL. Le

tableau 12 présente les valeurs de *FTdh* utilisées dans ASTRAL pour un rendement cultural de 0,7 kg frais/m² avec les valeurs pour les trois sites étudiés calculées par la relation précédente en prenant en compte les rendements de matières fraîches obtenus.

Date	Facteur de transfert par temps humide (m ² /kg frais)			
	Normandie	Lorraine	Rhône-Alpes	ASTRAL
15 mars	0,08	0,07	0,05	0,53
01 mai	0,14	0,12	0,10	0,27
15 septembre	0,13	0,13	0,13	0,27
01 novembre	0,08	0,10	0,13	0,53

Tableau 12 : comparaison des valeurs de *FTdh* tabulées dans ASTRAL à celles recalculées avec les données de STICS

De même que pour le *FTds*, l'intensité du transfert humide calculé ici est en dessous des valeurs d'ASTRAL d'un facteur 4 à 10 entre le 1^{er} novembre et le 1^{er} mai et seulement d'un facteur 2 à 2,7 durant la période de pâturage qui s'échelonne du 1^{er} mai au 15 septembre. Les valeurs d'ASTRAL semblent donc plus cohérentes avec les valeurs issues des simulations durant cette période.

De la même façon que pour l'étude du blé d'hiver (*Delboe et Mercat-Rommens, 2005*), les forts écarts entre les valeurs utilisées dans ASTRAL et celles recalculées dans cette étude pourraient s'expliquer par la façon de prendre en compte les précipitations journalières dans le calcul du rapport de captation. En effet, les valeurs d'ASTRAL concernent une hauteur de pluie toujours égale à 5 mm alors que les données climatiques utilisées pour chaque climat sont les valeurs mensuelles divisées par le nombre de jours dans le mois. D'après les données issues du CD-ROM de Météo France, les précipitations journalières varient de 1,5 à 2,83 mm pendant la période de pâturage, soit un facteur 2 à 3 fois moindre dans la valeur de *P* intervenant dans le calcul de *RCh*.

Le rendement est un paramètre qui rentre dans l'équation de la contamination de l'herbe de pâturage due au transfert foliaire. Sa valeur n'est donc pas négligeable et intervient dans les écarts relevés précédemment entre les valeurs des facteurs de transfert obtenues à la suite des résultats et celles d'ASTRAL. En effet, si on utilise un rendement de 0,7 kg/ha pour calculer le *FTds* et le *FTdh* de chacune des régions étudiées en prenant en compte respectivement les valeurs du *RCs* et du *RCh* pour la Normandie, la Lorraine et la région Rhône-Alpes, on obtient les figures 10 et 11.

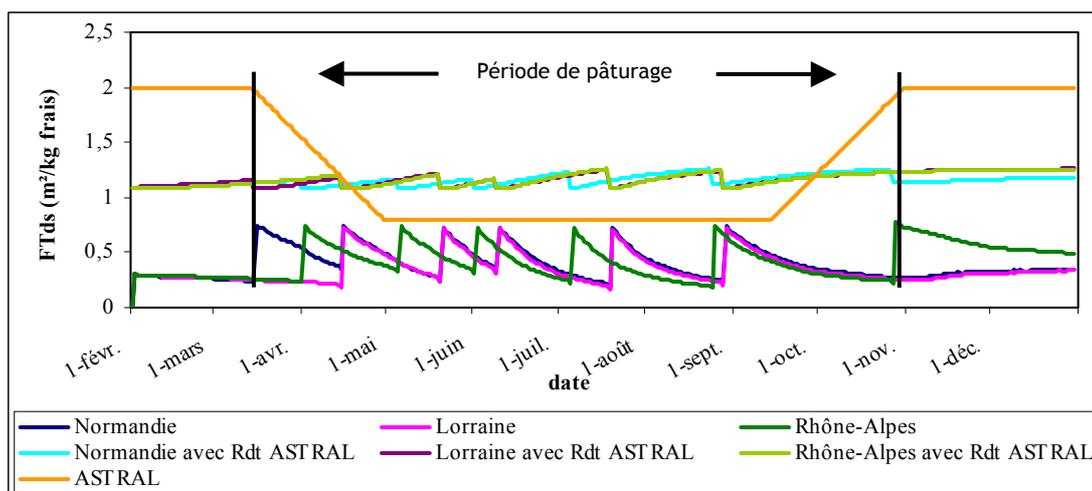


Figure 10 : comparaison des valeurs de *FTds* selon ASTRAL et pour les trois sites étudiés avec le rendement issu d’ASTRAL et avec les rendements des régions calculés avec STICS

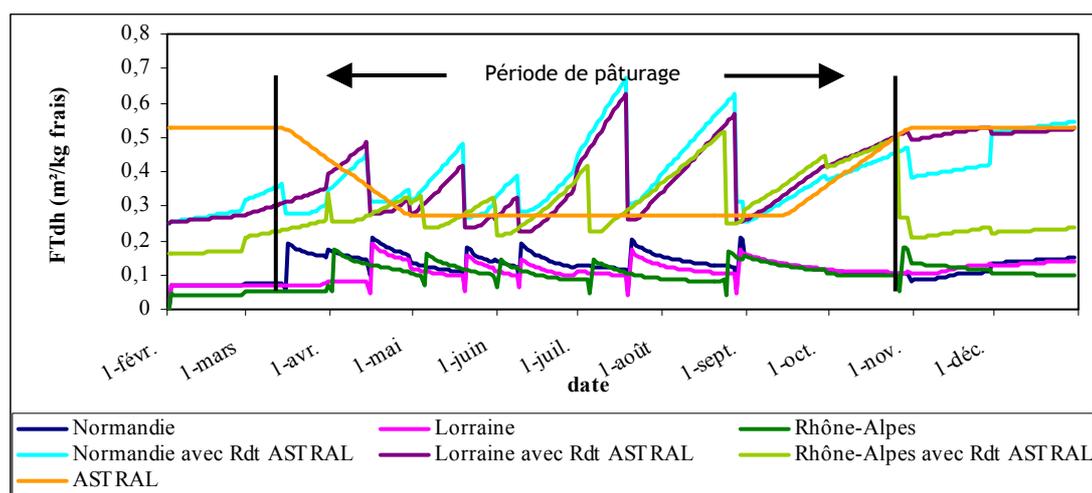


Figure 11 : comparaison des valeurs de *FTdh* selon ASTRAL et pour les trois sites étudiés avec le rendement issu d’ASTRAL et avec les rendements des régions calculés avec STICS

En utilisant un rendement de 0,7kg frais/ha, les valeurs de *FTds* (Figure 10) pour les trois régions étudiées, sont supérieures d’un facteur 1,5 à la valeur d’ASTRAL sur la période du 1^{er} mai au 1^{er} novembre. La valeur d’ASTRAL reste néanmoins supérieure d’un facteur 1,6 du 1^{er} novembre au 1^{er} mai. Mais c’est sur la première période que les vaches sont exclusivement au pâturage. On retrouve la même tendance concernant le *FTdh* (Figure 11). En effet, les valeurs du facteur de transfert en Normandie, pour un rendement de 0,7 kg frais/ha, peuvent être 2,5 fois supérieures à celles d’ASTRAL entre le 1^{er} mai et le 1^{er} novembre. Les valeurs du *FTdh* en Rhône-Alpes sont légèrement plus faibles que celles des autres régions mais restent supérieures à celles d’ASTRAL.

La figure 10 nous permet de voir également que, à rendement égal, les valeurs de *FTds* pour les trois régions sont proches et ne varient que de 1,08 à 1,2. Ceci confirme la tendance des

valeurs du rapport de captation par temps sec vue précédemment. Il n'en est pas de même pour les valeurs de *FTdh* qui illustrent, de la même façon que celles du *RCh*, l'intérêt de la régionalisation pour rendre compte de décalages entre les cycles et de l'ampleur des transferts. Ces figures viennent également confirmer l'importance des valeurs des rendements régionaux dans l'étude de la contamination de l'herbe de pâture.

On n'est pas en mesure d'aller plus loin dans l'explication des écarts relevés entre les valeurs proposées ici et celles d'ASTRAL en raison du manque d'informations sur les valeurs de *RCs* et *FTds* utilisées dans ASTRAL. En effet, la tabulation du paramètre *RCs* d'ASTRAL a été déterminée à partir des expérimentations effectuées par l'IPSN dans le cadre du programme TRAVAC (*Réal et Roussel, 1995*) mais l'obtention précise de ses valeurs n'est pas explicitée dans (*Renaud et al., 1997*) (*Renaud et al., 1999*). A l'issue de ce travail, on peut recommander de modifier la valeur générique du rendement pour l'herbe de pâture utilisée dans le modèle ASTRAL. En effet, la vache est mise sur une pâture en général lorsque la productivité de l'herbe est bonne et donc le rendement à considérer est plutôt un rendement maximum qu'un rendement moyen.

6 CONCLUSION

6.1 Intérêts et limites du travail

Cette étude a permis d'évaluer l'effet de la régionalisation de certains paramètres du modèle ASTRAL sur l'activité massique des fourrages issus d'une prairie permanente, soumise à un dépôt atmosphérique accidentel. C'est une première étape dans l'étude de la sensibilité radioécologique de la filière lait vis-à-vis d'une pollution accidentelle (projet SENSIB). Ce travail a notamment permis de montrer toute la richesse du couplage entre un modèle radioécologique comme ASTRAL et un modèle de culture comme STICS. Ce couplage permet de confronter les valeurs de paramètres génériques utilisées dans ASTRAL aux valeurs issues de STICS en prenant en compte certaines sources régionales de variabilité : climat, type de sol, système de culture et constitue donc une voie d'amélioration de la connaissance des paramètres utilisés en radioécologie.

Au terme de cette étude, une tabulation opérationnelle des paramètres d'ASTRAL permettant de calculer l'ampleur d'une émission atmosphérique accidentelle de radioactivité qui prenne en compte les variabilités régionales a pu être proposée. La régionalisation des rapports de captation rend compte d'une part de décalages entre les cycles de différentes régions et d'autre part, dans le cas de la captation par temps humide, de différences dans l'ampleur des transferts. Par ailleurs, la comparaison entre les valeurs de transfert recalculées à la suite des sorties de STICS et celles d'ASTRAL a mis en évidence un écart pouvant atteindre un facteur 3 dans le cas de *FTds* et un facteur 10 dans le cas de *FTdh*. L'étude du rendement a permis de mettre en évidence l'importance de ce paramètre dans l'estimation de la contamination de l'herbe de pâture et la nécessité de réactualiser la valeur tabulée dans ASTRAL.

Par ailleurs, ce rapport regroupe de nombreuses informations sur les pratiques culturales des prairies permanentes et sur les pratiques d'élevage actuelles en France qui peuvent être utiles au-delà du projet SENSIB. En effet, la gestion des conséquences d'une pollution radioactive repose aussi sur la crédibilité du dialogue technique entre les experts institutionnels et les filières agro-alimentaires. La bonne connaissance des pratiques est alors un élément indispensable de ce dialogue.

Les limites ont déjà été évoquées au cours de l'étude. Les principales sont les suivantes :

- l'indice foliaire ne peut réellement représenter la surface captante et ne rend pas compte de la géométrie du couvert (*Madoz-Escande et Santucci, 2004*) ;
- la portée des simulations est relativement réduite en raison des simplifications que l'on a effectuées. Il existe par exemple de grandes variations de temps de repos des parcelles prairiales selon les années : un mois de mai froid peut exiger des temps de repos de 30 jours au lieu de 15-20, alors qu'un mois de juillet humide peut limiter le repos à 25 jours au lieu de 30 en année normale ;
- les données pluviométriques ont également posé certaines limites dans l'interprétation de la captation et de l'activité dans l'herbe de pâture. En effet, l'utilisation d'ASTRAL nécessite de déterminer les importances relatives des dépôts qui se sont effectués par temps sec et lors de pluies, ainsi que les hauteurs de précipitations durant le passage des masses d'air contaminé. L'intensité du transfert des radionucléides vers les végétaux dépend de ces paramètres ;
- par ailleurs, le fait d'estimer les conséquences d'un accident avec une approche fondée sur des troupeaux en pâture permanente comme seule origine de la ration donne une enveloppe maximale mais est peu réaliste. Outre le fait que seule l'herbe soit considérée dans l'alimentation des vaches, l'ingestion de particules de sol adhérentes aux aliments et la consommation d'eau n'ont pas été prises en compte. La consommation de terre contaminée peut correspondre à une activité importante, du fait d'une contamination importante du sol.

6.2 Perspectives

La qualité des simulations pourrait être améliorée pour une meilleure prise en compte de la variabilité climatique, particulièrement au niveau des données journalières, des sols et des pratiques de fertilisation.

Afin de poursuivre sur la sensibilité de la production laitière et de rendre compte davantage de la réalité, il serait judicieux d'élargir le type de recherches effectué sur les prairies permanentes aux prairies temporaires (prairies ensemencées en graminées fourragères ou en mélange avec des légumineuses) et artificielles (prairies ensemencées exclusivement de légumineuses fourragères) qui sont en grande majorité semées puis fauchées avec des destinations diverses : zéro-pâturage quand le fourrage est transporté jusqu'à l'animal pour être consommé sans stockage, ensilage, foin ou encore enrubannage. En outre, l'implantation

de ces prairies nécessite une préparation du sol et un semis dont la date varie d'une région à l'autre. Les cycles de repousse dépendent de la plante elle-même : on a des différences assez fortes entre des graminées et des légumineuses ainsi qu'entre espèces d'une même famille mais qui restent minimales auprès des variations considérables de valeur en fonction du stade végétatif. Il serait donc intéressant d'étudier également d'autres variétés de graminées telles que le ray-grass qui est l'une des plus répandues.

L'étude pourrait également être étendue à la culture du maïs. En effet, l'ensilage de maïs occupe une place importante dans la ration alimentaire des vaches laitières, et ce, d'autant plus qu'elles sont de grosses productrices de lait. Afin d'estimer au mieux les conséquences d'une émission radioactive accidentelle sur les productions continues telles que le lait, il est nécessaire de connaître 80 à 90% de la production de fourrages destinés à l'alimentation des ruminants avec les rendements de production.

Il serait en outre utile de savoir si l'importation des stocks de fourrage a lieu de façon notable et d'en connaître l'origine. On peut cependant s'interroger sur la faisabilité d'une collecte de ces données sans enquête de terrain, sur le degré de simplification nécessaire à rechercher et sur la possibilité éventuelle de remettre à jour ces données compte tenu des évolutions qui peuvent être rapides.

Il serait enfin intéressant de vérifier si l'allure des courbes obtenues à la suite des simulations se retrouve pour les climats méditerranéen et océanique dégradé (climat du centre où l'influence océanique est encore perceptible mais dégradée du fait de l'éloignement de la côte) et de voir si elle est commune pour l'ensemble des climats français. Néanmoins, en raison du peu, voire de l'absence, de production de lait de vaches dans les régions influencées par ces deux climats, leur étude ne s'est pas imposée.

Enfin, lorsque la sensibilité radioécologique des différentes composantes des rations alimentaires des vaches laitières sera mieux appréhendée, la sensibilité de l'activité obtenue dans le lait aux pratiques zootechniques régionales pourra être étudiée.

7 BIBLIOGRAPHIE

- Angeletti L. et Levi E., 1997. Etudes comparatives des facteurs de transfert de l'eau, de l'iode et du strontium sur le ray-grass et le trèfle. Rapport CEA-R-4960.
- Brisson N et *al.*, 2002. STICS : Notice concepts et formalismes. Editions INRA.
- Besse J., 1969. L'alimentation du bétail. Collection d'Enseignement Agricole. J.-B. Baillière et fils, Editeurs, 365p.
- Calmon P., 1996. Calendriers d'affouragement pour les principales productions animales françaises. Rapport IPSN/DPRE/SERE/LRC n°96-013.
- Calmon P. et Murlon C., 2003. Equations et paramètres du logiciel ASTRAL V2.1. Rapport IRSN/SERLAB/L-MODE n°03-16 (révision du document 02-29).
- Chamberlain A.C., 1970. *Interception and retention of radioactive aerosols by vegetation*. Atmospheric Environment n°4, p57.
- Delboe A. et Mercat-Rommens C., 2005. Étude régionalisée de l'impact d'une pollution radioactive accidentelle sur le blé d'hiver- Projet SENSIB. Rapport DEI/SESURE n°2005-15.
- Hoffman F.O., 1989. *Pasture grass interception and retention of ¹³¹I, ⁷Be and insoluble microspheres deposited in rain*. OAK-RIDGE laboratory, Environmental Sciences Divisions.
- Institut de l'Elevage, 2005. Communications personnelles.
- Jamagne et *al.*, 1997. Quelques données sur la variabilité dans le milieu naturel de la réserve en eau des sols. Bulletin Technique 324-325, p119-157.
- Madoz-Escande C. et Santucci P., 2004. RADEMIC 2000-2003. Synthèse des expérimentations de contamination foliaire par aérosols radioactifs (¹³⁷Cs, ⁸⁵Sr, ¹³³Ba et ^{123m}Te). Rapport IRSN/DEI/SECRE/2004-003.
- Maubert H. et *al.*, 1991. Programme Réhabilitation des Sols et des Surfaces après un Accident. Acquis expérimentaux 1985-1990. Note RESSAC 04/91.
- Mercat-Rommens C. et Renaud P., 2003. Rapport de lancement du projet Sensibilité Radioécologique. Rapport IRSN/DEI/SESURE 2003-02.
- Müller H. et Pröhl G., 1993. ECOSYS-87: a dynamic Model for assessing radiological consequences of nuclear accidents. Health Physics, vol. 64, n°3, 232-252.
- Rabaut V., 2000. Agreste. *Les prairies en 1998*. Chiffres et Données Agriculture, n°128, 12/2000.
- Réal J. et Roussel S., 1995. Paramètres mesurés en laboratoire lors d'expérimentation d'étude du transfert foliaire de radioéléments à des végétaux terrestres. IPSN, rapport IPSN/DPEI/SERE 95-024.
- Renaud P., Maubert H., Badie C., 1997a. Contamination des productions agricoles de base suite à une émission atmosphérique accidentelle. *Première partie : Les modèles de transferts des radionucléides dans la chaîne alimentaire terrestre*. Document SERE 97-017.
- Renaud P., Maubert H., Duffa C., 1997b. Contamination des productions agricoles de base suite à une émission atmosphérique accidentelle. *Deuxième partie : Le modèle ASTRAL Crise*. Document SERE 97-018.
- Renaud P., Maubert H., Bernié J.C., 1997c. Prise en compte des paramètres contextuels en radioécologie post-accidentelle. *Radioprotection* vol 32, n°2.
- Renaud P., Beaugelin K., Maubert H., Ledenvic P., 1999. Les retombées en France de l'accident de Tchernobyl. *Conséquences radioécologiques et dosimétriques*. IPSN, 146p.

Renaud P., Réal J., Maubert H. and Roussel-Debet S., 1999. Dynamic modelling of the caesium, strontium and ruthenium to grass and vegetables. *Health Physics* vol 76, n°5, 495-501.

SCPRI, 1986. Tableaux mensuels de mesures. *Mai-juin 1986, juillet 1986, août 1986, septembre 1986, octobre 1986.*

Soltner D., 1990. Les Grandes Productions Végétales. *Céréales, plantes sarclées, prairies.* Sciences et Techniques Agricoles, p321-449.

Référence des CD-ROM :

CD-ROM Agreste (2001) *Statistique agricole annuelle.*

CD-ROM Météo France (1996) *Le climat de la France*

Référence des Sites Internet :

Site Internet de l'INRA d'Avignon : www.avignon.inra.fr/stics/

Site Internet de la statistique agricole AGRESTE :

www.agreste.agriculture.gouv.fr/default.asp?rub=resw&hauteur=535

Site Internet de l'INRA d'Orléans : www.inra.fr/afes/snas/base.htm

Site Internet de l'Élevage Laitier : www.cidilait.com/elevage_marche0.0.html?&i=2&j=0

Site Internet de l'Université de Picardie Jules Verne (cours de Jacques Beauchamp : *L'eau et le sol*) : www.u-picardie.fr/~beaucham/mst/eau-sol.htm

Site Internet du C.N.F.S.H (Comité National Français des Sciences Hydrologiques) :

www.cig.ensmp.fr/~hubert/glu/FRDIC/DICRESHH.HTM

Site Internet des Chambres d'Agricultures :

www.pep.chambagri.fr/bovinslait/html/filiere.html

Site Internet de l'INRA (Productions Animales : Ingrand S., 2000. *Comportement alimentaire, quantités ingérées et performances des bovins conduits en groupe*) :

www.inra.fr/Internet/Produits/PA/an2000