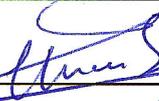
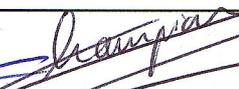


IRSNINSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Etude régionalisée de l'impact d'une pollution radioactive accidentelle sur le blé d'hiver

Aude Delboe, 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>Etude régionalisée de l'impact d'une pollution radioactive accidentelle sur le blé d'hiver</p> <p>Rapport DEI/SESURE n° 2005-15</p>					
	Réservé à l'unité		Visas pour diffusion		
	Auteur(s)	Vérificateur*	Chef du SESURE	Directeur DEI	Directeur Général de l'IRSN
Noms	C. MERCAT	Ph. RENAUD	N. LEMAITRE	D. CHAMPION	J. REPUSSARD
Dates	14/04/05	14/04/05	18/04/05	28/04/05	
Signatures					

* rapport sous assurance de la qualité

HISTORIQUE DES MODIFICATIONS

Version	Date	Auteur	Pages ou paragraphes modifiés	Description ou commentaires
0	01/09/2004	C. Mercat		Émission du document
1	11/04/2005	C. Mercat		Prise en compte demande de modifications N. Lemaitre

LISTE DES PARTICIPANTS

Nom	Organisme
Aude DELBOE	Stagiaire Institut National Agronomique Paris-Grignon
Catherine MERCAT	IRSN / DEI / SESURE / LERCM

LISTE DE DIFFUSION

Nom	Organisme
J. REPUSSARD	IRSN/DIR
M. BRIERE	IRSN/DIR
JC NIEL	IRSN/DSDRE
J. LEWI	IRSN/DESTQ
MP BIGOT	IRSN/COM
A. OUDIZ	IRSN/DSDRE
F. BRECHIGNAC	DESTQ
F. SOULET	DESTQ/DISCT/CRIS
C. RINGEARD	DRPH/SER/UETP
D. CHAMPION	DEI/DIR
G. LINDEN	DEI/DIR
B. DUFER	DEI/DIR
JM PERES	DEI/SARG
N. REALES	DEI/SARG
JC GARIEL	DEI/SECRE
C. MADOZ-ESCANDE	DEI/SECRE/LRE
C. COLLE	DEI/SECRE/LRE
L. GARCIA-SANCHEZ	DEI/SECRE/LME
C. MOURLON	DEI/SECRE/LME
MA GONZE	DEI/SECRE/LME
P. DUBIAU	DEI/SESUC
JP MAIGNE	DEI/SIAR
MC ROBE	DEI/STEME
B. DESCAMPS	DEI/SESURE/LESE
O. PIERRARD	DEI/SESURE/LVRE
P. RENAUD	DEI/SESURE/LERCM
S. ROUSSEL-DEBET	DEI/SESURE/LERCM
B. BRIAND	DEI/SESURE/LERCM
G. DUCHARME	Université de Montpellier

RESUME

Le but de cette étude est d'évaluer la sensibilité du blé d'hiver 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 culture à l'échelle du territoire national. L'étude s'est appuyée sur les équations du modèle ASTRAL qui permet d'évaluer le transfert des radionucléides dans la chaîne alimentaire terrestre suite à une émission atmosphérique accidentelle. Le paramètre d'ASTRAL sur lequel l'étude s'est concentrée est le facteur de transfert de la radioactivité de l'air au grain. Ce facteur dépend à la fois des paramètres de captation et de translocation, puisque la récolte est contaminée quand les radionucléides déposés sur les feuilles sont assimilés et transportés vers le grain. La méthodologie a donc consisté à régionaliser ces deux paramètres. Pour cela, le logiciel STICS (Simulateur multIdisciplinaire pour des Cultures Standard) développé par l'INRA d'Avignon a été utilisé. Ce modèle propose un suivi au pas de temps journalier de l'indice foliaire, ainsi que les dates d'occurrence des stades agronomiques du blé. Ces variables ont été corrélées à la captation et à la translocation. Les sorties des simulations effectuées sur 12 stations climatiques et 2 variétés ont permis d'exprimer les paramètres de captation et de translocation selon la typologie d'ASTRAL, c'est-à-dire en fonction du délai dépôt-récolte. Ces valeurs ont ensuite été confrontées à des données bibliographiques et aux travaux menés par l'IRSN dans le cadre des programmes RESSAC et RADEMIC.

ABSTRACT

The goal of this study is to evaluate the sensitivity of corn of winter with respect to an accidental release of radioactivity. We want to know if a uniform and specific deposit would involve the same contamination on the scale of the whole territory. The study was based on the equations of the ASTRAL model which makes it possible to evaluate the transfer of the radionuclides in the terrestrial food chain following an accidental atmospheric emission. The parameter of ASTRAL on which the study concentrated is the factor of transfer of the radioactivity of the air to the grain. This factor depends on the parameters of captation and translocation, since harvest is contaminated when the radionuclides deposited on the leaves are assimilated and transported towards the grain. Methodology thus consisted in regionalizing these two parameters. For that, software STICS (multidisciplinary Simulator for Standard Cultures) developed by the INRA of Avignon was used. This model proposes a daily follow-up of the foliar index, as well as the dates of occurrence of the agronomical stages of corn. These variables were correlated with captation and translocation. The outputs of the simulations carried out on 12 climates and 2 varieties made it possible to express the parameters of captation and translocation according to the typology of ASTRAL, i.e. according to the time deposit-harvest. Then, these values were compared with bibliographical data and with data issued from IRSN programs RESSAC and RADEMIC.

MOTS-CLES

Rejet accidentel, blé d'hiver, contamination agricole, sensibilité, régionalisation

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION.	9
2. PRESENTATION DU MODELE ASTRAL.....	10
2.1. Classement des productions agricoles végétales	10
2.2. Mode de calcul de la valeur de la contamination.....	10
2.3. Explicitation des paramètres susceptibles d'être régionalisés	11
2.3.1. La proportion de dépôt sec : Kr	11
2.3.2. Les facteurs de transfert air/organe consommé : Ftds et FTdh.....	12
2.3.3. Le rapport de captation par temps sec : RCs	13
2.3.3.1. Expression de la captation selon la biomasse aérienne.....	13
2.3.3.2. Expression de la captation selon l'indice foliaire	14
2.3.3.3. Limites de la méthode choisie.....	16
2.3.4. Le rapport de captation par temps humide : RCh	17
2.3.5. La date de récolte : DatR	17
2.3.5.1. Utilité dans ASTRAL.....	17
2.3.5.2. Variabilité agronomique	17
2.3.6. Le facteur de translocation : TLF	18
2.3.6.1. Mode de calcul de l'ICRU	18
2.3.6.2. Mode de calcul de l'IAEA.....	19
2.3.6.3. Les valeurs de translocation du modèle ECOSYS	19
2.3.6.4. Effet de la diversité des modes de calculs sur la valeur de TLF	19
2.3.6.5. Variabilité du facteur de translocation en fonction du délai floraison-récolte	20
3. PRESENTATION DU MODELE STICS	21
3.1. Hypothèses de travail.....	21
3.1.1. Hypothèse sur l'indice de surface foliaire	21
3.1.2. Hypothèse sur la date de récolte	22
3.1.3. Hypothèse sur la date de floraison et le délai floraison-récolte	22
3.2. Présentation du modèle STICS.....	23
3.2.1. Potentialités et organisation	23
3.2.2. La croissance foliaire	24
3.2.3. La sénescence foliaire	25
3.3. Description des simulations réalisées	26
3.3.1. Choix de la culture-test : le blé d'hiver	26
3.3.2. Choix des sites-test	26

3.4.	Données nécessaires au modèle STICS	26
3.4.1.	Fichiers pédologiques.....	26
3.4.2.	Fichier technique.....	28
3.4.3.	Fichiers climatiques.....	28
3.4.3.1.	Températures minimale et maximale journalières.....	29
3.4.3.2.	Rayonnement global.....	29
3.4.3.3.	L'évapotranspiration potentielle (ETP)	31
4.	ETUDE DE RCS	33
4.1.	Résultats des simulations-test.....	33
4.1.1.	Cycle de développement	33
4.1.2.	Calcul de l'indice foliaire	34
4.1.3.	Calcul du rapport de captation déduit de l'indice foliaire.....	37
4.1.3.1.	Méthodologie.....	37
4.1.3.2.	Résultats	37
4.2.	Généralisation des simulations à l'ensemble du climat de la France.....	39
4.2.1.	Généralités sur les climats de la France.....	39
4.2.2.	Echantillonnage des stations climatiques.....	40
4.2.3.	Etude de l'effet du climat sur RCs.....	40
5.	ETUDE DE RCH	44
5.1.	Mode de calcul de RCh	44
5.2.	Obtention des courbes de RCh	45
5.3.	Encadrement de RCh.....	47
6.	ETUDE DE LA DATE DE RECOLTE	47
6.1.	Résultats des simulations	47
6.2.	Comparaison avec les données de l'ITCF et celles d'ASTRAL.....	48
7.	ETUDE DE LA TRANSLOCATION	49
7.1.	Etude de l'effet du climat sur le délai floraison-récolte	49
7.1.1.	Résultats des simulations	49
7.1.2.	Comparaison avec les dates de floraison tirées de la bibliographie.....	50
7.1.3.	Proposition de construction des courbes TLF = f (délai avant récolte)	51
7.2.	Comparaison des valeurs de TLF	52
8.	COMPARAISON ENTRE LES FACTEURS DE TRANSFERT AIR/GRAIN ISSUS DE STICS ET CEUX D'ASTRAL	54
8.1.	Facteur de transfert par temps sec: FTds	54
8.2.	Facteur de transfert par temps humide: FTdh.....	55

9. EXEMPLE D'APPLICATION DES RESULTATS.....	57
9.1. Effet relatif de la captation et de la translocation	57
9.1.1. Sur la valeur de FTds	58
9.1.2. Sur la valeur de FTdh	59
9.2. Résultats.....	59
9.2.1. Cas d'un dépôt sec	59
9.2.2. Cas d'un dépôt humide.....	61
9.2.3. Discussion.....	63
10. CONCLUSION.....	65
10.1. Intérêts et limites du travail.....	65
10.2. Perspectives.....	66
11. LISTE DES TABLEAUX	68
12. LISTE DES FIGURES	69
13. RÉFÉRENCES	71
14. LISTE DES ANNEXES	73

1. INTRODUCTION.

La présente étude a été réalisée dans le cadre d'un stage de fin d'études (6 mois) de diplôme d'ingénieur agronome et porte sur le volet agricole du projet SENSIB.

Le Projet Sensibilité Radioécologique (SENSIB) a été lancé en septembre 2003 (Mercat-Rommens et Renaud, 2003). La sensibilité radioécologique désigne l'ensemble des caractéristiques d'un environnement qui déterminent la réponse de celui-ci lorsqu'il est soumis à une pollution radioactive. En effet, les conséquences d'une pollution dépendent non seulement de sa nature et de son importance, mais aussi des caractéristiques de l'environnement qui la reçoit. L'objectif visé est de comparer la sensibilité radioécologique de différents environnements vis-à-vis d'une pollution radioactive. Il s'agit de mettre en place une méthode de normalisation qui puisse s'appliquer aux domaines continental, aquatique et marin, et qui fournisse un indice global rendant compte de l'influence des différents facteurs de sensibilité. Ces facteurs de sensibilité, qui restent à identifier et dont la gamme de valeurs doit être caractérisée, sont notamment des paramètres intrinsèques au milieu (hauteur de précipitation, type de sol, pratiques d'affouragement, précipitations neigeuses...) qui régissent l'intensité des processus de dépôt, de transfert et de migration des radionucléides dans le milieu. De ces processus résultent des indicateurs de la réponse du milieu à la contamination, en terme de stock ou de flux d'activité.

La présente étude contribue à l'évaluation de la sensibilité des milieux agricoles vis-à-vis d'un rejet accidentel de radioactivité. En d'autres termes, il s'agit de savoir si un dépôt uniforme et ponctuel entraînerait une contamination identique des produits agricoles à l'échelle du territoire national. Cette étude s'appuie sur le modèle ASTRAL qui permet d'évaluer le transfert des radionucléides dans la chaîne alimentaire terrestre suite à une émission atmosphérique accidentelle. ASTRAL est un modèle générique qui privilégie la simplicité d'utilisation en cas de crise, puisqu'il exige peu de données d'entrée et propose une valeur de contamination par catégorie générique de culture, sans distinction régionale. Il s'agit ici d'évaluer l'effet de la régionalisation des paramètres du modèle ASTRAL sur l'activité massique des produits agricoles soumis à un dépôt accidentel.

Le travail de régionalisation a été consacré au blé d'hiver, puisque les grandes cultures sont soumises à des conditions climatiques non contrôlées, à la différence des cultures maraîchères. De plus, la diversité des pratiques culturales (dates de labour, de semis, irrigation) et des choix variétaux sont susceptibles d'induire une variabilité dans leur parcours de développement. Cette variabilité se répercute potentiellement sur les valeurs des paramètres d'ASTRAL.

Dans ce but, le logiciel STICS (Simulateur multidisciplinaire pour des Cultures Standard) développé par l'INRA d'Avignon a été utilisé. En effet, ce modèle propose un suivi au pas de temps journalier de l'indice foliaire, variable qui a pu être corrélée à certains paramètres d'ASTRAL, et propose des valeurs pour les dates d'occurrence des stades phénologiques du blé. On s'est intéressé plus particulièrement à la date de floraison et à la date de récolte, qui interviennent dans le formalisme d'ASTRAL.

Dans un premier temps, le gain d'information apporté par le modèle STICS a été testé sur deux jeux de données régionalisées. Puis des valeurs ont été obtenues pour les paramètres d'ASTRAL, afin de proposer d'éventuelles évolutions de ce modèle et de pouvoir comparer les valeurs trouvées à celles d'ASTRAL et de la bibliographie. Pour cela, l'utilisation de STICS au territoire a été étendue au territoire national en intégrant aux simulations la variabilité spatiale du climat et de certaines pratiques.

Enfin, des simulations de dépôt exprimé en jour de l'année calendaire ont été effectuées afin de déterminer l'impact de la date de dépôt sur l'intensité du transfert foliaire à la plante.

Le champ de l'étude a été restreint aux paramètres entrant en jeu dans la contamination foliaire, car cette voie de transfert est prépondérante par rapport à la voie racinaire durant la première année suivant l'accident.

2. PRESENTATION DU MODELE ASTRAL

2.1. Classement des productions agricoles végétales

Les principales productions agricoles ont été regroupées en une typologie comprenant trois groupes et 15 « classes ASTRAL » (Tableau 1). Les critères de regroupement des cultures au sein d'une même classe sont : l'appartenance à une même famille agronomique (céréales, plantes sarclées, protéagineux...), à une même unité radioécologique (similitudes vis-à-vis des transferts de radioactivité), les mêmes pratiques agricoles, la même destination...

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, dur, seigle</u>
	Céréales homme printemps	Céréales semées au printemps, pour la consommation humaine	<u>Orge, blé dur et tendre</u>
	Céréales animaux hiver	Céréales semées en hiver, pour l'alimentation animale (affouragement ou ensilage)	<u>Orge-escourgeon, triticale, avoine</u>
	Céréales animaux printemps	Céréales semées au printemps, pour l'alimentation animale (affouragement ou ensilage)	<u>Mais, orge, avoine, sorgho</u>
	Racines et tubercules	Racines et tubercules de grande culture destinées à l'alimentation humaine ou animale	<u>Pomme de terre, 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, soja</u>
	Ensilage maïs	Maïs d'ensilage destiné à l'alimentation animale	<u>Maïs d'ensilage</u>
	Graines protéagineuses	Protéagineux de printemps	<u>Pois, féverole</u>
	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 maraîchers	Légumes feuille	Cultures maraîchères dont les feuilles sont consommées	Salade, chou, épinard, céleri, poireau...
	Légumes fruit	Cultures maraîchères dont les fruits sont consommés	Tomate, petit pois, haricot, courgette...
	Légumes racine	Cultures maraîchères 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 ASTRAL des productions agricoles végétales.

Source : Renaud et al, 1997a, Calmon et Murlon, 2003

Après avoir explicité le mode de calcul de contamination propre à chaque groupe, l'étude s'est concentrée sur les paramètres de la classe "Céréales Homme Hiver" qui comprend le blé d'hiver.

2.2. Mode de calcul de la valeur de la contamination

Les équations citées sont tirées de la modélisation d'ASTRAL (Renaud et al, 1997b). Pour les grandes cultures, le modèle ASTRAL calcule une concentration dans le végétal à la récolte à partir des dates définies dans le calendrier agricole et de la date du dépôt :

Si $\text{Dat}_D > \text{Dat}_{R1}$ $Cv(\text{Dat}_{R1}) = 0$ (récolte non contaminée)

Si $\text{Dat}_{Li} < \text{Dat}_D \leq \text{Dat}_{Ri}$ $Cv(\text{Dat}_{Ri}) = Cv_{fol}(\text{Dat}_{Ri})$ (récolte contaminée par transfert foliaire)

Si $\text{Dat}_{Li} \geq \text{Dat}_D$ $Cv(\text{Dat}_{Ri}) = Cv_{rac}(\text{Dat}_{Ri})$ (récolte contaminée par transfert racinaire)

Cv : Concentration du végétal v à la récolte ($\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ frais)

Cv_{fol} : concentration due au transfert foliaire ($\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ frais)

Cv_{rac} : concentration due au transfert racinaire ($\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ frais)

Dat_D : date de dépôt (j)

Dat_{Ri} : date de récolte de la i ème année ($R1$ étant la récolte de l'année du dépôt)
(j)

Dat_{Li} : date de labour concernant la récolte de la i ème année (j)

On s'intéresse uniquement aux paramètres intervenant dans le calcul de la contamination due au transfert foliaire, donc à des dépôts survenant entre le labour et la récolte de la culture. La contamination est calculée selon l'équation :

$$Cv_{fol,r}(\text{Dat}_R) = D_r (Kr \cdot FTds_{v,r,\text{Dat}_R-\text{Dat}_D} + (1-Kr) \cdot FTdh_{v,r,\text{Dat}_R-\text{Dat}_D, Hp}) \cdot e^{-1r (\text{Dat}_R-\text{Dat}_D)}$$

Dat_R : date de récolte

Dat_D : date de dépôt

v : type de végétal

r : type de radionucléide

D_r : dépôt total du radionucléide r sur l'ensemble des sols et des végétaux ($\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2}$)

Kr : proportion du dépôt sec dans le dépôt total (s.d)

$FTds$: facteur de transfert pour dépôt sec ($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ frais)

$FTdh$: facteur de transfert pour dépôt humide ($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ frais)

Hp : hauteur de précipitation (mm)

λ_r : constante de décroissance radioactive du radionucléide (j^{-1})

2.3. Explicitation des paramètres susceptibles d'être régionalisés

2.3.1. La proportion de dépôt sec : Kr

Le paramètre Kr , qui rend compte dans ASTRAL de la proportion du dépôt sec par rapport au dépôt total, est susceptible d'être régionalisé puisqu'il varie en fonction de la distance au site nucléaire d'une part, du vent et de l'intensité de précipitation au moment du dépôt d'autre part. Cependant on ne peut travailler de façon prédictive sur ces facteurs climatiques en situation accidentelle. On fixera donc Kr égal à 0 (dépôt sec) ou 1 (dépôt humide) au cours des simulations sous ASTRAL.

Le dépôt sec se produit au contact de l'air contaminé avec des obstacles tels que la végétation ou le sol. Divers processus entrent alors en jeu : captation par diffusion gazeuse à travers les épidermes foliaires par l'intermédiaire des ouvertures stomatiques, impaction à la surface des feuilles des particules les plus grosses,

dissolution s'il y a présence d'eau liquide à la surface des végétaux, réaction chimique dans le cas de gaz très réactifs (Maddoz Escande et Henner, 2003).

Le dépôt sec sur le végétal peut se calculer à partir de la vitesse de dépôt et de l'activité volumique de l'air.

Le dépôt humide résulte du lessivage du panache par la pluie. C'est donc un phénomène intermittent. Son importance est fonction de la distribution des tailles des gouttes d'eau et des tailles des particules. Il est, de plus, proportionnel à l'intensité des précipitations, le taux de lavage dépendant des propriétés physico-chimiques des particules radioactives et des caractéristiques de l'eau de pluie (pH principalement).

2.3.2. Les facteurs de transfert air/organe consommé : FTds et FTdh

FTds représente le facteur de transfert de l'activité déposée au niveau du sol à la partie consommée de la plante, en cas de dépôt sec. Ce paramètre dépend du végétal, du radionucléide et du délai dépôt-récolte. La valeur de FTds dans ASTRAL est obtenue par interpolation des valeurs tabulées pour différents « délais avant récolte ». Il couvre à la fois les phénomènes d'interception, de translocation et de remise en suspension.

Quant à FTdh, il s'agit du facteur de transfert de l'air à la plante pour un dépôt humide. Ce paramètre dépend du végétal, du radionucléide, du délai dépôt-récolte et de la hauteur de pluie tombée qui est une donnée rentrée par l'utilisateur. Cette hauteur de pluie doit être envisagée sur la durée de passage du panache au-dessus de la zone.

L'étude a été axée sur les paramètres FTds et FTdh, puisqu'ils dépendent du stade de développement d'un végétal donné au moment du dépôt.

Les paramètres FTds et FTdh sont donnés directement dans ASTRAL. Au sein de la catégorie des grandes cultures, ils ont été calculés de la façon suivante pour la classe « Céréales homme hiver » d'ASTRAL (Renaud 2004) :

$$FTds = RCs \cdot \frac{TLF}{Rdt_{récolte}}$$

$$FTdh = RCh \cdot \frac{TLF}{Rdt_{récolte}}$$

RCs : rapport de captation par temps sec (s.d)

RCh : rapport de captation par temps humide (s.d)

TLF : facteur de translocation ($m^2.kg^{-1}$)

Rdt récolte : Rendement à la récolte ($kg.m^{-2}$)

Dans la suite du rapport, on s'efforce donc de caractériser la variabilité des paramètres RCs, RCh, DatR et TLF selon les régions de production et les pratiques culturales propres au blé d'hiver. On en déduira les courbes de FTds et FTdh, qui seront comparées aux valeurs d'ASTRAL.

Remarque : La variabilité du paramètre Rdt récolte n'a pas été étudiée. En effet, les écarts de rendements du blé d'hiver sont faibles entre régions (CD-ROM Agreste, 2001) et n'influent donc pas sur la variabilité spatiale de la contamination.

2.3.3. Le rapport de captation par temps sec : RCs

Le rapport de captation par temps sec, encore dénommé facteur d'interception, est défini comme le rapport entre l'activité fixée par la végétation et l'activité totale déposée sur 1 m² (Real et Roussel-Debet, 1995). Il s'exprime donc par un rapport d'activité sans dimension :

$$RCs = \frac{\text{Dépôt sur la plante (Bq.m}^{-2}\text{)}}{\text{Dépôt total (Bq.m}^{-2}\text{)}}$$

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...).

2.3.3.1. Expression de la captation selon la biomasse aérienne

La formule proposée par Chamberlain (1970), pour l'herbe de pâture a été très largement reprise. Elle établit une corrélation entre le rapport de captation et le rendement de biomasse aérienne, ce qui fait du rapport de captation une fonction du temps.

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

μ : coefficient de captation (m².kg⁻¹ sec ou frais)

B : biomasse aérienne (kg sec ou frais.m⁻²)

Remarque : Il importe de bien différencier les termes de biomasse aérienne à la récolte et de rendement. En effet, dans le cas du blé, le rendement désignera la masse en grains récoltée par unité de surface, alors que la biomasse aérienne tiendra compte non seulement du grain, mais aussi de l'ensemble du talle. En revanche, dans le cas de l'ensilage de maïs, la valeur de B est égale à celle du rendement.

Dans le but de généraliser l'équation à d'autres cultures, des expérimentations ont été effectuées en France (CEA/ IRSN/ DPEI/ SERE) dans le cadre du programme RESSAC (Maubert et al, 1991).

Les résultats obtenus permettent l'utilisation de la formule de Chamberlain modifiée.

$$RCs = S \cdot (1 - e^{-\mu B})$$

S : Coefficient de saturation (s.d).

C'est la fraction maximale de dépôt capté par une culture donnée quelle que soit sa biomasse, soit S=RCmax. Pour une culture donnée, S dépend de la géométrie du couvert et de la densité de plantation.

La formule de Chamberlain modifiée implique en effet que la valeur de RCs puisse approcher 100% pour de fortes densités de biomasse, ce qui ne s'applique pas à toutes les cultures. Par exemple, on observe un plateau plus bas pour le blé de printemps, dû au fait qu'une partie des aérosols peuvent atteindre le sol via les interstices entre plants (Vandecasteele et al., 2001), ce qui n'est pas le cas pour l'herbe de pâture.

Les travaux du programme RESSAC, qui n'avaient pas fait jusque-là l'objet d'une publication, ont été poursuivis par la suite et axés notamment sur le blé de printemps, ce qui a permis de corriger la valeur de S du blé à 0,85 (Vandecasteele et al., 2001).

Les résultats expérimentaux (Figure 1) obtenus sur le blé de printemps dans le cadre de ces travaux complémentaires montrent une adéquation satisfaisante avec l'équation précédente.

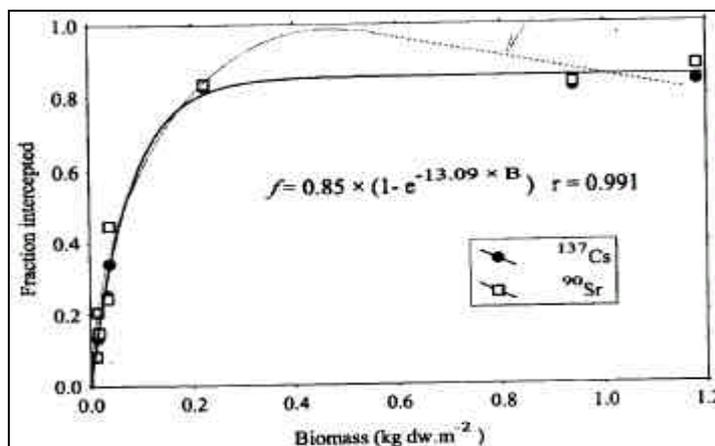


Figure 1 : Relation entre le rapport de captation et la biomasse sèche par m² du blé de printemps

Source : (Vandecasteele et al., 2001)

Ce modèle a été largement validé pour l'herbe de pâture et les légumes-feuilles. Cependant, pour les céréales, en particulier pendant leur phase reproductive, il est plus approprié de relier le rapport de captation par temps sec avec l'indice foliaire (Vandecasteele et al., 2001), qui est une meilleure estimation de la propension des plantes à intercepter les aérosols.

On définit l'indice de surface foliaire comme la surface susceptible de capter les aérosols. On considèrera donc qu'il s'agit de la surface des feuilles, cumulée entre les étages de végétation, par unité de surface du sol (m² feuilles.m⁻² sol), indépendamment de leur activité photosynthétique. On se démarque donc de la définition agronomique de l'indice foliaire, qui considère uniquement la surface des feuilles vertes.

Par ailleurs, l'indice foliaire est une variable largement étudiée et renseignée dans le milieu agronomique, alors qu'il est plus difficile de se procurer des données sur l'évolution de la biomasse aérienne. De plus, il y a eu peu d'expériences menées dans le but d'évaluer les coefficients de captation μ propres à chaque culture.

2.3.3.2. Expression de la captation selon l'indice foliaire

ECOSYS-87 est un modèle conçu par une équipe allemande (Müller et Pröhl, 1993), qui a été testé suite à l'accident de Tchernobyl dans le cadre de programmes internationaux. Des études de comparaison entre leurs prédictions et des mesures effectuées dans différents sites européens ont donné des résultats satisfaisants (Renaud et Maubert, 1994). Ce modèle propose un mode de calcul du dépôt sur la plante et du dépôt total, dont le rapport équivaut à la captation.

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, soit :

$$A_{di} = V_{gi} \cdot C_a$$

A_{di} : dépôt sec sur la plante de type i ($Bq \cdot m^{-2}$)

V_{gi} : vitesse de déposition sur la plante de type i ($m \cdot s^{-1}$)

C_a : concentration dans l'air de l'activité intégrée dans le temps ($Bq \cdot s \cdot m^{-3}$)

Les auteurs postulent que la vitesse de dépôt sur la plante dépend du stade de développement du couvert, ce qui induit une saisonnalité prononcée de ce paramètre. ECOSYS-87 fait le choix de l'indice foliaire comme variable caractérisant le stade de la plante. Il est donc admis dans ECOSYS-87 que la vitesse de dépôt est proportionnelle à l'indice foliaire :

$$V_{gi} = V_{gi \max} \cdot \frac{LAI_i}{LAI_{i \max}}$$

$V_{gi \max}$: Vitesse de dépôt maximale sur la plante i ($m \cdot s^{-1}$), atteinte quand $LAI=LAI_{\max}$.

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

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

On exprime de la même façon le dépôt total :

$$A_{dt} = (V_{gs} + V_{gi}) \cdot C_a$$

$A_{dt} = (V_{gs} + V_{gi}) \cdot C_a$

A_{dt} : Dépôt total ($Bq \cdot m^{-2}$)

V_{gs} : Vitesse de dépôt sur le sol ($m \cdot s^{-1}$), constante pour tout type de plante

D'après l'équation précédente on obtient :

$$RCs = \frac{A_{di}}{A_{dt}} = \frac{LAI/LAI_{\max}}{LAI/LAI_{\max} + V_{gs}/V_{gi \max}}$$

De la valeur de LAI_{\max} de la plante dépend celle de $V_{gi \max}$, et donc la valeur de RC_{\max} .

Cette fonction est linéaire pour de faibles valeurs d'indice foliaire, puis RCs atteint un palier, ce qui s'explique physiologiquement par la compétition intra-plante (mise en place de plusieurs étages de végétation) et inter-plante (recouvrement).

La figure 2 permet de valider cette approche, puisque les résultats du modèle ECOSYS-87 y sont comparés de façon satisfaisante à des résultats expérimentaux obtenus sur lysimètres.

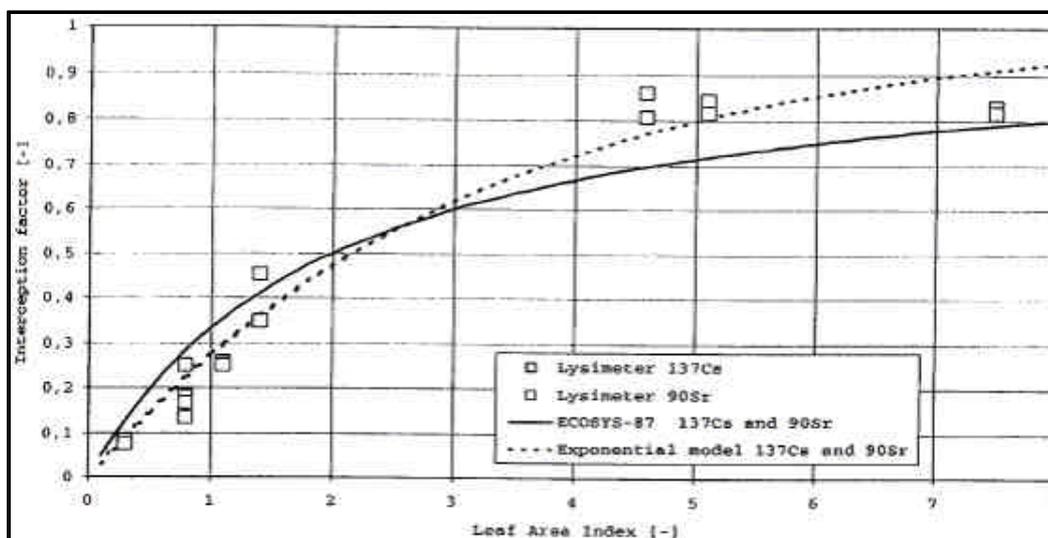


Figure 2 : Rapport de captation sèche par la culture de blé en place en fonction de son indice de surface foliaire ($m^2.m^{-2}$) et comparaison entre les rapports de captation observés sur lysimètres, le modèle d'interception proposé dans ECOSYS- 87 et un modèle de type exponentiel.

Source : (Gonze, 2000)

2.3.3.3. Limites de la méthode choisie

Tout au long de l'étude, on considère donc que l'indice foliaire représente la surface captante de la pollution radioactive. Or, la surface captante dépend du type de flux de dépôt. Un dépôt résulte de la somme de ces différents flux qui agissent en parallèle, mais chacun sur un type de surface captante précis. Ces différents processus sont les suivants (Petroff, 2002) :

- La sédimentation, lors de laquelle les particules sont soumises à leur propre poids et suivent une trajectoire de chute libre. Dans ce cas on ne devrait considérer comme surface captante que la surface projetée et non étagée des feuilles (soit le taux de couverture).
- La dispersion turbulente : Toute particule est soumise à un flux de dispersion turbulente dû aux fluctuations de vitesses de l'écoulement.
- La diffusion brownienne, obéissant au même principe que la diffusion moléculaire.
- L'impaction : Une particule transportée par le vent s'approche d'un obstacle immergé dans l'écoulement (comme une feuille) et entre en contact avec l'obstacle. Alors on prend en compte l'indice foliaire double face (le vent permet des contacts tant sur une face que sur l'autre).
- L'interception : Une particule est interceptée par les petits cils présents sur la surface foliaire. On considère alors l'indice foliaire « étagé », dans l'acception agronomique du terme.

Une estimation rigoureuse de la captation devrait donc prendre en compte cette diversité de surfaces captantes afin de représenter les différents types de dépôt.

Par ailleurs, il est un aspect de la captation que l'indice foliaire ne peut représenter. En effet, à LAI égal, le rapport de captation sec dépend de la morphologie des feuilles. C'est ce que révèlent les résultats du programme RADEMIC 2000-2003 (Madoz-Escande et Santucci, 2004). Ce programme expérimental a été mené par l'IRSN, de 2000 à 2003. Il a été axé sur l'étude de la contamination foliaire des végétaux par des aérosols radioactifs. Ainsi, pour un LAI de 5, les résultats de captation affichent-ils un RCs de 0,5 pour le blé et de 0,8 pour le haricot.

Cette nuance n'est pas prise en compte dans le calcul qui a été adopté pour le RCs.

2.3.4. Le rapport de captation par temps humide : RCh

Dans le cas d'un dépôt humide, il a été montré (Angeletti et Levi, 1977 ; Hoffman, 1989) que l'interception est essentiellement corrélée à la biomasse et à la hauteur d'eau contaminée précipitée.

On utilisera l'équation suivante :

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

S₂ : coefficient de saturation (mm), qui dépend du radionucléide et du végétal

P : quantité d'eau (mm)

L'intensité de captation 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.

2.3.5. La date de récolte : DatR

2.3.5.1. Utilité dans ASTRAL

Pour les grandes cultures et les surfaces toujours en herbe et pâturées, la date de récolte correspond à la date d'étude du niveau de contamination. Dans ASTRAL, elle est tabulée à raison d'une date de récolte par classe de produits agricoles.

D'autre part, c'est à partir de ce paramètre, et de la date de dépôt rentrée par l'utilisateur, qu'est calculé un délai dépôt-récolte. Les paramètres étant exprimés en fonction du délai dépôt-récolte, le code de calcul associé à un délai donné une valeur unique de chaque paramètre.

2.3.5.2. Variabilité agronomique

La date de récolte dépend de quatre facteurs :

- La date de semis : Elle est étroitement corrélée au choix variétal et aux conditions climatiques de la région de production (Annexe 1). Ainsi, l'alternativité d'une variété détermine une plage optimale de dates de semis. D'autre part, on sème plus tôt dans

des régions aux températures plus froides afin d'atteindre la somme de températures nécessaire à la récolte. La pluviométrie d'automne et le précédent cultural (ex : pomme de terre de féculerie, récoltée tardivement) peuvent également retarder le semis, pour des raisons techniques (possibilité de labour, calendrier cultural). Un semis tardif entraîne une récolte différée par rapport aux prévisions.

- La variété : Dans les régions où la température excède 25°C en juin-juillet, on choisit une variété précoce, c'est-à-dire qui atteint un stade donné plus rapidement qu'une autre, pour éviter le risque d'échaudage (Annexe 1). Ainsi, le remplissage du grain se fera avant le coup de chaleur. Or la précocité d'une variété détermine la durée de son cycle végétatif, donc la date de récolte.

- Le climat : Un climat froid exige une durée d'occupation du sol par la culture plus long afin que les besoins en sommes de température soient satisfaits. D'autre part, la pluviométrie peut, pour des raisons pratiques, retarder la récolte (terrain trop humide pour le passage du tracteur).

- Les contraintes de l'agriculteur : L'agriculteur peut repousser ou avancer la date de récolte d'une culture en fonction de la disponibilité du matériel ou de la culture prévue dans la rotation culturale.

2.3.6. Le facteur de translocation : TLF

La translocation est le processus biochimique de transport et de redistribution du radiopolluant déposé sur les parties aériennes vers des organes non initialement contaminés directement (parties souterraines, fruits non formés au moment du dépôt etc.), en particulier les organes comestibles (Madoz Escande et Henner, 2003).

Dans la classe ASTRAL étudiée ici, « Céréales Homme Hiver », l'organe consommé par l'homme est le grain.

Notons cependant que la partie végétative du blé peut aussi constituer un fourrage destiné à l'alimentation animale. Cet aspect n'a pas été examiné dans l'étude. Il faudrait alors considérer que la radioactivité captée par le feuillage est intégralement ingérée par l'animal. La translocation n'intervenant pas dans le calcul de FTds, elle serait toujours égale à 1.

2.3.6.1. Mode de calcul de l'ICRU

L'ICRU (International Commission Radiation Units and Measurements) mentionne deux méthodes pour calculer cette variable (ICRU, 2002). Le texte faisant référence au facteur de translocation a été intégralement reproduit ci-dessous :

Definition	The translocation ratio, f_{tr} , is the mass activity density (A_m in $Bq\ kg^{-1}$) in one tissue, typically an edible tissue, divided by the mass activity density (A_m in $Bq\ kg^{-1}$) in another tissue of the same plant or crop. It also can be calculated as the mass activity density in the edible tissue ($Bq\ kg^{-1}$) divided by the activity contained on the mass of foliage covering a square metre of land surface ($Bq\ m^{-2}$).
Units	dimensionless, $m^2\ kg^{-1}$
Comments	This quantity is often used to estimate the activity density in an unmeasured tissue from another tissue in the same plant which has been measured. The quantity may be used for fruits, seeds, specific edible vegetables or the bole of trees. It varies with radionuclide and chemical form, time, species, growth stage, nutrition status, etc.

Le mode de calcul proposé par l'ICRU peut donc se traduire par les équations suivantes :

$$TLF (sd) = \frac{\text{Activité massique mesurée dans un organe comestible (Bq.kg}^{-1}\text{)}}{\text{Activité massique dans un autre tissu de la plante (Bq.kg}^{-1}\text{)}}$$

$$TLF (m^2.kg^{-1}) = \frac{\text{Activité massique mesurée dans un organe comestible (Bq.kg}^{-1}\text{)}}{\text{Activité contenue dans un couvert végétal sur une surface d'1 m}^2}$$

Ces définitions sont néanmoins ambiguës puisqu'elles ne spécifient pas le moment des mesures d'activité (date de récolte ou date du dépôt).

2.3.6.2. Mode de calcul de l'IAEA

L'IAEA (International Atomic Energy Agency) recommande le protocole suivant lors des expériences destinées à évaluer le facteur de translocation : on vaporise une solution de radionucléides sur les plantes à différents stades de leur développement. L'un des blocs est récolté immédiatement, une fois la plante sèche, et l'activité de la plante entière est mesurée afin de déterminer la captation initiale. Dans des blocs parallèles, les plantes sont récoltées à maturité et l'activité de la partie comestible mesurée (IAEA, 1994). Le calcul de la valeur de translocation se fait selon l'équation :

$$TLF (sd) = \frac{\text{Activité dans un organe comestible sur 1 m}^2 \text{ de couvert à la récolte (Bq.m}^{-2}\text{)}}{\text{Activité retenue sur 1 m}^2 \text{ de couvert végétal au moment du dépôt (Bq.m}^{-2}\text{)}}$$

D'après (Voigt et al., 1989), la variabilité des résultats d'expérience est moindre si la translocation est pondérée par le rendement (en kg). Les valeurs de translocation du rapport de l'IAEA représentent donc $TLF/Rdt (m^2.kg^{-1})$, Rdt étant le rendement.

2.3.6.3. Les valeurs de translocation du modèle ECOSYS

L'équation à l'origine des valeurs tabulées dans ECOSYS-87 n'est pas citée dans (Müller et Pröhl, 1993), mais celles-ci sont exprimées sans dimension.

Les éléments ont été classés selon leur mobilité. Ainsi le césium (Cs), l'iode (I), le manganèse (Mn) et le tellure (Te) sont-ils classés parmi les éléments mobiles, et on leur affecte les mêmes valeurs de translocation, alors que le strontium (Sr), le baryum (Ba), le zirconium (Zr), le niobium (Nb), le ruthénium (Ru), le cérium (Ce) et le plutonium (Pu) sont considérés comme des éléments immobiles, c'est-à-dire que seul le dépôt direct sur les parties comestibles importe. L'intensité de la translocation dépend en effet beaucoup du type de radionucléide. Ainsi le césium est-il un analogue du potassium, élément nutritif des végétaux, ce qui explique sa mobilité au sein de la plante.

2.3.6.4. Effet de la diversité des modes de calculs sur la valeur de TLF

On a comparé dans le tableau 2 les valeurs de TLF du blé d'hiver tirées du rapport de l'IAEA, d'ECOSYS et du programme RADEMIC dans le cas de la translocation du césium (Madoz-Escande et Santucci, 2004).

	Nombre de jours avant récolte	$\frac{TLF_{RADEMIC}}{Rdt_{RADEMIC}}$	$\frac{TLF}{Rdt}$ (IAEA)	$\frac{TLF_{ECOSYS}}{Rdt_{AGRESTE}}$
Blé d'hiver	0	-	-	0,15
	10	-	0,05	0,17
	20	-	0,2	0,18
	30	-	0,15	0,2
	40	-	0,2	0,2
	60	0,2	0,1	0,18
	90	0,1	0,02	0,01

Tableau 2 : Comparaison des valeurs de TLF/Rdt tirées de la bibliographie pour le blé

Entre les valeurs d'ECOSYS et celles préconisées par l'IAEA, on relève un facteur 2 (à 90 jours avant récolte) et un facteur 3 (à 10 jours avant récolte).

Les différences entre les valeurs adoptées par l'IAEA et par ECOSYS et celles du programme RADEMIC semblent plus marquées à 90 jours avant récolte (facteur 5 à 10 d'écart).

La translocation est un facteur très sensible dans le calcul de la contamination, et dont la valeur est tributaire d'une grande part d'incertitude. Cela tient notamment à la difficulté d'accéder à des valeurs expérimentales de TLF, ce qui est un processus de longue haleine. D'autre part, la façon même dont le TLF est calculé et exprimé (moment de la mesure, pondération par le rendement ou non, expression en fonction du délai dépôt-récolte ou du stade..) varie au sein de la communauté scientifique et rend la comparaison des sources souvent délicate.

Enfin, ce facteur recouvre non seulement le transport du radionucléide jusqu'à l'organe consommé via la sève élaborée, mais aussi le lessivage des feuilles par la pluie, la dilution du contaminant du fait de la croissance du végétal, et également la remise en suspension. La prise en compte de ces facteurs dans le processus expérimental est donc une autre source de variabilité des résultats et de difficulté de leur comparaison.

2.3.6.5. Variabilité du facteur de translocation en fonction du délai floraison-récolte

Le stade végétatif au moment du dépôt influence fortement l'intensité de la translocation. L'absorption est plus importante lorsque la plante a besoin d'éléments majeurs ou d'oligo-éléments. C'est notamment le cas lorsqu'elle développe le fruit ou le tubercule (IRSN, 2001).

Dans le cas du blé, la translocation correspond ainsi à un phénomène physiologique précis : la formation du grain, ce qui coïncide avec la date de floraison.

Les valeurs de TLF d'ECOSYS sont représentées sur la figure 3.

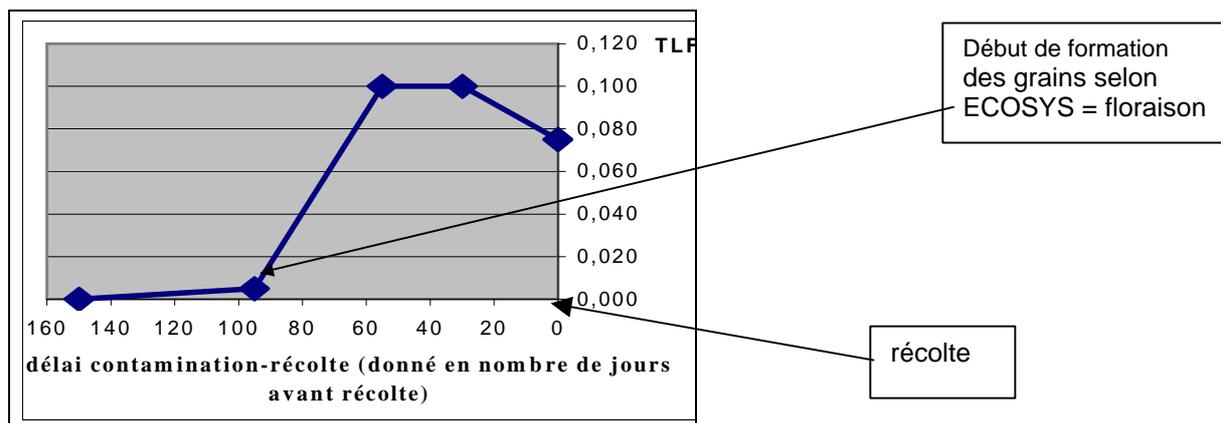


Figure 3 : Allure de TLF pour le blé d'hiver en fonction du délai contamination-récolte

D'après la courbe, la phase de croissance linéaire de TLF commence environ 3 mois avant la récolte ; TLF atteint son maximum environ 2 mois avant la récolte.

On admet que la courbe ne peut se déformer en Y, c'est-à-dire que l'intensité de translocation ne dépend ni du site de production, ni des pratiques culturales. En effet, le taux d'allocation des assimilats vers les grains dépend surtout du rapport sources/puits. Or la force des puits par rapport aux sources au cours du cycle est une donnée physiologique.

En revanche, une variabilité dans la durée floraison-récolte induirait une déformation de la courbe selon l'axe des abscisses.

3. PRESENTATION DU MODELE STICS

3.1. Hypothèses de travail

3.1.1. Hypothèse sur l'indice de surface foliaire

On cherche à obtenir des parcours d'indice foliaire intégrant le climat et les pratiques culturales menées sur le blé d'hiver. La figure 4 révèle en effet une forte incidence de ces deux facteurs sur l'allure des courbes d'indice foliaire.

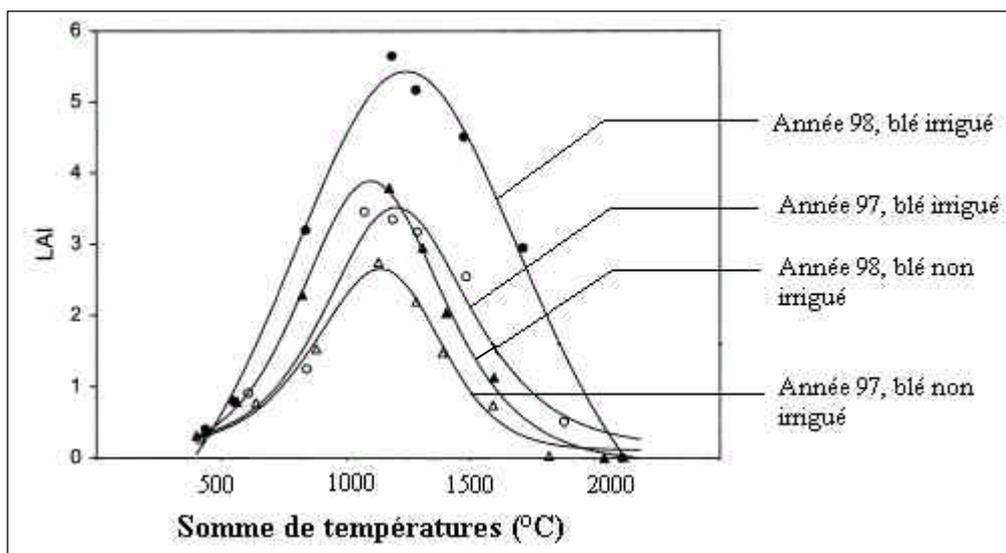


Figure 4 : Variabilité des parcours d'indice foliaire en fonction du climat et des pratiques.

Source : (Royo et al., 2004)

On suppose que la valeur d'indice foliaire du blé d'hiver diffère selon les régions à une date donnée. Si c'est le cas, il en sera de même pour les valeurs de captation par temps sec et humide.

3.1.2. Hypothèse sur la date de récolte

La date de récolte sert à calculer un délai dépôt-récolte dans ASTRAL. En cas de décalage entre les dates de récolte selon les sites de production, les valeurs extraites des tables de paramètres par le code de calcul seraient différentes pour une même date de dépôt.

Un tableau de dates de récolte régionalisées permettrait de simuler le décalage des cycles et d'intégrer l'effet du site dans l'estimation de la contamination.

3.1.3. Hypothèse sur la date de floraison et le délai floraison-récolte

Le décalage des dates de floraison sera également étudié à l'aide de STICS. En effet, on a vu précédemment que le grain de blé ne peut être contaminé avant la date de floraison.

On étudiera également la variabilité du délai floraison-récolte, qui conditionne l'allure de la courbe TLF = f (délai dépôt-récolte).

Afin de tester ces hypothèses, on a eu recours à la modélisation des cultures. On a utilisé le logiciel STICS (Simulateur multIdisciplinaire pour des Cultures Standard), développé par l'INRA d'Avignon (Brisson et al., 2002).

3.2. Présentation du modèle STICS

3.2.1. Potentialités et organisation

STICS est un modèle dynamique, à pas de temps journalier, qui simule le comportement du système sol-culture au cours d'une année.

La limite supérieure du système est l'atmosphère caractérisée par les variables climatiques standard (rayonnement, températures minimale et maximale, pluie, évapotranspiration de référence ou éventuellement vent et humidité) et la limite inférieure correspond à l'interface sol/sous-sol.

La culture est appréhendée globalement par sa biomasse aérienne et sa teneur en azote, son indice foliaire ainsi que le nombre, la biomasse et la 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.

Le modèle est organisé en huit modules (Figure 5), chaque module faisant 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.

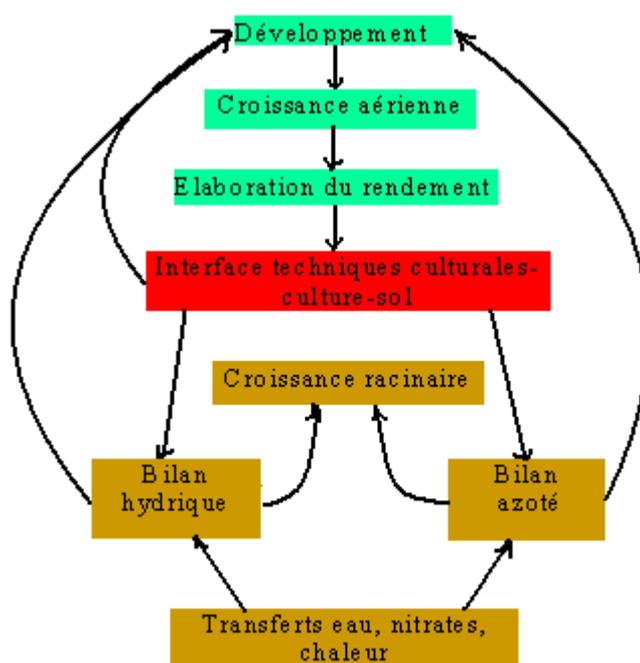


Figure 5 : Organisation et interactions des modules de STICS

Les stades simulés dans STICS diffèrent des stades agronomiques classiques, comme dans la plupart des modèles. 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 utilisés pour simuler le LAI et le remplissage du grain.

Ces deux échelles phénologiques sont indépendantes l'une de l'autre : par exemple, le début de remplissage du grain peut survenir avant ou après le stade LAI maximal.

3.2.2. La croissance 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 sol.

Le modèle propose plusieurs options pour calculer cette variable de sortie, désignée par « LAI(n) ». L'option standard, ou option « LAI-net direct » simule directement le LAI comme le bilan net entre la croissance et la sénescence des feuilles. Dans le cadre de cette option, la sénescence naturelle est implicite. Elle est simulée de façon simple en utilisant deux stades phénologiques spécifiques : entre les stades indice foliaire maximal et début de sénescence, l'indice foliaire est constant. Du début de sénescence, qui est une date calculée par le modèle, au stade « LAI nul », l'indice foliaire décroît linéairement en fonction du temps physiologique. Le stress hydrique peut entraîner une sénescence et une maturité précoces.

Une autre option de calcul de la variable de sortie LAI(n) prend en compte la sénescence de façon explicite. Alors $LAI(n) = LAI_{brut} - \text{sénescence}$. La sénescence est calculée explicitement en utilisant le concept de durée de vie naturelle des feuilles, qui peut être raccourcie en cas de stress hydrique ou azoté, voire augmentée en cas de surfertilisation azotée.

C'est l'option LAInet qui sera choisie dans toutes les simulations ultérieures. En effet, l'option LAIbrut fait intervenir de nombreux paramètres en rapport avec la durée de vie, qui n'apportent pas de gain d'information justifiant leur emploi dans le cadre de cette étude.

Pour tout type de plante, la croissance foliaire est calculée de la façon suivante :

- calcul de l'indice de croissance foliaire net ($m^2 / \text{plante} / \text{degré-jours}$), d'après les stades phénologiques uniquement ; cet indice décrit une courbe sigmoïde en fonction d'unités-développement, 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 (caractéristique de la variété) ;
- enfin par les indices de stress azoté et hydrique.

Ce qui se traduit par l'équation suivante :

$$DELTAI = \frac{DLAIMAX * (Tcult - Tbase) * EFDENSITE * DENSITE * EXOLAI * \min(TURFAC, INNS)}{1 + \exp(PENTLAIMAX * (VLAIMAX - ULAI))}$$

DELTAI : Indice de croissance foliaire (m^2 feuille /plante /degré-jours) ou accroissement journalier de l'indice foliaire vert.

DLAIMAX : Vitesse maximale de production de surface foliaire nette (m^2 feuille/plante/degré-jour)

Tcult : Température de la culture (en °C, calculé d'après la température de l'air)

Tbase : Température de base du couvert (seuil de l'efficacité de la température dans le développement)

EFDENSITE : Effet de la densité sur le développement (s.d, entre 0 et 1)

DENSITE : Densité de semis ($plantes.m^{-2}$)

EXOLAI : Effet d'un excès d'eau sur le développement (s.d, entre 0 et 1)

TURFAC : Indice de stress hydrique (s.d, entre 0 et 1)

INNS : Indice de stress azoté (s.d, entre 0 et 1)

PENTLAIMAX : Paramètre de la logistique du LAI (propre au type de culture)

VLAIMAX : Valeur de ULAI au point d'inflexion de la fonction $DELTA I=f(ULAI)$

ULAI : Unité de développement foliaire (entre 1 et 3)

Un exemple est donné du parcours de croissance foliaire du maïs (Figure 6) :

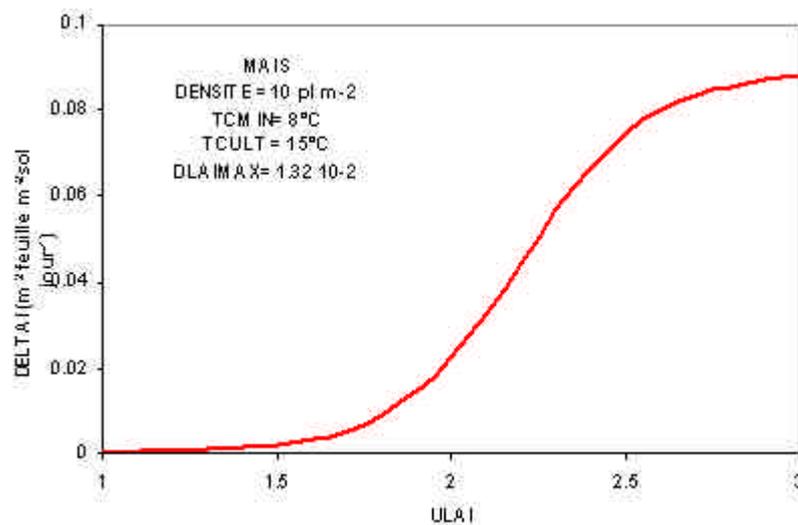


Figure 6 : Modélisation selon STICS de la croissance foliaire du maïs

Source : (Brisson et al., 2002)

3.2.3. La sénescence foliaire

La variable LAI(n) dans le cadre de l'option LAI-net représente donc l'indice foliaire du couvert en croissance retranché de celui des feuilles sénescentes. Cette modélisation entraîne la nullité du LAI de la culture au moment de la récolte, car alors toutes les feuilles sont sénescentes. Or la captation ne saurait être nulle à la récolte, puisque la captation ne dépend que de la surface physique déployée par le couvert et ne tient pas compte des fonctions physiologiques ou photosynthétiques des feuilles. On considèrera donc le LAI dit « total », en additionnant les valeurs de la sortie « LAI(n) », qui représente le LAI des feuilles vertes, et celles de la sortie « LAI-sen », c'est-à-dire le LAI des feuilles jaunes.

3.3. Description des simulations réalisées

3.3.1. Choix de la culture-test : le blé d'hiver

Le blé d'hiver a été choisi comme culture-test pour les grandes cultures, du fait de la diversité des climats et des pratiques auxquelles est soumise cette culture. Par ailleurs, on dispose d'une documentation abondante sur la physiologie de cette culture (Annexe 1), nécessaire pour faire des choix pertinents de simulation et interpréter les sorties du modèle. Pour chaque site, la même simulation a été effectuée sur deux variétés distinctes, Talent (variété précoce) et Allure (variété tardive). Les caractéristiques de ces variétés et leur importance dans le contexte de la régionalisation sont données en annexe 1, ainsi qu'une synthèse des besoins en sommes de températures par stade phénologique.

3.3.2. Choix des sites-test

Dans un premier temps, les simulations effectuées sur le modèle STICS portent sur deux jeux de données climatiques. En effet, on cherche en premier lieu à estimer le gain d'information apporté par cet outil. On choisit deux départements aux climats et aux pratiques différents (ITCF, 1996), où le blé d'hiver est cultivé sur des surfaces équivalentes. La base de données Agreste (CD-Rom Agreste, 2001) indique une surface cultivée en blé d'hiver de 63 200 ha en Moselle contre 34 500 en Haute-Garonne. Par ailleurs, les pratiques diffèrent sensiblement. D'après les données Agreste, le blé d'hiver est irrigué en Haute-Garonne, au contraire de la Moselle. Enfin, il est semé très précocément et récolté très tardivement en Moselle, alors qu'on sème très tardivement et récolte très précocément en Haute-Garonne.

3.4. Données nécessaires au modèle STICS

Une fois le logiciel téléchargé à partir du site Internet de l'INRA d'Avignon, l'utilisateur a accès à des fichiers-plantes et à des fichiers de techniques qui récapitulent, pour chaque espèce disponible sous STICS, les paramètres physiologiques ou témoignant de pratiques culturelles reflétant des cas-type. Ces fichiers proposent donc une base de paramètres indispensable pour faire tourner le modèle, mais l'utilisateur peut modifier certaines de ces valeurs par défaut afin de tester différents scénarii.

3.4.1. Fichiers pédologiques

Le fichier intitulé "param.sol" disponible sous STICS contient le descriptif de nombreux sols-type. Ex: "sol-blé", "sol-maïs", "sol Limon-Paris"... Il importe de modifier ces paramètres par défaut pour représenter le sol des régions choisies.

Parmi les paramètres du fichier "param.sol", on a distingué ceux dont la valeur peut influencer sur celle du LAI, afin de cibler la recherche bibliographique (Tableau 3).

Nom du paramètre	Signification	Influence du paramètre sur la valeur du LAI	Valeur rentrée pour la simulation		Source
			Haute-Garonne	Moselle	
argi	Teneur en argile de la couche de surface(%)	Calcul du bilan hydrique (stress hydrique éventuel retardant le développement)	23 %	35,5 %	Base de données de l'AFES (Site Internet de l'INRA d'Orléans)
pH	Potentiel Hydrogène (caractère acide ou basique du sol)	Bilan azoté : calcul de la volatilisation de l'azote sous forme d'ammoniac	6,9	7	Base de données de l'AFES (Site INRA d'Orléans)
albedo	Albédo du sol nu sec (sd)	Module de rayonnement	0,18	0,18	Valeurs déduites de la texture des sols selon la norme GEPPA (Base de l'AFES) et des fonctions de pédotransfert (Jamagne <i>et al.</i> , 1977)
qo	Paramètre d'évaporation en sol nu (mm)	Bilan hydrique	9	12	
HCCF	Humidité à la capacité au champ de chaque horizon (terre fine)	Bilan hydrique	27,1	32,4	
HMINF	Humidité au point de flétrissement permanent de chaque horizon (terre fine)	Bilan hydrique	12,8	19,3	

Tableau 3 : Descriptif des paramètres pédologiques modifiés en vue des simulations STICS

Les paramètres d'intérêt ont été renseignés d'après les sources suivantes :

- Le site Internet de l'INRA d'Orléans héberge une base de donnée construite à la demande du Ministère de l'Agriculture sous l'égide de l'Association Française pour l'Etude des Sols, dans le cadre d'un partenariat entre l'ISA de Lille et le laboratoire de Science du Sol ENSA-INRA de Rennes. A l'échelle nationale, une base de données cantonale a été construite par traitement statistique des résultats analytiques portant sur 297 000 échantillons d'horizons de surface de sols cultivés, prélevés en France entre 1990 et 1994. Le téléchargement de cette base donne accès aux données suivantes, par canton : teneur en argile, en sables, en limons, en calcaire total, pH, texture selon la norme du G.E.P.P.A. Les cantons d'un même département ont été sélectionnés (Moselle, puis Haute-Garonne) afin de moyenniser les valeurs cantonales en les pondérant selon le nombre d'analyses effectuées.
- Quant aux autres paramètres, on dispose dans les notices du modèle STICS d'un tableau donnant les ordres de grandeur des caractéristiques hydriques des sols et de leur masse volumique selon leur texture, tiré de (Jamagne *et al.*, 1977). La texture selon la norme GEPPA (ex : Argilo-Limoneux, Argilo-Sableux, etc.) permet d'accéder aux valeurs de l'humidité à la capacité au champ, de l'humidité au point de flétrissement permanent, de l'albedo et de qo (paramètre d'évaporation en sol nu).

On a considéré que les autres paramètres pédologiques présents dans la modélisation n'influencent pas notablement sur la valeur calculée du LAI, on a donc conservé systématiquement leur valeur par défaut.

3.4.2. Fichier technique

Dans le fichier technique disponible concernant le blé, dénommé « blé.tec » sous STICS, on n'a modifié que les paramètres cités dans le tableau 4. On sait en effet que la date de semis influe sur les besoins en somme de températures (Annexe 1), et que la pratique de l'irrigation permet d'augmenter l'indice foliaire.

Nom du paramètre	Signification	Valeur rentrée pour les simulations		Source
		Haute-Garonne	Moselle	
jultrav	jour julien de travail du sol	258 ou 15/09	232 ou 20/08	ITCF, 1996
iplt	jour julien de plantation	314 ou 10/11	273 ou 30/09	ITCF, 1996
julapl, dose I	jour julien d'irrigation et quantité apportée	Jour julien	Quantité d'irrigation	0 Superficie irriguée par département (Agreste, 2001). En cas d'irrigation : dates et quantités de STICS.
		495	22,2	
		523	16,4	
		533	20,6	
		541	20,8	
		546	29,2	

Tableau 4 : Descriptif des paramètres techniques modifiés en vue des simulations STICS

L'ITCF (Institut Technique des Céréales et des Fourrages) a réalisé pour le compte de l'IRSN une estimation des dates de semis et de labour du blé d'hiver à l'échelle nationale. On en a déduit les valeurs des paramètres dits « jultrav » et « iplt », soit respectivement le jour julien de travail du sol et le jour julien de semis.

Quant aux valeurs de fertilisation et d'irrigation, on s'en tient aux paramètres par défaut du modèle, sauf pour la Moselle dont les valeurs d'irrigation sont forcées à zéro.

On simule donc une date de semis avancée de 40 jours en Moselle par rapport à celle de la Haute-Garonne. Les températures y étant moindres, cela laisse à la végétation plus de temps pour accumuler la somme de température requise pour arriver au stade de maturité.

3.4.3. Fichiers climatiques

L'utilisateur est amené à rentrer des fichiers climatiques propre au site concerné par la simulation. Les données doivent être journalières et porter sur une année calendaire.

Les 9 colonnes suivantes doivent être renseignées :

- 1-Année
- 2-Jour dans le mois
- 3-Mois

- 4-Jour julien (de 1 à 365)
- 5-Température minimale journalière
- 6-Température maximale journalière
- 7- Rayonnement global
- 8- ETP
- 9- Précipitations

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 trentenaire (1961-1990), et qui constituent des références.

La simulation portant sur une culture d'hiver à cheval sur deux années calendaires successives, on doit rentrer deux fichiers climatiques. Faute de données climatiques portant sur deux années consécutives, on a édité deux fois le même fichier climatique, issu des normales trentenaires de Météo France, en ne modifiant que le chiffre de l'année.

Cette approximation néglige la variabilité inter-annuelle du climat, qui est pourtant une composante importante de la variabilité du LAI (Figure 3). A titre d'exemple, entre les années 1997 et 1998, on relève sur la figure 3 des valeurs de LAImax allant de 3,5 à 5,5 sur le blé irrigué.

3.4.3.1. Températures minimale et maximale journalières

On ne dispose que des valeurs mensuelles sur le CD-ROM de Météo France, mais on postule que la température minimale journalière est identique à la température minimale mensuelle. On effectue la même approximation pour la température maximale journalière.

3.4.3.2. Rayonnement global

Le rayonnement global correspond à l'éclairement énergétique d'une surface horizontale unitaire pendant une période donnée. Une partie de ce rayonnement correspond à la fraction du rayonnement solaire incident qui atteint directement le sol ; c'est le rayonnement direct. L'autre provient de la diffusion du rayonnement solaire incident dans l'atmosphère, c'est le rayonnement diffus. Le rayonnement est mesuré à l'aide d'un pyranomètre, et exprimé en Joules.cm⁻².

La carte (Figure 7) divise la France en zones selon la valeur du rayonnement global journalier moyen. Cette carte est utile à titre indicatif, mais ne permet pas à elle seule de renseigner le fichier climatique, puisqu'elle ne rend pas compte des variations saisonnières du rayonnement. Or cette variation joue un rôle non négligeable dans le développement de la plante.

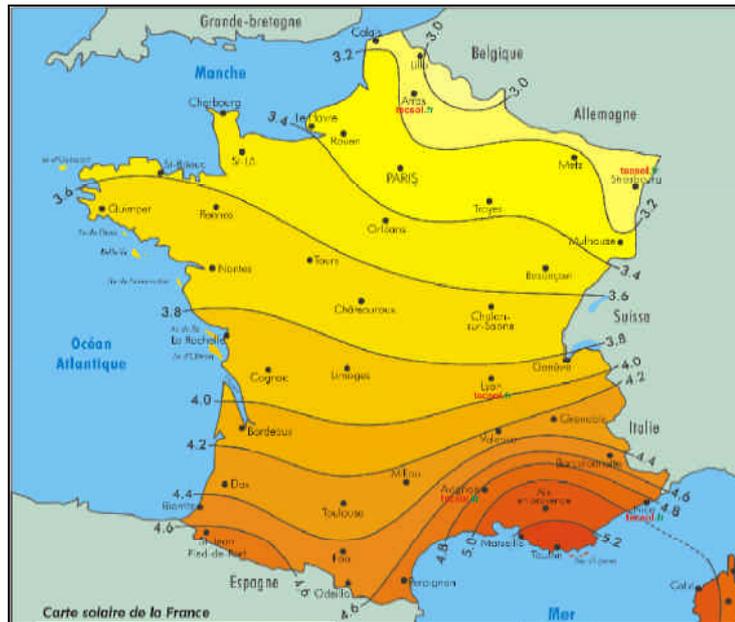


Figure 7 : Moyenne annuelle de l'énergie reçue sur une surface orientée au Sud et inclinée d'un angle égal à la latitude ($\text{kWh.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$).

Source : Site Internet du bureau d'étude TECSOL, le 26/07/2004

On cherche donc à obtenir les valeurs de rayonnement global mensuel, voire journalier si possible, à Metz et Toulouse, considérées comme représentatives de la Moselle et de la Haute-Garonne.

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 le rayonnement s'en trouverait largement sous-estimé.

En revanche, on peut calculer le rayonnement global grâce à la fraction d'insolation et aux valeurs de radiation solaire directe (Figure 8).

$$\text{RG} = \text{Iga} \cdot \left(0,18 + 0,62 \cdot \frac{h}{H} \right)$$

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

Iga : radiation solaire directe en l'absence d'atmosphère ($\text{cal.cm}^{-2}.\text{j}^{-1}$)

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

h : durée d'insolation effective (heure.mois^{-1})

Valeurs d'Iga		
latitude nord	40°	50°
janvier	364	222
février	495	360
mars	673	562
avril	833	764
mai	944	920
juin	985	983
juillet	958	938
août	858	800
septembre	710	607
octobre	536	404
novembre	390	246
décembre	323	180

Figure 8 : Valeurs saisonnières de radiation solaire directe.

Source : Site Internet de l'Université de Picardie Jules Verne, cours de Jacques Beauchamp

Météo France ne donne pas accès directement à la fraction d'insolation mensuelle, mais aux valeurs suivantes :

- a : nombre de jours pour un mois donné où $h/H = 0,2$
- b : nombre de jours où $0,2 < h/H < 0,8$
- g : nombre de jours où $h/H > 0,8$

La fraction d'insolation mensuelle moyenne a été calculée selon l'équation suivante :

$$h / H \text{ moyen mensuel} = \frac{a \cdot 0,2 + b \cdot 0,5 + g \cdot 0,8}{\text{nombre de jours du mois}}$$

La fraction d'insolation journalière a ensuite été considérée comme égale à la valeur mensuelle.

Afin de valider la méthode, on a multiplié la valeur de la radiation solaire directe Iga ($\text{cal.cm}^{-2}.\text{j}^{-1}$) donnée dans la figure 8 par la fraction d'insolation journalière calculée. On obtient les valeurs journalières de rayonnement global. On compare la somme sur l'année des valeurs de rayonnement journalier calculées pour Toulouse, soit $1361 \text{ kWh.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ avec le rayonnement annuel à Toulouse déduit de la carte (Figure 7), soit on obtient le même ordre de grandeur, on conservera donc cette méthode pour l'édition des fichiers climatiques ultérieurs.

3.4.3.3. L'évapotranspiration potentielle (ETP)

L'évapotranspiration potentielle (ETP) 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.

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. Notons que l'ETP moyenne annuelle est essentiellement dépendante de la latitude en France. Elle évolue de 500 mm pour les régions les plus septentrionales à 900 mm dans les régions les plus méridionales (Site Internet de l'ENPC, cours d'Eric Gaume).

On dispose de la carte ci-dessous (Figure 9) qui donne les valeurs spatialisées d'ETP annuelles à l'échelle de la France. On ne saurait pourtant se contenter de ces valeurs moyennées puisque la variabilité saisonnière de l'évapotranspiration est un facteur important du développement végétatif.

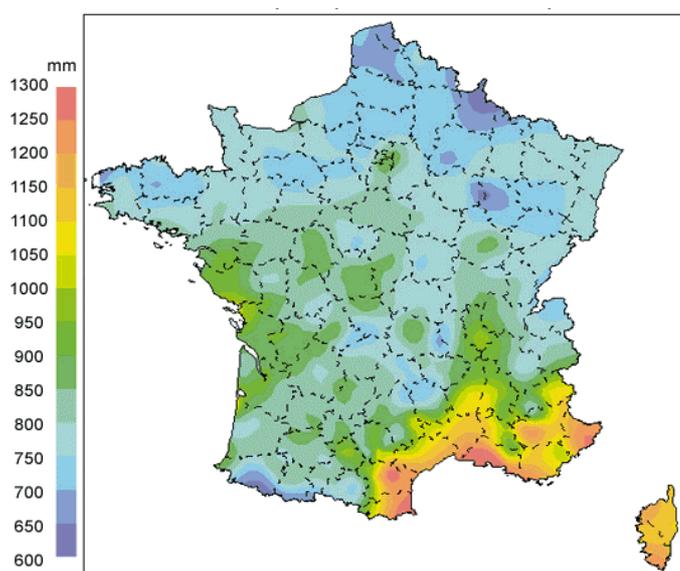


Figure 9 : Evaporation cumulée annuelle, pour l'année 1997.

Source : Site Internet de Météo France

On propose d'utiliser la formule de Turc, trouvée sur le site Internet de l'université de Picardie Jules Verne (cours de Jacques Beauchamp). 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 ».

$$ETP = 0,4 \cdot (RG + 50) \cdot \frac{t}{t + 15}$$

RG : Rayonnement global (cal.cm⁻²)

t : Température moyenne journalière (°C)

Si on compare la somme sur l'année des ETP journalières ainsi calculées, soit 870 mm, avec l'ETP annuelle à Toulouse lue sur la carte, soit 800-850 mm (Figure 9), on obtient le même ordre de grandeur, ce qui valide la méthode.

Remarque : lorsque l'humidité relative de l'air, Hr, est inférieure à 50%, la valeur de l'ETP calculée par la formule de Turc doit être pondérée par un facteur correctif, ce qui n'a pas été fait faute de données d'humidité de l'air. La validité des valeurs non corrigées a cependant pu être vérifiée à posteriori grâce à la fiche climatique de la station de Metz, sur laquelle figurent Hr et ETP. On a pu vérifier que, même sans correction, les résultats estimés par la formule de Turc sont très proches des valeurs d'ETP de Météo France.

Les données climatiques acquises sur les deux sites sont regroupées dans le tableau 5 :

	Tmin journalière (°C)		Tmax journalière (°C)		Rayonnement (kwh.m ⁻² .j ⁻¹)		ETP (mm.j ⁻¹)		Pluies (mm.j ⁻¹)	
	Metz	Toulouse	Metz	Toulouse	Metz	Toulouse	Metz	Toulouse	Metz	Toulouse
Janvier	-1,1	1,8	4	9	3,34	6,4	0,16	0,7	2,12	1,8
Février	-0,5	2,9	6,2	10,8	7,09	9,3	0,46	1,1	1,92	1,8
Mars	1,7	4	9,9	13,4	11,66	13,3	1,22	1,8	2,1	1,9
Avril	4,3	6,5	13,9	16,1	15,85	16,4	2,16	2,5	1,78	2,2
Mai	8	9,6	18,3	20	20,99	19,1	3,45	3,4	2,3	2,4
Juin	11,2	12,8	21,6	23,9	23,19	20,5	4,21	4	2,4	1,9
Juillet	12,9	15,2	23,8	27,4	22,13	21,1	4,26	4,3	2,05	1,4
Août	12,7	15	23,4	26,7	18,67	18,5	3,61	3,8	4,08	1,6
Septembre	9,9	12,7	20,2	24,3	14,01	15,5	2,57	3,1	1,99	1,6
Octobre	6,5	9,5	14,7	19,2	7,33	10,7	1,24	2	2,12	1,7
Novembre	2,4	5	8,3	12,9	4,4	7,1	0,54	1,1	2,22	1,6
Décembre	-0,1	2,5	4,9	9,4	3,13	5,5	0,23	0,7	2,43	1,9

Tableau 5 : Valeurs journalières climatiques prises en compte dans les simulations

4. ETUDE DE RCS

4.1. Résultats des simulations-test

4.1.1. Cycle de développement

Les sorties du modèle STICS sont de deux types. Un premier fichier donne le bilan de la simulation sous forme de deux pages de texte. Les variables de sortie propres à chaque module sont explicites. Les dates d'occurrence des stades physiologiques définis dans le formalisme du modèle et la durée totale du cycle sont synthétisées dans le tableau 6.

	Haute-Garonne		Moselle	
	Talent	Allure	Talent	Allure
Date de semis	10 nov	10 nov	30 sept	30 sept
Date de levée	22 nov	22 nov	9 oct	9 oct
Date où LAI _{max} est atteint	5 mai	27 mai	18 mai	6 juin
Date où LAI=0	18 juil	6 août	11 juil	18 août
Date de floraison	23 mai	13 juin	5 juin	23 juin
Date de maturité physiologique	3 juil	21 juil	16 juil	4 août
Date de récolte (quand teneur en eau du grain < 13%)	22 juil	12 août	4 août	29 août
Durée du cycle	253 jours	274 jours	307 jours	332 jours

Tableau 6 : Dates de réalisation des stades données en sortie par le modèle STICS

Pour une même date de semis, le cycle dure 21 jours de plus pour Allure que pour Talent en Haute-Garonne et 25 jours de plus en Moselle. Ceci s'explique par les différences de précocité liées à la variété. On remarque que les variétés semées 40 jours plus tôt, en Moselle, ont un cycle de développement plus long de 50 jours par rapport à celles de Haute-Garonne. Ces 50 jours ont été nécessaires pour atteindre la somme de températures correspondant au stade récolte, d'où un écart de 10 jours environ à la récolte entre les deux sites. Le choix de la date de semis étant principalement lié au climat, ce facteur sera désigné sous le nom d' « effet climat ». On relève un écart maximal d'environ 1 mois à la récolte en combinant l'effet du climat et de la variété.

4.1.2. Calcul de l'indice foliaire

Un deuxième fichier, dit fichier dynamique, contient les valeurs journalières d'une ou des variable(s) de sortie choisie(s) par l'utilisateur. On a choisi les variables « lai(n) » et « laisen », qui représentent respectivement l'indice foliaire des feuilles vertes et des feuilles sénescentes, et on additionne ces valeurs au pas de temps journalier sous Excel.

On aboutit aux parcours d'indice foliaire propre à chaque couple Variété/Climat (Figure 10).

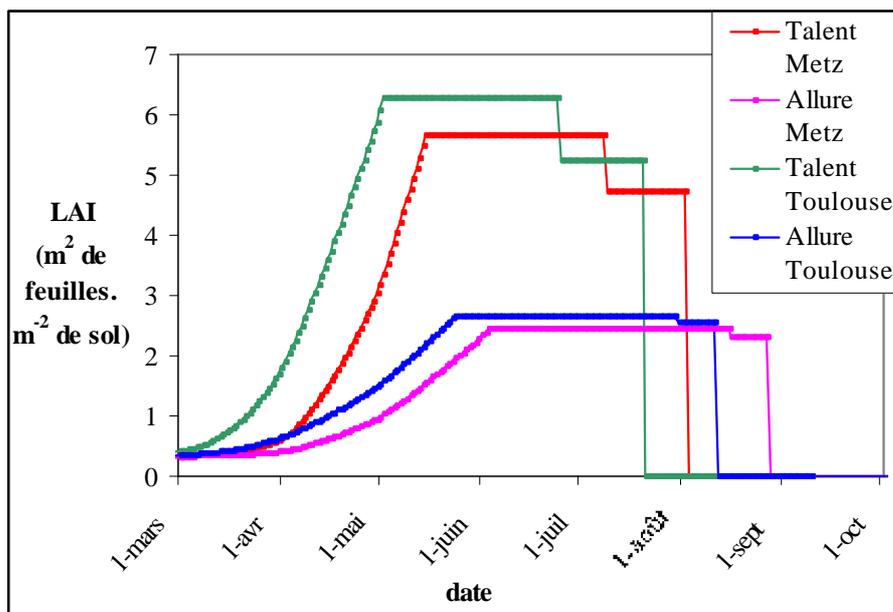


Figure 10 : Parcours d'indice foliaire selon le site et la variété, par date

Les courbes d'évolution de l'indice de surface foliaire confirment les conclusions sur le décalage des cycles tirées du bilan de la simulation. D'une part, le climat induit un décalage des cycles végétatifs d'une dizaine de jours entre les deux sites choisis, quelle que soit la variété. D'autre part, la variété a aussi une incidence sur le développement puisqu'on note un décalage de trois semaines entre les deux variétés, quel que soit le site. La figure 11 (dessin d'après la figure 10) permet de bien visualiser l'effet relatif des deux facteurs sur la valeur du LAI au temps t . Afin de ne pas surcharger le dessin on n'a représenté l'effet variété qu'à Toulouse.

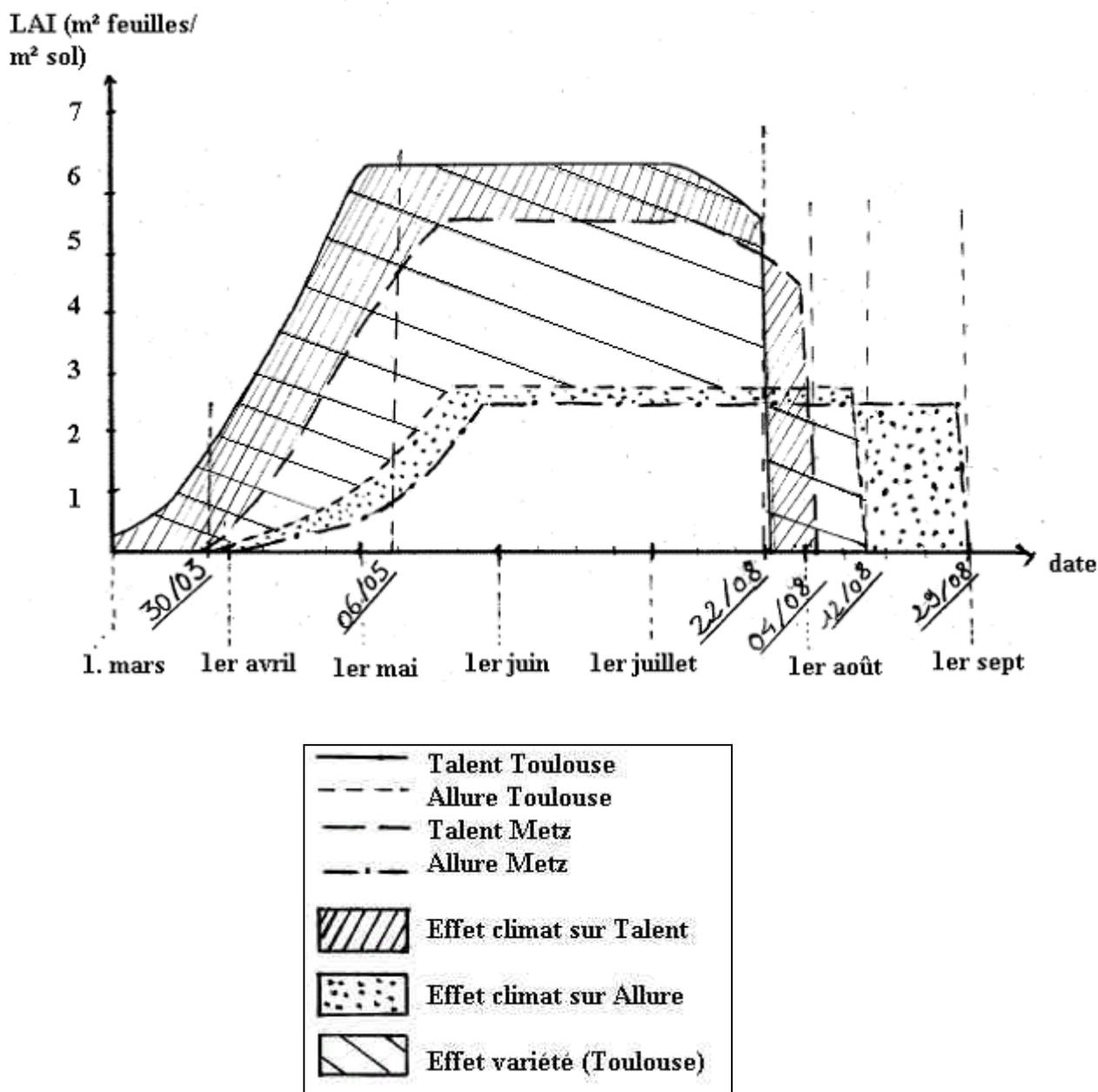


Figure 11 : Effet relatif du climat et de la variété sur la valeur de LAI au temps t

Du 30/03 au 6/05 : Effet conjugué du décalage des cycles dû au climat (Talent : facteur 2 à 3 ; Allure : facteur 1,5) et à la variété (facteur 3 à 4 à Toulouse, 2 à 3 à Metz)

Du 06/05 au 22/08 : Effet variété uniquement (facteur 2)

Du 22/08 au 04/08 : Effet climat sur Talent (valeur 0 ou 4,6)

Du 12/08 au 29/08 : Effet climat sur Allure (valeur 0 ou 2,4)

Du 22/08 au 12/08 : Effet variété à Toulouse (précocité de Talent sur Allure : valeur 0 ou 2,7)

Conclusion : Cette première utilisation de STICS permet de mettre en évidence des écarts dans la valeur d'indice foliaire au temps t du fait d'un décalage des cycles d'un mois au maximum.

4.1.3. Calcul du rapport de captation déduit de l'indice foliaire

4.1.3.1. Méthodologie

On dispose des valeurs d'indice foliaire au pas de temps journalier. On peut donc appliquer la formule déduite des équations d'ECOSYS-87 développée précédemment afin de calculer le rapport de captation sec.

$$RCs = \frac{A_{di}}{A_{dt}} = \frac{LAI/LAI_{max}}{LAI/LAI_{max} + V_{gs} / V_{gimax}}$$

Il est spécifié dans ECOSYS-87 que la valeur de V_{gimax} dépend de LAI_{max} . Mais en l'absence de formule corrélant V_{gimax} et LAI_{max} , on a considéré ce paramètre comme constant pour le blé d'hiver. La valeur utilisée est 2 mm.s^{-1} (Müller & Pröhl, 1993). Cette approximation présente cependant un inconvénient. En effet, d'après l'équation, la captation dépend du rapport entre l'indice foliaire journalier et l'indice foliaire maximal atteint par la culture au cours de son cycle. De ce fait, une fois le LAI journalier égal au LAI_{max} , la valeur de captation maximale est $1 / (1 + (V_{gs} / V_{gimax}))$ et ce, quelle que soit la valeur d'indice foliaire maximale atteinte. En d'autres termes, puisqu'on affecte une valeur constante à V_{gimax} , de la forme même de l'équation résulte une valeur maximale de captation constante pour chaque simulation. Or l'écart constaté entre les valeurs d'indice foliaire, notamment entre variétés, devrait logiquement entraîner un écart entre les valeurs de captation qui en découlent.

4.1.3.2. Résultats

On aboutit aux courbes suivantes (Figures 12 et 13). Le changement d'abscisse de la figure 13 a été obtenu en tenant compte de la date de récolte prévue par STICS pour chaque simulation. On désire en effet aboutir à une tabulation de RCs en fonction du délai dépôt-récolte, afin de pouvoir comparer les valeurs recalculées avec celles d'ASTRAL.

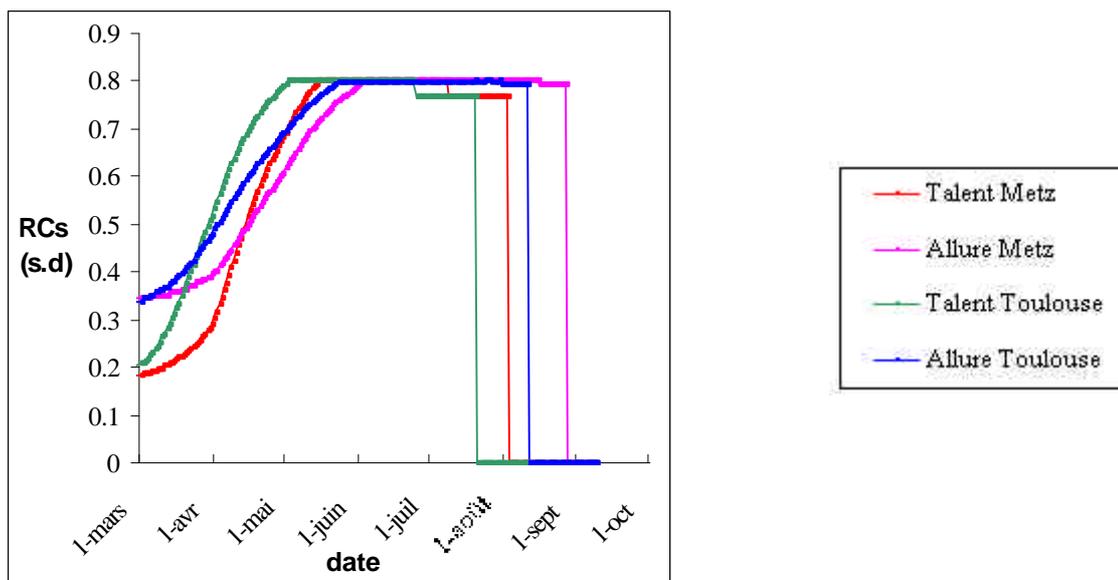


Figure 12 : Rapport de captation sec selon la date

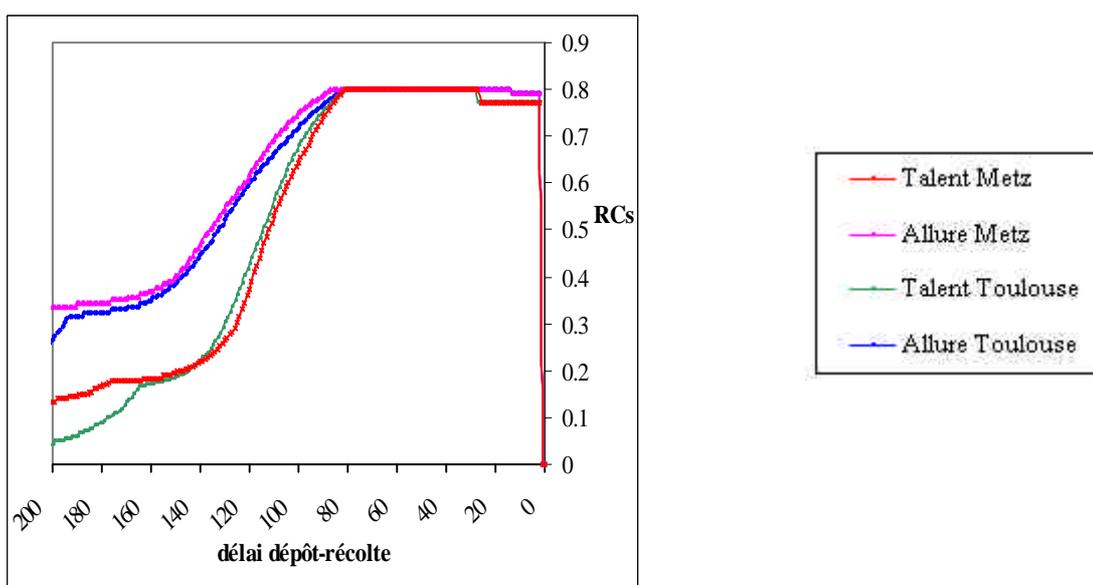


Figure 13 : Rapport de captation sec selon le délai dépôt-récolte

La figure 12 permet de déterminer deux plages de dates où les valeurs de RCs diffèrent.

- De début avril à début mai : facteur 3 entre Talent en Haute Garonne et Allure en Moselle.
- Dès la récolte de la variété la plus précoce (22 juillet) à la récolte de la variété la plus tardive (29 août), puisque celle-ci ne sera plus contaminée alors que les autres seront en phase de captation maximale.

Du 22 juillet au 29 août, la valeur de RCs peut passer de 0 (minimum) à 0,8 (maximum), selon les couples Variété/Climat.

On déduit de la figure 13 que les écarts de valeur de RCs dus à la variété n'apparaissent que pour des délais dépôt-récolte supérieurs à 80 jours et peuvent atteindre un facteur 2.

D'autre part, la figure 13 semble montrer que l'allure générale des courbes de captation, quel que soit le site, est invariable pour une variété donnée. Ce point doit être vérifié sur un plus grand nombre de climats.

On propose de vérifier d'abord que les courbes de LAI selon le délai dépôt-récolte se superposent pour un grand nombre de climats. Si c'est le cas, alors il en est forcément de même pour les courbes de RCs et on pourra donc éditer pour chaque variété une courbe-type de RCs en fonction du délai dépôt-récolte.

4.2. Généralisation des simulations à l'ensemble du climat de la France

4.2.1. Généralités sur les climats de la France

Le climat général de la France est tempéré, c'est-à-dire qu'il est à l'abri des conditions extrêmes. Il reste néanmoins variable car il résulte de l'alternance des influences de l'air froid et de l'air chaud. Les écarts de température sont toutefois modérés en raison de la présence de l'océan Atlantique sur le littoral occidental français. On distingue cinq types de climat en France (Figure 14) :

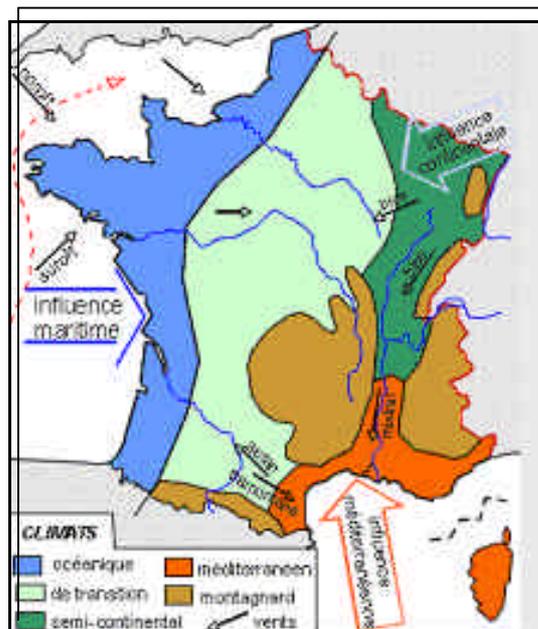


Figure 14 : Carte des climats de la France.

Source : Site Internet de l'association Environnement-Ecoles

- le climat méditerranéen. Il est caractérisé par des étés chauds et secs, des automnes à orages, à averses éparses et brutales, des hivers doux et humides, et l'influence du Mistral.
- le climat océanique. Conféré par l'océan Atlantique, il est caractérisé par des étés relativement frais aux températures stables, et des hivers doux et aux gelées rares.

- le climat océanique dégradé ou climat de transition. Il est appelé ainsi car son influence, bien que prépondérante, est contrastée par une nuance continentale conférée par l'éloignement du littoral. Il est caractérisé par de fréquentes pluies de faible amplitude.
- le climat semi continental. Sous influence océanique, il est caractérisé par des étés chauds et pluvieux, avec souvent des pluies orageuses, et des hivers rigoureux, longs et froids, avec des vents violents.
- le climat montagnard. Il se distingue par des précipitations importantes, de la neige en hiver, et une baisse de la température avec l'altitude.

4.2.2. Echantillonnage des stations climatiques

Le CD-ROM « Le Climat de la France » de Météo France permet de consulter les valeurs climatiques mensuelles de stations météorologiques couvrant le territoire français.

Afin d'effectuer un choix pertinent parmi ces stations, on s'appuie sur la carte des cinq climats majeurs de France. A l'intérieur de chacune de ces zones, on choisit des stations censées refléter leur hétérogénéité climatique en terme de rayonnement reçu, de somme de températures et de précipitations.

Les cartes en annexes 3 à 7 reflètent les gradients de rayonnement, précipitations et températures moyennes (en janvier et en juillet) à l'intérieur des cinq zones climatiques. Les stations ont été positionnées afin de refléter, dans la mesure du possible, l'hétérogénéité d'une zone donnée :

- Zone de climat océanique : Rouen, La Rochelle, Mont-de-Marsan
- Zone de climat océanique dégradé : Reims, Châteauroux, Toulouse.
- Zone de climat montagnard : Clermont-Ferrand, Embrun
- Zone de climat méditerranéen : Nîmes, Perpignan
- Zone de climat continental : Metz, Dijon

On dispose donc de 12 stations climatiques pour étudier la variabilité spatiale du climat, nombre limité compte tenu du temps nécessaire à l'élaboration d'un fichier climatique sous le format propre à STICS.

4.2.3. Etude de l'effet du climat sur RCs

Afin de tester uniquement l'effet du climat et de simplifier les simulations, on affecte à chaque site les mêmes valeurs pédologiques. On choisit donc systématiquement en guise de fichier-sol un même fichier de valeurs par défaut de STICS. De même, on se place dans des conditions toujours identiques de fertilisation et d'irrigation. En revanche, on modifie à chaque fois les dates de travail du sol et de semis selon les cartes éditées par l'ITCF (Annexe 2), ces facteurs étant étroitement corrélés au climat.

En sortie de chaque simulation, on dispose de la valeur journalière d'indice foliaire en fonction du jour julien et de la date de récolte. On passe donc aisément à une expression du LAI selon le délai avant la récolte, ce qui permet de tracer les courbes de la Figure 15. On s'est limité à représenter les courbes extrêmes et quelques courbes intermédiaires, pour une meilleure illustration des commentaires.

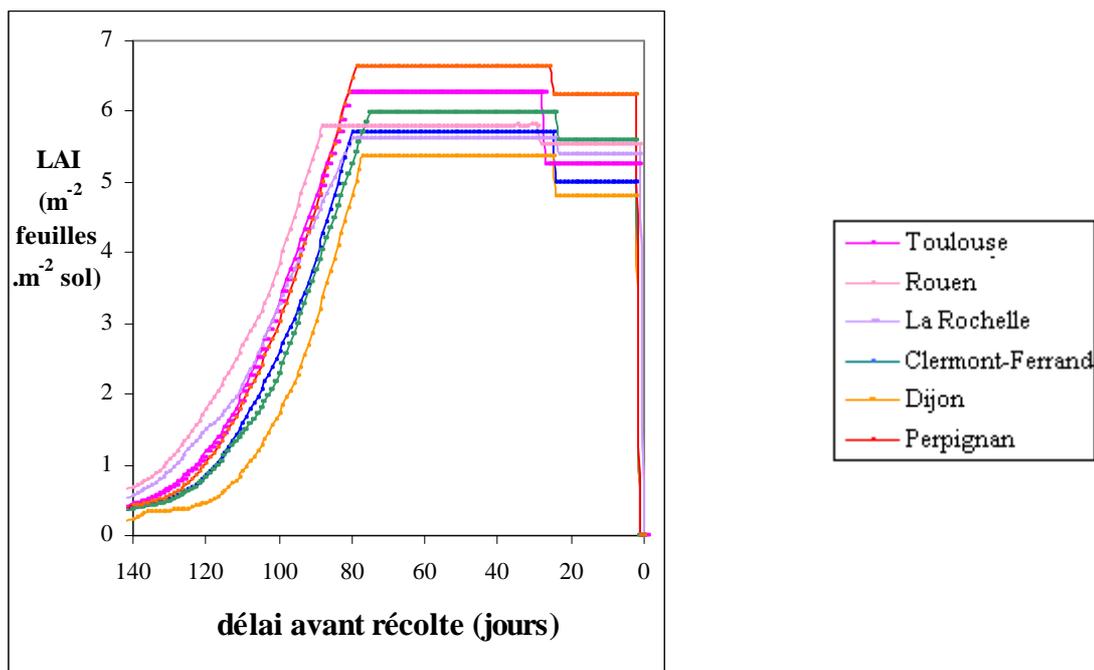


Figure 15 : Variabilité des parcours d'indice foliaire en fonction du climat, variété Talent

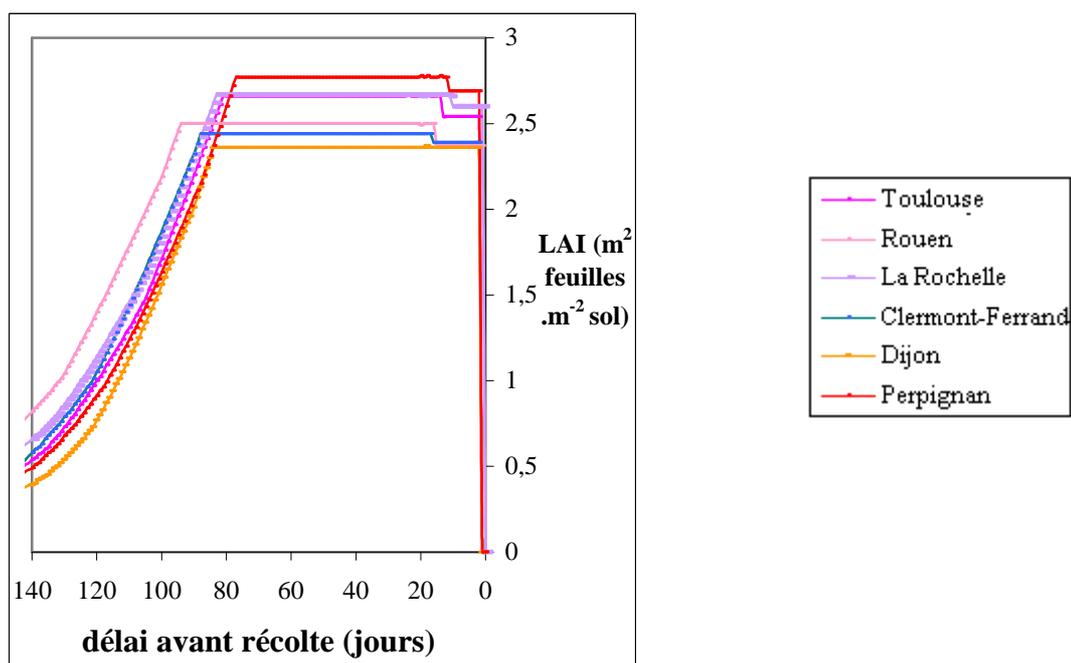


Figure 16 Variabilité des parcours d'indice foliaire en fonction du climat, variété Allure

En ce qui concerne la variété Talent, les écarts entre les extrêmes (à Dijon et Rouen) varient d'un facteur 2 à 3 de 120 à 80 jours avant la récolte. Sur cette même période, la variabilité est d'un facteur 2 au plus pour la variété Allure. A partir de 80 jours avant récolte, l'écart n'est plus que d'un facteur 1,3 au maximum entre les valeurs extrêmes de Talent (Perpignan et Dijon), et d'un facteur 1,2 sur la variété Allure.

Comme il sera développé dans le chapitre 7, la plage de dates de contamination éventuelle du grain de blé n'excède pas un délai de 80 jours avant la récolte. La variabilité de l'indice foliaire étant faible sur cette période, cela justifie de proposer une courbe-type de RCs indépendante du climat.

Pour chaque délai avant récolte, on a donc effectué la moyenne des valeurs d'indice foliaire propre à chaque climat. On a déduit la courbe-type de RCs (Figure 18) de la courbe-type d'indice foliaire (Figure 17) :

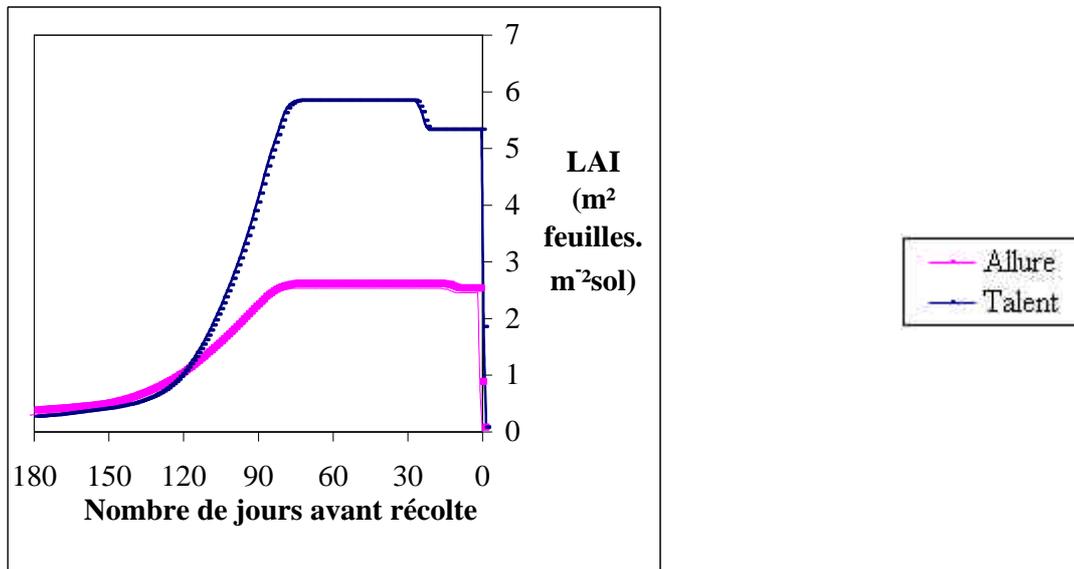


Figure 17 : Courbes-type de LAI en fonction du délai dépôt-récolte

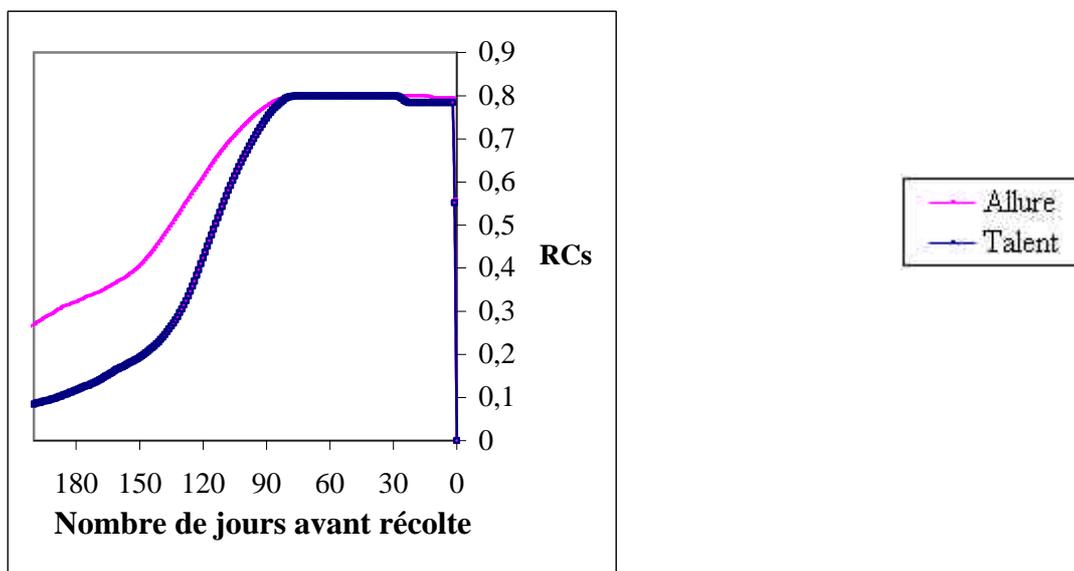


Figure 18 : Courbes-type de RCs en fonction du délai dépôt-récolte

Dans le cadre du programme RADEMIC (Madoz-Escande et Santucci, 2004), des valeurs d'indice foliaire de 3,7 à 92 jours avant récolte et de 5,2 à 57 jours avant récolte ont été obtenues expérimentalement pour le blé d'hiver (variété non précisée). Ces valeurs sont comprises entre les deux courbes-type proposées.

Conclusion : Il est inutile de régionaliser l'allure de la courbe RCs = f (délai avant récolte), puisque les courbes se superposent pour un nombre étendu de climats.

Cela ne signifie pas que la valeur de RCs soit identique en tout lieu à une date donnée. En effet, pour une date de dépôt donnée, la valeur de RCs sur la courbe-type dépend de la date de récolte du couple Variété/Climat. Ainsi, le site et le choix de la variété peuvent intervenir sur la valeur de RCs via le décalage des récoltes. Ce point sera étudié par la suite.

Selon Renaud (1997), la tabulation du paramètre RCs d'ASTRAL a été obtenue d'après les résultats du programme expérimental RESSAC. Cette tabulation n'étant pas explicitée dans Renaud (1997), la comparaison se fonde sur les résultats bruts du programme RESSAC (Maubert et al, 1991). Au cours de ce programme, le rendement de biomasse aérienne du blé a été mesuré aux stades de semis, montaison, floraison et récolte, ainsi qu'à des stades intermédiaires. La valeur du coefficient de saturation S et de captation μ ayant été calculée par un programme d'ajustement spécialement écrit pour cette application, on a pu en déduire la valeur de RCs aux stades décrits, d'après l'équation de Chamberlain modifiée. Du fait de la variabilité des rendements mesurés à un stade donné, on obtient des plages de valeurs de captation (Figure 19).

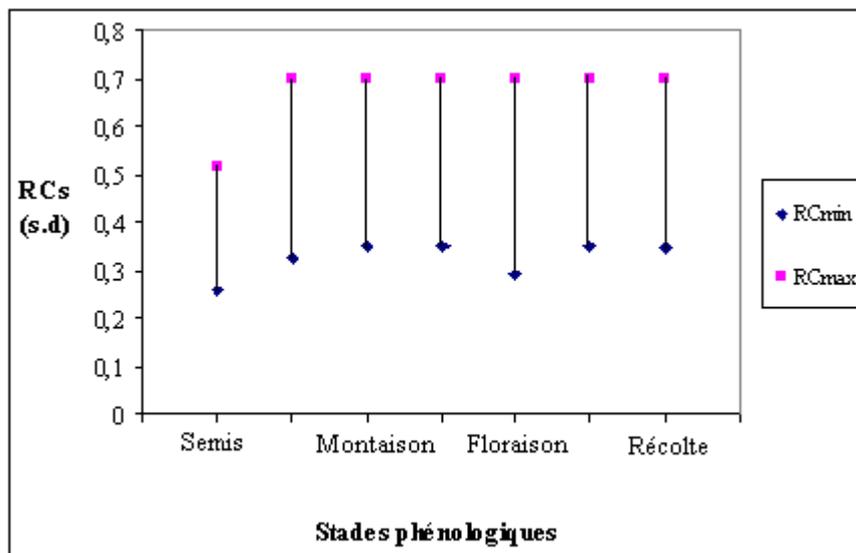


Figure 19 : Variation de la captation pour le blé selon les stades phénologiques d'après RESSAC

D'après (Soltner, 1990), le délai entre la montaison et la floraison est très peu variable et dure 60 jours. On considère que le délai floraison-récolte ne peut excéder 80 jours, comme il sera développé ultérieurement (Chapitre 7). La figure 20 permet de comparer avec les valeurs recalculées grâce à STICS. Le tableau de valeurs utilisé pour le tracé des courbes a été reporté en annexe 8.

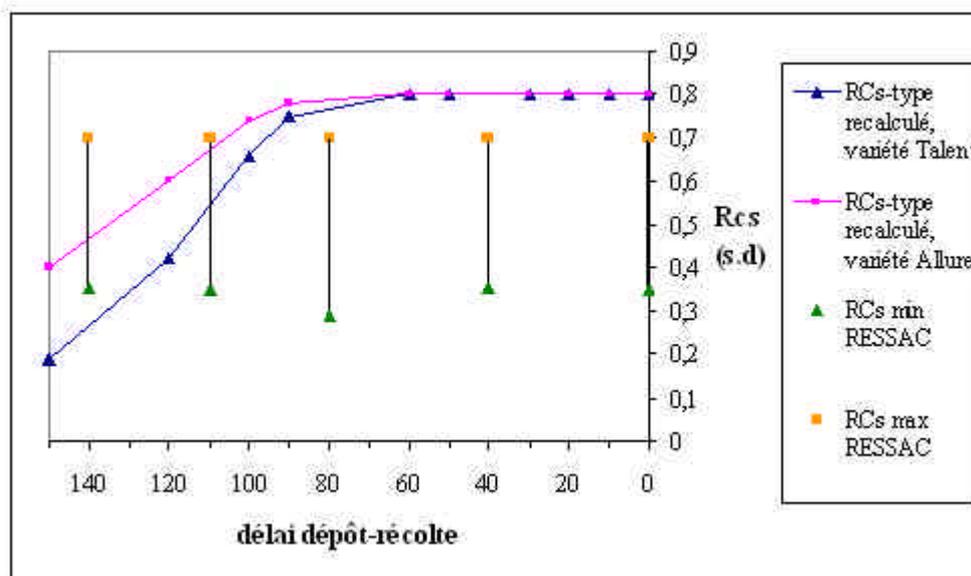


Figure 20 : Comparaison des courbes de RCs en fonction du délai dépôt-récolte

Les courbes déduites des sorties du modèle STICS sont conformes à l'allure générale du phénomène de captation décrit jusqu'ici (Figures 1 et 2). En revanche, les plages de valeurs données par RESSAC sont très larges et ne permettent pas de mettre clairement en évidence une phase de croissance caractéristique de l'établissement du couvert, suivie d'un palier dû à la compétition entre étages foliaires.

Néanmoins, dès 110 jours avant récolte, les valeurs recalculées d'après les sorties du modèle STICS sont proches des valeurs maximales de captation selon RESSAC.

5. ETUDE DE RCh

5.1. Mode de calcul de RCh

On rappelle qu'on utilise la formule suivante:

$$RCh = (LAI * S_2 / P) * [1 - 2^{-P / (3 * S_2)}]$$

D'après (Müller & Pröhl, 1988), on a choisi 0,2 pour la valeur de S_2 du blé. Cette valeur est caractéristique du césium, zirconium, niobium, ruthénium et tellure pour l'herbe et les céréales.

En ce qui concerne le LAI, on utilise les courbes-type d'indice foliaire par variété en fonction du délai dépôt-récolte obtenues précédemment.

Quant aux valeurs de P, on dispose des données journalières de précipitation par date de l'année calendaire contenues dans les 12 fichiers climatiques (Figure 21). On rappelle que les valeurs journalières des fichiers climatiques ont été obtenues en divisant les précipitations cumulées mensuelles par 30, ce qui explique la présence des paliers. Cependant, on désire obtenir les courbes de captation humide en fonction du délai dépôt-récolte, afin d'éditer éventuellement des courbes-type sur le modèle du RCs.

On calcule donc les valeurs journalières de précipitation par station et en fonction du délai dépôt-récolte (Figure 22).

Par souci de clarté, toutes les stations n'ont pas été représentées.

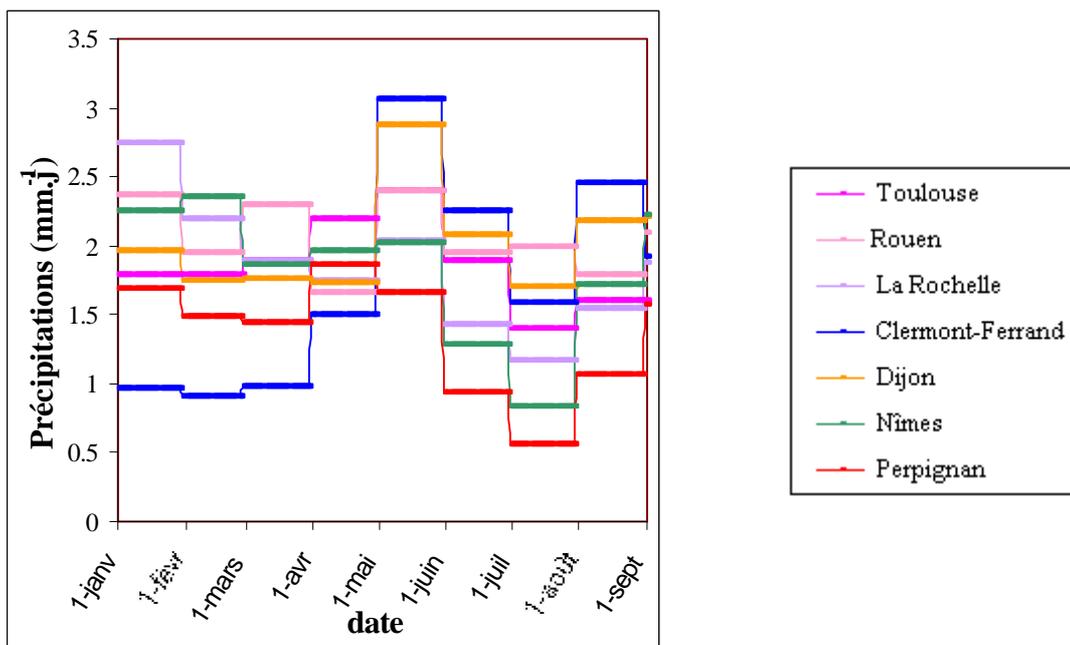


Figure 21 : Variabilité saisonnière des précipitations journalières entre 7 stations climatiques

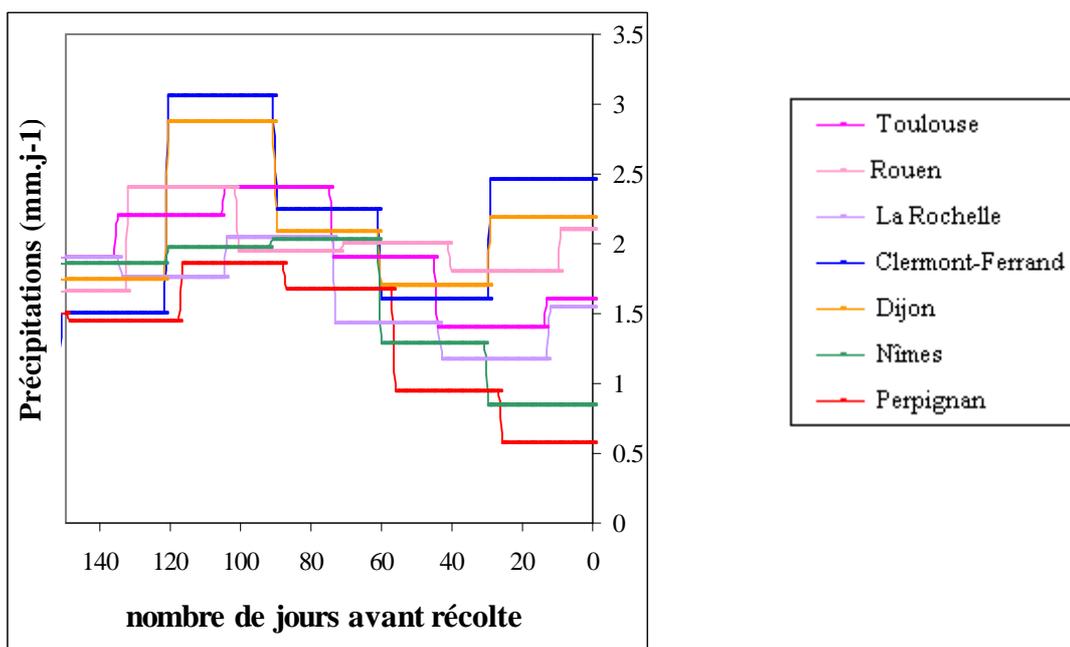


Figure 22 : Variabilité saisonnière des précipitations sur 7 stations climatiques

Le changement d'abscisse (Figure 22) permet de visualiser l'impact de la variabilité des précipitations entre sites en fonction du délai dépôt-récolte. Ainsi, pendant les 30 jours précédant la récolte, la variabilité des précipitations peut atteindre un facteur 5.

5.2. Obtention des courbes de RCh

Les valeurs de LAI et de P permettent de tracer les courbes de RCh en fonction du délai dépôt-récolte (Figures 23 et 24).

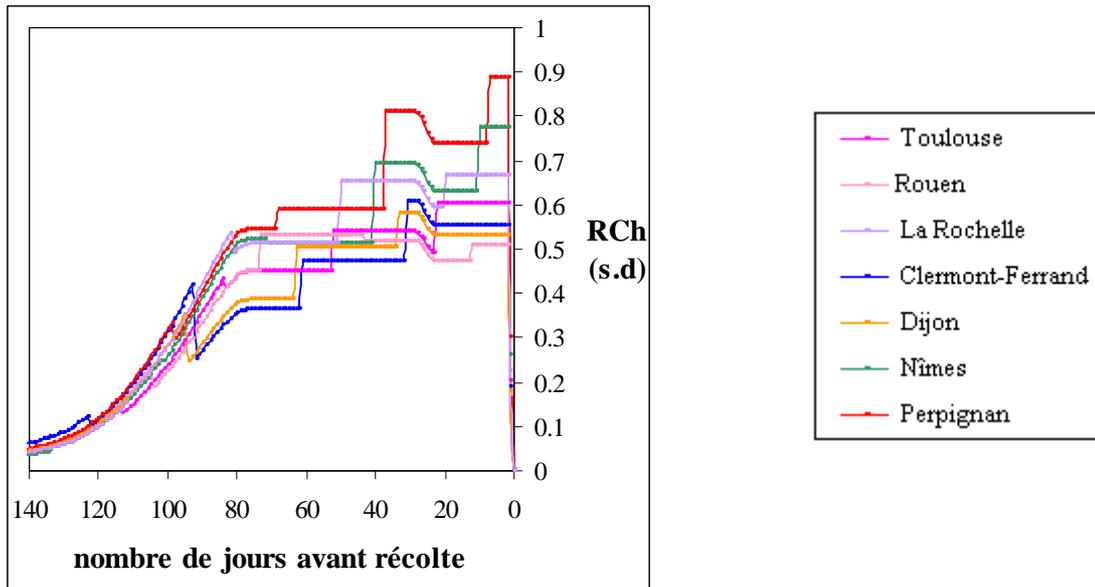


Figure 23 : Variation de RCh selon le site, variété Talent

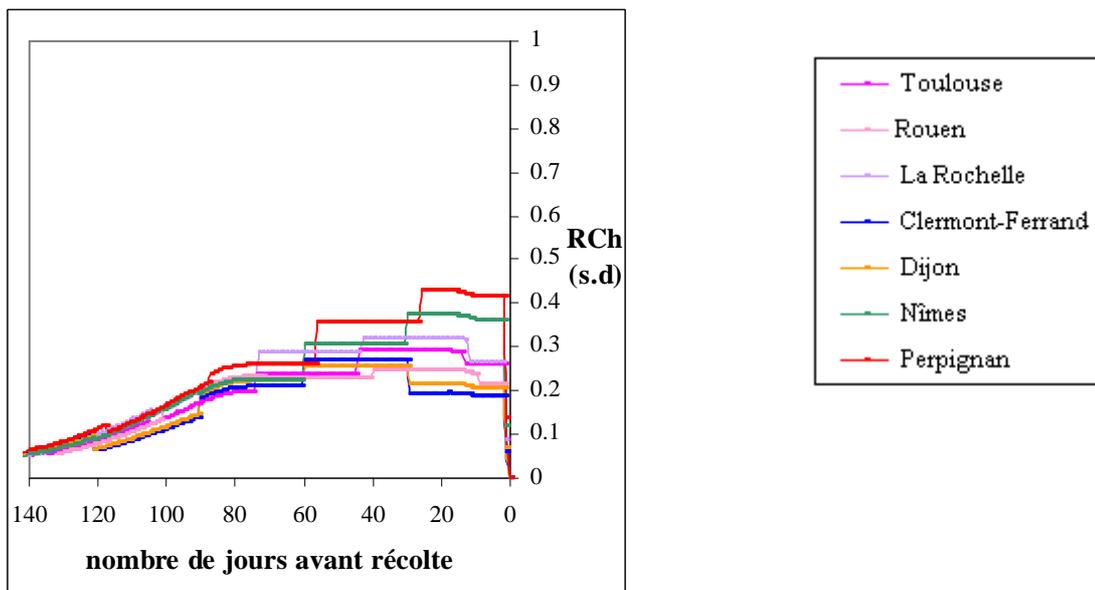


Figure 24 : Variation de RCh selon le site, variété Allure

Si l'on compare les figures 23 et 24, on voit que l'effet variété est un fort facteur de variabilité du paramètre RCh (facteur 2), ce qui s'explique par l'allure des deux courbes-type de LAI. D'autre part, l'examen séparé de chaque figure permet de mettre en évidence les écarts de captation humide dus uniquement aux précipitations au cours des 80 jours précédant la récolte. En effet, l'indice foliaire a alors atteint son plateau (Figure 17). Lors des 80 jours précédant la récolte, la variabilité inter-site des précipitations peut atteindre un facteur 2 (entre Perpignan et Metz) sur les valeurs de RCh. Or c'est pendant cette période que le blé d'hiver est sensible à une contamination (Chapitre 7).

Il est donc judicieux de régionaliser l'allure de la courbe $RCh = f(\text{délai dépôt-récolte})$, les courbes pour un nombre étendu de climats ne se superposant pas. Le site et le choix

de la variété peuvent également intervenir sur la valeur de RCh via le décalage des dates de récoltes.

5.3. Encadrement de RCh

Afin de mieux visualiser la variabilité du paramètre RCh en fonction du délai dépôt-récolte, on a relevé à chaque pas la valeur minimale et maximale de RCh, par variété. Ces courbes ne correspondent donc pas à un couple Climat/Variété, mais permettent d'encadrer la valeur de RCh à chaque délai dépôt-récolte (Figure 25). Le tableau de valeurs utilisé pour le tracé des courbes a été reporté en annexe 9.

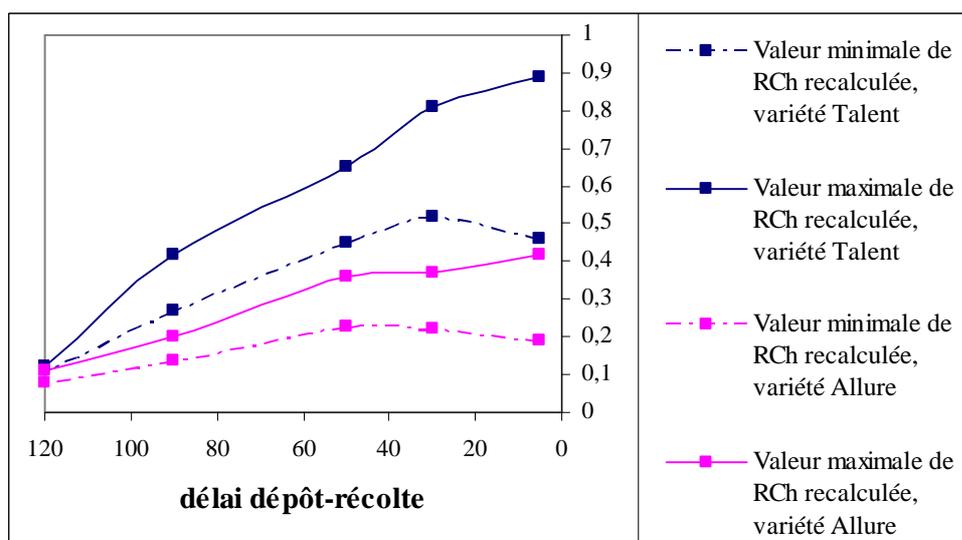


Figure 25 : Comparaison entre les valeurs recalculées de RCh et celles d'ASTRAL

Les valeurs de RCh utilisées dans ASTRAL n'étant pas référencées dans (Renaud, 1997), on ne peut effectuer de comparaison entre les valeurs recalculées du paramètre et celles d'ASTRAL.

6. ETUDE DE LA DATE DE RECOLTE

6.1. Résultats des simulations

Les dates de récolte propres à chaque simulation ont été reportées dans le tableau 7.

Type de climat	Station	Date de Récolte	
		Talent	Allure
montagnard	Clermont-Ferrand	31/07	29/08
	Embrun	07/08	02/09
océanique	Rouen	12/08	09/09
	La Rochelle	20/07	12/08
	Mont-de-Marsan	22/07	12/08
océanique dégradé	Reims	06/08	31/08
	Châteauroux	03/08	28/08
	Toulouse	22/07	13/08
continental	Metz	04/08	29/08
	Dijon	02/08	29/08
méditerranéen	Nîmes	10/07	30/07
	Perpignan	07/07	26/07

Tableau 7 : Dates de récolte prévue par STICS en fonction des simulations

Pour la variété Talent, la date la plus précoce de récolte est le 7 juillet à Perpignan, alors qu'on récoltera le 12 août à Rouen. Quant à la variété Allure, on constate également un écart d'un mois et demi entre une récolte à Perpignan (26 juillet) et à Rouen (9 septembre). On en conclut que les différences climatiques jouent bien un rôle dans le décalage des cycles culturaux. L'effet des différences climatiques et variétales sur la valeur de RCs et de RCh sera donc pris en compte via le tableau 8.

6.2. Comparaison avec les données de l'ITCF et celles d'ASTRAL

Le tableau 8 permet de comparer les dates de récolte d'après STICS à celles prévues par l'ITCF (Annexe 7) et à celle utilisée dans ASTRAL.

Nom station	Date Récolte		
	Talent - Allure	Prévisions ITCF	Date Astral
Clermont-Ferrand	31/07 - 29/08	15 - 30/07	10/08
Embrun	07/08 - 02/09	05 - 20/07	
Rouen	12/08 - 09/09	01 - 20/08	
La Rochelle	20/07 - 12/08	05 - 20/07	
Mont-de-Marsan	22/07 - 12/08	05 - 20/07	
Reims	06/08 - 31/08	01 - 20/08	
Châteauroux	03/08 - 28/08	01 - 20/08	
Toulouse	22/07 - 13/08	05 - 20/07	
Metz	04/08 - 29/08	01 - 20/08	
Dijon	02/08 - 29/08	15 - 30/07	
Nîmes	10/07 - 30/07	05 - 20/07	
Perpignan	07/07 - 26/07	05 - 20/07	

Tableau 8 : Comparaison des dates de récolte du blé d'hiver entre STICS et l'ITCF

Les plages de dates de récolte de l'ITCF semblent calées sur une variété précoce plutôt que tardive. Néanmoins, les dates prévues par STICS pour Talent sont légèrement plus avancées que la limite supérieure de l'ITCF. La variété prise en compte dans l'estimation de récolte de l'ITCF n'étant pas précisée, la comparaison avec les sorties de STICS ne peut être poussée plus loin.

D'après le paragraphe 2.3.5, la variabilité de la date de récolte est grande du fait des nombreux facteurs qui l'influencent et interagissent entre eux. On ne peut donc produire d'estimation de récolte au jour près, les choix de l'agriculteur en terme de précédent, de rotation culturale et de calendrier n'étant pas prévisibles, au même titre que les accidents climatiques. Ceci explique que la plage de dates de récolte donnée par l'ITCF soit de 15 à 20 jours, ordre de grandeur habituel de l'erreur dans l'estimation.

7. ETUDE DE LA TRANSLOCATION

7.1. Etude de l'effet du climat sur le délai floraison-récolte

7.1.1. Résultats des simulations

Il s'agit ici de tester l'hypothèse selon laquelle le délai entre la floraison et la récolte serait constant quels que soient la variété et le climat. On relève donc la date de floraison pour chaque combinaison entre climat et variété et on la soustrait à la date de récolte (Tableau 9).

Nom climat	Nom station	Date floraison		Date Récolte		Délai floraison-récolte	
		Talent	Allure	Talent	Allure	Talent	Allure
montagnard	Clermont-Ferrand	03/06	22/06	31/07	29/08	58	68
	Embrun	10/06	30/06	07/08	02/09	58	64
océanique	Rouen	07/06	27/06	12/08	09/09	66	74
	La Rochelle	21/05	10/06	20/07	12/08	60	63
	Mont-de-Marsan	23/05	11/06	22/07	12/08	60	62
océanique dégradé	Reims	04/06	22/06	06/08	31/08	63	70
	Châteauroux	30/05	21/06	03/08	28/08	65	68
	Toulouse	23/05	13/06	22/07	13/08	60	61
continental	Metz	05/06	23/06	04/08	29/08	60	67
	Dijon	06/06	25/06	02/08	29/08	57	65
méditerranéen	Nîmes	17/05	05/06	10/07	30/07	54	55
	Perpignan	13/05	30/05	07/07	26/07	57	57

Tableau 9 : Délai dépôt-récolte en fonction des simulations

Si on combine les 2 facteurs de variabilité que sont le climat et la variété, alors on met en évidence un décalage maximal de 50 jours entre les dates de floraison (entre Talent à Perpignan et Allure à Embrun). Ainsi, un dépôt radioactif le 30 juin n'affecterait pas la variété Allure à Embrun, alors que le remplissage des grains de la variété Talent à Perpignan aurait déjà commencé depuis 50 jours. Dans le premier cas, la valeur de TLF serait nulle, et maximale (0,1) dans le second.

On s'aperçoit que le délai floraison-récolte n'est pas constant au cours des simulations, puisqu'on met en évidence un écart pouvant atteindre 20 jours.

Ceci implique que la forme de la courbe générique $TLF = f$ (délai avant récolte) d'ASTRAL diffère selon les variétés et les climats.

Remarque : On déduit du tableau 9 qu'il importe seulement de tabuler les valeurs des paramètres pour un délai dépôt-récolte maximal de 74 jours, puisqu'il n'y a pas de translocation vers le grain avant la floraison. Les conséquences de ce résultat sur la tabulation de RCs et RCh sont les suivantes :

On pourra tabuler RCs dès 80 jours avant récolte, en s'appuyant sur les courbes-types. La valeur de RCs restant constante de 80 à 0 jours avant récolte (Figure 18), la tabulation de RCs sur ce laps de temps se réduit donc à 2 valeurs (une par variété).

En ce qui concerne le paramètre RCh, sa tabulation doit intégrer l'effet du climat, ce qui revient à considérer 12 climats, deux variétés et un délai maximal de 80 jours avant récolte, soit 1920 valeurs. Certains climats pourraient être regroupés, ce qui permettrait de diminuer ce nombre.

7.1.2. Comparaison avec les dates de floraison tirées de la bibliographie

L'hypothèse testée, selon laquelle les dates de floraison sont décalées dans le temps, a donc été validée. La date de floraison la plus précoce serait celle de Talent à Perpignan, le 13 mai, et la date la plus tardive celle d'Allure le 30 juin, ce qui entraîne la variabilité des sites contaminés selon que le dépôt a lieu avant ou après la floraison des variétés.

Dans (Gate, 1995), les dates de floraison du blé d'hiver ont été estimées en fonction de la précocité et de la zone géographique (Tableaux 10 et 11).

Région	Date de floraison des variétés précoces (Gate, 1995)	Nom station	Date de floraison de la variété Talent (STICS)
Nord	28/05-1/06	Rouen	7/6
		Reims	4/6
		Metz	5/6
Bassin Parisien	23-28/05	Châteauroux	30/5
Sud	9-18/05	Toulouse	23/5
		Nîmes	17/5
		Perpignan	11/5

Tableau 10 : Comparaison des dates de floraison des variétés précoces

Région	Date de floraison des variétés tardives (Gate, 1995)	Nom station	Date de floraison de la variété Allure (STICS)
Nord	9 – 23/06	Rouen	27/6
		Reims	22/6
		Metz	23/6
Bassin Parisien	1 – 13/06	Châteauroux	21/6
Sud	28/05 – 09/06	Toulouse	13/6
		Nîmes	5/6
		Perpignan	30/5

Tableau 11 : Comparaison des dates de floraison des variétés tardives

Les dates de STICS coïncident assez bien avec celles proposées par P. Gate, puisque celui-ci donne le 9 mai comme date de floraison la plus précoce et le 23 juin comme date la plus tardive. Notons cependant que les dates de floraison de STICS constituent systématiquement la limite supérieure des plages de dates proposées par (Gate, 1995). Cela peut être dû au fait que les estimations de P. Gate intègrent la variabilité des dates de floraison à grande échelle, alors que les dates issues de STICS ne portent que sur quelques stations. D'autre part, les plages de dates de floraison données par P. Gate sont de 10 à 15 jours. Cela reflète la variabilité qui est de mise dans l'estimation de la date de floraison d'une culture. Soulignons que la précision des sorties de STICS, au jour près, est factice. D'où le danger de sous-estimer la contamination du grain si la floraison est avancée d'une quinzaine de jours par rapport aux prévisions du modèle.

7.1.3. Proposition de construction des courbes $TLF = f$ (délai avant récolte)

On peut modéliser la courbe $TLF = f$ (délai avant récolte) proposée dans ECOSYS de la façon suivante : pendant un mois, soit un tiers du délai floraison-récolte, la translocation croît linéairement de 0 à 0,1. Puis elle atteint un plateau égal à 0,1 pendant encore un mois, soit le 2ème tiers de la durée floraison-récolte. Le dernier tiers se caractérise par une décroissance linéaire de 0,1 à 0,75.

On conserve cette modélisation en trois phases de durée égale pour représenter la translocation de chaque couple Variété/Climat. En effet, la translocation est un phénomène physiologique qui dépend du stade de la plante. Il est donc logique d'adapter la durée des phases successives à la durée totale du processus; de la sorte la courbe d'origine est effectivement étirée ou comprimée selon l'axe des abscisses. On obtient le tracé des courbes en figure 26. On n'a pas représenté les 24 combinaisons Variété/Climat, afin de mieux visualiser les écarts entre courbes.

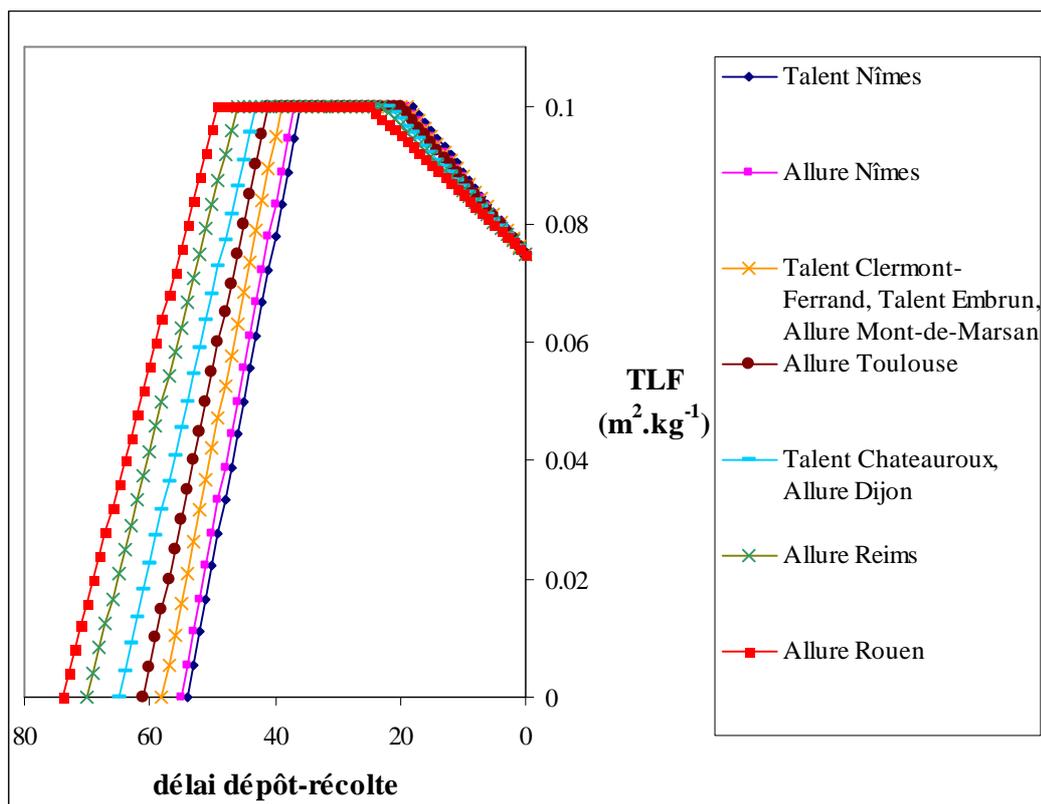


Figure 26 : Allure du rapport TLF en fonction du site et du délai dépôt-récolte

Du fait de la forte pente de la phase de croissance de TLF, les écarts entre courbes peuvent induire des différences dans la valeur de la translocation pour un même délai dépôt-récolte (facteur 2 à 10 de 45 à 70 jours avant récolte). Il est donc pertinent de régionaliser la courbe $TLF = f(\text{délai dépôt-récolte})$. D'autre part, le climat et le choix de la variété interviennent également sur la valeur de TLF via le décalage des récoltes.

7.2. Comparaison des valeurs de TLF

La figure 27 compare les valeurs de translocation issues du modèle ECOSYS, celles de l'IAEA et celles recalculées d'après STICS. Parmi les couples Variété/Climat, seules les valeurs extrêmes ont été prises en compte, afin d'encadrer TLF à chaque délai dépôt-récolte.

Le tableau de valeurs utilisé pour le tracé des courbes a été reporté en annexe 10.

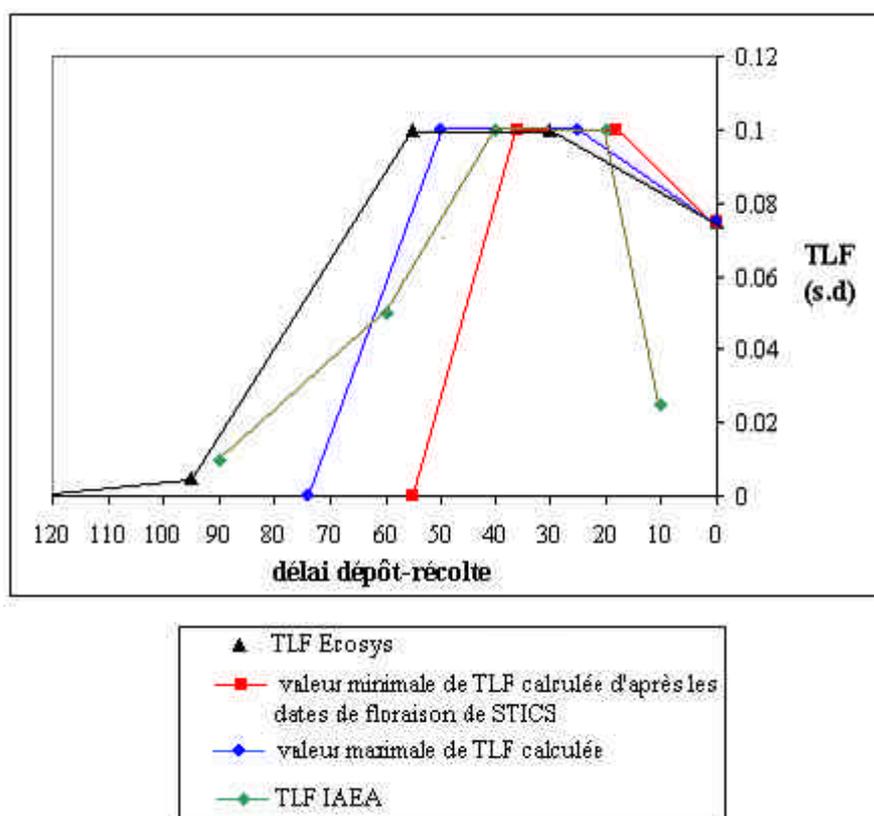


Figure 27 : Comparaison des valeurs de TLF calculées et bibliographiques

Suite aux simulations effectuées, on a réduit le délai floraison-récolte, qui était de 90 jours selon ECOSYS, à une plage comprise entre 54 et 74 jours, d'où l'allure plus resserrée de ces courbes par rapport à celle d'ECOSYS. Le modèle ECOSYS ayant été calé sur les cycles culturaux du sud de l'Allemagne ; on peut admettre que l'intervalle entre la floraison et la récolte soit moindre dans le cas de la France qui a un climat plus tempéré.

Les valeurs de translocation pour différents délais dépôt-récolte sont rassemblées dans le tableau 12.

Nombre de jours avant récolte	74	60	50	30	10
TLF _{ECOSYS}	0,055	0,09	0,1	0,1	0,082
TLF _{IAEA}	0,03	0,05	0,08	0,1	0,02
TLF minimal (recalculé)	0	0	0,02	0,1	0,09
TLF maximal (recalculé)	0	0,06	0,1	0,1	0,082

Tableau 12 : Comparaison des valeurs de translocation pour différents délais avant récolte

L'écart entre les valeurs de l'IAEA et d'ECOSYS d'une part et les valeurs issues de STICS d'autre part est principalement dû au raccourcissement du délai floraison-récolte. Ainsi, à 60 jours avant récolte, la translocation selon ECOSYS a pratiquement atteint la valeur maximale, alors que la valeur minimale recalculée est toujours nulle.

Les écarts entre les valeurs bibliographiques et les valeurs issues de STICS peuvent atteindre un facteur 5 (à 50 jours avant récolte, entre ECOSYS et la valeur minimale issue de STICS). Les 30 jours précédant la récolte, les valeurs sont similaires, à l'exception de celle proposée par l'IAEA, 10 jours avant récolte. Cette valeur est en effet 4 fois plus faible que les autres. Ceci impliquerait que la translocation baisse significativement pendant les 20 jours précédant la récolte, alors que le modèle ECOSYS considère que le grain ne cesse de recevoir des assimilats jusqu'à la récolte.

Mise à part cette dernière observation, les 4 courbes suivent globalement la même allure.

8. COMPARAISON ENTRE LES FACTEURS DE TRANSFERT AIR/GRAIN ISSUS DE STICS ET CEUX D'ASTRAL

8.1. Facteur de transfert par temps sec: FTds

Les valeurs de FTds tabulées dans ASTRAL ont été comparées à celles issues de STICS. Ces dernières ont été obtenues d'après l'équation suivante :

$$FTds = RCs \cdot \frac{TLF}{Rdt_{récolte}}$$

La valeur du rendement du blé d'hiver a été choisie égale à 0,5 kg.m⁻², d'après les données du CD-ROM Agreste. Seules les courbes correspondant aux extrêmes des couples Variété/Climat ont été représentées sur la figure 28.

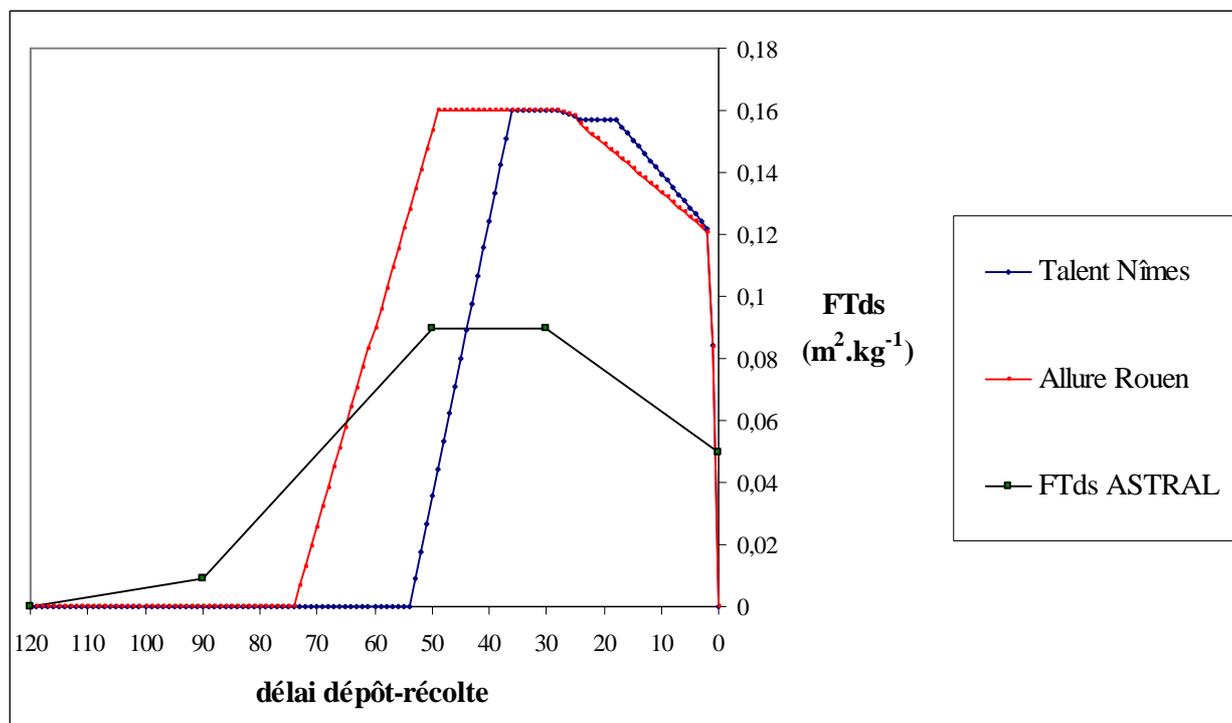


Figure 28 : Comparaison des valeurs de FTds tabulées dans ASTRAL à celles recalculées avec les données de STICS

Les valeurs de facteur de transfert pour différents délais dépôt-récolte sont rassemblées dans le tableau 13.

délai avant récolte	80	70	60	50	30	10
FTds ASTRAL	0,03	0,05	0,06	0,09	0,09	0,06
FTds recalculé min	0	0	0	0,036	0,16	0,13
FTds recalculé max	0	0,026	0,09	0,15	0,16	0,13

Tableau 13 : Comparaison des valeurs de transfert sec pour différents délais avant récolte

Le phénomène de transfert démarre plus tôt selon ASTRAL, d'où les écarts relevés entre 80 et 60 jours avant la récolte entre ASTRAL et FTdsmin. D'autre part, le transfert estimé d'après la présente étude surpasse celui proposé par ASTRAL. Ainsi, 50 jours avant récolte, les écarts relevés atteignent un facteur 3. A 10 jours avant récolte, l'écart n'est plus que d'un facteur 2.

On ne peut précisément déterminer l'origine des écarts relevés entre les valeurs proposées dans la présente étude et celles d'ASTRAL, faute de précisions sur les valeurs de RCs et TLF utilisées dans ASTRAL mais le démarrage du transfert plus précoce dans ASTRAL est probablement dû au paramètre TLF alors que les écarts d'un facteur 2 à 3 sont plutôt dus au paramètre RCs.

8.2. Facteur de transfert par temps humide: FTdh

On a procédé de même pour le calcul de FTdh. On n'a représenté que quelques courbes de climat, pour chaque variété, par souci de lisibilité (Figures 29 et 30).

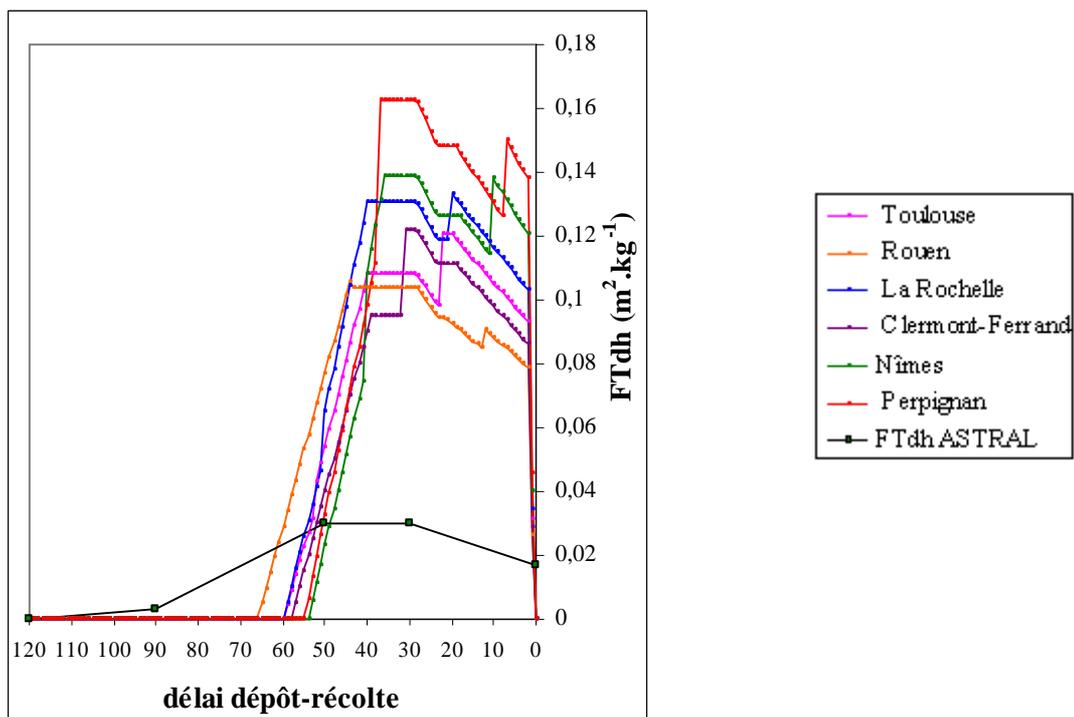


Figure 29 : Comparaison des valeurs de FTdh tabulées dans ASTRAL et recalculées d'après STICS, variété Talent

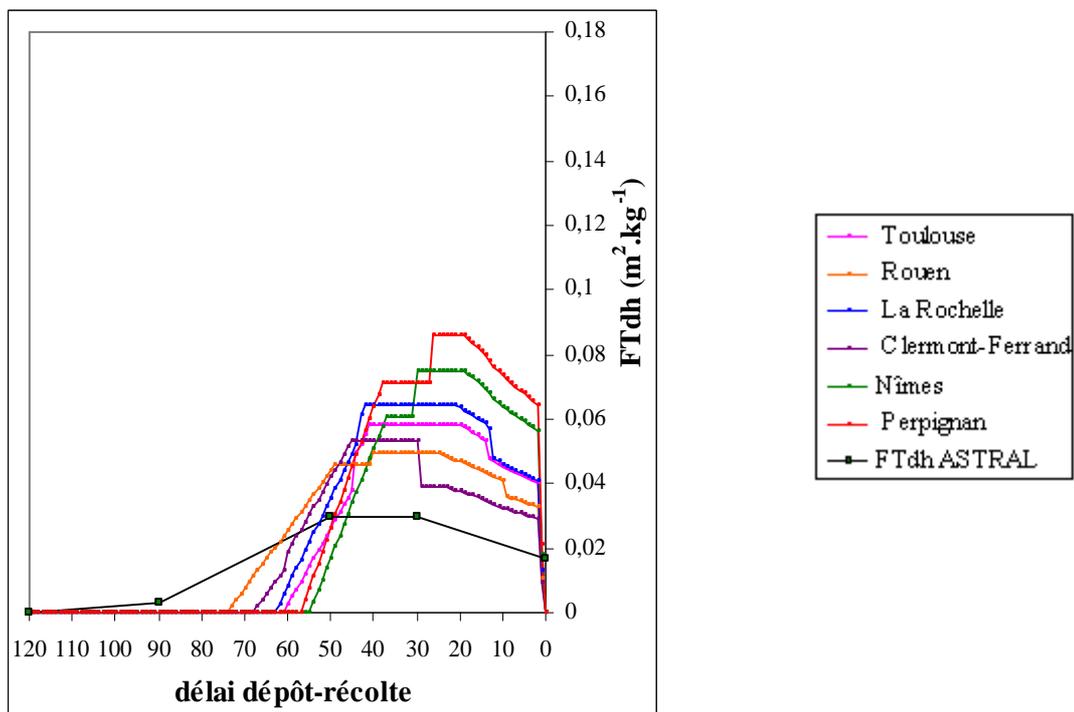


Figure 30 : Comparaison des valeurs de FTdh tabulées dans ASTRAL et recalculées d'après STICS, variété Allure

Les valeurs de transfert pour différents délais dépôt-récolte sont rassemblées dans le tableau 14.

délai avant récolte		80	70	60	50	30	10
FTds ASTRAL		0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	0,02
Talent	FTdh recalculé min	0	0	0	0,017	0,1	0,08
	FTdh recalculé max	0	0	0,029			
Allure	FTdh recalculé min	0	0	0	0,017	0,045	0,032
	FTdh recalculé max	0	0,07	0,025	0,044	0,074	0,073

Tableau 14 : Comparaison des valeurs de transfert humide pour différents délais avant récolte

De même que pour le transfert sec, le phénomène de transfert humide démarre plus tôt selon ASTRAL (effet de la translocation), d'où les écarts relevés entre 80 et 60 jours avant la récolte entre ASTRAL et FTdhmin. De même que pour FTds, l'intensité du transfert humide calculé ici surpasse les valeurs d'ASTRAL d'un facteur 5 à 6 quant à la variété Talent. L'écart relevé est moindre pour la variété Allure (facteur 2 à 3 lors des 50 jours précédant la récolte).

Les forts écarts entre les valeurs utilisées dans ASTRAL et celles qu'on a recalculées dans la présente étude s'expliquent probablement par la façon de prendre en compte les précipitations journalières dans le calcul de RCh. Les valeurs d'ASTRAL concernent une hauteur de précipitation toujours égale à 5 mm alors que la présente étude considère pour chaque climat les valeurs mensuelles divisées par 30, ce qui sous estime probablement le taux de précipitation instantanée.

D'après l'étude climatique, les précipitations journalières varient de 0,5 (Perpignan) à 2,5 mm.j⁻¹ (Clermont-Ferrand) pendant les 30 jours avant récolte, soit un facteur 2 à 10 fois moindre dans la valeur de précipitation P intervenant dans l'équation 19. Ainsi, pour le LAI de Talent correspondant à cet intervalle dépôt-récolte, soit 5,2 (Figure 18), la valeur de RCh calculée pour une précipitation de 5 mm serait inférieure d'un facteur 2 à 4 par rapport aux RCh calculés pour les précipitations de Perpignan et de Clermont-Ferrand et donc du même ordre de grandeur que les valeurs d'ASTRAL.

C'est donc bien le mode de prise en compte des précipitations qui induit les écarts relevés lors de la comparaison de RCh.

9. EXEMPLE D'APPLICATION DES RESULTATS

9.1. Effet relatif de la captation et de la translocation

Afin d'illustrer les effets combinés de régionalisation étudiés précédemment pour les différents paramètres du modèle de transfert d'un polluant radioactif au blé d'hiver, on propose de simuler des dépôts à différentes périodes de l'année et de prévoir l'effet global résultant sur FTds et FTdh.

9.1.1. Sur la valeur de FTds

En premier lieu, on s'efforce de déterminer l'influence relative de la captation et de la translocation dans la valeur des paramètres de transfert en fonction des jours de l'année calendaire.

On a représenté sur la figure 31 la captation et la translocation des variétés Talent à Perpignan et Allure à Rouen, qui correspondent aux extremums des décalages observés entre cycles (Tableau 8).

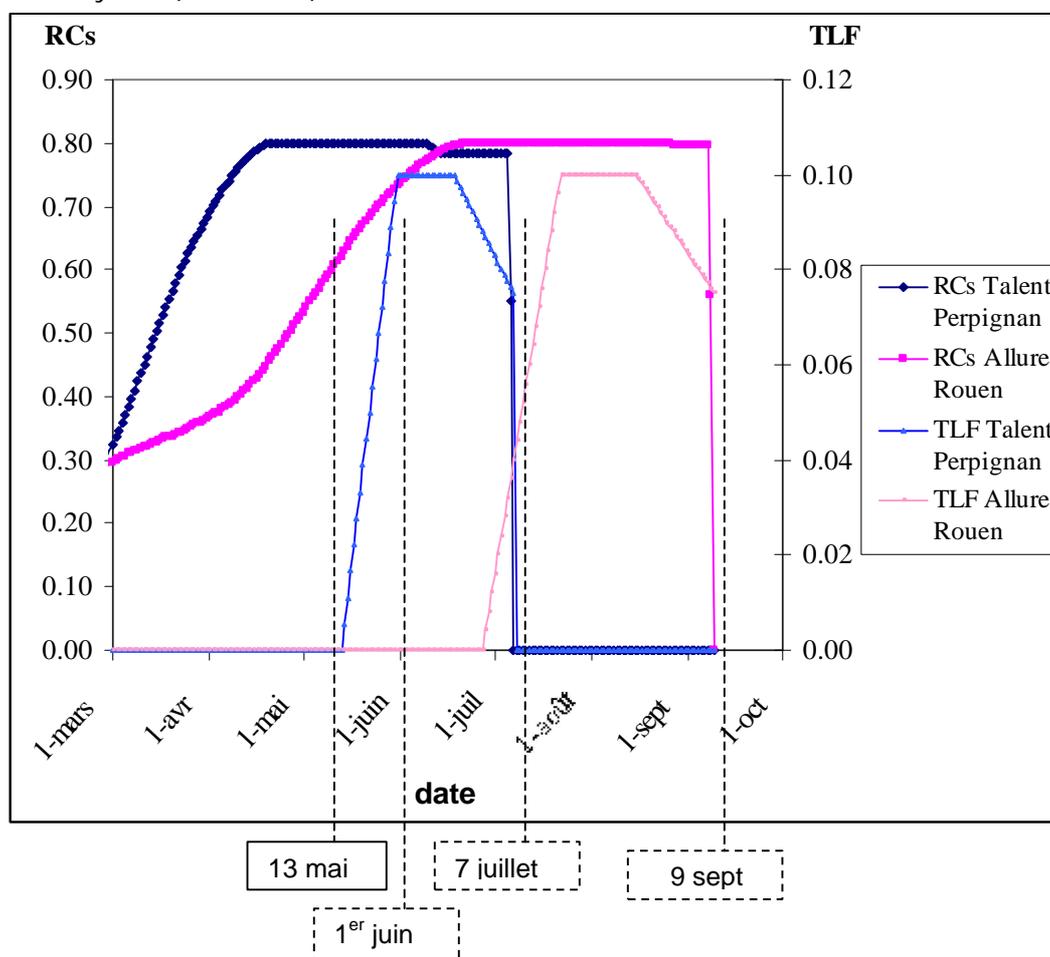


Figure 31 : Comparaison des courbes de captation et de translocation des cycles les plus décalés

Avant le 13 mai, date de floraison simulée la plus précoce, aucun dépôt n'aura d'incidence sur la contamination du grain de blé. La plage de dates critiques pour la contamination du grain s'étale donc du 13 mai au 9 septembre, date de récolte la plus tardive.

La zone comprise entre les deux courbes de RCs représente la variabilité des valeurs de RCs en fonction du climat et de la variété au temps t. Cette variabilité est faible du 13 mai au 1er juin et ne concerne que les couples, peu nombreux, dont la translocation a débuté avant le 1er juin. Sur cette plage de dates, on peut donc prévoir que les simulations mettront en évidence des écarts dus aux décalages de floraison plutôt que de captation, puisque les couverts captent partout au maximum.

En revanche, la valeur de RCs passe brutalement du maximum (0,8) au minimum (0) une fois la date de récolte dépassée. Des simulations dès le 7 juillet (date de récolte la plus précoce) mettront donc en évidence la contamination des cultures qui captent et transloquent encore les radionucléides alors que d'autres sont déjà récoltées.

9.1.2. Sur la valeur de FTdh

On choisit à nouveau de représenter les deux cycles les plus décalés (Figure 32).

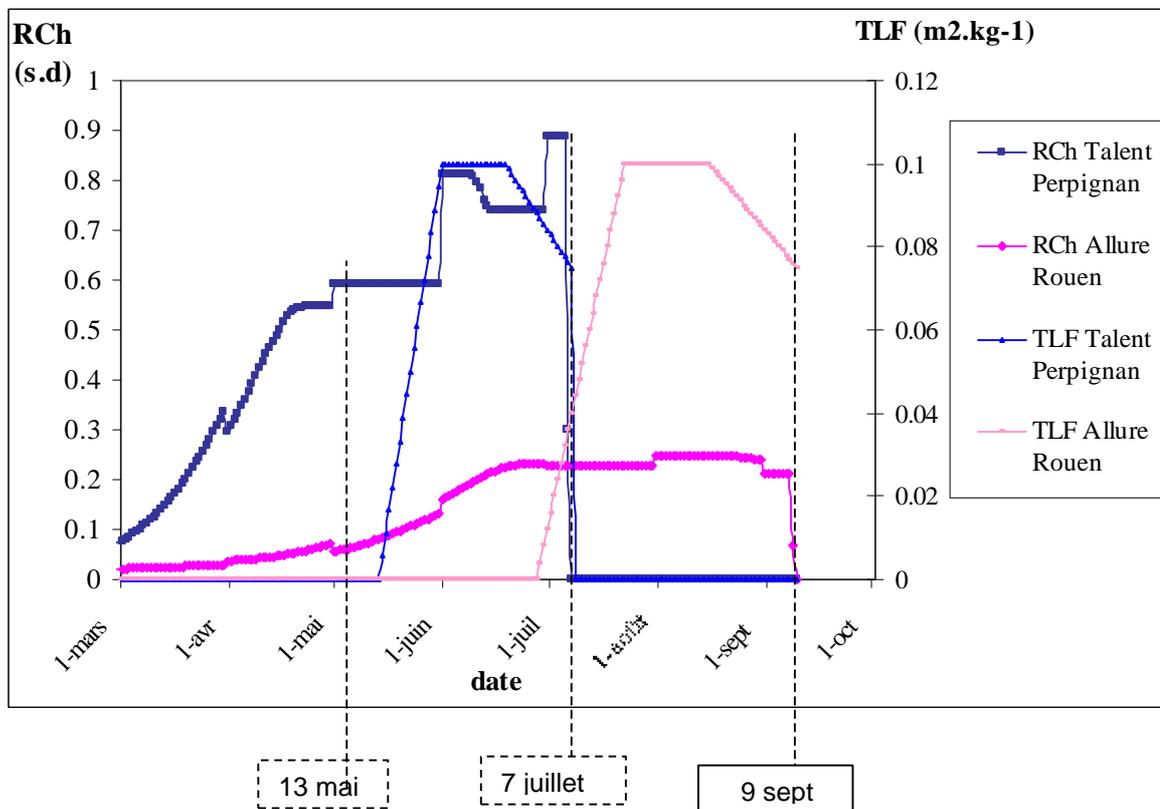


Figure 32 : Comparaison des courbes de RCh et de translocation des extremums

Du 13 mai au 7 juillet, on relève des écarts de RCh d'un facteur 4 à 6. La variabilité de la contamination sera donc due autant aux décalages de dates de floraison qu'aux écarts de captation.

Après le 7 juillet, les écarts de contamination seront plutôt dus à la valeur de captation et à la date d'occurrence de la récolte. La variabilité des valeurs de translocation jouera dans une moindre mesure, puisque le couple le plus tardif atteint une valeur de translocation de 0,04 au 7 juillet. Du 7 juillet au 9 septembre, la translocation des autres couples non récoltés varie donc faiblement (entre 0,04 et 0,1).

9.2. Résultats

9.2.1. Cas d'un dépôt sec

Par souci de clarté, on n'a représenté que six courbes sur vingt-quatre combinaisons Variété/Climat (Figure 33). Les couples Talent/Perpignan et Allure/Rouen représentent les limites inférieures et supérieures des valeurs que peut atteindre FTds.

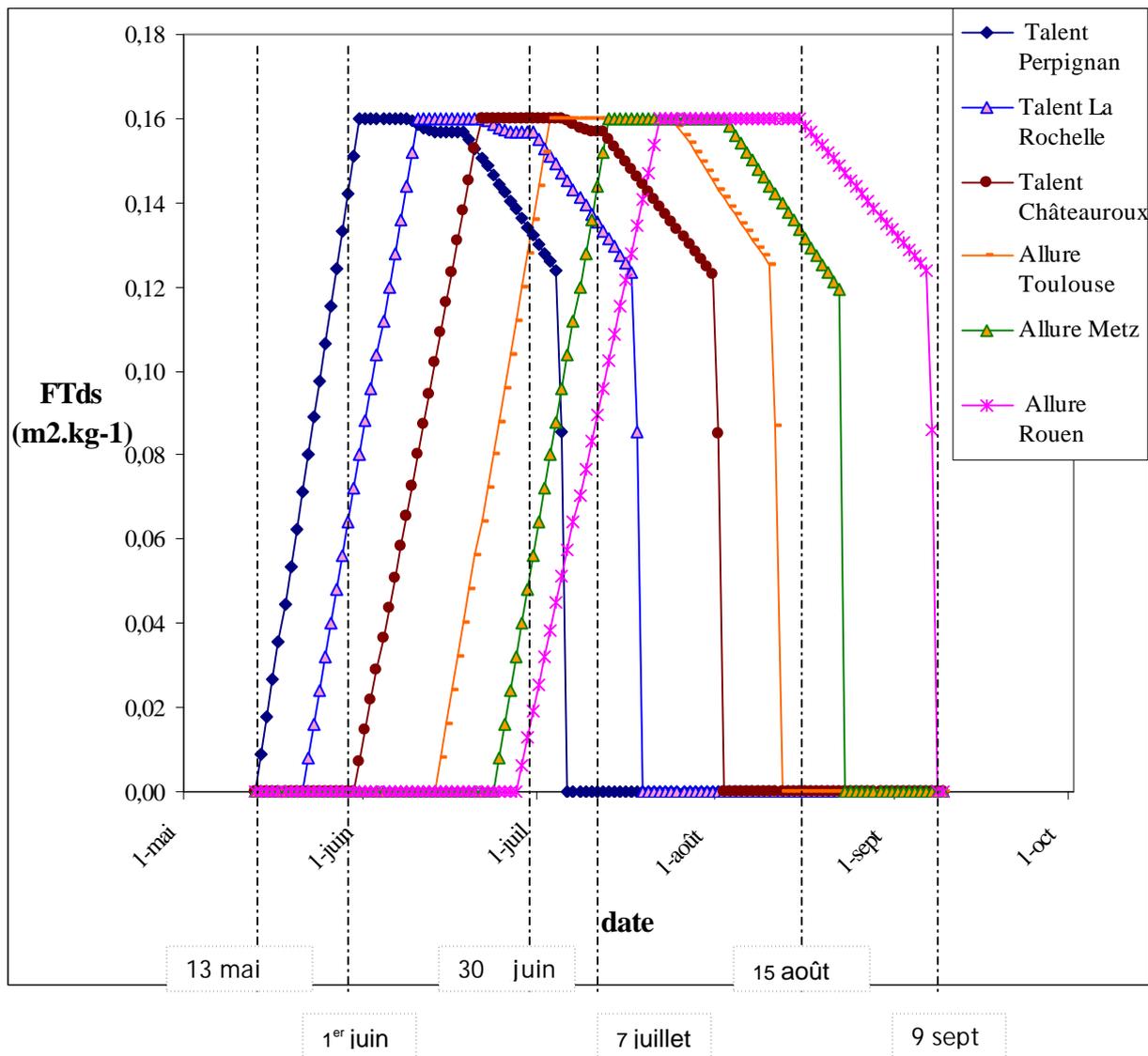


Figure 33 : Variabilité des valeurs de FTds pour une date de dépôt t

Les valeurs de FTds ont été relevées pour quelques dates de dépôt représentatives (Tableau 15).

Couple \ Date de dépôt	13/05	01/06	30/06	07/07	15/08	09/09
Talent Perpignan	0,02	0,16	0,14	0	0	0
Talent La Rochelle	0	0,08	0,16	0,14	0,12	0
Talent Châteauroux	0	0,02	0,16	0,16	0,16	0
Allure Toulouse	0	0	0,14	0,16	0,16	0
Allure Metz	0	0	0,06	0,12	0,18	0
Allure Rouen	0	0	0,02	0,06	0,12	0,14

Tableau 15 : Valeurs de FTds en fonction du site et de la variété à différentes dates

En bleu : valeur maximale de transfert air/grain

En rouge : valeur minimale de transfert air/grain

Du 13 mai (date de floraison la plus précoce) au 9 septembre (date de récolte la plus tardive), un dépôt radioactif contaminerait au moins une région de production en France.

Du 1^{er} juin au 15 août, cette contamination serait maximale sur au moins un site.

Du 1^{er} au 30 juin (date de floraison la plus tardive), le transfert de l'air au grain peut varier de 16 % (si la floraison en un site donné a précédé d'un mois le dépôt) à 0 % (si la floraison en un autre site n'a pas encore eu lieu).

Du 7 juillet (date de récolte la plus précoce) au 9 septembre (date de récolte la plus tardive), le transfert de l'air au grain varie de 16 % (si le dépôt précède d'un mois la récolte en un site donné) à 0% (si la récolte a lieu après le dépôt).

9.2.2. Cas d'un dépôt humide

On obtient la figure 34 de la même façon que précédemment :

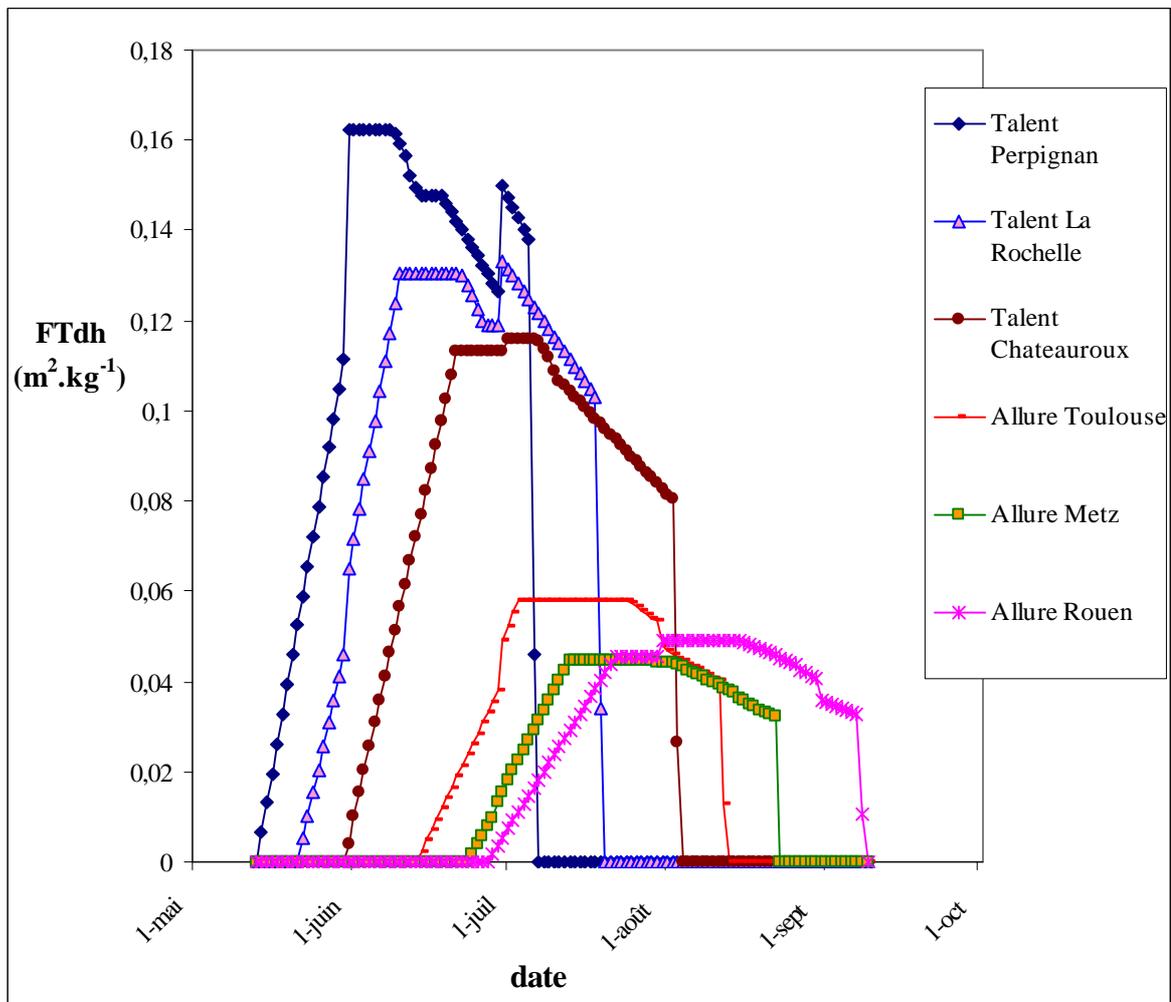


Figure 34 : Variabilité des valeurs de FTdh pour une date de dépôt t

Les valeurs de FTdh ont été relevées pour quelques dates de dépôt représentatives (Tableau 16).

Couple \ Date de dépôt	13/05	01/06	07/07	07/08	12/08	10/09
Talent Perpignan	0,06	0,16	0	0	0	0
Talent La Rochelle	0	0,08	0,12	0	0	0
Talent Châteauroux	0	0,02	0,12	0	0	0
Allure Toulouse	0	0	0,06	0,04	0,02	0
Allure Metz	0	0	0,04	0,04	0,04	0
Allure Rouen	0	0	0,02	0,05	0,04	0

Tableau 16 : Valeurs de FTds en fonction du site et de la variété à différentes dates

De même que pour FTds, le paramètre FTdh présente une grande variabilité au cours du temps. Le maximum de variabilité (valeur de 0 à 0,16 au maximum) s'observe du 1^{er} juin au 7 juillet, date de récolte la plus précoce pour Talent. Pendant la période de récolte de Talent, du 7 juillet au 12 août, le FTdh de Talent vaut soit 0 (récolte déjà faite) ou est sur sa phase décroissante (FTdh compris entre 0,06 et 0,12), alors que FTdh d'Allure est partout proche du maximum (0,04). La variabilité diminue donc par rapport à la première période. Du 12 août au 9 septembre, la valeur de FTdh de Talent est nulle partout, et celle d'Allure varie de 0 (récolte déjà effectuée) à 0,05 (maximum). Enfin, la plage de temps pendant laquelle le transfert maximal de radioactivité au grain atteint des valeurs comparables à celles survenant lors d'un dépôt sec est plus courte et concerne uniquement la variété Talent. Seules les variétés Talent à Perpignan, Nîmes, La Rochelle, Toulouse et Embrun prennent des valeurs de FTdh supérieures à 0,12 du 1^{er} juin au 7-10 juillet (Figure 35).

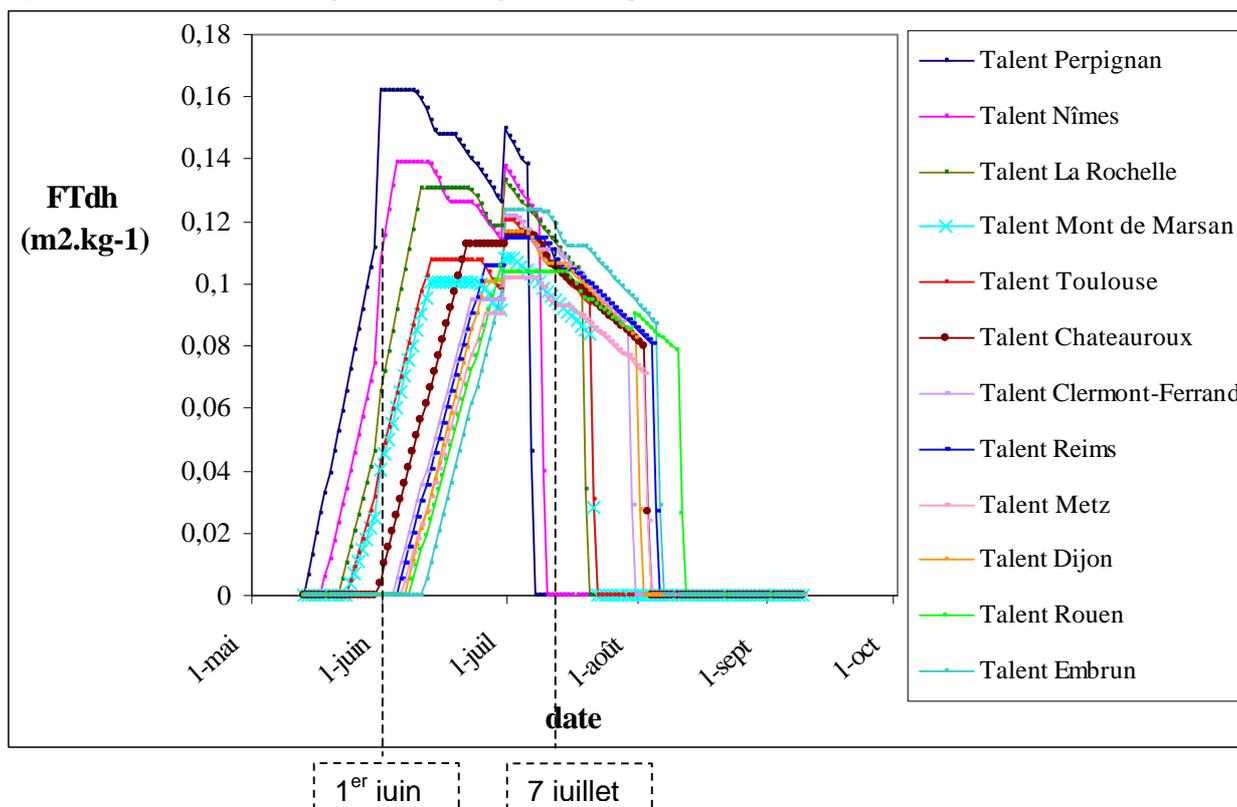


Figure 35 : Variabilité des valeurs de Ftdh, variété Talent

Du 13 mai (date de floraison la plus précoce) au 9 septembre (date de récolte la plus tardive), un dépôt radioactif contaminerait au moins un site de production en France.

Du 1^{er} juin au 7 août, cette contamination serait forte (12 à 16 %) sur 5 sites d'études et uniquement sur la variété Talent.

De début juin à début juillet, on relève les plus grands écarts entre sites (0 à 16 % en fonction des dates de floraison).

Du 7 juillet au 9 septembre (fin des récoltes), on note une moindre variabilité des contaminations entre les cas étudiés, par rapport à un dépôt sec. De plus, l'intensité même de contamination par voie humide est inférieure à celle qui se produit par temps sec.

9.2.3. Discussion

Les mesures effectuées sur le territoire français suite à l'accident de Tchernobyl permettent de confronter les résultats exposés ici à un cas réel. Le rejet du réacteur n°4 de la centrale de Tchernobyl, qui a explosé le 26 avril 1986, a duré 10 jours. La France a surtout été concernée par les rejets du 27 avril : ceux de la nuit dont le panache a abordé le territoire par l'est, et ceux de l'après-midi, dont le panache est remonté par le sud pour traverser le pays (trajet sud-est).

Suite à l'accident, le SCPRI (Service Central de Protection contre les Rayonnements Ionisants) a mené une campagne de mesure de l'activité des produits consommés par l'homme.

Seules les valeurs concernant le blé ont été relevées ici (SCPRI, 1986).

Sur les 326 mesures effectuées de mai à septembre 1986 dans 74 départements français, seules 10 dépassent le seuil de mesure du SCPRI qui était de 50 Bq.kg-1 frais à l'époque (Tableau 17).

Département	Ville	Date de prélèvement	134 Cs	137 Cs
Drôme	Valence	4-août	N.M	60
	Crest	4-août	N.M	N.M
	Crest	4-août	N.M	N.M
	St-Paul	5-août	N.M	N.M
	St-Vallier	5-août	N.M	N.M
	Crest	7-août	N.M	N.M
	Valence	19-août	N.M	N.M
	Valence	19-août	N.M	N.M
	St Paul	19-août	N.M	N.M
	Montélimar	2-sept	50	120
	St Vallier	2-sept	N.M	50
Ardèche	Chomerac	17-juil	N.M	60
	Chomerac	7-août	N.M	72
	Chomerac	7-août	N.M	N.M
Bouches-du-Rhône	Marseille	12-août	N.M	N.M
	Arles	12-août	N.M	N.M
	Meyrargues	13-août	N.M	N.M
	Trets	13-août	N.M	60
Vaucluse	Orange	12-août	N.M	N.M
	Ginasservis	13-août	N.M	N.M
	Bollène	20-août	N.M	100
	Bollène	20-août	60	140
	Sault	20-août	N.M	120
	Pertuis	20-août	N.M	80
	Apt	20-août	N.M	N.M

N.M. = Non mesurable

Tableau 17 : Activités mesurées sur le blé lors des campagnes de mai à septembre du SCPRI dans les 4 départements pour lesquels des mesures significatives ont été réalisées

Il semble donc que le blé français ait échappé, dans sa majorité, à la contamination liée au dépôt du 1^{er} au 5 mai de Tchernobyl. Ceci viendrait corroborer le résultat de la présente étude, selon lequel un dépôt survenant avant la floraison la plus précoce, soit le 13 mai, ne peut contaminer le blé.

Certaines réserves doivent cependant être émises. D'une part, la hauteur du seuil de détection a pu masquer la concentration réelle en 137 Cs dans le blé. Les prévisions d'ASTRAL pour un dépôt de 3000 Bq.m⁻², qui concordent avec les résultats d'autres mesures, indiquent en effet un ordre de grandeur de 10 Bq.kg⁻¹ frais dans le sud-est pour la récolte des céréales en 1986 (Renaud et al, 1999). D'autre part, certains départements ont été faiblement échantillonnés (Annexe 11). Enfin, on ne peut négliger les fortes activités décelées ponctuellement sur certains échantillons de la Drôme, de l'Ardèche, des Bouches-du-Rhône et du Vaucluse. Le département le plus touché semble le Vaucluse, puisque autour du 20 août, les cultures ont été contaminées à hauteur de 100 Bq.kg⁻¹ en plusieurs points du département. Deux hypothèses peuvent expliquer ces fortes activités. Soit les variétés cultivées étaient très précoces, leur date de floraison aurait donc été avancée par rapport aux autres variétés cultivées dans le même département. Cependant, cette hypothèse est contrecarrée par les estimations de dates de floraison de (Gate, 1995) du blé d'hiver. La date de floraison la plus précoce (dans le sud, pour une variété précoce) donnée est le 9 mai (Tableau 11). Une autre hypothèse serait que la contamination ne dépende pas entièrement de la date de floraison. En d'autres termes, un dépôt survenant avant la floraison pourrait néanmoins contaminer

le grain. On peut supposer que les aérosols radioactifs restent fixés aux feuilles, en l'absence de pluie, et soient transloqués vers le grain ultérieurement.

10. CONCLUSION

10.1. Intérêts et limites du travail

A l'issue de cette étude, on a pu proposer une tabulation opérationnelle des paramètres d'ASTRAL permettant de calculer l'ampleur d'une contamination accidentelle qui tienne compte de la régionalisation. La comparaison entre les valeurs de transfert recalculées d'après les sorties du logiciel STICS et celles d'ASTRAL a mis en évidence une différence pouvant atteindre un facteur 6 pour le paramètre FTdh. Cet écart, relevé dans le cas de la captation humide, a pu être expliqué par la prise en compte différente de la précipitation par rapport au choix d'ASTRAL. Par ailleurs, on a mis en évidence l'intérêt de la régionalisation dans l'estimation de la contamination des produits végétaux en cas d'accident. Il existe en effet des dates de dépôt pour lesquelles des régions peuvent échapper totalement à la contamination, alors que d'autres seront contaminées au maximum. Ces résultats sont synthétisés dans la figure 36.

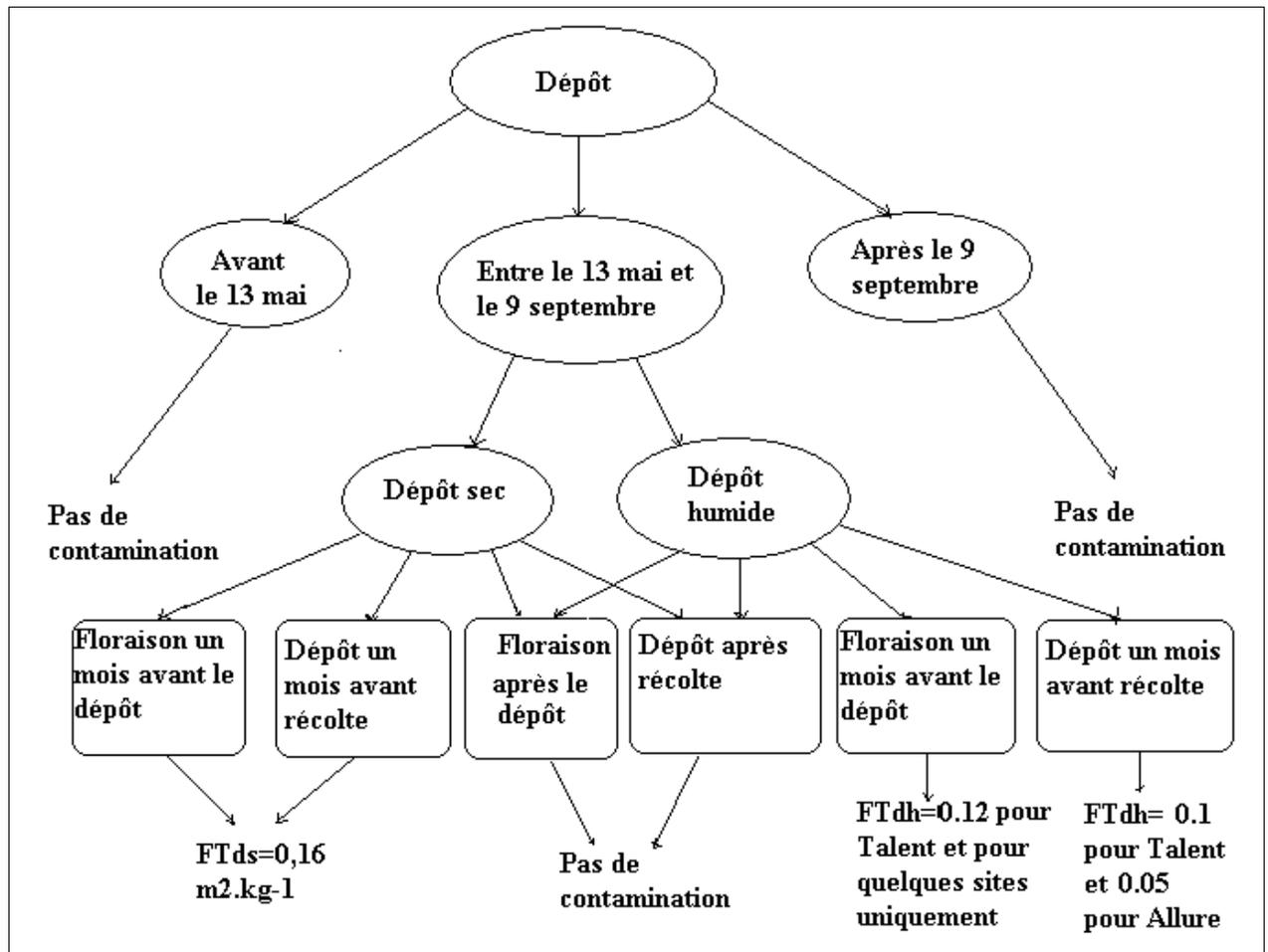


Figure 36 : Algorithme pour la prévision de la contamination des cultures de blé d'hiver

Les limites de l'étude ont déjà été signalées au cours de ce rapport. Rappelons notamment que l'indice foliaire ne peut rigoureusement représenter la surface captante, et qu'il ne rend pas compte de la géométrie du couvert. Quant aux simulations elles-mêmes, leur portée est réduite par les simplifications effectuées

(nombre de stations climatiques, pas de prise en compte de la variabilité inter-annuelle du climat, etc.). Par exemple, afin de calculer le LAI par grande zone climatique, on a considéré un climat-type de la région à partir de valeurs normales de Météo France, moyennées sur 30 ans, ce qui ne permet pas de tenir compte de la variabilité inter-annuelle du climat. Or la figure 4 montre bien que l'indice foliaire varie notablement entre deux années successives, à pratique culturale constante (irrigation ou non). A titre d'exemple, entre les années 1997 et 1998, on relève sur la figure 4 une différence de LAI_{max} allant de 3,5 à 5,5 sur le blé irrigué.

10.2.Perspectives

Il serait judicieux d'améliorer la qualité des simulations par une meilleure prise en compte de la variabilité climatique, des sols et des pratiques d'irrigation et de fertilisation. Ainsi, il serait intéressant de faire varier ces facteurs séparément, toutes autres valeurs égales par ailleurs, afin d'observer un éventuel stress hydrique ou azoté susceptible de retarder le parcours de développement.

Par ailleurs, on a vu que le facteur variété, plus précisément le facteur précocité, induit une variabilité importante dans tous les paramètres étudiés. Il serait donc intéressant d'étendre le nombre de variétés étudiées ici, en rentrant notamment sous STICS les caractéristiques de variétés très tardives et très précoces. L'étude pourrait également être élargie aux variétés de printemps, puisque seules les variétés d'hiver ont été prises en compte ici.

On pourrait aussi élargir le type de recherches effectué sur le blé aux autres membres de la classe ASTRAL dite "Céréales homme hiver", ce qui pourrait mettre en évidence des différences de contamination dues à des variations dans le parcours d'indice foliaire.

Ainsi la figure 37 montre-t-elle que le parcours de LAI de l'orge et du seigle est décalé dans le temps par rapport à celui du blé.

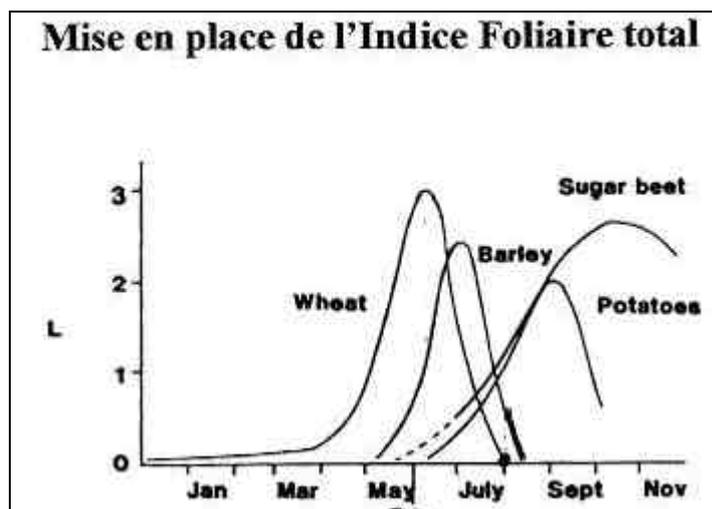


Figure 37 : Parcours de LAI des cultures de blé, d'orge, de betterave et de pomme de terre pour de faibles niveaux de fertilisation (d'après Watson 1947)

L'étude pourrait être étendue aux autres groupes de la typologie ASTRAL. En ce qui concerne les cultures maraîchères, l'objectif visé par des recherches ultérieures ne

porterait pas sur la régionalisation, puisque ces cultures sont majoritairement soumises à des conditions optimales standard sous serre. Il s'agirait plutôt de proposer des précisions pour le modèle ASTRAL, en opérant une distinction entre espèces classées dans une même catégorie de végétaux, en particulier dans les catégories « légumes-feuilles » et « légumes-fruit ». On tenterait de mettre en évidence parmi les membres de ces catégories des différences physiologiques qui influent sensiblement sur la valeur des paramètres d'ASTRAL.

Enfin, il importe de souligner que toute la démarche suivie, très théorique, a été basée sur des dates d'occurrence des stades précises, issues des simulations du modèle STICS, afin d'en déduire des délais dépôt-récolte.

Mais cette typologie n'est pas la plus judicieuse d'un point de vue agronomique. Ainsi, on ne peut prédire de façon sûre la date de récolte d'une culture. Celle-ci est en effet étroitement liée aux aléas climatiques imprévus, aux contraintes de l'agriculteur, etc.

C'est pour cette raison que, dans la pratique, le stade du blé est décrit plutôt à l'aide de l'échelle BBCH qu'en fonction du délai en jours restant avant la récolte. L'échelle BBCH a été mise au point conjointement par les firmes de produits phytosanitaires Bayer, BASF, Ciba-Geigy et Hoechst Agricultural Chemicals. Les stades BBCH (Annexe 12) sont déterminés à partir de l'observation de la plante (nombre de nœuds formés, allure des feuilles...).

Il serait donc utile, et plus proche de la réalité, d'exprimer les paramètres d'ASTRAL en fonction de ces stades. En cas d'accident, l'utilisateur rentrerait alors parmi les données d'entrée le stade BBCH de la culture au lieu de la date de dépôt.

11. LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : TYPOLOGIE ASTRAL DES PRODUCTIONS AGRICOLES VEGETALES.	10
TABLEAU 2 : COMPARAISON DES VALEURS DE TLF/RDT TIREES DE LA BIBLIOGRAPHIE POUR LE BLE.....	20
TABLEAU 3 : DESCRIPTIF DES PARAMETRES PEDOLOGIQUES MODIFIES EN VUE DES SIMULATIONS STICS	27
TABLEAU 4 : DESCRIPTIF DES PARAMETRES TECHNIQUES MODIFIES EN VUE DES SIMULATIONS STICS.....	28
TABLEAU 5 : VALEURS JOURNALIERES CLIMATIQUES PRISES EN COMPTE DANS LES SIMULATIONS.....	33
TABLEAU 6 : DATES DE REALISATION DES STADES DONNEES EN SORTIE PAR LE MODELE STICS.....	34
TABLEAU 7 : DATES DE RECOLTE PREVUE PAR STICS EN FONCTION DES SIMULATIONS	48
TABLEAU 8 : COMPARAISON DES DATES DE RECOLTE DU BLE D'HIVER ENTRE STICS ET L'ITCF.....	48
TABLEAU 9 : DELAI DEPOT-RECOLTE EN FONCTION DES SIMULATIONS	49
TABLEAU 10 : COMPARAISON DES DATES DE FLORAISON DES VARIETES PRECOCES	50
TABLEAU 11 : COMPARAISON DES DATES DE FLORAISON DES VARIETES TARDIVES.....	51
TABLEAU 12 : COMPARAISON DES VALEURS DE TRANSLOCATION POUR DIFFERENTS DELAIS AVANT RECOLTE	53
TABLEAU 13 : COMPARAISON DES VALEURS DE TRANSFERT SEC POUR DIFFERENTS DELAIS AVANT RECOLTE	55
TABLEAU 14 : COMPARAISON DES VALEURS DE TRANSFERT HUMIDE POUR DIFFERENTS DELAIS AVANT RECOLTE	57
TABLEAU 15 : VALEURS DE FTDS EN FONCTION DU SITE ET DE LA VARIETE A DIFFERENTES DATES	60
TABLEAU 16 : VALEURS DE FTDS EN FONCTION DU SITE ET DE LA VARIETE A DIFFERENTES DATES	62
TABLEAU 17 : ACTIVITES MESUREES SUR LE BLE LORS DES CAMPAGNES DE MAI A SEPTEMBRE DU SCPRI DANS LES 4 DEPARTEMENTS POUR LESQUELS DES MESURES SIGNIFICATIVES ONT ETE REALISEES	64

12. LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : RELATION ENTRE LE RAPPORT DE CAPTATION ET LA BIOMASSE SECHE PAR M ² DU BLE DE PRINTEMPS	14
FIGURE 2 : RAPPORT DE CAPTATION SECHE PAR LA CULTURE DE BLE EN PLACE EN FONCTION DE SON INDICE DE SURFACE FOLIAIRE (M ² .M ⁻²) ET COMPARAISON ENTRE LES RAPPORTS DE CAPTATION OBSERVES SUR LYSIMETRES, LE MODELE D'INTERCEPTION PROPOSE DANS ECOSYS- 87 ET UN MODELE DE TYPE EXPONENTIEL.	16
FIGURE 3 : ALLURE DE TLF POUR LE BLE D'HIVER EN FONCTION DU DELAI CONTAMINATION-RECOLTE	21
FIGURE 4 : VARIABILITE DES PARCOURS D'INDICE FOLIAIRE EN FONCTION DU CLIMAT ET DES PRATIQUES.....	22
FIGURE 5 : ORGANISATION ET INTERACTIONS DES MODULES DE STICS	23
FIGURE 6 : MODELISATION SELON STICS DE LA CROISSANCE FOLIAIRE DU MAÏS.....	25
FIGURE 7 : MOYENNE ANNUELLE DE L'ENERGIE REÇUE SUR UNE SURFACE ORIENTEE AU SUD ET INCLINEE D'UN ANGLE EGAL A LA LATITUDE (KWH.M ⁻² .J ⁻¹).	30
FIGURE 8 : VALEURS SAISONNIERES DE RADIATION SOLAIRE DIRECTE.	31
FIGURE 9 : EVAPORATION CUMULEE ANNUELLE, POUR L'ANNEE 1997.	32
FIGURE 10 : PARCOURS D'INDICE FOLIAIRE SELON LE SITE ET LA VARIETE, PAR DATE	35
FIGURE 11 : EFFET RELATIF DU CLIMAT ET DE LA VARIETE SUR LA VALEUR DE LAI AU TEMPS T	36
FIGURE 12 : RAPPORT DE CAPTATION SEC SELON LA DATE.....	38
FIGURE 13 : RAPPORT DE CAPTATION SEC SELON LE DELAI DEPOT-RECOLTE	38
FIGURE 14 : CARTE DES CLIMATS DE LA FRANCE.	39
FIGURE 15 : VARIABILITE DES PARCOURS D'INDICE FOLIAIRE EN FONCTION DU CLIMAT, VARIETE TALENT	41
FIGURE 16 VARIABILITE DES PARCOURS D'INDICE FOLIAIRE EN FONCTION DU CLIMAT, VARIETE ALLURE	41
FIGURE 17 : COURBES-TYPE DE LAI EN FONCTION DU DELAI DEPOT-RECOLTE	42
FIGURE 18 : COURBES-TYPE DE RCs EN FONCTION DU DELAI DEPOT-RECOLTE	42
FIGURE 19 : VARIATION DE LA CAPTATION POUR LE BLE SELON LES STADES PHENOLOGIQUES D'APRES RESSAC.....	43

FIGURE 20 : COMPARAISON DES COURBES DE RCh EN FONCTION DU DELAI DEPOT-RECOLTE	44
FIGURE 21 : VARIABILITE SAISONNIERE DES PRECIPITATIONS JOURNALIERES ENTRE 7 STATIONS	45
FIGURE 22 : VARIABILITE SAISONNIERE DES PRECIPITATIONS SUR 7 STATIONS CLIMATIQUES	45
FIGURE 23 : VARIATION DE RCh SELON LE SITE, VARIETE TALENT	46
FIGURE 24 : VARIATION DE RCh SELON LE SITE, VARIETE ALLURE	46
FIGURE 25 : COMPARAISON ENTRE LES VALEURS RECALCULEES DE RCh ET CELLES D'ASTRAL	47
FIGURE 26 : ALLURE DU RAPPORT TLF EN FONCTION DU SITE ET DU DELAI DEPOT-RECOLTE	52
FIGURE 27 : COMPARAISON DES VALEURS DE TLF CALCULEES ET BIBLIOGRAPHIQUES	53
FIGURE 28 : COMPARAISON DES VALEURS DE FTDS TABULEES DANS ASTRAL A CELLES RECALCULEES AVEC LES DONNEES DE STICS	54
FIGURE 29 : COMPARAISON DES VALEURS DE FTdH TABULEES DANS ASTRAL ET RECALCULEES D'APRES STICS, VARIETE TALENT	56
FIGURE 30 : COMPARAISON DES VALEURS DE FTdH TABULEES DANS ASTRAL ET RECALCULEES D'APRES STICS, VARIETE ALLURE	56
FIGURE 31 : COMPARAISON DES COURBES DE CAPTATION ET DE TRANSLOCATION DES CYCLES LES PLUS DECALES	58
FIGURE 32 : COMPARAISON DES COURBES DE RCh ET DE TRANSLOCATION DES EXTREMUMS	59
FIGURE 33 : VARIABILITE DES VALEURS DE FTDS POUR UNE DATE DE DEPOT T	60
FIGURE 34 : VARIABILITE DES VALEURS DE FTdH POUR UNE DATE DE DEPOT T	61
FIGURE 35 : VARIABILITE DES VALEURS DE FTdH, VARIETE TALENT	62
FIGURE 36 : ALGORITHME POUR LA PREVISION DE LA CONTAMINATION DES CULTURES DE BLE D'HIVER	65
FIGURE 37 : PARCOURS DE LAI DES CULTURES DE BLE, D'ORGE, DE BETTERAVE ET DE POMME DE TERRE POUR DE FAIBLES NIVEAUX DE FERTILISATION (D'APRES WATSON 1947)	66

13. RÉFÉRENCES

- Angeletti L., Levi E. (1977). *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
- Calmon Ph., Mourlon Ch. (2003) *Equations et paramètres du logiciel ASTRAL V2.1*. Rapport IRSN/SERLAB/ LMODE 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.
- Gate P. (1995). *Ecophysiologie du blé*, Lavoisier Tec &Doc
- Gonze M.A. (2000) *Bilan des intercomparaisons entre expérimentations sur lysimètres*. Rapport DPRE/SERLAB n°2000/01
- Hoffman F.O. (1989) *Pasture grass interception and retention of I 131, Be 7 and insoluble microspheres deposited in rain*. OAK-RIDGE laboratory, Environmental Sciences Divisions
- IAEA (1994). *Radionuclide Transfer in temperate Environments*, Vienna, Austria, Technical Report Series N°364
- ICRU, Journal of the ICRU (2002). *Quantity, Units and terms used in Radioecology*. ICRU Reports 65, Nuclear Technology Publishing
- IRSN, 2001 . *Identification et estimation des incertitudes associées aux évaluations de doses obtenues par le modèle mathématique du groupe Radioécologie Nord-Cotentin*. Rapport technique IRSN/DPRE/SERNAT 2001-13 p109.
- ITCF pour CEA Cadarache (1996) *Calendriers agricoles des stades-clé en grandes cultures*.
- Jamagne M., Bétrémieux R., Bégon J C., Mori A.,(1977). *Quelques données sur la variabilité dans le milieu naturel de la réserve en eau des sols*. Bull ; Tech Inf. 324-325 p119-157
- Madoz-Escande C., Henner P. (2003). *Transfert de radionucléides en milieu terrestre*. Document IRSN - DPE - Service d'Études et de Recherches Radioécologiques de Laboratoire - LRE. Cours de la session INSTN : "La radioécologie". p15
- Madoz-Escande C., Santucci P. (2004) *Synthèse des expérimentations de contamination foliaire par aérosols radioactifs*. Rapport IRSN/SECRE.
- Maubert et al. (1991). *Programme RESSAC- Acquis expérimentaux 1985-1990*. Document Commissariat à l'Energie Atomique/ Institut de protection et de Sûreté Nucléaire/Département de Protection de l'Environnement et des Installations/Service d'Etudes et de Recherches sur l'Environnement.
- Mercat-Rommens C. et Renaud P. (2003). *Rapport de lancement du projet Sensibilité Radioécologique*. Rapport IRSN/DEI/SESURE 2003-02.
- Müller H., Pröhl G.(1993). *ECOSYS-87 : a dynamic model for assessing radiological consequences of nuclear accidents*. Health Physics, vol 64
- Müller H., Pröhl G., (1988). *Cesium transport in food chains. Comparison of model prediction and observation*. CEC. *Reliability of radioactive transfer models*. Desmet.G. p 104
- Petroff A. (2002). *Etude phénoménologique du dépôt d'espèces aériennes sur un couvert végétal. Première synthèse bibliographique*. Rapport DPRE/SERLAB/02-28 ; p 29.
- Real J., Roussel-Debet S. (1995) *Paramètres mesurés en laboratoire lors d'expérimentations d'étude du transfert foliaire de radioéléments à des végétaux terrestres*. Rapport SERE 95/024/P

Renaud P., Maubert H. (1994). *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*. DPEI/ SERE/LMTR. Document SERE 94-046. p 11.

Renaud P. et al. (1997). *Contamination des productions agricoles de base suite à une émission atmosphérique accidentelle. Deuxième partie : Le modèle ASTRAL Crise*. DPEI/ SERE/LMTR. Document SERE 97-018. p 12.

Renaud P. Maubert H., Bernié J.C.(1997b). Prise en compte des paramètres contextuels en radioécologie post-accidentelle. *Radioprotection* vol 32, n°2, pp 181-195.

Renaud P. et al. (1999). *Les retombées en France de l'Accident de Tchernobyl. Conséquences radioécologiques et dosimétriques*. IPSN, EDP Sciences.

Renaud P. (2004). *Communication personnelle*.

Royo C., Aparicio N., Blanco R., Villegas D. (2004) *Leaf and green area development of durum wheat genotypes grown under Mediterranean conditions*. European Journal of Agronomy 20, p 424

SCPRI (1986). *Tableaux mensuels de mesures, mai-juin 1986, juillet 1986, août 1986, septembre 1986*.

Vandecasteele C.M. et al. (2001). *Interception, retention and translocation under greenhouse conditions of radiocaesium and radiostrontium from a simulated accidental source*. The Science of the Total Environment 278 (2001) p199-214.

Voigt, G., et al.,(1989) *Experimental determination of transfer coefficients of 137 Cs and 131I from fodder into milk of cows and sheep after the Chernobyl accident*, Health Physics.257 p 967-973.

Références des CD-Rom :

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

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

Références des Sites Internet :

Site Internet de l'INRA d'Avignon :

<http://www.avignon.inra.fr/stics/accueil/accueil.php>

Site Internet de l'INRA d'Orléans:

<http://www.inra.fr/afes/snas/base.htm>

Site Internet de l'Université de Picardie Jules Verne (cours de Jacques Beauchamp : L'eau et le sol):

<http://www.u-picardie.fr/~beaucham/mst/eau-sol.htm> le 16/06/04

Site Internet de Météo France : <http://www.meteofrance.com/FR/espacepro/produits/horsligne/stat.jsp>

Site Internet d'Environnement-Ecoles:

<http://environnement.ecoles.free.fr/Vin/CARTE120.jpg> le 27/05/03

Site Internet de l'ENPC (cours d'Eric Gaume du 2/11/2000. Hydrologie : cycle de l'eau et modélisation pluie-débit)

<http://www.enpc.fr/cereve/HomePages/gaume/coursh2.pdf>

Site Internet du bureau d'études TECSOL :

<http://www.tecsol.fr/imagehome/carte.jpg>

14. LISTE DES ANNEXES

- Annexe 1 : Bibliographie rassemblée sur le blé d'hiver
- Annexe 2 : Dates de semis et de labour choisies pour les simulations
- Annexe 3 : Choix des 12 stations en fonction du gradient de rayonnement
- Annexe 4 : Choix des 12 stations en fonction du gradient de précipitations
- Annexe 5 : Choix des 12 stations en fonction du gradient de températures (Janvier)
- Annexe 6 : Choix des 12 stations en fonction du gradient de températures (Juillet)
- Annexe 7 : Estimation des dates de récolte par région (ITCF)
- Annexe 8 : Valeurs de RCs d'ASTRAL (d'après RESSAC) et des RCs-type retabulés
- Annexe 9 : Valeurs des extremums de RCh recalculé
- Annexe 10 : Comparaison des tabulations de TLF
- Annexe 11 : Nombre d'échantillons prélevés par département de mai à septembre 1986 pour la détermination de l'activité massique du blé
- Annexe 12 : Les stades BBCH du blé

ANNEXES

Annexe 1 : Bibliographie rassemblée sur le blé d'hiver

• Alternativité

Elle désigne le besoin de vernalisation, mais ne préjuge pas de la précocité. De même que la précocité, l'alternativité est une caractéristique variétale. Les variétés sont classées de « très hiver » à « printemps » en passant par « alternatives », selon leur besoin de vernalisation.

L'alternativité d'une variété définit sa période de semis. Ainsi, une variété dite alternative se sème de l'automne au début du printemps (15 mars), tout en se développant normalement à la belle saison. Une variété d'hiver se sème à l'automne, et une variété de printemps se sèment en avril (en région parisienne).

Une espèce ou une variété est dite semi-alternative si elle peut être semée de l'automne à la fin janvier ; elle est dite de demi-hiver si elle peut être semée de l'automne à la mi-janvier.

Cette caractéristique variétale doit être prise en compte en cas de semis tardif, en sortie d'hiver, car alors le besoin de basses températures risque de ne pas être satisfait.

• Variétés

Ce sont des lignées pures. Il existe en France plus d'une centaine de variétés inscrites au catalogue officiel, qui permettent de répondre à des demandes très diverses. Elles sont notées par l'ITCF en fonction de leur productivité et de leur précocité. Les variétés les plus cultivées en France sont les variétés d'hiver ou semi alternatives et classées en panifiable supérieur. Les variétés de printemps sont quasiment abandonnées et ne seront utilisées que dans certaines circonstances particulières (destruction accidentelle d'une culture nécessitant un nouveau semis de printemps). En France, seulement 10 variétés occupent 72% de la sole de blé.¹

3 variétés de blé panifiables sont de plus en plus utilisées ces dernières années : Apache, Isengrain, Trémie⁵.

Dans une même région, la gamme des variétés utilisées par les agriculteurs relève de la stratégie de l'exploitant. Cependant, si le choix variétal est différent d'une exploitation à l'autre, il reste basé sur les mêmes critères : c'est leur hiérarchie qui diffère.

¹ ITCF, *Blé tendre: Marchés, débouchés, techniques culturales, récolte et conservation*, Editions ITCF

Régions	Précocité	Aptitude au tallage	Résistance										
			Echaudage Sécheresse	Froid	Egrenage	Germi- nation	Verse	Oidium	Rouille			Septoria modiorum	Fusarium roseum
									noire	jaune	brune		
Nord-Normandie ...	↓ tardive ↓ précoce				X	XX	X		X	X	XX	XX	X
Plateaux du Massif Central et situation d'altitude	↓ tardive ↓ précoce		X				X	X				X	X
Ouest ...	↓ précoce	X	X		X	XX	XX			X		XX	X
Bassin Parisien	↓ précoce précoce	X	X				XX	X		X	X	XX	X
Est ...	↓ précoce précoce	X	X	XX			X	X		X	X	X	X
Centre-Ouest ...	précoce	XX	XX				X	X		X	X	X	X
Plaines du Centre	précoce	XX	XX				X		X				XX
Sud-Ouest ...	précoce	XX	XX	X			X	X	X	XX		X	X
Sud-Est ...	précoce très précoce	XX	XX	XX			X	X		X		X	X

Tableau 1 : Importance relative des critères de choix selon les régions (ITCF)

La précocité : Il s'agit de l'aptitude d'une variété à atteindre un stade donné de développement plus rapidement qu'une autre. La précocité est une qualité recherchée lorsque l'on veut raccourcir le cycle végétatif dans les régions où la durée de la saison propice aux cultures est courte. Exemple : sur sols séchants ou dans les régions où la probabilité que la température excède 25° C en juin-juillet est forte, on choisit une variété précoce (alors le remplissage du grain se fera avant le coup de chaleur, on limite ainsi le risque d'échaudage). La gamme de précocité disponible en France va de Récital (très précoce ; note 8.5) à Tilburi et Vivant (4.5, très tardif).

	Précocité	Résistance : Sécheresse Echaudage	Aptitude au Tallage	Alternativité	Résistance							
					Froid	Verse	Astigmimides	Oidium	Pâtin-Verse	Septoriose	Fusariose	
Sols argileux et profonds						X				X	X	
Sols siliceux et superficiels	X	X							X		X	
Mauvaises conditions de semis			X		X							
Date de semis			X	X	X					X	X	
Densité de semis			X		X			X		X	X	
Profondeur de semis			X		X							
Sols sains, apport précoce d'azote	X	X	X									
Disponibilité du sol et exigence en azote					X			X	X			
Fonds de vallée, gel sur épis	X											
Sols envahis de graminées							X					
Appâttement céréalière												X

Tableau 2: Choix des variétés en fonction des sols et des techniques culturales

Pour tester la productivité des variétés, l'ITCF met en place des essais régionaux lors desquels les rendements des différentes variétés sont comparés à celui d'un témoin 100 qui représente la moyenne de productivité de variétés très cultivées.

Nom variété	tendre/dur	Alternativité	Nbre de degré-jours nécessaires entre le stade levée et floraison	Nbre de degré-jours nécessaires entre le stade floraison et maturité	Total depuis la levée	Précocité
Sideral	tendre	hiver	692	700	1392	Précoce
Talent	tendre	½ hiver, ½ alternatif	692	700	1392	Précoce
Ambral	dur	hiver	657	750	1407	Précoce
Ardente	dur	hiver	657	750	1407	Précoce
Soissons	tendre	hiver	722	700	1422	1/2 précoce
Thesée	tendre	½ hiver	732	700	1432	½ précoce, ½ tardive
Acalou	dur	hiver	703	750	1453	½ précoce, ½ tardive
Promentin	tendre	hiver	762	700	1462	Précoce
Neodur	dur	hiver	722	750	1472	½ précoce, ½ tardive
Artimon	dur	hiver	750	750	1500	½ précoce, ½ tardive
Arminda	tendre	Très hiver	837	700	1537	½ précoce, ½ tardive
Nefer	dur	hiver	897	750	1647	tardive
Lloyd	dur	hiver	900	750	1650	tardive
Or jaune	dur	hiver	955	750	1705	tardive
Allur	dur	hiver	960	750	1710	tardive
Arcalis	dur	hiver	960	750	1710	tardive

Tableau 3: Liste des variétés disponibles sous STICS

En bleu : caractéristiques supposées mais qui n'ont pu être vérifiées par une source bibliographique

En vert : valeurs disponibles dans les fichiers-plante propres au blé sous STICS

En orange : caractéristiques déduites du classement des variétés de STICS dans les fichiers-plantes intitulés « blé.plt » (blé tendre) ou « blédur.plt ».

En marron : caractéristiques de précocité relevées dans (Soltner, 1990, p 58)

En rose : caractéristiques de précocité déduites de celles relevées dans (Soltner, 1990), au vu du besoin total en somme de températures depuis la levée.

• **Date de semis** :

➤ Les travaux de modélisation du développement du blé ont permis à l'ITCF de mettre au point des recommandations techniques, pour le choix des variétés et des dates de semis, dans le but de limiter dans une région donnée, à la fois les risques de gel d'épis au début de la montaison et d'échaudage des grains en fin de cycle.²

Risque d'échaudage : Au moment de la maturation du grain, les réserves migrent des feuilles jaunissantes aux grains, ce qui nécessite une circulation d'eau dans la plante. Si à ce moment

² Combe L., D. Picard. *Elaboration du rendement des principales cultures annuelles*, INRA Editions

l'évaporation est trop forte, la plante se dessèche brusquement sans que les réserves aient eu le temps de migrer. Le grain privé de ses réserves sera ridé et léger.

Tableau 4 : Conseils de date de semis, par variété et par région (ITCF)

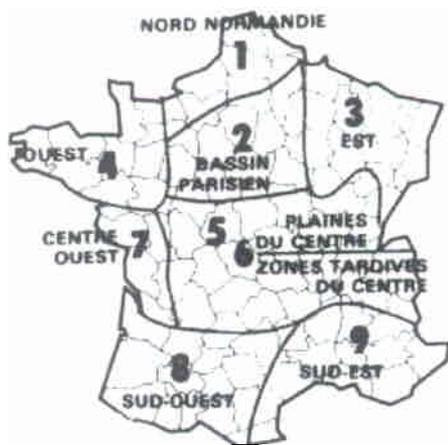


Figure 1 : Dates limites de semis en fonction de la région et du degré d'alternativité des variétés

Région	Type de blé (exemple)	Très hiver	Hiver	1/2 hiver	1/2 alternatif	Alternatif	Printemps
		Adam Armada	Aquila Capitole	Hardi	Talent	Fidel	Wim
1		1 ^{er} oct. 20 nov.	10 oct. 1 ^{er} janv.	10 oct. 1 ^{er} fév.	10 oct. 15 fév.	10 oct. 1 ^{er} mars	20 fév. 15 avril
2		1 ^{er} oct. 10 nov.	10 oct. 1 ^{er} déc.	10 oct. 15 janv.	10 oct. 10 fév.	10 oct. 1 ^{er} mars	20 fév. 1 ^{er} avril
3		1 ^{er} oct. 10 nov.	1 ^{er} oct. 1 ^{er} déc.	1 ^{er} oct. 15 janv.	10 oct. 15 fév.	10 oct. 15 mars	20 fév. 1 ^{er} avril
4		10 oct. 15 nov.	10 oct. 15 déc.	10 oct. 15 janv.	10 oct. 1 ^{er} fév.	1 ^{er} nov. 1 ^{er} mars	10 fév. 1 ^{er} avril
5-6		1 ^{er} oct. 15 nov.	10 oct. 1 ^{er} déc.	10 oct. 10 janv.	10 oct. 15 janv.	10 oct. 1 ^{er} fév.	20 fév. 10 mars
7		20 oct. 5 nov.	20 oct. 5 déc.	20 oct. 5 janv.	20 oct. 15 janv.	1 ^{er} nov. 15 fév.	10 fév. 15 mars
8		15 oct. 1 ^{er} déc.	15 oct. 1 ^{er} déc.	15 oct. 15 déc.	15 oct. 1 ^{er} janv.	15 oct. 1 ^{er} fév.	15 oct. 15 mars
9		20 oct. 20 nov.	20 oct. 20 nov.	20 oct. 20 déc.	20 oct. 20 déc.	20 oct. 10 fév.	20 oct. 10 fév.

+ La date de semis par régions et le choix variétal de l'agriculteur sont donc étroitement corrélés.

+ Blé d'hiver : En général, on sème courant octobre/novembre, parfois en décembre quand la récolte de la culture précédente est tardive (betterave sucrière) ou quand la pluviométrie d'automne retarde le semis.³

Blé de printemps : selon les régions, pour la variété Wim : du 20 octobre au 10 février (semis le plus précoce, dans le Sud Est) au 20 fév-15 avril (semis le plus tardif, Nord Normandie)

+ Une variété semée précocement est plus productive qu'une variété semée plus tardivement.

+ La date de semis influe aussi sur les besoins en somme de température du blé⁴. Ainsi, de la date de semis vont dépendre :

- la date du stade levée
- la date du stade 3 feuilles
- la date du stade épi 1 cm
- la date du stade épiaison

• Rythme de développement :

³Mazoyer M et al. (2002) *Larousse agricole: Le monde paysan au XXIème siècle*, Ed Larousse, p 99

⁴ Gate P, *Ecophysiologie du blé*, Lavoisier Tec &Doc

Pour une variété donnée, les dates d'occurrence des stades du blé dépendent essentiellement des températures et photopériodes subies depuis la germination⁵ (P. Gate).

Entre semis et levée : Cette phase est indépendante de la photopériode.

Le besoin en somme de température va de 130 à 150 °.j , pour une température de base de 0°C.

- Pour un semis très précoce, (première décade du mois d'octobre), la durée de la période semis-levée dure de 8 à 10 jours.
- Pour un semis très tardif de décembre, étant donné que les températures sont plus basses après le semis, le stade levée peut apparaître après 30 ou 40 jours seulement.
- Cas moins extrêmes : 10 à 15 jours pour un semis d'octobre
15 à 20 jours pour un semis de novembre
20 à 40 jours (voire plus) pour un semis de décembre

Stade 2-3 feuilles : Cette phase est indépendante de la photopériode.

Le **phyllotherme** est la somme de température qui sépare le dégainement entre deux feuilles successives. Il peut être estimé à 100° C en moyenne en base 0°C pour le blé tendre. La gamme de durée du phyllotherme va de 160°C (semis précoce) à 75°C (semis tardif).

L'avancement du stade foliaire du blé dur reste généralement identique ou plus lent que celui du blé tendre.

Ph. Gate propose la modélisation suivante : une plantule est au stade 2 feuilles quand elle a reçu l'équivalent d'1 phyllotherme depuis la levée, au stade 3 feuilles quand elle a reçu 2 phyllothermes, etc..

Notons cependant qu'en réalité, la progression du stade foliaire est réglé par la *durée du jour* et la *rayonnement au moment de la levée*, si bien que le phyllotherme varie selon les conditions d'implantation. La valeur du phyllotherme peut être estimée grâce à la date de semis, qui prend en charge une part importante des fluctuations de ces facteurs.

- Dates de réalisation du stade 2-3 feuilles : du Nord au Sud, entre 40 à 50 jours après le semis.

Stade début tallage: ce stade survient quand le brin-mâitre possède en moyenne 3,5 feuilles. On peut aussi estimer l'occurrence du stade à partir de la date de levée, ce qui s'avère plus précis. Il est alors atteint quand la plante a reçu l'équivalent de 2.5 phyllothermes depuis la levée, soit environ 300 °C pour un blé.

Stade plein tallage : Conventionnellement, on le définit comme le moment où les plantes portent 2 à 3 talles.

Date de réalisation : février-mars

Stade épi 1 cm : L'estimation de la date d'apparition de ce stade est complexe, car elle fait intervenir l'action combinée de trois facteurs de nature différente et indépendants : besoins en vernalisation, en durée du jour et en somme de température, qui sont des caractéristiques génétiques.

On peut estimer la date de réalisation de ce stade par les besoins en température cumulée depuis le semis ou la levée définis par petites régions climatiques homogènes (mêmes niveaux

de latitude et d'altitude). A l'échelle de la France, les **besoins** varient de 650°C à 1250°C **selon les variétés et les dates de semis.**

Tableau 5 : Dates moyennes de réalisation du stade Epi 1 cm (D'après P. Gate)

	Variétés précoces	Demi-précoces	Variétés tardives
Nord	20 mars	1 ^{er} avril	10 avril
Sud Bassin Parisien	15 mars	25 mars	5 avril
Sud	5-10 mars	15 mars	20-25 mars

Ces dates correspondent à des dates moyennes : variétés semées à leur périodes de semis optimales compte tenu de leur précocité au stade épi 1 cm, et en conditions climatiques normales pour la région décrite.

Stade 1-2 nœuds : en modélisation, on estime qu'il est atteint quand la plante a reçu environ 250°C (base 0) depuis le stade épi 1 cm (cette somme tendant à être plus faible quand le stade épi 1 cm est tardif).

Dates moyennes de réalisation : - Nord : fin avril-début mai
 - Sud Bassin parisien : 2^{ème} quinzaine d'avril
 - Sud : 1^{ère} quinzaine d'avril

Pendant les 20 jours avant l'épiaison, un déficit hydrique a un fort impact sur la formation de l'indice de surface foliaire.

Stade épiaison : par milieu et par type de variété, il est possible d'estimer la date d'apparition de ce stade par un cumul de température (base 0) depuis le semis. Cette somme tend vers un maximum en semis très précoce (durée du jour limitante et nombre de feuilles élevé) pour diminuer avec la tardiveté du semis et atteindre un minimum pour les semis de janvier. Cette durée varie entre 1200 et 1900°C en fonction de la variété et de la date de semis.

Tableau 6: Dates moyennes de réalisation du stade épiaison (d'après P. Gate)

	Variétés précoces	Demi-précoces	Variétés tardives
Nord	20-25 mai	25 mai-1 ^{er} juin	1 ^{er} -15 juin
Sud Bassin Parisien	15-20 mai	20-25 mai	25 mai-5 juin
Sud	1 ^{er} -10 mai	10-20 mai	20 mai-1 ^{er} juin

Floraison :

Elle a lieu en moyenne 8 jours après l'épiaison (entre 4 et 15 jours). Le facteur climatique le plus déterminant de la durée entre épiaison et floraison est la température. En moyenne, cette durée équivaut à 145 °C.

Tableau 7: Dates moyennes de réalisation du stade Floraison (d'après P. Gate)

	Variétés précoces	Demi-précoces	Variétés tardives
Nord	28 mai-1 ^{er} juin	1 ^{er} -9 juin	9-23 juin
Sud Bassin Parisien	23-28 mai	28 mai-1 ^{er} juin	1 ^{er} -13 juin
Sud	9-18 mai	18-28 mai	28 mai-9 juin

Début de remplissage du grain : Entre l'anthèse et fin remplissage des grains (phase indépendante de la photopériode) , les besoins en somme de température s'élèvent à 625°C (Tbase 6°C). Pendant la maturation du grain, un déficit hydrique a un fort impact sur la formation de l'indice de surface foliaire.

Annexe 2 : Dates de semis et de labour choisies pour les simulations

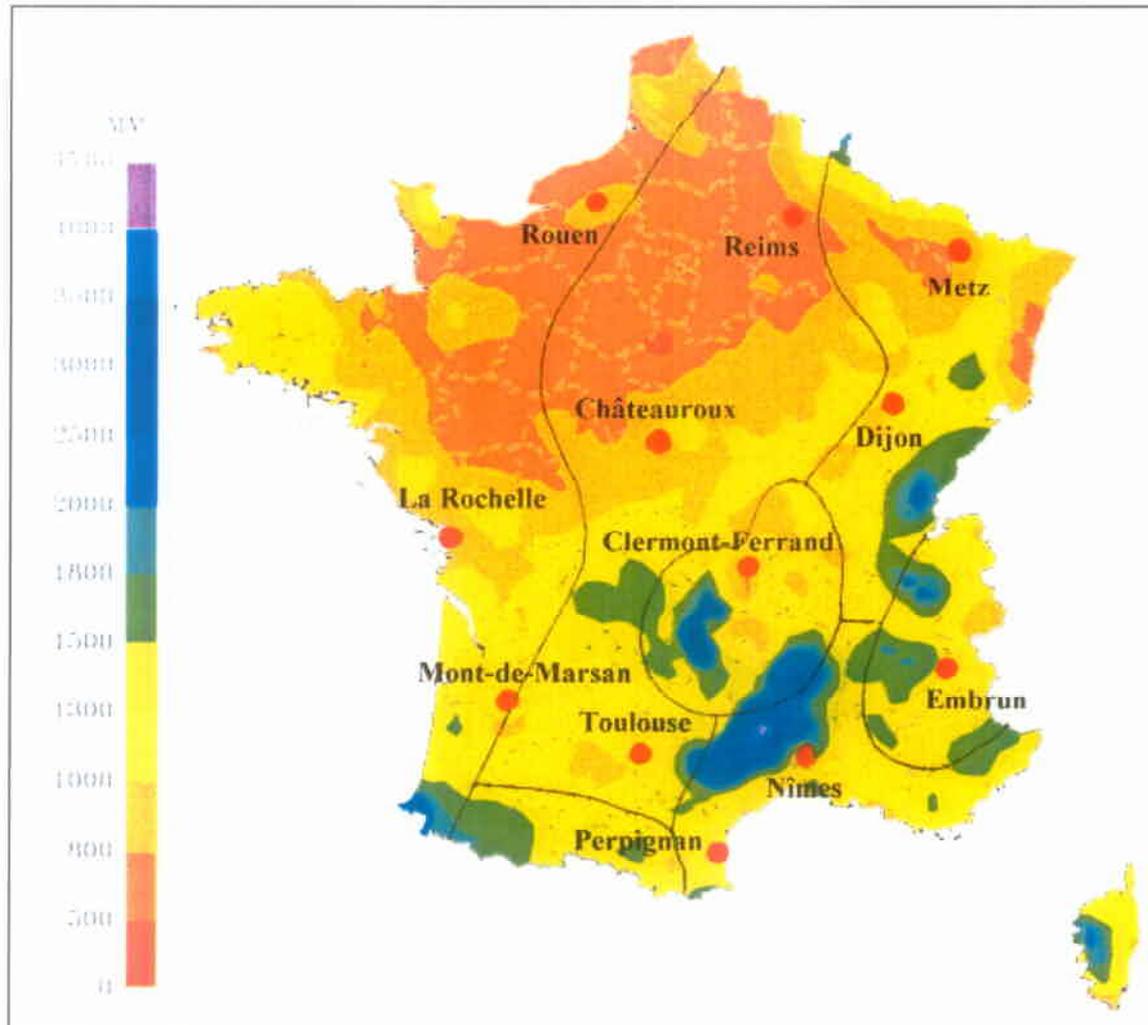
Station	date de travail du sol	Date de semis choisie pour la simulation
Rouen	30/9	4/10
La Rochelle	30/9	26/10
Mont-de-Marsan	14/9	14/11
Reims	24/9	4/10
Dijon	24/8	4/10
Embrun	31/7	26/10
Nîmes	24/8	14/11
Perpignan	24/8	14/11
Clermont-Ferrand	31/8	26/10
Châteauroux	24/8	4/10

Annexe 3 : Choix des 12 stations en fonction du gradient de rayonnement

Chaque carte présentée en annexe 3, 4, 5, 6 représente la variabilité spatiale d'une variable climatique influençant le cycle de développement du blé d'hiver (rayonnement, température, précipitations). A partir de la carte des 5 climats de la France (figure 14 du rapport), on a retracé sur chaque carte les limites de chaque zone climatique (en noir). Puis on s'est efforcé de caractériser l'hétérogénéité des valeurs de chaque zone via le positionnement des stations (points rouges)



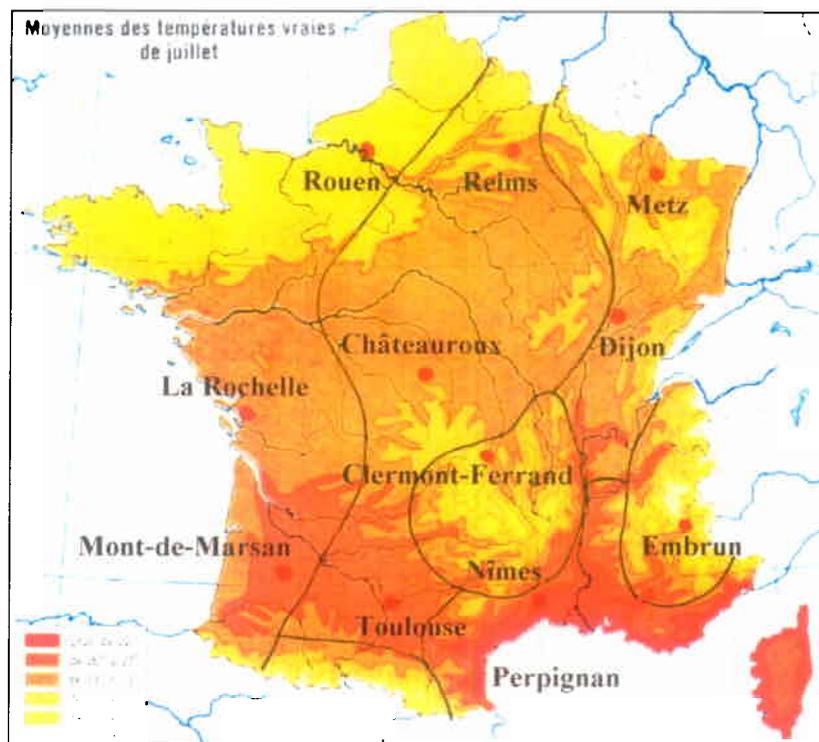
Annexe 4 : Choix des 12 stations en fonction du gradient de précipitations



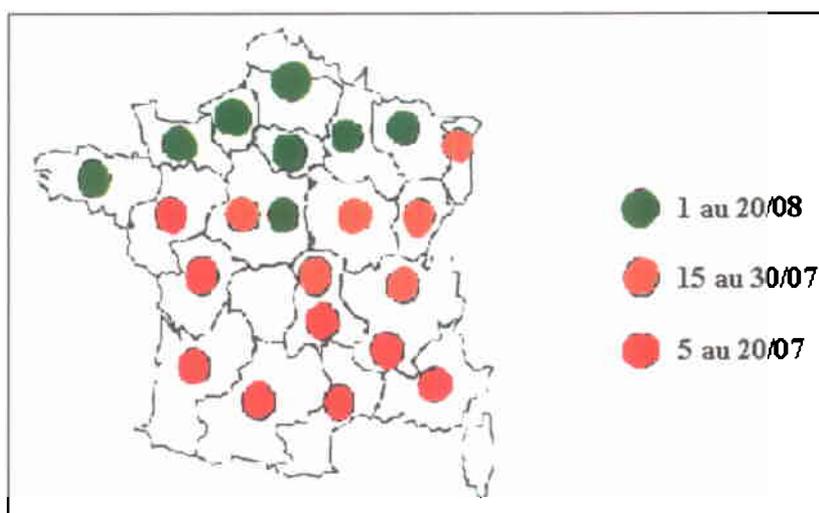
Annexe 5 : Choix des 12 stations en fonction du gradient de températures (Janvier)



Annexe 6 : Choix des 12 stations en fonction du gradient de températures (Juillet)



Annexe 7 : Estimation des dates de récolte par région (ITCF)



Annexe 8 : Valeurs de RCs d'ASTRAL (d'après RESSAC) et des RCs-type retabulés

Nb jours avant récolte	RCs-type recalculé, variété Talent	RCs-type recalculé, variété Allure	Rcmin RESSAC	Rcmax RESSAC
0	0,8	0,8	0,35	0,7
10	0,8	0,8	-	-
20	0,8	0,8	-	-
30	0,8	0,8	0,35	0,7
40	-	-	0,35	0,7
50	0,8	0,8	-	-
60	0,8	0,8	-	-
80	-	-	0,3	0,7
90	0,75	0,78	-	-
100	0,66	0,74	-	-
110	-	-	0,35	0,7
120	0,42	0,6	-	-
140	-	-	0,35	0,7
150	0,19	0,4	-	-

Annexe 9 : Valeurs des extremums de RCh recalculé

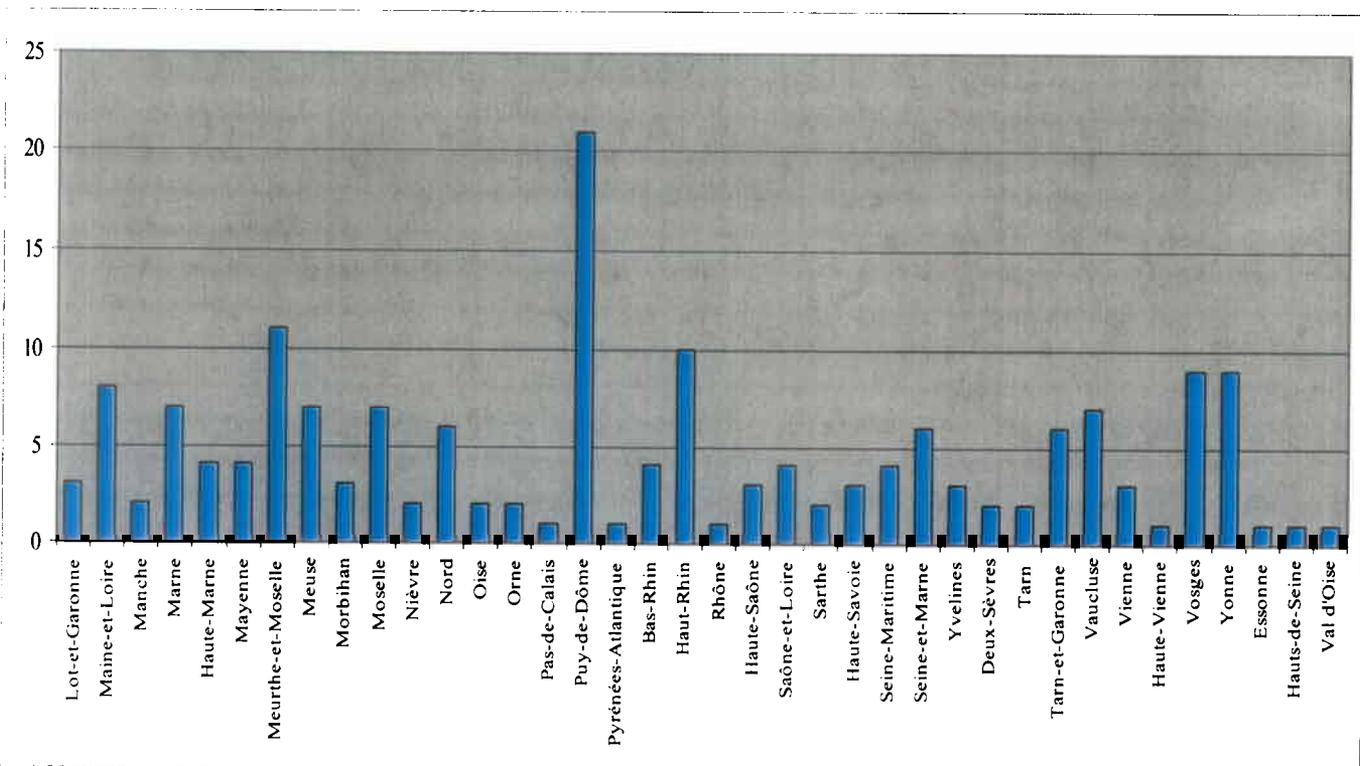
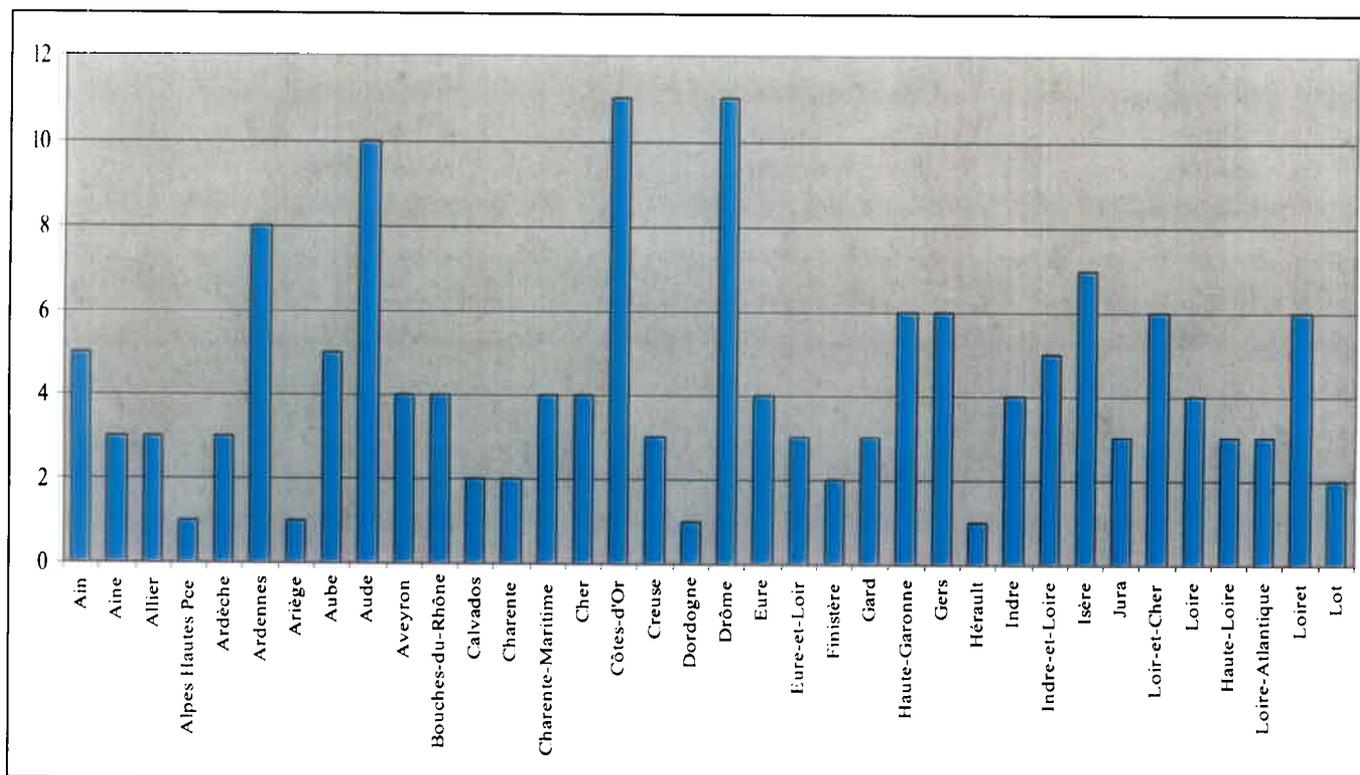
délai avant récolte	RCh Astral	Valeur minimale de RCh recalculée, variété Talent	Valeur maximale de RCh recalculée, variété Talent	Valeur minimale de RCh recalculée, variété Allure	Valeur maximale de RCh recalculée, variété Allure
5	0,11	0,46	0,89	0,19	0,42
30	0,15	0,52	0,81	0,22	0,37
50	0,15	0,45	0,65	0,23	0,36
90	0,30	0,27	0,42	0,14	0,20
120		0,11	0,12	0,08	0,11

Annexe 10 : Comparaison des tabulations de TLF

délai dépôt-récolte	TLF _{ECOSYS}	valeur minimale de TLF calculée d'après les dates de floraison de STICS (Talent/Nîmes)	valeur maximale de TLF calculée d'après les dates de floraison de STICS (Allure/Rouen)	TLF _{IAEA}
0	0,075	0,075	0,075	-
10	-	-	-	0,025
18	-	0,100	-	-
20	-	-	-	0,1
25	-	-	0,100	-
30	0,1	-	-	-
36	-	0,1	-	-
40	-	-	-	0,1
50	-	-	0,1	-
55	0,1	0	-	-
60	-	-	-	0,05
74	-	-	0	-
90	-	-	-	0,01
95	0,005	-	-	-
150	0	-	-	-

***NB :** On a respecté la tabulation donnée dans la bibliographie pour les valeurs d'ECOSYS et de l'IAEA. Les valeurs correspondant aux intervalles intermédiaires doivent être interpolées linéairement (les points ont donc été reliés par des droites)..*

Annexe 11 : Nombre d'échantillons prélevés par département de mai à septembre 1986 pour la détermination de l'activité massique du blé



Annexe 12 : les stades BBCH du blé

