



HAL
open science

Modélisation de la croissance, des relations sources-puits et du rendement en sucre de la betterave sucrière (*Beta vulgaris* L.) sous des régimes contrastés de nutrition azotée

Anne Didier

► To cite this version:

Anne Didier. Modélisation de la croissance, des relations sources-puits et du rendement en sucre de la betterave sucrière (*Beta vulgaris* L.) sous des régimes contrastés de nutrition azotée. Sciences agricoles. AgroParisTech, 2013. Français. NNT : 2013AGPT0040 . pastel-00949047

HAL Id: pastel-00949047

<https://pastel.hal.science/pastel-00949047>

Submitted on 19 Feb 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Doctorat ParisTech

THÈSE

pour obtenir le grade de docteur délivré par

L'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (AgroParisTech)

Spécialité : Sciences agronomiques et écologiques

présentée et soutenue publiquement par

Anne DIDIER

le 4 juin 2013

Modélisation de la croissance, des relations sources-puits et du rendement en sucre de la betterave sucrière (*Beta vulgaris* L.) sous des régimes contrastés de nutrition azotée

Directeur de thèse : **Bertrand Ney**

Jury

M. Bertrand Ney, Professeur, AgroParisTech
M. Jacques Caneill, Professeur, AgroSup Dijon
M. Ghislain Gosse, Directeur de Recherche émérite, INRA
Mme Marie Launay, Ingénieure de Recherche, INRA
M. Alain Mollier, Chargé de Recherche 1^{ère} classe, INRA
M. Marc Richard-Molard, Directeur Général Institut Technique de la Betterave

Directeur
Rapporteur
Rapporteur
Examinatrice
Examinateur
Examinateur

Remerciements

Ce travail achevé, je tiens tout d'abord à adresser mes remerciements à Marc Richard-Molard, directeur général de l'Institut Technique de la betterave qui m'a accueillie pendant ces trois années. Je remercie également mes deux encadrants, Bertrand Ney, directeur de mon projet de thèse, et Fabienne Maupas ma responsable à l'ITB, pour l'engagement qu'ils ont montré, les conseils qu'ils m'ont donné et pour leur disponibilité.

Je remercie les membres de mon comité de pilotage de thèse, Bertrand Ney, Fabienne Maupas, Carolyne Durr, Alain Mollier et Paul-Henry Cournède pour l'attention qu'ils ont pu porter à mon travail, leurs conseils et leurs encouragements.

Je tiens également à remercier les membres du jury qui ont accepté de lire et d'examiner ce travail, Jacques Caneill et Ghislain Gosse, rapporteurs, et Bertrand Ney, Marie Launay, Alain Mollier et Marc Richard-Molard.

Durant ces trois années, j'ai eu la chance et le plaisir de bénéficier de l'encadrement de Fabienne Maupas. Ta disponibilité et ton expertise ont grandement participé à la réalisation de ces travaux. Tu as toujours veillé à mettre à ma disposition l'ensemble des moyens humains et techniques nécessaires allant même jusqu'à donner beaucoup de ton temps lors des expérimentations. J'ai énormément appris à tes côtés et je ressors grandie de ces trois années de travail.

Je tiens à remercier toute l'équipe de l'ITB pour sa sympathie et pour l'intérêt montré envers mon travail. Les expérimentations réalisées ont demandé un travail très important et n'auraient pu être menées à bien sans une participation nombreuse. Alors pour leur investissement et leur bonne humeur dans les champs ou au labo pour les mesures je tiens à remercier : Arnaud et Jacques (les trublions de service qui ont donné une note de bonne humeur à ce dur labeur !), Jean-Charles, François, Marc, Pascal, Ulrich, Sébastien, Rémy, Céline et Fabienne (j'en oublie sûrement, excusez-moi), ainsi que les pauvres apprentis et stagiaires qui ont dû venir m'aider également, je pense en particulier à Sylvie, Pauline et Marie, mais il y en a eu bien d'autres. Je tiens aussi à remercier spécialement Sylvain Molet, pas vraiment ITB mais tout comme, qui a participé sans relâche et avec entrain à toutes les expérimentations, tous les prélèvements de plantes et toutes les mesures menées pendant cette thèse. J'ai vraiment apprécié ta bonne humeur et ta gentillesse, ton aide m'a été très précieuse. J'ai également une pensée spéciale pour Céline, ma colocataire de bureau, nos discussions passionnées et interminables me manqueront beaucoup, merci pour ton attention et ta présence dans les bons comme dans les mauvais moments.

Un grand merci également à Charlotte Baey, doctorante à l'ECP et à Sébastien Lemaire, ancien thésard à l'ITB converti en informaticien, pour m'avoir initiée à la

programmation avec le logiciel R, et pour avoir partagé vos connaissances et vos idées dans le domaine.

Enfin je tiens à remercier ma famille, mes parents et mon frère, pour leurs encouragements et leur soutien. Je tiens particulièrement à remercier mon compagnon qui a dû subir mes états d'âmes pendant ces trois années (enfin surtout à la fin !). Ton soutien indéfectible m'a permis de ne jamais baisser les bras et de pouvoir me consacrer le mieux possible à la finalisation de ce travail, pour cela et tout le reste encore merci.

Modélisation de la croissance, des relations sources-puits et du rendement en sucre de la betterave sucrière (*Beta vulgaris* L.) sous des régimes contrastés de nutrition azotée

Résumé :

La filière betteravière française cherche à gagner en productivité afin d'obtenir des rendements en sucre économiquement satisfaisants. La fertilisation azotée est l'un des principaux facteurs influençant le rendement de la betterave sucrière. De nombreux modèles ont pour but de simuler le rendement en sucre de la betterave mais peu prennent en compte l'effet des conditions de nutrition azotée.

Dans ce contexte, les objectifs de ce travail étaient: (i) de mener une réflexion conduisant au choix du type de modélisation, (ii) d'identifier les caractéristiques de la plante en réponse à la nutrition azotée pour le paramétrage du modèle, et (iii) d'évaluer notre modèle.

La démarche de modélisation s'est concentrée sur l'intégration des effets de la nutrition azotée sur l'élaboration de la surface foliaire, et sur les relations source-puits au sein de la plante. Des expérimentations au champ sur deux années nous ont permis d'acquérir les données nécessaires à l'étude des réponses de la betterave à des conditions contrastées de nutrition azotée et au paramétrage du modèle. Un travail de compilation de données de validation disponibles à l'ITB a permis de prendre en compte la variabilité des paramètres.

Nous avons constaté que la betterave répondait à la nutrition azotée comme les autres plantes en C3. Le modèle simule les différences de rendement en sucre en fonction de l'état de nutrition azotée comme annoncé dans la bibliographie. Le modèle permet de retrouver sans les imposer les stades de croissance de la betterave. Couplé au module de fourniture d'azote du modèle STICS, le modèle permet de simuler les grandes tendances des rendements depuis les trente dernières années.

Mots-clés : betterave sucrière, nutrition azotée, rendement en sucre, modèle de croissance

Growth, source-sink relationships and yield modeling of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) under contrasting regimes of nitrogen nutrition

Abstract :

The French sugar beet industry seeks to increase productivity in order to obtain sugar yields economically satisfactory. Nitrogen fertilization is one of the main factors influencing yield of sugar beet. Many models are designed to simulate the yield of sugar beet but few take into account the effect of nitrogen nutrition conditions.

In this context, the objectives of this work were: (i) to reflect leading to the choice of the type of modeling, (ii) to identify the plant characteristics in response to nitrogen nutrition for parameterization of the model and (iii) evaluate our model.

The modeling approach has focused on the integration of the nitrogen nutrition effects on the leaf area development, and source-sink relationships within the plant. Two years field experiments have enabled us to acquire data necessary for the study of the sugar beet responses under contrasting nitrogen nutrition conditions and parameterization of the model. A compilation of a data set validation at the ITB makes it possible to take into account parameters variability.

We found that sugar beet responded to nitrogen nutrition as the other C3 plants. The model simulates the differences in sugar yield based on nitrogen nutrition status as reported in the literature. The model can find growth stages of sugar beet without force them. Coupled to the supply nitrogen module of the STICS crop model, the model simulates the major trends in yields over the past thirty years.

Keywords : sugar beet, nitrogen nutrition, sucrose yield, crop model

Table des matières :

1.	^{ERE} PARTIE : INTRODUCTION	19
2.	^{ème} PARTIE : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE.....	25
2.1.	La betterave sucrière	27
2.1.1.	Classification	27
2.1.2.	Morphologie et cycle de développement.....	27
2.2.	L'élaboration du rendement et sa variabilité	29
2.2.1.	Elaboration du rendement.....	29
2.2.1.1.	Développement foliaire	29
2.2.1.2.	Transport des assimilats de la photosynthèse et croissance de la racine	31
2.2.1.3.	Relations source-puits chez la betterave	33
2.2.2.	Principaux facteurs limitant le rendement.....	35
2.2.2.1.	La fertilisation azotée	35
2.2.2.2.	La disponibilité en eau	41
2.2.2.3.	Les maladies et ravageurs	43
2.2.3.	Evolution des rendements en racines et en sucre et changements variétaux	45
2.3.	Les modèles de prévision du rendement.....	45
2.3.1.	Un modèle développé par l'ITB : PREVIBET®.....	49
2.3.2.	Le modèle de croissance de Broom's Barn	49
2.3.3.	SUBEMOpo : SUGar BEet MOdel potential production	51
2.3.4.	CERES-BEET	57
2.3.5.	STICS : Simulateur multIdisciplinaire pour les Cultures Standards.....	59
2.3.6.	SUCROS : Simple and Universal CROp growth Simulator	63
2.3.7.	Un modèle de croissance explicite structure-fonction : GreenLab.....	65
2.3.8.	Conclusion sur les modèles de prévision du rendement de la betterave sucrière	67
2.4.	Conclusion	69
3.	^{ème} PARTIE : PROBLEMATIQUE.....	71
4.	^{ème} PARTIE : MATERIELS ET METHODES.....	77

4.1.	Expérimentations menées pendant la thèse (2010 et 2011) pour paramétrer le modèle	79
4.1.1.	Conditions expérimentales et traitements azotés.....	79
4.1.2.	Mesures réalisées	81
4.1.2.1.	Mesure de la levée.....	81
4.1.2.2.	Observations non destructives en cours de croissance.....	85
4.1.2.3.	Observations destructives en cours de croissance.....	85
4.2.	Expérimentations complémentaires à l'étude pour validation du modèle	89
4.2.1.	Les essais disponibles pour simulation avec le modèle.....	89
4.2.1.1.	Mesures climatiques	89
4.2.1.2.	Prélèvements	91
4.2.1.3.	Mesures réalisées.....	95
4.2.2.	Essais supplémentaires participant au calcul des paramètres du modèle .	95
4.2.2.1.	Essais menés en 2006, 2007 et 2008 à l'ITB (Lemaire S. , 2010)	95
4.2.2.2.	Essais menés par l'ITB en 2010 et 2011 sur le suivi de la richesse en sucre	97
4.3.	Récapitulatif des données sources pour les variables et paramètres du modèle	99
4.4.	Traitement des données recueillies	99
4.4.1.	Calcul sur les données brutes issues des prélèvements	99
4.4.2.	Calcul des données d'entrée du modèle	101
4.4.2.1.	L'azote prélevé par la plante :.....	101
4.4.2.2.	Les données climatiques :	101
4.4.3.	Calcul des paramètres du modèle	101
4.4.3.1.	Les paramètres racinaires : %N _{Rmin} et MSR ^{HS} _{max} :	101
4.4.3.2.	Les paramètres foliaires : α , RUE et LMA :	103
4.4.4.	Analyses statistiques.....	103
5.	^{ème} PARTIE : RESULTATS	107
5.1.	Caractérisation de l'état de nutrition azotée et élaboration du rendement.....	109
5.1.1.	Détermination de la courbe critique de l'azote d'une culture de betteraves	109
5.1.1.1.	Détermination de la courbe sur les essais menés pendant la thèse en 2010 et 2011	109

5.1.1.2.	Positionnement des modalités azotées des autres essais sur la courbe de dilution de l'azote	109
5.1.2.	Influence de la nutrition azotée sur la formation de la surface foliaire ..	113
5.1.3.	Rendements en biomasses et en sucre	113
5.2.	Donnée d'entrée et paramétrage du modèle.....	117
5.2.1.	L'azote absorbé par la culture : variable d'entrée du modèle.....	117
5.2.2.	Les paramètres racinaires	117
5.2.2.1.	Le paramètre biomasse racinaire structurale maximale : MSR_{max}^{HS} (point 1.1 du schéma général).....	117
5.2.2.2.	Le paramètre proportion en azote racinaire structural minimum : $\%N_{Rmin}$ (point 1-2 du schéma général)	121
5.2.3.	Les paramètres foliaires.....	121
5.2.3.1.	Surface foliaire produite par unité de masse d'azote des feuilles : paramètre α (point 2-1 du schéma général)	121
5.2.3.2.	Le paramètre masse de feuilles par unité de surface : LMA (point 2-3 du schéma général)	125
5.2.4.	Le paramètre Radiation Use Efficiency : RUE	129
5.2.5.	Récapitulatif des variables et paramètres du modèle.....	129
5.3.	Validation du modèle.....	133
5.3.1.	Les résultats de calibration du modèle	133
5.3.2.	Les résultats de simulation sur les données de validation	133
5.3.2.1.	Les résultats de simulation sur le rendement en sucre	133
5.3.2.2.	Les résultats de simulation sur les autres variables.....	135
5.3.3.	Le comportement général du modèle selon la nutrition azotée.....	137
5.3.4.	Analyse de sensibilité du modèle aux paramètres	139
5.3.4.1.	La sensibilité du modèle au paramètre teneur minimale en azote dans la biomasse racinaire structurale : $\%N_{Rmin}$	139
5.3.4.2.	La sensibilité du modèle au paramètre biomasse racinaire structurale maximale : MSR_{max}^{HS}	145
5.3.4.3.	La sensibilité du modèle au paramètre « K ».....	147
6.	^{ème} PARTIE : DISCUSSION	151
6.1.	Le comportement de la betterave sous l'effet de la nutrition azotée : une plante en C3	153
6.1.1.	Courbe critique de l'azote de la betterave	153
6.1.2.	La réponse de la surface foliaire à la nutrition azotée	153

6.2.	La qualité des simulations du modèle	155
6.2.1.	Le comportement du modèle en fonction des classes d'INN	155
6.2.2.	La simulation des variables du modèle	157
6.2.3.	Incorporation des racines fibreuses non récoltées dans le modèle	159
6.2.4.	Quelles performances par rapports aux autres modèles ?.....	161
6.3.	Propriété émergente du modèle : les stades phénologiques de Fleury et Caneill (1984)	163
6.4.	Le modèle pour expliquer les tendances de l'évolution des rendements depuis les années 80.....	165
6.4.1.	L'azote diminue mais les rendements augmentent.....	165
6.4.2.	L'augmentation du rapport PR/PF au cours du temps.....	167
6.5.	Des traits variétaux pour améliorer le rendement ?	167
7.	^{ème} PARTIE : CONCLUSION	171
8.	^{ème} PARTIE : BIBLIOGRAPHIE	177
9.	^{ème} PARTIE : ANNEXES	193
9.1.	Annexe 1 : Les représentations graphiques des simulations du modèle sur tous les essais	195
9.2.	Annexe 2 : Variables racinaires impliquées dans la limitation de la croissance racinaire structurale en fonction des classes d'INN	201

1.^{ERE} PARTIE : INTRODUCTION

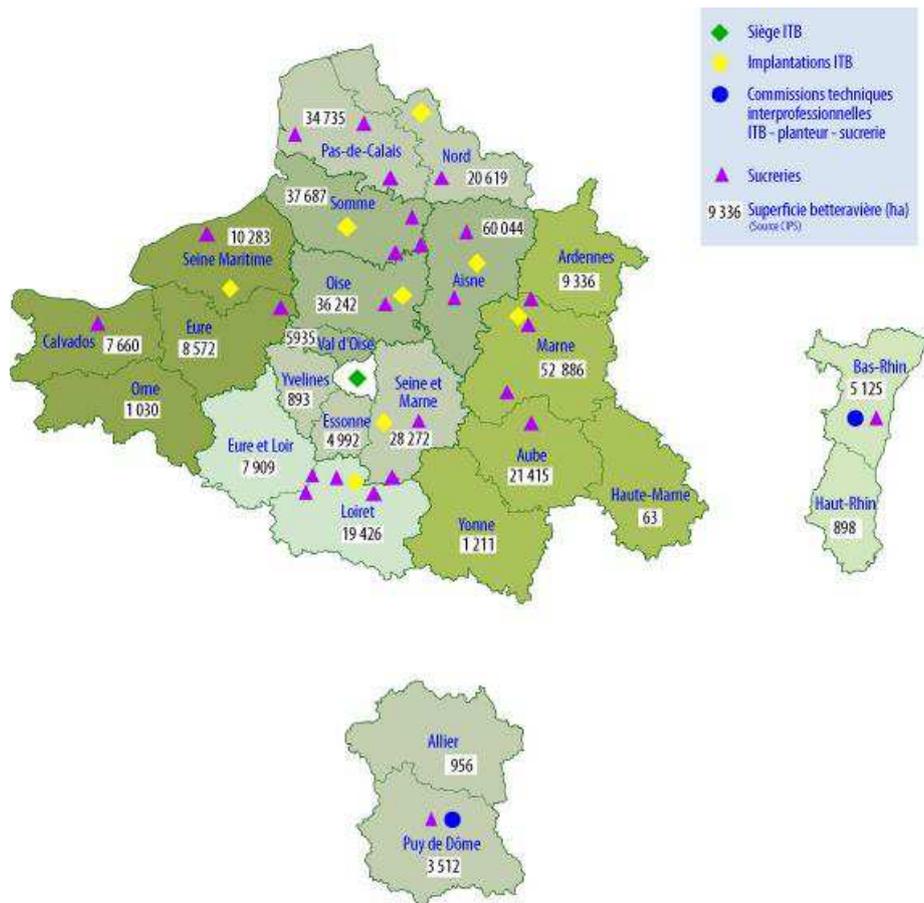


Figure 1-1 : La production betteravière en France (Institut Technique de la Betterave (ITB)).

La betterave sucrière est connue comme légume depuis l'Antiquité. Les premières traces écrites nous proviennent des grecs au V^{ème} siècle avant Jésus-Christ. Ses feuilles servaient alors à l'alimentation du bétail, et un miel végétal était extrait de sa racine. En 1575 l'agronome français Olivier de Serres, remarqua sa forte teneur en sucre. Mais l'intérêt pour la betterave sucrière ne sera suscité qu'en 1747, quand Marggraf parvient à obtenir à partir des racines de betteraves, le même sucre cristallisable que celui issu de la canne à sucre. Il faut attendre encore 50 ans pour voir son procédé industrialisé par Achard. C'est à cette époque clé que la betterave prend une place cruciale dans le marché du sucre en France, pour faire face au blocus continental qui prive la France de sucre de canne sous Napoléon. Soutenue par une forte recherche agronomique (Louis de Vilmorin en 1850 fut l'initiateur de l'amélioration de la teneur en sucre) la betterave ne tardera plus à concurrencer la canne à sucre (Collectif direction Choppin de Janvry, 1997).

En 2010, la production sucrière mondiale s'élève à 158 millions de tonnes dont 22% provenaient de la betterave sucrière. La France est le premier pays producteur de sucre de betterave au monde avec une production d'un peu plus de 4 millions de tonnes. Les régions betteravières sont principalement concentrées dans la moitié Nord du pays (figure 1-1). La filière betteravière produit 9 millions d'hectolitres d'alcool alimentaire et d'éthanol. La productivité française est de 13,1 tonnes de sucre blanc par hectare et celle-ci augmente de façon constante d'environ 2% par an. La betterave est fortement concurrencée par la canne à sucre dont les coûts de production sont plus faibles. En 2000, les coûts de production du sucre de betterave étaient deux fois supérieurs à ceux du sucre de canne au Brésil, pays le plus compétitif au monde. Cet écart est aujourd'hui réduit à seulement 30% du fait des progrès des rendements de la betterave et de la forte hausse des coûts de production du Brésil. L'écart est surtout le fait des durées de campagne de fabrication industrielle du sucre, 200 jours au Brésil contre 110 en France qui présente donc des coûts de fabrication du sucre de consommation proportionnellement plus faibles. A l'horizon 2020, la demande en sucre augmentera de 30 millions de tonnes environ du fait de l'augmentation de la population mondiale et des développements des pays émergents. Parallèlement la demande en éthanol continuera à croître fortement, notamment au Brésil. Néanmoins la croissance de la production de sucre au Brésil ne suffira pas à couvrir celle de la consommation

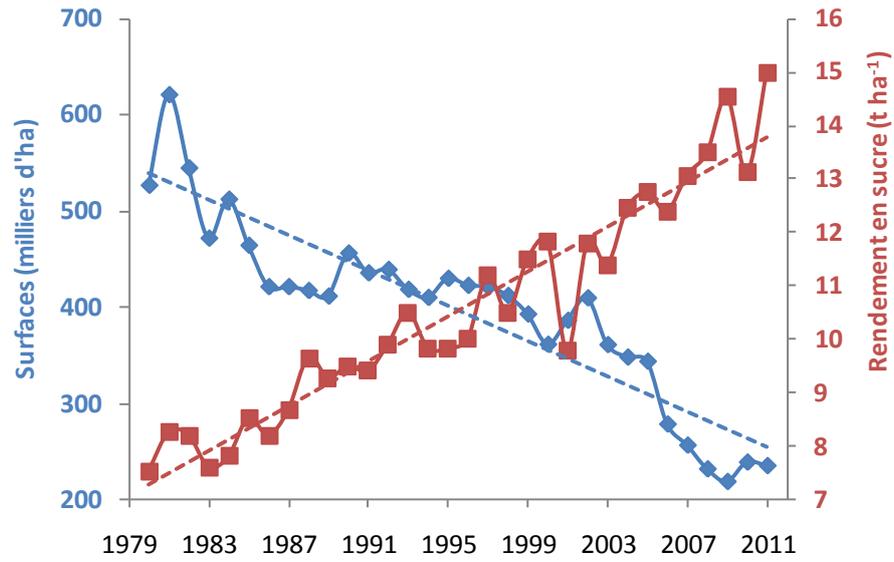


Figure 1-2 : Evolution des surfaces betteravières et des rendements en sucre (source Confédération Générale des Planteurs de Betteraves (CGB) 1977-1996, Institut Technique de la Betterave (ITB) depuis 1997).

mondiale à l'horizon 2020 ; d'autres régions devraient donc augmenter leur production. L'Union européenne, et notamment la France, a une carte à jouer dans cet environnement. Il est donc important d'améliorer la productivité de la culture de betterave afin d'obtenir des rendements économiquement satisfaisants. En France, depuis 30 ans, les rendements en sucre de betterave augmentent considérablement, jusqu'à atteindre un record de rendement de 15 t/ha en 2011. La filière française s'est donné le défi de gagner 30% de productivité d'ici 2020, date à partir de laquelle le régime des quotas sera supprimé. Depuis 1977, les rendements en sucre ont connu une forte progression, passant de 7 t/ha à plus de 13 t/ha, soit plus de 85%. L'augmentation de la productivité, combinée à une stabilisation voire une diminution des volumes réglementés par un système de quotas de sucre attribué à chaque pays de l'Union Européenne, a abouti à une réduction des surfaces consacrées à la betterave sucrière (figure 1-2) (Institut Technique de la Betterave). Il s'agit donc aujourd'hui de passer de 13 t/ha à 17 t/ha de sucre. Une telle progression de 4 t/ha de sucre a déjà été obtenue entre 1990 et 2010, en 20 ans. Il s'agit de doubler ce rythme de progression (Richard-Molard, 2012).

Cette progression de rendement doit se faire dans un contexte de changement des pratiques avec la diminution des intrants (produits phytosanitaires et fertilisants azotés notamment) afin de diminuer la pollution et les coûts de production, et avec les changements climatiques (le climat se modifiant en tendance, mais aussi en augmentant ses aléas). Les industriels qui sont également concernés, sont en attente d'outils de prévision de rendement afin de prévoir au mieux leurs campagnes sucrières.

Un des axes de recherche poursuivis par l'ITB est d'identifier les facteurs limitant le rendement et leur impact sur l'élaboration du rendement de la betterave. Actuellement, de nombreux modèles ont pour but de simuler le rendement en sucre de la betterave, mais il n'existe pas d'outil permettant de modéliser l'accumulation du saccharose dans la racine de la betterave prenant en compte les facteurs du milieu. Ce travail propose d'établir une modélisation de la croissance et du rendement en sucre de la betterave dans des conditions contrastées de fertilisation azotée.

2.^{EME} PARTIE : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

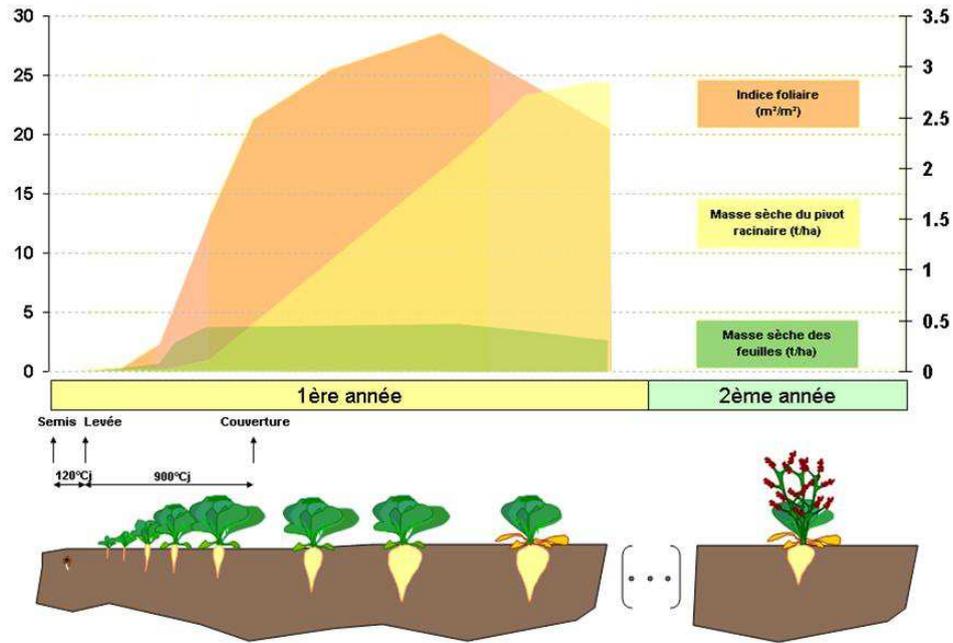


Figure 2-1 : Schéma du cycle cultural de la betterave sucrière. 1ère année : phase végétative, 2ème année : phase de reproduction (formation et maturation des graines sur la hampe florale) (Lemaire S. , 2010).

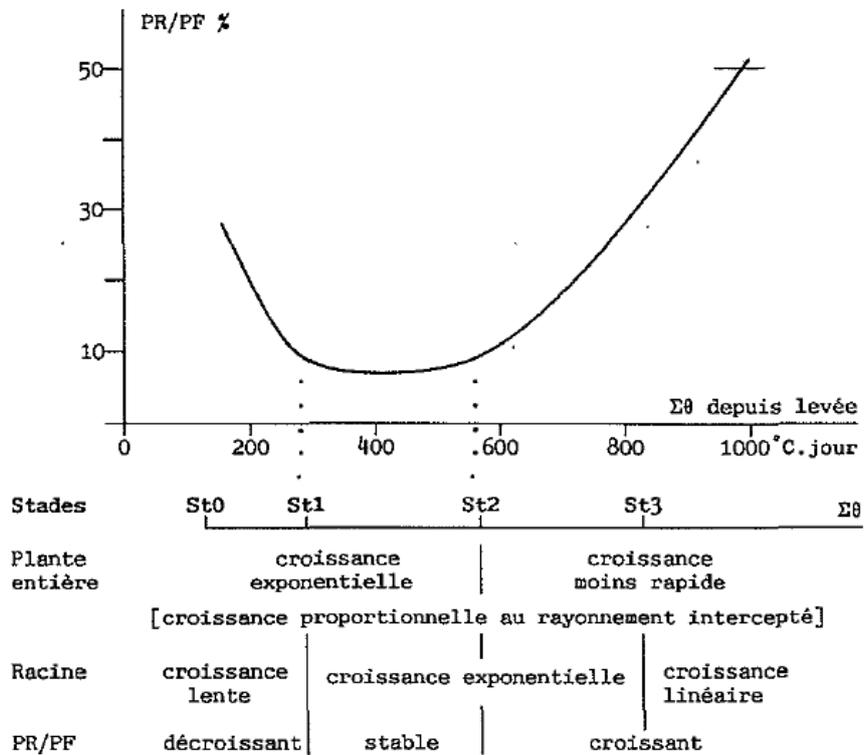


Figure 2-2 : Les stades de changement de comportement. PR/PF = poids sec de racine / poids sec de feuilles (Fleury & Caneill, 1984).

2.1. La betterave sucrière

2.1.1. Classification

La betterave sucrière est une plante dicotylédone de la classe des Caryophyllidées, de l'ordre des Caryophyllales et de la famille des Chénopodiacées. Elle fait partie du genre *Beta* et de l'espèce *vulgaris*. L'espèce *Beta vulgaris* est constituée de trois sous espèces (ssp) : *Beta vulgaris ssp vulgaris*, ce sont les formes cultivées dans lesquelles on retrouve la betterave sucrière avec le cultivar *altissima* ; *Beta vulgaris ssp maritima* et les betteraves rudérales ou adventices (Elliott & Weston, 1993).

2.1.2. Morphologie et cycle de développement

La betterave sucrière est semée de mars à avril et récoltée de septembre à novembre lorsque le pivot a atteint une teneur en sucre optimale. Mais cela ne correspond pas à l'état de maturité de la plante car la betterave est une plante bisannuelle (figure 2-1). La première année se déroule la phase végétative. Durant cette phase la betterave sucrière possède une racine renflée, charnue et de forme conique, communément appelée « pivot » où sont accumulés les produits de la photosynthèse. Le sillon saccharifère délimite la zone riche en sucre de la racine. Le point d'insertion des feuilles sur la racine est le collet, et le bouquet foliaire présente un port en rosette avec des limbes ovales et gaufrés à croissance indéfinie. La seconde année est la phase de reproduction sexuée ou de maturation. Après une vernalisation, la betterave puise dans ses réserves pour former une inflorescence. La morphologie de la betterave change, la tige s'allonge et peut atteindre 1,5 mètres de hauteur. A l'aisselle de chaque feuille part une inflorescence en épi portant de nombreuses fleurs. Ce sont des fleurs de type 5, hermaphrodites et groupées par trois, avec une fécondation croisée. Après la floraison et la maturation des fruits, on peut apercevoir les akènes (source ITB).

En ce qui concerne le développement de la plante, Fleury et Caneill (1984) ont proposé une description des stades de la betterave pendant sa phase végétative basée sur des relations allométriques et sur la stabilisation du taux de sucre dans la biomasse sèche (figure 2-2). Ils définissent 6 stades : la germination, la levée (St0), l'apparition de la première paire de feuilles (St1), la fin de croissance exponentielle des feuilles (St2), la fin de croissance exponentielle de la racine (St3), et la fin de la croissance de la teneur en sucre rapportée à la matière sèche (St4) qui définissent eux-mêmes 5 périodes :

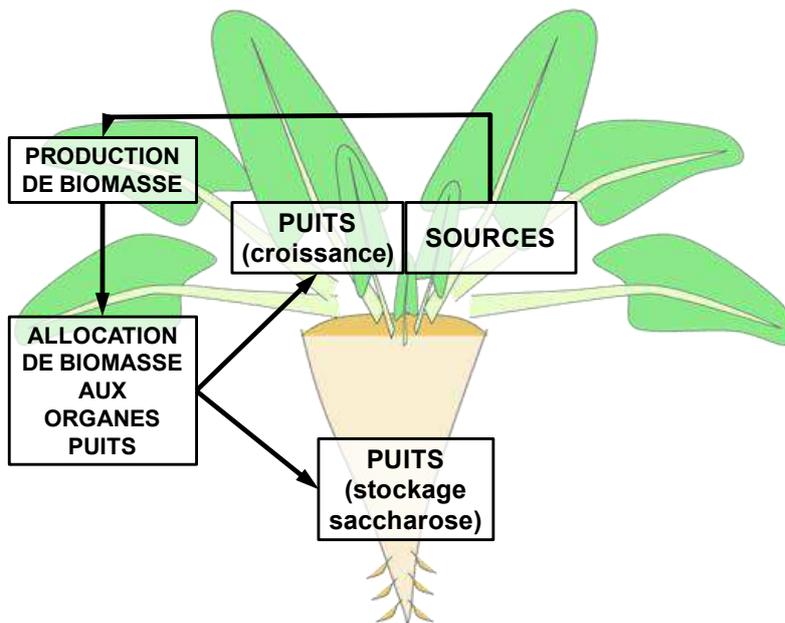


Figure 2-3 : Schéma simplifié de l'élaboration du rendement de la betterave sucrière.

- De la germination à St0 : vie souterraine à partir des réserves de la graine, début de la croissance exponentielle des plantules.
- De St0 à St1 : on constate la diminution du rapport entre le poids sec de racines et le poids sec de feuilles (PR/PF), la croissance est due à l'activité des cotylédons.
- De St1 à St2 : stabilisation du rapport PR/PF, proportionnalité entre l'apparition des anneaux méristématiques de la racine et l'émission des feuilles, croissance exponentielle en poids du bouquet foliaire et de la racine. Les feuilles sont de plus en plus grandes et à St2 environ apparait la plus grande.
- De St2 à St3 : la racine progresse encore de façon exponentielle, mais plus le bouquet foliaire. On observe le décrochement du ratio entre le nombre de feuilles apparues et le nombre d'anneaux méristématiques de la racine.
- De St3 à St4 : la croissance de la racine peut être considérée comme linéaire entre St3 et St4 et au-delà, la vitesse est variable en fonction des conditions en compétition.

2.2. L'élaboration du rendement et sa variabilité

2.2.1. Elaboration du rendement

L'élaboration du rendement de la betterave sucrière peut être schématiquement représentée par la figure 2-3. Ainsi la betterave sucrière intercepte le rayonnement incident par l'intermédiaire de son bouquet foliaire, les feuilles sont alors des organes sources qui produisent des assimilats issus de la photosynthèse. Les assimilats sont ensuite répartis dans les organes puits, les feuilles en croissance et la racine, en fonction de leur force de puits.

2.2.1.1. Développement foliaire

L'apparition des feuilles répond linéairement à la température en base 1°C, et l'expansion de ces feuilles en base 3°C, en deçà il n'y a pas de développement (Milford, Pocock, & Riley, 1985a). Des températures de l'air plus chaudes induisent une augmentation de la vitesse d'expansion foliaire. Les feuilles ont besoin de 300 à 400 °CJ pour atteindre leur pleine taille, mais sont déjà étalées à 120 °Cj après leur apparition à l'apex de la tige. Jusqu'à la 12^{ème} feuille, la taille des feuilles augmente par rapport aux feuilles précédentes mais ensuite le profil est inversé et progressivement les feuilles ont de plus petites tailles finales (Milford J. , Pocock, Riley, & Messemer, 1985c). Ensuite les feuilles meurent dans l'ordre dans lequel elles apparaissent, à un taux d'environ une feuille par semaine, la longévité thermique des feuilles successives augmente avec leur position (Milford, Pocock, & Riley, 1985b).

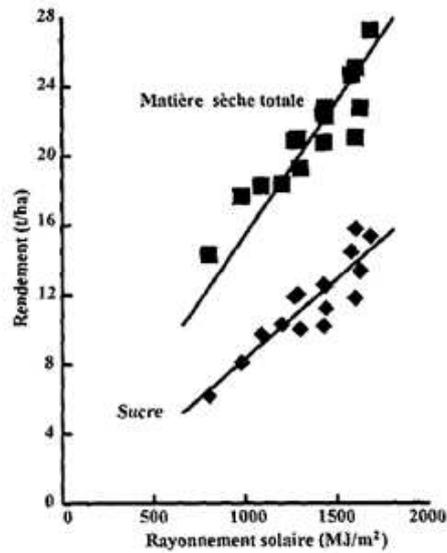


Figure 2-4 : Relation entre la quantité de rayonnement intercepté par les feuilles de betteraves et les quantités de matière sèche et de sucre produites par ces plantes pendant la période de croissance. Chaque donnée représente le rendement d'une récolte de betterave, y compris celles qui proviennent de parcelles irriguées, à Broom's barn entre 1978 et 1992 (Jaggard, 1994).

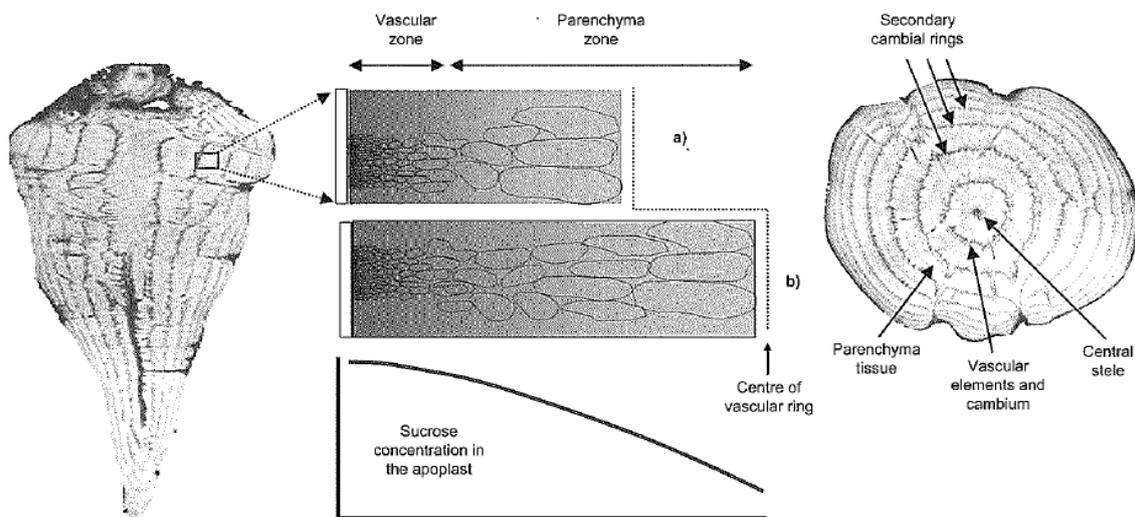


Figure 2-5 : Vues longitudinales et transversales de la structure secondaire de la racine de stockage de la betterave et un diagramme du gradient d'accumulation du saccharose selon l'hypothèse d'accumulation du sucre dans une betterave à haute concentration en sucre (a) et une betterave à haut rendement en racine (b) (Milford G., 2006).

L'interception de la lumière est dépendante de la taille du couvert foliaire (Werker & Jaggard, 1998). D'après les travaux de Damay et Le Gouis (1993), la production de biomasse par le couvert peut être définie comme suit :

$$\text{Biomasse sèche totale} = RUE \times PARi (1 - e^{-K \times IF})$$

$$PARi = 0,48 \times Rg$$

(Varlet-Granchet, Chartier, Gosse, & Bonhomme, 1982)

Avec :

- RUE : Efficacité de conversion de l'énergie lumineuse (g MJ^{-1}).
- PARi : Rayonnement intercepté ($\text{MJ m}^2 \text{j}^{-1}$).
- Rg : Rayonnement global journalier ($\text{MJ m}^2 \text{j}^{-1}$).
- K : Coefficient issu de la loi de Beer Lambert, il dépend des propriétés spectrales et géométriques du couvert. Pour la betterave différentes valeurs ont été reportées, $K = 0.7$ selon Hodanova (1972) et Andrieu et al. (1997), et $K = 0.6$ selon Martin (1986).
- IF : Indice foliaire ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$).

Une fois le couvert établi de façon complète, et en bon état sanitaire, la culture de la betterave accumule environ un gramme de sucre par MJ de rayonnement global intercepté, soit 2 g par MJ de rayonnement photosynthétiquement actif intercepté (Jaggard, 1994). Les rendements en matière sèche et en sucre sont donc proportionnels à la quantité totale de rayonnement intercepté pendant la croissance (figure 2-4).

2.2.1.2. Transport des assimilats de la photosynthèse et croissance de la racine

L'aspect important de la productivité des plantes est leur capacité à produire une grande quantité de produits de photosynthèse et leur capacité à transporter et cloisonner ces produits dans les endroits appropriés (Wyse, 1979).

Le saccharose produit par la photosynthèse est transporté dans la plante via les vaisseaux conducteurs du phloème. Il est transporté en l'état et ne subit pas d'hydrolyse pendant son transport, ni lors de son déchargement du phloème à travers les membranes, contrairement à la canne à sucre (Giaquinta, 1979). Le saccharose entre dans les cellules de la racine de stockage par la voie apoplastique.

La racine de la betterave a une structure annelée visible en coupe transversale ou longitudinale (figure 2-5). Elle résulte de la production continue de cellules et de leur agrandissement à partir d'une série de cambia secondaires concentriques originaires du péricycle de la racine primaire. Les 6 à 7 cambia qui produisent la majeure partie de la racine de stockage récoltée sont établis dans le péricycle à un stade très précoce du développement de la plante. Tous les anneaux vasculaires de la racine se développent simultanément et s'étendent avec la croissance (Theurer, 1979).

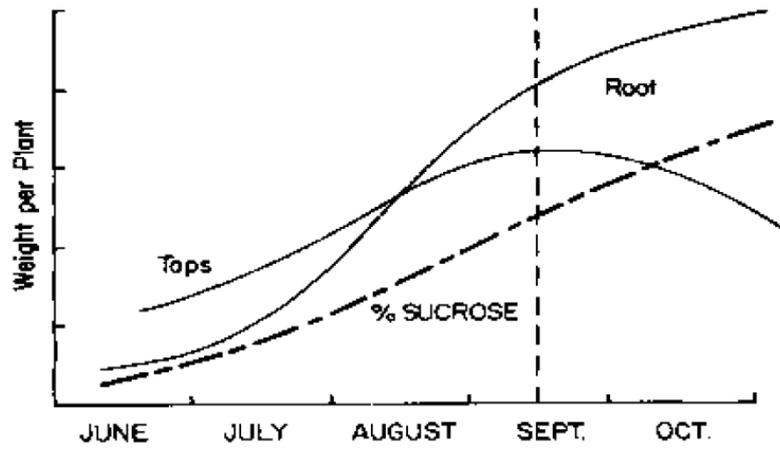


Figure 2-6 : Profils saisonniers des biomasses de racines et de feuille, et du pourcentage de sucre dans la racine (Wyse, 1979).

Les jeunes racines utilisent principalement le saccharose pour leur croissance et leur métabolisme à l'aide d'une invertase hydrolysant le saccharose, le stockage ne débute qu'entre 30 et 60 jours avec l'apparition de l'enzyme saccharose synthétase.

La concentration en sucre dans les tissus augmente proportionnellement avec le volume de la cellule jusqu'à une certaine taille. Les plus grandes cellules de la racine de stockage sont situées dans les zones centrales du parenchyme qui séparent les anneaux vasculaires adjacents, et il a été montré que ces cellules ont une plus faible concentration en saccharose (poids frais et poids sec) que les petites cellules parenchymatiques des zones vasculaires (figure 2-5) (Milford G. , 2006). Les petites cellules proches des sites de déchargement du phloème contiennent les plus fortes concentrations en saccharose car elles sont exposées à des concentrations en saccharose plus élevées et pour de plus longues périodes que les grandes cellules éloignées des faisceaux vasculaires dont la voie de diffusion est plus longue (Wyse, 1979). De nombreux facteurs influencent la taille des cellules de la racine de stockage, tels que le génotype, la disponibilité de l'eau, la fertilisation du sol et notamment l'azote ainsi que la densité de population (Milford G. , 2006).

La concentration en saccharose augmente pendant la croissance et le développement de la racine et elle atteint à son maximum 20 % de son poids frais, soit 75 % du poids sec (Wyse, 1979). Quand la racine accumule du saccharose, ses cellules doivent faire face à une grande pression osmotique, qui est maintenue constante pendant la croissance par l'accumulation de solutés, probablement du potassium, dans l'apoplaste des cellules parenchymatiques (Bell & Leigh, 1996).

Le saccharose est présent dans trois compartiments : l'espace libre, le cytoplasme et la vacuole. La vacuole représente 70% du volume tissulaire et contient approximativement 97% du saccharose. Le saccharose est activement transporté dans les vacuoles des cellules racinaires par un mécanisme de co-transport contre son gradient de potentiel chimique. Un influx de cations alcalins et un efflux de protons en opposition sont couplés à la prise active du saccharose dans la vacuole (Saftner & Wyse, 1980).

2.2.1.3. Relations source-puits chez la betterave

La répartition des produits de la photosynthèse, donc de la matière sèche produite, chez la betterave suit le profil suivant : la plupart de la matière sèche se situe dans les parties aériennes au début de la croissance, et dans la racine de stockage à partir du mois de juillet et jusqu'à la récolte (figure 2-6) (Wyse, 1979).

Durant la première moitié de la saison, la croissance de la racine de stockage dépend de l'indice foliaire, alors qu'il n'y a presque aucune relation entre l'indice foliaire et le taux de croissance de la racine plus tard. L'indice foliaire optimal pour intercepter le rayonnement se situe autour de 3,5 m² de feuilles par m² de sol pendant

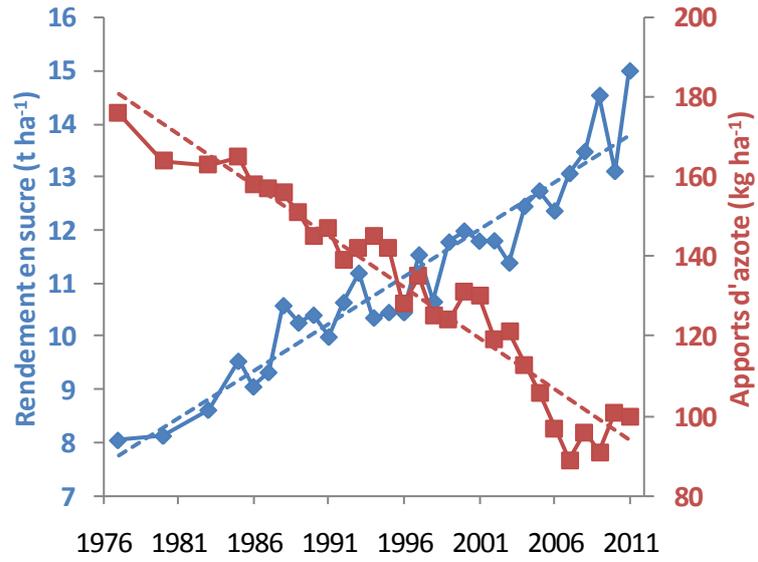


Figure 2-7 : Evolution des apports minéraux azotés et des rendements en sucre nationaux depuis 1977 (CGB 1977-1996, ITB depuis 1997).

l'été (Märlander, et al., 2003). Les assimilats de la photosynthèse sont alloués à la racine de manière continue au cours de la saison de croissance. Selon Wyse, les priorités pour l'allocation sont la respiration, la croissance du bouquet foliaire, la croissance structurale de la racine et la croissance de la racine de stockage incluant l'accumulation du saccharose. Cependant, la proportion d'assimilats disponibles allouée à chaque puits varie continuellement au cours de la saison, et dépend de la « force de puits » relative de chaque partie de la plante. Toujours selon Wyse (1979), il y a une répartition des assimilats contrôlée génétiquement entre les parties structurales et de stockage de la racine. Cette répartition est une importante composante du rendement. La capacité photosynthétique des feuilles et le potentiel de croissance des racines sont aussi importants pour maximiser la croissance racinaire.

2.2.2. Principaux facteurs limitant le rendement

2.2.2.1. La fertilisation azotée

Comme pour toutes les grandes cultures, les éléments principaux constitués de l'azote, du phosphore et du potassium, représentent la majeure partie des substances minérales absorbées. La betterave est exigeante en ce qui concerne le phosphore et la potasse, elle en prélève respectivement 70 à 120 kg ha⁻¹ et 350 à 700 kg ha⁻¹. Les besoins en azote ne dépassent que rarement les 220 kg ha⁻¹ (source ITB). Les exportations sont également élevées pour le magnésium, le calcium et le sodium. La betterave a aussi la particularité d'être sensible aux carences de certains oligo-éléments, et en particulier aux carences en bore (source ITB). En début de végétation, les besoins de la jeune plante sont réduits jusqu'au 75^{ème} jour grâce aux réserves contenues dans la graine, mais ensuite, jusqu'au 120^{ème} jour, l'absorption des éléments minéraux croît très rapidement jusqu'à la couverture totale du sol. Pendant cette période, quasi les trois quarts des éléments fertilisants ont déjà été absorbés (source ITB).

Les quantités d'azote minéral apportées à la betterave sont passées depuis 1977 de 176 kg/ha à environ 95 kg/ha, soit une diminution de 44 % (figure 2-7). Une partie de cette réduction s'explique par une meilleure prise en compte de l'ensemble des éléments du bilan azoté. Les pratiques visant à recycler de l'azote organique se substituent en partie à l'apport d'engrais minéral. Ainsi aujourd'hui, pour produire une tonne de sucre, on utilise 7,3 kg ha⁻¹ d'azote minéral contre 21 kg ha⁻¹ en 1978.

L'azote est l'intrant majeur qui affecte la croissance foliaire (Milford G. , et al., 1985d). Un trop fort apport de fertilisant azoté chez la betterave entraîne une surproduction de feuilles qui apporte peu d'augmentation de l'interception du rayonnement et cause donc la diminution de la proportion d'assimilats de photosynthèse stockés dans le pivot. L'azote stimule la formation de feuilles plus larges et prolonge la période de domination de croissance du feuillage. L'azote augmente la proportion d'assimilats utilisés pour la croissance des composants structuraux de la racine de

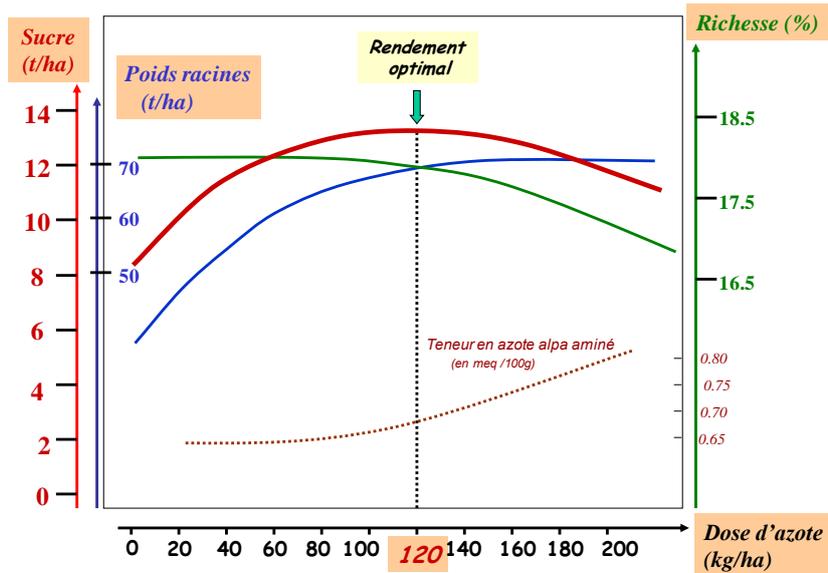


Figure 2-8 : Réponse générale de la betterave sucrière à une augmentation du niveau de fertilisation azotée (Duval, Machet, & Maupas, 2003).

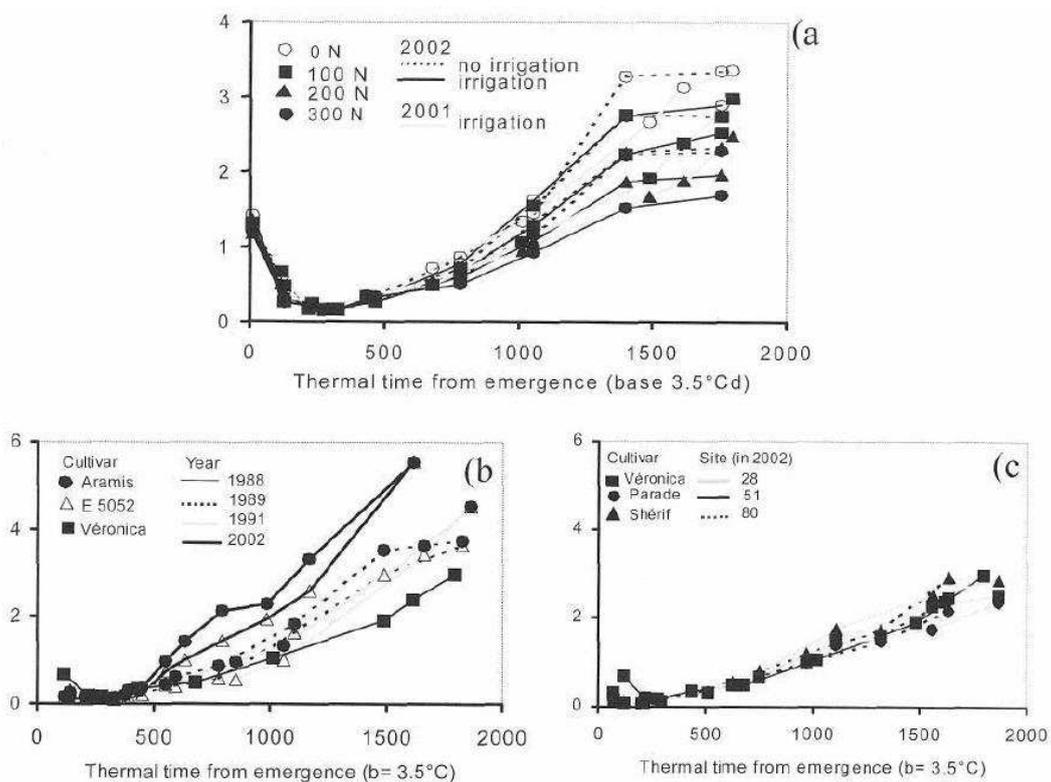


Figure 2-9 : Changements du ratio racines/feuilles au cours du temps en fonction de différentes conditions de croissance de la même variété (a), de plusieurs variétés et années, et de plusieurs sites la même année (c) (Durr, et al., 2003).

stockage. Par conséquent un haut niveau d'azote n'augmente pas seulement la biomasse des plantes mais augmente aussi la teneur en composants non sucrés de la racine. Le taux d'accumulation du sucre est inversement proportionnel à la quantité d'azote prélevée par la plante (Werker, Jaggard, & Allison, 1999). Des études menées à l'ITB illustrent ces réponses de la betterave à l'augmentation de la fertilisation azotée (figure 2-8). Un faible niveau de fertilisation azotée retarde la croissance des feuilles, et augmente le temps thermique de sénescence, cela diminue aussi la quantité de lumière interceptée et le rendement. Cette perte en rendement est en partie compensée par une augmentation de la proportion d'assimilats stockés comme le sucre au lieu d'être utilisé pour la croissance qui est donc moins rapide (Milford, Pocock, & Riley, 1985b). Une privation en azote provoque la diminution de la taille des feuilles par la diminution du rythme de leur expansion (Milford J. , Pocock, Riley, & Messem, 1985c).

Le rapport PR/PF, qui est indicateur de la répartition des assimilats dans la plante, montre une grande stabilité jusqu'à environ 500°Cj quelles que soient les conditions culturales (figure 2-9), au-delà de cette limite, de fortes variations peuvent apparaître en fonction des conditions de culture. L'azote agit sur la distribution de la biomasse entre organes aériens et souterrains. On assiste généralement à une diminution de la proportion d'assimilats alloués aux racines par rapport aux assimilats alloués aux feuilles dans le cas d'une forte disponibilité de l'azote, et inversement (Gastal & Lemaire, 1997). Ce phénomène est illustré par la diminution du rapport PR/PF avec l'augmentation de la fertilisation azotée au-delà de 500°Cj (figure 2-9 a).

La betterave accumule l'azote prélevé dans les feuilles et le redistribue plus tard pour maintenir la croissance des autres organes (Milford, Pocock, & Riley, 1985b). La concentration en azote dans les feuilles diminue durant la période d'expansion du bouquet foliaire car les feuilles accumulent la matière sèche plus vite que l'azote et les organes de structure de la feuille (pétiole et nervures) sont pauvres en azote (Milford G. , et al., 1985d). La répartition des assimilats est fortement influencée par l'azote du sol qui influence la taille des feuilles (Werker, Jaggard, & Allison, 1999).

Lemaire et Salette (1984) ont développé le concept de concentration critique en azote dans les parties aériennes des plantes. Cela correspond, à tout moment de la croissance végétative, à la concentration minimale en azote nécessaire à l'obtention du maximum de biomasse aérienne. Cette concentration critique est représentée par une courbe de type puissance, justifiée par les auteurs :

$$N = a W^{-b}$$

Où W est la biomasse sèche aérienne totale exprimée en $t\ ha^{-1}$, N est la concentration totale en azote dans la partie aérienne exprimée en pourcentage de la biomasse sèche aérienne, et a et b des constantes positives.

Tableau 2-1 : Valeurs des paramètres de la courbe critique de prélèvement d'azote pour différentes espèces en C3 et C4.

Espèce	a	b	Sources
Graminées C3	4.8	0.32	(Lemaire & Salette, 1984)
Blé C3	5.3	0.44	(Justes, Mary, Meynard, Machet, & Thelier-Huche, 1994)
Pois C3	5.1	0.32	(Ney, Doré, & Sagan, 1997)
Luzerne C3	4.8	0.33	(Andrieu, Lecoer, Lemaire, & Ney, 2006)
Colza C3	4.5	0.25	(Colenne, Meynard, Reau, Justes, & Merrien, 1998)
Tomate C3	4.5	0.33	(Tei, Benincasa, & Guiducci, 2002)
Maïs C4	3.4	0.37	(Plénet & Lemaire, 2000)
Sorgho C4	3.9	0.39	(Plénet & Cruz, 1997)

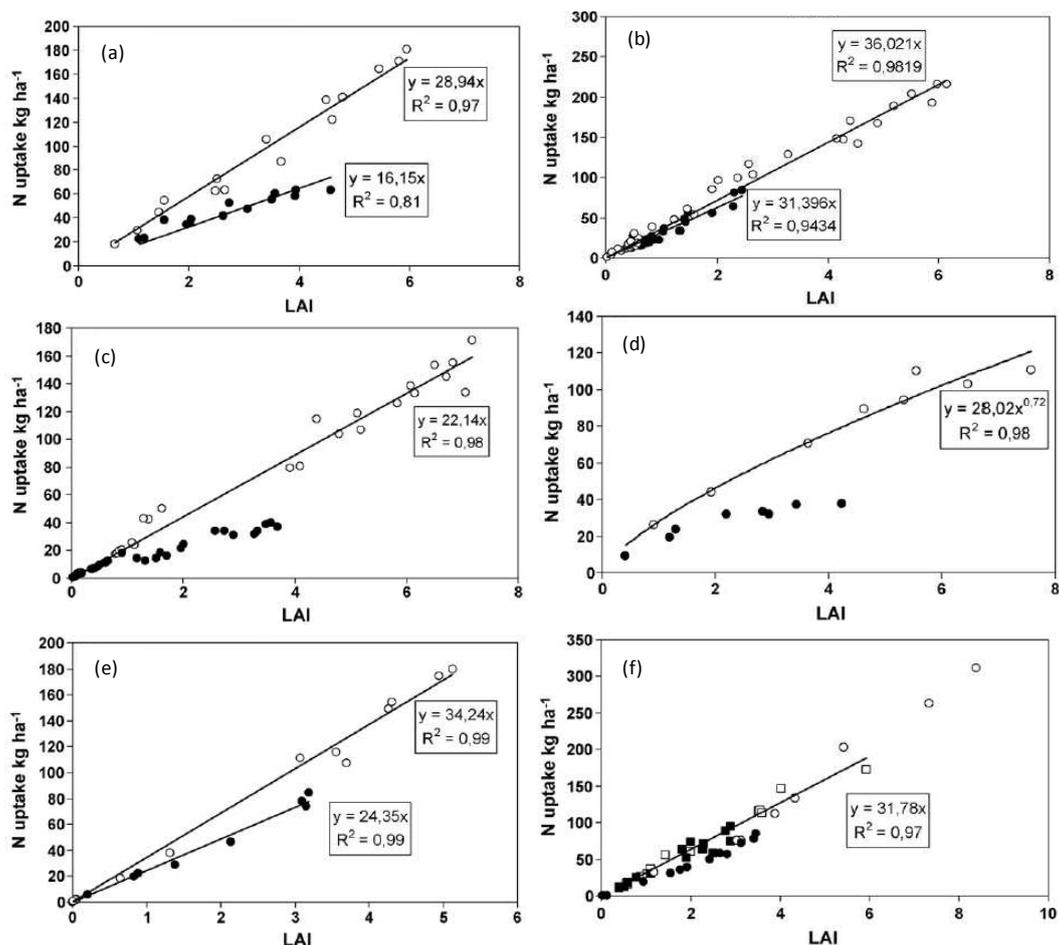


Figure 2-10 : Relation entre l'azote prélevé par les parties aériennes et l'indice foliaire pour des cultures de maïs (a), de blé (b), de sorgho grain (c), de fétuque (d), de tournesol (f) et de canola cultivées avec une forte fertilisation azotée (points noirs) ou une faible fertilisation azotée (points blancs) (Lemaire, van Oosterom, Jeuffroy, Gastal, & Massignam, 2008).

Cette courbe permet de différencier trois statuts azotés : sous la courbe, la croissance de la plante est limitée par l'azote, au dessus de la courbe la croissance n'est pas limitée par l'azote ; et sur la courbe la nutrition en azote est optimale.

Lors de la croissance des parties aériennes d'une plante, l'accroissement des surfaces foliaires s'accompagne d'un développement des structures de soutien (nervures, pétioles, tiges). Ces structures sont constituées de tissus relativement pauvres en azote, peu actifs dans la photosynthèse. Leur croissance entraîne une diminution globale des teneurs en azote des parties aériennes. Les phénomènes d'auto-ombrage des feuilles, avec appauvrissement en azote des couronnes inférieures, accentue cette évolution et explique une diminution apparente de l'azote.

Les valeurs des paramètres a et b de la courbe critique de prélèvement d'azote pour différentes cultures sont présentées dans le tableau 2-1. Pour un groupe métabolique d'espèces donné, C3 ou C4, la variabilité du paramètre a est faible. Le paramètre b varie peu dans l'ensemble des espèces avec une valeur moyenne très proche de 1/3.

Pour caractériser le statut azoté des plantes, on peut utiliser un indice de nutrition azoté (INN) défini par Lemaire et al. (2008), calculé par le ratio entre la teneur en azote observée dans les parties aériennes de la plante et la concentration en azote critique correspondant à la même biomasse aérienne fournie par la courbe précédente. Une valeur d'INN proche de 1 signifie que la plante est dans une situation de non limitation en azote, des valeurs supérieures indiquent un excès d'azote et des valeurs inférieures indiquent une déficience en azote.

Il existe un contrôle de la vitesse de prélèvement d'azote par la croissance des cultures, et l'azote dans les parties aériennes de la plante (N) s'accumule proportionnellement au développement de sa surface foliaire (IF) (Lemaire, Gastal, Plenet, & Le Bot, 1997) :

$$N = K * IF$$

Ainsi, sur le blé, la valeur de K est d'environ 3 g N m⁻² lorsque l'alimentation azotée est non limitante (Lemaire, Gastal, Plenet, & Le Bot, 1997). Une relation identique (de même pente) a été retrouvée chez la luzerne (Lemaire & Gastal, 1997), le maïs (Plenet & Lemaire, 2000) et le sorgho (Lemaire, van Oosterom, Sheehy, Jeuffroy, Massignam, & Rossato, 2007) (figure 2-10).

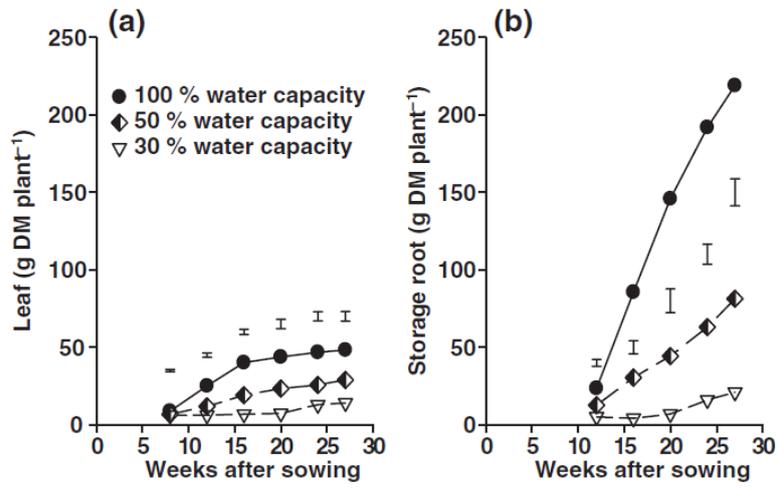


Figure 2-11 : Biomasses sèches des feuilles (a) et des racines (b) de betteraves affectées par l'apport d'eau au cours d'une expérimentation en pots (Hoffmann, 2010).

2.2.2.2. La disponibilité en eau

Les besoins en eau de la betterave sont de 600 à 700 mm durant la période de culture (source ITB). Au moment de la levée, en avril, le lit de germination doit être humide, mais un excès de précipitations peut être nuisible. Au mois de juillet et d'août, la pluviométrie doit être abondante, environ 80 à 90 mm pour obtenir un maximum de rendement en poids. Par contre en septembre et octobre la pluviométrie doit rester faible pour obtenir de bonnes richesses saccharines.

La betterave est une plante halophyte et relativement tolérante à la sécheresse (Werker & Jaggard, 1998), elle supporte aisément de courtes périodes de sécheresse estivale sans compromettre le déroulement de sa croissance. La betterave tient cette tolérance à la sécheresse d'une adaptation métabolique provenant de la betterave sauvage tolérante au sel : *Beta maritima*, qui est une betterave incluant le sodium qui réalise l'ajustement osmotique par l'accumulation de sels (principalement NaCl) dans la vacuole des tissus foliaires (Mäck & Hoffmann, 2006).

Le stress hydrique diminue la performance photosynthétique, l'ampleur de la diminution dépend de la durée du stress (Monti, Brugnoli, Scartazza, & Amaducci, 2006). Cela entraîne une diminution de l'accumulation de matière sèche dans la plante (figure 2-11). La proportion d'assimilats alloués aux organes aériens diminue d'autant plus que le stress augmente, ce qui entraîne une augmentation de la fraction d'assimilats destinés au stockage du sucre (Werker, Jaggard, & Allison, 1999). Néanmoins, des impuretés telles que des composés α -amino-N, de la glycine, de la bétaine et de la proline s'accumulent dans la racine pendant le stress et réduisent la qualité technologique de la betterave par inhibition de la cristallisation du sucre (Choluij, Karwowska, Jasinska, & Haber, 2004). Une période de stress hydrique augmente la vitesse de sénescence naturelle des feuilles et elle s'arrête temporairement lorsque le stress est levé (Milford, Pocock, & Riley, 1985b).

Après la levée du stress, la croissance foliaire reprend si de l'azote est disponible (Werker & Jaggard, 1998), mais cela ne s'accompagne pas d'une augmentation de l'accumulation du saccharose dans les racines (Monti, Brugnoli, Scartazza, & Amaducci, 2006) car la nouvelle croissance des jeunes feuilles agit comme un puissant puits, et influence la répartition des assimilats dans la plante, l'exportation de saccharose vers la racine de stockage en est réduite (Choluij, Karwowska, Ciszewska, & Jasinska, 2008). La reprise de la croissance importante des organes aériens ne peut s'expliquer que par le seul rétablissement de l'allocation des assimilats aux organes aériens, un phénomène de translocation de la matière sèche depuis le pivot vers les organes aériens pourrait expliquer ce phénomène (Launay, Graux, Brisson, & Guerif, 2009).

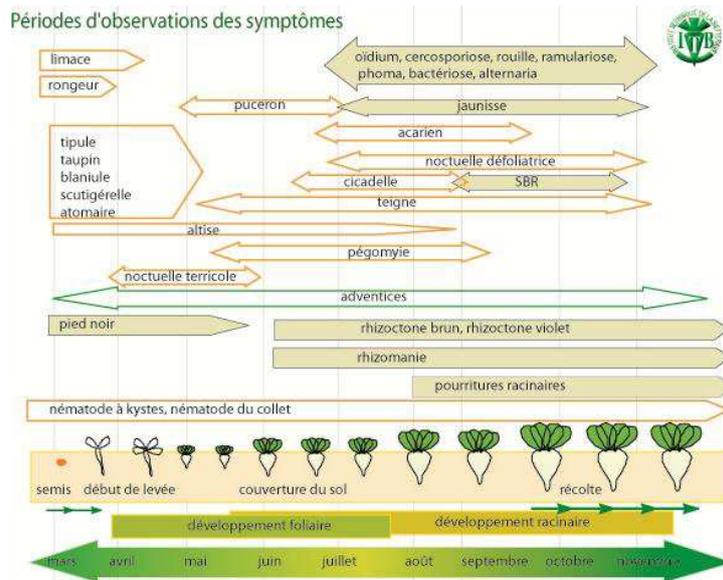


Figure 2-12 : Bioagresseurs de la betterave, positionnement de la période d'observation des symptômes par rapport au cycle de croissance (Institut Technique de la Betterave, 2012).



Figure 2-13 : Photographies représentant les symptômes racinaires et systémiques de la rhizomanie (ITB).



Figure 2-14 : Photographies représentant les symptômes foliaires de la cercosporiose (ITB).

2.2.2.3. Les maladies et ravageurs

La betterave sucrière peut être atteinte par de nombreux ravageurs et maladies tout au long de son cycle de croissance (figure 2-12). Les virus, bactéries, champignons ou ravageurs peuvent atteindre les feuilles ou les racines, avec pour conséquence une réduction du rendement. Nous détaillerons l'exemple de deux maladies causant de fortes pertes de rendement et bien répandues dans les régions betteravières, une maladie racinaire, la rhizomanie et une maladie foliaire, la cercosporiose.

Le virus *Beet necrotic yellow vein virus* (BNYVV) est l'agent causal de la rhizomanie. Cette maladie est le problème sanitaire majeur de la culture betteravière dans le monde, par son effet important sur le rendement et par sa capacité à persister presque indéfiniment dans le sol. La maladie est transmise par un champignon du sol : *Polymyxa betae*. La rhizomanie se caractérise au niveau racinaire par une prolifération anormale des radicelles latérales et par la nécrose des faisceaux vasculaires, et au niveau foliaire par l'apparition de nervures jaunes et nécrotiques dans le cas d'infections systémiques qui sont plus rares (Stevens, Liu, & Lemaire, 2006) (figure 2-13). Des infections sévères peuvent aboutir à de fortes réductions du rendement, du contenu en sucre, et de la pureté du jus, selon le génotype des betteraves, le niveau d'inoculum dans le sol, le type du virus BNYVV et les conditions climatiques (Scholten & Lange, 2000). Ainsi, il n'est pas rare d'atteindre des pertes de 50 à 60% de rendement en sucre. L'évolution des variétés permet de contrôler cette maladie, avec une augmentation du rendement en sucre passant de 3.9 t/ha pour des variétés sensibles à 13.1 t/ha avec des variétés tolérantes (Stevens, Liu, & Lemaire, 2006).

La cercosporiose est la maladie fongique foliaire la plus destructive chez la betterave tant en quantité qu'en qualité de récolte, la maladie diminue la quantité de sucre extractible. L'agent pathogène responsable de la cercosporiose est un champignon : *Cercospora beticola*. Le pathogène provoque l'apparition de petites taches qui se développent d'abord sur les feuilles les plus âgées, et qui se multiplient, pouvant conduire au dessèchement complet du limbe (Asher & Hanson, 2006). La mortalité des feuilles peut donner un aspect de champ brûlé (figure 2-14). La photosynthèse des bouquets foliaires affectés diminue significativement. La matière sèche s'accumule donc à un taux plus faible dans ces plantes. Dans le cas de sévères attaques de cercosporiose, la perte de la surface foliaire incite la plante à accélérer l'émission de nouvelles feuilles qui deviennent infectées et détruites à leur tour dans les cas où les conditions climatiques permettent le développement de l'agent pathogène. La plante accélère l'émission des nouvelles feuilles d'un rythme normal de une à trois feuilles par semaine à quatre ou plus. Le rendement en racines peut alors diminuer de 10% et le contenu en sucre de 4%, au total, la quantité de sucre extractible diminue de 17% en moyenne comparé aux cultures saines (Rossi, Meriggi, Biancardi, & Rosso, 2000).

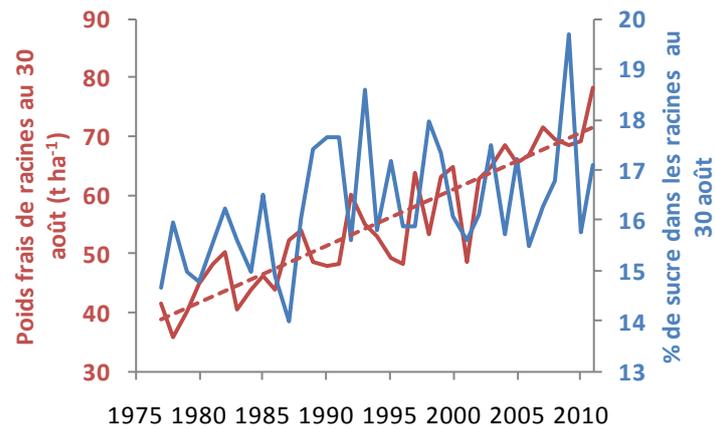


Figure 2-15 : Evolution du rendement en racines (poids frais) et de la part de sucre dans le poids frais de racines au 30 août (CGB 1977-1996, ITB depuis 1997).

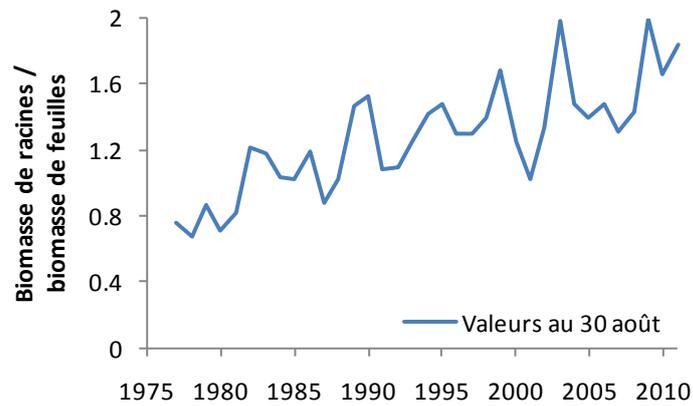


Figure 2-16 : Evolution du rapport de la biomasse fraîche de racines sur la biomasse fraîche de feuilles depuis 1977 (CGB 1977-1996, ITB depuis 1997).

2.2.3. Evolution des rendements en racines et en sucre et changements variétaux

On assiste à une augmentation en parallèle du rendement en racines et de la teneur en sucre des racines depuis 1977 (figure 2-15). On note néanmoins une certaine stagnation de la proportion de sucre dans les racines depuis les années 1990 environ.

Le progrès génétique est difficile à mesurer objectivement car on observe un turn-over très rapide des variétés. De plus, les effets des changements de pratiques de culture sont difficilement différenciables de l'effet de la génétique. On peut cependant remarquer que des progrès significatifs ont été obtenus par la création et l'utilisation de variétés résistantes à la rhizomanie et au développement de variétés tolérantes aux nématodes. La vitesse de levée des plantules et la croissance dans la phase juvénile de la culture ont été également améliorées (Escriou, Maupas, & Richard-Molard, 2010). Cela pourrait expliquer les progrès constants obtenus en rendement peu à peu depuis une trentaine d'année par le maintien d'une surface foliaire efficace (avant le mois d'août).

Quoiqu'il en soit, le rapport PR/PF a augmenté de façon régulière depuis 1977, sans qu'il soit possible de différencier l'apport de la génétique ou des pratiques culturales (figure 2-16). Nous avons vu que la diminution de l'utilisation de l'azote pourrait concourir à diminuer la surface foliaire sans altérer l'absorption du rayonnement. Dans ces conditions, et moyennant l'hypothèse d'une conservation de la capacité photosynthétique des feuilles, la production de biomasse totale ne devrait pas être altérée tandis que la part allouée aux parties aériennes est diminuée. Cette part résiduelle pourrait être attribuée aux racines et à l'accumulation de sucre. Cette hypothèse est au centre de notre travail, mais requiert pour être validée le recours à la modélisation. Seule la mise en équation de la capacité de croissance des différents organes et des différents flux entre compartiments permettrait de la tester. Nous nous proposons de faire l'inventaire des modèles, et de leurs caractéristiques pour évaluer leur capacité à rendre compte de l'effet d'une restriction en azote sur l'élaboration du rendement.

2.3. Les modèles de prévision du rendement

Les modèles de culture sont une représentation simplifiée de la réalité et sont orientés par une certaine finalité (Jeuffroy, et al., 2008). Ils sont constitués de relations mathématiques décrivant le fonctionnement de la plante en interaction avec différents facteurs (le climat, les opérations techniques, etc.). La modélisation peut prendre des formes diverses. A partir de la nature des relations mathématiques employées et des objectifs, peuvent être distingués les modèles statistiques, empiriques, et mécanistes. Les modèles strictement statistiques sont en règle générale simples et robustes. Les

Tableau 2-2 : Récapitulatif des caractéristiques des modèles.

Modèles	Formalisme		Niveau de spécialisation		Niveau d'explicitation		Objectif d'utilisation	
	Statistique ou Empirique	Mécaniste	Générique	Spécialiste	Peu explicite	Explicite	Connaissance	Prévision
Previbet	X			X	X			X
Broom's Barn		X		X	X			X
SUBEMOpo		X		X	X			X
CERES		X	X			X		X
STICS		X	X		X			X
SUCROS		X		X	X			X
GreenLab		X	X			X	X	

modèles empiriques décrivent l'évolution du système au travers de relations simplifiées entre les différentes variables sans fournir d'explications sur le fonctionnement biologique ou physique. Les équations décrivant les relations sont le plus souvent obtenues à partir d'ajustements statistiques entre les différentes variables d'état mesurées (Jeuffroy, et al., 2008). Les modèles mécanistes quant à eux décrivent et quantifient les mécanismes et les processus qui interviennent au niveau de la plante et du sol en se basant sur la formalisation d'hypothèses concernant le fonctionnement physiologique et physique du système étudié. Une classification des modèles de culture existe en fonction du nombre de cultures prises en charge et des choix de formalismes opérés lors de l'élaboration du modèle de culture (Guillaume, 2011). Les modèles spécifiques sont ainsi distingués des modèles génériques. Les modèles spécifiques ont été développés pour représenter la croissance et le développement d'une culture donnée. Ils intègrent des processus spécifiques à l'espèce concernée et prennent en compte différents facteurs de production en fonction des objectifs d'application. De nombreux modèles spécifiques à la betterave ont été développés pour simuler le rendement en sucre. Parmi les plus importants on peut citer : Previbet (ITB), Broom's Barn (Richter, Jaggard, & Mitchell, 2001) (Pidgeon, Werker, Jaggard, Richter, Lister, & Jones, 2001) (Qi, Kenter, Hoffmann, & Jaggard, 2005), SUBEMOpo (Vandendriessche, 2000) et SUCROS (Spitters, van Keulen, & van Kraalingen, 1989). Les modèles génériques se caractérisent par la description quantitative des processus biologiques qui sont communs à plusieurs cultures. Ils traitent la spécificité de chaque espèce au travers d'options de simulation et de différentes valeurs des paramètres. Le développement de tels modèles permet de mutualiser les connaissances acquises sur le fonctionnement des espèces et fournit un cadre d'évaluation pour l'identification des convergences et des différences entre cultures (Brisson, Wery, & Boote, 2006). De tels modèles permettent également d'envisager des analyses à l'échelle du système de culture. Les modèles CERES (Leviel, 2000) et STICS (Brisson, et al., 1998) (Brisson, et al., 2003) ont par exemple été développés dans ces objectifs. Qu'il s'agisse des modèles spécifiques ou génériques, les différences variétales sont prises en compte au travers de paramètres génotypiques ou encore variétaux (Guillaume, 2011). On peut également différencier les modèles selon leur niveau de détail du point de vue de l'architecture de la plante, on distingue alors des modèles selon le degré d'explicitation du couvert, les modèles FSPM (Functional-Structural Plant Models) comme le modèle GreenLab (Yan, Kang, De Reffye, & Dingkuhn, 2004) étant les plus explicites. Le tableau 2-2 récapitule les modèles que l'on vient de citer. Les trois modèles génériques qui y apparaissent sont applicables à la betterave. Ainsi nous allons détailler en exemple dans le prochain paragraphe chacun des modèles du tableau pour illustration des méthodes de modélisation chez la betterave sucrière.

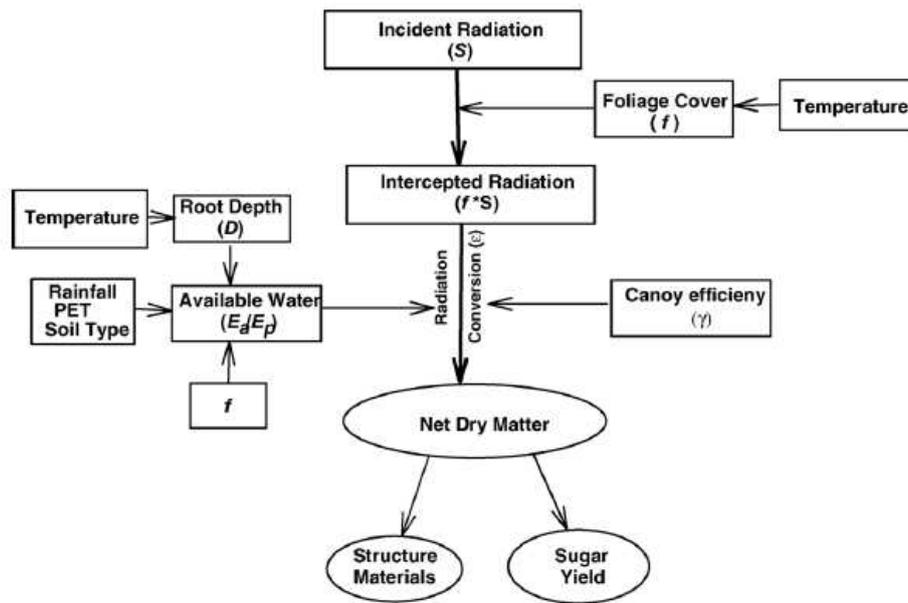


Figure 2-17 : Les composantes et les variables environnementales du modèle de croissance de la betterave sucrière Broom's Barn (Qi, Kenter, Hoffmann, & Jaggard, 2005).

2.3.1. Un modèle développé par l'ITB : PREVIBET®

PREVIBET® est un modèle de croissance élaboré à partir d'études récentes qui permet de simuler le rendement en biomasse racinaire et la production journalière de sucre à l'échelle de la parcelle.

Le modèle utilise la relation de linéarité existant entre la production racinaire de betterave et le temps thermique à partir du moment où les feuilles atteignent 80% de couverture du sol. On peut considérer à ce stade que le rayonnement n'est plus limitant. La production est régulée par la température et des indices de contraintes hydriques et photopériodiques.

Le rendement en sucre est calculé avec un coefficient, considérant la teneur en saccharose constante et correspondant à 77% de la quantité de biomasse sèche racinaire.

Ce type de modèle est robuste grâce à l'acquisition par l'ITB d'une base de données expérimentales importante sur le rendement de la betterave, il s'appuie sur un échantillonnage de plusieurs années et est régulièrement mis à jour en fonction du climat. Cependant cette estimation de la quantité de sucre n'interagit pas avec le développement foliaire ce qui empêche son utilisation dans le cas de stress où des phénomènes de sénescence accrue accompagnés de repousses foliaires apparaissent quand le stress est levé. Ce modèle ne prend donc pas en compte les variabilités phénotypiques des plantes qui sont engendrées par les contraintes environnementales sur l'organogenèse et la morphogenèse. Il ne permet pas de réaliser de diagnostic fin sur les conditions de l'élaboration du rendement (Lemaire S. , 2010).

2.3.2. Le modèle de croissance de Broom's Barn

Ce modèle de simulation de la croissance et du rendement a été développé à la station de recherche de Broom's Barn au Royaume-Uni (Richter, Jaggard, & Mitchell, 2001) (Pidgeon, Werker, Jaggard, Richter, Lister, & Jones, 2001) (Qi, Kenter, Hoffmann, & Jaggard, 2005). Il est piloté par les variables climatiques et donne une estimation de la croissance des plantes et du rendement final en sucre, dans des conditions optimales pour les nutriments et exempt de maladies, avec une population supérieure ou égale à 75000 plantes par hectares. Le modèle prend en compte les effets de la disponibilité en eau dans le sol sur la production de la matière sèche et l'accumulation de sucre. Les composants du modèle de croissance Broom's Barn sont représentés sur la figure 2-17.

Sous ces conditions, la croissance de la betterave et l'accumulation de matière sèche et de sucre sont principalement contrôlées par des variables climatiques : le rayonnement et la température. Pour calculer la production de biomasse sèche et la part pour le rendement en sucre, le modèle calcule à l'aide d'équations mathématiques les

valeurs journalières de la couverture du sol par le bouquet foliaire, le rayonnement intercepté par le bouquet foliaire, la production totale de biomasse sèche en utilisant une efficacité d'utilisation du rayonnement potentielle, et sa répartition pour le rendement en sucre. L'efficacité d'utilisation potentielle du rayonnement est amenée à diminuer avec l'augmentation de la biomasse sèche et l'âge du bouquet foliaire. Pour prendre en compte les effets du stress hydrique, un modèle simulant le contenu en eau des sols est couplé au modèle de croissance, donnant la quantité d'eau disponible journalièrement dans la zone proche des racines. L'efficacité d'utilisation potentielle du rayonnement est réduite proportionnellement au ratio entre l'évapotranspiration actuelle et potentielle.

La couverture du sol par le bouquet foliaire et la profondeur d'enracinement sont modélisés en fonction des températures moyennes journalière cumulées en base 3°C. La couverture du sol par le bouquet foliaire est directement reliée à l'indice foliaire des plantes et détermine la proportion de rayonnement intercepté par le bouquet foliaire (Scott & Jaggard, 1993). Le stress hydrique est intégré par l'intermédiaire d'un indice de stress hydrique affectant le développement foliaire.

La quantité journalière de biomasse sèche totale (ΔW) destinée au stockage du sucre (ΔY) est définie à l'aide d'un coefficient de répartition du sucre « k » ($k = 0.00099581 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$, (Qi, Kenter, Hoffmann, & Jaggard, 2005)) de la manière suivante :

$$\Delta Y = \Delta W (kW / (1 + kW))$$

Avec W : la biomasse sèche totale obtenue en additionnant tous les incréments journaliers.

Par intégration, le modèle calcule également le rendement final en sucre. Le reste de la biomasse totale est allouée aux parties structurales des plantes.

Le modèle ne prend pas en compte les effets des pratiques agronomiques comme la fertilisation azotée.

2.3.3. SUBEMOpo : Sugar BEet MOdel potential production

SUBEMOpo est un modèle de simulation dynamique mécaniste, basé sur les modèles CROPPHOT, SUBGRO I et II et SUBGOL (Vandendriessche, 2000). Il simule la croissance potentielle de la betterave et l'accumulation de sucre dans des conditions optimales, avec un apport en nutriments et en eau adéquats et sans pression de maladies gênant la croissance à un pas de temps horaire. Sous ces conditions, la croissance de la betterave et l'accumulation de sucre sont entièrement contrôlées par le climat (rayonnement, température, précipitations et vitesse du vent) et les caractéristiques de la culture (densité). L'accumulation de la matière sèche et du sucre dans les organes est calculée par l'assimilation du CO₂ par le bouquet foliaire. Ce taux dépend du rayonnement absorbé et des caractéristiques photosynthétiques individuelles des

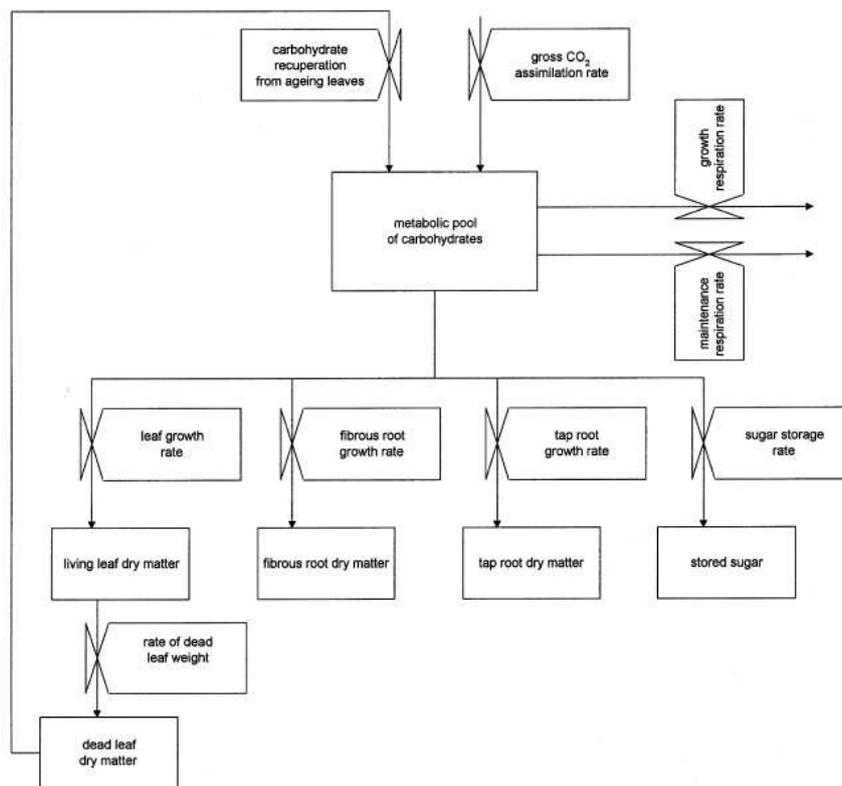


Figure 2-18 : Diagramme relationnel montrant la répartition des sucres entre la respiration, la biomasse sèche structurale et le stockage du sucre dans le modèle SUBEMOpo (Vandendriessche, 2000). (Les boîtes représentent les variables d'état, les « valves » représentent la variation de la variable et les lignes représentent les flux de masse).

feuilles. Une partie des sucres produits servent à maintenir la biomasse existante (respiration de maintenance). Les sucres restants sont convertis en biomasse structurale des feuilles, du pivot et des racines fibreuses, et en sucre stocké.

La répartition des assimilats dans le modèle est gérée par une relation source-puits. Ce mécanisme de répartition inclut une régulation des priorités au sein des organes de la plante pour l'allocation des sucres et un équilibre fonctionnel entre les racines et les feuilles qui permettent dans un environnement donné d'allouer le nouveau matériel aux feuilles et à la racine de telle manière que la plante atteigne un taux de croissance optimal. Ainsi la croissance de la racine est dépendante des sucres provenant des feuilles, mais la croissance foliaire est en retour dépendante de la quantité de racines fibreuses, et de l'eau et des nutriments acquis par celles-ci.

Le modèle divise donc la plante en trois compartiments de biomasse structurale (feuilles, pivot et racines fibreuses) et en deux parts non structurales (le pool de sucre métabolique et le sucre stocké) (figure 2-18). Le pool métabolique est rempli de nouveau par l'assimilation du CO₂ et par la récupération des sucres des feuilles âgées, et est amputé par la respiration, la croissance et le stockage du saccharose.

Pour modéliser la croissance, l'activité des puits pour les sucres de chaque compartiment de la plante est calculée. L'activité de puits est définie comme le taux d'accroissement en biomasse de l'organe. Le stockage du sucre est considéré comme un cas spécial de croissance appelé augmentation de biomasse sèche non-structurale dans le pivot.

La croissance d'un compartiment (GR_o) est modélisée par :

$$GR_o = PGR_o * E_{limit}$$

$$\text{Avec } PGR_o = \text{MIN} (MRGR_o * DWCo, AGR_o)$$

Où PGR_o est le taux de croissance potentiel du compartiment, défini par la valeur la plus faible entre le taux de croissance absolu (AGR_o) et le taux de croissance relatif maximum du compartiment ($MRGR_o$), multiplié par le poids sec de cette partie du compartiment qui est capable de croissance ($DWCo$).

Le facteur limitant (E_{limit}) a une valeur comprise entre 0 et 1 (Vandendriessche, 1995). Quand le facteur limitant est égal à un, on est à la croissance potentielle.

Dans le modèle, le stockage du sucre est basé sur les observations réalisées par Giaquinta (1979) et divisé en 2 phases. Pendant la première phase, les sucres sont compartimentés dans le matériel structural. A partir du moment où le poids sec de la plante excède $0.1 \text{ g plante}^{-1}$, la phase de stockage du sucre commence avec un taux lié au taux de croissance de la structure de la plante modulé par les facteurs l'influençant : la température du sol, le contenu relatif en eau des feuilles et l'apport en sucre des feuilles. Le facteur majeur influençant la croissance, et l'accumulation de sucre est le

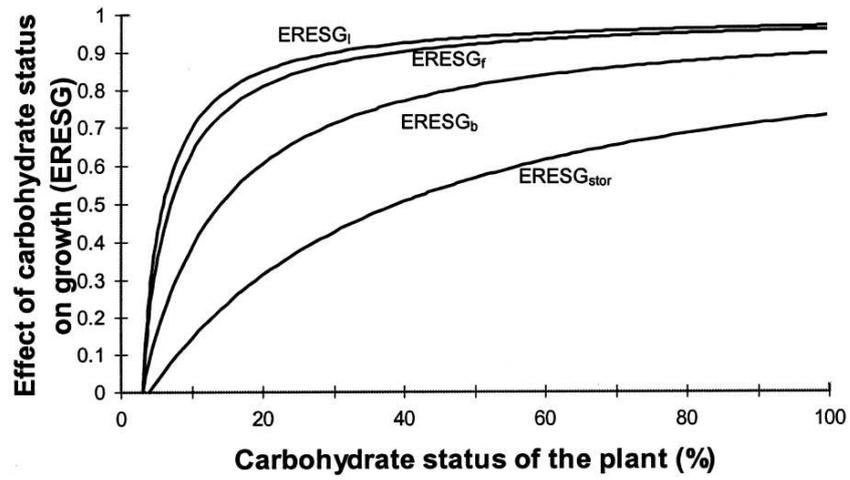


Figure 2-19 : Courbes de réponse montrant l'effet du statut en sucres totaux de la plante sur la croissance des feuilles (ERESG_l), de la racine fibreuse (ERESG_r), du pivot (ERESG_b) et du stockage du sucre (ERESG_{stor}) dans le modèle SUBEMOpo (Vandendriessche, 2000).

statut en sucres totaux de la plante, et est calculé comme le poids du pool de sucres métaboliques exprimé en pourcentage de la biomasse sèche totale de la plante (figure 2-19).

Le saccharose qui est stocké est modélisé comme un facteur interne qui a une influence sur la croissance du pivot. Il implique que la croissance structurale de la racine doit se produire avant que le saccharose puisse être stocké, mais aussi qu'une certaine quantité de saccharose doit être stocké dans les cellules existantes avant que d'autres nouvelles cellules ne soient produites. SUBEMOpo modélise la réponse du taux de croissance du pivot au contenu en sucre total par le remplissage du « réservoir de stockage du saccharose » à 2.5% de sucre en fonction du poids frais. En dessous de ce seuil il n'y a pas de croissance structurale du pivot, et au-delà de 8% le contenu en sucre n'a plus d'effet limitant sur la croissance du pivot (entre ces 2 bornes, une relation linéaire définit la réponse).

La réponse du modèle à un manque de sucres totaux est de garder une plus grande proportion de croissance aux feuilles dans le but de produire plus de sucres.

La partie la moins concluante du modèle est la répartition de la biomasse sèche entre les parties structurales et non-structurales du pivot. Le modèle alloue trop de sucre à la croissance structurale de la betterave aux dépens de son accumulation. Ainsi dans le modèle, le pourcentage de sucre exprimé en fonction de la masse sèche n'atteint jamais la valeur de 75% (bien en dessous des données expérimentales utilisées), alors que selon Scott et Jaggard (1993), le sucre exprimé en fonction de la matière sèche a une valeur débutant à 25% de la matière sèche racinaire et augmente jusqu'à une valeur stable de 75%.

Le modèle Broom's Barn affecte à la biomasse de la plante entière simulée une proportion de sucre, et n'est valable que dans des conditions optimales. Le SUBEMOpo a une approche plus poussée de la répartition des assimilats avec des relations source-puits au sein de la plante pilotées par le contenu en sucre global, mais n'est également valable qu'en conditions optimales. Ces 2 modèles ne prennent donc pas en compte l'effet de nombreux stress qui peuvent affecter la betterave. Les erreurs imputées aux manques d'information sur les variations du taux de répartition de la biomasse peuvent induire des biais conséquents dans l'estimation des biomasses compartimentées en fin de culture (Lemaire S. , 2010).

Il est donc nécessaire d'étudier d'autres types de modèles simulant les phénomènes d'allocations et de translocations des assimilats selon les variations du milieu.

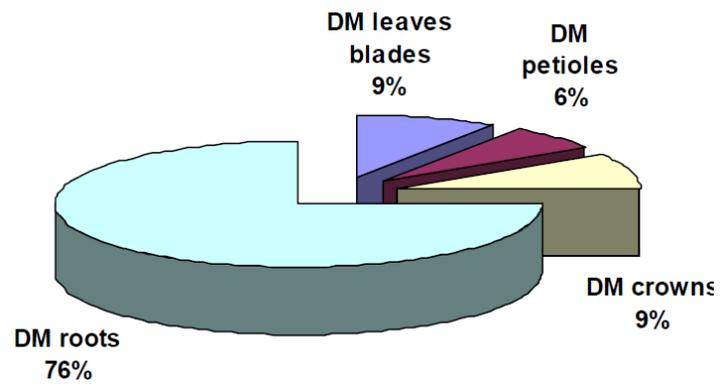


Figure 2-20 : Schéma de répartition des assimilats de la photosynthèse dans le modèle CERES-Beterrave (Leviel, 2000).

2.3.4. CERES-BEET

CERES est une famille de modèles déterministes de fonctionnement du système sol-plante-atmosphère disponible pour un grand nombre de cultures. Ces modèles fournissent un cadre simple pour la simulation de l'eau, des cycles du carbone et de l'azote dans les systèmes sol-plante. Le modèle CERES-betterave a été développé dans le contexte d'un projet de recherche sur les impacts environnementaux de l'agriculture en Roumanie dans la plaine du Danube, dans le travail de thèse de B. Leviel (Leviel, 2000).

Dans le modèle, la simulation de l'indice foliaire est basée sur la croissance individuelle des feuilles, dont l'expansion est pilotée par le temps thermique. La photosynthèse nette est calculée à partir du rayonnement intercepté par la culture par l'intermédiaire de l'efficacité de l'utilisation du rayonnement ($RUE = 2.8 \text{ g MJ}^{-1}$) et avec un coefficient d'extinction de la loi de Beer Lambert égal à 0.65.

Le prélèvement d'azote par la plante est représenté selon un schéma offre-demande. La demande de la plante est une fonction de la différence entre le contenu en azote actuel et critique dans les tissus aériens et souterrains. Les stress azotés et hydriques dans le modèle affectent la croissance de l'indice foliaire et donc la photosynthèse. Ils sont représentés par des coefficients (variant de 0 à 1) qui sont combinés pour réduire le taux de croissance potentiel. Le coefficient du stress azoté est basé sur l'indice de nutrition azoté, qui est le ratio entre la concentration actuelle en azote dans les feuilles et le contenu critique en azote optimal pour la production de biomasse. Le coefficient de stress hydrique est le ratio entre la transpiration actuelle et potentielle de la plante.

Les assimilats de la photosynthèse sont prioritairement alloués aux feuilles (en utilisant une masse surfacique des feuilles de 50 g m^{-2}). Ensuite, les 85% de la biomasse sèche restante sont alloués aux racines (dont le pivot), et les 15% restants sont alloués au collet. En pratique, l'indice foliaire cesse d'augmenter après 1500°CJ , la racine devient alors le principal puits. Ainsi B. Leviel dans sa thèse utilise un rapport constant entre la biomasse sèche racinaire et la biomasse sèche de feuilles quels que soient les traitements appliqués à la culture, il estime qu'à la récolte la biomasse sèche racinaire (pivot et collet) représente 85% de la biomasse sèche totale, et le bouquet foliaire représente les 15% restants (figure 2-20).

Le rendement en sucre à la récolte est calculé à partir de la biomasse sèche racinaire totale, en faisant l'hypothèse que 95% de la biomasse sèche racinaire est récoltée et que les racines contiennent 82% d'eau et 14% de sucre dans leur masse fraîche.

Comparé à d'autres modèles betterave, comme SUCROS ou Broom's Barn, le modèle présente des caractéristiques originales : il peut simuler la succession de cultures

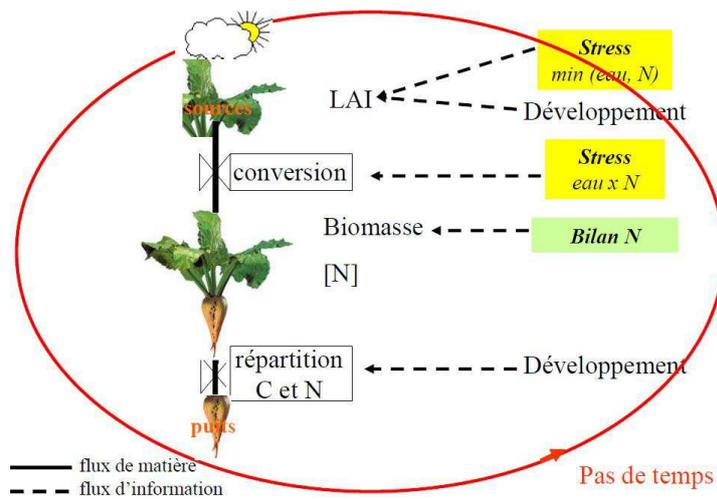


Figure 2-21 : Schéma représentant le modèle STICS-betterave (Launay M., communication personnelle, 2012).

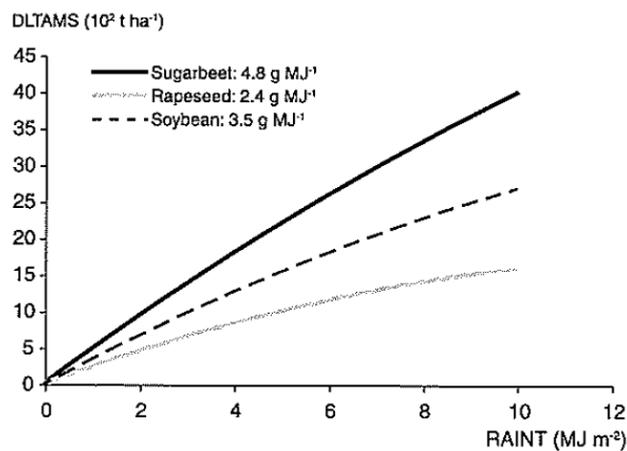


Figure 2-22 : Accumulation journalière potentielle de biomasse (DLTAMS) en fonction du rayonnement intercepté pour 3 espèces pendant leur phase de remplissage : la betterave sucrière, le colza et le soja dans le modèle STICS (Brisson, Launay, Mary, & Beaudoin, 2008).

et donc simuler les effets des rotations, il est environnement-orienté et prédit les émissions au champ de différents composants azotés par exemple. Son approche sur le développement de l'indice foliaire est basée sur une simulation individuelle de chaque feuille (Leviel, Crivineanu, & Gabrielle, 2003).

2.3.5. STICS : Simulateur multIdisciplinaire pour les Cultures Standards

STICS (Brisson, et al., 1998) (Brisson, et al., 2003) est un modèle de fonctionnement des cultures qui simule la croissance et le développement de cultures variées (grandes cultures, prairies, cultures intermédiaires, tomate, salade, vigne et betterave par exemple), ainsi que les bilans hydriques et azotés. C'est un modèle dynamique qui fonctionne à un pas de temps journalier.

Les données d'entrée du modèle sont relatives au climat, au sol et au système de culture. Les variables de sorties concernent la production, l'environnement, et l'évolution des caractéristiques du sol sous l'effet de la culture et des pratiques culturales. L'impact des stress hydriques, azotés et thermiques est pris en compte par l'intermédiaire d'indices de stress qui peuvent réduire la croissance végétative et celle des organes de stockage. La production des cultures ne repose pas que sur leur fonctionnement écophysologique mais aussi sur les itinéraires techniques qui leur sont appliqués (figure 2-21).

Les organes identifiés pour la betterave dans le modèle sont : les feuilles vertes et jaunes (attachées à la plante ou qui tombent), les organes récoltés (pivot) et des réserves (compartiment non localisé, qui correspond à la différence entre la biomasse totale et la biomasse de feuilles et organes récoltés). Le pivot comprend deux parties : une partie « structurelle » que le modèle simule comme un « fruit » par analogie avec les autres cultures où le fruit représente la partie de la plante qui est récoltée, avec une période de croissance propre limitée par des stades phénologiques, et une partie « réserve » alimentée chaque jour par les assimilats disponibles une fois que tout ce qui a été produit par la photosynthèse ait été alloué aux autres organes (Launay, Graux, Brisson, & Guerif, 2009).

Dans le modèle, la croissance de la culture est pilotée par le bilan carbone : interception du rayonnement solaire par le feuillage puis transformation en biomasse (figure 2-22). Chez la betterave il y a une compétition pour les assimilats entre le feuillage et le pivot. STICS utilise la fonction du type plantes indéterminées pour simuler ce phénomène. Cette formalisation, initialement utilisée pour la tomate, suppose que la compétition trophique entre les feuilles et l'organe de stockage est un facteur important pour la production et la gestion de la culture. Dans le modèle, on considère que la durée d'établissement du pivot est estimée à 250°Cj (base 3°C) ; que la croissance du pivot prend la priorité sur les organes en croissance à 550°Cj (en base 0°C

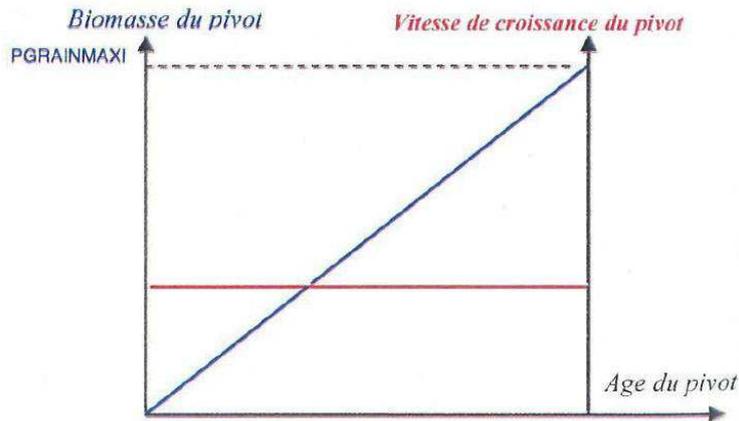


Figure 2-23 : Croissance en biomasse des organes récoltés chez la betterave dans le modèle STICS d'après Launay et al. (2009).

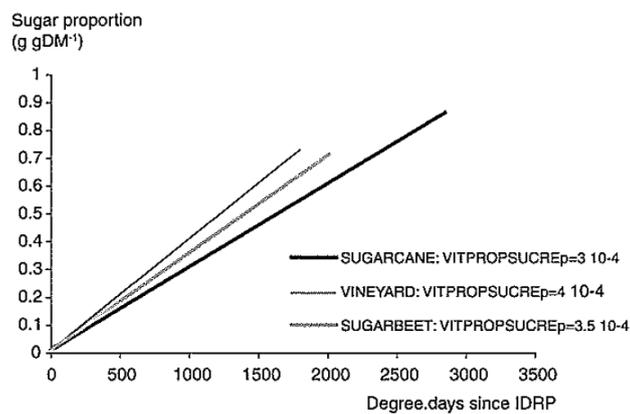


Figure 2-24 : Evolution du contenu en sucre en relation avec le développement du fruit pour la canne à sucre, la betterave sucrière et la vigne dans le modèle STICS (Brisson, Launay, Mary, & Beaudoin, 2008).

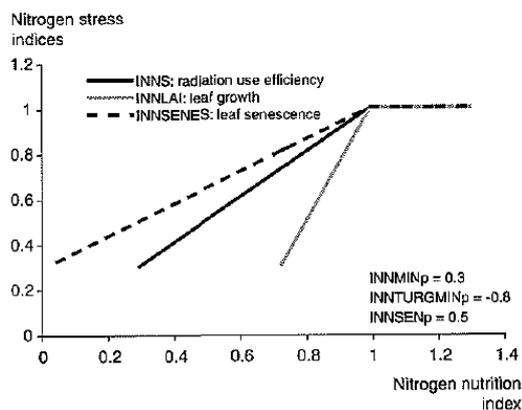


Figure 2-25 : Indices de stress azoté en fonction de l'indice de nutrition azoté dans le modèle STICS (Brisson, Launay, Mary, & Beaudoin, 2008).

depuis la levée) ; et que le début de l'accumulation de biomasse sèche dans le pivot débute à 850°Cj (en base 0°C depuis la levée) (Launay & Brisson, 2003). Les trois stades identifiés en fonction du temps thermique correspondent aux stades de croissance « St1 », « St2 » et « St3 » proposés par Fleury et Caneill (1984). En conditions potentielles de croissance, le modèle considère que la biomasse du pivot est une fonction linéaire du temps, le pivot croît donc de manière constante au cours du cycle de croissance (Launay, Graux, Brisson, & Guerif, 2009) (figure 2-23), c'est également en accord avec les hypothèses de Fleury et Caneill (1984) qui indiquent qu'après le stade « St3 », la croissance de la racine est linéaire.

La compétition trophique entre les feuilles et le pivot commence dès l'établissement de ce dernier. Pour les plantes à croissance indéterminées, STICS caractérise le stress trophique par la variable SOURCEPUTS qui est le ratio entre le pool trophique (défini comme l'accumulation journalière de biomasse) et les puits dépendants du taux de croissance potentiel de l'indice foliaire et du pivot. Quand il n'y a pas de stress trophique, la croissance foliaire n'est pas réduite (Launay & Brisson, 2003).

Dans le modèle, la détermination du contenu en sucre se fait de la manière suivante : depuis le début du remplissage de la partie « réserve » du pivot jusqu'à la maturité physiologique, il est supposé qu'il y a une augmentation graduelle de la proportion de sucre dans la matière sèche. Cette augmentation est déterminée par un paramètre « VITPROPSUCREp » exprimé en $g^{-1} °Cj^{-1}$ (figure 2-24).

Le prélèvement de l'azote du sol par la plante est simulé par le concept d'offre et de demande. Le modèle calcule et compare chaque jour l'azote du sol disponible et les besoins de la plante, le taux effectif de prélèvement d'azote sera égal à la plus faible de ces deux composantes. L'impact des stress azotés est pris en compte dans le modèle par l'intermédiaire de différents indices de stress tous exprimés en fonction de l'indice de nutrition azoté (figure 2-25). L'indice de nutrition azotée est le rapport entre la concentration en azote de la plante et la concentration critique en azote pour la même biomasse calculée en fonction de la courbe de dilution de l'azote. Les indices de stress azoté agissent sur la croissance foliaire (« INNLAJ »), la sénescence des feuilles (« INNSENES ») et sur l'efficacité d'utilisation du rayonnement (« INNS »).

Comme pour le modèle CERES, le modèle STICS est un modèle qui simule la production de la culture et l'impact de celle-ci sur l'environnement. Le modèle STICS a besoin de stades précis du développement de la betterave pour simuler les rendements en racine et en sucre. Ainsi, on force le démarrage du développement de la racine et le taux d'accumulation de sucre dans celle-ci.

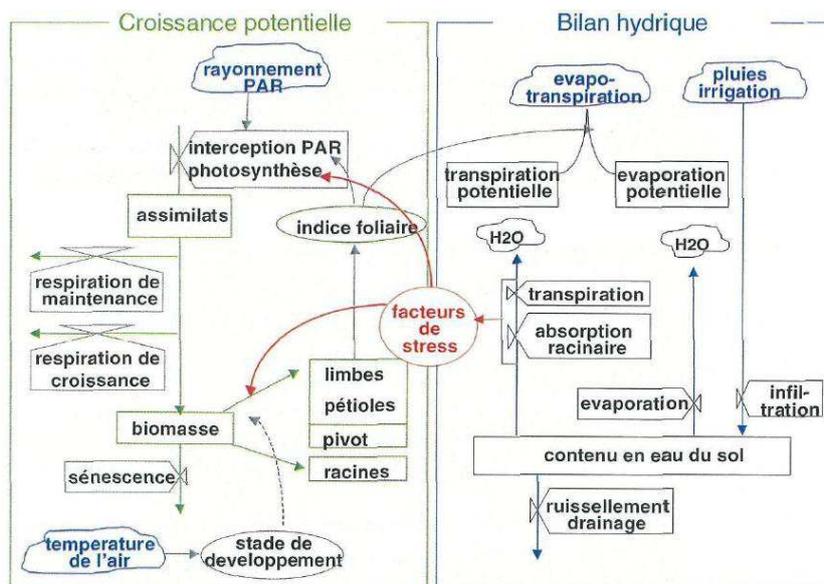


Figure 2-26 : Présentation globale du modèle SUCROS et de son module de bilan hydrique (Launay, 2002).

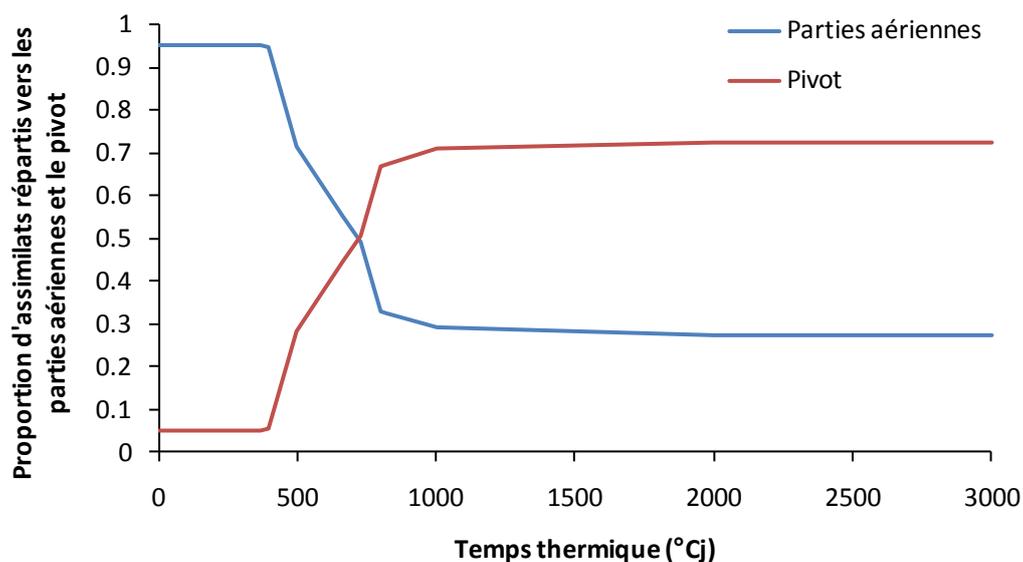


Figure 2-27 : Fonction de répartition des assimilats référencés dans SUCROS donnant la proportion d'assimilats alloués à chaque organe en fonction de la somme de température depuis la levée d'après Spitters, van Keulen et van Kraalingern (1989).

2.3.6. SUCROS : Simple and Universal CROp growth Simulator

Le modèle de culture SUCROS (Spitters, van Keulen, & van Kraalingen, 1989) est un modèle mécaniste simulant la production de biomasse de la betterave depuis la levée jusqu'à la récolte à un pas de temps journalier et dont les variables de forçage sont des variables climatiques : températures, rayonnement global, pluviométrie, vent et humidité de l'air (figure 2-26). Ce modèle utilise des équations empiriques de taux de biomasse alloués aux compartiments en fonction du temps thermique et des conditions de la culture (Launay, 2002).

Le modèle calcule chaque jour l'indice foliaire de la culture et détermine ainsi une nouvelle surface d'interception de la lumière le jour suivant. Le calcul journalier de biomasse produite est fondé sur le taux d'assimilation du CO₂, dépendant du rayonnement absorbé et de la température, avec une modulation en fonction de l'âge de la plante. Le taux de croissance de la plante et la vitesse avec laquelle elle accumule la matière sèche sont une résultante de la différence entre la production d'assimilats par la photosynthèse et la consommation partielle par la respiration, affectée d'un coefficient de conversion des sucres en matière sèche (Launay, 2002).

Après l'enlèvement du coût de la respiration de croissance des organes, le reste des assimilats est distribué aux organes selon des proportions dépendant du stade de développement de la culture (figure 2-27). On peut expliquer cette fonction de répartition des assimilats avec les stades de croissance proposés par Fleury et Caneill (1984). Ainsi au démarrage du modèle on a une forte allocation de la biomasse pour les feuilles et une faible allocation de biomasse pour les racines, et ce jusqu'à environ 400 °Cj (base 2°C). Cela correspond au stade St0 à St1, qui voit le rapport PR/PF diminuer avec l'apparition de la première paire de feuilles. Ensuite dans le modèle on assiste à une inversion de l'allocation de la biomasse entre les organes. L'allocation vers les racines augmente fortement entre 400 et 800 °Cj, alors que celle des feuilles diminue. Cela correspond au stade St2 à St3 où la croissance racinaire continue à être exponentielle alors que celle des feuilles ne l'est plus. On a enfin une stabilisation des rapports à partir de 1000°Cj, avec une forte proportion d'assimilats alloués aux racines. Cela correspond au stade St3 à St4 où la croissance de la racine est considérée comme linéaire.

Le rendement en sucre est calculé comme une proportion de la biomasse sèche allouée aux racines. Il correspond à 75% du rendement en poids sec de racines. Les racines colonisent le sol jusqu'à atteindre une profondeur maximale ou un stade physiologique déterminé par une somme de temps thermique au-delà de laquelle la croissance racinaire est stoppée. La vitesse de croissance racinaire est supposée constante tout au long du cycle cultural.

SUCROS décrit la production en conditions d'alimentation hydrique limitante, mais ne tient compte d'aucun autre facteur limitant tel que la disponibilité de l'azote, la compétition avec les adventices ou la présence de ravageurs et maladies. Des facteurs de stress hydrique régulent l'efficacité de la photosynthèse en incluant la sénescence et en limitant directement le taux de sucre produit par le couvert en fonction du CO₂ absorbé chaque jour ; la répartition des assimilats entre les racines fibreuses et le reste de la plante en favorisant l'allocation des assimilats vers les racines fibreuses en cas de fort stress hydrique ; et la translocation d'assimilats depuis le pivot vers les parties aériennes (Launay, 2002).

Ce type de fonction permet la prise en compte d'une rétroaction positive entre morphogénèse et taux de biomasse alloué aux organes aériens dans le cas par exemple d'une reprise d'activité des méristèmes ou d'une croissance individuelle des feuilles accélérée suite à la levée d'un stress (Lemaire S. , 2010).

2.3.7. Un modèle de croissance explicite structure-fonction : GreenLab

Le modèle GreenLab est un modèle générique de croissance de plante (Yan, Kang, De Reffye, & Dingkuhn, 2004), il a été adapté sur la betterave sucrière. Il décrit à la fois le fonctionnement écophysologique de la plante au cours de sa croissance (production de biomasse et allocation) mais également son développement architectural au niveau de l'organe (feuilles (limbes et pétioles), fruits, entrenœuds, racine,...). GreenLab décrit la croissance de la plante de la graine à sa mort, ainsi que la sénescence. La plante est considérée comme le résultat cumulé des effets de l'environnement sur le génotype (Lemaire S. , 2010).

La production de la biomasse sèche d'une plante est déterminée par une fonction empirique de la surface foliaire et des conditions environnementales (rayonnement principalement). La répartition de la biomasse dans la plante est régie par les relations sources-puits de la plante. L'hypothèse principale du modèle de répartition de biomasse est celle du pool commun, c'est-à-dire que la biomasse produite par la plante alimente une réserve commune à laquelle tous les organes en expansion viennent s'alimenter. Chaque organe en expansion reçoit une quantité de biomasse proportionnelle à la force de son puits qui est dépendante de l'âge de l'organe. Des relations allométriques permettent de déterminer la forme des organes. En particulier pour les limbes, on déduit directement de la masse la surface foliaire en considérant une masse surfacique constante (Lemaire S. , 2010).

Ce modèle ne simule malheureusement pas le rendement en sucre de la betterave. Les simulations du modèle concernant la racine s'arrêtent à la biomasse racinaire totale, sans distinction d'un compartiment racinaire structural et d'un compartiment de stockage comme le font les modèles à visée de prévision du rendement en sucre. Le modèle ne rend pas non plus compte des effets de la fertilisation azotée.

Tableau 2-3 : Récapitulatif des modèles betterave avec leurs objets de simulation, leurs conditions d'application et la méthode de partage des assimilats et d'élaboration du rendement en sucre.

<i>Modèle</i>	<i>Objet de simulation</i>	<i>Conditions d'application</i>	<i>Méthode pour la répartition des assimilats et le stockage du sucre</i>
Previbet	Rendement racine et sucre	Optimales sauf pour l'eau	Pas d'allocation des assimilats, le sucre en % de la biomasse racinaire
Broom's Barn	Rendement final en sucre	Optimales sauf pour l'eau	Pas d'allocation des assimilats, le sucre en % de la biomasse totale
SUBEMOpo	Croissance et rendement en sucre	Optimales (eau, nutriments, maladies)	Allocation des assimilats : source-puits, 2 compartiments racinaires (structure et stockage), sucre à partir du % de sucre total de la biomasse totale
SUCROS	Croissance et rendement en sucre	Optimales sauf pour l'eau	Allocation des assimilats : selon le stade de développement. Le sucre en % de la biomasse
CERES	Croissance et rendement en sucre	Environnement varié (eau, azote)	Allocation des assimilats en priorité aux feuilles. Le sucre en % de la biomasse à la récolte
STICS	Croissance et rendement en sucre	Environnement varié (eau, azote)	Allocation des assimilats : selon le stade de développement et des relations source-puits, 2 compartiments racinaires (structure et stockage). Stockage du sucre à partir d'une fonction linéaire dépendante du temps thermique
GreenLab	Croissance, architecture	Environnement stable	Allocation des assimilats : rapports source-puits. Pas de simulation du sucre

2.3.8. Conclusion sur les modèles de prévision du rendement de la betterave sucrière

Les modèles développés ci-avant représentent les principaux formalismes de modélisation que l'on peut retrouver pour la betterave sucrière, mais la liste faite ici n'est pas exhaustive, il en existe bien d'autres.

La plupart des modèles développés ci-avant ne sont valables qu'en conditions non limitantes ou prennent seulement en compte l'impact d'un stress hydrique sur la croissance (Previbet, Broom's Barn, SUBEMOpo, SUCROS et GreenLab). Ils ne sont donc pas appropriés pour étudier les effets d'autres facteurs agronomiques importants tels que la nutrition azotée. D'autres modèles prennent en compte la nutrition azotée par l'intermédiaire de facteurs de stress agissant sur la croissance foliaire (CERES et STICS) et sur leur sénescence et leur capacité photosynthétique (STICS). Cette prise en compte du stress azoté permet donc de moduler la production de biomasse en fonction de la nutrition azotée (tableau 2-3).

Certains modèles comme STICS et SUBEMOpo nécessitent de définir des stades de croissance de la betterave. En effet, dans SUBEMOpo, l'accumulation de sucre ne peut débuter qu'à partir d'une quantité de biomasse prédéfinie (0.1 g pl^{-1}). Et dans STICS, la croissance du pivot est pilotée en fonction du temps thermique en ce qui concerne le démarrage de sa croissance ainsi que de l'accumulation du sucre.

La simulation de l'accumulation du sucre dans le pivot n'est globalement pas bien prise en compte dans ces modèles. Pour Previbet, Broom's barn, SUCROS et CERES, on affecte une proportion de sucre à la biomasse sèche racinaire. Pour le modèle SUBEMOpo, le contenu en sucre des racines est déterminé à partir du contenu en sucre total de la plante. Et dans STICS, on affecte un taux évolutif d'accumulation du sucre dans la biomasse sèche du pivot en fonction du temps thermique.

Plusieurs de ces modèles prennent en compte une approche source-puits pour effectuer la répartition des assimilats de la photosynthèse entre les différents compartiments de la plante. SUBEMOpo utilise une fonction du contenu en sucre global de la plante pour définir le taux de croissance de chaque compartiment. SUCROS utilise une relation dépendante du temps thermique pour définir la part de biomasse à allouer aux feuilles et au pivot. Dans CERES, les feuilles sont le puits prioritaire, les assimilats restants étant alloués aux racines. STICS utilise une variable pour représenter la compétition pour les assimilats entre les feuilles et le pivot.

Tableau 2-4 : Différences génotypiques et effet du site, de la saison et des pratiques agronomiques sur la répartition de la biomasse sèche totale de la plante (DM) à la racine de stockage et sur les concentrations en sucre dans le pivot en poids frais (FW) et poids sec (DM) (Milford G. , 2006).

Factor	Root DM % of total DM	Sugar % of root DM	Sugar % of root FW	Reference
Genotype	47.1–57.9	73.1–76.6	14.1–16.9	Loach (1970)
	63.8–77.3	66.7–69.9	12.2–16.7	Follet et al. (1970)
Site/season	53.3–68.5	59.9–75.2	13.6–17.4	Goodman (1963)
	60.9–71.6	72.2–74.7	–	Last & Draycott (1975)
Plant density	60.1–68.4	71.6–75.0	18.2–18.6	Harris (1972)
	63.1–68.0	74.7–75.1	16.0–17.1	Draycott & Webb (1971)
Drought	61.2–63.0	72.4–74.4	18.0–18.9	Harris (1972)
	72.5–77.3	72.8–75.9	16.5–18.6	Brown et al. (1987)
Nitrogen fertilizer	58.4–76.0	62.0–70.1	16.4–19.3	Carter & Traveller (1981)
	63.5–75.1	68.4–71.4	16.0–17.7	Follet et al. (1970)
	63.1–75.1	74.7–75.7	16.0–17.7	Draycott & Webb (1971)
Potassium fertilizer	66.1–67.7	71.9–72.7	16.8–17.1	Farley & Draycott (1974)
Sodium fertilizer	66.1–69.4	72.0–72.7	16.7–17.1	Farley & Draycott (1974)
Season/genotype	63.0–83.9	72.0–78.0	17.3–18.9	Scott & Jaggard (1993)

2.4. Conclusion

Cette partie a mis en évidence l'évolution des rendements au cours des dernières décennies, elle a également pointé un changement des pratiques de culture notamment en ce qui concerne la fertilisation azotée. Dans ce contexte, l'Institut Technique de la Betterave cherche donc à identifier précisément les facteurs influençant la richesse des betteraves sucrières et à comprendre leur action sur la teneur en sucre de la racine. Mais la dynamique d'accumulation du saccharose dans les racines est mal connue. Elle peut varier en fonction de facteurs biotiques et abiotiques et/ou des conditions de développement de la betterave. C'est par l'utilisation d'un modèle de croissance que l'ITB souhaite appréhender les composantes du rendement en sucre, et notamment étudier les rapports source-puits en carbone de la betterave. C'est dans cette optique qu'a été mené ce travail de thèse, où l'on propose d'étudier le fonctionnement des rapports source-puits en carbone de la betterave sous des régimes contrastés de nutrition azotée.

Les modèles actuels qui simulent le rendement en sucre de la betterave ne permettent pas d'en approcher totalement les composantes. Des modèles comme Previbet, Broom's barn, SUCROS et CERES qui utilisent une proportion de sucre dans la biomasse sèche pour estimer le rendement en sucre ne peuvent pas intégrer des changements sur cette teneur en sucre. Or on sait que selon les années, la teneur en sucre dans la biomasse racinaire varie (tableau 2-4). Des études menées en 2009 à l'ITB montrent également cette variabilité avec l'obtention de 74% à 82% de sucre dans la biomasse sèche racinaire selon les sites et les conditions de culture étudiés. Parmi les modèles ayant une démarche de répartition des assimilats en fonction des forces de source et de puits de la betterave, et n'utilisant pas une proportion pour représenter la quantité de sucre dans la racine on trouve SUBEMOpo et STICS. Et seul STICS est capable de prendre en compte l'effet d'un stress azoté sur la croissance. STICS semble être un modèle pouvant répondre à notre questionnement, mais c'est un modèle orienté recherche qui est peu adapté à une utilisation routinière, le nombre très élevé de paramètres et leur difficulté d'accès rendent ce modèle complexe à utiliser, de plus, il ne modélise pas les rapports source-puits de façon totalement satisfaisante.

Il apparaît alors nécessaire d'élaborer une nouvelle démarche de modélisation inspirée des caractéristiques intéressantes des modèles développés, plutôt que d'essayer d'adapter un de ces modèles. L'objectif étant de créer un modèle simple, avec peu de paramètres, et des données d'entrée facilement accessibles. Afin de pouvoir intégrer dans le modèle les effets de l'azote sur le développement foliaire et racinaire et sur l'accumulation de sucre, qui est l'objet principal que l'on souhaite étudier, il faut développer un modèle de fonctionnement global de la plante. Ce modèle serait alors une base pour une possible évolution vers un modèle prédictif. Une meilleure connaissance des relations source-puits de la betterave en réponse à un stress azoté nous permettrait de développer un modèle aboutissant probablement à une meilleure estimation du rendement en sucre que les modèles actuels.

3.^{EME} PARTIE : PROBLEMATIQUE

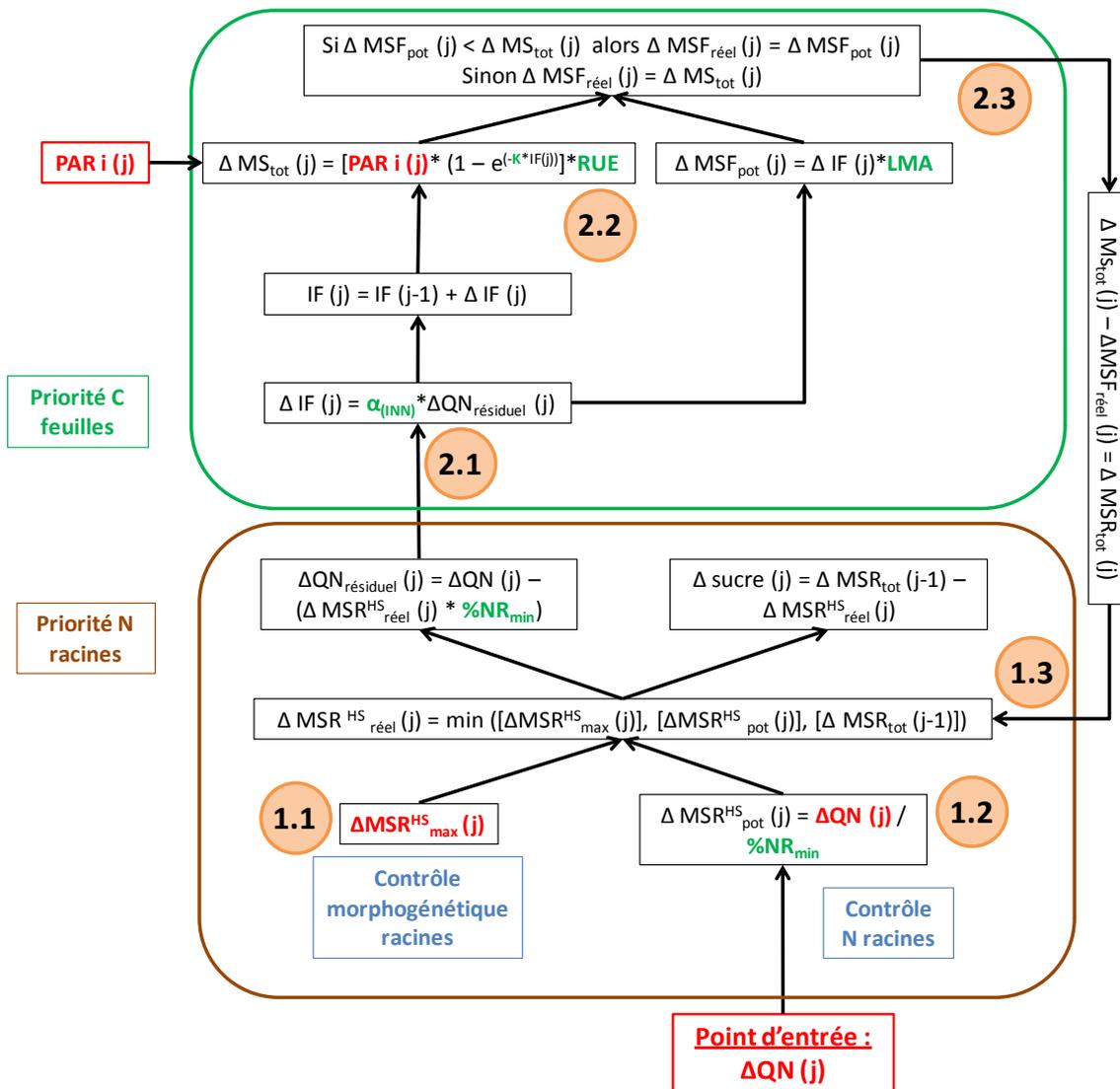


Figure 3-1 : Schéma conceptuel du modèle (pour la définition des sigles employés, se référer au tableau 3-1).

L'objectif de la thèse est de modéliser les rapports sources-puits entre les parties aériennes et souterraines de la betterave et l'élaboration de son rendement en poids de racine et en sucre, et sa variation sous des conditions fluctuantes d'azote.

Ce modèle aura pour seules variables d'entrée l'azote absorbé par la plante et le climat (rayonnement et températures) et sera fondé sur les hypothèses de fonctionnement suivantes :

1) Le compartiment racinaire structural (hors-sucre) croît journalièrement à hauteur de $\Delta MSR_{\text{réel}}^{\text{HS}}$, la valeur la plus basse entre :

1.1) Une croissance maximale imposée par son développement qui est fonction du temps thermique $\Delta MSR_{\text{max}}^{\text{HS}}$ (1.1, figure 3-1).

1.2) Une croissance en biomasse permise par l'azote entrant, calée sur une valeur minimale de teneur en azote du compartiment racinaire structural, $\Delta MSR_{\text{pot}}^{\text{HS}}$. Nous faisons ici l'hypothèse que les racines sont prioritaires pour l'azote (1.2, figure 3-1).

1.3) La croissance permise par le carbone non consommé par les feuilles pour leur croissance ΔMSR_{tot} , estimée par ce qui suit (1.3, figure 3-1).

Le produit de la croissance obtenue précédemment par la teneur en azote minimale citée donne la consommation en azote du compartiment racinaire structural, et la quantité d'azote résiduel exploitable par les feuilles (différence entre l'azote absorbé et l'azote consommé par le compartiment racinaire structural).

2) Les feuilles émettent une surface foliaire qui est fonction de cet azote résiduel non consommé par les racines, et produisent du carbone :

2.1) Formation de la surface foliaire proportionnellement à l'azote résiduel non consommé par les racines, ΔIF . Nous reprendrons à notre compte les résultats de Lemaire et al. (2008) présentés précédemment sur la proportionnalité entre la surface foliaire et l'absorption d'azote, et nous examinerons sa dépendance à l'état de nutrition azotée de la plante (2.1, figure 3-1).

2.2) La surface foliaire cumulée, IF , absorbe du rayonnement et le transforme en biomasse sèche, ΔMS_{tot} (2.2, figure 3-1).

2.3) Les feuilles croissent, $\Delta MSF_{\text{réel}}$, à hauteur de la valeur la plus basse entre la croissance permise par l'azote, ΔMSF_{pot} , et la croissance permise par le carbone, ΔMS_{tot} (2.3, figure 3-1).

Tableau 3-1 : Définition des données d'entrée, variables et paramètres du modèle.

	Intitulé	Définition	Unité
Variables d'entrée du modèle	QN	Azote prélevé par la plante	g m^{-2}
	T	Températures moyennes journalières	$^{\circ}\text{C}$
	PAR _i	Rayonnement photosynthétiquement actif intercepté	MJ m^{-2}
Autres variables du modèle	QN _{résiduel}	Quantité d'azote résiduel disponible pour les feuilles	g m^{-2}
	IF	Indice foliaire	$\text{m}^2 \text{m}^{-2}$
	INN	Indice de nutrition azotée	
	MS _{tot}	Biomasse sèche totale	g m^{-2}
	MSF _{pot}	Biomasse sèche aérienne potentielle	g m^{-2}
	MSF _{réel}	Biomasse sèche aérienne réelle	g m^{-2}
	MSR _{tot}	Biomasse sèche racinaire totale	g m^{-2}
	MSR ^{HS} _{pot}	Biomasse sèche racinaire structurale (hors-sucre) potentielle	g m^{-2}
	MSR ^{HS} _{réel}	Biomasse sèche racinaire structurale (hors-sucre) réel	g m^{-2}
	Sucre	Sucre stocké	g m^{-2}
Paramètres du modèle	%N _{Rmin}	Pourcentage d'azote minimal dans la biomasse sèche racinaire structurale	%
	α	Surface foliaire par unité de masse d'azote, variable en fonction de l'INN	$\text{m}^2 \text{g}^{-1}$
	RUE	Efficacité d'utilisation du rayonnement	g MJ^{-1}
	K	Coefficient d'extinction de la loi de Beer-Lambert	
	LMA	Masse des feuilles par unité de surface	g m^{-2}
	MSR ^{HS} _{max}	Biomasse sèche racinaire structurale (hors-sucre) maximale	g m^{-2}

Le carbone résiduel non consommé pour la croissance foliaire est attribué aux racines pour donner la valeur du point 1.3 sur la figure 3-1.

Le carbone non consommé pour la croissance foliaire et racinaire est versé dans le compartiment de stockage racinaire, et correspond au stockage du sucre.

Le modèle a été paramétré à partir des résultats issus de différents traitements azotés de l'expérimentation menée en 2010 pendant ma thèse. D'autres expérimentations servent à la validation du modèle et ont été menées soit pendant la thèse en 2011, soit lors d'années antérieures, avec pour certaines d'entre elles l'application de fertilisations azotées contrastées. L'expérimentation menée en 2011 a malheureusement été marquée par un important épisode de grêle rendant inexploitable la majeure partie des résultats de cette expérimentation.

4.^{EME} PARTIE : MATERIELS ET METHODES



Figure 4-1 : Situation géographique des communes des essais de la thèse : La Selve en 2010, année pour paramétrer le modèle, et Bourgogne en 2011.

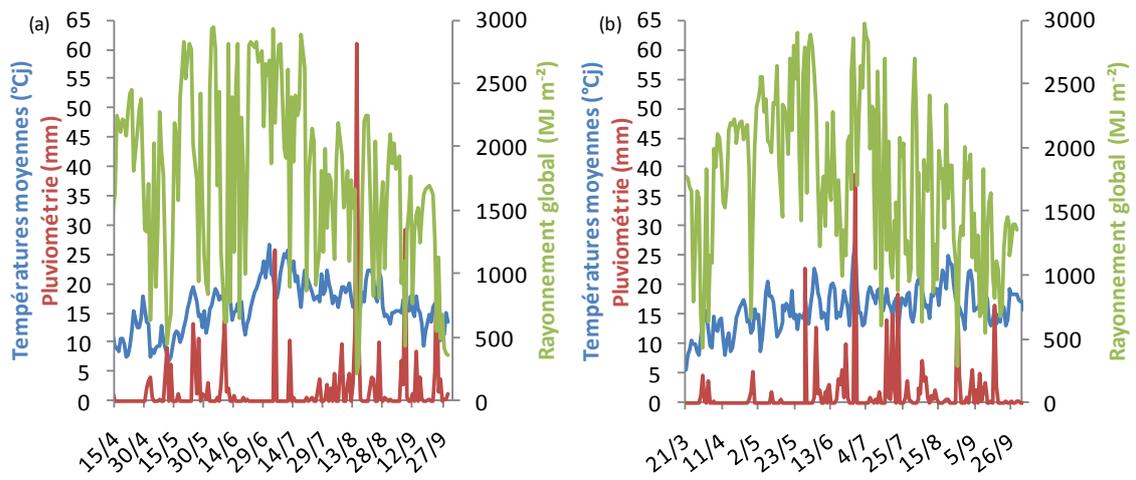


Figure 4-2 : Données météorologiques obtenues à la station de Reims pour l'année 2010 (a) et 2011 (b).

4.1. Expérimentations menées pendant la thèse (2010 et 2011) pour paramétrer le modèle

Des essais au champ ont été réalisés pendant deux années consécutives, 2010 et 2011, dans l'objectif d'effectuer une analyse des impacts de niveaux de nutrition azotée contrastés sur le fonctionnement de la plante (formes des courbes) et d'obtenir les paramètres du modèles (paramètres de celles-ci).

4.1.1. Conditions expérimentales et traitements azotés

Le matériel végétal utilisé est : *Beta vulgaris spp.vulgaris* (*Chenopodiaceae*) de la variété Python, commercialisée par la société SESVanderHave.

Les expérimentations ont été menées sur deux sites différents en 2010 et en 2011 (figure 4-1). En 2010, l'expérimentation a été menée à La Selve dans l'Aisne (02, coordonnées 49°34'N, 03°59'E), sur un sol de type limon sableux de 120 cm de profondeur. En 2011, l'expérimentation a été menée à Bourgogne dans la Marne (51, coordonnées 49°20'N, 04°04'E), sur un sol de type limon calcaire de 90 cm de profondeur. Ces parcelles ont été choisies parce qu'elles présentaient un faible reliquat azoté, et sans apport organique ou couvert en interculture avant betterave très développé susceptible de fournir des quantités importantes d'azote au printemps. Le reliquat représentait 14 kg N ha⁻¹ en 2010 et 30 kg N ha⁻¹ en 2011.

Les semis ont été réalisés à l'aide d'un semoir automatique sur six rangs espacés de 45 cm et à 3 cm de profondeur environ, l'espacement entre graines est d'environ 18 cm pour atteindre une population approximative de 100000 plantes par hectare. Le semis a été réalisé le 15 avril en 2010 et le 21 mars en 2011. Le stade de 80% de levée des plantules est atteint le 07 mai en 2010 et le 04 avril en 2011.

Les expérimentations ont été effectuées dans les conditions réelles en champ, il n'y a pas eu d'irrigation, et la fertilisation azotée (pour les traitements concernés) a été apportée environ 3 semaines avant le semis. Les mesures climatiques ont été recueillies sur la station météorologique de Reims en 2010 (à 40 km du site) et 2011 (à 10 km du site). Les données du semis à la récolte sont représentées sur la figure 4-2. Le temps thermique a été calculé en base 0°C à partir de la levée.

Le suivi de l'évolution de la réserve en eau du sol a été effectué par la méthode de bilan hydrique réalisé habituellement à l'ITB pour apprécier la date d'apparition, l'intensité et la durée d'un déficit hydrique. La disponibilité en eau du sol a été calculée à partir du mois de janvier pour chaque année de culture de la manière suivante :

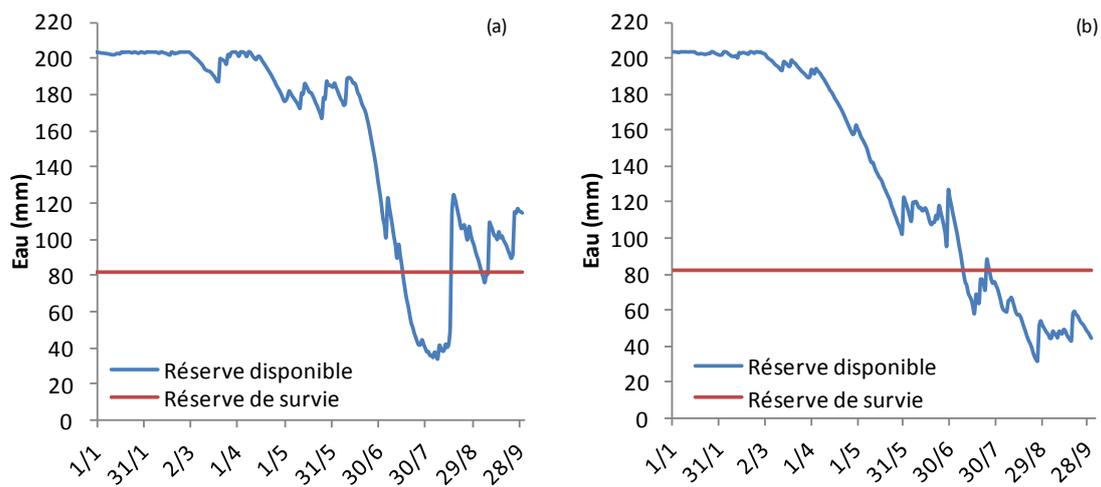


Figure 4-3 : Etat hydrique des parcelles d'expérimentation en 2010 (a) et 2011 (b).

Tableau 4-1 : Description des niveaux du facteur azote en 2010 et 2011.

Traitement	Code du traitement	2010	2011
Pas d'apport d'azote	N1	0 kg/ha	0 kg/ha
Dose conseillée en azote	N2	136 kg/ha	113 kg/ha
Dose forte d'azote	N3	196 kg/ha	226 kg/ha

$$R_j = R_{j-1} + P_{j-1} - ETR_{j-1}$$

Avec: $ETR_j = ETM_j * R_j$ si l'on n'atteint pas la réserve de survie, sinon : $ETR_j = ETM_j$

Et

$$ETM_j = K * ETP_j$$

Avec R : la réserve en eau disponible du sol (en mm), P : la pluviométrie (en mm) et ETR l'évapotranspiration réelle (en mm). Lorsque la réserve en eau disponible du sol atteint la réserve de survie (qui est fonction de la profondeur d'enracinement et de la texture du sol), la transpiration de la culture est altérée, ainsi l'ETR prend en compte le degré d'assèchement de la réserve en eau difficilement utilisable par les plantes. L'évapotranspiration maximale (ETM, en mm), est calculée à l'aide du coefficient cultural de la betterave sucrière, K, qui évolue en fonction du stade de développement. L'ETP, évapotranspiration potentielle (en mm), est issue des stations météorologiques.

Ainsi en 2010 il y a une période d'un mois, entre le 16 juillet et le 16 août où la quantité d'eau disponible dans le sol est inférieure à la réserve de survie qui caractérise l'état de stress hydrique des betteraves (figure 4-3 a). En 2011, les betteraves subissent un stress hydrique à partir du 9 juillet. Les précipitations du 23 juillet permettent d'annuler le stress hydrique pour deux jours, mais la réserve en eau disponible dans le sol repasse ensuite sous le seuil de la réserve de survie jusqu'à la récolte (figure 4-3 b).

Les essais présentent un facteur, la dose de fertilisant azoté appliquée, à trois niveaux : un témoin sans apport azoté, un apport de la dose conseillée en azote calculée par le logiciel de fertilisation azoté (AZOFERT©(INRA)), et un fort apport d'azote correspondant à 60 unités supplémentaires par rapport à la dose conseillée en 2010 et 123 unités supplémentaires en 2011 (tableau 4-1). Les traitements azotés sont appliqués au champ à l'aide d'un pulvérisateur motorisé, ce qui fait que les traitements azotés se présentent sous forme de bandes correspondant à la largeur d'une rampe de pulvérisateur (13.50 mètres) perpendiculairement au sens des semis.

L'essai réalisé en 2010 est réalisé sans répétition autre que la prise en compte de la variabilité inter-plante sur 6 prélèvements répartis pendant la période d'expérimentation, en raison de la lourdeur des mesures (figure 4-4). En 2011, l'essai présente 3 répétitions tout au long de l'expérimentation (figure 4-5).

4.1.2. Mesures réalisées

4.1.2.1. Mesure de la levée

Environ une semaine après le semis, les plantules de betteraves sont dénombrées pour suivre la dynamique de levée au champ. Les comptages s'effectuent sur 12 zones de 4 rangs sur 10 mètres également réparties sur les différents traitements azotés, trois

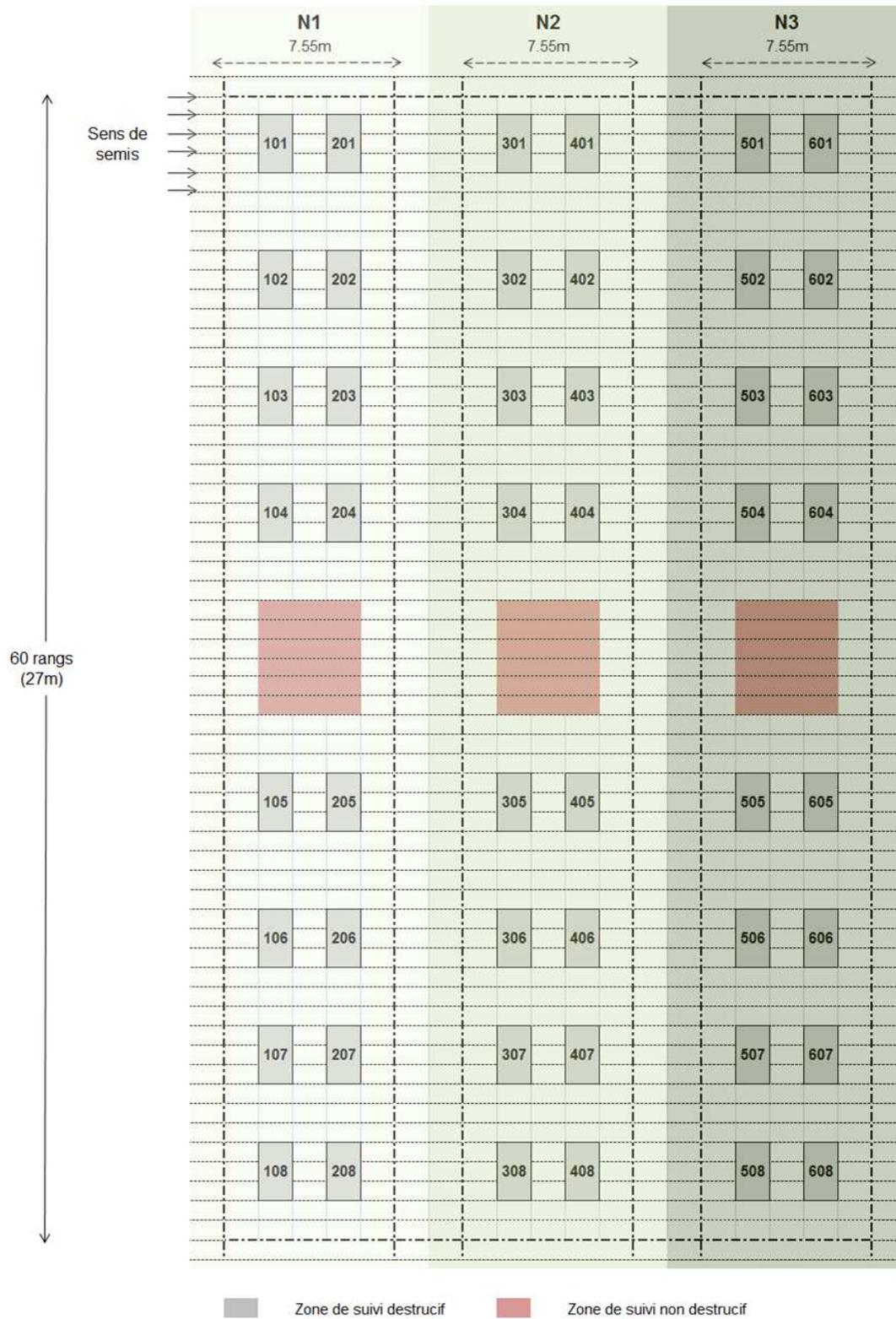


Figure 4-4 : Schéma du dispositif expérimental en 2010.

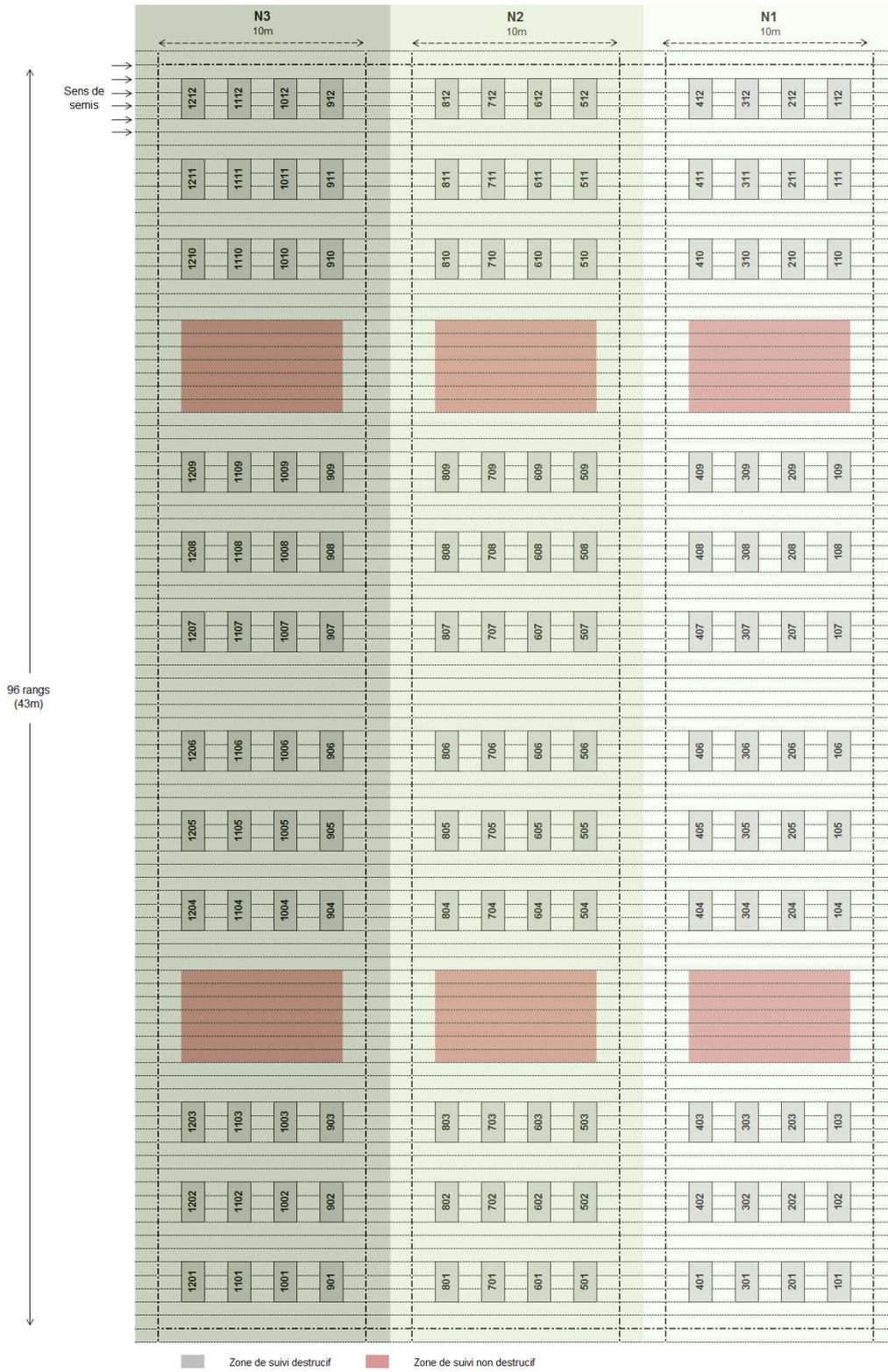


Figure 4-5 : Schéma du dispositif expérimental en 2011.

Tableau 4-2 : Calendrier des prélèvements réalisés en 2010.

N°	Date	Placettes N1	Placettes N2	Placettes N3	Type
1	07/06/10	205	305	508	Détaillé
2	21/06/10	204	306	606	Global
3	29/06/10	208	406	605	Détaillé
4	06/07/10	103	408	604	Global
5	13/07/10	206	301	608	Global
6	21/07/10	102	405	505	Détaillé
7	27/07/10	203	304	607	Global
8	02/08/10	104	403	506	Global
9	10/08/10	202	402	601	Détaillé
10	17/08/10	207	401	504	Global
11	24/08/10	101	302	602	Global
12	31/08/10	107	404	603	Détaillé
13	06/09/10	108	303	503	Global
14	13/09/10	105	407	501	Global
15	21/09/10	201	307	507	Détaillé

Tableau 4-3 : Calendrier des prélèvements réalisés en 2011.

N°	Date	Placettes N1	Placettes N2	Placettes N3	Type
1	17/05/11	1106 / 1002 / 1203	702 / 607 / 706	311 / 411 / 401	Détaillé
2	06/06/11	1108 / 1206 / 1105	609 / 608 / 812	204 / 101 / 105	Global
3	14/06/11	1004 / 906 / 1012	512 / 805 / 810	103 / 107 / 312	Détaillé
4	21/06/11	1103 / 1007 / 1202	807 / 704 / 705	205 / 406 / 210	Global
5	28/06/11	1209 / 1008 / 1102	508 / 505 / 803	206 / 410 / 209	Global
6	05/07/11	1011 / 903 / 1003	506 / 507 / 710	310 / 403 / 408	Détaillé
7	12/07/11	1001 / 1210 / 1110	701 / 511 / 502	201 / 110 / 305	Global
8	18/07/11	1109 / 1205 / 910	603 / 509 / 611	302 / 306 / 211	Global
9	26/07/11	909 / 911 / 1009	707 / 703 / 605	407 / 405 / 304	Détaillé
10	02/08/11	907 / 1107 / 1204	711 / 708 / 601	301 / 308 / 208	Global
11	16/08/11	908 / 1101 / 902	809 / 510 / 808	108 / 402 / 404	Global
12	23/08/11	905 / 1201 / 1006	604 / 610 / 506	212 / 412 / 202	Détaillé
13	30/08/11	1208 / 1211 / 1111	811 / 801 / 501	109 / 102 / 409	Global
14	07/09/11	901 / 1005 / 904	504 / 804 / 709	309 / 106 / 111	Global
15	27/09/11	912 / 1207 / 1104	612 / 606 / 802	307 / 104 / 203	Détaillé

fois par semaine (entre 80°Cj et 400°Cj environ). Nous considérons qu'une plantule de betterave est levée quand les pointes des cotylédons ont émergé du sol. Dans l'étude, la date de levée considérée pour chaque objet correspond à la date à laquelle 80 % des plantules sont levées.

Au cours de l'expérimentation menée en 2011, les plantules ayant reçu la plus forte dose de fertilisant azoté présentent des problèmes de levée. Ces plantules sont moins nombreuses que sur les autres modalités azotées et présentent un retard de développement.

4.1.2.2. Observations non destructives en cours de croissance

Un suivi hebdomadaire du nombre de feuilles vertes et de feuilles sénescentes a été réalisé sur les mêmes plantes pendant toute la durée de l'expérimentation. Sur chaque traitement azoté, 10 plantes en 2010 et 20 plantes en 2011 ont été choisies aléatoirement dans les zones prévues à cet effet sur les dispositifs expérimentaux (figures 4-4 et 4-5).

4.1.2.3. Observations destructives en cours de croissance

Ces observations sont réalisées à l'aide de 15 prélèvements de betteraves effectués de manière hebdomadaire dans les placettes réservées à cet effet sur la parcelle (figures 4-4 et 4-5, tableaux 4-2 et 4-3). En 2010, une placette par traitement azoté est prélevée. En 2011, il y a trois répétitions, 3 placettes sont prélevées sur chaque traitement azoté. Un prélèvement d'une placette représente 4.5 m² (environ 50 plantes) en 2010 et 2.25 m² (environ 30 plantes) en 2011.

Deux types de prélèvements sont effectués en alternance (tableaux 4-2 et 4-3) : des prélèvements globaux (9 en 2010 et 8 en 2011) et des prélèvements détaillés (6 en 2010 et 7 en 2011) dont voici la description :

Prélèvements « globaux »

Le nombre de plantes contenues dans la placette de prélèvement est compté. Les plantes sont prélevées manuellement à l'aide de fourches, avec cette technique, il n'est pas possible de prélever toutes les racines dans leur intégralité, la majorité des racines fibreuses restent dans le sol. Une fois prélevée, on sépare les deux compartiments de la plante : la partie aérienne et la partie souterraine. La partie aérienne comprend les limbes et les pétioles, que nous identifierons à partir de maintenant comme étant les feuilles. Et la partie souterraine comprend le collet, le pivot et une partie des racines fibreuses, que nous identifierons à partir de maintenant comme étant la racine. Les feuilles sont séparées de la racine directement au champ (figure 4-6) et les racines sont brossées pour éliminer la terre restante. Le poids frais global des feuilles et des racines du prélèvement entier sont directement mesurés au champ. Des sous-échantillons de



Figure 4-6 : Photographie d'une zone de prélèvement « global » où le bouquet foliaire des betteraves vient d'être séparé de la racine.



Figure 4-7 : Photographies représentant la séparation d'une betterave en limbes, pétioles et racine (prélèvement du 07/06/2010) (a) et l'étalement des limbes d'une betterave pour la mesure de la surface foliaire (prélèvement du 28/06/2011) (b).

Tableau 4-4 : Description des expérimentations ayant les données nécessaires au fonctionnement du modèle.

Année	1994	2002	2005	2009
Lieu	Clermont Les Fermes (02)	Saint-Quentin-Sur-Cooles (51)	Avignon (84)	Perles (02)
Traitements	6 traitements azotés (0, 50 ; 100 ; 150 ; 200 et 300 kgN/ha), pas d'irrigation	4 traitements azotés (0, 100, 200 et 300 unités d'azote/ha), et irrigués	Une seule modalité azotée, irriguée	3 traitements azotés (0, 120 et 200 kgN/ha), pas d'irrigation
Dispositif	2 blocs	3 blocs	Pas de blocs à cause de l'irrigation	1 bloc, pas de répétitions
Type de sol	Limoneux profond	Rendzine brune sur craie	Limono-argileux	Limon sableux
Variété	Laser	Veronica	Radar	Carissima
Semis	24/04/1994	29/03/2002	10/03/2005	18/03/2009
Levée	Du 1 ^{er} au 7/05/1994	14/04/2002	Du 1 ^{er} au 7/04/2005	9/04/2009
Densité	14-15 pl/m ²	12 pl/m ²	10-11 pl/m ²	10 pl/m ²

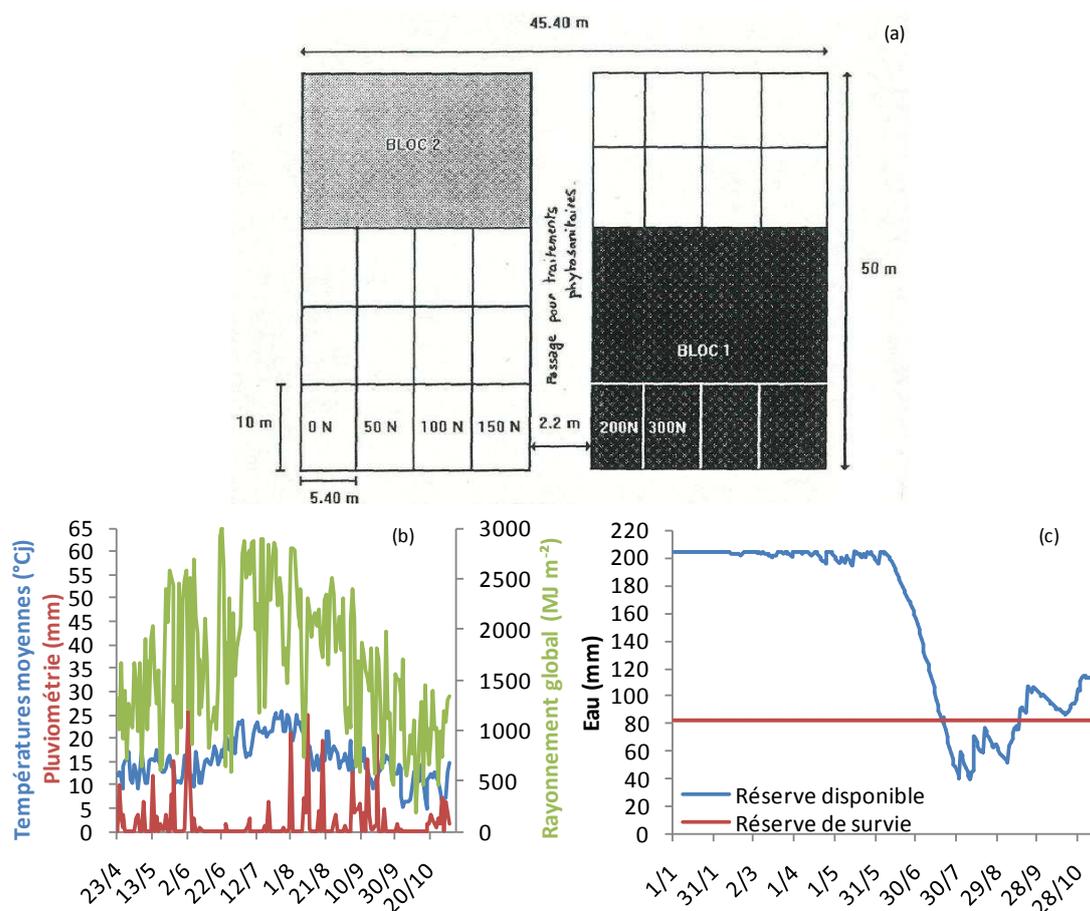


Figure 4-8 : Représentation du dispositif expérimental (a) (Droulin, 1995), des données météorologiques du semis à la récolte (b) et de l'état hydrique des parcelles (c) de l'essai de Clermont Les Fermes en 1994.

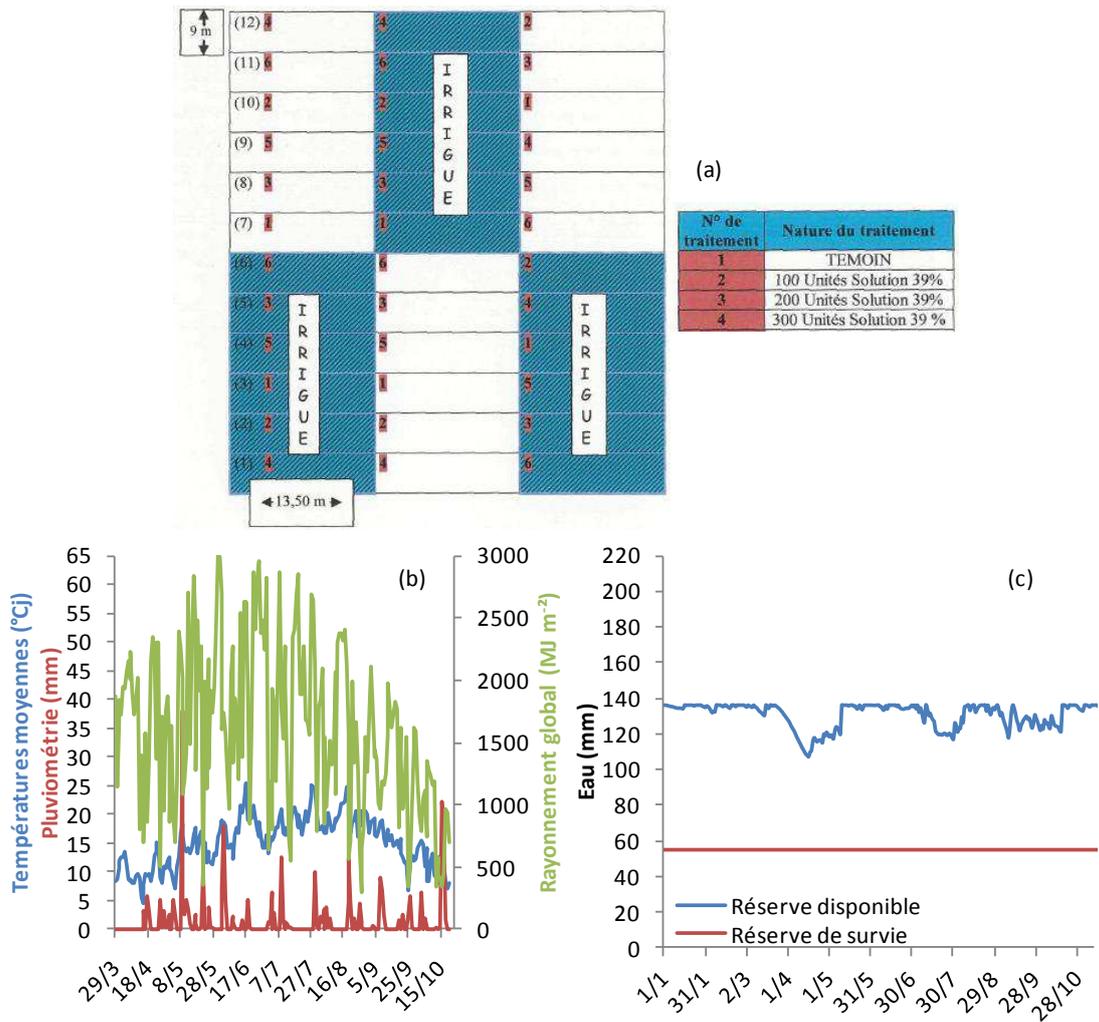


Figure 4-9 : Représentation du dispositif expérimental (a), des données météorologiques du semis à la récolte (b) et de l'état hydrique des parcelles (c) de l'essai de Saint-Quentin-Sur-Coole en 2002 (ITB).

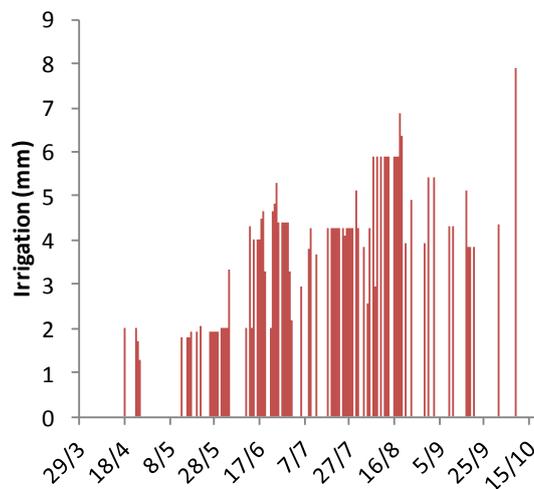


Figure 4-10 : Quantités d'eau apportée par irrigation du semis à la récolte sur l'essai de Saint-Quentin-Sur-Coole en 2002 (ITB) (au total, 300 mm ont été apportés).

feuilles et de racines sont constitués, pesés en frais, puis passés à l'étuve à 70°C pendant 48 heures, le poids sec des sous-échantillons est mesuré à la sortie de l'étuve. Les sous-échantillons sont conservés pour réaliser des dosages de la teneur en azote total à la fin de l'expérimentation au Laboratoire Départemental d'Analyse et de Recherche de Laon (02). Le reste des racines (fraîches) sont passées à la râpe au laboratoire du syndicat betteravier de Laon (02) afin de constituer des échantillons qui seront congelés et qui serviront à l'analyse de la richesse en sucre à la fin de l'expérimentation.

Prélèvements « détaillés »

Comme pour le type de prélèvement précédent, le nombre de plantes contenues dans la placette de prélèvement est compté, et le mode de prélèvement des betteraves est identique. Ce prélèvement « détaillé » comprend une mesure individuelle de chaque plante prélevée, et ne peut donc pas être réalisé directement au champ. Le poids frais des feuilles et de la racine de chaque betterave est mesuré (figure 4-7 a). Comme pour le précédent type de prélèvement, des sous-échantillons de feuilles et de racines sont constitués par placette pour séchage à l'étuve en vue des analyses d'azote et le reste des racines est râpé en vue des analyses de richesse en sucre. Sur la totalité des betteraves prélevées, 5 plantes par traitement en 2010 et 6 plantes par traitement en 2011 (2 plantes par répétition) sont utilisées pour mesurer la surface des limbes par photographie après étagement sur une planche (figure 4-7 b). Le poids frais correspondant aux feuilles (limbes et pétioles) est reporté pour chaque betterave photographiée.

4.2. Expérimentations complémentaires à l'étude pour validation du modèle

4.2.1. Les essais disponibles pour simulation avec le modèle

Plusieurs études menées à l'ITB, ou en collaboration avec l'INRA, disposent du jeu de données nécessaire pour permettre de réaliser des simulations avec le modèle. Ces expérimentations sont décrites dans le tableau 4-4. Et les plans d'expérience sont décrits dans les figures 4-8 à 4-13. Voici un détail des mesures utiles pour l'utilisation du modèle :

4.2.1.1. Mesures climatiques

Les données journalières des températures moyennes et de la pluviométrie ont été récupérées à partir d'une station de mesure implantée directement sur la parcelle pour les essais de Clermont Les Fermes (1994) et d'Avignon (2005). Les données de rayonnement global ont été fournies par la station météorologique de Météo France de La Selve (02) pour l'essai de Clermont Les Fermes, elles étaient réalisées directement à

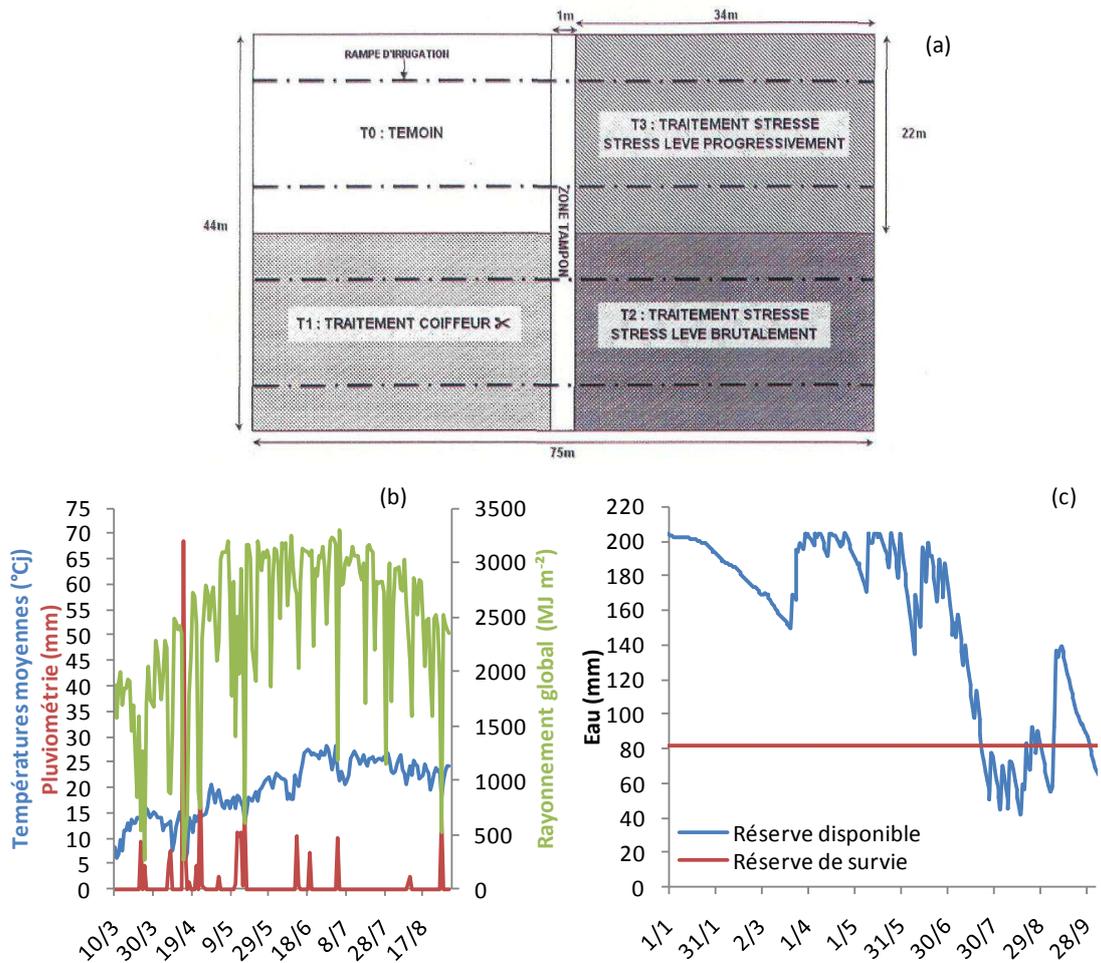


Figure 4-11 : Représentation du dispositif expérimental situé sur le domaine Saint-Paul de l'INRA d'Avignon (a) (Graux, 2005), des données météorologiques du semis à la récolte (b) et de l'état hydrique des parcelles (c) (ITB).

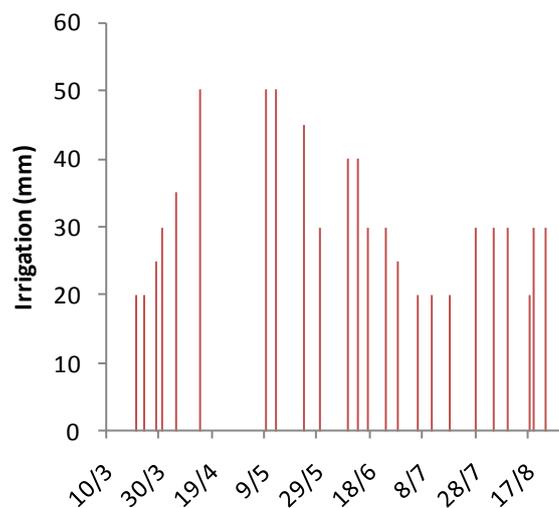


Figure 4-12 : Quantités d'eau apportée par irrigation du semis à la récolte sur l'essai d'Avignon en 2005 (au total, 750 mm ont été apportés) (ITB).

la parcelle pour Avignon. Toutes les données climatiques des essais de Perles (2009) et Saint- Quentin- Sur-Coole (2002) sont issues de stations météorologiques de Météo France de La Selve (02) et Châlons sur Marne (51) respectivement.

La parcelle d'expérimentation de Clermont Les Fermes (1994) a été détruite partiellement par la grêle le 3 juin, et les plantes ont subi un stress hydrique à partir du 21 juillet (figure 4-8), ce stress a perduré jusqu'au 15 septembre. Ces deux phénomènes ont perturbé la croissance des betteraves. L'expérimentation de Saint-Quentin-Sur-Coole (2002) s'est déroulée dans de bonnes conditions hydriques grâce à l'irrigation (figures 4-9 et 4-10), il n'y a pas eu d'accidents pouvant perturber la croissance des betteraves. L'expérimentation d'Avignon (2005) a été menée avec irrigation, néanmoins, à partir du 23 juillet, les plantes ont subi un stress hydrique modéré, le stress a été levée le 7 septembre (figures 4-11 et 4-12). Les betteraves de la parcelle d'expérimentation de Perles (2009) ont subi un stress hydrique à partir du 10 juillet (figure 4-13), ce stress a perduré jusqu'à la récolte.

4.2.1.2. Prélèvements

Essai de Clermont Les Fermes (1994) :

Des prélèvements réguliers (tous les 15 jours) ont été effectués pour les mesures de croissance à partir de la mi-mai jusqu'à la mi-août sur les 2 blocs (figure 4-8) : le 25 mai, les 8 et 21 juin, les 5 et 20 juillet et les 2 et 17 août. Un prélèvement supplémentaire a été opéré le 22 septembre uniquement sur le bloc 2. Le dernier prélèvement, correspondant à la récolte, a été réalisé le 18 octobre. Dans chaque bloc et pour chaque traitement, 10 rangs ont été prélevés sur une longueur de 2 m. La surface du prélèvement est divisée en 5 placettes constituées chacune de 2 rangs contigus sur une longueur de 2m (soit environ 1,8 m² et 25 plantes). Par bloc et par traitement cela représentait donc de 5 répétitions ; et englobait au total environ 125 plantes sur une surface de prélèvement de 9 m². Une zone tampon d'un mètre était laissée entre chaque zone de prélèvement.

L'ensemble du prélèvement (2 blocs * 6 traitements * 5 placettes * 25 plantes par placette) représentait au total environ 1500 plantes. Un sous-échantillonnage a donc été pratiqué. Pour représenter au mieux la population de plantes celui-ci a été stratifié en fonction de la taille des plantes. Ainsi les plantes étaient réparties en classes par estimation visuelle de la grosseur de sa racine et de son bouquet foliaire. Le nombre de classes était généralement de 3 (excepté pour le prélèvement du 8 juin où il était de 2) et réparti comme suit : G1 (grosses plantes), G2 (plantes moyennes) et G3 (petites plantes). Les plantes provenant des 5 placettes étaient ensuite regroupées par tailles de plantes. Un sous-échantillonnage de chacune des 2 ou 3 classes avec un taux de sondage dégressif en fonction du stade (50 à 20% selon le stade), et un minimum de 4 plantes par classe était alors réalisé. Pour les 4 dernières dates de prélèvement, le sous-échantillonnage comptait par traitement et par bloc 4 grosses plantes (G1), 5 plantes moyennes (G2) et 6 petites plantes (G3).

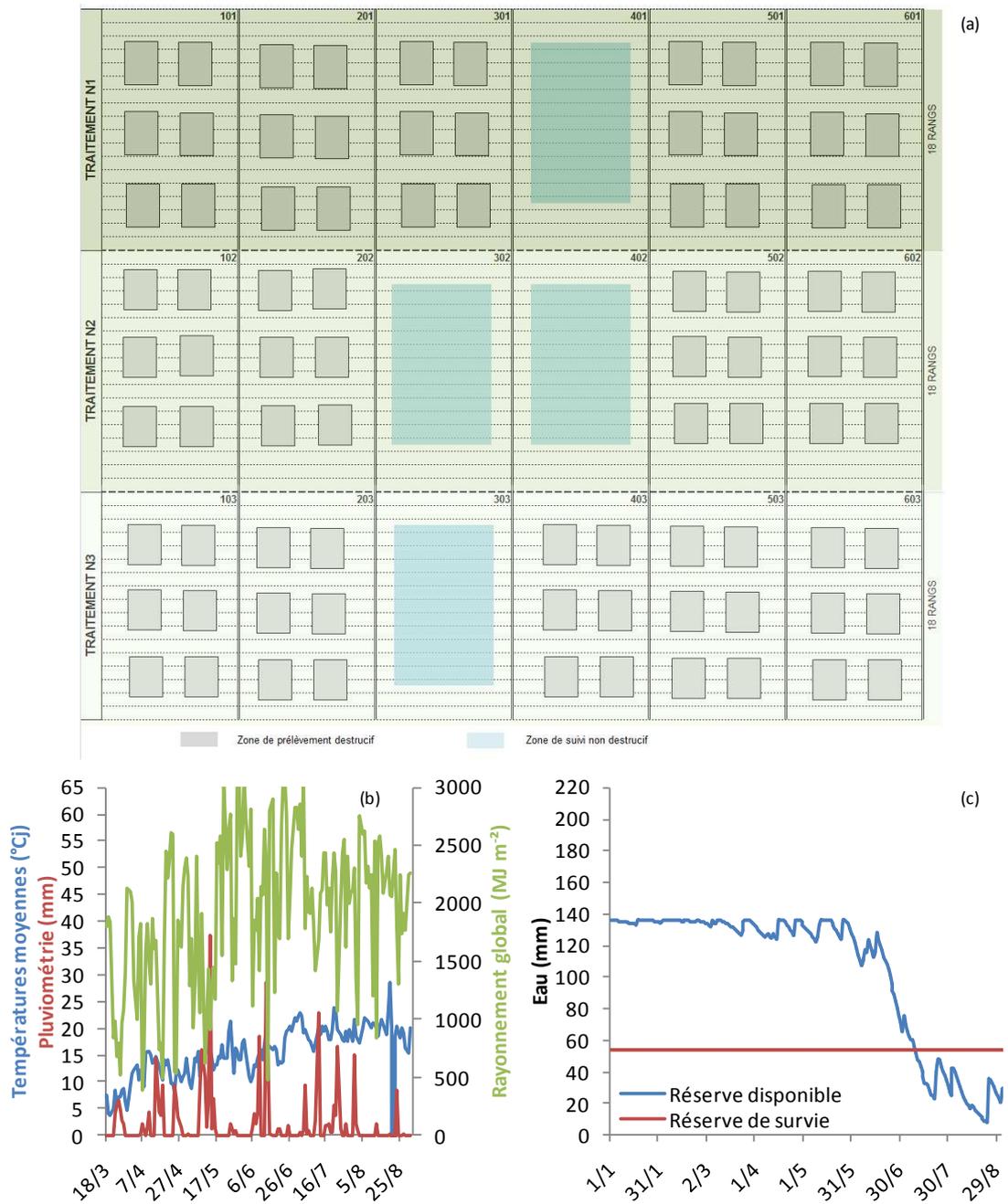


Figure 4-13 : Représentation du dispositif expérimental (a), des données météorologiques du semis à la récolte (b) et de l'état hydrique des parcelles (c) de l'essai de Perles en 2009 (ITB).

Essai de Saint-Quentin-Sur-Coole (2002) :

Neuf prélèvements ont été effectués du mois de mai jusqu'à la récolte. Chacun des prélèvements a été effectué sur les trois blocs pour une même modalité (figure 4-9), le choix de la placette de prélèvement a été déterminé aléatoirement, le choix n'était pas influencé par l'irrigation puisque celle-ci a été apportée en goutte-à-goutte au niveau de chaque inter-rang. L'échantillon de betterave prélevé variait de 40 à 70 plantes selon le stade de développement. Un sous-échantillon représentatif de chaque traitement est réalisé pour des mesures de poids secs et de teneur en azote des différents organes des betteraves.

Essai d'Avignon (2005) :

Des prélèvements réguliers ont été effectués à partir de la mi-mai et jusqu'à la fin du mois d'août sur le traitement T0 (figure 4-11). A chaque date, 3 placettes tirées aléatoirement (correspondant à 3 répétitions) ont été prélevées. Les placettes étaient localisées à mi-chemin entre 2 passages de roues de tracteur de manière à éviter de prélever dans les zones où le sol a été tassé par son passage. Afin d'avoir des betteraves ayant reçu la même quantité d'eau, les prélèvements ont été effectués dans des placettes situées autour d'une même rampe d'irrigation (dont la portée est de 6 m de part et d'autre de la rampe). Chaque placette de prélèvement s'étend sur 2 rangs contigus sur une longueur de 1,5 m, soit une surface de 1,35 m² correspondant à un peuplement d'environ 14 plantes au m². Avant chaque prélèvement, le nombre de betteraves au sein de chaque placette était compté et la densité reportée. Puis au centre de chaque placette, 10 plantes étaient prélevées, soit un total de 30 plantes par date de mesure.

A chaque date de mesure, un sous-échantillonnage de 3 plantes parmi les 10 prélevées sur chaque placette a été pratiqué. Pour mieux préserver la population des plantes, ces 3 plantes ont été choisies suivant leur taille, par simple estimation visuelle de la grosseur de leur pivot et de leur bouquet foliaire, de manière à avoir une petite, une moyenne et une grande betterave.

Essai de Perles (2009) :

Des prélèvements de type « global » comme ceux de l'essai mené en 2010 pendant la thèse, ont été réalisés de manière hebdomadaire de la mi-juin et jusqu'à la fin du mois d'août sur les trois traitements azotés (figure 4-13). La placette à prélever mesurait 2.7 m², une placette par traitement était prélevée, il n'y avait pas de répétitions. Le nombre de plantes contenues dans la placette de prélèvement était compté, et les racines brossées pour éliminer la terre restante. Le poids frais global des bouquets foliaires et des racines du prélèvement entier étaient directement mesurés au champ. Un sous-échantillon représentatif des feuilles et des racines de chaque traitement est réalisé pour des mesures de poids secs et de teneur en azote des différents organes des plantes.

Tableau 4-5 : Tableau récapitulatif des modalités des essais et de leurs abréviations.

Essai/Lieu	Année	Descriptif de la modalité	Irrigation	Sigle de la modalité
La Selve	2010	0 kg N ha ⁻¹	Non	2010 N1
La Selve	2010	136 kg N ha ⁻¹	Non	2010 N2
La Selve	2010	196 kg N ha ⁻¹	Non	2010 N3
Bourgogne	2011	0 kg N ha ⁻¹	Non	2011 N1
Bourgogne	2011	113 kg N ha ⁻¹	Non	2011 N2
Bourgogne	2011	226 kg N ha ⁻¹	Non	2011 N3
Clermont Les Fermes	1994	0 kg N ha ⁻¹	Non	1994 N1
Clermont Les Fermes	1994	50 kg N ha ⁻¹	Non	1994 N2
Clermont Les Fermes	1994	100 kg N ha ⁻¹	Non	1994 N3
Clermont Les Fermes	1994	150 kg N ha ⁻¹	Non	1994 N4
Clermont Les Fermes	1994	200 kg N ha ⁻¹	Non	1994 N5
Clermont Les Fermes	1994	300 kg N ha ⁻¹	Non	1994 N6
Saint-Quentin-Sur-Coole	2002	0 kg N ha ⁻¹	Oui	2002 N1
Saint-Quentin-Sur-Coole	2002	100 kg N ha ⁻¹	Oui	2002 N2
Saint-Quentin-Sur-Coole	2002	200 kg N ha ⁻¹	Oui	2002 N3
Saint-Quentin-Sur-Coole	2002	300 kg N ha ⁻¹	Oui	2002 N4
Avignon	2005	Dose conseillée en azote	Oui	2005
Perles	2009	0 kg N ha ⁻¹	Non	2009 N1
Perles	2009	120 kg N ha ⁻¹	Non	2009 N2
Perles	2009	200 kg N ha ⁻¹	Non	2009 N3

4.2.1.3. Mesures réalisées

Les plantes prélevées étaient comptées, et leur poids frais total mesuré. Selon le cas, sur la totalité des plantes ou sur les échantillons : le poids frais des différents organes (limbes verts, pétioles verts, pétioles et limbes sénescents, ou feuilles entières, collets et racines, ou racines entières) était mesuré. Sur les mêmes échantillons ou sur les sous-échantillons confectionnés, le poids sec était mesuré après séchage à l'étuve pendant 48 h à 70°C. Les surfaces foliaires de 2 à 4 plantes prélevées en surplus ont été mesurées à l'aide d'un planimètre optique (sauf en 2009 où cette mesure n'a pas été effectuée). Le dosage de la teneur en azote total a été effectué sur les organes séchés des plantes, un regroupement des répétitions de chaque essai a été établi pour ces dosages. La richesse en sucre des racines a été mesurée à partir des râpures de racines fraîches restantes lors des prélèvements.

Nous ne disposons pas du jeu de données complet pour l'essai mené en 1994, ainsi nous n'avons que les valeurs moyennes des données, il n'est alors pas possible de calculer des écarts-types. C'est aussi le cas pour l'essai de 2005. L'essai de 2009 quant à lui a été mené sans répétitions, nous ne pouvons donc pas non plus calculer d'écarts-types. Nous disposons du jeu de données complet pour l'année 2002 sauf en ce qui concerne l'indice foliaire dont on ne dispose que des données moyennes par traitement azoté.

Le tableau 4-5 fait la synthèse de toutes les modalités et de leurs abréviations les identifiant pour leur utilisation avec le modèle.

4.2.2. Essais supplémentaires participant au calcul des paramètres du modèle

4.2.2.1. Essais menés en 2006, 2007 et 2008 à l'ITB (Lemaire S. , 2010)

Au cours du travail de thèse de Sébastien Lemaire (2010) à l'ITB, ont été réalisées 3 expérimentations. Ces essais ne peuvent pas être utilisés pour faire des simulations avec le modèle puisqu'aucun dosage d'azote dans les organes de betteraves n'a été effectué, la donnée d'entrée du modèle qui est l'azote prélevé par la plante ne peut donc pas être approchée. Néanmoins, les mesures réalisées sur les surfaces et les masses de feuilles permettent de les utiliser pour conforter deux paramètres du modèle : la masse des feuilles par unité de surface (LMA) et l'efficacité d'utilisation du rayonnement (RUE).

Tableau 4-6 : Descriptif des traitements expérimentaux en 2006, 2007 et 2008.

Année	2006	2007	2008
Semis	20/04/2006	17/04/2007	11/03/2008
Levée	Du 31 au 8/04/2006	Du 3 au 9/03/2007	Du 23 au 28/03/2008
Densité	1 ; 5.5 ; 9.6 et 15.8 pl m ²	1 et 10 pl m ²	5.4 ; 10.9 et 15.4 pl m ²

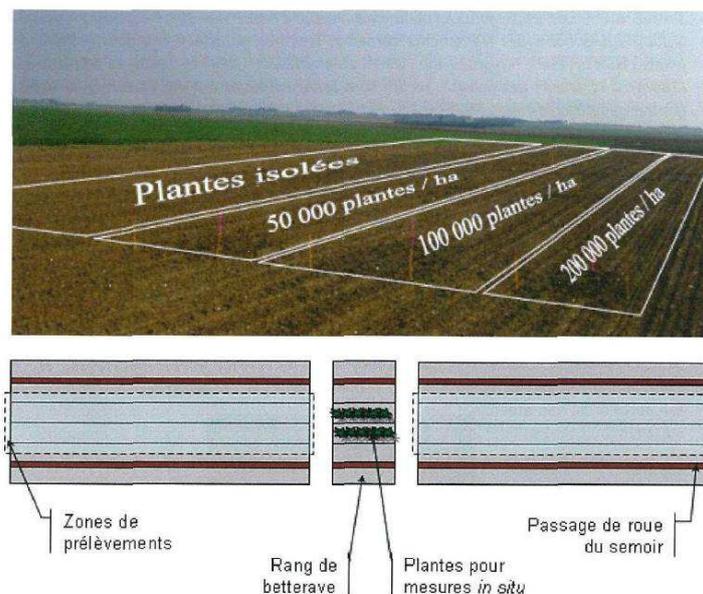


Figure 4-14 : Schéma du dispositif expérimental de l'année 2006 (Lemaire S. , 2010).

Tableau 4-7 : Descriptif des essais menés par l'ITB en 2010 et 2011 à Luneray et Corbeilles.

Essai	Année	Lieu	Facteurs	Dispositif
526AL	2010	Corbeilles	Irrigation : 2 niveaux (irrigué et non irrigué)	Essai factoriel bloc à 3 répétitions
526AE	2011	Luneray	Variété : 2 niveaux (Pasteur et Schubert)	Blocs complets randomisés, 3 répétitions
526AL	2011	Corbeilles	Irrigation : 2 niveaux (irrigué et non irrigué)	Essai factoriel bloc à 3 répétitions

Les expérimentations se sont déroulées en 2006, 2007 et 2008 dans la commune de Bazainville (45, coordonnées 48 11'N, 02°05'E) sur un sol limono-argileux de Beauce, avec des betteraves de la variété Radar et la variété Harmonie pour l'année 2008. Les traitements appliqués portaient sur la densité de population et la fertilisation azotée (pour 2007 seulement), dans un dispositif sans répétitions (tableau 4-6 et figure 4-14).

Des plantes ont été prélevées à intervalles de temps réguliers pour réaliser une description fine de l'architecture de la plante en séparant limbes, pétioles et racines : 15 plantes par traitement en 2006 et 2007 et 30 plantes en 2008. Les mesures portent sur la géométrie et l'initiation des feuilles, ainsi que leurs surfaces. Les biomasses sèches des échantillons sont mesurées.

Les données météorologiques relatives aux essais sont fournies par la station météorologique de Pithiviers (45).

4.2.2.2. Essais menés par l'ITB en 2010 et 2011 sur le suivi de la richesse en sucre

Trois essais ont été menés, l'essai 526AL en 2010 à Corbeilles (45, coordonnées 48 07'N, 02°55'E) et les essais 526AL et 526AE en 2011 à Corbeilles et Luneray (76, coordonnées 49 49'N, 00°55'E) respectivement pour suivre l'évolution de la richesse en sucre de la betterave (tableau 4-7). Il n'y avait pas non plus de dosage d'azote dans les organes des plantes, ces essais ne peuvent donc pas être utilisés pour faire des simulations avec le modèle car la donnée d'entrée du modèle qui est l'azote prélevé par la plante ne peut également pas être approchée. Néanmoins, les mesures réalisées sur les racines permettent de les utiliser pour conforter un paramètre du modèle : la biomasse racinaire structurale maximale.

Des prélèvements périodiques ont été réalisés sur chacun des essais : tous les 15 jours depuis le 01/07 et jusqu'au 15/09 pour les essais 526AL et 526AE 2011, et tous les mois du 15/05 au 30/09 pour l'essai 526AL 2010, sur une surface de 4 m² et avec 3 répétitions. Les betteraves ainsi prélevées ont été comptées, les racines et les feuilles ont été pesées en frais et en sec à l'aide d'un sous-échantillonnage pour chaque répétition. Les racines fraîches restantes sont utilisées pour faire des râpures qui servent à l'analyse de la richesse en sucre.

Tableau 4-8 : Tableau récapitulant les paramètres et variables disponibles par essais.

			Variables du modèle									Paramètres du modèle					
			QN	QN ^{résiduel}	IF	INN	MS _{tot}	MSF _{réel}	MSR _{tot}	MSR ^{HS} _{réel}	Sucre	%N _{Rmin}	α	RUE	LMA	MSR ^{HS} _{max}	k
Exp. Thèse	2010	La Selve	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	2011	Bourgogne	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Autres expérimentations	1994	Clermont Les Fermes	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X		
	2002	Saint Quentin Sur Coole	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X		
	2005	Avignon	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X			
	2006	Bazainville			X		X	X	X				X	X			
	2007	Bazainville			X		X	X	X				X	X			
	2008	Bazainville			X		X	X	X				X	X			
	2009	Perles	X	X		X	X	X	X	X	X				X		
	2010	Corbeilles					X	X	X	X	X						
	2011	Luneray					X	X	X	X	X						
	2011	Corbeilles							X	X	X						

4.3. Récapitulatif des données sources pour les variables et paramètres du modèle

Les expérimentations menées en 2010 et 2011 pendant la thèse disposent des données permettant de calculer tous les paramètres et les variables du modèle. L'année 2011 est quant à elle une année spéciale, les plantes ayant subi un épisode de grêle (le soir du 28 juin) qui a fortement endommagé leur feuillage. Les valeurs des paramètres utilisés dans le modèle sont exclusivement issues des résultats d'expérimentation de l'année 2010. Les essais complémentaires que l'on vient de détailler dans la partie précédente permettent également de calculer un ou plusieurs paramètres de ces paramètres et/ou variables permettant de participer à la validation du modèle. Le tableau 4-8 propose un récapitulatif de toutes ces possibilités.

4.4. Traitement des données recueillies

Pour approcher les variables d'entrée, les autres variables et les paramètres nécessaires au modèle, les données recueillies ont besoin d'être transformées.

4.4.1. Calcul sur les données brutes issues des prélèvements

Toutes les données sont traitées en fonction de la biomasse sèche. Le calcul du poids sec des échantillons est réalisé en multipliant leur poids frais mesuré avec la teneur en biomasse sèche mesurée sur le sous-échantillon correspondant, on ramène ensuite la mesure par unité de surface en fonction de la surface du prélèvement.

Le même principe est appliqué pour déterminer la quantité d'azote présente dans les différents organes.

Pour calculer l'indice foliaire, la moyenne des surfaces obtenues sur les plantes mesurées dans un traitement est multipliée par la densité de plantes du prélèvement.

Le rendement en sucre est calculé en multipliant le rendement en poids frais ou sec de racines par la teneur en sucre des racines exprimée en fonction du poids frais ou sec respectivement.

4.4.2. Calcul des données d'entrée du modèle

4.4.2.1. L'azote prélevé par la plante :

Pour quantifier l'azote prélevé par la plante, on additionne les quantités d'azote présentes dans chacun de ses compartiments. Le meilleur ajustement à ces points est effectué (chapitre 5.2.1).

4.4.2.2. Les données climatiques :

Pour exprimer le temps thermique, nous utilisons les températures moyennes aériennes journalières. Nous avons choisi de le calculer suivant une base 0°C depuis la levée.

Le rayonnement photosynthétiquement actif intercepté journalier est calculé à partir du rayonnement global. On considère, d'après Varlet-Granchet et al. (1982) que :

$$PAR_i = R_g * 0.48$$

Avec, PAR_i, le rayonnement photosynthétiquement actif intercepté et R_g, le rayonnement global (MJ m⁻²).

4.4.3. Calcul des paramètres du modèle

4.4.3.1. Les paramètres racinaires : %N_{Rmin} et MSR^{HS}_{max} :

Ces deux paramètres sont calculés à partir de la biomasse sèche racinaire structurale (hors-sucre). On approche cette biomasse racinaire structurale en ôtant à la biomasse totale de la racine la quantité de sucre qui y est présente. Lors des prélèvements, la plupart des racines fibreuses nous échappe, se cassant et restant dans le sol. La biomasse racinaire structurale reste donc sous-estimée.

Le pourcentage d'azote minimal dans la biomasse racinaire structurale (%N_{Rmin}) est calculé sur le traitement N1 de l'année 2010 (sans apport de fertilisant azoté).

La biomasse sèche racinaire structurale maximale (MSR^{HS}_{max}), est calculée à partir des points maximaux de biomasse sèche racinaire structurale obtenus en 2010 sur les traitements azotés N2 et N3.

4.4.3.2. Les paramètres foliaires : α , RUE et LMA :

Les paramètres foliaires sont calculés en prenant en compte les points expérimentaux de tous les traitements azotés de l'année 2010.

La surface foliaire par unité de masse d'azote (α) est représentée par la pente de la droite de régression reliant les points expérimentaux d'indices foliaires (IF) exprimés en fonction de la quantité d'azote présente dans les feuilles.

L'efficacité d'utilisation du rayonnement (RUE) est représentée par la pente de la droite de régression reliant les points expérimentaux de biomasse sèche totale (MS_{tot}) exprimés en fonction de la quantité de rayonnement photosynthétiquement actif intercepté (PAR_i).

La masse des feuilles par unité de surface (LMA) est représentée par la pente de la droite de régression reliant les points expérimentaux de biomasse sèche des feuilles exprimés en fonction de la surface des feuilles.

4.4.4. Analyses statistiques

Des analyses statistiques ont été réalisées sur certains résultats expérimentaux. Ainsi des analyses de variance et de covariance ont été effectuées à l'aide du logiciel R (v2.15.2).

Des analyses de variance pour comparer plusieurs moyennes ont été effectuées, et des comparaisons multiples selon la méthode de la plus petite différence significative (LSD) ont été appliquées aux données pour caractériser chaque traitement avec un risque alpha égal à 0.05. Il en découle l'établissement de classes représentées par une lettre. Les moyennes avec la même lettre ne sont pas significativement différentes. Ces classes sont indiquées sur les graphiques concernés, pour simplifier la représentation quand il n'y a pas de différences significatives le sigle « ns. » (non-significatif) remplace les classes. Sur les graphiques, les classes sont ordonnées verticalement avec en haut les traitements azotés les plus forts et en allant vers le bas les traitements azotés les plus faibles, pour une meilleure compréhension, les lettres sont colorées de la même couleur que le traitement azoté qu'elles représentent.

Pour certaines données, la construction d'un modèle linéaire suivi d'une analyse de la variance (Anova) était plus appropriée. Dans ce cas, dans l'expression des résultats graphiques ou sous forme de tableaux, les différences significatives sont représentées par un signe « * », quand il n'y a pas de différences significatives le sigle « ns. » est également utilisé.

Les sorties du modèle sont également analysées, ainsi nous avons choisi d'utiliser deux indices pour la validation du modèle : RRMSE (Relative Root Mean

Square Error) et l'EF (Efficience de modélisation) (Bellocchi, Rivington, Donatelli, & Matthews, 2010).

Le RRMSE mesure la différence absolue moyenne entre les valeurs observées et simulées et est calculé comme suit :

$$RRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Pi - Oi)^2}{n}}}{\bar{O}} * 100$$

Où : O_i et P_i sont les valeurs observées et prédites respectivement, n le nombre de couples estimation-mesure et \bar{O} est la moyenne des valeurs observées.

Cet indice, exprimé en pourcentage, varie de 0 à l'infini. Plus petite est la valeur du RRMSE, meilleure est la performance du modèle. Cet indice sans dimension permet de faire des comparaisons en s'affranchissant des unités (Bellocchi, Rivington, Donatelli, & Matthews, 2010).

L'efficience de modélisation est à utiliser en complément du RRMSE, elle représente la proportion de variation expliquée par le modèle, et est calculée comme suit :

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Pi - Oi)^2}{\sum_{i=1}^n (Oi - \bar{O})^2}$$

Cet indice sans dimension varie de moins l'infini à 1. Les meilleures performances donnent une EF égale à 1. Des valeurs négatives d'EF indiquent que le modèle donne une plus mauvaise estimation que les valeurs moyennes de toutes les valeurs mesurées (\bar{O}) (Rivington, Bellocchi, Matthews, & Buchan, 2005).

5.^{EME} PARTIE : RESULTATS

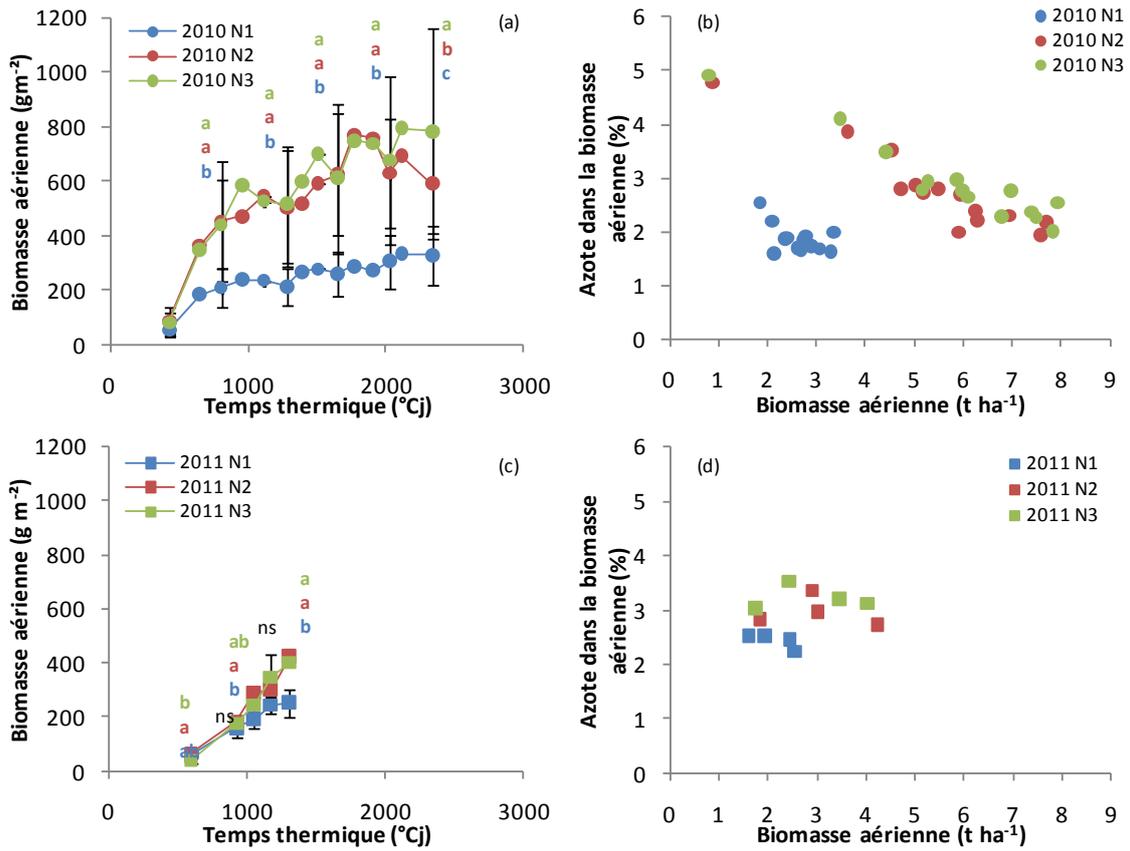


Figure 5-1 : Biomasse aérienne en fonction du temps thermique en 2010 (a) et 2011 (c) et évolution de la teneur en azote des parties aériennes en fonction de la biomasse aérienne en 2010 (b) et 2011 (d).

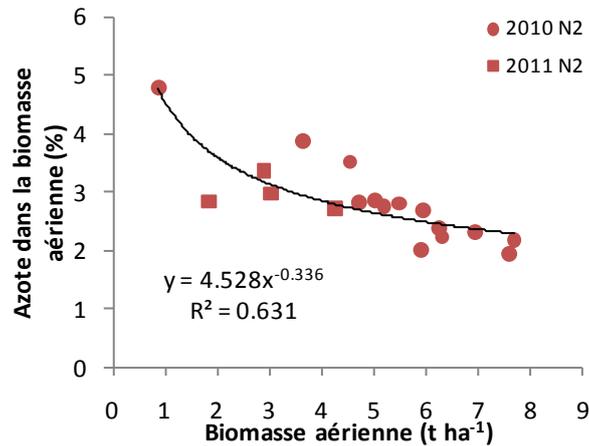


Figure 5-2 : Construction de la courbe de dilution de l'azote à partir des données expérimentales des traitements N2 en 2010 et 2011.

5.1. Caractérisation de l'état de nutrition azotée et élaboration du rendement

5.1.1. Détermination de la courbe critique de l'azote d'une culture de betteraves

5.1.1.1. Détermination de la courbe sur les essais menés pendant la thèse en 2010 et 2011

Dans chacune des deux expérimentations de 2010 et 2011, l'objectif était de créer des traitements entraînant une gamme de situations de nutrition azotée. Dans les deux cas, l'accroissement de la biomasse aérienne n'a lieu qu'entre les traitements N1 et N2, et pas entre les traitements N2 et N3 (figure 5-1 a et c). La fertilisation additionnelle du traitement N3 par rapport au traitement N2 n'apporte pas une croissance aérienne significativement différente les deux années. Nous avons supposé, pour construire la courbe critique de nutrition azotée que le traitement N2 en 2010 et 2011 correspond à la dose minimale d'azote permettant d'élaborer le plus fort rendement en biomasse aérienne, et correspond en cela aux points critiques de la nutrition azotée. La figure 5-2 montre la relation entre les valeurs expérimentales des traitements N2 des deux années et l'ajustement statistique, avec une courbe puissance choisie *a priori*. Même si la variation autour de la courbe est importante (coefficient de détermination de 0.63), la valeur des paramètres obtenus est proche des courbes obtenues sur les plantes en C3. En 2010 et 2011, la modalité N1 se situe bien en dessous de la courbe, nous avons donc pour ces années deux régimes de nutrition azotée différents et contrastés : une carence en azote et une nutrition optimale. Nous prendrons les valeurs de paramètres 4.5 et 0.33 par la suite pour déterminer le niveau de satisfaction azotée des traitements les différentes années d'étude.

5.1.1.2. Positionnement des modalités azotées des autres essais sur la courbe de dilution de l'azote

L'essai de 1994 se positionne très nettement sous la courbe critique, seule la modalité avec un très fort apport azoté (300 kgN ha⁻¹) se situe sur la courbe. On observe un décalage progressif des points sous la courbe en fonction du traitement azoté (figure 5-3 b).

Pour l'essai de l'année 2002 un gradient de nutrition azotée est observable en fonction du traitement azoté. Seules les modalités N3 et N4 se rapprochent le plus de la courbe et s'y superposent ou la dépassent pour certains prélèvements (figure 5-3 d).

L'essai de 2005, qui n'a qu'un seul traitement azoté correspondant à la dose conseillée en azote, se situe sous la courbe (figure 5-3 f).

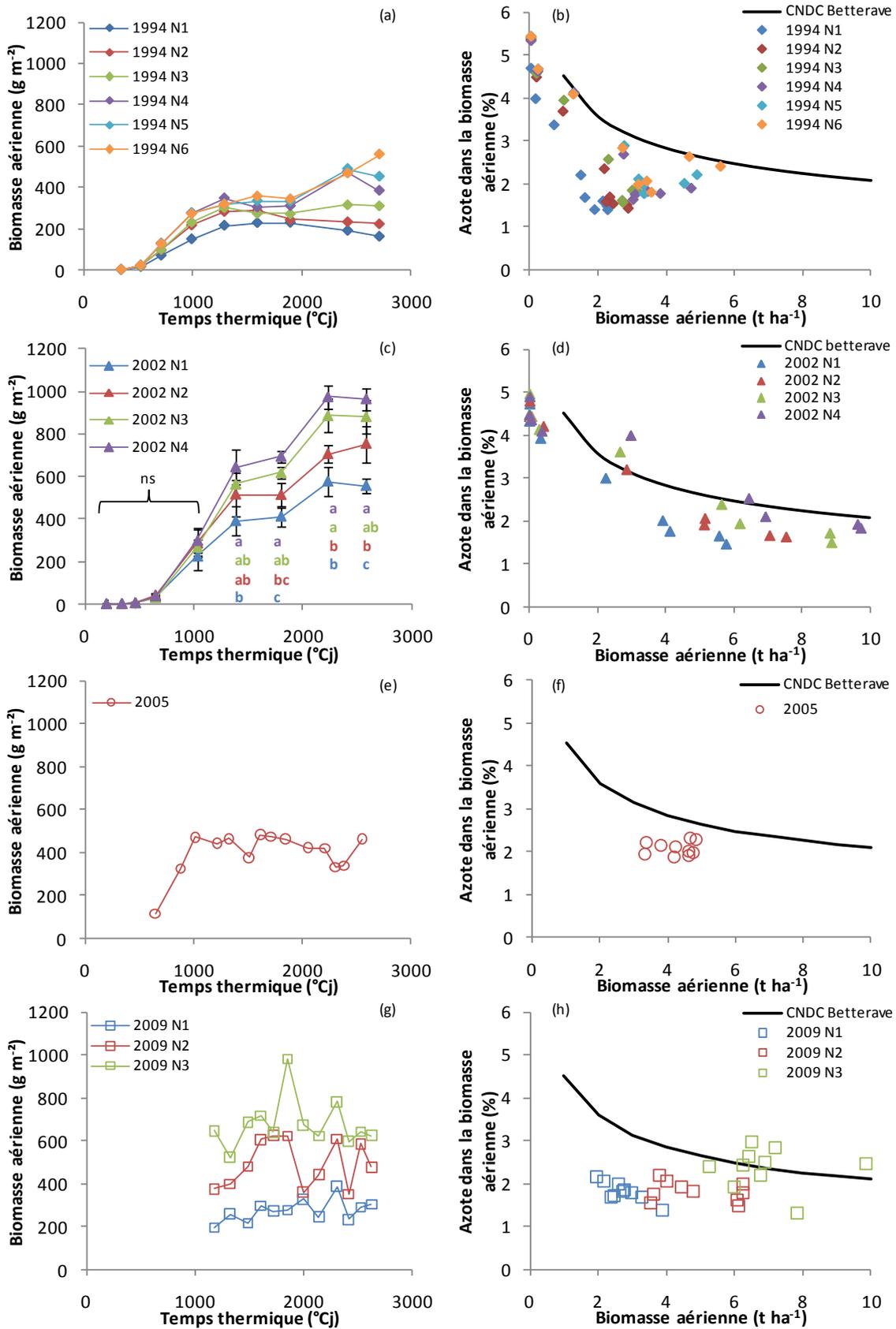


Figure 5-3 : Evolution des biomasses aériennes en fonction du temps thermique et des modalités azotées et positionnement par rapport à la courbe de dilution de l'azote de la betterave (CNDC Betterave) en 1994(a, b), 2002 (c, d), 2005 (e, f) et 2009 (g, h).

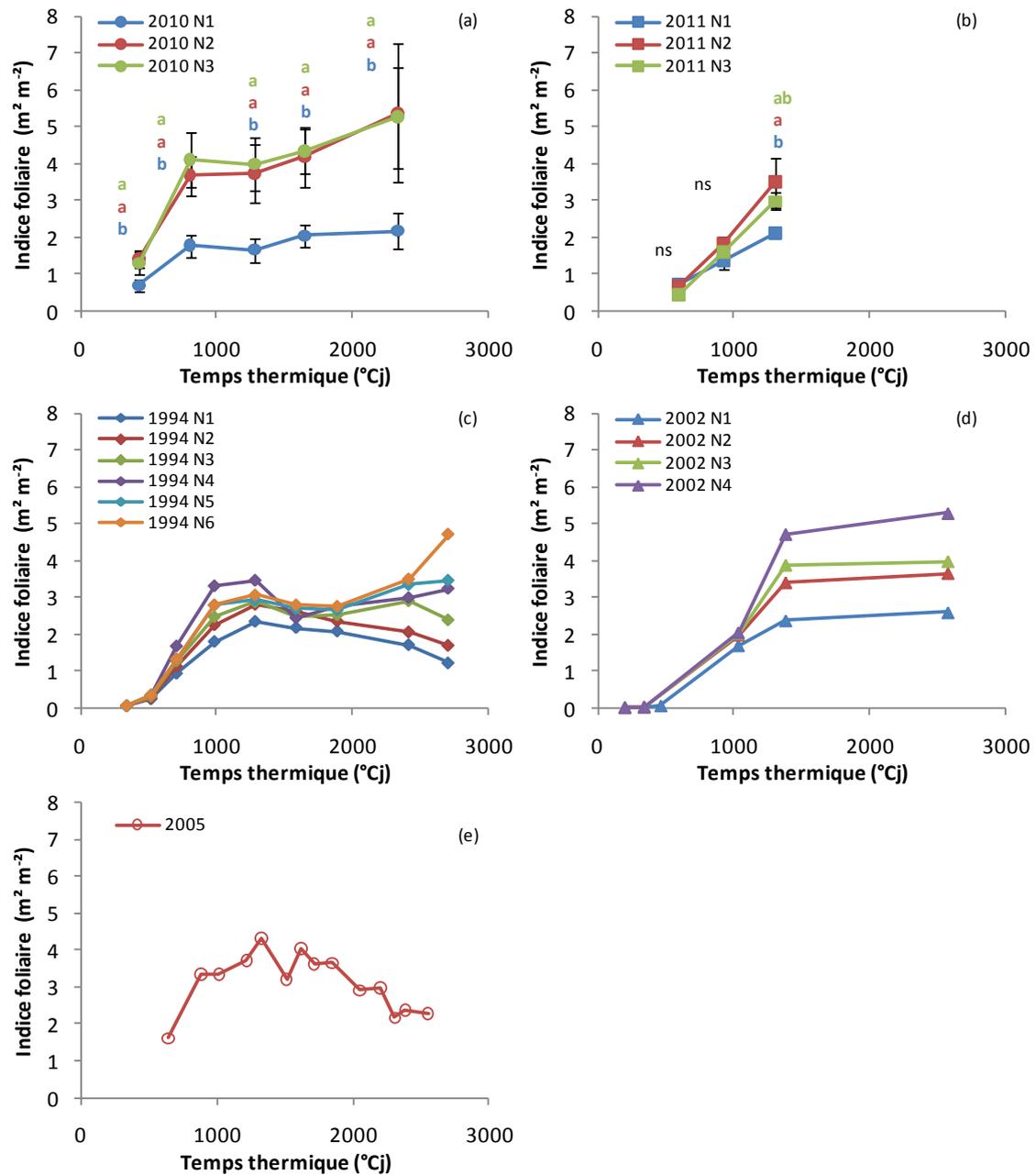


Figure 5-4 : Evolution des indices foliaires en fonction du temps thermique et du traitement azoté en 2010 (a), 2011 (b), 1994 (c), 2002 (d) et 2005 (e).

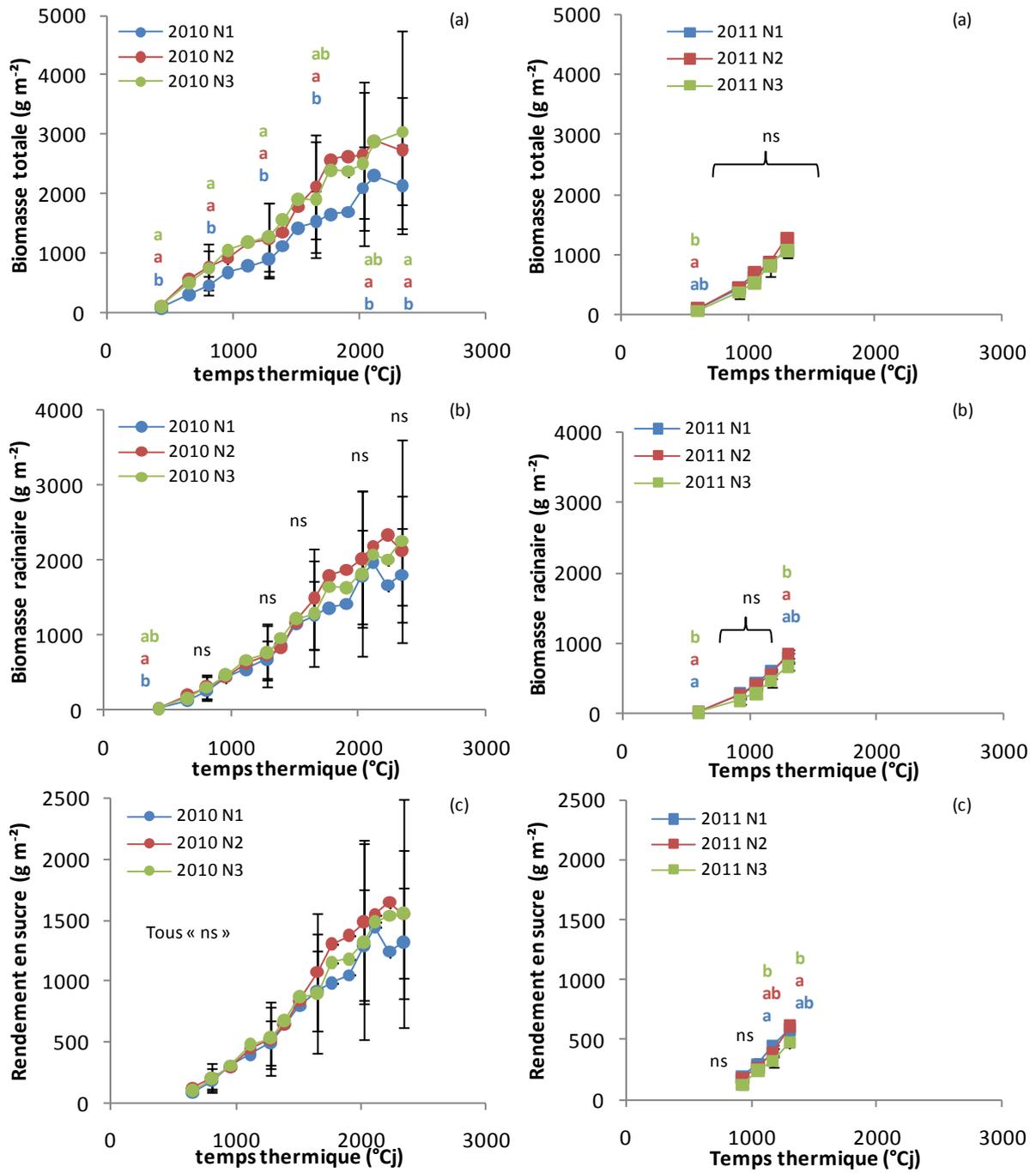


Figure 5-5 : Biomasses totales (a) et racinaires (b) et rendement en sucre (c) en 2010.

Figure 5-6 : Biomasses totales (a) et racinaires (b) et rendement en sucre (c) en 2011.

L'essai mené en 2009 montre un gradient de répartition en fonction du traitement azoté (figure 5-3 h).

5.1.2. Influence de la nutrition azotée sur la formation de la surface foliaire

L'indice foliaire est fortement influencé par le niveau de nutrition azotée. Il augmente comme attendu avec le régime de nutrition (figure 5-4). Les plus fortes différences sont retrouvées en 2010 et 2002, où l'on a jusqu'à 3 m² m⁻² de différence entre le plus faible et le plus fort traitement azoté à la récolte. En 1994, malgré de forts niveaux de fertilisation azotée, l'indice foliaire reste assez faible, entre 2 et 3 m² m⁻² du plus faible traitement azoté au plus élevé jusqu'à 2000°Cj. Après cette date, seuls les traitements N3 à N6 voient leur indice foliaire remonter, le traitement N6 atteint alors environ 5 m² m⁻², ce qui correspond aux valeurs des autres traitements azotés les plus élevés en 2010 et 2002.

5.1.3. Rendements en biomasses et en sucre

L'azote a un effet important sur l'allocation de biomasse au sein des différents compartiments de la plante. La biomasse totale augmente avec l'augmentation de l'apport d'azote (figures 5-1 à 5-10). Ce sont les biomasses aériennes qui sont le plus pénalisées par une carence en azote par rapport à la racine (figures 5-1 à 5-10). Par exemple à la récolte en 2010, la déficience en azote (traitement N1) a provoqué une perte de 58% de biomasse aérienne par rapport au traitement non limitant en azote (figure 5-1 a), mais seulement une perte de 20% de biomasse racinaire (figure 5-5 b). Les expérimentations menées en 1994, 2002 et 2009, voient une perte de biomasse aérienne de 71%, 42% et 51% respectivement à la récolte entre les traitements les plus limitants (N1) et non limitants en azote (figure 5-3). Les biomasses racinaires subissent quant à elles une perte de 13% en 1994 et 10% en 2009, et contrairement aux résultats des autres années, la biomasse racinaire est favorisée dans les traitements limitant en azote avec un gain de biomasse de 5% en 2002 (figures 5-7 b, 5-8 b et 5-10 b).

Les rendements en sucre sont proches entre les différents traitements pour chaque année d'expérimentation. L'azote a un effet sur le rendement en sucre, les traitements les plus faibles (N1) et les plus forts présentent de plus faibles rendements en sucre que les traitements intermédiaires (figures 5-5 c à 5-10 c).

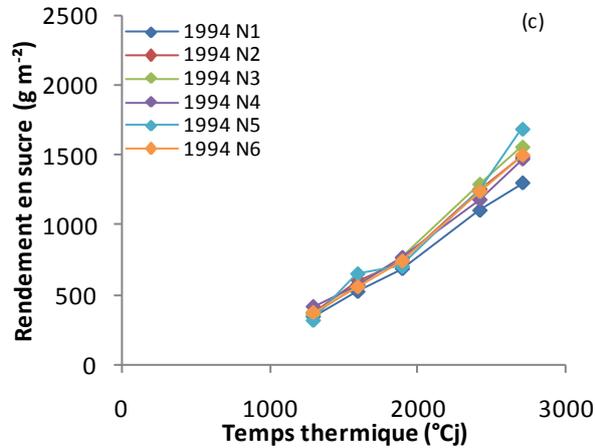
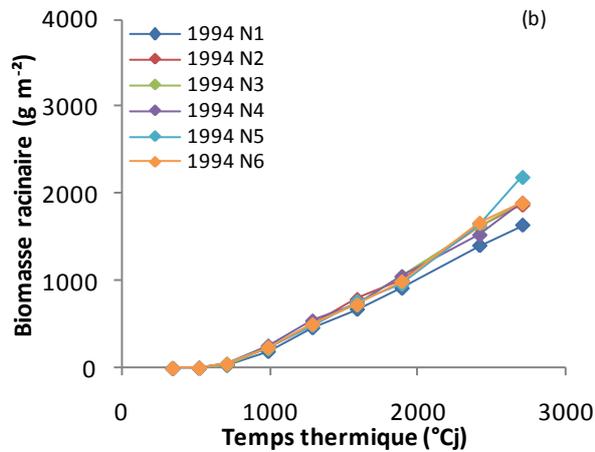
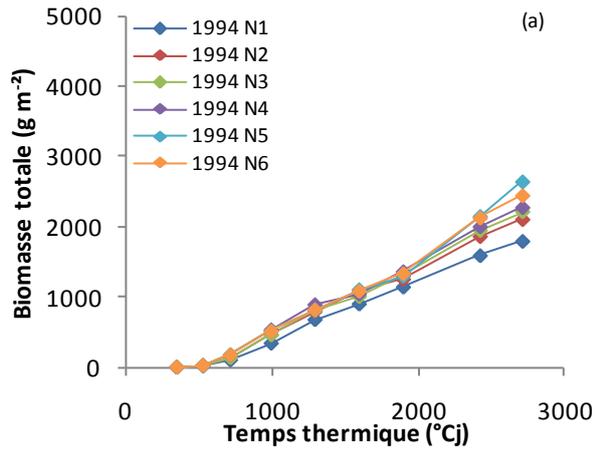


Figure 5-8 : Biomasses totales (a) et racinaires (b) et rendement en sucre (c) en 1994.

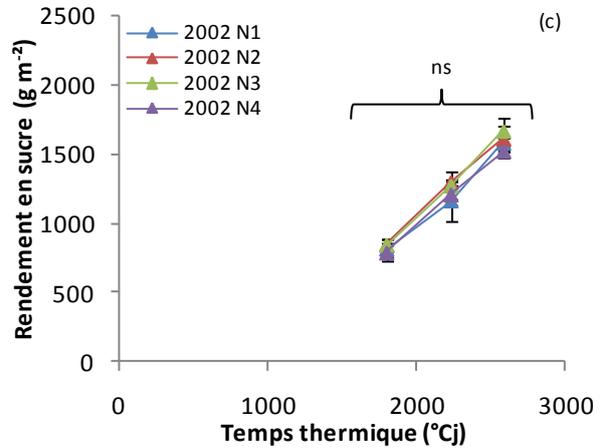
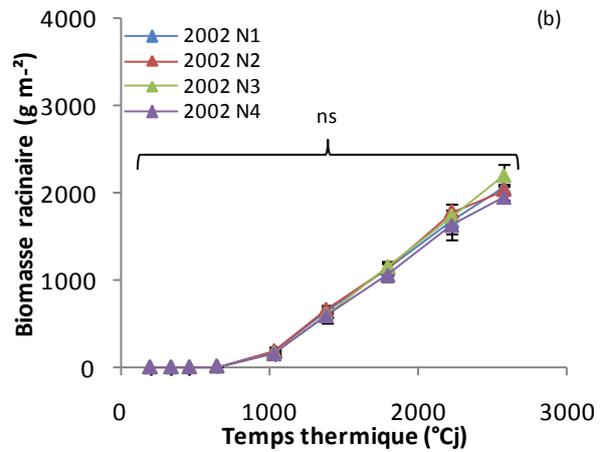
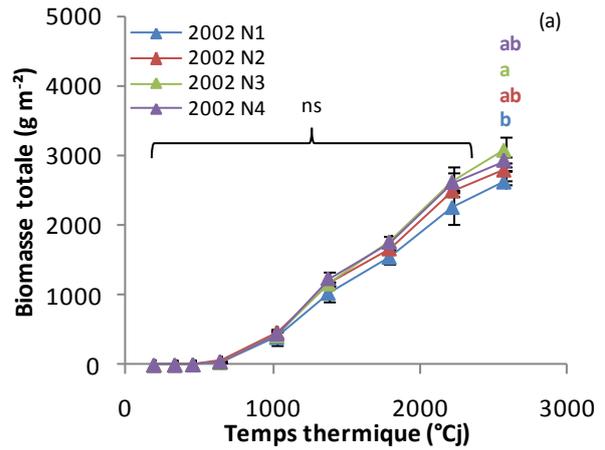


Figure 5-7 : Biomasses totales (a) et racinaires (b) et rendement en sucre (c) en 2002.

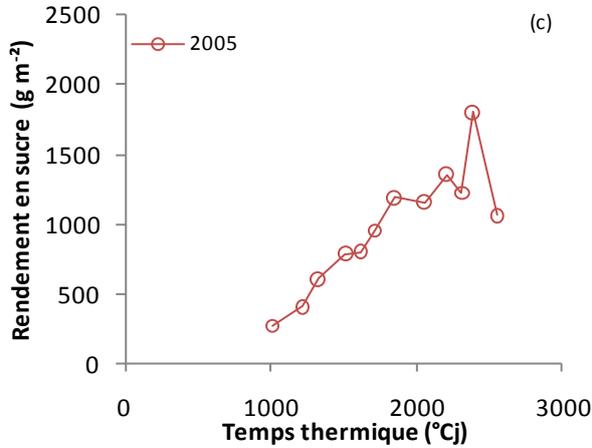
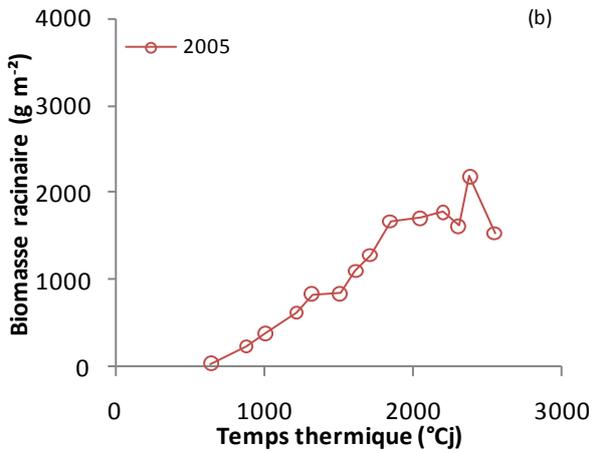
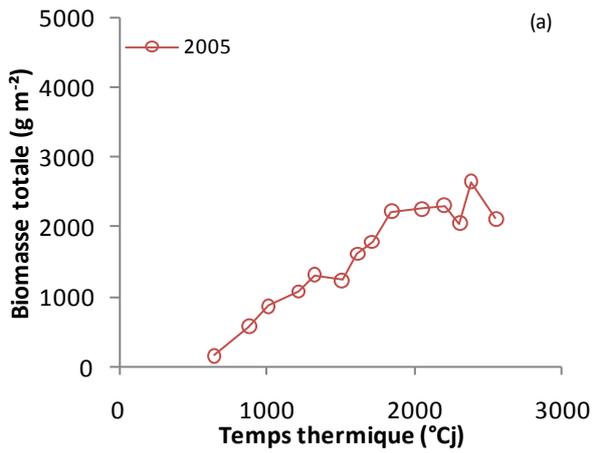


Figure 5-9 : Biomasses totales (a) et racinaires (b) et rendement en sucre (c) en 2005.

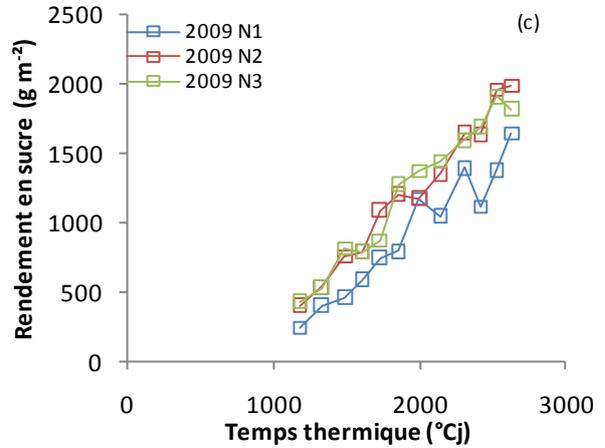
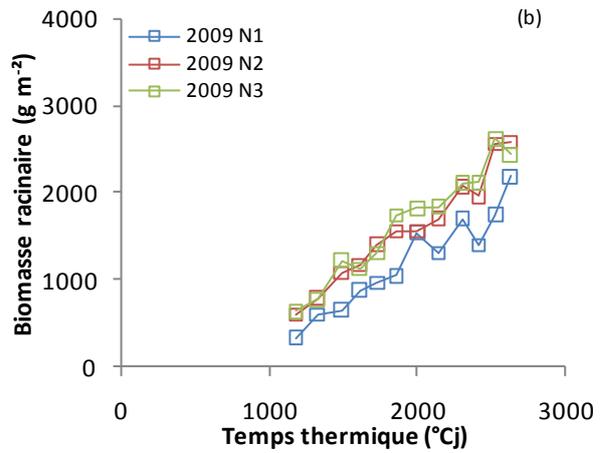
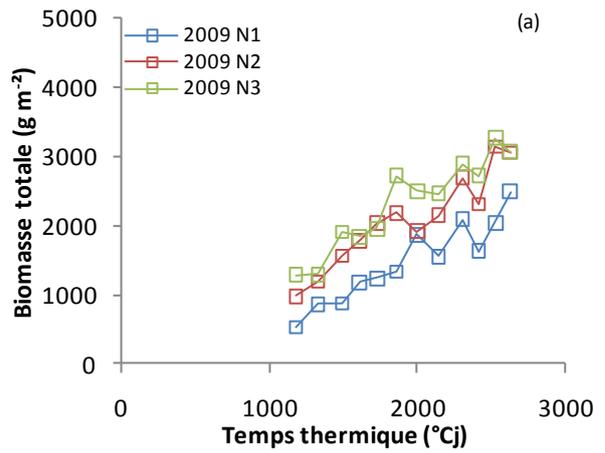


Figure 5-10 : Biomasses totales (a) et racinaires (b) et rendement en sucre (c) en 2009.

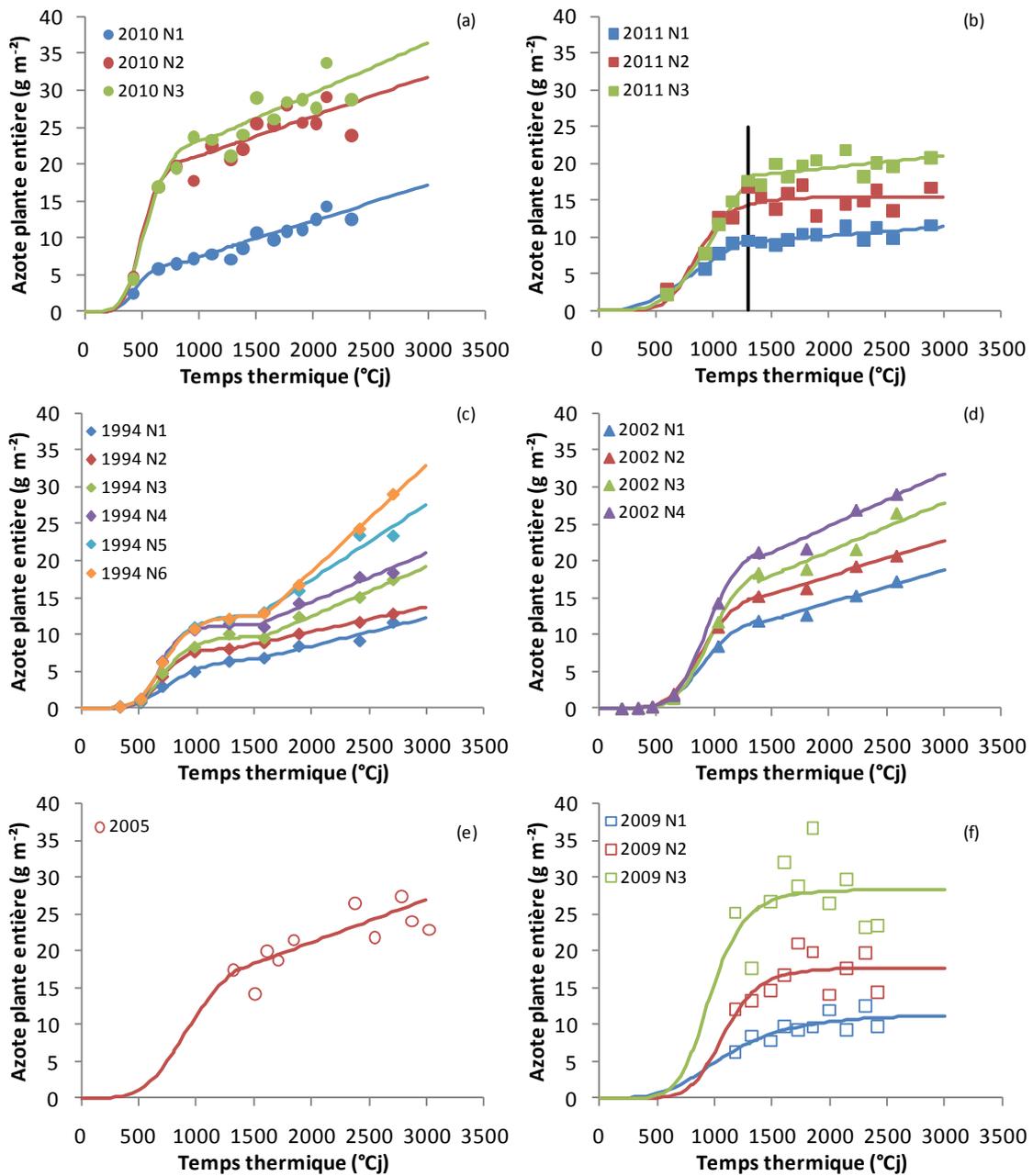


Figure 5-11 : Courbes d'absorption de l'azote dans les différentes modalités de traitements azotés pour les expérimentations menées en 2010 (a), 2011 (b), 1994 (c), 2002 (d), 2005 (e) et 2009 (f).

5.2. Donnée d'entrée et paramétrage du modèle

5.2.1. L'azote absorbé par la culture : variable d'entrée du modèle

La quantité totale d'azote contenue dans la plante est utilisée pour quantifier l'azote absorbé, variable d'entrée du modèle (figure 5-11). Cette évolution suit la même dynamique pour tous les essais (hormis en 2005 et 2009), avec une première partie rapide, pour laquelle on a fait un ajustement de Hill pour être le plus fidèle aux observations, et une seconde partie plus lente pour laquelle on a fait un ajustement linéaire. La transition entre les deux types d'ajustements a été faite de manière visuelle. En 2005 et 2009 nous ne disposons pas de points expérimentaux précoces pour calibrer les courbes. Nous avons donc utilisé un point fictif correspondant au premier point expérimental du traitement 2010 N2 pour calibrer le démarrage des courbes de 2005, 2009 N2 et 2009 N3. Pour le traitement 2009 N1, la fonction de Hill s'ajuste bien sur les points disponibles. Les valeurs des paramètres des courbes d'ajustement sont regroupées dans le tableau 5-1.

5.2.2. Les paramètres racinaires

5.2.2.1. Le paramètre biomasse racinaire structurale maximale : MSR^{HS}_{max} (point 1.1 du schéma général)

Une des hypothèses sous-jacente au modèle développé dans ce travail est la possibilité d'une croissance maximale des parties racinaires structurales de la plante (hors sucre), en fonction du temps thermique. Nous avons considéré que cette croissance maximale doit être obtenue logiquement sous le régime de nutrition azotée le plus favorable, qui permet l'expression d'une croissance maximale de la plante et de ses racines. La courbe de croissance maximale a donc été ajustée sur les valeurs les plus fortes de croissance pour chaque prélèvement de notre année de référence 2010. Les points retenus à chaque date pour construire la courbe de référence sont des points des modalités N2 ou N3. Les points expérimentaux et les paramètres de cette courbe, de type courbe de Hill, sont donnés dans la figure 5-12.

L'examen de la position des valeurs de MSR^{HS} des autres expérimentations par rapport à ce maximum (figure 5-12) montre :

- Que seuls quelques points dépassent la courbe obtenue : un point de 2009, et deux points des essais 526AE 2011 et 526AL 2011, conférant bien à la courbe son statut de courbe maximale.

Tableau 5-1 : Valeurs des paramètres des équations pour la représentation de la quantité d'azote dans la plante. Equation linéaire du type : $Y = a x + b$, équation de Hill du type : $Y = (Y_{max} x^n)/(k^n + x^n)$.

Modalité	Paramètre "a" équation linéaire	Paramètre "b" équation linéaire	Paramètre "Ymax" équation de Hill	Paramètre "k" équation de Hill	Paramètre "n" équation de Hill
2010 N1	0.00	2.62	6.86	462.62	5.62
2010 N2	0.01	15.71	20.98	504.33	6.28
2010 N3	0.01	16.05	24.36	549.28	5.02
2011 N1	0.00	7.73	15.43	1068.97	2.77
2011 N2	/	/	15.43	867.20	6.31
2011 N3	0.00	16.15	29.66	1177.90	3.97
1994 N1	0.00	0.79	7.03	798.12	4.48
1994 N2	0.00	3.60	8.15	700.47	7.22
1994 N3	0.01	-0.94	9.74	728.43	6.25
1994 N4	0.01	1.06	11.25	687.47	7.86
1994 N5	0.01	-3.11	12.62	722.39	6.27
1994 N6	0.01	-10.41	12.63	725.77	6.05
2002 N2	0.00	8.21	16.70	917.14	5.71
2002 N3	0.01	8.10	20.59	987.60	6.21
2002 N4	0.01	10.37	23.29	959.37	6.27
2002 N1	0.00	5.03	13.10	930.03	5.65
2005 N2	0.01	9.58	21.84	987.04	4.32
2009 N1	/	/	11.48	1094.70	3.67
2009 N2	/	/	17.68	1085.23	7.23
2009 N3	/	/	28.32	967.99	6.59

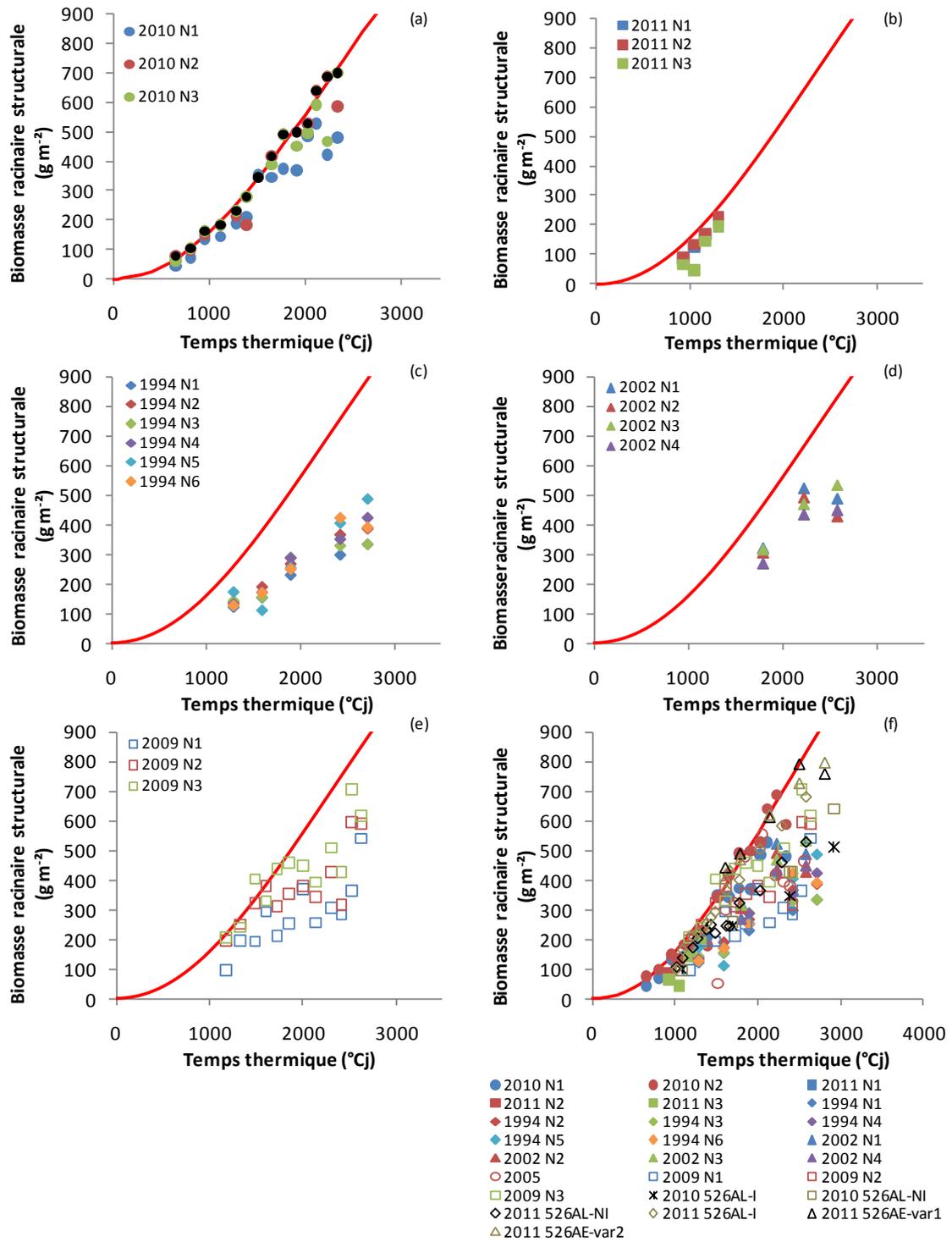


Figure 5-12 : Le paramètre matière sèche structurale racinaire maximale (MSR_{max}^{HS}) et ses variations selon les années et les traitements (azote et irrigation) en 2010 (a), 2011 (b), 1994 (c), 2002 (d), 2009 (e) et toutes les données disponibles (f). Equation de référence 2010 : $y = (2735.78 x^{2.07}) / (3853.60^{2.07} + x^{2.07})$, réalisée sur les points maximaux colorés en noir (a).

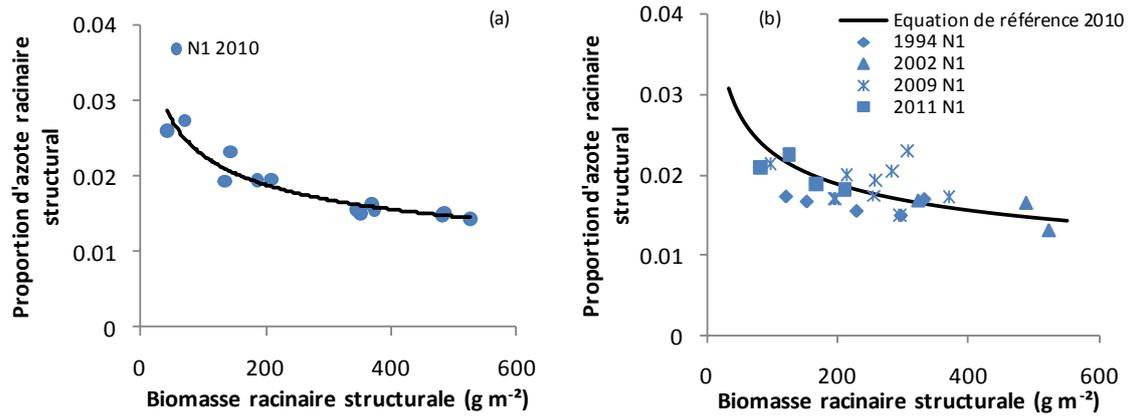


Figure 5-13 : Le paramètre $\%N_{Rmin}$ (a) et ses variations selon les années (b). L'équation de référence 2010 est : $0.08 x^{-0.27}$, $R^2 = 0.92$.

- Que cette valeur maximale de croissance n'est pas atteinte lorsque le peuplement est sous-alimenté en azote, voire pas atteinte pour tous les traitements en 1994.

5.2.2.2. Le paramètre proportion en azote racinaire structural minimum : %N_{Rmin} (point 1-2 du schéma général)

Une autre hypothèse du modèle est que la croissance de la biomasse racinaire structurale croît avec une teneur en azote caractéristique qui peut être approchée par la valeur minimale observée. Cette valeur est estimée sur le régime de nutrition azotée le plus contraignant, N1 de notre année de référence 2010. Comme le pivot de la betterave forme des cellules pour les faire croître en volume et les remplir de sucre ensuite, nous avons considéré qu'il était plus pertinent de considérer l'évolution de cette teneur en fonction de la biomasse des parties souterraines que du temps thermique. Nous obtenons un ajustement de bonne qualité avec une courbe puissance, construite par analogie à la dilution de l'azote dans la biomasse aérienne. Les assises cellulaires en division, constantes au cours du temps mais riches en azote voient leur proportion diminuer au profit de zones en remplissage pauvres en azote (figure 5-13).

Les traitements sans fertilisation azotée des autres années confirment la forme de la courbe obtenue. Cependant, en 1994, les points expérimentaux se trouvent en dessous de la courbe de référence, montrant que celle-ci ne représente pas la valeur minimale atteignable. Nous conserverons cependant les paramètres de la courbe de référence 2010 N1 pour le modèle.

Les autres traitements azotés des autres expérimentations montrent que les teneurs obtenues ont la même dynamique d'évolution mais sont toujours au dessus de la courbe de référence (figure 5-14).

5.2.3. Les paramètres foliaires

5.2.3.1. Surface foliaire produite par unité de masse d'azote des feuilles : paramètre α (point 2-1 du schéma général)

Nous nous sommes inspirés de l'approche de Lemaire, et al. (1997) pour modéliser la surface foliaire de la betterave. Nous avons établi une relation qui montre que la surface foliaire produite par la plante est linéairement reliée à la quantité d'azote contenue dans les feuilles grâce aux données expérimentales (figure 5-15). La pente de cette relation est différente selon la nutrition azotée et selon les années. On remarque une tendance à la diminution de la valeur des pentes des droites de régression linéaires avec l'augmentation du niveau de fertilisation azotée, sauf en 2002, pour qui elles restent stables.

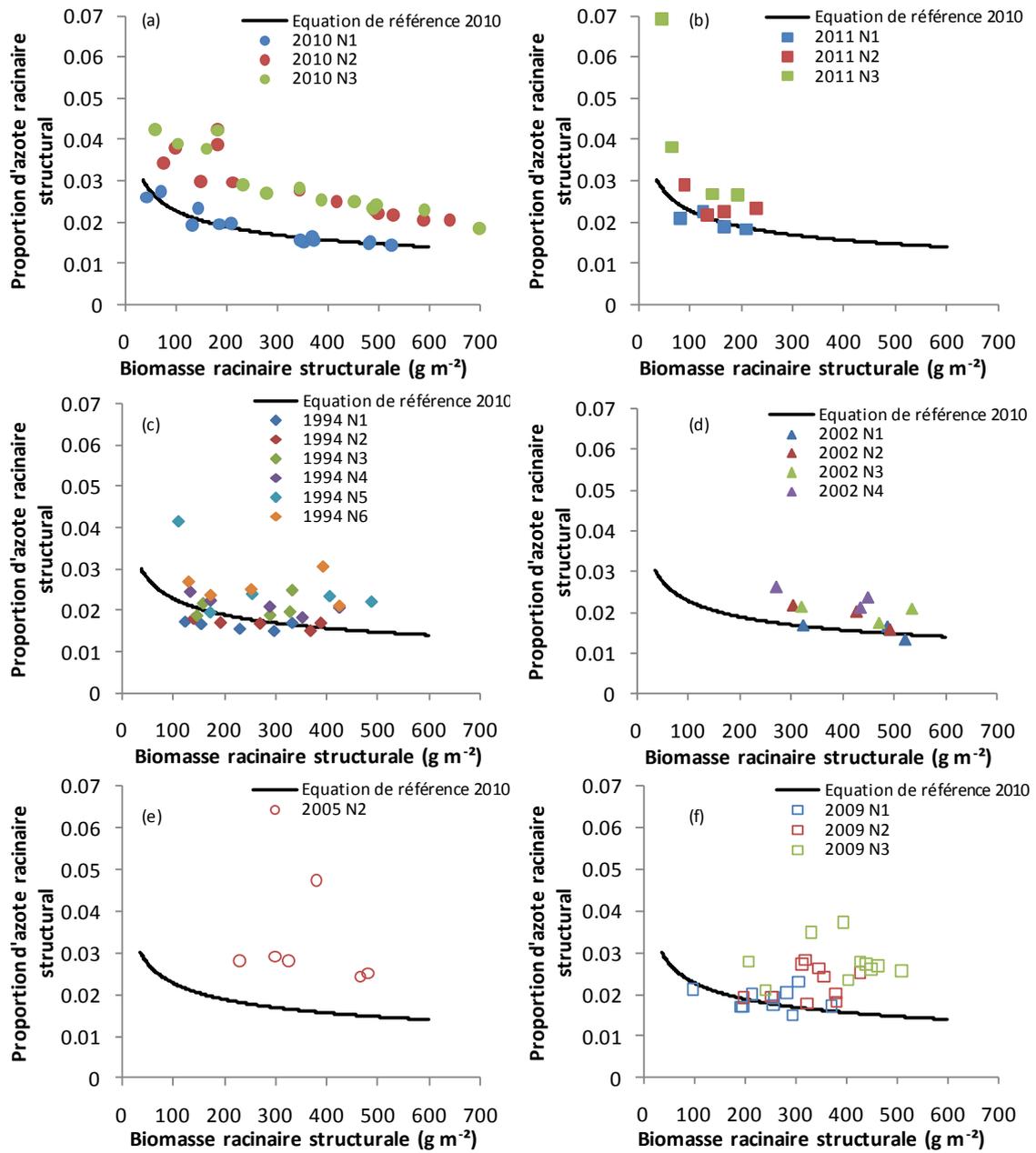
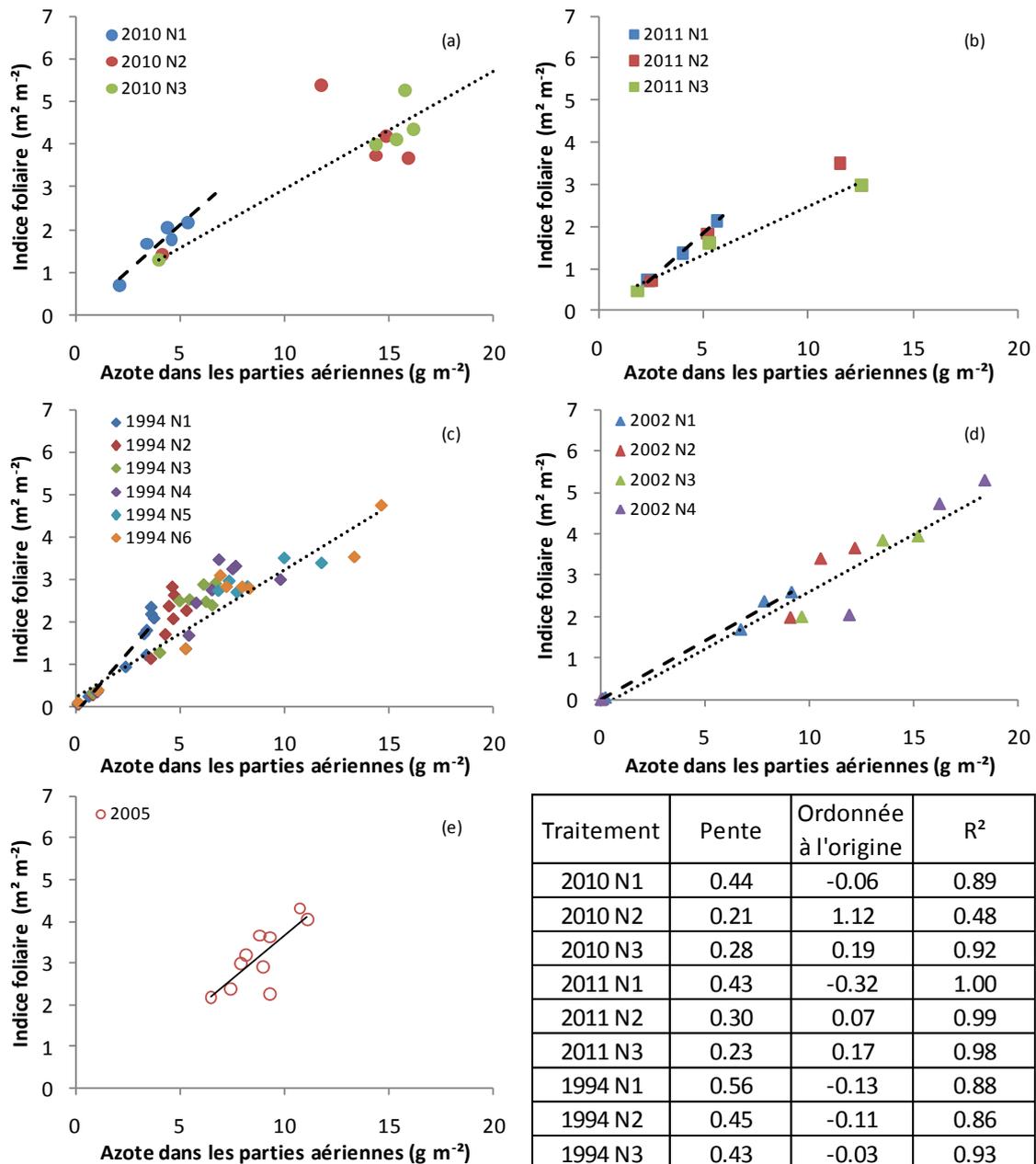


Figure 5-14 : Variations de la proportion d'azote dans la biomasse structurale racinaire en fonction de la nutrition azotée en 2010 (a), 2011 (b), 1994 (c), 2002 (d), 2005 (e) et 2009 (f).



Traitement	Pente	Ordonnée à l'origine	R ²
2010 N1	0.44	-0.06	0.89
2010 N2	0.21	1.12	0.48
2010 N3	0.28	0.19	0.92
2011 N1	0.43	-0.32	1.00
2011 N2	0.30	0.07	0.99
2011 N3	0.23	0.17	0.98
1994 N1	0.56	-0.13	0.88
1994 N2	0.45	-0.11	0.86
1994 N3	0.43	-0.03	0.93
1994 N4	0.38	0.12	0.87
1994 N5	0.32	0.10	0.93
1994 N6	0.30	0.22	0.91
2002 N1	0.29	-0.01	0.99
2002 N2	0.29	-0.05	0.96
2002 N3	0.27	-0.07	0.98
2002 N4	0.28	-0.17	0.94
2005	0.41	-0.50	0.62

Figure 5-15 : Relation entre l'indice foliaire et la quantité d'azote dans les feuilles en 2010 (a), 2011 (b), 1994 (c), 2002 (d) et 2005 (e) en fonction de la nutrition azotée. Pour des raisons de lisibilité, seules les droites de régression linéaires des modalités N1 (tirets) et des plus fortes modalités azotées (pointillés) sont représentées, les valeurs des paramètres des droites de régression de toutes les modalités figurent dans le tableau.

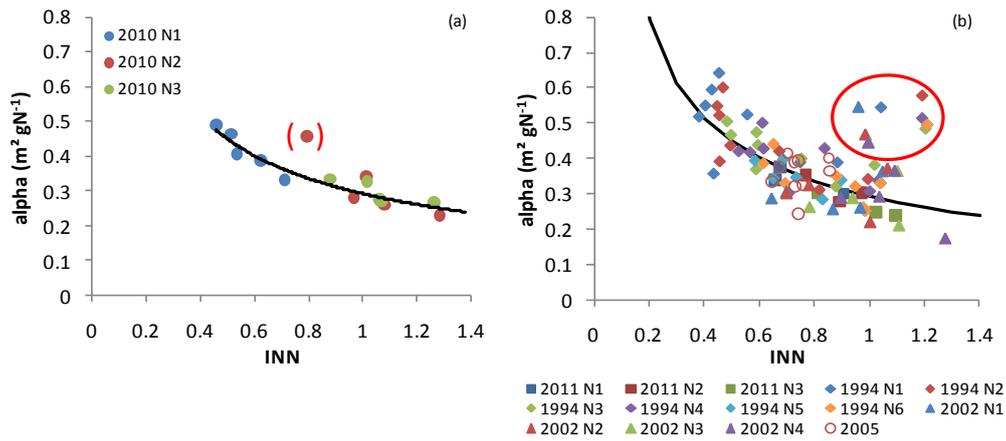


Figure 5-16 : Evolution du paramètre α en fonction de l'INN en 2010 (a) et pour les autres essais (b). L'équation de référence calculée sur l'année 2010 : $y = 0.29 x^{-0.21}$, $R^2 = 0.89$.

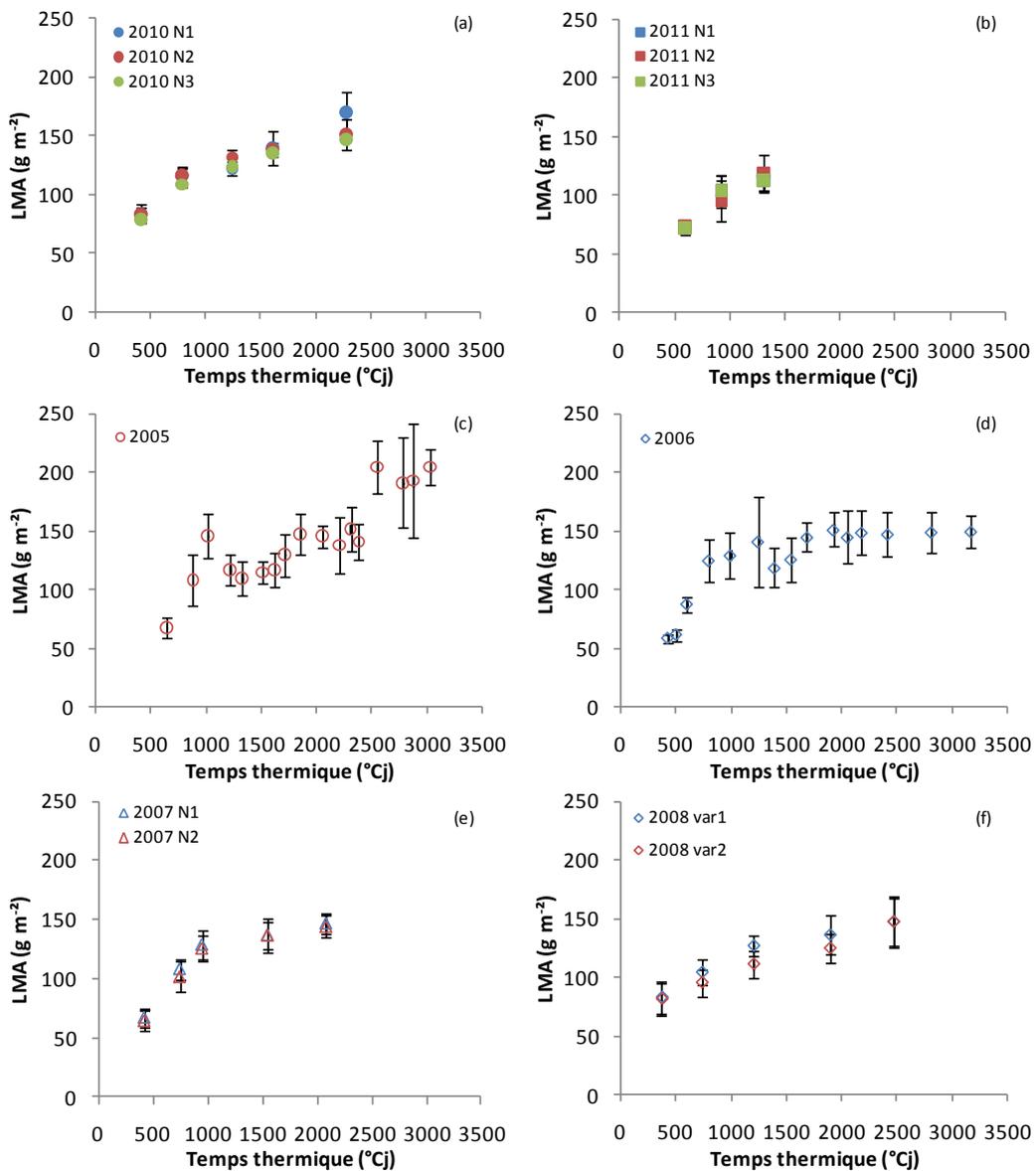


Figure 5-17 : Evolution du paramètre LMA en fonction du temps thermique pour les années 2010 (a), 2011 (b), 2005 (c), 2006 (d), 2007 (E) et 2008 (f).

Nous avons donc choisi de faire varier la valeur du paramètre α en fonction de la nutrition azotée. Nous avons ajusté une courbe de type puissance sur les valeurs instantanées du paramètre α et de l'INN calculé pour chaque point pour l'année de référence 2010, tous traitements azotés confondus (figure 5-16 a). Nous excluons de la régression le point de donnée indiqué entre parenthèses qui se situe bien au dessus de tous les autres points de données et qui semble dû à un problème de mesure. Cette relation permet de réaligner tous les points issus des différents traitements azotés en 2010, c'est aussi le cas pour les différentes modalités des autres années (figure 5-16 b). Sur cette représentation, un groupe de points de données apparaît nettement au dessus des autres (entourés en rouge sur la figure 5-16 b). Ce sont des données très précoces, ayant une biomasse aérienne inférieure à 0.5 t ha^{-1} , sur lesquelles le calcul de l'INN reste incertain.

5.2.3.2. Le paramètre masse de feuilles par unité de surface : LMA (point 2-3 du schéma général)

Dans le modèle, la biomasse potentiellement attribuée aux parties aériennes est déduite de la surface foliaire construite à partir de l'azote résiduel disponible pour les feuilles. Seuls les essais menés pendant la thèse et les essais des années 2005, 2007 et 2008 disposent des données expérimentales nécessaires au calcul du paramètre LMA, c'est-à-dire des mesures détaillées par plantes. La valeur du paramètre varie au cours du temps (figure 5-17). Les évolutions retrouvées entre années ont la même allure, avec une forte augmentation de la valeur du paramètre entre 0 et 1000°Cj , puis une stabilisation ou une augmentation moins rapide de sa valeur selon les années. Les différences de valeurs observées entre les différents traitements azotés pour les années 2010, 2011 et 2007 ne sont pas significatives.

La surface des feuilles est reliée de manière linéaire à leur biomasse en 2010 (figure 5-18 a). Même si le coefficient directeur de la droite de régression du traitement N1 est plus important que ceux des traitements N2 et N3, les coefficients ne sont pas significativement différents entre traitement (tableau 5-2). C'est également le cas en 2007 entre les deux traitements azotés (figure 5-18 c et tableau 5-2). En revanche en 2011, cette tendance n'est pas observable (figure 5-18 b et tableau 5-2). L'essai de l'année 2008 montre qu'il n'y a pas de différences significatives entre les deux variétés testées (var1 : Radar, var2 : Harmonie) (figure 5-18 d et tableau 5-2). Il y a un effet année marqué sur ce paramètre (figure 5-18 d et tableau 5-3). Les valeurs de LMA globales pour chaque année étaient de : 151.17 ± 8.92 en 2010, 125.72 ± 6.15 en 2011, 115.67 ± 11.88 en 2005, 153.34 ± 5.68 en 2006 et 142.07 ± 5.04 en 2007. Les points les plus précoces sur les essais des autres années que 2010 semblent montrer que la relation n'est pas linéaire pour de faibles surfaces foliaires.

Nous avons choisi de fixer dans le modèle le paramètre à la valeur de 151.17, valeur de la pente de la droite de régression issue de tous les points expérimentaux de l'année 2010.

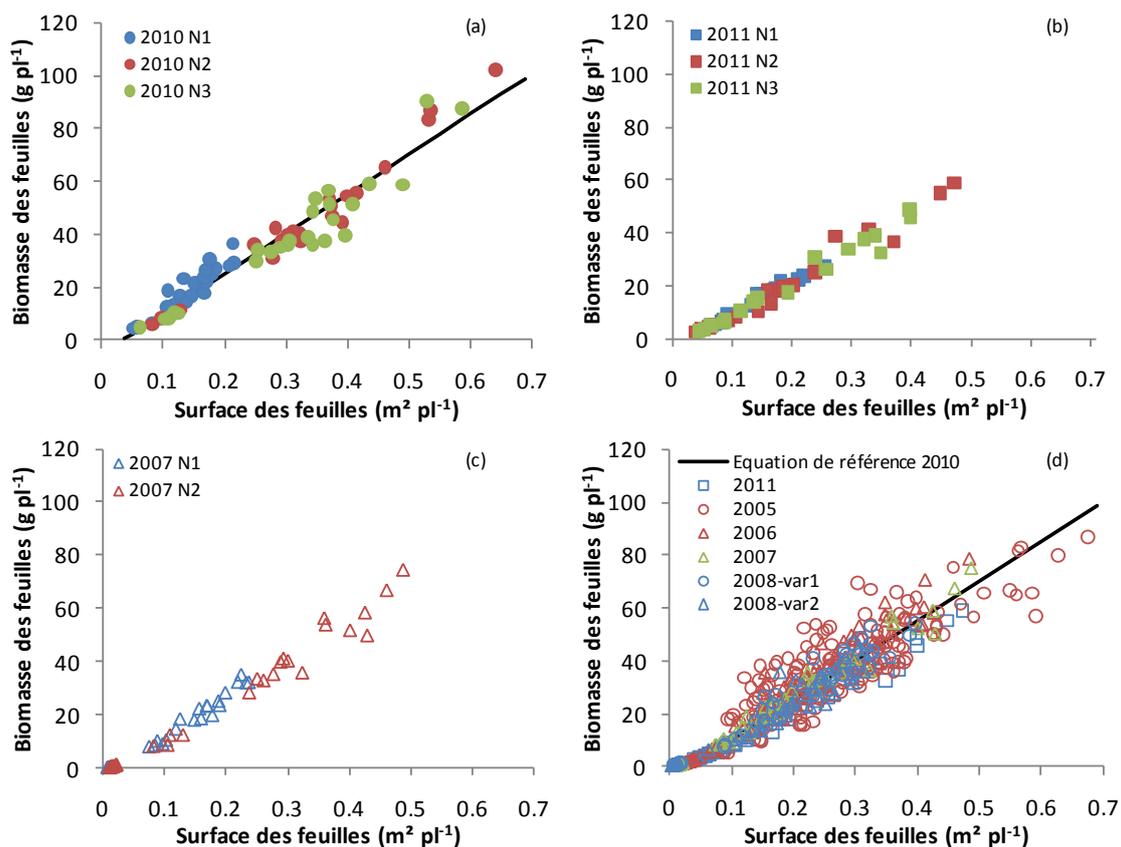


Figure 5-18 : Le paramètre LMA en 2010 (a), 2011 (b) et ses variations en fonction de la nutrition azotée (c) et sur toutes les données disponibles (d).
L'équation de référence 2010 : $y = 151.17x - 5.30$, $R^2 = 0.94$.

Tableau 5-2 : Valeurs des pentes et des ordonnées à l'origine des droites de régressions issues des données de la figure 5-18, comparaison des différents traitements : azoté et variétés sur le paramètre LMA.

Modalité	Pente	Ordonnée à l'origine	Différences significatives entre traitements
2010 N1	170.72	-5.23	ns.
2010 N2	169.30	-11.55	
2010 N3	157.19	-9.57	
2011 N1	128.10	-3.26	ns.
2011 N2	130.15	-4.44	
2011 N3	122.32	-3.18	
2007 N1	145.47	-1.51	ns.
2007 N2	142.07	-1.81	
2008 var1	138.63	-1.30	ns.
2008 var2	130.53	-1.17	
2005	115.67	6.48	
2006	153.34	-2.90	

Tableau 5-3 : Comparaison des valeurs du paramètre LMA entre années.

Comparaisons entre années	2010	2011	2008	2007	2006	2005
2010	-	-	-	-	-	-
2011	***	-	-	-	-	-
2008	**	.	-	-	-	-
2007	ns.	***	ns.	-	-	-
2006	ns.	***	***	*	-	-
2005	***	ns.	*	**	***	-

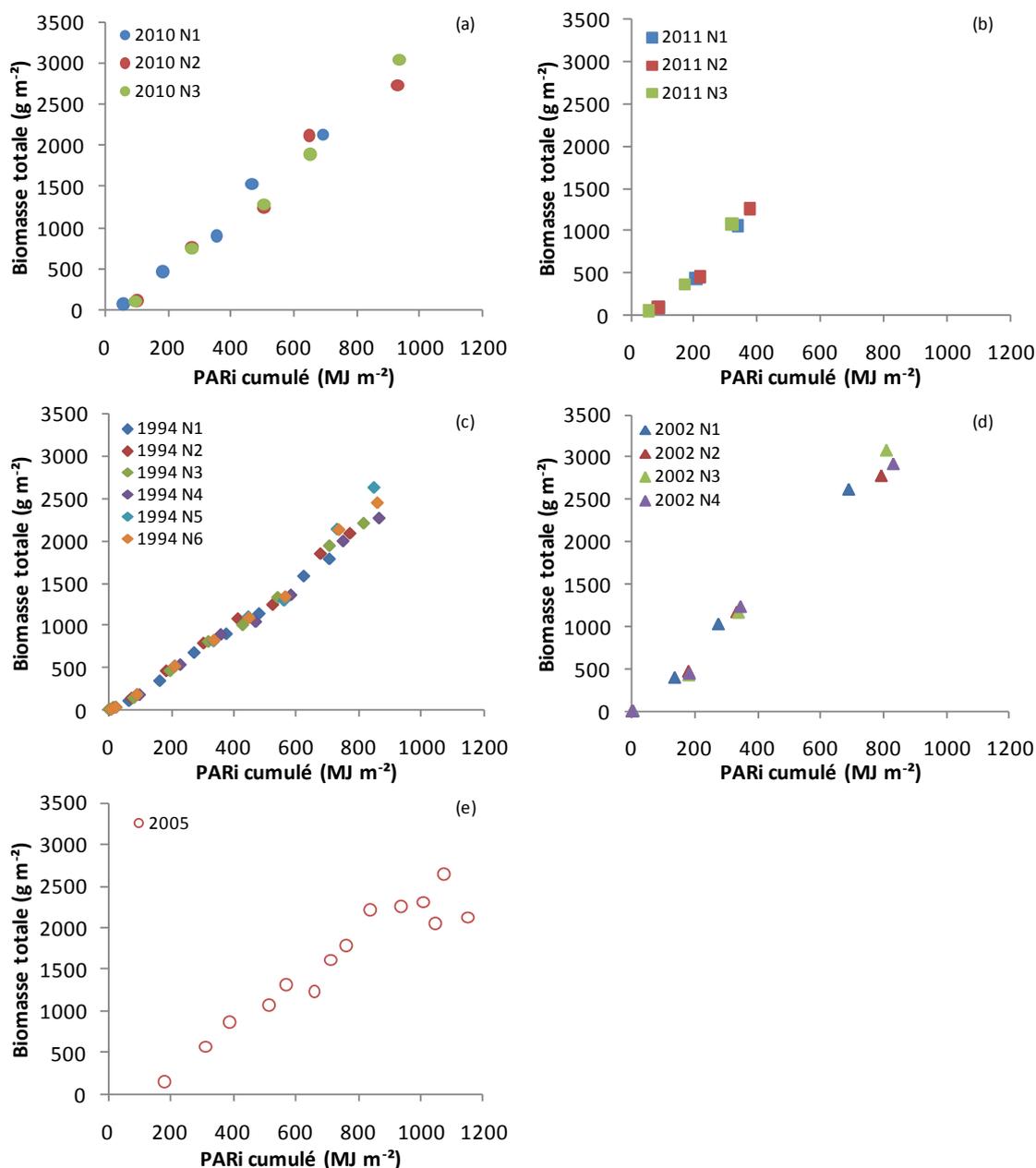


Figure 5-19 : Biomasses totales exprimées en fonction du rayonnement photosynthétiquement actif intercepté selon le traitement azoté en 2010 (a), 2011 (b), 1994 (c), 2002 (d) et 2005 (e).

Tableau 5-4 : Valeurs des pentes et des ordonnées à l'origine des droites de régressions issues des données de la figure 5-19, comparaison de l'effet des différents traitements azotés sur la RUE.

Modalité	Pente	Ordonnée à l'origine	Différences significatives entre traitements azotés
2010 N1	3.31	-148.72	ns.
2010 N2	3.21	-190.17	
2010 N3	3.44	-279.09	
2011 N1	3.90	-304.06	ns.
2011 N2	4.10	-334.71	
2011 N3	3.89	-213.21	
1994 N1	2.57	-43.47	ns.
1994 N2	2.72	-44.32	
1994 N3	2.72	-64.46	
1994 N4	2.62	-61.04	
1994 N5	2.98	-105.77	
1994 N6	2.83	-79.38	
2002 N1	3.82	-26.19	ns.
2002 N2	3.55	-40.31	
2002 N3	3.86	-85.71	
2002 N4	3.55	-46.44	
2005	2.32	-98.68	

Tableau 5-5 : Comparaison des valeurs de RUE entre années.

Comparaisons entre années	2010	2011	1994	2002	2005
2010	-	-	-	-	-
2011	ns.	-	-	-	-
1994	**	**	-	-	-
2002	**	**	**	-	-
2005	**	**	**	**	-

5.2.4. Le paramètre Radiation Use Efficiency : RUE

L'interception de la lumière dans le modèle est modélisée par la loi de Beer-Lambert :

$$I = (1 - e^{-K IF})$$

Avec K valant 0.7 comme indiqué dans la synthèse bibliographique, valeur classiquement observée dans des conditions de culture optimales (avec une densité d'environ 10 plantes par m²). Ce coefficient permet d'estimer l'efficacité d'interception du rayonnement.

La production de biomasse totale est linéairement reliée à la quantité de rayonnement absorbé, comme attendu, et comme l'ont montré Scott et Jaggard (1978) et Damay et Le Gouis (1993). La pente de cette fonction linéaire représente l'efficacité d'utilisation du rayonnement (RUE). La comparaison des pentes des régressions linéaires entre les différents traitements azotés pour les années 2010, 2011, 1994 et 2002 issues des données de la figure 5-19 (a, b, c et d) est récapitulée dans le tableau 5-4. Ce tableau nous montre que les coefficients directeurs ne sont pas significativement différents entre les traitements azotés. La carence en azote dans ces trois expérimentations n'affecte donc pas l'efficacité d'utilisation des ressources. Les valeurs de RUE globales pour chaque année sont de 3.29 ± 0.26 en 2010, 3.92 ± 0.62 en 2011, 2.75 ± 0.09 en 1994, 3.67 ± 0.15 en 2002 et 2.32 ± 0.45 en 2005. Il y a un effet année sur la RUE, les pentes des régressions linéaires sont significativement différentes ($P < 0.01$) entre les années (tableau 5-5).

5.2.5. Récapitulatif des variables et paramètres du modèle

Le tableau 5-6 récapitule les équations et valeurs des paramètres cités ci-avant. Ainsi sur les 6 paramètres que compte le modèle, 3 sont fixes : la RUE, la LMA et le coefficient k, et 3 sont variables : le $\%N_{Rmin}$ qui est variable en fonction de la biomasse racinaire structurale, le MSR_{max}^{HS} qui est variable en fonction du temps thermique et le paramètre α qui est variable en fonction de l'INN. Le tableau 5-7 indique les valeurs initiales données aux paramètres et aux variables du modèle lors de son démarrage.

Tableau 5-6 : Récapitulatif des équations ou des valeurs des paramètres du modèle (avec TT = temps thermique en °Cj).

Paramètre	Equation ou valeur	Unité
$\%N_{Rmin}$	$\%N_{Rmin} = 0.08 MSR_{réel}^{HS}^{-0.27}$	%
α	$\alpha = 0.29 INN^{-0.21}$	$m^2 g^{-1}$
RUE	3.29	$g MJ^{-1}$
K	0.7	
LMA	151.17	$g m^{-2}$
MSR_{max}^{HS}	$MSR_{max}^{HS} = (2735.78 TT^{2.07}) / (3853.60^{2.07} + TT^{2.07})$	$g m^{-2}$

Tableau 5-7 : Valeurs initiales données au variables et paramètres pour le démarrage du modèle.

	Intitulé	Valeur	Unité
Variables du modèle	QN	0.002364	$g m^{-2}$
	QN _{résiduel}	0.00002025	$g m^{-2}$
	IF	0.00005	$m^2 m^{-2}$
	INN	1	
	MS _{tot}	0.03	$g m^{-2}$
	MSF _{pot}	0.00045	$g m^{-2}$
	MSF _{réel}	0.00045	$g m^{-2}$
	MSR _{tot}	0.02955	$g m^{-2}$
	MSR _{pot} ^{HS}	0.02955	$g m^{-2}$
	MSR _{réel} ^{HS}	0.02955	$g m^{-2}$
	Sucre	0	$g m^{-2}$
Paramètres du modèle	$\%N_{Rmin}$	0.08	%
	α	0.2957	$m^2 g^{-1}$
	RUE	3.29	$g MJ^{-1}$
	K	0.7	
	LMA	151.17	$g m^{-2}$
	MSR _{max} ^{HS}	0.02955	$g m^{-2}$

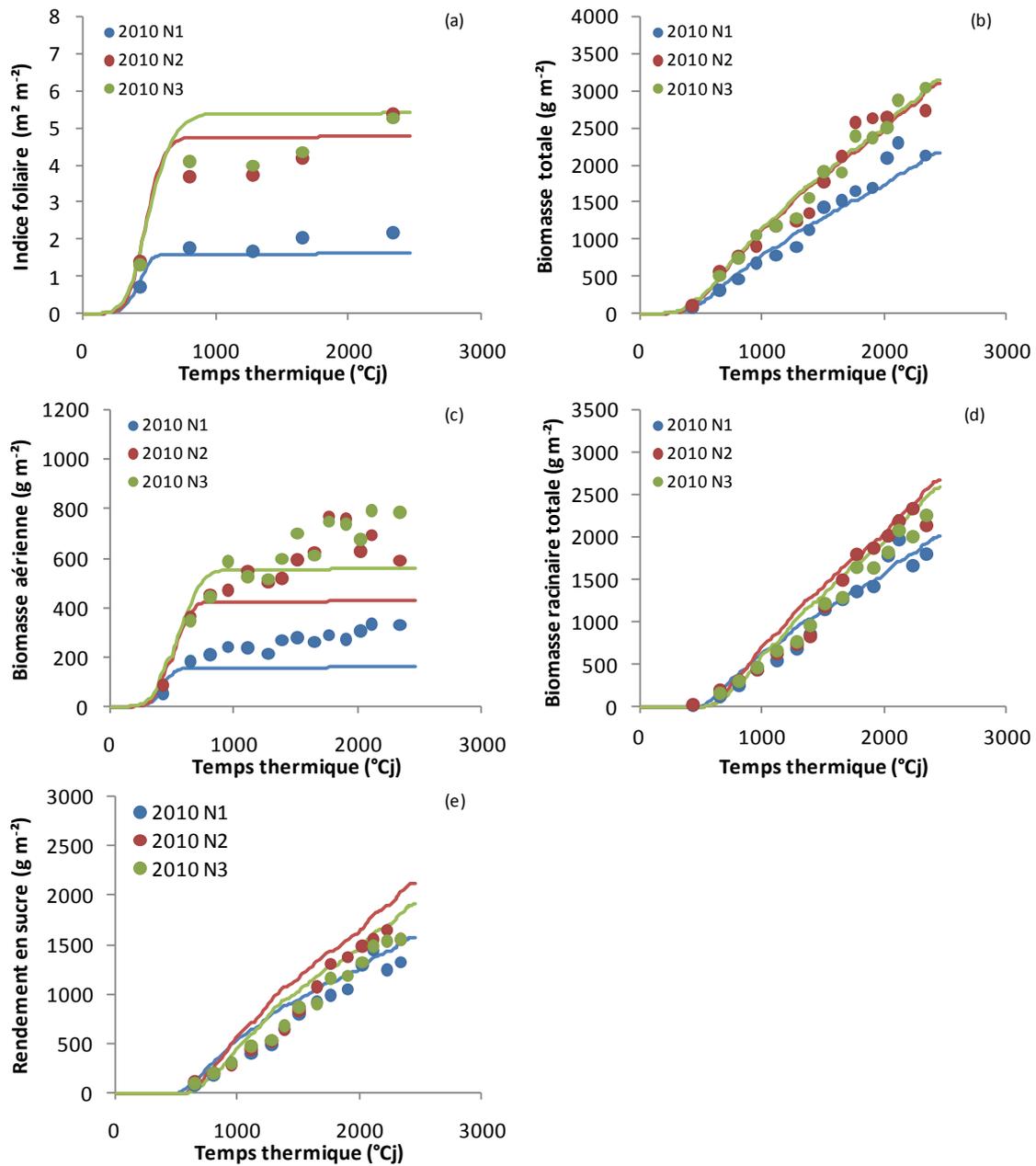


Figure 5-20 : Représentations des données simulées par le modèle (lignes) et des données observées (points) sur les variables d'indice foliaire (a), de biomasse totale (b), de biomasse aérienne (c), de biomasse racinaire (d) et de rendement en sucre (e) pour toutes les modalités azotées de l'année de calibration 2010.

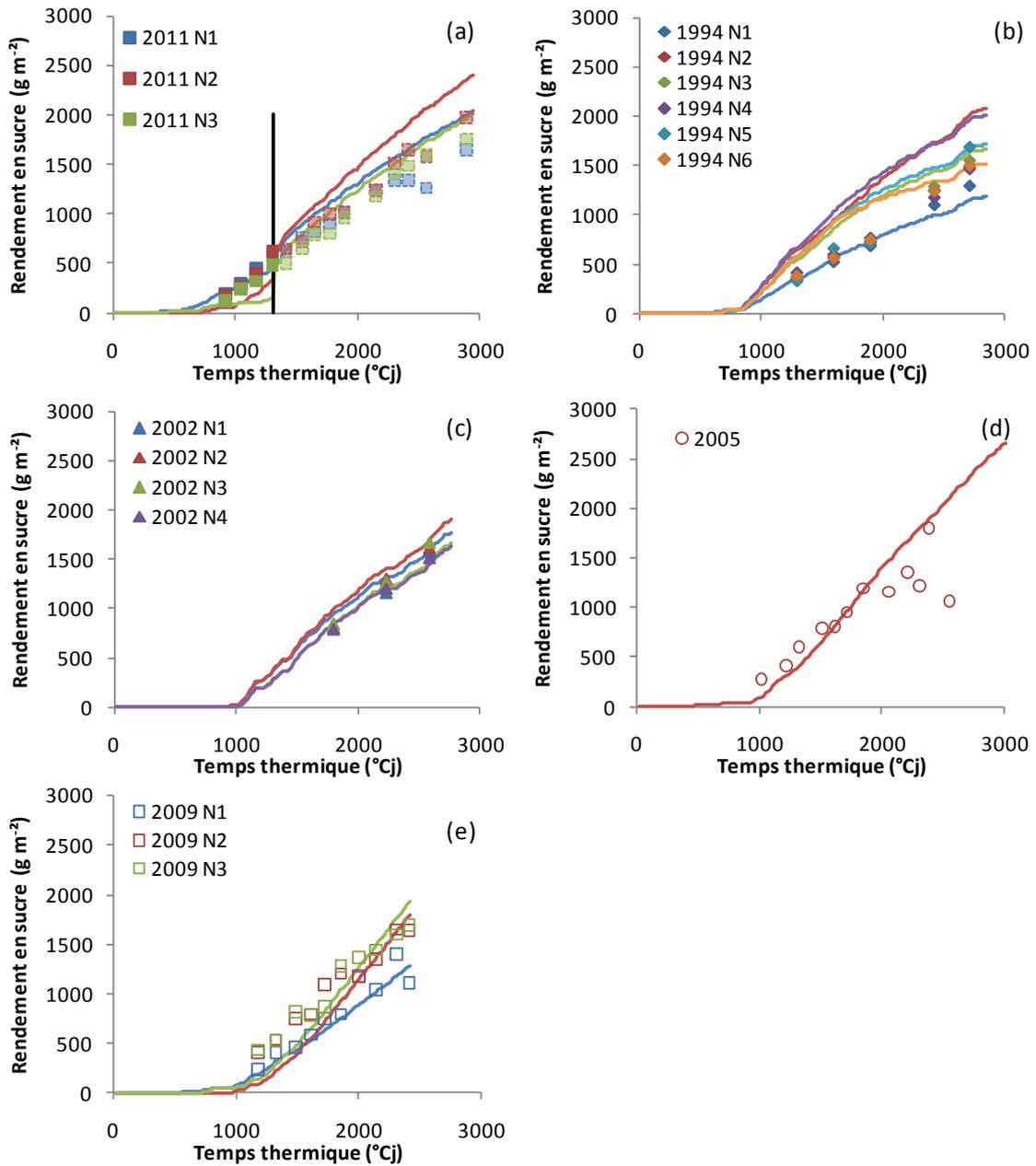


Figure 5-21 : Résultats des simulations du rendement en sucre (lignes) sur les données de validation du modèle en 2011 (a), 1994 (b), 2002 (c), 2005 (d) et 2009 (e). Pour l'année 2011, le moment de survenue de la grêle est indiqué par la droite verticale noire.

5.3. Validation du modèle

5.3.1. Les résultats de calibration du modèle

Les résultats de calibration sur les différentes modalités de l'expérimentation 2010, année de référence, sont représentés graphiquement sur la figure 5-20. L'indice foliaire est globalement bien simulé pour la modalité N1 mais est surestimé à partir d'environ 750°Cj pour les deux autres modalités. La biomasse totale est très bien simulée par le modèle quel que soit le niveau de fertilisation azotée. La biomasse aérienne est bien simulée jusqu'à 750°Cj, mais au-delà pour toutes les modalités, le modèle sous-estime cette biomasse. La biomasse racinaire totale est globalement bien estimée, et légèrement surestimée pour les modalités N2 et N3, et le rendement en sucre est par conséquent aussi surestimé sur toutes les modalités azotées.

5.3.2. Les résultats de simulation sur les données de validation

L'essai de l'année 2011 est pris en compte pour la validation du modèle jusqu'à la survenue de l'épisode de grêle. Néanmoins, les sorties graphiques représentent les simulations du modèle après cet épisode. Pour ce faire, nous avons réinitialisé le modèle avec les données expérimentales relevées à ce stade. Les équations du modèle et son fonctionnement restent inchangés. Le moment de survenue de la grêle est indiqué sur les graphiques par une barre verticale noire.

5.3.2.1. Les résultats de simulation sur le rendement en sucre

Le rendement en sucre est surestimé par le modèle, mais les courbes de simulations ont la même allure que l'enchaînement des données expérimentales (figure 5-21).

Les indices utilisés pour évaluer le modèle sur la variable sucre sont les RRMSE et l'EF. La valeur globale de RRMSE est de 29.60 % et celle de l'EF globale est de 0.65. Les RRMSE sont comprises entre 4.74 % pour la modalité 2002 N4 et 70.60 % pour la modalité 2011 N3, et les valeurs d'EF sont comprises entre 0.97 et -1.55 pour les mêmes modalités respectivement (tableau 5-8). Les plus fortes RRMSE et les plus faibles EF sont principalement retrouvées sur les essais de 1994, 2005 et 2011. On peut relier cela avec le fait que les deux années d'expérimentations en 1994 et 2005 présentaient une très faible RUE par rapport à celle utilisée dans le modèle. Utiliser une RUE plus forte conduit donc à une surestimation de la production de biomasse totale et donc du sucre. Les valeurs d'EF sont toujours positives sauf pour l'essai de 1994 et

Tableau 5-8 : Valeurs des RRMSE et d'EF sur l'ensemble des simulations pour les variables principales du modèle.

Modalité	Biomasse totale		Indice foliaire		Biomasse aérienne		Biomasse racinaire totale		Rendement sucre	
	RRMSE %	EF	RRMSE %	EF	RRMSE %	EF	RRMSE %	EF	RRMSE %	EF
2011 N1	13.92	0.94	12.08	0.91	36.47	0.12	15.00	0.94	23.42	0.65
2011 N2	12.81	0.95	36.42	0.60	76.43	-1.52	48.96	0.44	55.46	-0.53
2011 N3	33.30	0.71	147.79	-3.28	151.39	-7.16	65.68	0.11	70.60	-1.55
1994 N1	6.54	0.99	50.59	0.21	28.10	0.78	8.26	0.99	11.20	0.94
1994 N2	42.86	0.75	26.16	0.78	51.60	0.22	42.99	0.81	49.80	-0.12
1994 N3	27.40	0.90	17.64	0.89	20.31	0.88	32.26	0.90	25.93	0.73
1994 N4	42.58	0.75	14.82	0.92	34.23	0.69	53.42	0.70	54.98	-0.53
1994 N5	35.64	0.85	22.59	0.83	42.83	0.54	35.98	0.88	32.17	0.63
1994 N6	39.34	0.80	34.11	0.68	62.23	0.10	33.74	0.89	29.77	0.61
2002 N1	9.08	0.99	54.26	0.71	39.01	0.83	6.27	1.00	10.71	0.84
2002 N2	8.42	0.99	70.28	0.35	34.61	0.87	12.37	0.99	9.68	0.85
2002 N3	13.24	0.99	93.02	-0.10	36.64	0.86	10.01	0.99	9.18	0.88
2002 N4	9.51	0.99	72.63	0.39	35.51	0.87	12.73	0.99	4.74	0.97
2005	46.17	-0.12	91.80	-13.66	99.34	-16.29	37.63	0.54	39.19	0.14
2009 N1	15.58	0.80	/	/	35.90	-2.33	13.73	0.88	17.21	0.85
2009 N2	16.10	0.62	/	/	32.54	-1.05	23.68	0.48	24.08	0.61
2009 N3	11.72	0.79	/	/	35.63	-3.28	19.79	0.67	19.40	0.76
Toutes modalités	28.41	0.87	67.84	-0.11	58.56	0.38	30.15	0.88	29.60	0.65

2011. Pour l'essai de 2002, l'EF est au minimum égal à 0.84, ce qui est très proche de 1 (la valeur maximale d'EF) et montre que le modèle est performant cette année là.

Globalement, ces résultats nous indiquent que le modèle arrive à simuler correctement le rendement en sucre quelle que soit l'année, la modalité azotée ou la variété, exception faite des années 1994 et 2011.

5.3.2.2. Les résultats de simulation sur les autres variables

Les sorties graphiques des simulations du modèle sur les autres variables sont présentées en annexe 1. Pour comparer les résultats des simulations sur tous les essais, il est plus simple d'utiliser le tableau comparatif des valeurs de RRMSE et d'EF pour toutes les sorties d'intérêt (tableau 5-8).

La biomasse totale est très bien simulée par le modèle avec une valeur globale de RRMSE de 28.41 % et une EF globale de 0.87. Les valeurs par modalité de RRMSE s'étendent de 6.54 % pour la modalité 1994 N1 à 46.17 % pour la modalité 2005, et les valeurs d'EF de 0.99 pour toutes les modalités de 2002 et la modalité 1994 N1 à -0.12 pour la modalité 2005. Ce sont de très bons résultats de simulation. Si on omet les résultats de l'année 1994 et 2005 qui présentent, comme on l'a dit précédemment, une plus faible RUE que celle utilisée dans le modèle, et la modalité 2011 N3, les valeurs de RRMSE sont toutes inférieures à 20 %, et l'EF reste dans des valeurs positives, supérieures à 0.62, ce qui sont de bonnes valeurs pour ces indices.

L'indice foliaire n'est pas bien simulé par le modèle, il est généralement surestimé par celui-ci, avec une valeur globale de RRMSE de 67.84 % et une EF globale de -0.11. Prises individuellement par modalités, les valeurs de RRMSE s'étendent de 12.08 % pour la modalité 2011 N1 à 147.79 % pour la modalité 2011 N3.

On ne peut pas tirer de tendance nette entre les années et les traitements azotés. Les valeurs d'EF ne représentent pas exactement les mêmes extrêmes que les RRMSE. En effet elles sont comprises entre 0.91 pour la modalité 2011 N1 et -13.66 pour la modalité 2005.

La biomasse aérienne n'est également pas très bien simulée par le modèle, avec une valeur globale de RRMSE de 58.56 % et une EF globale de 0.38. Les valeurs par modalité de RRMSE s'étendent de 20.31 % pour la modalité 1994 N3 à 151.39 % pour la modalité 2011 N3, et des valeurs d'EF de 0.88 pour la modalité 1994 N3 à -16.29 pour la modalité 2005. Ce sont quasi les mêmes tendances que pour l'indice foliaire. Ce phénomène est dû à l'hypothèse de priorité carbone des feuilles qui implique que la biomasse aérienne est directement reliée à l'indice foliaire. Comme le modèle ne simulait pas bien l'indice foliaire, il est donc logique qu'il ne simule pas bien non plus la biomasse aérienne.

Tableau 5-9 : Détermination des trois classes d'INN (calculés sur les données observées).

	Carence forte, INN de 0.5 à 0.7	Carence faible, INN de 0.7 à 0.9	Pas de carence, INN de 0.9 à 1.1
2011 N1	X		
2011 N2		X	
2011 N3			X
1994 N1	X		
1994 N2	X		
1994 N3		X	
1994 N4		X	
1994 N5		X	
1994 N6			X
2002 N1		X	
2002 N2		X	
2002 N3			X
2002 N4			X
2005		X	
2009 N1	X		
2009 N2	X		
2009 N3			X

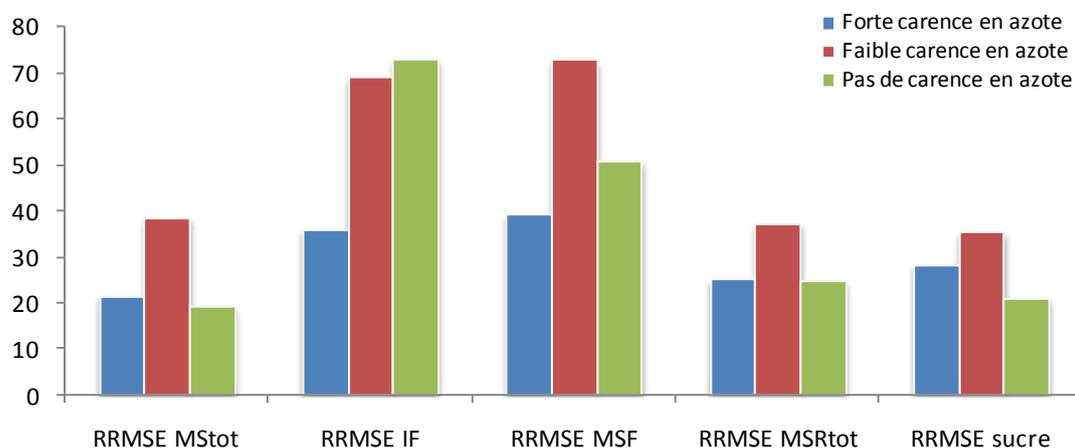


Figure 5-22 : Comparaison des valeurs des RRMSE et d'EF sur l'ensemble des simulations regroupées en trois classes d'INN pour les variables principales du modèle.

Et enfin, la biomasse racinaire totale est bien simulée par le modèle, tout comme pour la biomasse totale, on retrouve de bonnes valeurs de RRMSE et d'EF, avec une valeur globale de RRMSE de 30.15 % et une EF globale de 0.88. Ainsi les valeurs de RRMSE s'étendent de 6.27 % pour la modalité 2002 N1 à 65.68 % pour la modalité 2011 N3, et les valeurs d'EF de 1 pour la modalité 2002 N1 à 0.06 pour la modalité 2011 N3. L'EF reste positive pour toutes les modalités. Comme pour la biomasse totale, l'EF est maximale pour toutes les modalités de 2002, entre 0.99 et 1. La mauvaise estimation de la biomasse foliaire sur la plupart des modalités testées n'a que peu d'impact sur la biomasse racinaire totale.

5.3.3. Le comportement général du modèle selon la nutrition azotée

Pour rendre intelligible le tableau 5-8, nous allons juger la qualité du modèle par classes d'INN, en utilisant comme indice d'évaluation du modèle les RRMSE.

Le modèle ne se comporte pas de la même manière selon l'état de nutrition azotée des plantes. Nous avons pu déterminer trois grandes catégories de statut azoté selon les valeurs moyennes d'INN des différentes modalités calculées à partir des données expérimentales. Ainsi nous considérerons que les modalités avec des INN compris entre 0.5 et 0.7 représentent un état de forte carence en azote, des INN compris entre 0.7 et 0.9 représentent un état de faible carence en azote et des INN compris entre 0.9 et 1.1 représentent des états de nutrition azotée normaux, sans carence. Le positionnement des différentes modalités des essais de validation est indiqué dans le tableau 5-9.

Deux grandes tendances apparaissent en fonction de l'état de nutrition azotée (figure 5-22). Dans le cas de fortes carences en azote, le modèle simule mieux les parties aériennes que sur les autres classes de nutrition azotée, en termes de surface et de biomasse. Ceci était attendu puisque les modalités retrouvées dans cette classe de nutrition azotée correspondent aux témoins sans apport de fertilisant azoté ou à des modalités avec de faibles apports de fertilisant azoté dont les points expérimentaux se situent au plus près de la courbe de référence du paramètre $\%N_{Rmin}$ (figure 5-14) qui détermine l'azote résiduel disponible pour l'élaboration de la surface foliaire et par conséquent de la biomasse aérienne également. On observe la tendance inverse dans les cas de nutrition azotée normale, le modèle simule mieux les parties souterraines, biomasse racinaire et rendement en sucre, ainsi que la biomasse totale de la plante. Ce sont les modalités avec des INN intermédiaires, faiblement carencées en azote, qui rassemblent les plus mauvaises valeurs de RRMSE qui sont donc les moins bien simulées par le modèle.

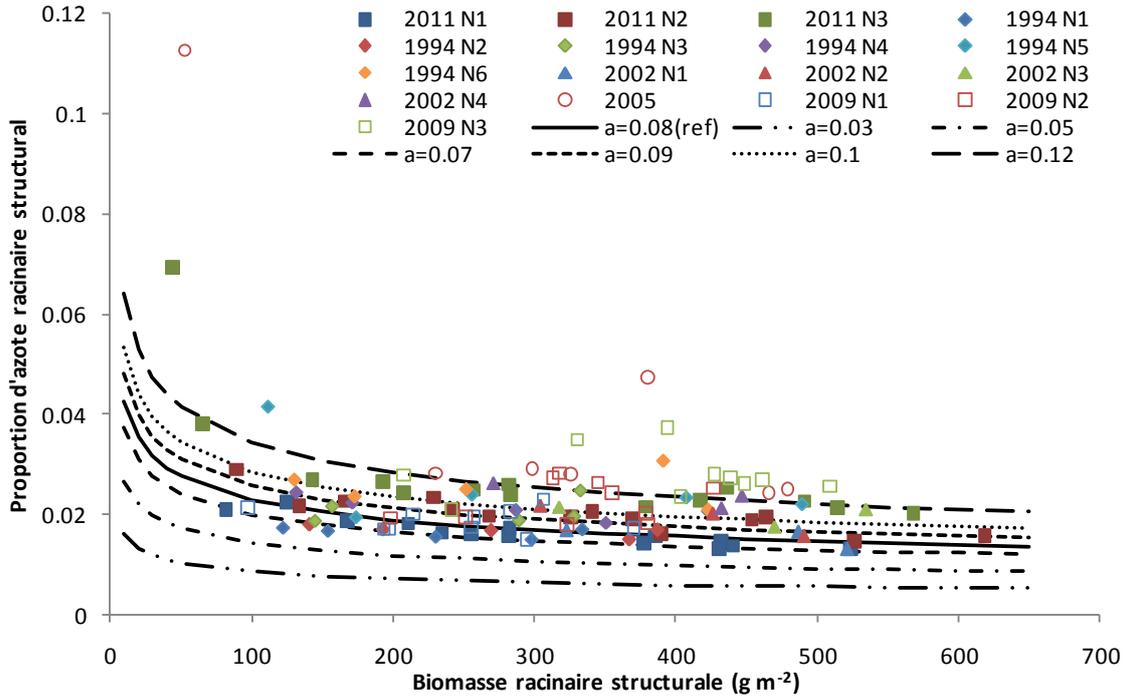


Figure 5-23 : Positionnement des points expérimentaux par rapport aux différentes courbes du paramètre $\%N_{Rmin}$ testées pour l'analyse de sensibilité.

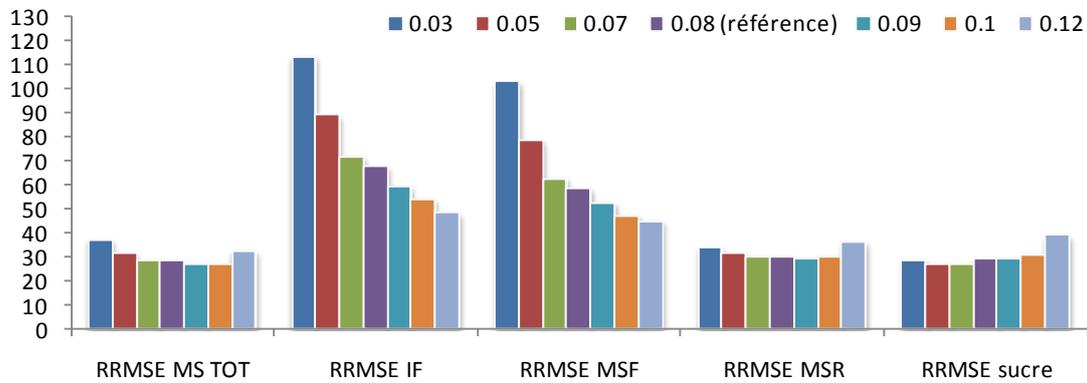


Figure 5-24 : Evolution des valeurs globales de RRMSE (%) issues de toutes les données de validation en fonction de la valeur du paramètre $\%N_{Rmin}$ sur les variables principales du modèle.

5.3.4. Analyse de sensibilité du modèle aux paramètres

Nous avons choisi de réaliser une analyse de sensibilité sur trois des paramètres du modèle : $\%N_{Rmin}$, MSR_{max}^{HS} et K. Nous avons choisi RRMSE comme indicateur de qualité du modèle.

5.3.4.1. La sensibilité du modèle au paramètre teneur minimale en azote dans la biomasse racinaire structurale : $\%N_{Rmin}$

Ce paramètre important qui détermine la croissance de la biomasse racinaire structurale a été approchée sur le régime de nutrition azotée le plus contraignant, N1, de notre année de référence 2010. Or sur les figures 5-13 et 5-14, les points expérimentaux de la modalité N1 de l'année 1994 se situent sous la courbe de référence, sans changer la forme de l'ajustement mais remettant en cause la valeur minimale. Cela nous indique que nous n'avons pas atteint la valeur minimale et que ce paramètre est par conséquent difficile à estimer.

Nous avons donc choisi de faire varier la valeur du paramètre « a » de l'équation autour de sa valeur de référence 0.08, et non le coefficient puissance dans la formule :

$$\%NRmin = a MSR^{HS}_{réel^{-b}}$$

Avec $b = -0.27$.

Nous avons fait varier le paramètre a de +50 % ($a = 0.12$) à -63 % ($a = 0.03$) par rapport à la référence. La gamme de valeurs retrouvée dans les données expérimentales est ainsi représentée (figure 5-23).

La réponse globale du modèle montre que plus on augmente la valeur du paramètre $\%N_{Rmin}$, plus faible est l'erreur de simulation sur les parties aériennes. De $a = 0.03$ à $a = 0.12$, l'erreur diminue de 65 % pour l'indice foliaire et de 58 % pour la biomasse aérienne (figure 5-24). Une augmentation de 50 % de la valeur du paramètre par rapport à la référence diminue l'erreur de simulation de 19 % pour l'indice foliaire et 13 % pour la biomasse aérienne. Une diminution de 63 % de la valeur du paramètre par rapport à la référence augmente l'erreur de 46 % et 44 % sur les mêmes variables respectivement. Concernant les parties souterraines, rendement en racines et en sucre, et la biomasse totale, la variation de la réponse du modèle est plus modérée quand le paramètre $\%N_{Rmin}$ varie (figure 5-24). Ainsi la variation maximale de l'erreur est de 9 % par rapport à la référence sur la biomasse totale et le sucre, et de 6 % pour la biomasse racinaire. Si nous retenons la variable sucre, c'est la valeur du paramètre avec $a = 0.07$ qui offre les meilleures performances du modèle.

La réponse du modèle en fonction des classes d'INN (tableau 5-9) montre pour la classe faiblement carencée en azote un comportement identique pour presque toutes

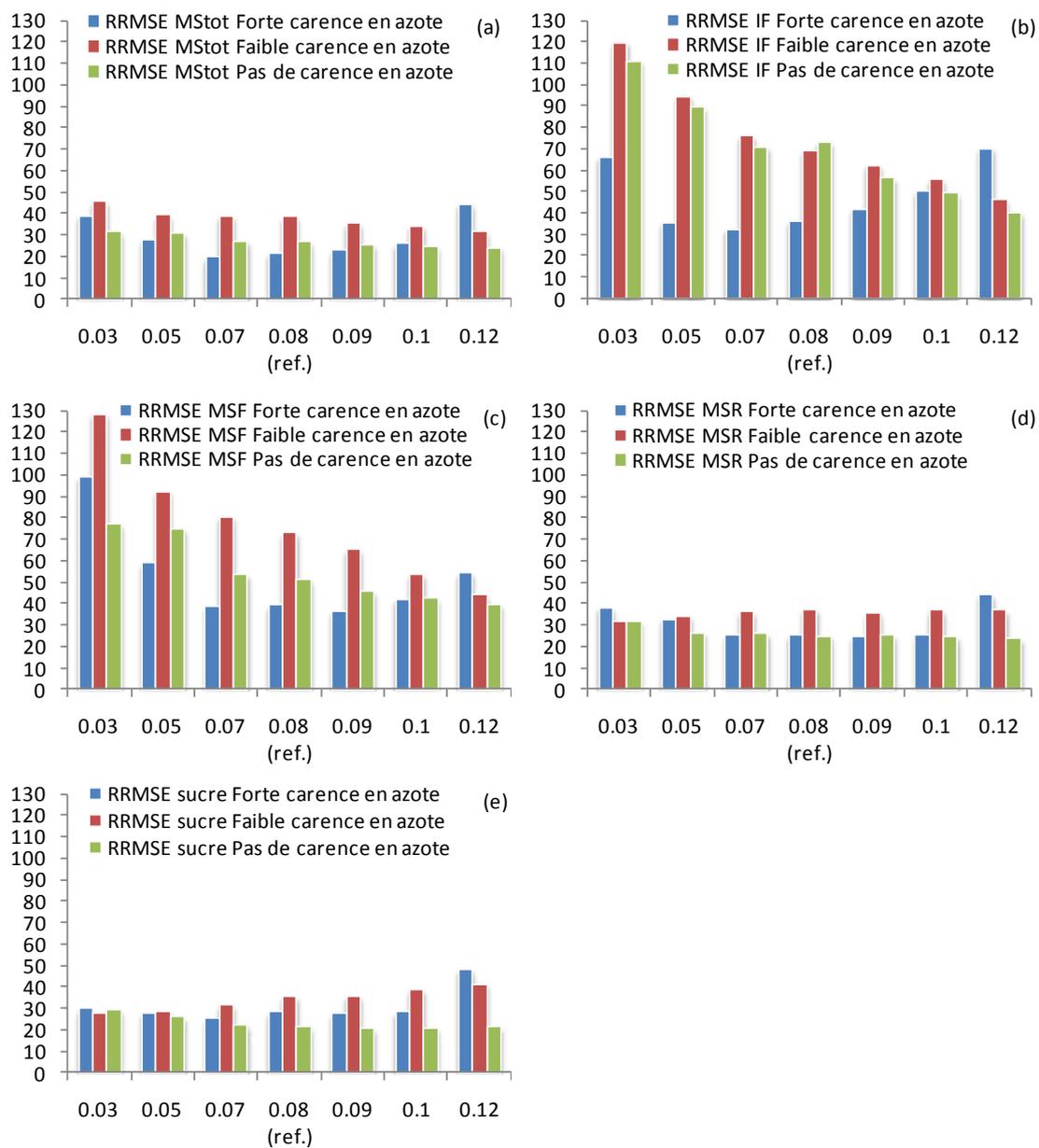


Figure 5-25 : Evolution des valeurs de RRMSE (%) issues de toutes les données de validation classées par gamme d'INN en fonction de la valeur du paramètre $\%N_{Rmin}$ sur les variables principales du modèle : la biomasse totale (a), l'indice foliaire (b), la biomasse aérienne (c), la biomasse racinaire (d) et le sucre (e).

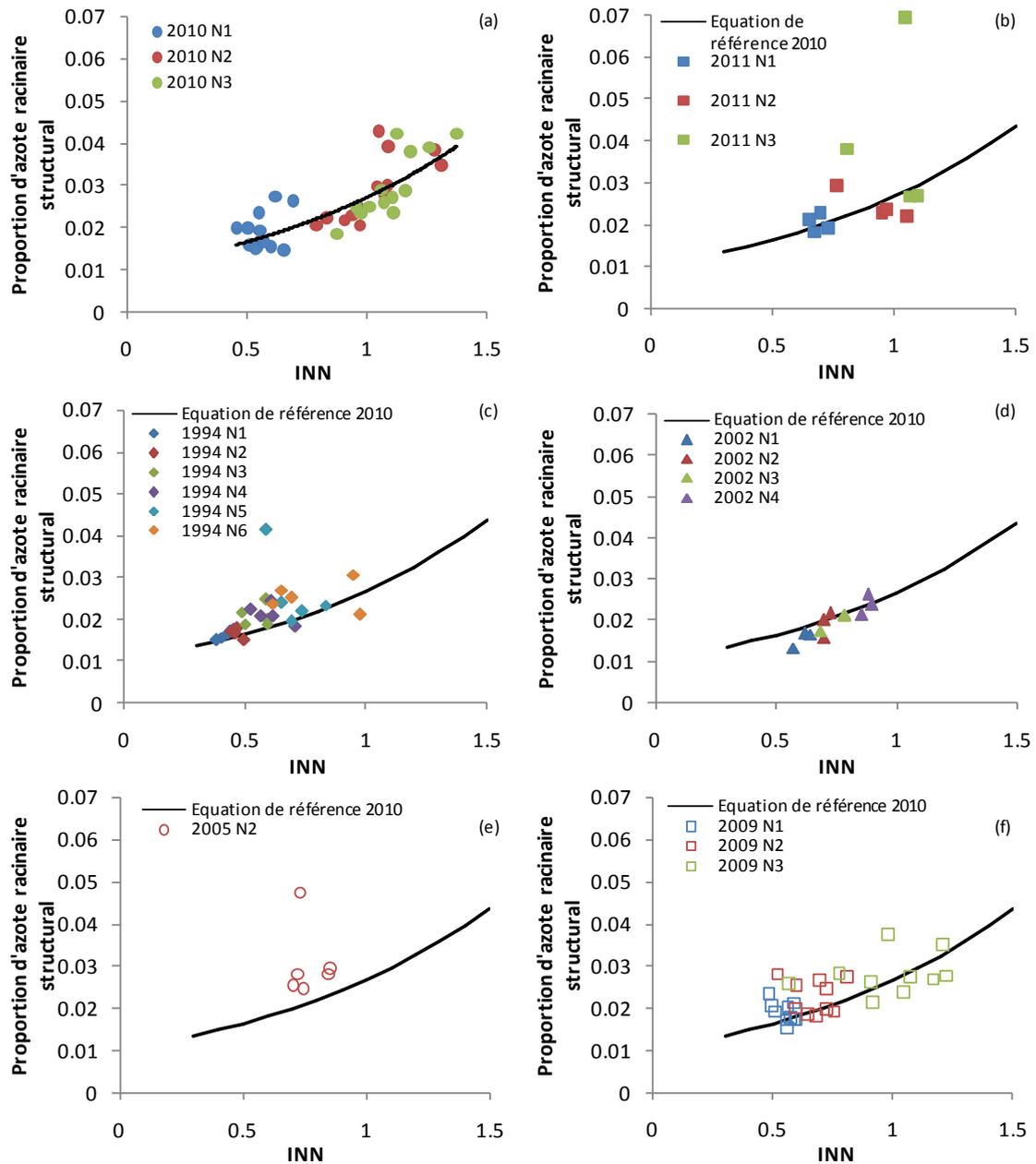


Figure 5-26 : Variations de la proportion d'azote dans la biomasse racinaire structurale en fonction de l'INN en 2010 (a), 2011 (b), 1994 (c), 2002 (d), 2005 (e) et 2009 (f). L'équation de référence en 2010 est : $y = 0.010 e^{(0.981 \text{ INN})}$, $R^2 = 0.67$.

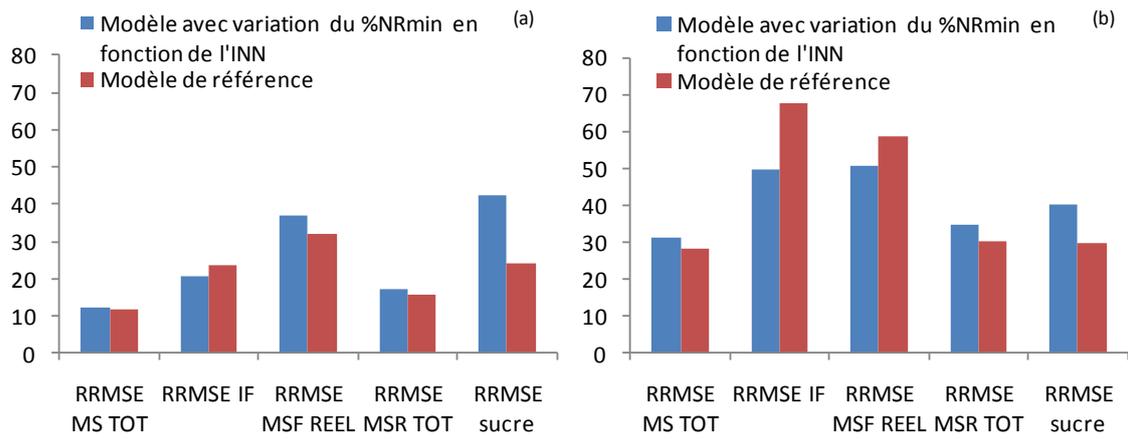


Figure 5-27 : Comparaison des valeurs des RRMSE (%) sur les données de calibration du modèle (2010) (a) et sur les données de validation du modèle (b) sur les variables principales pour les deux modes de calcul du paramètre $\%N_{Rmin}$.

les valeurs du paramètre hormis les extrêmes ($a = 0.03$ et $a = 0.12$), avec les plus mauvaises valeurs de RRMSE sur toutes les variables étudiées (figure 5-25). Les plus grandes variations de RRMSE sur les 3 classes d'INN liées à la variation du paramètre se retrouvent toujours sur les parties aériennes, sur la surface foliaire et la biomasse. Les valeurs de RRMSE de la biomasse totale et des parties souterraines sont peu impactées.

Pour la classe fortement carencée en azote, l'augmentation de 50 % de la valeur du paramètre ($a = 0.12$) conduit à une augmentation de 34 % de la valeur du RRMSE de l'indice foliaire de 15 % pour la biomasse aérienne. Si le paramètre diminue de 63 % ($a = 0.03$), les RRMSE augmentent de 30 % et 60 % respectivement sur ces mêmes variables. Pour les deux autres classes d'INN, plus la valeur du paramètre augmente, plus la valeur des RRMSE diminue sur les variables aériennes.

Les variables biomasse totale, biomasse racinaire et sucre sont peu sensibles à une variation de la valeur du paramètre. La plus grande variation est retrouvée sur la classe fortement carencée en azote, avec une variation maximale du RRMSE de 23 % sur ces variables. Pour les deux autres classes d'INN, la variation maximale retrouvée est seulement de 8 %.

Si nous nous focalisons sur le rendement en sucre, chaque classe d'INN présente une valeur différente du paramètre pour obtenir l'erreur la plus faible. Ainsi la classe fortement carencée en azote présente la meilleure simulation du rendement en sucre avec la valeur $a = 0.07$, ce qui est un peu plus faible que la valeur de référence utilisée dans le modèle. Pour la classe faiblement carencée en azote, c'est la valeur $a = 0.03$ qui permet d'obtenir la meilleure simulation du rendement en sucre, or c'est également cette valeur de paramètre qui a les plus mauvaises valeurs de RRMSE sur les variables biomasse totale, biomasse aérienne et indice foliaire. Pour la classe non carencée en azote, c'est la valeur $a = 0.1$ qui permet d'obtenir la meilleure simulation du rendement en sucre. C'est d'ailleurs avec les plus fortes valeurs du paramètre, $a = 0.12$ et/ou $a = 0.1$ que le modèle présente les meilleures performances pour toutes les variables étudiées pour cette classe d'INN.

Les variations de la valeur optimale du paramètre obtenues selon les classes d'INN montrent qu'il aurait pu être judicieux de le faire varier dans le modèle en fonction de l'INN. Nous avons réalisé ce test, en prenant comme valeur de paramètre l'équation obtenue sur les données de calibration de l'année 2010 (figure 5-26 a). Les données de validation se superposent bien sur cette courbe de référence (figure 5-26 b à f). Les valeurs des RRMSE sur les données de calibration du modèle (figure 5-27 a) et sur les données de validation (figure 5-27 b) montrent que la simulation de l'indice foliaire est améliorée quand on prend en compte l'INN dans le calcul du paramètre $\%N_{Rmin}$, les RRMSE sont alors plus faibles. En revanche toutes les autres variables sont moins bien simulées. Ces résultats ne remettent donc pas en cause notre mode de calcul du paramètre.

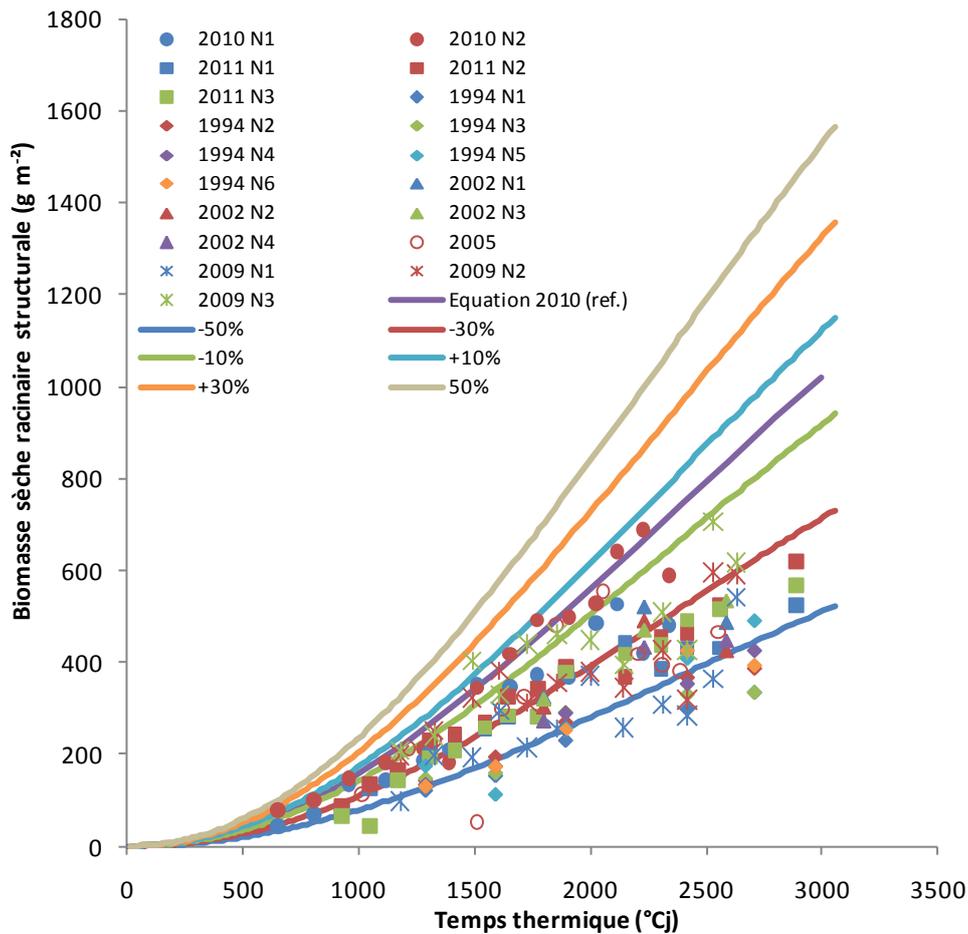


Figure 5-28 : Positionnement des points expérimentaux par rapport aux différentes courbes du paramètre MSR^{HS}_{max} testées pour l'analyse de sensibilité.

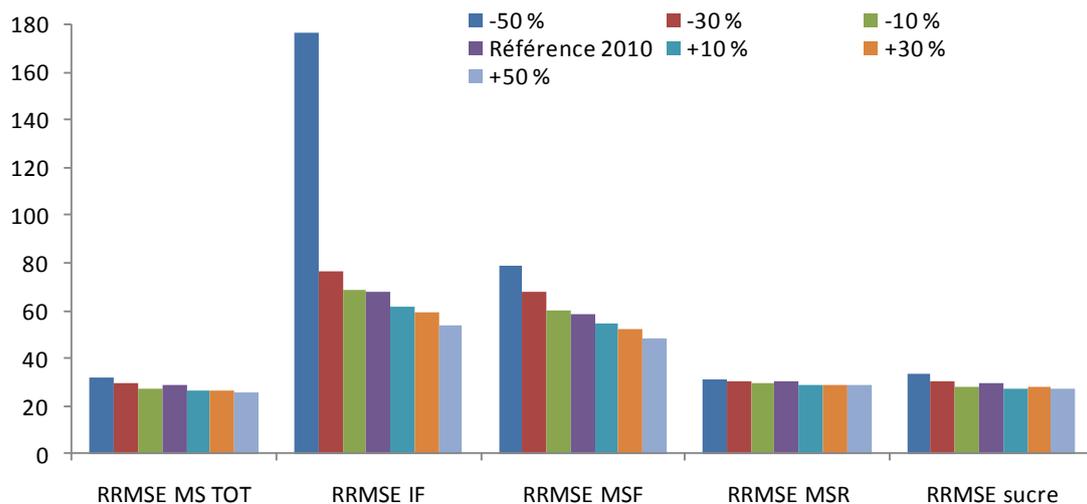


Figure 5-29 : Evolution des valeurs globales de RRMSE (%) issues de toutes les données de validation en fonction de la valeur du paramètre MSR^{HS}_{max} sur les variables principales du modèle.

5.3.4.2. La sensibilité du modèle au paramètre biomasse racinaire structurale maximale : MSR^{HS}_{max}

Ce paramètre qui détermine la croissance racinaire structurale maximale intervient dans le modèle pour limiter la croissance de la racine quand l'azote et/ou le carbone disponible sont excédentaires.

Nous avons choisi de faire varier la valeur de ce paramètre de -50 % à +50 %, le positionnement des points expérimentaux des différentes modalités est représenté sur la figure 5-28. Nous remarquons encore que ce sont les variables des parties aériennes, indice foliaire et biomasse aérienne, qui présentent la plus grande variation de RRMSE avec la variation du paramètre, comme c'était déjà le cas avec le paramètre $\%N_{Rmin}$ (figure 5-29). Il y a une très forte variation de la valeur du RRMSE de l'indice foliaire avec la valeur la plus extrême du paramètre (-50 %) qui augmente de 109 % par rapport à la référence. Cette valeur mise à part, on ne dépasse pas les 20 % de variation du RRMSE par rapport à la référence pour les variables d'indice foliaire et de biomasse aérienne. La variation du paramètre n'a que très peu d'impact sur les parties souterraines et la biomasse totale, avec une variation maximale des RRMSE de seulement 3 %.

Les résultats de simulation du modèle sont améliorés quand la valeur du paramètre augmente, ainsi pour toutes les variables hormis le sucre, la meilleure valeur de paramètre correspond à sa plus forte valeur testée, +50 % par rapport à la référence, et pour le rendement en sucre c'est avec 10 % d'augmentation par rapport à la référence que l'on obtient les meilleurs résultats, mais les valeurs de RRMSE sont extrêmement proches entre une augmentation de 10 % ou de 50 % de la valeur du paramètre avec seulement 0.25 % de différence entre les RRMSE.

Quand on étudie la réponse du modèle en fonction des classes d'INN, on retrouve le même comportement que précédemment pour la classe des INN moyens, avec les plus mauvaises valeurs de RRMSE sur toutes les variables étudiées, hormis l'indice foliaire (figure 5-30). Les plus grandes variations de RRMSE sur les 3 classes d'INN liées à la variation du paramètre se retrouvent toujours sur les parties aériennes, sur la surface foliaire et la biomasse. Les valeurs de RRMSE de la biomasse totale et des parties souterraines ne sont que peu impactées.

Pour la classe d'INN faibles, en se positionnant par rapport à la référence, si on augmente la valeur du paramètre de 50 %, on augmente la valeur du RRMSE de l'indice foliaire de 46 % et celui de la biomasse aérienne de 37 %. Si on diminue le paramètre de 50 %, on augmente les RRMSE de 300 % et 57 % respectivement sur ces mêmes variables. Pour les deux autres classes d'INN, plus on augmente la valeur du paramètre, plus on diminue la valeur des RRMSE sur les variables aériennes.

Les variables biomasse totale, biomasse racinaire et sucre sont peu sensibles à une variation de la valeur du paramètre. La plus grande variation est retrouvée sur la

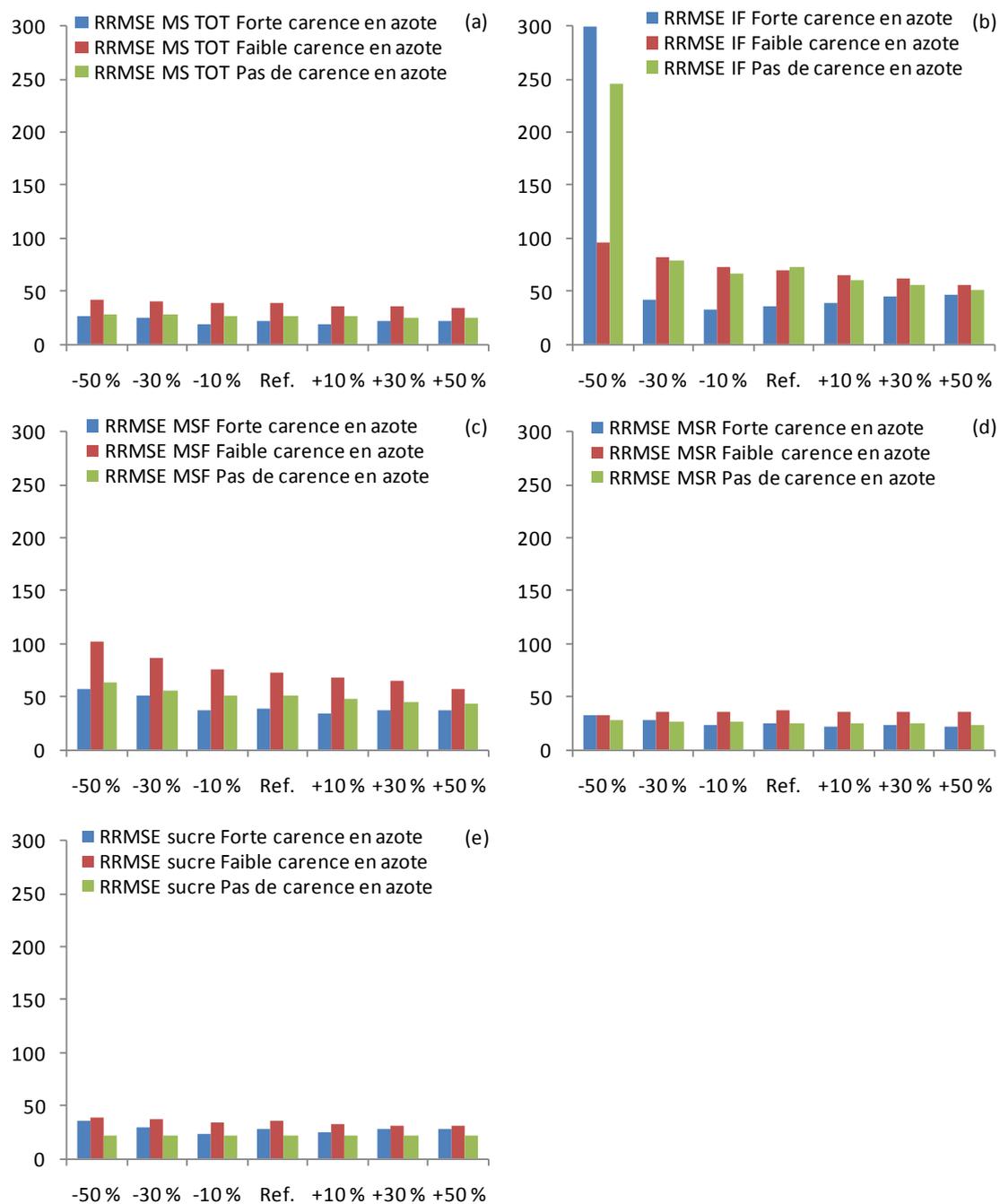


Figure 5-30 : Evolution des valeurs de RRMSE issues de toutes les données de validation classées par gamme d'INN en fonction de la valeur du paramètre MSR^{HS}_{max} sur les variables du modèle : l'indice foliaire (a), la biomasse totale (b), la biomasse aérienne (c), la biomasse racinaire (d) et le sucre (e).

classe d'INN faibles, avec une variation maximale de 7 % du RRMSE sur ces variables. Pour les deux autres classes d'INN, la variation maximale retrouvée est seulement de 4% pour la classe d'INN moyens et 3 % pour la classe d'INN forts.

Si nous nous focalisons sur la variable du sucre, on distingue deux tendances sur la valeur du paramètre pour obtenir l'erreur la plus faible. Ainsi la classe d'INN faible présente la meilleure simulation du rendement en sucre avec une diminution de 10% du paramètre. Pour les classes d'INN moyens et forts, c'est une augmentation de 50 % de la valeur du paramètre qui permet d'obtenir la meilleure simulation du rendement en sucre, c'est également cette valeur de paramètre qui permet d'avoir les meilleures simulations sur toutes les autres variables étudiées.

5.3.4.3. La sensibilité du modèle au paramètre « K »

Ce paramètre n'a pas été calculé à partir des données expérimentales. Nous avons donc choisi de le fixer dans le modèle à la valeur de 0.7 à partir des travaux de deux auteurs : Hodanova (1972) et Andrieu et al. (1997). Néanmoins ce paramètre semble variable car selon les travaux de Martin (1986), la valeur de K serait de 0.6. Le coefficient d'extinction est fortement dépendant des variétés qui peuvent présenter des ports de feuilles différents, plus ou moins dressés.

Nous avons choisi de faire varier la valeur de ce paramètre de -14 % à +14 %, avec des valeurs de K égales à 0.6, 0.65, 0.7 (la référence), 0.75 et 0.8. Cela nous permet de confronter la valeur de K = 0.6 retrouvée par Martin (1986), ainsi que des valeurs plus élevées. Nous remarquons encore que ce sont les variables des parties aériennes, indice foliaire et biomasse aérienne, qui présentent la plus grande variation de RRMSE avec la variation du paramètre, comme c'était déjà le cas avec les paramètres analysés précédemment (figure 5-31). Néanmoins, cette variation reste modérée par rapports à celles observées sur les autres paramètres. La variation maximale est retrouvée sur l'indice foliaire avec lors d'une diminution de 14 % de la valeur du paramètre, une diminution de 14 % du RRMSE. Concernant la biomasse aérienne, une diminution de 14 % de la valeur du paramètre provoque une diminution de 8% de la valeur du RRMSE. La variation du paramètre n'a que très peu d'impact sur les parties souterraines et la biomasse totale, avec une variation maximale des RRMSE de seulement 3 % dans la gamme de variation du paramètre. Les valeurs de RRMSE de toutes les variables étudiées diminuent avec la diminution du paramètre, les meilleures simulations sont donc obtenues avec la valeur K = 0.6.

Comme ce paramètre est censé être fortement lié aux variétés et représenter la géométrie de leur couvert, la valeur optimale du paramètre devrait varier entre nos différentes expérimentations. A dire d'expert (ITB), le classement des variétés utilisées dans les expérimentations est comme suit : les variétés Python et Radar présentent des feuilles le port foliaire le plus étalé, les variétés Laser et Carissima ont un port foliaire intermédiaire et la variété Veronica a un port foliaire dressé. Pour déterminer l'effet

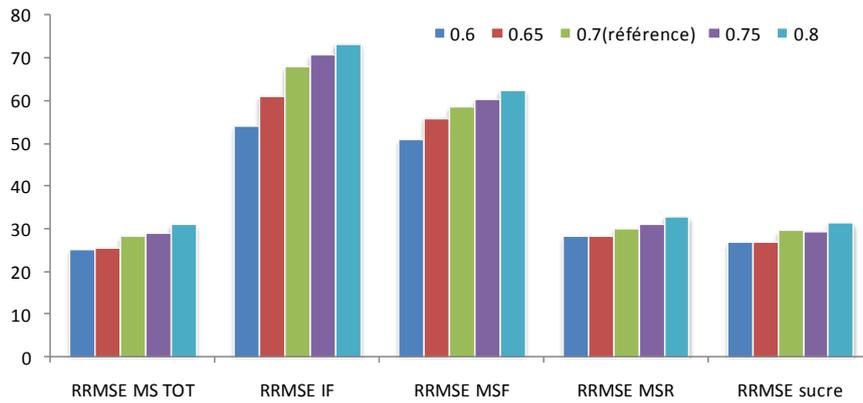


Figure 5-31 : Evolution des valeurs globales de RRMSE (%) issues de toutes les données de validation en fonction de la valeur du paramètre K sur les variables principales du modèle.

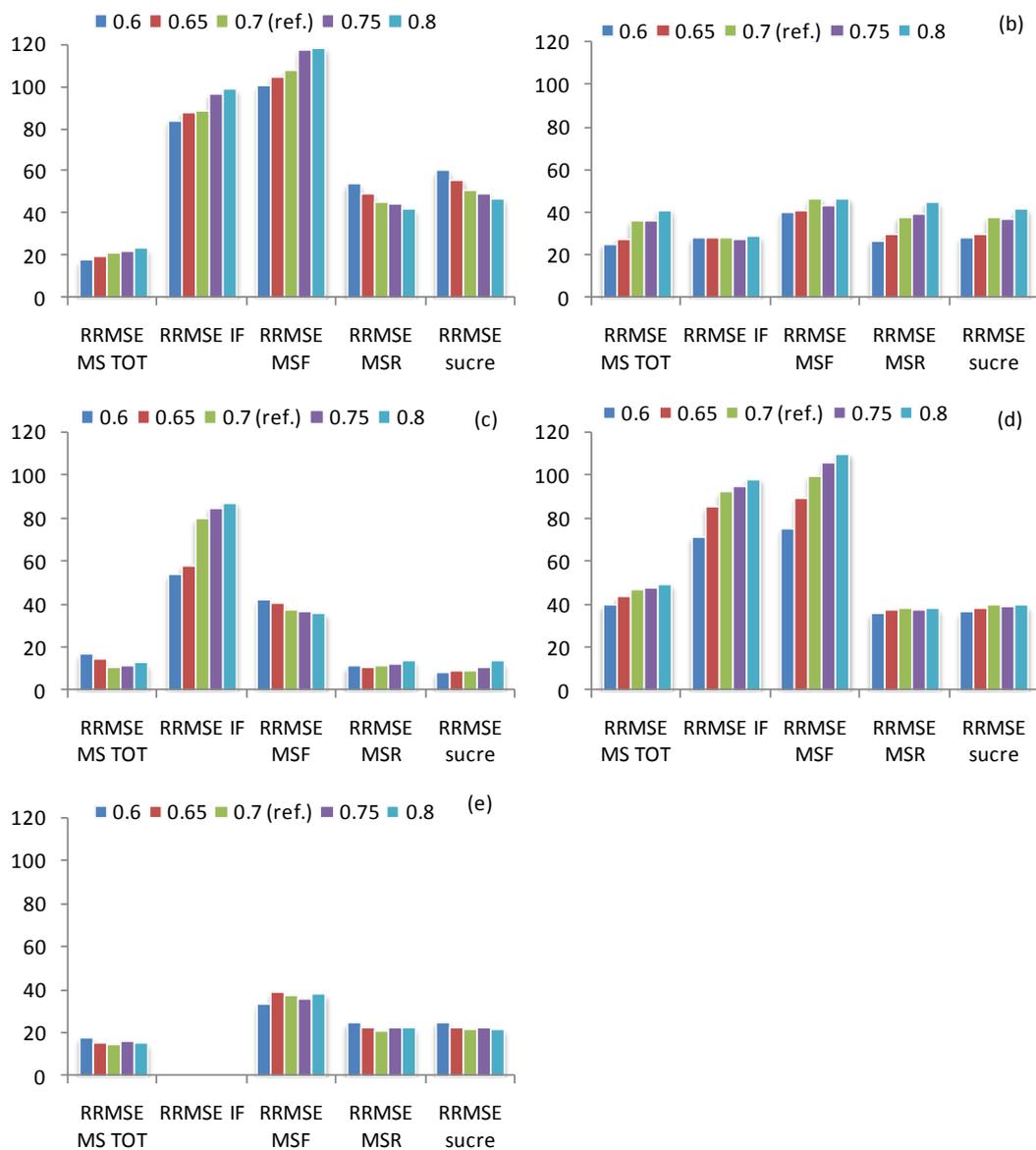


Figure 5-32 : Evolution des valeurs de RRMSE (%) issues de toutes les données de validation classées par variété en fonction de la valeur du paramètre K sur les variables principales du modèle. Variété Python en 2011 (a), variété Laser en 1994 (b), variété Véronica en 2002 (c), variété Radar en 2005 (d) et variété Carissima en 2009.

variétal dans le modèle, nous nous focaliserons sur l'étude de l'indice foliaire en réponse à des variations de la valeur de K (figure 5-32). Nous ne pouvons donc pas étudier la variété Carissima de l'année 2009 puisque nous ne disposons pas de l'indice foliaire sur cette expérimentation. Pour les variétés Python (2011), Veronica (2002) et Radar (2005), la meilleure simulation de l'indice foliaire par le modèle est obtenue avec la plus petite valeur de K testée, 0.6. Pour la variété Laser (1994), c'est avec une valeur de K de 0.75 que l'on obtient la meilleure simulation de l'indice foliaire. Par contre ce ne sont pas avec ces mêmes valeurs de paramètre que l'on obtient la meilleure simulation du rendement en sucre. Il n'est donc pas possible de retrouver directement avec le modèle le classement des variétés selon leur port foliaire, représenté par le paramètre K .

6.^{EME} PARTIE : DISCUSSION

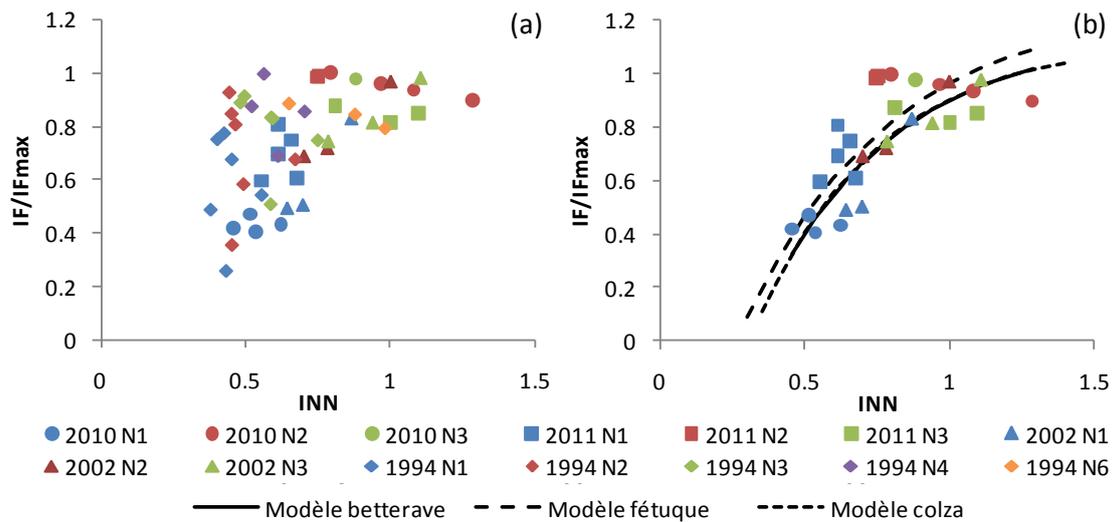


Figure 6-1 : Relation entre l'indice foliaire relatif, IF/IF_{max} et l'INN pour toutes les modalités (a) et comparaison du modèle betterave avec les modèles de la fétuque (Bélanger, Gastal, & Lemaire, 1992) et du colza (Colnenne, Meynard, Roche, & Reau, 2002) (b). L'équation du modèle betterave est : $IF/IF_{max} = 1.16 - 1.89 \exp^{-2.12 INN}$, $R^2 = 0.82$. L'équation du modèle fétuque est : $IF/IF_{max} = 1.27 (1 - 1.65 \exp^{-1.92 INN})$, $R^2 = 0.89$. Et celle du modèle colza est : $IF/IF_{max} = 1.13 - 2.3 \exp^{-2.31 INN}$, $R^2 = 0.53$.

6.1. Le comportement de la betterave sous l'effet de la nutrition azotée : une plante en C3

6.1.1. Courbe critique de l'azote de la betterave

La courbe critique de l'azote chez la betterave n'a pas été établie jusqu'à présent. La démarche entreprise au cours de ce travail de thèse d'en estimer les paramètres sur les modalités 2010 N2 et 2011 N2 (partie « 5.1.1 » des résultats) se révèle intéressante. Ils correspondent aux valeurs communément trouvées pour des plantes en C3 (tableau 2-1) :

$$N = 4.5 W^{-0.33}$$

La faiblesse de cette référence réside dans le fait que les données qui en sont à l'origine n'avaient pas été construites *a priori* pour obtenir ce résultat. En effet, la construction de la courbe critique suppose de nombreux points de mesures avec une gamme étendue de nutriments azotés pour obtenir une bonne précision sur le point minimal de fertilisation à partir duquel il n'y a plus de gain de croissance en biomasse. Les trois niveaux de nutrition azotée que nous avons utilisés au cours de nos expérimentations ne permettent pas cette précision, et le problème de grêle de l'année 2011 affaiblissent le résultat obtenu. L'analyse de sensibilité pour le coefficient a (4.5 ici) reste à faire, le coefficient b (0.33 ici) étant connu pour être très robuste entre espèces.

6.1.2. La réponse de la surface foliaire à la nutrition azotée

Cependant, et pour donner du poids à la relation précédente, nous avons analysé les effets de l'azote sur l'indice foliaire en valeurs relatives. IF/IFmax correspond au ratio entre l'indice foliaire de chaque traitement et le maximum d'indice foliaire mesuré au même moment. Nous avons pris comme IFmax le plus fort indice foliaire d'une date donnée pour toutes les modalités azotées de chaque essai. En utilisant la méthodologie de Bélanger et al. (1992) pour la fétuque, nous avons relié l'évolution de l'IF/IFmax avec l'INN (figure 6-1 a). Plus importante est la déficience en azote, plus faible est le ratio IF/IFmax. Les modalités de l'essai mené en 1994 ne se superposent pas bien à celles des autres essais, révélant ainsi un problème de croissance sur cet essai. La surface foliaire maximale atteinte par les plantes y est très faible, ce qui est aussi le cas pour les biomasses totales, aériennes et racinaires (figures 5-3 à 5-10). Cette faiblesse est sans doute due aux conditions climatiques de l'année 1994, la grêle et le stress hydrique survenus en cours de végétation ont pu fortement impacter l'indice foliaire.

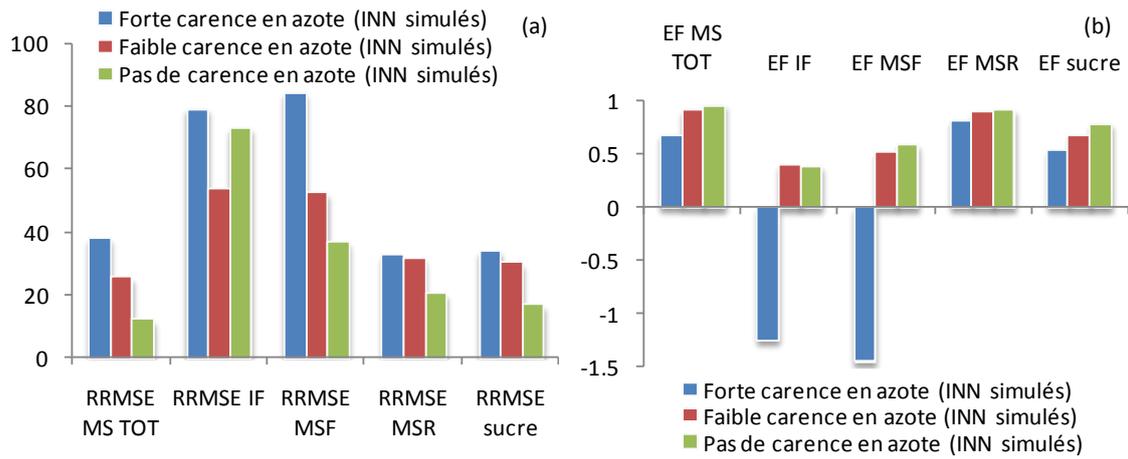


Figure 6-2 : Comportement du modèle en fonction des classes d'INN obtenues à partir des INN simulés par le modèle, évolution des RRMSE (%) (a) et de l'EF (b).

Avec toutes les données hormis celles de 1994, la relation entre IF/IFmax et l'INN est très proche de celle obtenue par Bélanger et al. (1992) pour la fétuque et de Colnenne et al. (2002) pour le colza, plantes en C3, donnant une bonne crédibilité à la courbe critique obtenue précédemment (figure 6-1 b).

6.2. La qualité des simulations du modèle

6.2.1. Le comportement du modèle en fonction des classes d'INN

Le modèle simule bien les classes d'INN extrêmes, il n'y a pas de défaut majeur pour les fortes carences en azote et les bonnes nutrition azotées. Mais les faibles carences en azote, avec des INN situés entre 0.7 et 0.9, présentent de plus forts RRMSE pour toutes les variables du modèle mis à part l'indice foliaire (figure 5-22).

Ce phénomène pourrait s'expliquer par la différence de valeur entre l'INN moyen issu des données expérimentales et celui issu du modèle. En effet, les INN moyens calculés à partir des données simulées ne se classeraient pas de la même manière au sein des trois classes formulées (tableau 5-9). Les INN moyens simulés étant toujours plus faibles que les INN moyens issus des données expérimentales, sauf sur la modalité 2009 N2 où l'INN moyen est plus élevé. Ainsi avec ces résultats, il n'y a plus que deux modalités qui se situent dans la classe d'INN les plus élevés, entre 0.9 et 1.1, ce sont les modalités 2002 N4 et 2009 N3. Et les modalités 1994 N3 et 2005 passent de la classe des faibles carences en azote à celle des fortes carences en azote. L'évaluation du modèle avec ces nouvelles classes d'INN montre une continuité dans le modèle avec une diminution des RRMSE depuis les plus faibles niveaux de nutrition azotée vers les plus élevés sur toutes les variables du modèle sauf l'indice foliaire (figure 6-2 a). On observe la même tendance pour l'EF avec une augmentation de l'EF depuis les plus faibles niveaux de nutrition azotée vers les plus élevés sur toutes les variables hormis l'indice foliaire (figure 6-2 b). Ce résultat sur l'indice foliaire peut être dû au fait qu'il n'y ait que la modalité 2002 N4 qui détermine la valeur sur l'indice foliaire, la modalité 2009 N3 ne disposant pas de mesures de l'indice foliaire. N'avoir qu'une seule modalité pour caractériser la réponse du modèle à une forte nutrition azotée est trop faible.

Les règles de répartition de la biomasse dans le modèle sont aussi impactées par l'état de nutrition azotée des plantes. Ainsi la succession des variables racinaires limitant la croissance structurale au cours du temps présente des profils différents selon la classe d'INN (tableau 6-1 et annexe 2). Au début de la croissance, jusqu'à 100°Cj environ, la croissance racinaire structurale est limitée par l'azote ($\Delta\text{MSR}_{\text{pot}}^{\text{HS}}$) quelle que soit la classe d'INN. Puis jusqu'à 1000°Cj c'est le carbone ($\Delta\text{MSR}_{\text{tot}}$) qui devient limitant pour toutes les classes d'INN, ce phénomène est sûrement induit par la forte

Tableau 6-1 : Succession des variables racinaires impliquées dans la limitation de la croissance racinaire structurale en fonction des classes d'INN. N : limitation par l'azote (ΔMSR_{pot}^{HS}), C : limitation par le carbone (ΔMSR_{tot}) et M : limitation par le maximum morphogénétique (ΔMSR_{max}^{HS}).

Période (°Cj)	Classe d'INN fortement carencée en azote	Classe d'INN faiblement carencée en azote	Classe d'INN non carencée en azote
0 à 100	N	N	N
100 à 500	C	C	C
500 à 1000	C et M	C et M	C (M)
1000 à 1500	N	N (M)	M (N)
1500 à 2500	N	N	N (M)
2500 à 3000	N	N et M	M

croissance des feuilles. Ensuite, c'est le carbone et le maximum morphogénétique ($\Delta\text{MSR}_{\text{max}}^{\text{HS}}$) qui sont limitants jusqu'à 1000°Cj. Au cours de la quatrième période, jusqu'à 1500°Cj, les profils divergent en fonction de l'état de nutrition azoté des plantes, c'est plutôt l'azote qui est limitant pour les classes carencées en azote, et le maximum morphogénétique pour les classes non carencées en azote où la disponibilité en azote permet une croissance optimale. L'azote va rester limitant jusqu'à la fin de la croissance pour les classes carencées en azote, bien que pour les faibles carences, certaines modalités atteignent le maximum morphogénétique. Pour la classe non carencée en azote, on note entre 1500 et 2500°Cj une limitation par l'azote retrouvée sur une majorité de modalités avant de retomber sur une limitation par le maximum morphogénétique à partir de 2500°Cj et jusqu'à la fin de la croissance. C'est un phénomène assez inattendu, nous ne savons pas pourquoi c'est l'azote qui est limitant entre 1500 et 2500°Cj alors que cette classe regroupe des modalités non carencées en azote dont les racines, prioritaires pour l'azote, devraient en prélever en suffisance.

6.2.2. La simulation des variables du modèle

La biomasse totale est très bien simulée par le modèle sur une plage d'INN contrastés avec un RRMSE global de 28.41 % et une EF de 0.87 (tableau 5-8) qui correspondent à la meilleure combinaison d'indices pour l'évaluation du modèle que l'on retrouve sur l'ensemble des variables.

En revanche, l'indice foliaire et la biomasse aérienne sont moins bien simulés par le modèle, et sont particulièrement surestimés à fort niveau de fertilisation azotée. Une hypothèse pour expliquer ce phénomène pourrait être la sénescence des feuilles. L'écart observé pour l'indice foliaire et la biomasse aérienne pourrait correspondre à la sénescence des feuilles, prise en compte dans le modèle mais pas dans la mesure de l'indice foliaire expérimental, les feuilles sénescentes se séparant de la plante. En 2010 la surface des feuilles perdues par sénescence a été estimée. La figure 6-3 montre que les valeurs simulées n'atteignent pas les valeurs d'indices foliaires observés lorsque la sénescence est prise en compte. Il est possible que cela provienne du fait que l'azote restitué par les feuilles sénescentes n'est pas uniquement dédié à la construction de l'indice foliaire et de la croissance aérienne, ce qui pourrait être une hypothèse plausible, mais est remis dans le pool commun d'azote. Ainsi pendant la période de sénescence des feuilles, la croissance de la racine est telle que l'azote remobilisé par la sénescence ne profite pas aux feuilles, et crée donc cet aspect de plateau sur les simulations de l'indice foliaire dans le modèle. La biomasse aérienne étant directement reliée à l'indice foliaire il est logique de la sous estimer également. Il aurait donc été intéressant d'intégrer dans le modèle la quantité d'azote libérée par la sénescence des

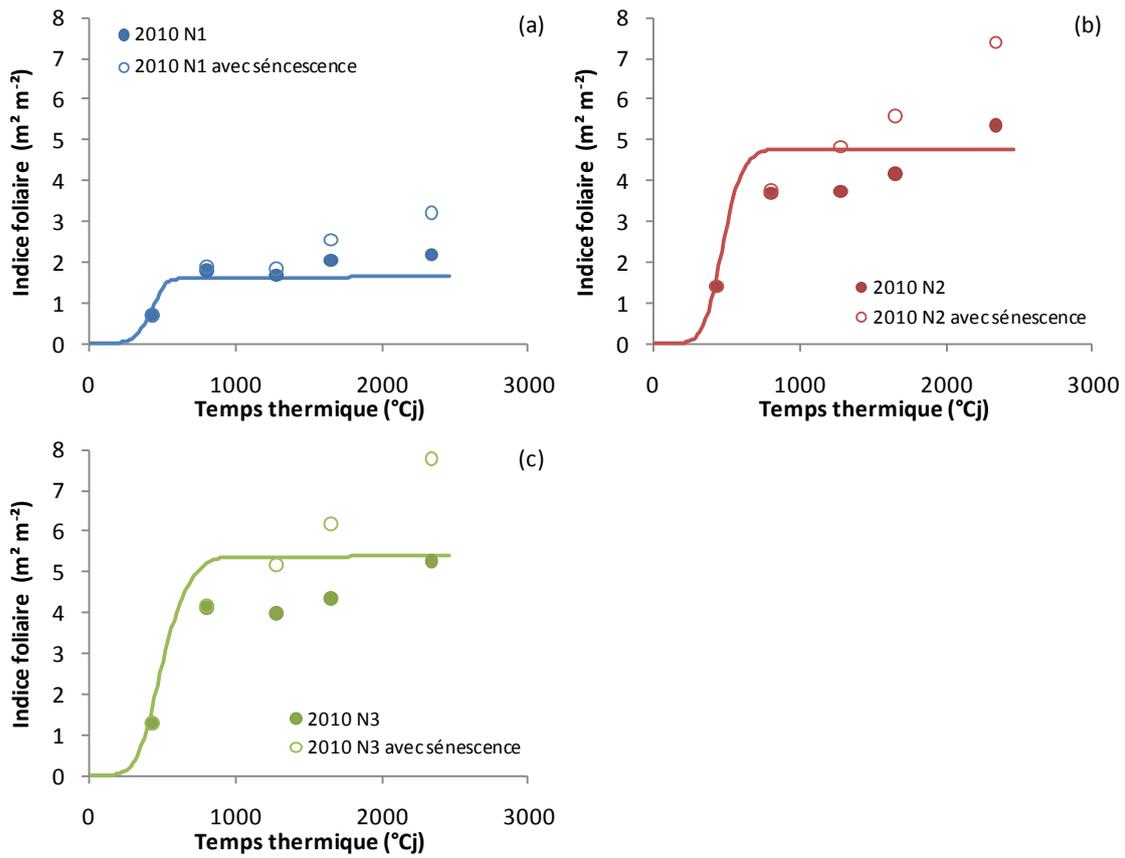


Figure 6-3 : Positionnement de la sénescence par rapport aux simulations du modèle en 2010 sur les modalités N1 (a), N2 (b) et N3 (c).

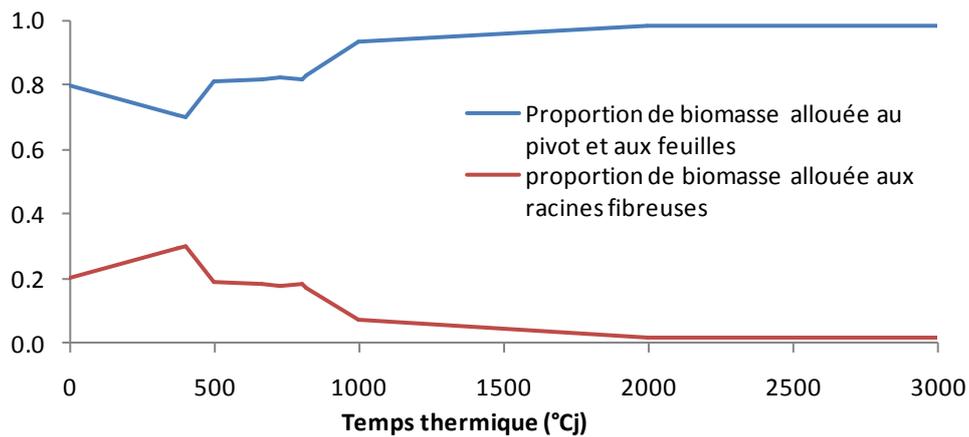


Figure 6-4 : Evolution de la proportion de la biomasse totale qui est allouée au pivot et aux feuilles et de la proportion de biomasse totale qui est allouée aux racines fibreuses dans le modèle SUCROS (Spitters, van Keulen, & van Kraalingen, 1989).

feuilles, avec une priorité à la construction d'une surface supplémentaire selon les mêmes hypothèses.

La biomasse aérienne est également impactée par la valeur du paramètre LMA. Celui-ci est peu différent entre traitements azotés alors que l'on constate souvent ce phénomène chez d'autres plantes à cause de l'accumulation de sucre dans les feuilles. Chez la betterave, il semble normal que le LMA varie peu car tout le sucre produit est déversé dans le pivot, même en cas de stress azoté.

La biomasse racinaire et le rendement en sucre sont quant à eux bien simulés par le modèle. Ces bons résultats sont dus au fait que malgré des indices foliaires simulés plus faibles que les données expérimentales l'interception du rayonnement est peu sensible à leur valeur à partir d'un certain seuil, rapidement atteint par la culture. Pour ce qui est de la répartition de la biomasse totale entre les compartiments aérien et racinaire, l'erreur observée sur la biomasse aérienne n'impacte que peu la biomasse racinaire car nous sommes dans des ordres de grandeur complètement différents, avec par exemple à la récolte une biomasse racinaire 3.5 fois supérieure à la biomasse aérienne pour la modalité N2 2010.

6.2.3. Incorporation des racines fibreuses non récoltées dans le modèle

Lors des prélèvements des plantes, sur tous les essais, la partie souterraine récoltée était principalement constituée du pivot et de quelques morceaux de racines fibreuses attenantes. Il restait donc dans le sol une grande quantité de racines fibreuses que nous ne prenons pas en compte dans le modèle. Pour tenter d'approcher cette quantité de biomasse racinaire restant dans le sol, nous avons utilisé les règles de répartition de la biomasse issues du modèle SUCROS (figure 6-4). Ainsi nous avons recalculé les valeurs des variables issues des données expérimentales de l'année 2010 en ajoutant les quantités de biomasse racinaire structurale ainsi obtenues aux données expérimentales de biomasse totale, biomasse racinaire totale et biomasse racinaire structurale. Nous avons également recalculé les valeurs des paramètres impactés par ce changement : la RUE et la MSR_{max}^{HS} . Les simulations ont été recalculées pour l'année de calibration (2010) et les indices de la qualité du modèle recalculés pour estimer l'effet de l'inclusion des racines fibreuses.

L'inclusion des racines fibreuses ne change pas les valeurs de RRMSE de manière importante (figure 6-5). Elle n'améliore pas la simulation du rendement en sucre, même si la biomasse racinaire est légèrement mieux simulée. En revanche, le comportement du modèle fluctue sur les autres variables en fonction de la modalité azotée. Pour la modalité N1 2010, toutes les variables sont mieux simulées avec l'incorporation des racines fibreuses non récoltées. Le problème sur cette modalité semble juste résider dans la répartition de la biomasse racinaire dans le compartiment

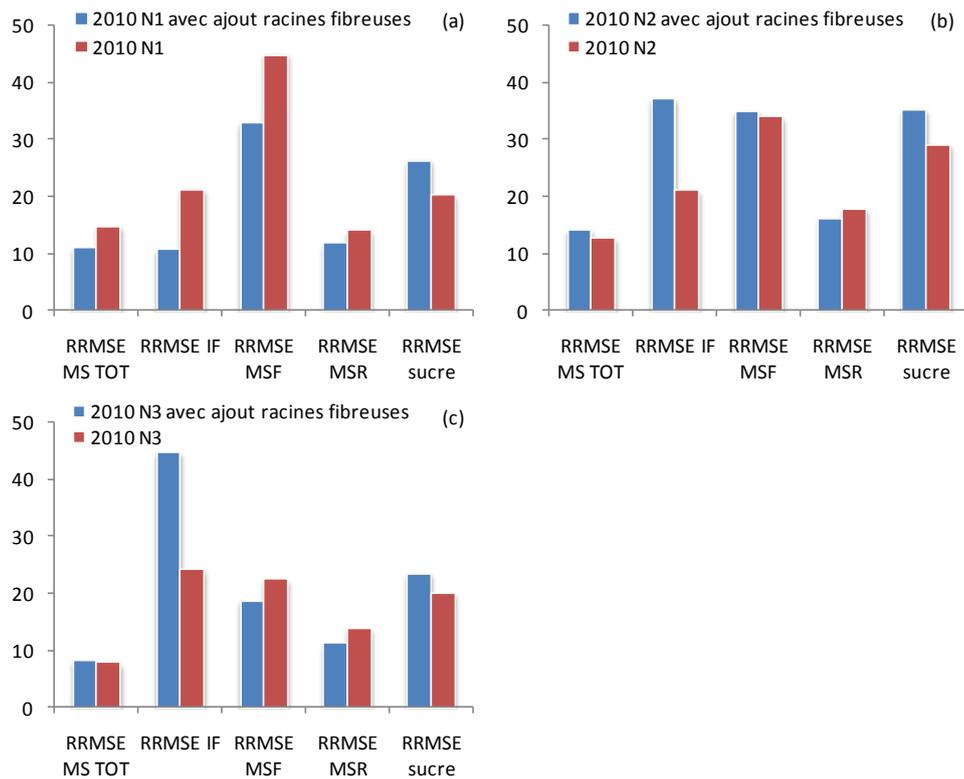


Figure 6-5 : Comparaison des RRMSE (%) avec et sans incorporation des racines fibreuses sur les modalités N1 (a), N2 (b) et N3 (c) de l'année 2010 pour les variables principales du modèle.

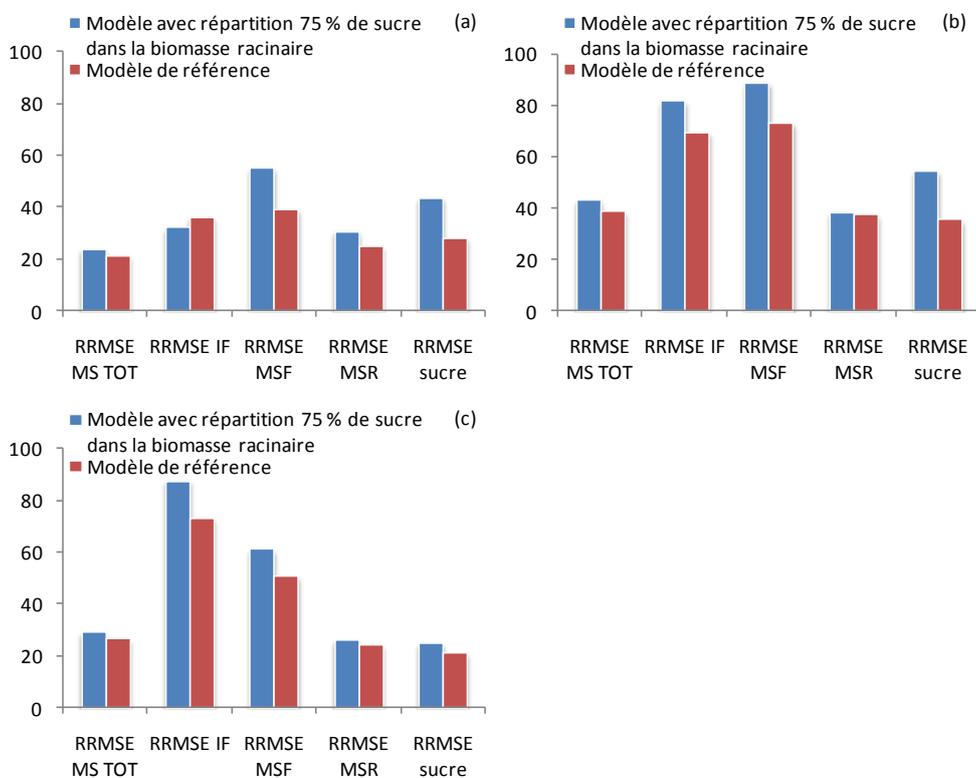


Figure 6-6 : Comparaison des RRMSE (%) entre les deux types de répartition : 75% de sucre dans la biomasse racinaire et le modèle de référence sur les données de validation par classe d'INN : forte carence en azote (a), faible carence en azote (b) et pas de carence en azote (c).

structural et de stockage du sucre. Pour les deux autres modalités c'est le contraire, les variables d'indice foliaire, de biomasse totale et de biomasse aérienne sont négativement impactées par l'incorporation des racines fibreuses non récoltées dans le modèle, hormis la biomasse aérienne de la modalité N3. Pour ces deux modalités, il n'y a donc que la biomasse racinaire totale qui est améliorée.

Bien que l'incorporation de la totalité des racines fibreuses soit nécessaire pour pouvoir simuler le système dans son ensemble, notamment l'absorption d'azote si le modèle présenté est couplé avec un modèle d'absorption, son impact négatif sur la simulation du rendement en sucre sur toutes les modalités de l'année de calibration et de la plupart des autres variables des modalités avec apport de fertilisant azoté nous indique que la méthode employée pour les simuler ne convient pas. La méthode utilisée dans SUCROS ne prend pas en compte l'état de nutrition azotée sur le développement des racines fibreuses, et il apparaît à la vue des résultats obtenus, qu'il faille intégrer ce phénomène.

6.2.4. Quelles performances par rapports aux autres modèles ?

Le jeu de données expérimentales dont nous disposons ne permet pas de procéder à des simulations avec les autres modèles tels que SUCROS ou STICS par exemple. En effet, nous n'avons pas de données caractérisant le sol, indispensables au fonctionnement de ces modèles. Nous pouvons cependant réaliser un test reprenant une hypothèse retrouvée dans nombre des modèles cités (Previbet, CERES et SUCROS) : la constance de la proportion de sucre dans la biomasse racinaire. Nous avons choisi de fixer ce taux à 75 % de la biomasse racinaire totale.

En appliquant cette nouvelle répartition, fixe, les résultats de simulation du modèle montrent que globalement cette méthode de calcul donne de moins bons résultats, et ce quelle que soit la classe d'INN concernée (figure 6-6). En effet, mis à part l'indice foliaire de la classe fortement carencée en azote, toutes les autres variables ont des valeurs de RRMSE plus élevées avec cette nouvelle méthode de calcul.

Cela montre que la teneur en sucre dans la racine est variable et que l'on ne peut donc pas la fixer pour simuler correctement le rendement en sucre. Cela conforte nos hypothèses de modélisation pour l'élaboration du rendement en sucre.

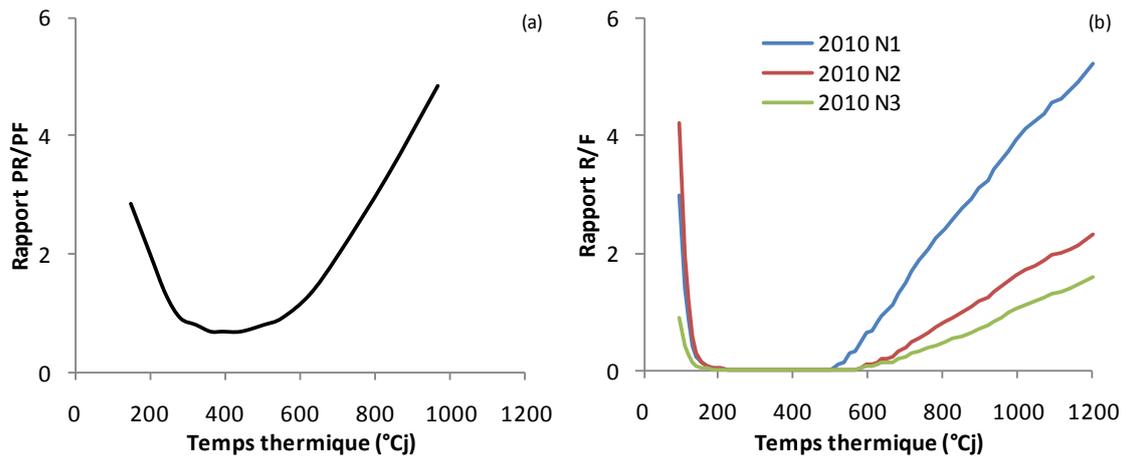


Figure 6-7 : Comparaison des rapports PR/PF d'après Fleury et Caneill (1984) (a) et d'après le modèle sur l'année de calibration 2010 (b).

6.3. Propriété émergente du modèle : les stades phénologiques de Fleury et Caneill (1984)

Dans la synthèse bibliographique nous avons rappelé les différents stades de croissance de la betterave sucrière proposés par Fleury et Caneill (1984), et représentés par l'évolution du rapport R/F (figure 6-7 a). Le modèle reproduit l'évolution du rapport R/F sur les données de calibration du modèle (2010) avec la même succession de phases que celles décrites par Fleury et Caneill (1984) (figure 6-7 b).

C'est une propriété émergente du modèle qui permet de s'affranchir des stades de croissance alors que beaucoup de modèles existants utilisent les stades de croissance pour simuler le développement de la betterave. Ce sont les mécanismes intrinsèques au modèle qui permettent ainsi de retrouver les différentes phases de croissance de la betterave décrites dans la littérature sans les imposer. Néanmoins, à cause de la sous-estimation de la biomasse aérienne par le modèle, le rapport R/F est surestimé pour les données de calibration et les données de validation (figure 6-8).

Ainsi selon Fleury et Caneill, le rapport R/F diminue jusqu'au stade T1 qui se situe à environ 250 °Cj, puis le rapport est stable jusqu'au stade T2 qui se situe à environ 550°Cj, puis à le rapport R/F augmente et à partir du stade T3 qui se situe entre 700 et 900°Cj le rapport augmente de manière linéaire. Ces trois stades représentatifs sont indiqués sur les simulations du modèle par des pointillés rouge (figure 6-8). Ainsi la diminution du rapport R/F jusqu'au stade T1 est bien simulée par le modèle pour toutes les conditions de fertilisation azotée et pour toutes les années et variétés étudiées. La période entre le stade T1 et le stade T2 est moins bien simulée. En effet sur les données de calibration (figure 6-8 a) et pour l'année de validation 2002 (figure 6-8 d), le rapport est bien au plus bas et stable, en revanche pour toutes les autres années testées (figure 6-8 b, c, e et f), le rapport R/F simulé augmente légèrement alors que les données expérimentales, quand il y en a, ne montrent pas de variation. Le démarrage de la phase de croissance linéaire de la racine (T3), est bien simulé pour toutes les conditions testées sauf sur l'année de calibration du modèle où cette phase semble débiter avant 700°Cj.

L'étude menée par Durr et al. en 2003 a montré que les conditions culturales influençaient l'allure de ce rapport (figure 2-3), ainsi plus la fertilisation azotée augmente, plus le rapport PR/PF diminue. Le modèle simule bien des variations de ce rapport selon la nutrition azotée (figure 6-8). Les différences ne sont observables qu'à partir du stade de croissance linéaire de la racine, sauf pour les données des années 2010, 2011 et 2009 où des différences selon la nutrition azotée sont visibles dès le début de la croissance de la plante. Le modèle indique donc que le rapport PR/PF est plus important pour les faibles états de nutrition azotée, et que celui-ci diminue avec l'augmentation de la fertilisation azotée. Cela illustre l'effet de l'azote sur le

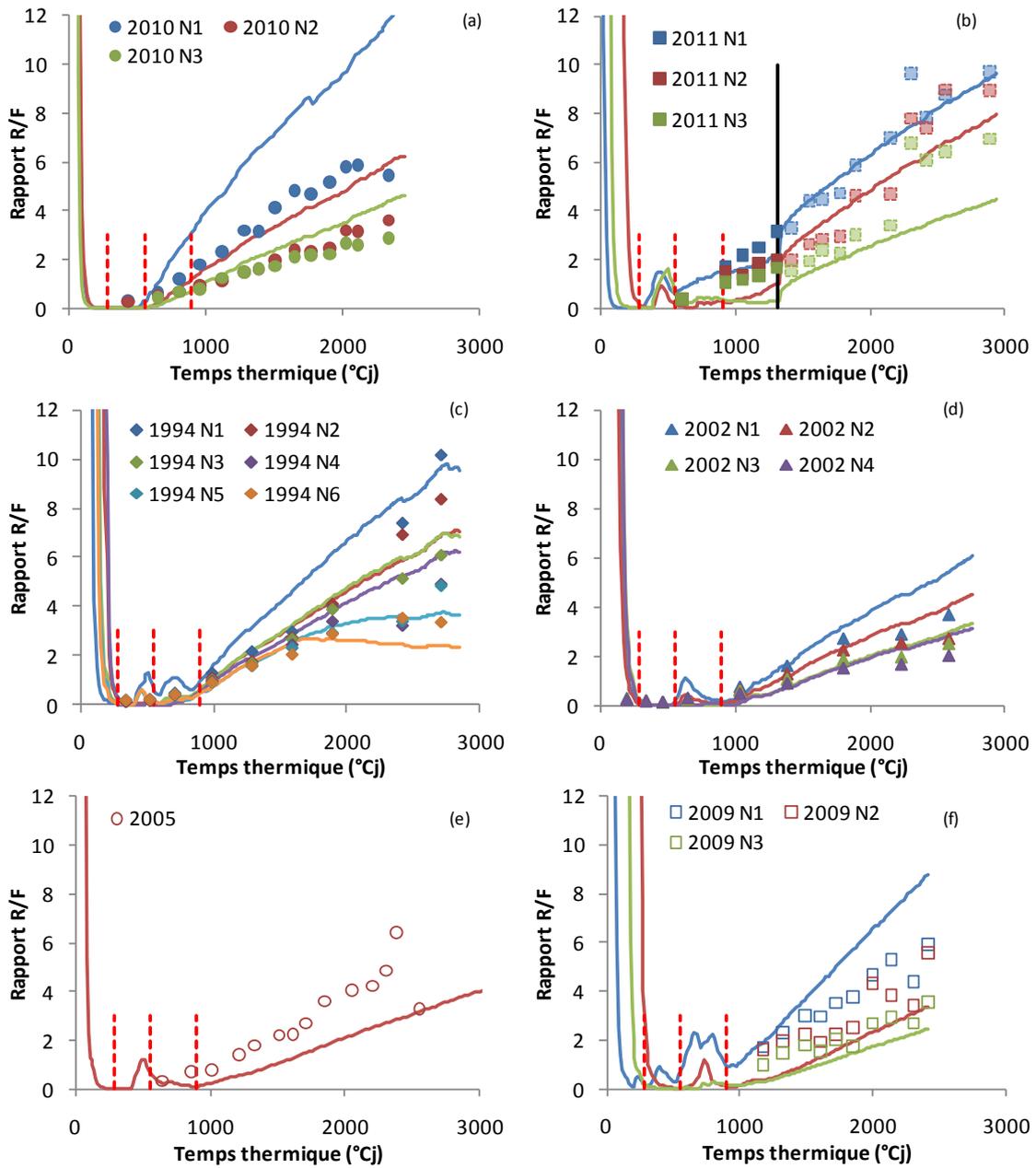


Figure 6-8 : Résultats des simulations du rapport PR/PF (lignes) en fonction du temps thermique pour toutes les modalités azotées des années 2010 (a), 2011 (b), 1994 (c), 2002 (d), 2005 (e) et 2009 (f) Pour l'année 2011, le moment de survenue de la grêle est indiqué par la droite verticale noire. Les stades de croissance T1 (~250 $^{\circ}Cj$), T2 (~550 $^{\circ}Cj$) et T3 (~800 $^{\circ}Cj$) d'après Fleury et Caneill (1984) sont indiqués par des pointillés rouges.

développement foliaire, la diminution du rapport PR/PF étant pour une grande part due à un développement excessif du bouquet foliaire sans gain supplémentaire de rendement en racines lors de l'apport de fortes doses de fertilisant azoté.

6.4. Le modèle pour expliquer les tendances de l'évolution des rendements depuis les années 80

Dans la synthèse bibliographique nous avons montré les tendances d'évolution des rendements en sucre et des biomasses des différents compartiments en parallèle avec des changements de pratiques de fertilisation azotée depuis 1977. Le modèle est utilisé ici pour rendre compte, ou non, de cette évolution. Nous suspicions au début de ce travail, que la diminution progressive du niveau de fertilisation azotée provoquait la diminution de la quantité de feuille produite, la surface foliaire restante étant capable d'assurer l'interception complète du rayonnement. Les hypothèses fondatrices du modèle devaient permettre, d'infirmier ou non cette hypothèse, mais au moins de ne pas disqualifier cette idée. Pour utiliser le modèle à cette fin, il nous fallait disposer des données climatiques, des dates de semis, et surtout des quantités d'azote prélevées par la culture, variable d'entrée du modèle. Pour cela, nous avons couplé à notre modèle le module de fourniture d'azote du sol du modèle STICS, en utilisant un type de sol moyen, représentatif d'un sol Picard, et en faisant l'hypothèse que tout l'azote disponible est absorbé par la plante. Les données nécessaires à de telles simulations sont disponibles depuis l'année 1986.

6.4.1. L'azote diminue mais les rendements augmentent

La figure 6-9 montre que le modèle reflète la tendance de l'évolution des rendements. La droite de régression faite sur les données annuelles et celle réalisée sur les simulations sont parallèles, indiquant que l'augmentation s'effectue au même rythme et est du même ordre de grandeur dans les deux cas. En revanche, le modèle surestime largement les rendements. La prise en compte des pertes cumulées à l'arrachage et à l'usine de l'ordre de 25%, dues à la récolte mécanique des plantes, réduisent cet écart sans l'effacer totalement. Le type de sol utilisé dans les simulations n'est pas représentatif de la sole betteravière au niveau national, ce qui peut sans doute expliquer ce biais.

Le modèle rend également compte de l'augmentation de la biomasse racinaire depuis 1983 (figure 6-10 a). Nous avons considéré une teneur en matière sèche racinaire constante et égale à 23 % pour toutes les années pour passer du poids frais au poids sec.

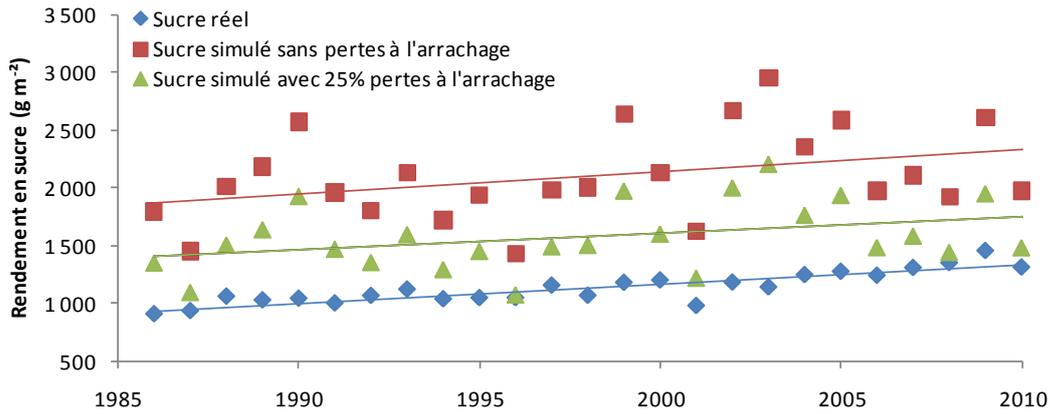


Figure-6-9 : Evolution des rendements en sucre réel, simulés avec le modèle et simulés avec 25 % de pertes à l'arrachage, depuis 1986. L'équation de la droite de régression du sucre réel est : $y = 16.48x - 31798$, $R^2 = 0.77$, celle du sucre simulé est : $y = 19.41x - 36698$, $R^2 = 0.13$ et celle du sucre simulé avec 25 % de pertes à l'arrachage est : $y = 14.56x - 27523$, $R^2 = 0.13$.

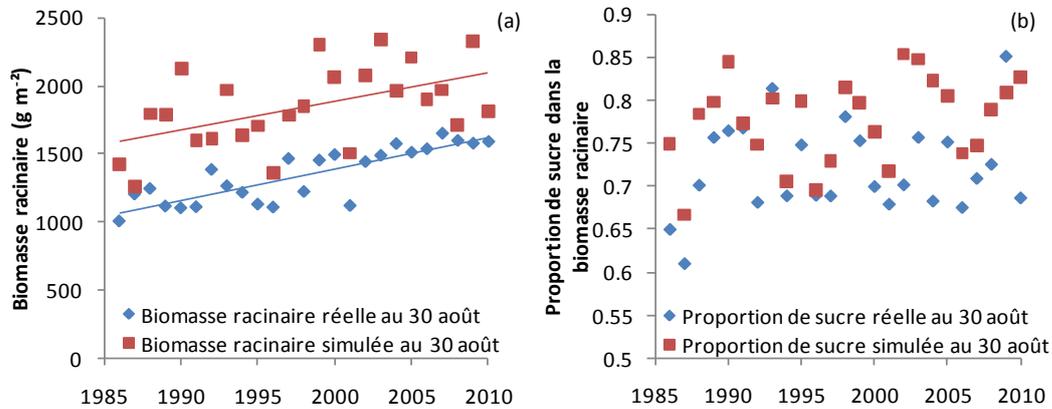


Figure 6-10 : Evolution des biomasses racinaires réelles (équation de la droite de régression : $y = 22.62x - 43860$, $R^2 = 0.70$) et simulées avec le modèle (équation de la droite de régression : $y = 20.57x - 39265$, $R^2 = 0.26$) au 30 août depuis 1986 (a) et évolution des teneurs en sucre dans la biomasse racinaire réelle et simulée au 30 août depuis 1986 (b).

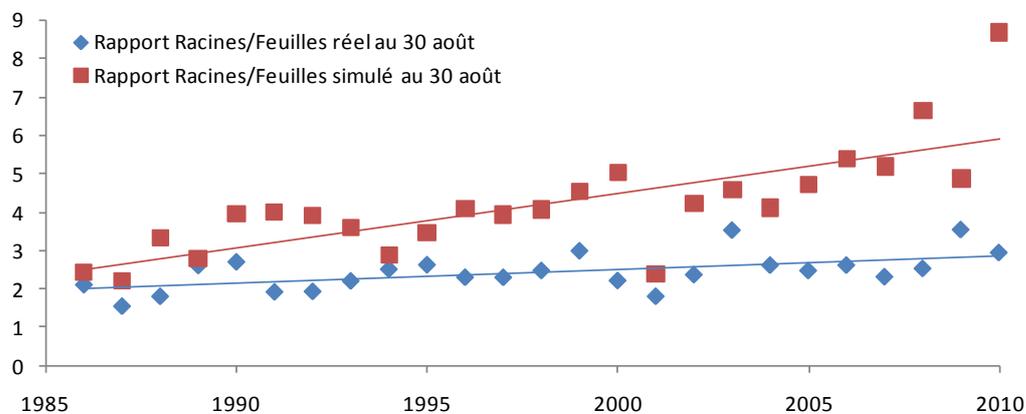


Figure 6-11 : Evolution des rapports biomasse de racines sur biomasse de feuilles (rapport R/F) réel et simulé par le modèle depuis 1986. L'équation de la droite de régression du rapport R/F réel est : $y = 0.037x - 70.41$, $R^2 = 0.32$, celle du rapport R/F simulé est : $y = 0.14x - 282.27$, $R^2 = 0.58$.

Comme pour la simulation du rendement en sucre, la biomasse racinaire est surestimée, mais les droites de régressions ont cette fois encore des pentes qui ne sont pas significativement différentes. Cela signifie que l'augmentation de rendement s'effectue aussi au même rythme et est du même ordre de grandeur entre les données réelles et simulées.

Nous avons également montré que la proportion de sucre dans la biomasse racinaire avait augmenté depuis 1977 avant de stagner aux environs de 1995 (figure 2-15). Il y a malheureusement trop de variabilité dans les données simulées par le modèle pour pouvoir en faire ressortir la même tendance (figure 6-10 b), mais on voit que le modèle surestime aussi la proportion de sucre dans la biomasse racinaire. Néanmoins, on constate que le modèle est capable de simuler une gamme de variabilité interannuelle de teneur en sucre allant de 65 à 85 %, gamme équivalente à celle des données réelles.

6.4.2. L'augmentation du rapport PR/PF au cours du temps

Nous avons vu dans la synthèse bibliographique que le rapport de la biomasse de racines sur la biomasse de feuilles a continuellement augmenté depuis 1977 (figure 2-16). Le modèle rend aussi compte de cette augmentation depuis 1986, en termes de biomasse sèche (figure 6-11). Nous avons encore une fois émis l'hypothèse d'une teneur en matière sèche constante et égale à 23 % de la biomasse racinaire et 13 % de la biomasse foliaire pour toutes les années pour passer du poids frais au poids sec. Le modèle rend compte de cette augmentation, néanmoins le rapport est surestimé. Les droites de régressions ont cette fois des pentes significativement différentes ce qui signifie que l'augmentation du rapport PR/PF ne s'effectue pas au même rythme dans le temps, le modèle surestimant cette évolution. La différence observée sur le rapport PR/PF, est peut être due à la moins bonne estimation des biomasses sèches aériennes issues de mesures expérimentales en poids frais. La baisse de fertilisation azotée observée depuis 1986 dans la pratique des agriculteurs a entraîné un changement d'allocation de la biomasse entre les feuilles et les racines que le modèle est capable de simuler.

6.5. Des traits variétaux pour améliorer le rendement ?

Nous avons dit plus haut que le modèle simulait globalement bien le rendement en sucre sur toutes les modalités testées. Il faut rappeler qu'à part sur les expérimentations menées en 2010 et 2011 avec la variété Python, tous les autres essais ont été réalisés avec des variétés différentes, et qu'aucun changement n'a été effectué dans la valeur des paramètres lors de l'application du modèle à ces différentes

modalités. Or nous avons également vu avant que la valeur de ces paramètres présentaient une certaine variabilité en fonction des essais (partie 5.2).

Les différences entre variétés se caractérisent par des changements dans la morphologie et dans la composition biochimique. Ainsi on va trouver des variétés que l'on appellera « riches » et qui auront une forte teneur en saccharose dans les racines mais un faible rendement en biomasse racinaire. A l'opposé de celles-ci on trouvera les « lourdes » qui n'ont pas une forte teneur en saccharose dans les racines mais qui ont un rendement en biomasse racinaire plus important. On observe également des différences entre variétés au niveau du bouquet foliaire : sur son port, la forme des feuilles, leur épaisseur, le nombre de feuilles développées, Le paramètre K est censé varier avec les variétés, mais l'analyse de sensibilité menée sur ce paramètre ne montre pas les résultats attendus, sûrement à cause de l'interaction avec la valeur d'autres paramètres du modèle. En première approche, le modèle semble également peu sensible à une variation de ce paramètre. Le temps nous a manqué pour analyser les effets de la variation du paramètre dans différentes conditions : température, rayonnement et fertilisation azotée.

7.^{EME} PARTIE : CONCLUSION

Le travail réalisé avait pour principal objectif d'élaborer un modèle de croissance et du rendement en sucre sous des conditions contrastées de nutrition azotée. Ce modèle a été validé avec succès sur une large base de données, avec plusieurs années de production réparties dans la zone de production betteravière.

L'originalité du modèle que nous avons construit réside dans le fait de répartir la biomasse produite dans trois compartiments, aérien, racinaire structural et sucre, selon des règles d'allocation dépendantes de l'azote et des capacités morphogénétiques du compartiment racinaire structural. L'azote absorbé est utilisé d'abord pour construire le compartiment racinaire structural avec une teneur minimale en azote, jusqu'à une valeur maximale morphogénétique, bornée par la quantité de biomasse disponible après que les feuilles aient assuré leur croissance. L'azote restant est alors utilisé par les feuilles pour assurer leur croissance en surface et en biomasse. Celles-ci assurent une croissance globale, qui une fois déduite la part qui leur est allouée, font croître les racines moyennant les règles décrites antérieurement. Le sucre représente la part non utilisée lorsque les compartiments feuilles et racines structurales saturent.

La confrontation du modèle ainsi constitué et paramétré sur une année de référence (ici 2010), à des expérimentations pluriannuelles comparant généralement des niveaux de fertilisation azotée lui confère une bonne crédibilité. Quelques pistes d'amélioration du modèle dans le futur proche peuvent être dessinées. La sénescence des feuilles par exemple, permettrait sous certaines hypothèses, en abondant le pool d'azote utilisable pour la construction de la surface foliaire, de corriger la faiblesse des simulations de l'indice foliaire pour les traitements à fort niveau de nutrition azotée. Une analyse plus poussée de certains paramètres, notamment le paramètre LMA, pourrait également être conduite.

Quoiqu'il en soit, le modèle rend compte, sans autre contrôle, de l'évolution du rapport du poids de racines sur celui de feuilles au cours du cycle de la plante (décroissant-stable-croissant) dont on a longtemps cherché le déterminisme par des stades physiologiques ou des réponses de voisinage inter-plante dans le peuplement. Cette évolution serait une propriété émergente des relations entre compartiments, sous les hypothèses du modèle. Il décrit également la variation, non de la forme de la courbe, mais de ses paramètres sous l'effet du niveau de nutrition azotée, confirmant ainsi des travaux antérieurs.

Il suggère également que l'augmentation régulière des rendements en sucre au cours des 30 dernières années conjointe avec la diminution de la fertilisation azotée qui décroît dans le même temps serait due à la diminution d'une biomasse de feuille excédentaire, non impactante sur l'absorption du rayonnement, profitant au compartiment sucre.

L'analyse de sensibilité sur certains paramètres, comme le coefficient **K** ou la biomasse racinaire structurale maximale, propre à simuler des améliorations variétales nous a déçus. Un travail plus approfondi concernant la possible utilisation du modèle dans cette voie reste cependant à conduire.

Afin de se diriger vers une application potentielle comme outil de prévision (notamment dans le cadre des changements climatiques, ou de changements de contexte de lutte contre les bioagresseurs) et de diagnostic, le modèle décrit peut aisément être intégré dans un modèle agronomique plus général, comme STICS par exemple.

8.^{EME} PARTIE : BIBLIOGRAPHIE

- Andrieu, B., Allirand, J., & Jaggard, K. (1997). Ground cover and leaf area index of maize and sugar beet crops. *Agronomie* , 17, 315-321.
- Andrieu, B., Lecoœur, J., Lemaire, G., & Ney, B. (2006). Le peuplement végétal cultivé. Dans *L'agronomie aujourd'hui* (pp. 103-136). Quae.
- Asher, M., & Hanson, L. (2006). Fungal and bacterial diseases. Dans A. Draycott (Éd.), *Sugar Beet* (pp. 286-315). Blackwell publishing.
- Bélangier, G., Gastal, F., & Lemaire, G. (1992). Growth analysis of a tall fescue sward fertilized with different rates of nitrogen. *Crop Science* , 32, 1371-1376.
- Bell, C., & Leigh, R. (1996). Differential effects of turgor on sucrose and potassium transport at the tonoplast and plasma membrane of sugar beet storage root tissue. *Plant, Cell and Environment* , 19, 191-200.
- Bellocchi, G., Rivington, M., Donatelli, M., & Matthews, K. (2010). Validation of biophysical models: issues and methodologies. A review. *Agronomy for Sustainable Development* , 30, 109-130.
- Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., et al. (2003). An overview of the crop model STICS. *European Journal of Agronomy* , 18, 309-332.
- Brisson, N., Launay, M., Mary, B., & Beaudoin, N. (2008). Conceptual basis, formalisations and parametrization of the STICS crop model. 297 p. Paris: Quae.
- Brisson, N., Mary, B., Ripoche, D., Jeuffroy, M., Ruget, F., Nicoullaud, B., et al. (1998). STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parametrization applied to wheat and corn. *Agronomie* , 18, 311-346.
- Brisson, N., Wery, J., & Boote, K. (2006). Fundamental concepts of crop models illustrated by a comparative approach. Dans D. Wallach, D. Makowski, & J. Jones (Éds.), *Working with dynamic crop models* (pp. 257-279). Elsevier.
- Caneill, J., Fleury, A., & Ferre, F. (1993). L'élaboration du rendement de la betterave sucrière. *Un point sur...l'élaboration du rendement des principales cultures annuelles* , 143-153. Paris: INRA.
- Cariolle, M., & Duval, R. (2006). Nutrition - Nitrogen. Dans A. Draycott (Éd.), *Sugar Beet* (pp. 169-184). Blackwell Publishing.
- Choluij, D., Karwowska, R., Ciszewska, A., & Jasinska, M. (2008). Influence of long-term drought stress on osmolyte accumulation in sugar beet (*Beta vulgaris* L.) plants. *Acta Physiologiae Plantarum* , 30, 679-687.
- Choluij, D., Karwowska, R., Jasinska, M., & Haber, G. (2004). Growth and dry matter partitioning in sugar beet plants (*Beta vulgaris* L.) under moderate drought. *Plant Soil and Environment* , 50, 265-272.

- Collectif direction Choppin de Janvry, E. (1997). *La betterave sucrière française*, 264 p. Paris: Seda-Somogy-ITB.
- Colnenne, C., Meynard, J., Reau, R., Justes, E., & Merrien, A. (1998). Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter oilseed rape. *Annals of Botany*, 81, 311-317.
- Colnenne, C., Meynard, J., Roche, R., & Reau, R. (2002). Effects of nitrogen deficiencies on autumnal growth of oilseed rape. *European Journal of Agronomy*, 17, 11-28.
- Confédération Générale des Planteurs de Betteraves. (2011). *L'Economie Betteravière*, 504 p. Paris: SEDA-CGB.
- Damay, N., & Le Gouis, J. (1993). Radiation use efficiency of sugar beet in Northern France. *European Journal of Agronomy*, 2 (3), 179-184.
- Droulin, J.-F. (1995). Etude de l'influence de l'azote sur la croissance de la betterave sucrière à l'aide d'un modèle simple d'efficience. Possibilités d'utilisation de la télédétection comme outil de diagnostic du statut azoté de la culture. *Mémoire de fin d'études, Institut Supérieur Agricole de Beauvais, INRA*, pp. 52.
- Durr, C., Fares, K., Damay, N., Carrera, A., Beaudoin, N., Machet, J., et al. (2003). A description of the development and growth of sugar beet for crop modelling. *Advances in Sugar Beet Research, IIRB*, vol. 5, 71-85.
- Duval, R., Machet, J., & Maupas, F. (2003). Critical curve for the dilution of nitrogen under sugar beet. *Advances in Sugar Beet Research, IIRB*, vol. 5, 47-61.
- Elliott, M., & Weston, G. (1993). Biology and physiology of the sugar-beet plant. Dans D. Cooke, & R. Scott (Éds.), *The Sugar Beet Crop* (pp. 37-66). Chapman & Hall.
- Escriou, H., Maupas, F., & Richard-Molard, M. (2010). Evolution des rendements de la betterave sucrière : un effet favorable du changement climatique. *Communication de l'Académie d'Agriculture de France*. Séance du 5 mai. 7 p.
- Fleury, A., & Caneill, J. (1984). Croissance et développement de la betterave sucrière. Analyse de l'hétérogénéité de peuplement. In: *Physiologie de la plante entière*, INRA, Département d'Agronomie. 201-212.
- Freckelton, R., Watkinson, A., Webb, D., & Thomas, T. (1999). Yield of sugar beet in relation to weather and nutrients. *Agricultural and Forest Meteorology*, 93, 39-51.
- Gastal, F., & Lemaire, G. (1997). Nutrition azotée et croissance des peuplements végétaux cultivés. Dans J.-F. Morot-Gaudry (Éd.), *Assimilation de l'azote chez les plantes. Aspects physiologique, biochimique et moléculaire* (pp. 355-367). INRA.
- Giaquinta, R. (1979). Sucrose translocation and storage in the sugar beet. *Plant Physiology*, 63, 828-832.

Graux, A.-I. (2005). Etude des mécanismes de remobilisation d'assimilats chez la betterave sucrière en réponse aux stress abiotiques : expérimentation et modélisation. *Mémoire de fin d'études, ENSAIA, INRA* , pp. 44.

Guillaume, S. (2011). Adaptation d'un modèle de culture et conception d'un modèle de décision pour la gestion conjointe de l'irrigation et de la fertilisation azotée du blé dur. Thèse. pp. 201. Institut National Polytechnique de Toulouse.

Hodanova, D. (1972). Structure and development of sugar beet canopy I. Leaf area-leaf angle relations. *Photosynthetica* , 6, 401-409.

Hoffmann, C. (2005). Changes in N composition of sugar beet varieties in response to increasing N supply. *Journal of Agronomy and Crop Science* , 191, 138-145.

Hoffmann, C. (2010). Sucrose accumulation in sugar beet under drought stress. *Journal of Agronomy and Crop Science* , 196, 243-252.

Institut Technique de la Betterave. (2012). Bioagresseurs et traitements. Dans *Culture de la betterave sucrière 2012-2013* (p. 39).

Jaggard, K. (1994). Effets de l'implantation de la culture sur l'interception du rayonnement et le rendement. *L'implantation de la betterave industrielle* , 105-112. (J. Boiffin, & E. Choppin De Janvry, Éds.) INRA.

Jeuffroy, M.-H., Bergez, J.-E., David, C., Flénet, F., Gate, P., Loyce, C., et al. (2008). Utilisation des modèles pour l'aide à la conception et à l'évaluation d'innovations techniques en production végétale: bilan et perspectives. Dans *Systèmes de culture innovants et durables. Quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer?* (pp. 109-128). Educagri.

Justes, E., Mary, B., Meynard, J.-M., Machet, J.-M., & Thelier-Huche. (1994). Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter wheat crops. *Annals of Botany* , 74, 397-407.

Kenter, C., & Hoffmann, C. (2006). Seasonal patterns of sucrose concentration in relation to other quality parameters of sugar beet (*Beta vulgaris* L.). *J. Sci. Food Agric.* , 86, 62-70.

Launay, M. (2002). Diagnostic et prévision de l'état des cultures à l'échelle régionale : couplage entre modèle de croissance et télédétection. Application à la betterave sucrière en Picardie. 72 p. Thèse : Institut national Agronomique Paris-Grignon.

Launay, M., & Brisson, N. (2003). Adaptability of the STICS model to various crops: application to sugar beet. *Advances in Sugar Beet Research, IIRB, vol. 5* , 87-94.

- Launay, M., Graux, A.-I., Brisson, N., & Guerif, M. (2009). Carbohydrate remobilization from storage root to leaves after a stress release in sugar beet (*Beta vulgaris* L.): experimental and modelling approaches. *Journal of Agricultural Science* , 147, 669-682.
- Lemaire, G., & Gastal, F. (1997). N uptake and distribution in plant canopies. Dans G. Lemaire (Éd.), *Diagnosis of the nitrogen status in crops* (pp. 3-44). Springer.
- Lemaire, G., & Salette, J. (1984). Relation entre dynamique de croissance et dynamique de prélèvement d'azote pour un peuplement de graminées fourragères. I. Etude de l'effet du milieu. *Agronomie* , 4, 423-430.
- Lemaire, G., Gastal, F., Plenet, D., & Le Bot, J. (1997). Le prélèvement d'azote par les peuplements végétaux et la production des cultures. Dans G. Lemaire, & B. Nicolardot (Éds.), *Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes - Les Colloques* (pp. 121-139). Reims: INRA.
- Lemaire, G., Jeuffroy, M., & Gastal, F. (2008). Diagnosis tool for plant and crop N status in vegetative stage theory and practices for crop N management. *European Journal of Agronomy* , 28, 614-624.
- Lemaire, G., van Oosterom, E., Jeuffroy, M., Gastal, F., & Massignam, A. (2008). Crop species present different qualitative types of response to N deficiency during their vegetative growth. *Field Crop Research* , 105, 253-265.
- Lemaire, G., van Oosterom, E., Sheehy, J., Jeuffroy, M., Massignam, A., & Rossato, L. (2007). Is crop N demand more closely related to dry matter accumulation or leaf area expansion during vegetative growth? *Field Crops Research* , 100, 91-106.
- Lemaire, S. (2010). Système dynamique de la croissance et du développement de la betterave sucrière (*Beta vulgaris* L.). 135 p. Thèse : ParisTech.
- Leviel, B. (2000). Evaluation des risques et maîtrise des flux d'azote au niveau d'une parcelle agricole dans la plaine roumaine et bulgare. Application aux cultures de maïs, blé, colza et betterave. 312 p. Thèse : INP Toulouse.
- Leviel, B., Crivineanu, C., & Gabrielle, B. (2003). CERES-BEET, a prediction model for sugar beet yield and environmental impact. *Advances in Sugar Beet Research, IIRB, vol. 5*, 143-152.
- Mäck, G., & Hoffmann, C. (2006). Organ-specific adaptation to low precipitation in solute concentration of sugar beet (*Beta vulgaris* L.). *European Journal of Agronomy* , 25, 270-279.
- Märländer, B., Hoffmann, C., Koch, H.-J., Ladewig, E., Merkes, R., Petersen, J., et al. (2003). Environmental situation and yield performance of the sugar beet crop in germany : heading for sustainable development. *Journal of Agronomy and Crop Science* , 189, 201-226.

- Martin, R. (1986). Radiation interception and growth of sugar beet at different sowing dates in Canterbury. *New Zealand Journal of Agricultural Research* , 29, 381-390.
- Milford, G. (2006). Plant Structure and Crop Physiology. Dans A. Draycott (Éd.), *Sugar Beet* (pp. 30-49). Blackwell Publishing.
- Milford, G., Pocock, T., & Riley, J. (1985a). An analysis of leaf growth in sugar beet. I. Leaf appearance and expansion in relation to temperature under controlled conditions. *Annals of applied biology* , 106, 163-172.
- Milford, G., Pocock, T., & Riley, J. (1985b). An analysis of leaf growth in sugar beet. II. Leaf appearance in field crops. *Annals of Applied Biology* , 106, 173-185.
- Milford, G., Pocock, T., Jaggard, K., Biscoe, P., Armstrong, M., Last, P., et al. (1985d). An analysis of leaf growth in sugar beet. IV. The expansion of the leaf canopy in relation to temperature and nitrogen. *Ann. App. Biol.* , 107, 335-347.
- Milford, J., Pocock, T., Riley, J., & Messem, A. (1985c). An analysis of leaf growth in sugar beet. III. leaf expansion in field crops. *Annals of Applied Biology* , 106, 187-203.
- Monti, A., Brugnoli, E., Scartazza, A., & Amaducci, M. (2006). The effect of transient and continuous drought on yield, photosynthesis and carbon isotope discrimination in sugar beet (*Beta vulgaris* L.). *Journal of Experimental Botany* , 57, 1253-1262.
- Ney, B., Doré, T., & Sagan, M. (1997). N dilution curves: Grain legumes. Dans G. Lemaire (Éd.), *Diagnosis of the nitrogen status in crops* (pp. 113-118). heidelberg, Springer verlag.
- Pidgeon, J., Werker, A., Jaggard, K., Richter, G., Lister, D., & Jones, P. (2001). Climatic impact on the productivity of sugar beet in Europe, 1961-1995. *Agricultural and Forest Meteorology* , 109, 27-37.
- Plénet, D., & Cruz, P. (1997). N dilution curves: Grain legumes. Dans *Diagnosis of the nitrogen status in crops* (pp. 113-118). heidelberg, Springer Verlag.
- Plénet, D., & Lemaire, G. (2000). Relationships between dynamics of nitrogen uptake and dry matter accumulation in maize crops. Determination of critical N concentration. *Plant and Soil* , 216, 65-82.
- Qi, A., Kenter, C., Hoffmann, C., & Jaggard, K. (2005). The Broom's Barn sugar beet growth model and it's adaptation to soils with varied available water content. *European Journal of Agronomy* , 23, 108-122.
- Richard-Molard, M. (2012). Culture betteravière et environnement, Introduction. *Communication de l'Académie d'Agriculture de France*. Séance du 4 avril. 2 p.
- Richter, G., Jaggard, K., & Mitchell, R. (2001). Modelling radiation interception and radiation use efficiency for sugar beet under variable climatic stress. *Agricultural and Forest Meteorology* , 109, 13-25.

- Rivington, M., Bellocchi, G., Matthews, K., & Buchan, K. (2005). Evaluation of three model estimations of solar radiation at 24 UK stations. *Agricultural and Forest Meteorology*, *132*, 228-243.
- Rossi, V., Meriggi, P., Biancardi, E., & Rosso, F. (2000). Effect of cercospora leaf spot on sugar beet growth, yield and quality. *Advances in Sugar Beet Research, IIRB*, *2*, 49-76.
- Saftner, R., & Wyse, R. (1980). Alkali cation/sucrose co-transport in the root sink of sugar beet. *Plant Physiology*, *66*, 884-889.
- Scholten, O., & Lange, W. (2000). Breeding for resistance to rhizomania in sugar beet: a review. *Euphytica*, *112*, 219-231.
- Scott, R., & Jaggard, K. (1992). Crop growth and weather : can yield forecasts be reliable? Dans *55ème congrès de l'Institut International de Recherches Betteravières* (pp. 169-187). Bruxelles: IIRB.
- Scott, R., & Jaggard, K. (1993). Crop physiology and agronomy. Dans D. Cooke, & R. Scott (Éds.), *The Sugar Beet Crop* (pp. 179-237). London: Chapman & Hall.
- Scott, R., & Jaggard, K. (1978). Theoretical criteria for maximum yield. Dans *Proceedings of the 41st Winter Congress of the International Institute of Sugar Beet Research* (pp. 179-198). Brussels: IIRB.
- Spitters, C., van Keulen, H., & van Kraalingen, D. (1989). A simple and universal crop growth simulator : SUCROS87. Dans R. Rabbinge, S. Ward, & H. van Laar (Éds.), *Simulation and systems management in crop protection* (p. 434). Wageningen: Simulation Monographs 32, PUDOC.
- Stevens, M., Liu, H.-Y., & Lemaire, O. (2006). Virus diseases. Dans A. Draycott (Éd.), *Sugar Beet* (pp. 256-285). Blackwell Publishing.
- Tei, F., Benincasa, P., & Guiducci, M. (2002). Critical nitrogen concentration in processing tomato. *European Journal of Agronomy*, *18*, 45-55.
- Theurer, J. (1979). Growth patterns in sugar beet production. *Journal of the American Society of Sugar Beet Technologists*, *20* (4), 343-367.
- Vandendriessche, H. (2000). A model of growth and sugar accumulation of sugar beet for potential production conditions: SUBEMOpo. I. Theory and model structure. *Agricultural Systems*, *64*, 1-19.
- Vandendriessche, H. (1995). Modelling growth and sugar accumulation of sugar beet (*beta vulgaris* L.) for potential production conditions. 195 p. Thèse: Université de Louvain.

- Varlet-Granchet, C., Chartier, M., Gosse, G., & Bonhomme, R. (1982). Rayonnement utile pour la photosynthèse des végétaux en conditions naturelles : caractérisation et variation. *Acta Oecologica Plantarum* , 16, 189-202.
- Werker, A., & Jaggard, K. (1998). Dependence of sugar beet yield on light interception and evapotranspiration. *Agricultural and Forest Meteorology* , 89, 229-240.
- Werker, A., Jaggard, K., & Allison, M. (1999). Modelling partitioning between structure and storage in sugar beet : effects of drought and soil nitrogen. *plant and Soil* , 207, 97-106.
- Werker, A., Jaggard, K., & Allison, M. (1999). Modelling partitioning between structure and storage in sugar beet : effects of drought and soil nitrogen. *Plant and Soil* , 207, 97-106.
- Wyse, R. (1979). Parameters controlling sucrose content and yield of sugarbeet roots. *Journal of the American Society of Sugar Beet Technologists* , 20 (4), 368-385.
- Wyse, R. (1979). Sucrose uptake by sugar beet taproot tissue. *Plant Physiology* , 64, 837-841.
- Yan, H.-P., Kang, M., De Reffye, P., & Dingkuhn, M. (2004). A dynamic, architectural plant model simulating resource-dependant growth. *Annals of Botany* , 93, 1-12.

9.^{EME} PARTIE : ANNEXES

9.1. Annexe 1 : Les représentations graphiques des simulations du modèle sur tous les essais

9.1.1. Essai de Bourgogne (2011)

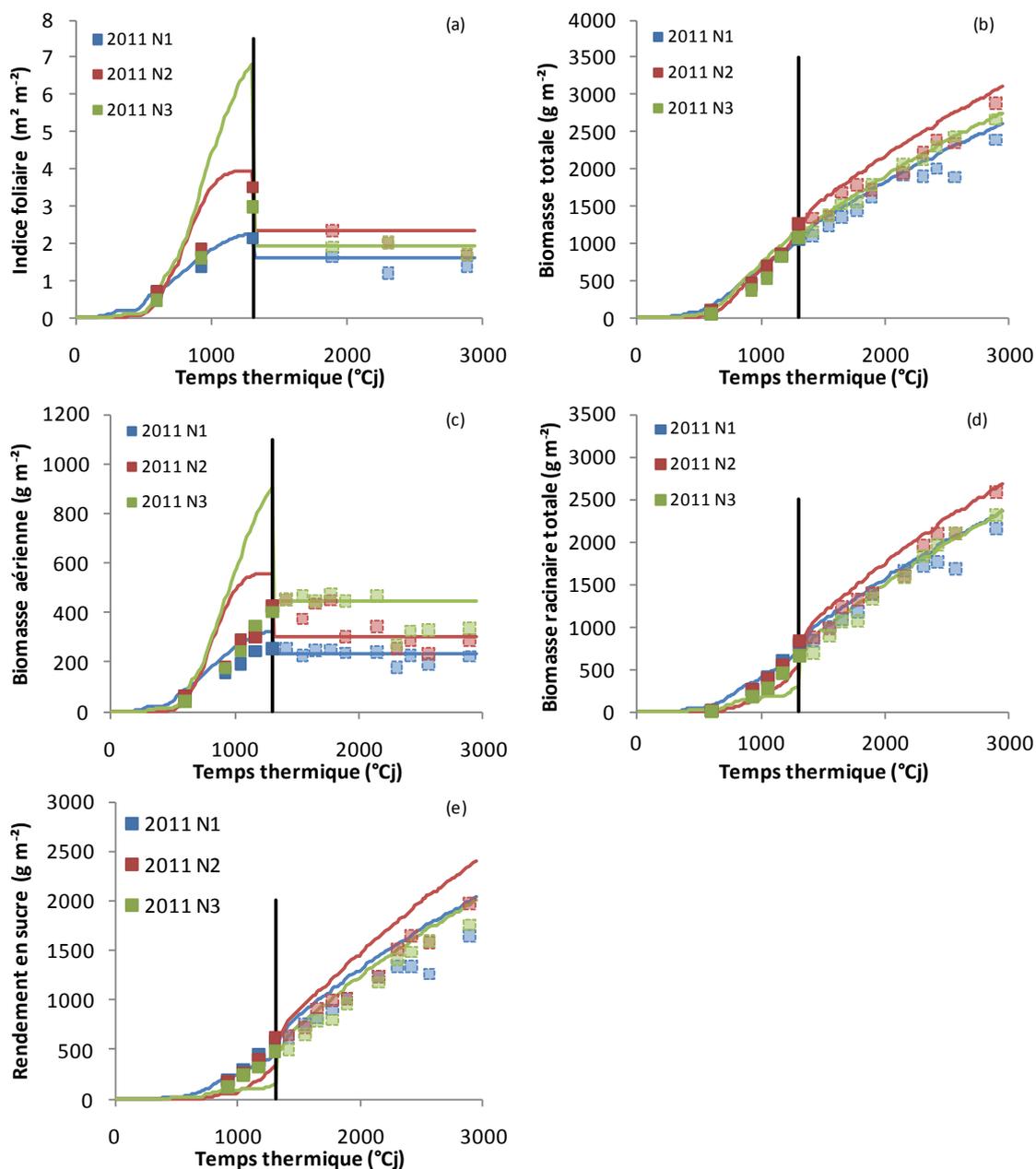


Figure 9-1 : Représentations des données simulées par le modèle (lignes) et des données observées (points) sur les variables d'indice foliaire (a), de biomasse totale (b), de biomasse aérienne (c), de biomasse racinaire (d) et de rendement en sucre (e) pour toutes les modalités azotées de l'année 2011.

9.1.2. Essai de Clermont Les Fermes (1994)

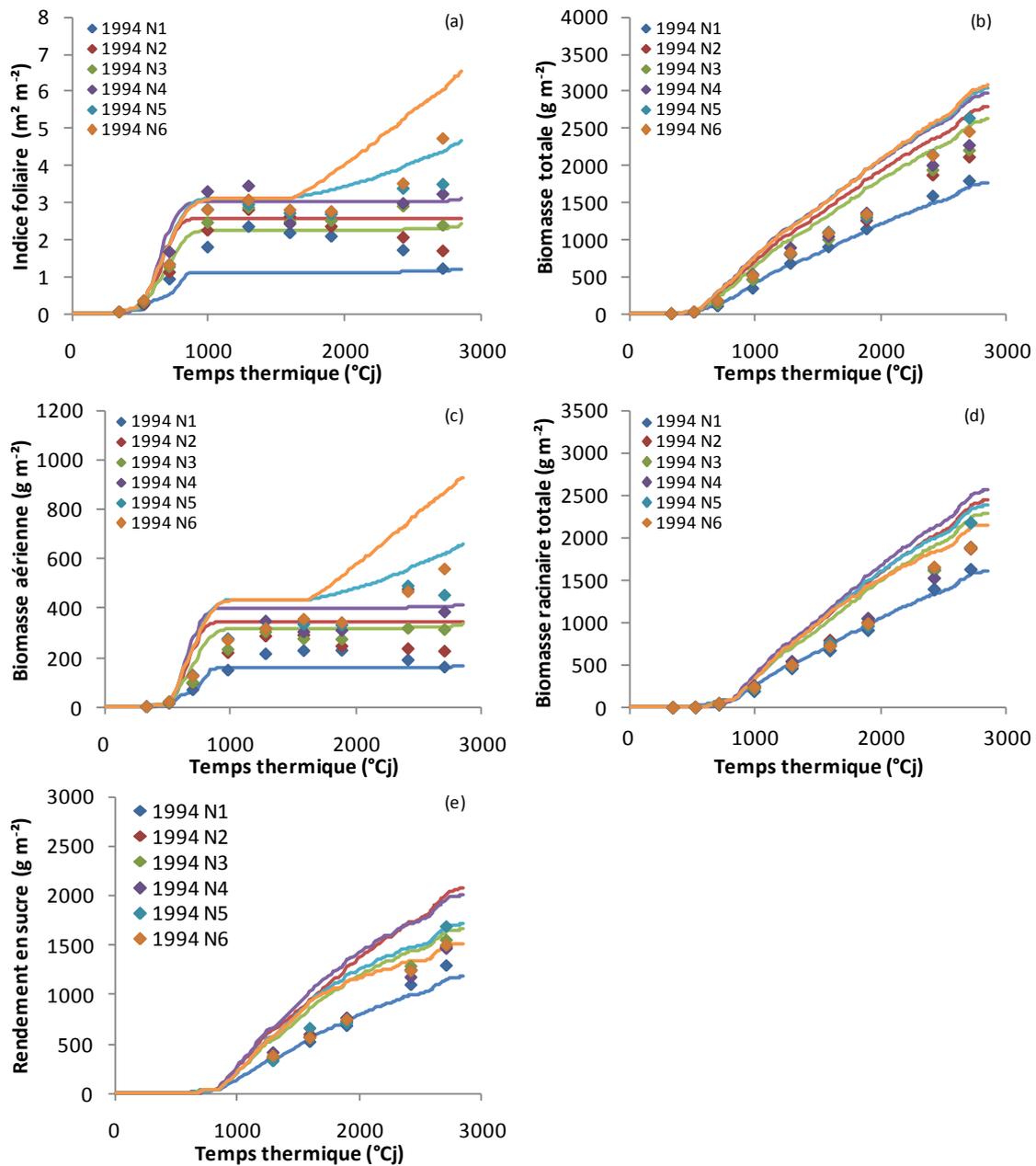


Figure 9-2 : Représentations des données simulées par le modèle (lignes) et des données observées (points) sur les variables d'indice foliaire (a), de biomasse totale (b), de biomasse aérienne (c), de biomasse racinaire (d) et de rendement en sucre (e) pour toutes les modalités azotées de l'année 1994.

9.1.3. Essai de Saint-Quentin-Sur-Cooles (2002)

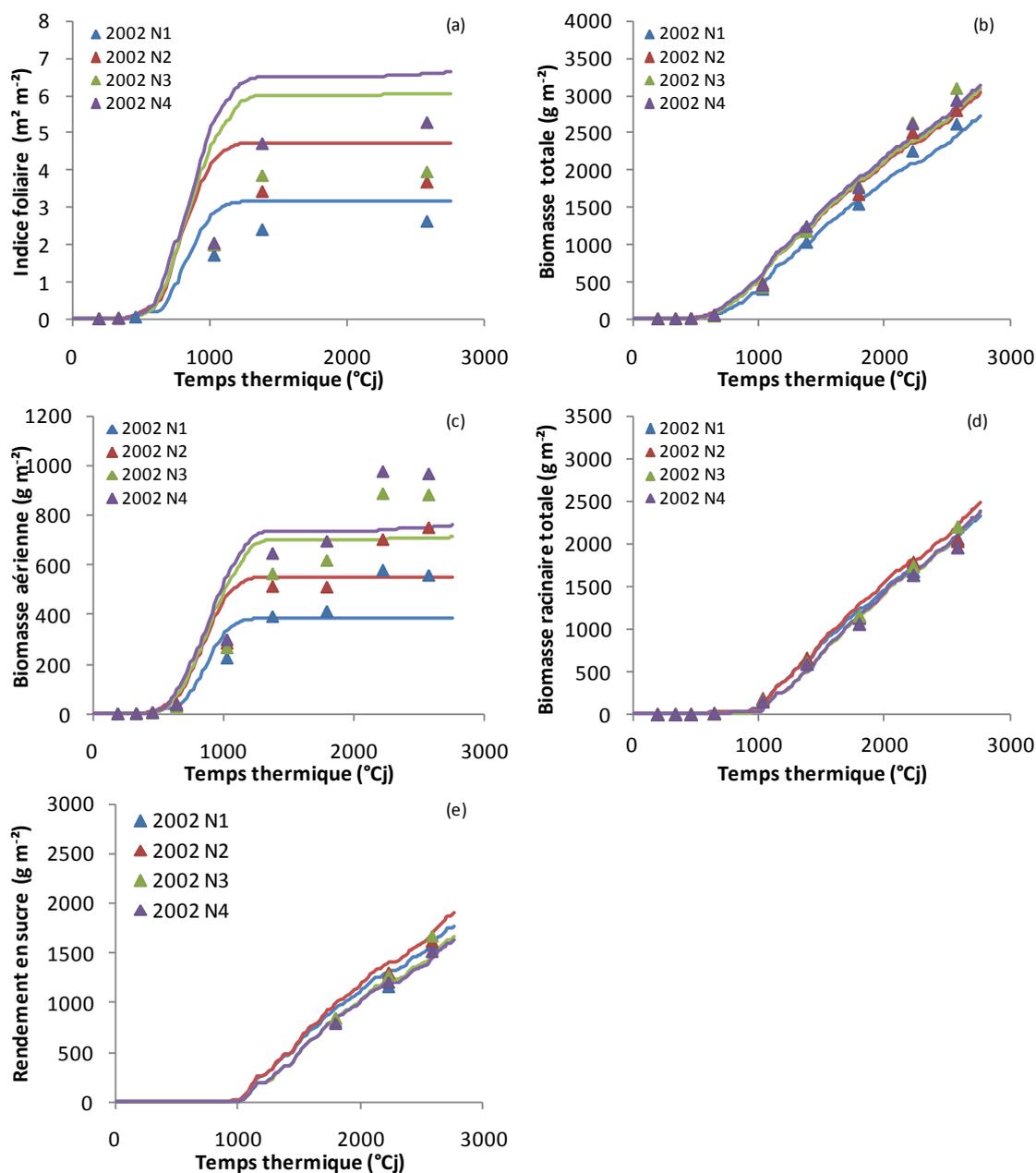


Figure 9-3 : Représentations des données simulées par le modèle (lignes) et des données observées (points) sur les variables d'indice foliaire (a), de biomasse totale (b), de biomasse aérienne (c), de biomasse racinaire (d) et de rendement en sucre (e) pour toutes les modalités azotées de l'année 2002.

9.1.4. Essai d'Avignon (2005)

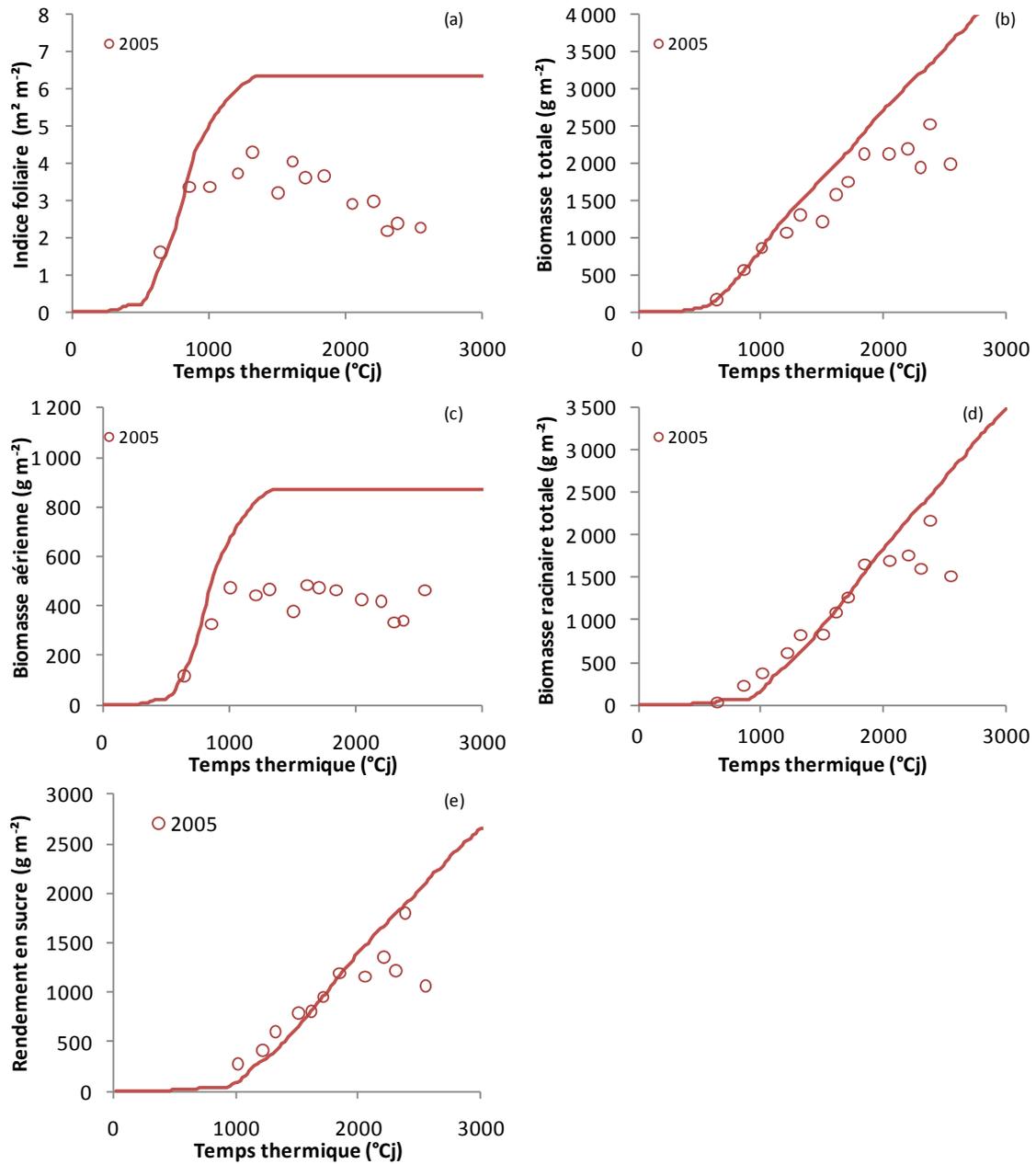


Figure 9-4 : Représentations des données simulées par le modèle (lignes) et des données observées (points) sur les variables d'indice foliaire (a), de biomasse totale (b), de biomasse aérienne (c), de biomasse racinaire (d) et de rendement en sucre (e) pour toutes les modalités azotées de l'année 2005.

9.1.5. Essai de Perles (2009)

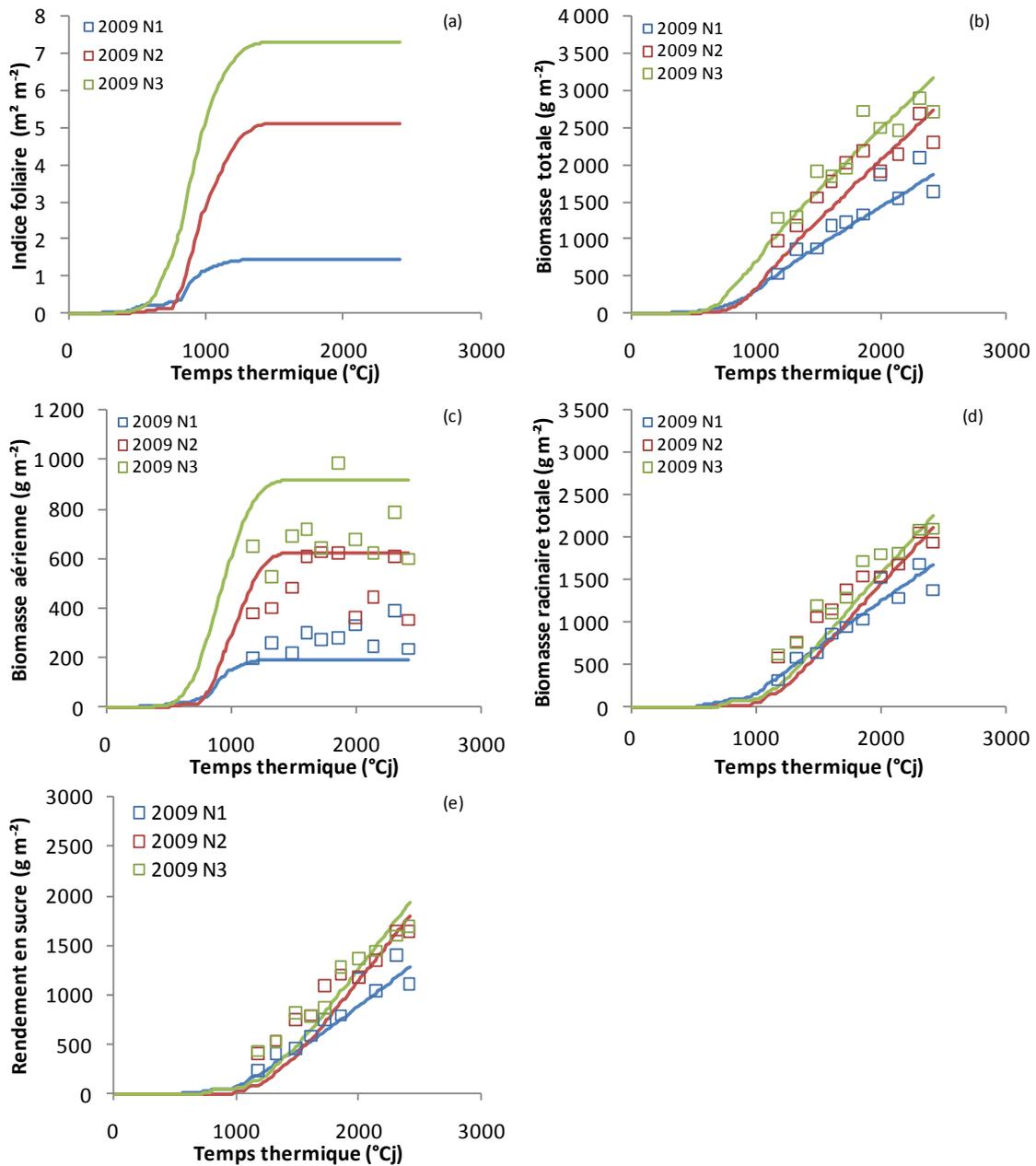


Figure 9-5 : Représentations des données simulées par le modèle (lignes) et des données observées (points) sur les variables d'indice foliaire (a), de biomasse totale (b), de biomasse aérienne (c), de biomasse racinaire (d) et de rendement en sucre (e) pour toutes les modalités azotées de l'année 2009.

9.2. Annexe 2 : Variables racinaires impliquées dans la limitation de la croissance racinaire structurale en fonction des classes d'INN

9.2.1. Classe fortement carencée en azote

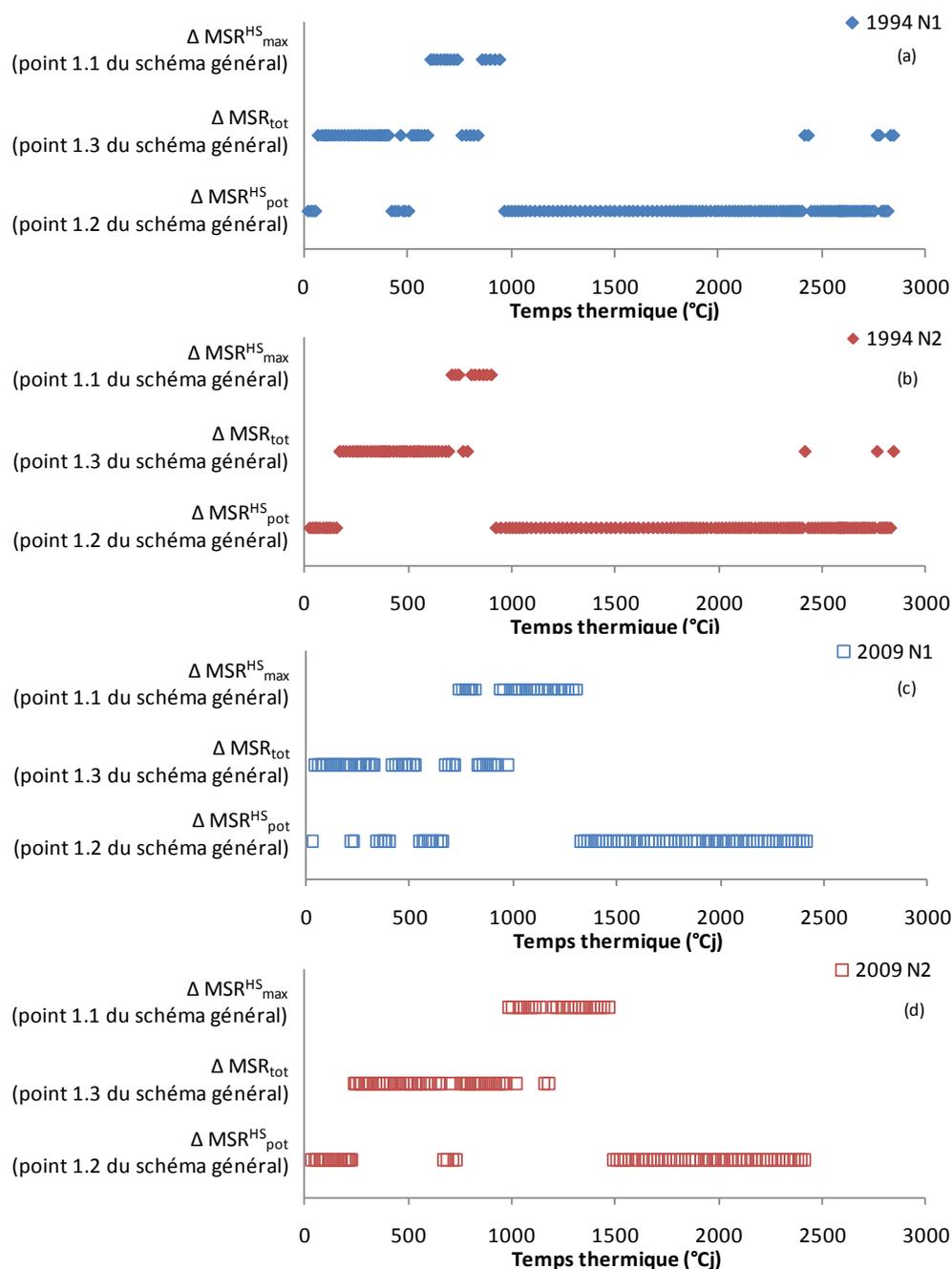


Figure 9-6 : Succession des variables racinaires impliquées dans la limitation de la croissance racinaire structurale pour les différentes modalités des données de validation du modèle sur la classe fortement carencée en azote : 1994 N1 (a), 1994 N2 (b), 2009 N1 (c) et 2009 N2 (c).

9.2.2. Classe faiblement carencée en azote

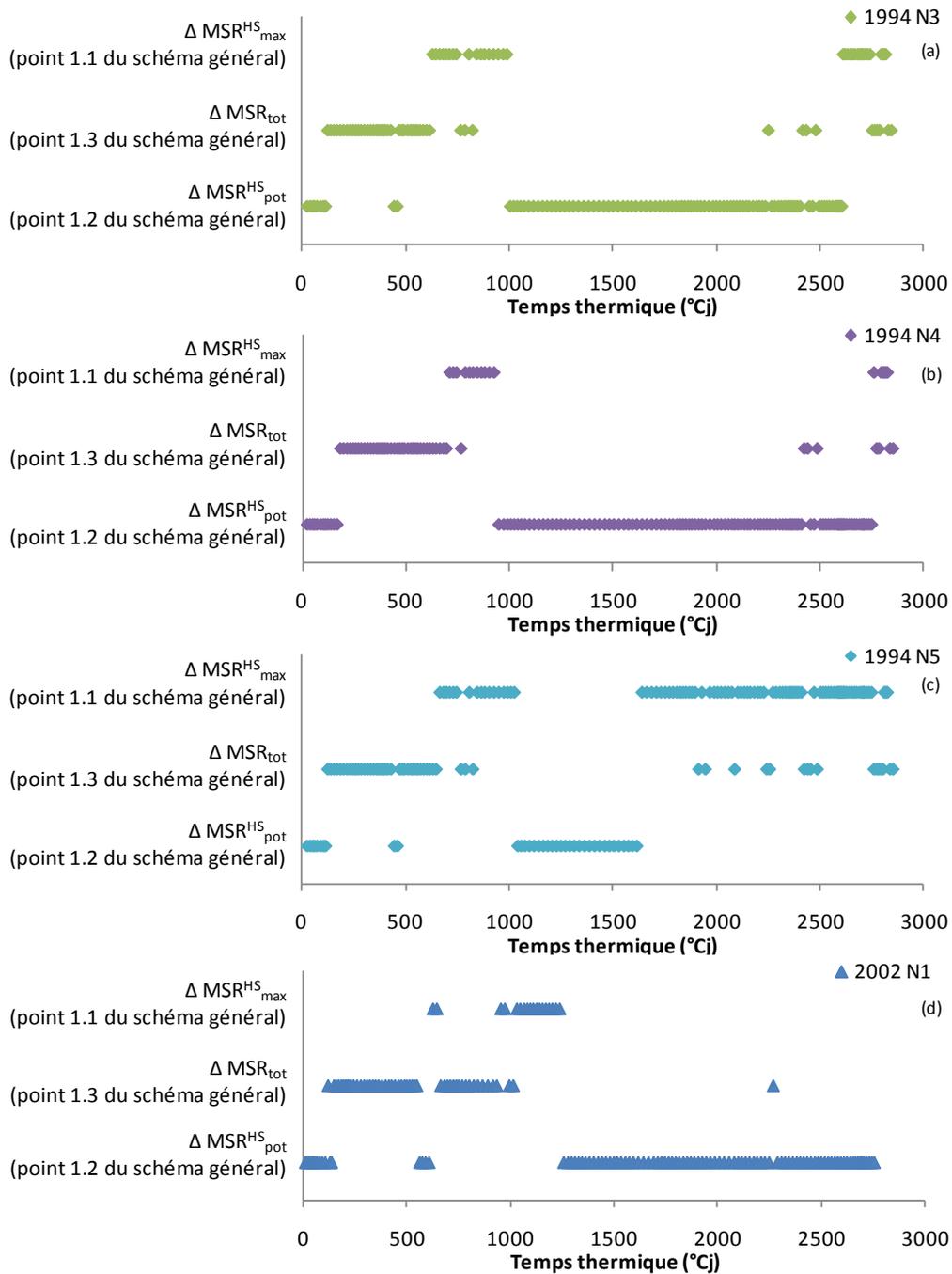


Figure 9-7 : Succession des variables racinaires impliquées dans la limitation de la croissance racinaire structurale pour les différentes modalités des données de validation du modèle sur la classe faiblement carencée en azote : 1994 N3 (a), 1994 N4 (b), 1994 N5 (c), 2002 N1 (d), 2002 N2 (e) et 2005 (f).

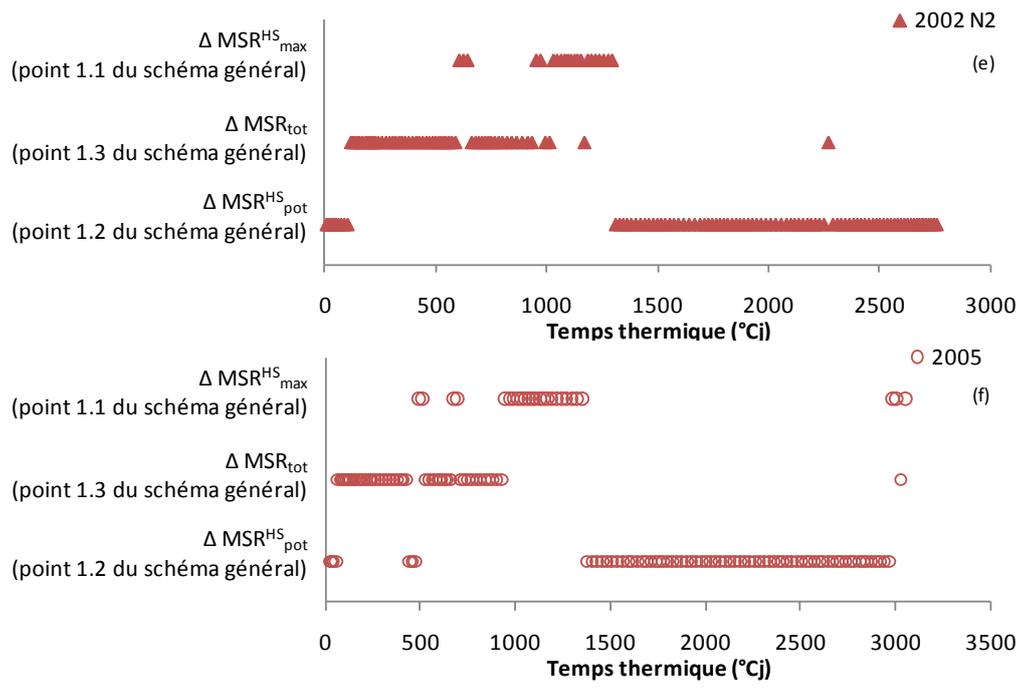


Figure 9-7 : suite.

9.2.3. Classe non carencée en azote

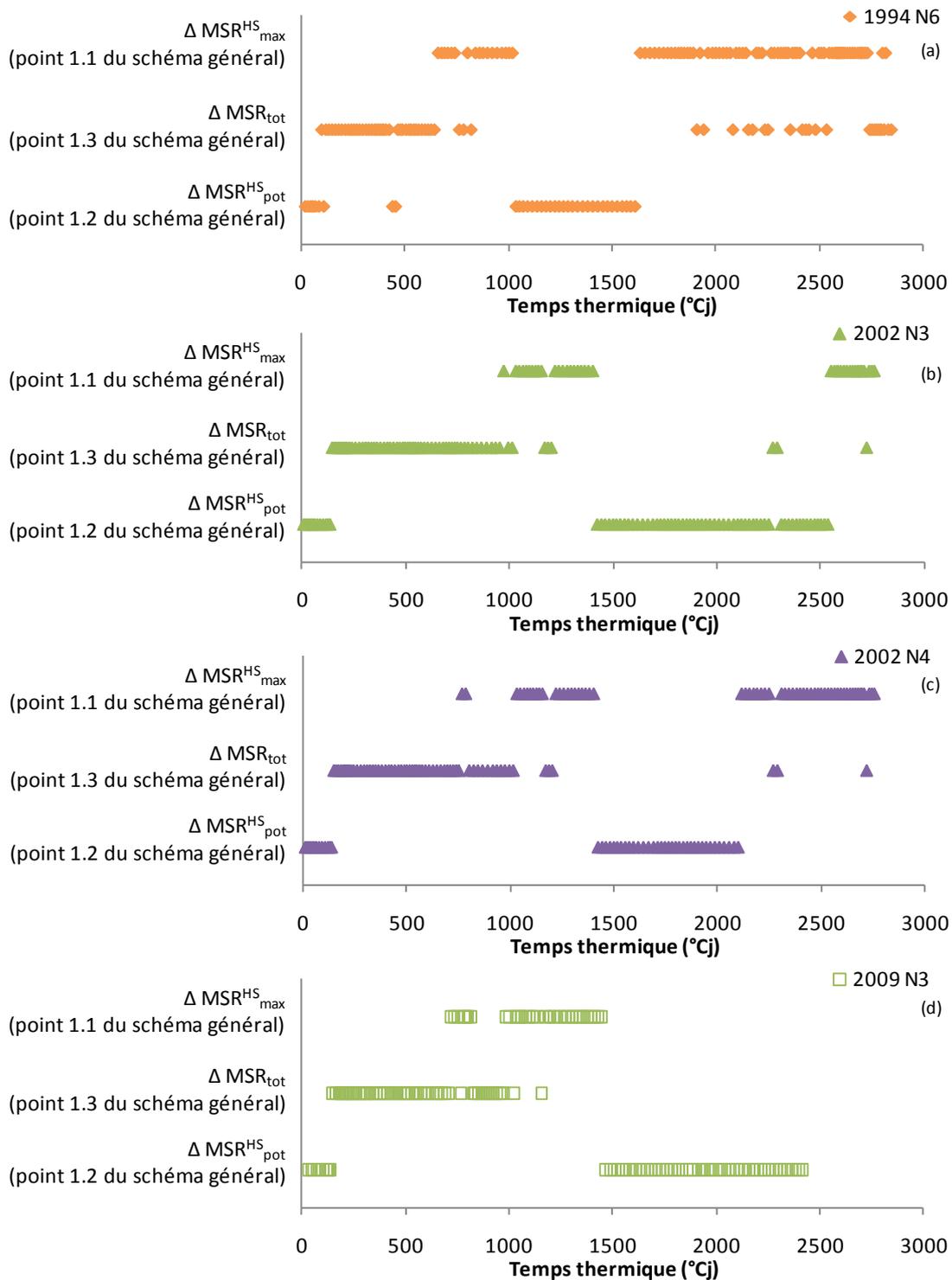


Figure 9-8 : Succession des variables racinaires impliquées dans la limitation de la croissance racinaire structurale pour les différentes modalités des données de validation du modèle sur la classe non carencée en azote : 1994 N6 (a), 2002 N3 (b), 2002 N4 (c) et 2009 N3 (d).