



HAL
open science

Modélisation de culture et diagnostic agronomique régional. Mise au point d'une méthode et application au cas du maïs chez les petits producteurs du Brésil Central

François Affholder

► To cite this version:

François Affholder. Modélisation de culture et diagnostic agronomique régional. Mise au point d'une méthode et application au cas du maïs chez les petits producteurs du Brésil Central. Physique [physics]. Institut national agronomique paris-grignon - INA P-G, 2001. Français. NNT: . tel-00006864

HAL Id: tel-00006864

<https://theses.hal.science/tel-00006864v1>

Submitted on 10 Sep 2004

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.

INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE PARIS-GRIGNON

THÈSE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE PARIS-GRIGNON

présentée et soutenue publiquement

par

François AFFHOLDER

le:10 décembre 2001

Titre:

Modélisation de culture et diagnostic agronomique régional.

*Mise au point d'une méthode et application au cas du maïs chez les petits producteurs
du Brésil Central.*

Directeur de Thèse:

Alain CAPILLON

JURY

Bernard SEGUIN,	directeur de recherche, INRA	rapporteur
Jacques WERY,	professeur, ENSAM,	rapporteur
Olivier ATTEIA	professeur, Université Bordeaux III	examineur
Alain CAPILLON,	directeur de département, CIRAD	examineur
José MADEIRA,	directeur adjoint EMBRAPA-CPAC	examineur
Jean ROGER-ESTRADE	maître de conférence INA-PG	président

RÉSUMÉ

Les diagnostics régionaux des causes des pertes de productivité des cultures restent un préalable indispensable pour réduire ces pertes. Les méthodes disponibles ne permettent cependant pas d'évaluer l'impact sur le rendement des différentes contraintes repérées, mais seulement leur fréquence d'occurrence dans un réseau de parcelles de producteurs. En outre, le suivi d'un tel réseau au cours d'un petit nombre d'années n'est pas suffisant pour tenir compte de l'influence de la variabilité inter-annuelle du climat dans la manifestation de ces contraintes.

Cette thèse développe une méthode nouvelle et la met à l'épreuve dans une étude de cas. Fondée sur une enquête de terrain et sur la construction puis l'exploitation d'un modèle « ad hoc » de simulation de culture, cette méthode facilite la détection des contraintes et les hiérarchise de manière plus objective que dans les méthodes antérieures, mais ne supprime pas toute subjectivité au diagnostic réalisé. Elle permet de replacer, pour une série de saisons agricoles représentatives du climat local, un diagnostic élaboré pour les quelques années de l'enquête.

Dans l'étude de cas, sur maïs chez les petits producteurs des Cerrados brésiliens, la modélisation a consisté à adapter le modèle STICS pour améliorer son module de bilan hydrique pour le contexte tropical et introduire les effets de la toxicité aluminique, de l'excès d'eau et de la compétition entre culture et adventices pour la lumière, l'eau et l'azote. Le diagnostic local a montré que l'essentiel des pertes de productivité étaient dues à de mauvaises mises en culture, dues aux carences de la gestion des tracteurs et semoirs par les associations de producteurs.

Mots-clés: **modèle, analyse du rendement, simulation, maïs, système de culture, contraintes, bilan hydrique, toxicité aluminique, adventices, parcelles de producteurs.**

Crop Modeling and Regional Yield Gap Diagnosis.

Development of a Method and Case Study of Maize in Small-scale Farms of Central Brazil.

ABSTRACT

In order to reduce locally the gap between potential and real yields, it is essential to diagnose its causes. The available methods, however, do not allow to assess the impact on yield of the identified constraints, but only evaluate their frequency of occurrence in a farmers' fields network. Furthermore, monitoring such network during a small set of years does not allow to take adequately into account the influence of inter-annual climate variability on the occurrence of these constraints.

This thesis develops a new method and tests it in a study case. Based on an on-farm survey and on the building and use of an *ad hoc* crop model, this method facilitates the detection of constraints and classifies them in a more objective hierarchy than with previous methods, although it does not suppress all subjectivity in the diagnosis. It allows to extrapolate, for a series of growing seasons representing the local climate, a diagnosis built for the few years of the survey.

In the case study, on maize crop of small-scale farmers in the Brazilian Cerrados region, the modeling performed resulted (i) in modifications in STICS model in order to improve its water balance module for the tropical context, and (ii) in new functions accounting for Aluminum toxicity, water excess and competition between crop and weeds for light, water and nitrogen. The local diagnosis showed that most of yield gap was due to incorrect crop establishment, itself resulting from shortcomings of associations of farmers in managing the collective farm machinery.

Keywords: **model, yield gap analysis, simulation, maize, cropping systems, constraints, water balance, Aluminum toxicity, weeds, on-farm survey.**

Résumé étendu

Les diagnostics régionaux des causes des pertes de productivité des cultures restent un préalable indispensable pour réduire ces pertes. Les méthodes disponibles ne permettent cependant pas d'évaluer l'impact sur le rendement des différentes contraintes repérées, mais seulement leur fréquence d'occurrence dans un réseau de parcelles de producteurs. En outre, le suivi d'un tel réseau au cours d'un petit nombre d'années n'est pas suffisant pour tenir compte de l'influence de la variabilité inter-annuelle du climat dans la manifestation de ces contraintes.

La présente thèse propose une méthode pour remédier à ces inconvénients, basée sur le recours à un modèle de simulation de culture. Ce dernier permet d'évaluer, pour de longues séries de données climatiques représentatives du climat local, les effets qu'aurait chacune des contraintes repérées si elle était la seule à agir, ainsi que les effets des interactions entre contraintes, compte tenu du niveau qu'elles atteignent dans les parcelles des producteurs.

Aucun modèle de culture n'étant universel, il faut cependant disposer d'un modèle capable de simuler correctement les effets des principales contraintes présentes dans la région étudiée, ce qui impose en réalité de le construire progressivement à mesure que le diagnostic précise la liste de ces contraintes. La méthode proposée peut donc être vue à la fois comme méthode de diagnostic agronomique régional et comme méthode de construction d'un modèle ad hoc pour une région agricole.

Appliquée au cas de la culture du maïs chez les petits producteurs de la région de savanes (Cerrados) du centre du Brésil, cette méthode a conduit à modifier le modèle STICS pour améliorer la simulation du bilan hydrique en contexte tropical puis pour introduire les effets, sur la croissance et le rendement, des contraintes de toxicité aluminique, d'excès d'eau dans la zone racinaire et de compétition entre culture et adventices pour la lumière, l'eau et l'azote. L'exploitation du modèle et des données de l'enquête agronomique a ensuite permis de mettre en évidence l'importance, pour la région étudiée, des problèmes de gestion collective des tracteurs et semoirs acquis par des associations de producteurs. Une maintenance inadéquate et les modalités de gestion définissant les réglages des outils et leurs dates d'utilisation par les associés conduisent fréquemment à une mise en culture avec des densités de peuplement faibles et dans des conditions favorables aux adventices ainsi qu'aux contraintes azotées et hydriques, aggravées dans quelques cas par la toxicité aluminique réduisant les profondeurs racinaires, et plus souvent par la faible profondeur des sols et leur pierrosité élevée.

La principale limite de la méthode est que l'effort de mesure requis par la modélisation n'est pas toujours compatible avec les contraintes spécifiques d'un réseau, étendu dans l'espace, de parcelles de producteurs. Il en résulte en particulier que la quantification des erreurs de simulation reste imparfaite, sans que ceci remette en cause les apports de la méthode pour élaborer des recommandations en vue d'améliorer localement la gestion de l'écosystème cultivé.

(veja resumo em português, em página III de capa)
(english abstract: cover p IV)

Resumo Expandido

Diagnósticos regionais das causas de perdas de produtividade das culturas ficam indispensáveis para reduzir tais perdas. Todavia, os métodos disponíveis não permitem avaliar o impacto sobre o rendimento das várias limitações identificadas, mas apenas as suas frequências de ocorrência numa rede de parcelas de produtores. No mais, acompanhar tal rede durante poucos anos não é suficiente para tomar em conta o efeito da variabilidade inter-anual do clima na ocorrência destas limitações.

A presente tese propõe um método para remediar estes inconvenientes, baseado sobre o uso de um modelo de simulação de cultivo. Este permite estimar, para séries históricas de dados climáticos representativas do clima local, os efeitos que produziria, se fosse a única agindo, cada limitação identificada, bem como os efeitos resultantes de interações entre limitações, tomando em conta os níveis em quais se encontram as limitações nas lavouras dos produtores.

Nenhum modelo sendo universal, é preciso dispor de um modelo capaz de simular adequadamente os efeitos das principais limitações presentes na região estudada, o que impõe de fato sua progressiva elaboração a medida que o diagnóstico define mais claramente a lista destas limitações. O método proposto pode portanto ser visto como método de diagnóstico agrônômico regional mas também como método de construção de um modelo *ad hoc* para uma região agrícola.

Aplicada ao caso do milho em lavouras de pequenos produtores das savanas do centro do Brasil (Cerrados), este método levou à modificar o modelo STICS para melhorar a simulação do balanço hídrico em contexto tropical, e em seguida a introduzir novos componentes simulando os efeitos, sobre o crescimento e o rendimento, das limitações seguintes: toxicidade alumínica, excesso de água na zona radicular, e competição entre milho e ervas daninhas para luz, água e nitrogênio. A exploração do modelo e dos dados do acompanhamento em lavouras de produtores permitiu mostrar o peso elevado, nas perdas de produtividade, de problemas de manejo da maquinaria coletiva pelas associações de produtores. Má manutenção dos equipamentos, assim como as regras definindo as regulagens dos mesmos e as datas de intervenção nas lavouras, levam frequentemente a instalação da cultura com baixa densidade de plantas e em condições fatoráveis às ervas daninhas bem como aos estresses hídricos e nitrogenados, complicados em alguns casos pela toxicidade alumínica diminuindo a profundidade radicular, e mais frequentemente pela fraca profundidade dos solos e seus altos teores em cascalhos.

O principal limite do método é o esforço de medição necessário à modelagem, nem sempre compatível com as dificuldades específicas de uma rede, estendida no espaço, de lavouras de produtores. Isto resulta particularmente numa imperfeita quantificação dos erros de simulação, sem invalidar a contribuição do método como meio de produzir recomendações para melhorar localmente o manejo do ecossistema cultivado.

REMERCIEMENTS

Eduardo Assad pour l'EMBRAPA-Cerrados, ainsi que Francis Forest et François-Noël Reyniers pour le CIRAD, ont concocté le projet de coopération entre ces deux institutions, dans le cadre duquel s'est inscrit ce travail. Je suis redevable à ces trois passionnés de cette opportunité qu'ils m'ont donnée, de leur enthousiasme et de la très grande confiance qu'ils m'ont accordée. Merci en outre à Eduardo pour son accueil et sa bonne humeur si communicative, et merci à Francis pour son soutien constant et efficace. S'il fallait que ces responsables me fassent confiance, il fallait que d'autres au contraire répugnent à se satisfaire de mes simples intuitions et exigent que j'apporte des preuves de mes allégations. Qui mieux que Florent Maraux pouvait jouer ce rôle ? Merci à lui d'avoir assumé une tâche aussi ingrate, d'avoir pardonné tous mes bougonnements et autres mouvements d'humeur en réponse "à chaud" à ses critiques, et de m'avoir encouragé avec enthousiasme au fur et à mesure que mes réponses "à froid" prenaient forme, en particulier dans les publications associées à cette thèse. Merci également à François Bertin, qui, dans son rôle de représentant du CIRAD au Brésil, m'a assisté dans la gestion et le développement du projet. Lui et son épouse Françoise ont en outre pris soin de moi et de ma petite famille comme ils l'auraient fait de la leur. Je les embrasse.

Un très grand merci aux chercheurs et techniciens de l'EMBRAPA qui m'ont chaleureusement accueilli et soutenu tant sur les routes et les parcelles (et, la nuit venue, les "botecos") de Silvânia que face aux blafards écrans d'ordinateurs du Centre "Cerrados". Parmi les inévitables lacunes de cette thèse, la plus grave est certainement de passer complètement sous silence les départs de cette joyeuse équipe vers le terrain au petit matin avec sandwich de mortadelle trempé dans le café au lait, les pistes tantôt poussiéreuses et brûlantes, tantôt disparaissant sous le déluge tropical, la recherche anxieuse, le Picqhélios brandi tel un bâton de pluie, d'une placette disparue dans un maïs envahi par le "mato" (et grouillant sans aucun doute d'abominables reptiles), la sueur et les diverses petites bêtes volantes qui semblent y voir le plus subtil des nectars, les pauses avec les producteurs devant un cafézinho, voire une pinga, les longues conversations du soir, enfin, devant brochettes et force bière, visant à refaire le monde (en début de soirée, lorsque les esprits étaient encore altérés par la soif) ou à en célébrer la beauté (plus tard dans la nuit)...C'était "Silvânia Jones", les aventuriers de la fazenda perdue ! Dans cette épopée, le premier rôle revenait à "Zoza" Valdivino de Oliveira Pais, compagnon des meilleurs comme des pires moments. Sans son calme, son endurance, sa rigueur et son engouement pour le terrain, que serais-je devenu ? Merci également à Balbino Evangelista pour son aide pleine d'humour sur le dispositif de bilan hydrique in situ et pour sa gestion de la base de données climatiques, à Lucio et Heleno pour leurs nombreux coups de main au laboratoire, à Zé Carlos Gonçalves dos Santos, Vanderley J. Lobo, José Humberto V. Xavier et Carlos H. Carvalho, pour avoir facilité mes premiers contacts avec les agriculteurs, pour leur connaissance intime de Silvânia et pour l'appui qu'ils n'ont jamais manqué de me fournir par la suite. Merci évidemment à Jalles Marques Moreira, qui a couru d'un coin à l'autre de Silvânia pour assurer la bonne marche du dispositif, avec un dévouement permanent. Merci à José Madeira pour sa grande sagesse, ses patientes tentatives de m'initier aux mystères de la pédologie, et pour son appui constant et enthousiaste depuis les plus petites tâches de terrain jusqu'aux grandes interrogations conceptuelles, merci à Fernando Macena pour son extrême gentillesse, son immense disponibilité, son humour, sa patience. Tous deux ont supporté avec un grand stoïcisme mon agitation désordonnée, mes révoltes contre le monde de Bill Gates, mon pauvre Portugais, mes réponses tortueuses à leurs questions claires, ma fumée, et certainement bien d'autres choses dont je ne me suis pas rendu

compte! J'espère que le chemin que nous continuerons à faire ensemble me donnera l'occasion de me faire pardonner. Merci à L. F. Zoby pour m'avoir, avec Philippe Bonnal pour le CIRAD, ouvert la porte de Silvânia, et pour m'avoir guidé par son engagement exigeant pour le développement de l'agriculture familiale au Brésil. Merci aux très nombreux autres, que je ne cite pas ici faute de place mais qui, à Brasilia comme à Silvânia, ont, quotidiennement, facilité ma tâche.

Merci aux agriculteurs de Silvânia, qui m'ont consacré tellement de leur temps si précieux et qui m'ont appris tant de choses, merci Enir, Adair, Nadir, João Diogo, Alonso, José Anísio, José Donizete, Olivar, Osvaldo, Helvécio, José Lúcio, José Ribeiro et tous les autres.

Un grand merci aussi à Monique Jonis et Cyril Douai, stagiaires de l'ENSAM qui se sont succédés à Silvânia et qui m'ont ainsi donné un sérieux coup de main lors des récoltes et pour l'analyse des données, et dont le questionnement m'a poussé à mettre de l'ordre dans mes idées.

Merci également à mes collègues du CIRAD et de l'INRA pour les discussions fertiles et néanmoins joyeuses, leurs commentaires critiques et leurs encouragements. Je pense tout particulièrement à la fine équipe de l'ATP "couplage de modèles", et en premier lieu à Eric Scopel, avec qui j'ai partagé tant de choses sur le terrain de Silvânia comme sur le sien au Mexique puis devant les micros (-ordinateurs et -phones) à Montpellier. Ses solides compétences d'agronome m'ont éclairé maintes fois au milieu de mes sombres bidouillages en Fortran, et son recul m'a sauvé la mise plus d'une fois où j'étais ravagé par le doute. Quant à Philippe Bonnal et Damien Jourdain, je leur suis reconnaissant de leurs efforts pour s'intéresser à nos travaux à l'échelle du système de culture et pour les intégrer à leur propre analyse à l'échelle de l'exploitation. Ils n'ont pas ménagé non plus leur peine pour m'éclairer, dans le sens inverse, sur le fonctionnement des exploitations. Merci à Nadine Brisson pour m'avoir donné les clefs de Stics, avec toute une panoplie d'outils et une mine de références et de contacts pour la modélisation. Merci aussi à Christian Baron pour m'avoir depuis très longtemps initié à ses outils d'interfaçage entre bases de données et modèles, et pour avoir joué le jeu, pourtant frustrant pour un informaticien, des modèles jetables. Merci à Lucien Séguy et Serge Bouzinac pour avoir prêté l'oreille à mes élucubrations, et pour m'avoir encouragé, par leurs critiques exigeantes et légitimes des abus des modèles, à relever le défi d'une modélisation partant des parcelles des producteurs. Je dois aussi remercier les relecteurs anonymes des articles, dont les critiques ont alimenté la thèse. Merci enfin à Serge Marlet et Guy Trébuil pour leurs sages conseils en fin de parcours.

Mes remerciements s'adressent également à Hubert Manichon, qui m'a lancé dans cette aventure et qui a trouvé le temps de me rendre visite sur le terrain, m'offrant un fantastique tour de plaine en sa compagnie, avec profils cultureux et tout et tout: en quelques jours j'ai compris beaucoup de choses ! Alain Capillon a quant à lui assuré la direction de cette thèse: merci pour la confiance dont il m'a témoigné, pour sa grande disponibilité malgré ses responsabilités, pour sa rigueur et pour ses encouragements.

Enfin, à ma douce Muriel, à mes petits zouaves Oscar et Antonin, à mes parents et à mes amis, merci de votre amour.

TABLE DES MATIÈRES

Introduction	11
Chapitre 1: problématique et démarche générale.	15
1.- Silvânia: une révolution agricole accompagnée par un projet de recherche-développement.	17
1.1.-Un milieu physique très hétérogène	18
1.2.-Un contexte économique hautement changeant et incertain, mais des opportunités récentes	21
1.3.-Les exploitations agricoles: une révolution nuancée	22
1.3.1.- Jusqu'à la fin des années 80: de la ruée vers l'or à la crise de la fertilité	22
1.3.2.- Les années 90: un développement spectaculaire des exploitations familiales....	25
1.3.3.-Avec une nouvelle différenciation des établissements. ...	25
1.4.- Quels sont les déterminants de cette différenciation? De nombreuses pistes, avec le risque pour dénominateur commun.	26
2.-Un projet de modélisation bioéconomique des exploitations, pour parvenir à une synthèse	27
2.1.- La modélisation en programmation mathématique des exploitations agricoles	28
2.2.- Le rôle de l'agronomie dans ces modèles	29
3.-Quelles simulations pour renseigner le modèle d'exploitation ?	31
3.1.-Aucun modèle n'est universel	31
3.2.- Une nécessaire modélisation	33
3.3.- Le diagnostic de la variabilité des rendements comme base de modélisation	35
4.- Une méthode itérative de diagnostic et modélisation	40
4.1.- Le point de départ de la démarche: un diagnostic préliminaire	42
4.2.- Phase itérative de "diagnostic et modélisation élémentaires"	42
4.3.- Diagnostic final	45
4.4.- Caractéristiques générales du dispositif expérimental	48
5.- Conclusion: les objectifs du travail et ses principales étapes	49
Chapitre 2:	
choix du modèle de départ et d'un dispositif expérimental.	53
1.- Diagnostic préliminaire de la variabilité des rendements à Silvânia.	55
1.1.- Informations fournies par la littérature	55
1.2.- Pré-enquête	57
2.- Choix du modèle	60
3.- Dispositif expérimental	62
3.1.- Situations culturelles en parcelles de producteur	62
3.2.- Dispositif de calage et de validation du modèle	70
3.2.1.- Essai "Line Source Experiment" (LSE) au CPAC	70
3.2.2.- Dispositif "sonde à neutrons" à Silvânia	71

Chapitre 3.

Premier cycle de modélisation et de diagnostic	77
1.- Modélisation	79
1.1.-Description générale du modèle STICS	79
1.2.- Adaptations préliminaires au contexte tropical	84
1.2.1.- Descente des racines et descente du front d'humectation	85
1.2.3.- Effet de stress post-floraison sur la sénescence foliaire	88
1.3.- Calage	89
1.3.1.- Modules de croissance et de développement en l'absence de contrainte	90
1.3.2.- Module de bilan hydrique	93
1.3.2.1.- Calage	94
1.3.2.2.- Validation	94
1.3.3.- Module de bilan azoté	97
1.4.- Validation de la simulation du rendement et du LAI	100
2. Diagnostic	104
2.1.- Ecart entre rendements simulés et mesurés	104
2.2.- Profils de réduction de croissance	104
2.3.- Diagnostic en termes de fréquence d'apparition des contraintes	109
3.-Conclusion	115

Chapitre 4:

Second cycle de modélisation et de diagnostic	119
1.- Introduction	121
2. Modélisation	121
2.1.- Généralités sur la démarche utilisée	121
2.2.- Effets de la toxicité aluminique et de la déficience en Ca	122
2.3.- Introduction de l'effet de l'anoxie du sol sur la croissance racinaire	126
2.4.- Simulation d'une population d'adventices et des ses effets sur la culture	128
2.4.1. Choix d'une approche pour la modélisation	128
2.4.2 Modifications résultant de l'introduction de nouvelles fonctions	129
2.4.2.1.- Levée des adventices	129
2.4.2.2.- Croissance aérienne des adventices	129
2.4.2.3.- Effet de la lutte contre les adventices par le producteur.	131
2.4.3.- Modification introduites sur des modules pré-existants de STICS.	131
2.4.3.1.- Réduction du rayonnement par les adventices	131
2.4.3.2.- Modification du bilan hydrique	132
2.4.3.3.- Modification du bilan d'azote.	132
2.4.4.-Calage sur des situations contrastées	133
3.- Diagnostic et validation empirique du modèle	138
4.- Conclusion	140

Chapitre 5:

Facteurs édaphiques et techniques responsables des principales contraintes	143
1.- Détails de la méthodologie.	146
1.1.- Hiérarchie des contraintes	146
1.2.- Hiérarchie des paramètres d'entrée du modèle	148
1.2.1.- Cas général	148
1.2.2.- Cas des facteurs interagissant avec le climat	148
1.3.- Typologie des situations culturales et possibilités de réduction des écarts entre rendements potentiels et rendements observés.	150
2.- Fréquence et impact des contraintes et de leurs causes pour les trois années de l'enquête agronomique	153
2.1.- Effets simples des contraintes	153
2.2.- Interactions entre contraintes	157
3.- Extrapolation du diagnostic pour une série historique de données pluviométriques	159
3.1.- Influence du ruissellement	160
3.2.- Influence de l'anoxie dans la zone de croissance des racines.	163
3.3.- Sensibilité du rendement à la date de semis	164
3.4.- Sensibilité du rendement au calendrier de lutte contre les adventices	172
4.- Synthèse de la hiérarchie des contraintes et de leurs causes élémentaires	176
5.- Distribution, chez les producteurs, des facteurs techniques et édaphiques à l'origine des contraintes	177
5.1.- Contrainte Aluminium et calcique à l'enracinement.	177
5.2.- Faibles densités de plantes à la levée	178
5.3.- Lutte contre les adventices	183
5.4.- Entrées d'azote	184
5.5.- Réserve utile des sols	185
5.6.- Date de semis	186
6. Conclusion: Synthèse des causes édapho-techniques des contraintes et typologie des systèmes de cultures et des milieux.	187
 Chapitre 6:	
Discussion et Conclusion Générales	191
1.- Sur les erreurs du modèle.	193
2.- Sur le diagnostic local des contraintes limitant la productivité et des moyens de les réduire.	195
3.- Sur la méthode lorsque l'objectif est le diagnostic	196
3.1.- Principaux points forts de la méthode	196
3.2.- Limites et possibilités d'amélioration	200
4.- Sur la modélisation	204
5. Conclusion générale	207
 RÉFÉRENCES	 209
 ANNEXES	 217

Introduction

Avec l'essor de la micro-informatique, le principe de simuler sur ordinateur des systèmes complexes comme les écosystèmes cultivés est apparu aux chercheurs comme un formidable moyen à la fois pour mieux comprendre ces systèmes et pour en prédire le comportement. Ceci a justifié notamment un effort de recherche important, depuis plusieurs décennies, pour contribuer à la construction de modèles de simulation de culture, avec l'espoir de leur conférer un domaine d'application toujours plus étendu. En l'absence d'un modèle universel de simulation capable de reproduire le comportement de tout écosystème cultivé, toutefois, l'objectif d'application d'un modèle pour résoudre un problème pratique exige des "modèles d'ingénieurs", différents de ceux visant à construire notre connaissance générale du système (Passioura, 1996). La nécessaire utilisation de relations empiriques, dans ces modèles d'ingénieurs, limite leur domaine de validité à l'environnement où ces relations ont été obtenues. Ils sont donc en toute rigueur à construire et valider pour chaque nouvelle application, dans la recherche d'un compromis entre complexité et robustesse, c'est à dire entre le niveau de détail avec lequel ils représentent la réalité et leur exigence en paramètres d'entrée. Mais la prise de conscience tardive, chez les agronomes, de la non-universalité de ces modèles, a conduit à une certaine rareté des travaux portant sur les moyens d'obtenir ce compromis. Les travaux existants fournissent des principes applicables à partir du moment où l'on connaît la hiérarchie, pour l'environnement étudié, des processus responsables des variations de la grandeur à simuler, mais ils ne précisent pas comment établir cette hiérarchie.

Par ailleurs, lorsque la variable à laquelle on s'intéresse est le rendement d'une culture, cette question de la hiérarchie de ses causes de variation à l'échelle d'une petite région a été abondamment traitée par l'agronomie française sous le nom de diagnostic agronomique régional. Dans la méthode générale qui en a résulté (Doré *et al.*, 1997), cependant, cette hiérarchie est établie principalement en termes de fréquence des contraintes. Leur impact sur le rendement, et surtout l'intensité des interactions entre contraintes est peu quantifié. Baser la modélisation du rendement d'une culture sur cette hiérarchie ne risque-t-il pas de conduire à négliger des contraintes rares mais intenses, ayant des conséquences importantes pour l'activité agricole ? Ou inversement à donner de l'importance à des contraintes fréquentes mais sans grandes conséquences ? Quelles interactions entre contraintes sont-elles importantes à prendre en compte dans un modèle ? Lesquelles peuvent-elles être négligées ?

L'objet de cette thèse est de contribuer à combler cette double lacune de la modélisation et du diagnostic de la variabilité du rendement, **en développant une méthode qui peut être vue tout d'abord comme méthode de diagnostic agronomique mais aussi comme méthode de modélisation d'une culture pour le contexte d'une petite région agricole**. La méthode est d'abord formalisée puis mise à l'épreuve d'un cas réel et discutée à la lumière de cette application.

Dans une première partie du mémoire, le cas particulier pour lequel un modèle de culture était requis est d'abord présenté: il s'agissait de contribuer à un projet pluridisciplinaire d'analyse des choix stratégiques des petits producteurs du centre-ouest brésilien, en fournissant des estimations des rendements du maïs, culture clé dans leurs exploitations, en fonction des sols, du climat, et du système de culture. La présente thèse ne prétend pas restituer l'ensemble de ce projet, dont elle n'est qu'une composante, mais il était nécessaire d'en donner quelques détails déterminant les caractéristiques du modèle de culture à construire. La méthode permettant de construire progressivement à la fois le diagnostic agronomique et le modèle est ensuite formalisée en partant de l'état de l'art de la modélisation des cultures et du diagnostic agronomique, puis le dispositif mis en place pour son application est décrit.

Une deuxième partie présente les résultats par grandes étapes de la démarche.

En troisième partie, est conduite une discussion générale de la méthode et des résultats du cas traité.

MATÉRIEL ET MÉTHODE

Chapitre 1: problématique et démarche générale.

1.- Silvânia: une révolution agricole accompagnée par un projet de recherche-développement.

Silvânia est une petite région agricole du centre du Brésil où domine une agriculture familiale particulièrement exposée aux risques climatiques et économiques, dans un contexte de changement spectaculaire à la fois des techniques de production et des conditions d'accès au marché.

Il s'agit d'un *município*, unité administrative élémentaire du Brésil, s'étendant vers le sud à une centaine de kilomètres de Brasilia, couvrant 3000km² et comprenant environ 2500 établissements agricoles (fig.1.1).



Figure 1.1.- Localisation du *Município* de Silvânia

1.1.-Un milieu physique très hétérogène

Silvânia se trouve au coeur de la région des Cerrados, qui couvre l'ensemble du plateau central brésilien sur près de deux millions de kilomètres carrés. Le climat de l'ensemble de cette région est favorable à une forêt dense sèche à subhumide, puisque la pluviométrie moyenne annuelle répartie sur quatre à huit mois de saison humide y est comprise, sauf pour une étroite frange orientale plus aride, entre 1000 et 2000mm, avec une évapotranspiration potentielle de 1500 à 1800 mm par an (Adámoli *et al.*, 1987). Pourtant, les formations végétales naturelles, regroupées sous le terme "*cerrados*", s'apparentent à une savane. Cet écart entre les potentialités climatiques et les formations végétales naturelles, resté longtemps mystérieux, s'explique par de fortes contraintes édaphiques (Alvim, 1996; Eiten, 1994; Ferri, 1980; Goodland et Ferri, 1979). La densité de plantes arbustives et arborées varie fortement dans le paysage en relation avec l'intensité de ces contraintes. La principale d'entre elles est la forte acidité des sols et la présence d'aluminium échangeable à des taux élevés, limitant le développement racinaire de la plupart des espèces, et à l'origine du développement tortueux des parties aériennes de nombreuses espèces ligneuses sensibles à la toxicité aluminique. Le taux de saturation du complexe d'échange par l'aluminium varie fortement dans le paysage, en fonction à la fois de la teneur en bases du matériau d'origine et du niveau de lessivage du sol. Sur les situations de plateau- les *chapadas*- le niveau de lessivage est tel, du fait de l'ancienneté des sols, que l'influence du matériau d'origine est extrêmement faible, et l'on a affaire à des situations relativement homogènes. Sur les surfaces d'érosion récente que constituent les versants, ainsi que dans les vallées, l'hétérogénéité des sols est au contraire très élevée, en relation avec l'hétérogénéité du matériau d'origine et avec la variabilité des phénomènes de colluvionnement-alluvionnement impliqués dans la genèse des sols. Enfin, la présence d'une nappe d'eau à faible profondeur, le long des cours d'eau, compense partiellement les contraintes chimiques du sol et permet la présence d'une forêt galerie, ou au contraire, lorsque les conditions d'anoxie prédominent dans la zone racinaire, donne lieu à une steppe hygrophile (Adámoli *et al.*, 1987).

Le *município* de Silvânia lui même reçoit une pluviométrie moyenne de 1500mm, la saison des pluies débutant mi-septembre et se terminant fin mars. Des périodes de sécheresse de 5 à 20 jours, redoutées par les producteurs et connues sous le nom de *veranicos*, peuvent se produire entre mi-janvier et fin février et constituent le principal risque d'origine climatique pour l'activité agricole (Assad, 1994; Steinmetz *et al.*, 1988). La région étant au contact du massif

central du Goiás, des zones de chapada et des zones de relief vallonné y coexistent. Une grande part des substrats géologiques présents dans les cerrados se rencontre à Silvânia (fig. 1.2), à l'exception des basaltes et des calcaires, la richesse de la roche en minéraux ferro-magnésiens augmentant grossièrement selon un gradient Nord-Est / Sud-Ouest (Madeira, comm pers.). Grossièrement, les sols de plateau présentent des contraintes chimiques fortes mais des propriétés physiques très favorables, et sont majoritairement exploités par les grandes exploitations de maïs-soja ou d'élevage bovin extensif. Les sols de versants et de bas de toposéquence sont extrêmement diversifiés et présentent pour la plupart des contraintes physiques. C'est sur les qualités chimiques de ces sols, exploités par les petits et moyens producteurs de Silvânia, que l'influence du substrat géologique est perceptible (tableau 1.1).

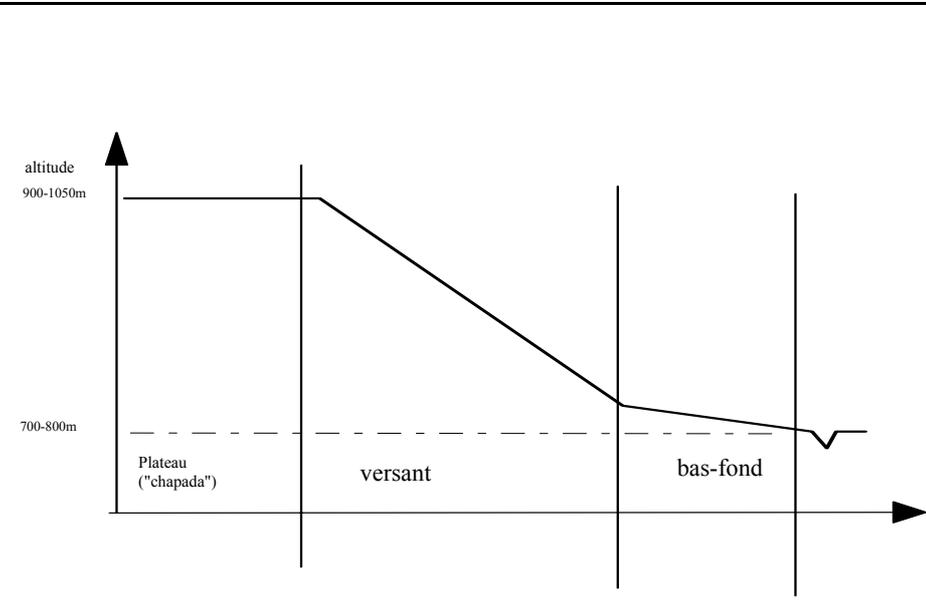
	 <p>Le diagramme illustre la toposéquence à Silvânia. L'axe vertical représente l'altitude, avec des valeurs de 900-1050m et 700-800m. L'axe horizontal représente la distance ou la position dans la toposéquence. La courbe de terrain est divisée en trois zones principales : un plateau ('chapada') à l'altitude la plus élevée, un versant en pente descendante, et un bas-fond à l'altitude la plus basse. Des lignes verticales marquent les transitions entre ces zones.</p>		
terme vernaculaire	<i>terra de cerrado</i>	<i>terra de meia cultura</i> (situations fertiles) <i>terra de campo</i> (situations peu fertiles)	<i>terra de cultura</i>
profondeur du sol	très élevée (>300cm)	très variable (50 à 200 cm)	relativement élevée et variable (100 à 200 cm)
pierrosité	nulle	très variable, de nulle à élevée (dominance de pierrosités élevées)	modérée
fertilité chimique	faible	variable de faible à élevée	élevée
influence relative du substrat géologique sur (Ca+Mg)/Al	faible	élevée	intermédiaire
types de sols (taxonomie brésilienne)	<i>latossolos</i>	<i>cambissolos, latossolos</i>	<i>podzolicos, cambissolos, terra roxa, solos aluviais</i>

Tableau 1.1.- Distribution des caractéristiques des sols dans la toposéquence à Silvânia (d'après Madeira, comm. pers.)

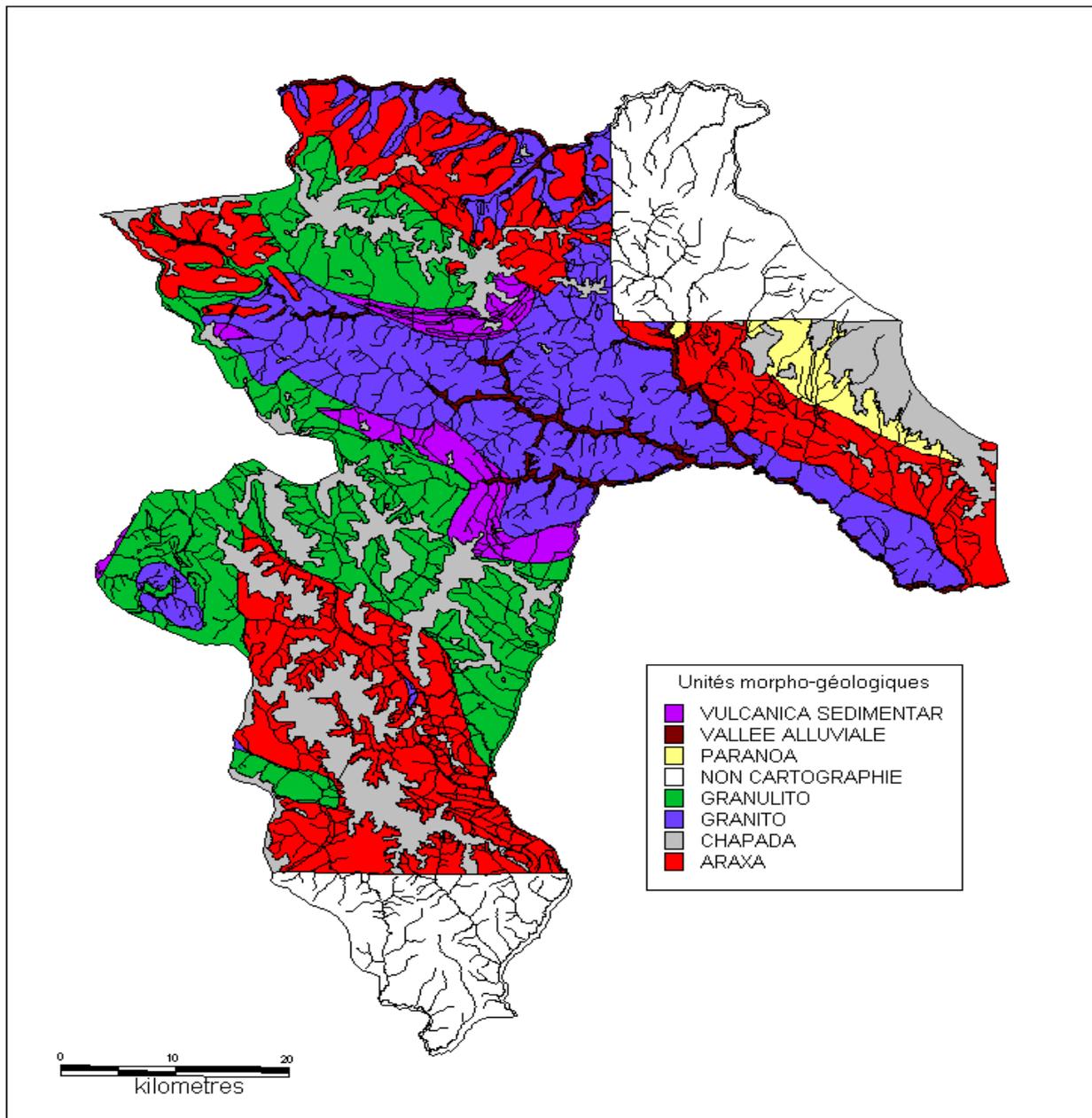


Figure 1.2.- Carte morpho-géologique de Silvânia (Madeira, Système d'Information Géographique de Silvânia, EMBRAPA-CPAC). L'unité "GRANITO" est très variable du point de vue de la teneur en minéraux ferro-magnésiens, augmentant du NE vers le SW (Madeira, comm. pers.)

1.2.-Un contexte économique hautement changeant et incertain, mais des opportunités récentes

Pendant les années 80, et jusqu'à mi-1994, le Brésil a connu une période d'hyperinflation. La politique agricole favorisait, via des crédits à des taux inférieurs à l'inflation, le secteur agro-industriel orienté vers les produits d'exportation, qui contribue au paiement de la dette du pays. Fernando Cardoso, avec son "plan Real" mis en place en juillet 1994, a mis fin à cette période. Les taux d'intérêt sont devenus brusquement supérieurs à l'inflation. Devenus très défavorables, ils ont été renégociés à la baisse par les grands producteurs mais ont cessé de représenter une subvention indirecte. Les prix des produits sont devenus transparents pour tous les opérateurs, mais sont caractérisés, surtout jusqu'en 1997, par une variabilité élevée, alors qu'à l'époque de l'inflation, les variations de prix dans la monnaie brésilienne cachaient en fait une relative stabilité des prix en dollars. Le ciseau des prix entre les principaux produits agricoles et les intrants nécessaires pour les produire (fig. 1.3) est passé, au début du plan, par une phase favorable aux agriculteurs, la plupart des produits se renchérissant davantage que les intrants du fait d'une augmentation importante de la demande intérieure. Mais à partir de 1996, les prix de nombreux produits, dont les céréales et le lait, ont baissé par rapport à leur niveau antérieur en raison de l'ouverture de l'économie brésilienne à la concurrence, surtout à travers la mise en place du Mercosur, zone de libre échange du cône sud de l'Amérique Latine. Les prix des intrants, quant à eux, sont restés stables à la même période, conduisant à une situation plus défavorable pour les producteurs (Affholder *et al.*, 1998; Bainville, 2000).

Progressivement, enfin, peu après la mise en place du plan Réal, une nouvelle orientation politique plus favorable à l'agriculture familiale apparaît, se concrétisant en 1996 par la mise en place d'un programme de crédit et d'appui à réservé à ces établissements, le PRONAF (Bainville, 2000).

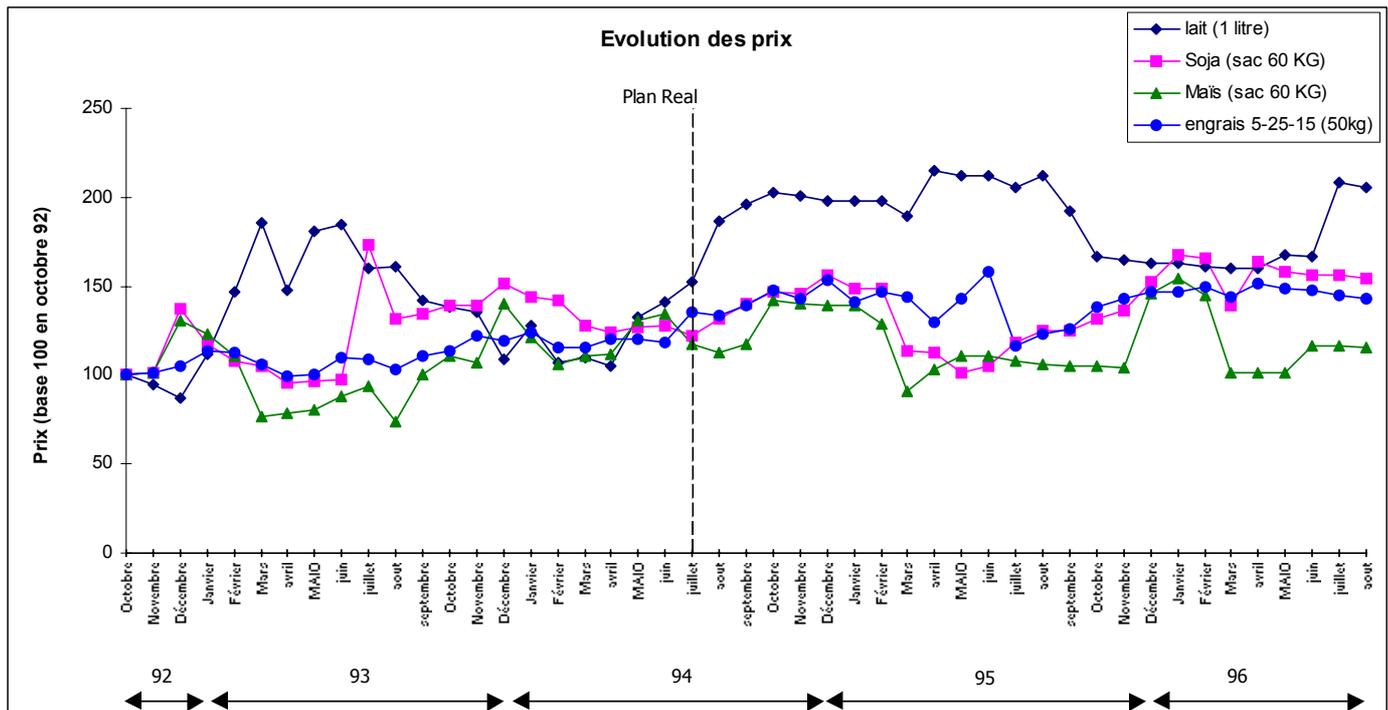


Figure 1.3.- Evolution du contexte économique de l'agriculture brésilienne avant et après le plan Réal. D'après Bonnal, Affholder et Bainville, données non publiées. Source des données: base de données EMBRAPA/CIRAD "réseau de fermes de référence".

1.3.-Les exploitations agricoles: une révolution nuancée

1.3.1.- Jusqu'à la fin des années 80: de la ruée vers l'or à la crise de la fertilité

L'histoire agraire du *município*, de la colonisation jusqu'à la fin des années 80, a été étudiée par Donnars *et al*, (1993) et éclaire la situation actuelle des exploitations.

La région du massif central du Goiás, à laquelle appartient en partie Silvânia, présente la particularité d'avoir été colonisée dès le milieu du XVIIIe siècle par les *bandeirantes* qui y trouvèrent des filons aurifères, alors que pour l'essentiel, la colonisation des Cerrados n'a été effective qu'après la création de Brasília, au début des années 60. Au début du XIXe siècle, avec l'épuisement des ressources en minerai précieux, l'activité agricole est progressivement devenue le mode de subsistance principal des habitants de Silvânia, les plateaux et les versants étant réservés à l'élevage bovin extensif tandis que les "*terra de cultura*", en bas de toposéquence, sont exploitées par défriche-brûlis et portent riz, maïs, haricot, manioc et coton.

Dans ses grandes lignes, ce système perdure jusqu'à la mise en place par les gouvernements militaires de la toute jeune Brasília, au cours des années 60, d'une politique agricole favorable à la mise en valeur de la région des cerrados à travers des cultures d'exportation (soja et maïs), comme évoqué plus haut. Des groupes agro-industriels du sud du pays, bénéficiant des conditions de crédit très favorables qui leur sont offertes, fondent de grands domaines (de 1000 à plus de 10000 ha) en acquérant les terres de plateau. Celles-ci sont d'ailleurs cédées à bas prix par les autochtones, qui ignorent les vertus du chaulage. En quelques années, un nouveau système agraire apparaît. Les plateaux sont majoritairement occupés par ces grands domaines, dont la gestion est le plus souvent confiée à des migrants venus également du sud, où les exploitations sont devenues trop petites au gré des successions. Soja et maïs y sont cultivés dans des systèmes hautement mécanisés, sur les *latossolos* corrigés par amendements calciques, relativement peu coûteux compte tenu de la présence d'abondants gisements de calcaire à une centaine de kilomètres de Silvânia. D'autres exploitations, moins nombreuses mais également de taille très élevée, pratiquent un élevage bovin extensif, basé sur des pâturages cultivés en *Brachiaria* spp.

Exploitant le reste de la toposéquence, sur laquelle elles sont établies suivant un modèle très peu variable (fig. 1.4), les exploitations appartenant aux descendants des premiers colons, qui pratiquaient une agriculture de subsistance proche de celle du siècle précédent, entrent en crise. Elles ne disposent plus des plateaux pour leur élevage bovin et la pression démographique sur les terres de culture est devenue telle que les friches y ont presque disparu. Le renouvellement de la fertilité des terres ne peut plus être assuré par la défriche-brûlis. La taille des exploitations, comprise entre 5 et 100ha (dont 1 à 20ha seulement sont cultivables), est le plus souvent inférieure à la superficie minimale exigée pour bénéficier des crédits subventionnés par l'état. Les agriculteurs vendent leur force de travail aux grandes exploitations des plateaux et louent les tracteurs de ces dernières pour la mise en culture de leurs propres terres. Lors des divisions de ces exploitations, à l'occasion des successions, les difficultés s'accroissent, et de nombreuses familles se prolétarisent .

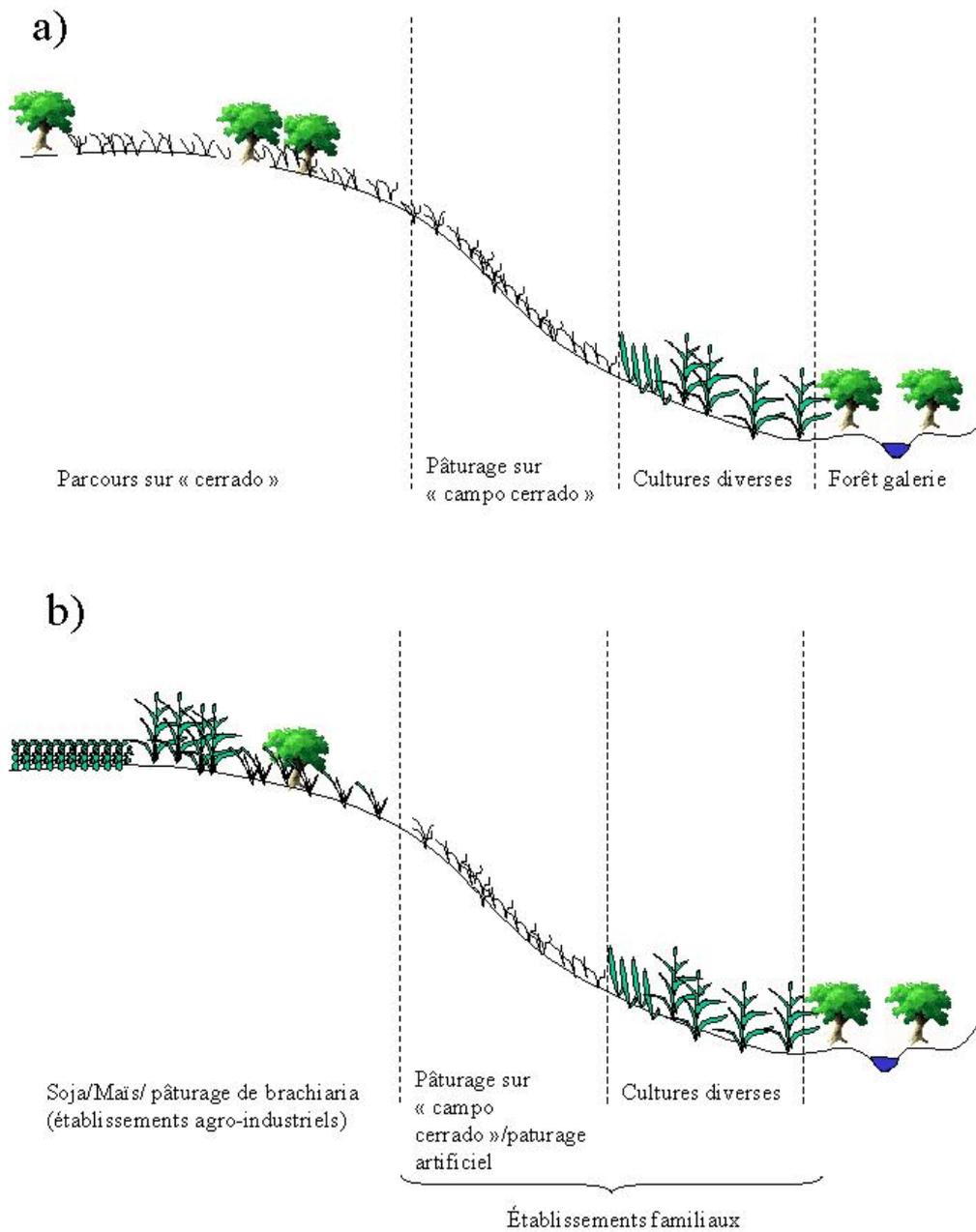


Figure 1.4. Exploitation des toposéquences à Silvânia, a) avant l'arrivée des migrants et b) après mise en valeur des plateaux par ces derniers (adapté de Donnars *et al.* (1993)).

1.3.2.- Les années 90: un développement spectaculaire des exploitations familiales....

A partir du début des années 90, pourtant, grâce à un vaste mouvement associatif de producteurs, et avec l'appui d'un projet de recherche-développement mis en oeuvre par l'EMBRAPA, le CIRAD et les structures d'encadrement des producteurs (EMATER, en particulier), un grand nombre de ces exploitations familiales se développe de façon spectaculaire. Résumés ci-après, les travaux du projet de recherche-développement, dit projet "Silvânia", décrivent ce processus de développement (Bainville, 2000; Bonnal *et al.*, 1994; Figuié, 2001; Zoby, 1998). Les associations de producteurs obtiennent l'accès aux crédits d'investissement et de campagne, en mettant collectivement leurs terres en garantie. Des tracteurs, des outils de travail du sol et des semoirs sont acquis collectivement, et le crédit de campagne permet de recourir aux engrais, aux variétés améliorées et d'employer de la main d'oeuvre. Le rôle du projet Silvânia est d'améliorer le conseil aux exploitants en le basant sur un diagnostic des systèmes de production, et de mettre au point des techniques de production adaptées au contexte de ces exploitations. Progressivement, ces dernières évoluent vers un élevage laitier intensif s'appuyant sur la culture continue du maïs, sur des fourrages tels que la canne à sucre où l'herbe à éléphant (*Pennisetum purpureum*), préférentiellement sur les terres de culture, et sur des pâturages cultivés en *Brachiaria* sur les versants. La culture de riz, quant à elle, tend à disparaître. Cette transition commence par une augmentation de l'offre fourragère des exploitations, rapidement suivie par le remplacement du bétail rustique peu productif (race locale croisée avec des zébus Nelor) par des animaux plus performants de race Holstein (Figuié, 2001). Des suivis pluri-annuels montrent, pour des exploitations ayant suivi l'ensemble de ce parcours, une augmentation très significative des productivités de la terre, des animaux et du travail, et une nette augmentation du revenu des exploitants (Bainville, 2000). Cette véritable révolution agricole en cours dynamise l'ensemble de l'économie locale de manière évidente et contrastée par rapport aux régions avoisinantes.

1.3.3.-Avec une nouvelle différenciation des établissements.

Au cours des années, cependant, il apparaît que toutes les exploitations ne suivent pas ce schéma d'évolution: certaines semblent se stabiliser à des niveaux de spécialisation et d'intensification inférieurs, tandis que d'autres encore restent presque complètement à l'écart du

mouvement. On assiste donc à une différenciation nouvelle des exploitations: à la différenciation “structurelle” par leur dotation en facteurs de production (terre, travail, et capital), observable il y a quelques années (Bonnal *et al.*, 1992), s’ajoute une différenciation “fonctionnelle”, en termes de degré d’intensification et de spécialisation (Bainville, 2000). Un facteur régional semble impliqué dans cette différenciation, car les exploitations les plus spécialisées et intensives sont nettement plus fréquentes dans certaines régions que dans d’autres.

1.4.- Quels sont les déterminants de cette différenciation? De nombreuses pistes, avec le risque pour dénominateur commun.

Les exploitations qui se sont le plus développées sont passées de systèmes de production extensifs et combinant de multiples activités, donc particulièrement robustes aux risques (Eldin et Milleville, 1989; Matlon, 1990), à des systèmes à priori nettement plus vulnérables car très intensifs et hautement spécialisés, dans lesquels les risques proviennent:

- de la variabilité des prix des intrants, et des produits vendus, le lait et le maïs.
- de la variabilité des rendements du maïs résultant de l’aléa climatique (Affholder *et al.*, 1998).

Les niveaux diversifiés d’évolution des exploitations de Silvânia, entre un point de départ généralisé et un extrême atteint par un nombre limité d’exploitations, sont-ils des étapes intermédiaires vers un même système destiné à être progressivement adopté par tous ? S’agit-il plutôt d’une réponse différenciée des exploitations en fonction de leurs caractéristiques biophysiques, économiques et sociales, conditionnant le niveau de risque qu’elles supportent et acceptent ? Quels sont alors les poids relatifs de ces trois grands types de caractéristiques ?

Dans l’équipe pluri-disciplinaire du projet Silvânia, chaque chercheur disposait en effet d’arguments pour expliquer par ses connaissances disciplinaires l’évolution différenciée des exploitations, sans qu’il soit possible de parvenir à une synthèse des points de vue, et conduisant à des propositions d’action d’une cohérence décevante par rapport aux ambitions généralement affichées dans les projets de recherche-développement.

Pour certains des sociologues du projet, ce qui était en cause c’était avant tout la capacité d’entreprise des producteurs (savoir technique et aversion aux risques), variable entre groupes

sociaux. Le fait que les exploitations les moins spécialisées étaient regroupées dans certaines régions s'expliquait alors par un isolement de ces régions par rapport à la circulation de l'information. La proposition d'action portait sur l'animation et l'information de groupes d'agriculteurs en vue notamment de réduire leur aversion aux risques. Pour le pédologue et l'agronome du système de culture, le risque dépendait avant tout du milieu physique dans lequel est placée l'exploitation, et l'on devait rechercher des systèmes de production adaptés à chaque type de milieu. Pour les économistes de l'exploitation agricole, l'évolution des exploitations était déterminée par la structure de l'exploitation au départ et par l'aptitude à réduire les coûts d'accès au marché de l'association à laquelle appartient le producteur (Bainville, 2000). Le niveau de risque dépend en effet du nombre de dépendants à nourrir par rapport à la force de travail et à la surface cultivable disponibles dans l'exploitation, ainsi que du rapport entre les prix des intrants et des produits, sur lesquels les associations de producteurs peuvent agir plus ou moins efficacement. Cependant, la polarisation régionale de la spécialisation laitière n'était alors qu'imparfaitement expliquée par l'enclavement de certaines zones et l'augmentation des coûts d'accès au marché qui en résultait.

2.-Un projet de modélisation bioéconomique des exploitations, pour parvenir à une synthèse

La nécessité de tenir compte des risques, dans l'analyse de la différenciation des exploitations, a conduit l'équipe du projet à retenir une approche par modélisation. Elle seule permet en effet de projeter sur une longue période de temps des parcelles cultivées, des exploitations, voire des régions, en reproduisant, à partir de connaissances acquises au cours d'un nombre limité d'années la variabilité temporelle du ou des facteurs de risque.

La synthèse recherchée devait établir les poids relatifs des contraintes biophysiques, sociales et économiques dans le déterminisme du choix par l'exploitant d'un système de production parmi les différents systèmes observables dans la région. Il était donc nécessaire d'intégrer des connaissances sur la socio-économie des exploitations et des connaissances biophysiques portant sur les résultats, en termes de rendement, de différentes techniques de production appliquées aux différents milieux. La question posée amenait ainsi l'équipe à envisager une modélisation bio-économique des exploitations.

2.1.- La modélisation en programmation mathématique des exploitations agricoles

La méthode de modélisation retenue par les spécialistes de l'exploitation agricole, dans cette équipe, était celle de la "programmation mathématique", généralisation de la méthode dite de "programmation linéaire", et considérée comme la mieux adaptée pour simuler les décisions stratégiques des exploitants (Jourdain, 1999). Le postulat sur lequel est basée cette méthode, est que les producteurs, dans le but de réaliser leur projet social et économique, font des choix stratégiques rationnels basés sur leur connaissance:

- des ressources de leur exploitation,
- de l'environnement biophysique
- de l'environnement économique,
- des techniques de production disponibles.

Comme, en outre, la connaissance que l'on peut avoir de l'environnement biophysique et économique n'est pas complète, ils doivent affronter des risques. On désigne communément par "état de nature" une réalisation donnée des conditions de l'environnement qui échappent au contrôle de l'exploitant et dont les différentes modalités possibles, avec leurs probabilités de réalisation décrivent le risque auquel le producteur est confronté. Il peut s'agir par exemple des conditions climatiques et de l'ensemble des prix réellement observés une année donnée, ou représentant une année typique. On désigne par "modèle de décision stratégique des exploitations" le modèle construit selon ce postulat.

La modélisation en programmation mathématique consiste à décrire les différentes activités élémentaires que l'agriculteur peut mener, qui génèrent des produits et consomment des ressources. Les contraintes propres à l'exploitation, telles que les surfaces disponibles dans les différents types de milieux et la force de travail présente, sont fournies en entrée au modèle. Par un processus d'optimisation, le programme recherche la combinaison d'activités élémentaires qui permet de mieux réaliser les objectifs de l'exploitant, décrits par une fonction des différents produits de ces activités. Cette fonction-objectif est par exemple le revenu annuel de l'exploitation, que le programme cherche à maximiser. La prise en compte du risque est fréquemment assurée en introduisant dans la fonction-objectif le calcul de l'espérance et de la variance du revenu (méthode MOTAD). Une contrainte de sécurité peut également être introduite, imposant par exemple que le revenu ne soit jamais inférieur à une valeur minimum

ou qu'il ne soit inférieur à cette valeur qu'avec une probabilité faible donnée (méthode "target-MOTAD", (Tauer, 1983)). Les seuils de variance ou de revenu minimum acceptés par le producteur représentent son aversion au risque.

Dans les travaux utilisant ces méthodes, ce sont les choix stratégiques des producteurs qui sont étudiés, c'est à dire des choix basés sur une anticipation des événements, tandis que les choix tactiques, par lesquels l'agriculteur adapte sa gestion technique en fonction des événements réalisés, sont négligés. Or, ces choix tactiques peuvent avoir une grande importance dans la gestion des risques: en cas de sécheresse ou d'enherbement important au début de la phase de croissance rapide des céréales, par exemple, la fertilisation d'entretien risque d'être peu valorisée sous forme de gains de productivités et il peut être judicieux de la réduire ou de la supprimer. S'adaptant aux prix du marché à la récolte, le producteur peut aussi décider, au lieu de vendre sa production, de la stocker ou de l'utiliser en intra-consommation dans l'exploitation (pour l'élevage, par exemple) ou encore de l'auto-consommer. Dans le cas du maïs, il peut aussi choisir entre récolter en vert pour l'ensilage ou récolter à maturité pour le grain. En négligeant ces possibilités de choix en cours de campagne, les risques courus par les producteurs peuvent donc être surestimés par les modèles en programmation mathématique.

2.2.- Le rôle de l'agronomie dans ces modèles

Ces modèles supposent que le producteur connaît la fonction de production des activités. Dans le cas des activités de production végétale, cette fonction de production donne le rendement des produits récoltables en fonction de l'espèce cultivée et du cultivar choisi, du climat, des sols et des techniques culturales dont dispose. Ainsi, pour un système de culture **c**, entendu comme une succession d'espèces cultivées selon un itinéraire technique donné (Sebillotte, 1990), et pour chacun des produits **p** récoltés dans ce système de culture, la fonction de production est décrite, dans les modèles d'exploitation en programmation mathématique, par la fonction discrète suivante:

$$\mathbf{QPRO}(\mathbf{p},\mathbf{e})=\sum_{\mathbf{c},\mathbf{z}}\mathbf{SURF}(\mathbf{c},\mathbf{z}).\mathbf{RDT}(\mathbf{c},\mathbf{p},\mathbf{z},\mathbf{e}),$$

où **QPRO(p,e)** est la quantité de produit obtenue pour le produit **p** et pour un "état de nature" **e**, **SURF(c,z)** est la surface occupée par le système de culture **c** dans la zone agro-écologique **z**, et **RDT(c,p,z,e)** le rendement en produit **p** du système de culture **c** dans la zone **z** et pour l'état de nature **e**.

Les connaissances agronomiques sont mobilisées pour:

- décrire le milieu naturel sous forme de zonage (définition des zones agro-écologiques et leur cartographie)

- décrire les systèmes de culture sous forme de typologie,

- fournir la matrice des rendements **RDT(c,p,z,e,t)** c'est à dire des estimations de rendement pour les différentes combinaisons de modalités retenues des produits, des systèmes de culture et des zones agro-écologiques, en considérant les différents états de nature possibles, c'est à dire les différentes situations climatiques.

La structure même des modèles en programmation mathématique impose comme on le voit une prise en compte discrète des systèmes de culture et des milieux naturels, à travers des typologies. La complexité du modèle d'exploitation, et ainsi la difficulté d'interprétation de ses résultats, augmentent en outre plus que proportionnellement avec la taille de la matrice **RDT**. Celle-ci doit donc être construite avec un souci de simplification. Cependant, du fait des nombreuses interactions entre les facteurs impliqués dans le déterminisme de la production des cultures, ces simplifications ont des limites. Ainsi, les "fonctions d'ingénieur", abaques reliant le rendement à un ou deux facteurs, établies à partir de résultats de station expérimentales, d'enquêtes et de points de vue d'experts, sont peu capables de rendre compte des interactions entre facteurs. Tout particulièrement, elles moyennent généralement les effets de la variabilité climatique. L'emploi de modèles de culture pour renseigner la matrice **RDT** apparaît au contraire comme une alternative séduisante et se généralise (Barbier et Hazell, 1998; Deybe, 1995; Flichman, 1995). S'il paraissait possible de se contenter d'abaques pour décrire la productivité des pâturages et des productions végétales secondaires des exploitations de Silvânia, ce recours à un modèle de simulation était à retenir pour le rendement du maïs, que les études préliminaires des économistes avaient identifié comme principal facteur biophysique de risque pour ces exploitations (Affholder *et al.*, 1995; Bainville, 2000; Bonnal *et al.*, 1994). Se posait alors, pour l'agronome, **la question du choix du modèle de simulation du maïs** à utiliser pour satisfaire aux besoins de la modélisation des exploitations. Mais se posait également la question des modalités discrètes c,p,z,e,t à retenir pour les simulations à fournir au modèle d'exploitation, c'est à dire **la question de la hiérarchie des facteurs du milieu et du système de culture**.

3.-Quelles simulations pour renseigner le modèle d'exploitation ?

3.1.-Aucun modèle n'est universel

Le développement de l'informatique a permis l'essor des "modèles de cultures", reproduisant le comportement d'une culture et sa réponse à diverses contraintes du milieu modulées par des actes techniques. Les premiers travaux dans ce domaine ont porté sur la simulation des flux hydriques dans le système sol-plante-atmosphère, dans le but d'optimiser la gestion de l'irrigation (Hanks *et al.*, 1969; Van Keulen et Van Beek, 1971). Dès cette origine, se sont opposées deux approches de la modélisation. L'une, dite mécaniste, prétendait construire les modèles sur la base exclusive des équations décrivant la physique des phénomènes, tandis que l'autre, dite fonctionnelle, cherchait à répondre rapidement à des questions pratiques en utilisant de nombreuses lois empiriques (Addiscott et Wagenet, 1985). L'inconvénient principal de la première approche est la très faible disponibilité des paramètres d'entrée, parfois inaccessibles à la mesure, tandis que celui de la seconde est la nécessité de caler les fonctions empiriques et d'en inclure de nouvelles pour chaque situation à étudier (De Jong, 1981). Ces difficultés existent également pour les modèles plus complets apparus par la suite, couplant des représentations des fonctions productives des plantes aux modèles hydriques (Passioura, 1996), puis intégrant de nouvelles fonctions de stress.

Or, les exigences formulées pour les modèles par leurs auteurs eux-même sont qu'ils puissent à la fois représenter le plus grand nombre possible de situations (exigence d'universalité), et qu'ils puissent être appliqués pratiquement à ces situations (exigence d'applicabilité) et non pas seulement constituer des bases de connaissances théoriques (Monteith, 1989; Ritchie, 1991). Il en résulte la recherche de compromis entre ces deux approches, conduisant depuis deux décennies à des modèles combinant selon des proportions très variables les équations théoriques avec des lois empiriques (Brisson et Perrier, 1991; Goudriaan, 1995.; Penning de Vries et Van Laar, 1982; Van Keulen et de Wit, 1982). Partant de ce constat, et dissipant une illusion qui semble avoir prévalu au cours des décennies précédentes, Spitters (1990), Passioura (1996) et Sinclair et Seligman (1996) ont montré qu'aucun de ces modèles n'est universel.

En particulier, un modèle privilégiant le rôle de la température par rapport à celui de la

transpiration, dans le contrôle de la croissance, pourra être pertinent pour une région tempérée, mais inadapté pour une zone tropicale où la hiérarchie entre ces facteurs est inverse. Une loi empirique telle que la fonction de ruissellement contenue dans le modèle EPIC, mise au point sur certains types de sols, peut aussi se révéler inadéquate sur d'autres (Perez, 1994). Par ailleurs, un modèle écrit en référence à un certain ensemble de techniques agricoles caractéristiques d'une certaine région de production, pourra se montrer inutilisable en l'état dans un contexte technique différent. Par exemple, Gossym, mis au point pour simuler la culture du coton aux Etats-Unis, où les densités de peuplement sont très homogènes, nécessite d'importantes modifications pour être appliqué aux cultures de coton d'Afrique de l'Ouest où la variabilité des densités de semis est un facteur important de la variabilité des productivités (Cretenet, 1995). Certains modèles fréquemment cités dans la littérature sont développés par des équipes internationales comprenant plusieurs dizaines de chercheurs, avec pour objectif affiché de couvrir le plus large champ possible en termes de cultures, climats, sols, et techniques agricoles, mais ils ne paraissent pas, à priori, pouvoir échapper à la règle d'un domaine d'application limité. C'est le cas en particulier des modèles de la famille CERES (Crop Estimation through Resource and Environment Synthesis, (Jones et Kiniry, 1986)) regroupés dans le logiciel DSSAT (Decision-Support System for Agrotechnology Transfer). Ils tiennent compte de la physiologie des plantes de manière très détaillée, autorisant des comparaisons entre variétés d'une même espèce, à condition de disposer des informations précises sur ces variétés (les "paramètres génétiques"), mais ne simulent que les contraintes hydriques et azotées. Le modèle EPIC, (Erosion Productivity Impact Calculator, (Williams *et al.*, 1984)), également très souvent cité, contient quant à lui une description beaucoup plus simple du fonctionnement des plantes, mais simule, outre les contraintes hydriques et azotées, les contraintes de nutrition phosphorée, d'excès d'eau et de toxicité aluminique. Il propose en outre une simulation de l'évolution à long terme du sol liée aux pertes par érosion, basée sur des abaques empiriques.

Enfin, les modèles de culture exigent comme paramètre d'entrée:

- des valeurs initiales de variables décrivant l'état du milieu (état hydrique et minéral du sol au début de la simulation),
- des dates auxquelles des interventions techniques modifient le milieu ou la plante (date de travail du sol, de semis).

Or, pour certaines interventions techniques, leurs effets sur le milieu ou la plante sont simulés, tandis que pour d'autres, ces effets sont également des paramètres d'entrée à fournir par

l'utilisateur. Par exemple, si EPIC contient une modélisation assez détaillée des effets du travail du sol, simulant une modification de la porosité du sol et incorporant les résidus de culture au sol, c'est à l'utilisateur de tenir compte, pour le paramétrage du modèle, d'éventuelles interactions entre le type d'outil utilisé et les types de sol et de résidus de culture, qui influencent la profondeur de travail et la distribution des résidus de culture dans le sol après incorporation. On peut considérer que tout modèle de culture comporte:

- un sous-modèle simulant la réponse d'un peuplement végétal aux états du milieu,
- un sous-modèle restituant les effets de la gestion technique de la culture sur le milieu et le peuplement (cas des interventions modifiant directement le peuplement, telle que le désherbage, la coupe, la récolte.....).

Les remarques précédentes sur la non universalité des modèles s'appliquent bien entendu à chacun de ces sous-modèles, et leur complexité relative est variable en fonction du modèle complet considéré.

Les abus résultant du malentendu sur l'universalité des modèles ont conduit Passioura (1996) à clarifier la classification des modèles en agronomie. Il distingue ainsi une première classe, celle des modèles scientifiques, dont l'objet est l'intégration d'hypothèses sur des processus bio-physiques dans le but de leur mise à l'épreuve des faits, et qui peuvent également avoir un intérêt pédagogique. La démarche de validation est alors principalement de rechercher les situations où le modèle échoue à simuler la réalité, de manière à identifier des lacunes dans les connaissances. La seconde classe est celle des modèles d'ingénieurs, dont l'objet est de mobiliser des connaissances dans le but de résoudre des problèmes pratiques complexes, tels que l'amélioration de la gestion des activités agricoles. Ces modèles, qui correspondent à la dénomination antérieure de modèles fonctionnels, contiennent nécessairement des relations empiriques. La démarche de validation consiste alors à s'assurer que le modèle simule la réalité avec une précision satisfaisante pour l'application prévue. Le domaine de validité d'un modèle d'ingénieur n'excède pas l'environnement dans lequel il a été mis au point.

Le modèle de culture requis par le modèle de décision stratégique des exploitations était clairement un modèle d'ingénieur.

3.2.- Une nécessaire modélisation

On a vu que lorsqu'un modèle d'ingénieur est requis, on ne peut appliquer directement les modèles existants, à cause de leur domaine de validité restreint. L'utilisateur d'un modèle de culture ne peut donc se passer d'être lui-même quelque peu modélisateur du système de culture, ce qui suppose qu'il ait des compétences dans cette matière. Par conséquent, on ne pouvait

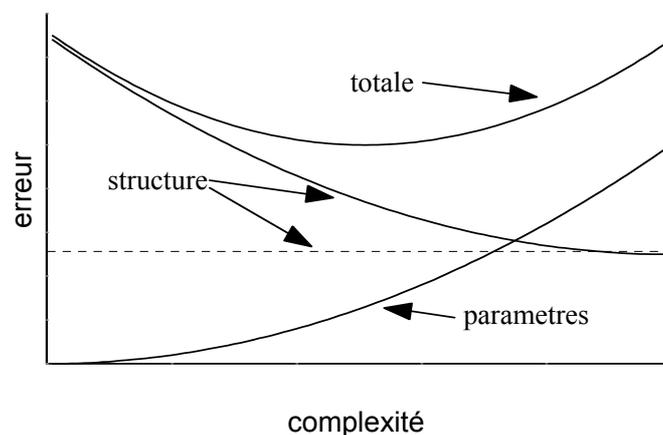


Figure 1.5. Erreurs de prédiction d'un modèle en fonction d'une complexité croissante depuis l'origine, avec une erreur de structure irréductible représentée par l'asymptote en pointillés. (D'après Passioura, 1996, citant Reynolds et Acock, 1985)

accepter l'approche, pourtant commune dans les études faisant appel à la modélisation "bio-économique" des exploitations, où des économistes appliquent sans évaluation préalable et pour des contextes extrêmement divers, les modèles EPIC ou DSSAT qu'ils considèrent comme les synthèses les plus complètes et les plus opérationnelles de la théorie agronomique, approche favorisée par le malentendu sur l'universalité des modèles. **Se pose alors la question du choix d'un modèle et de son adaptation pour un contexte donné.**

Tandis qu'abondent les travaux décrivant des modèles supposés couvrir un large domaine d'application et les validant pour un contexte particulier, la littérature est relativement pauvre sur cette question. Passioura (1996) rappelle, à partir des travaux de Reynolds et Acock (1985), que les erreurs de simulation provenant de la simplification de la réalité que constitue inévitablement un modèle diminuent quand augmente la complexité de ce dernier, en tendant vers une asymptote qui dépend de la pertinence des relations théoriques utilisées, tandis que les erreurs provenant

de l'estimation des paramètres augmentent inévitablement avec la complexité (fig. 1.5). Il en déduit que dans le cas des modèles d'ingénieurs, on doit rechercher la plus grande simplicité possible (*“and especially a small appetite for data”*), et que l'on a avantage à utiliser des relations empiriques simples et robustes lorsqu'on n'est pas certain de connaître les mécanismes des phénomènes modélisés. Dans la même quête d'un équilibre entre les “erreurs de structure” et les “erreurs de paramètres”, Monteith (1996) prêche pour que les efforts des modélisateurs portent sur la suppression de composants lorsqu'ils entraînent davantage de bruit que de précision dans la variable simulée. Sinclair et Seligman (1996) proposent quant à eux une liste de principes à respecter:

- le modèle doit être construit en fonction d'objectifs clairement formulés, et il a plus de chances de convenir si ces objectifs sont modestes,
- les critères de jugement de la qualité d'un modèle doivent dépendre de ses objectifs,
- ne pas hésiter à construire un nouveau modèle, tout en valorisant des approches antérieures ayant fait la preuve de leur efficacité,
- le niveau organisationnel du problème à traiter (tissu, organe, plante, couvert ou culture) doit déterminer la structure du modèle,
- certaines relations synthétiques sont suffisamment robustes pour représenter efficacement des théories plus complexes sous-jacentes, elles doivent être utilisées autant que possible.

Dans l'idée de garantir la pertinence d'un modèle pour l'application qu'on souhaite en faire tout en réduisant les tâches de modélisation au minimum, enfin, Hammer et al (1989), Shorter et al (1991), et Hammer et Muchow (1994) ont proposé une méthode de construction de modèle “pilotée par les besoins” ou “top-down” tenant compte de la hiérarchie entre les variables nécessaires pour prédire les variables désirées en sortie du modèle. Cependant, ces auteurs n'indiquent pas comment est obtenue cette hiérarchie entre variables impliquées dans le déterminisme des variables à simuler.

3.3.- Le diagnostic de la variabilité des rendements comme base de modélisation

Lorsque la principale variable à laquelle on s'intéresse est le rendement, la question de la hiérarchie locale des variables impliquées dans son déterminisme est connue sous le nom de question du “diagnostic agronomique” et a fait l'objet de nombreux travaux des agronomes

français. Faisant la synthèse d'une longue série de travaux ayant suivi ceux de Manichon et Sebillotte (1973), Doré *et al* (1997) ont proposé une méthode générale pour traiter ce problème (fig. 1.6), avec pour objectif de réduire la subjectivité du diagnostic par rapport aux méthodes basées sur des interviews de producteurs (Fujisaka, 1991; Pillot, 1988; Zandstra *et al.*, 1981) et de diminuer les risques de confusion d'effets comparativement aux méthodes basées sur la recherche de corrélations statistiques directes entre la gestion technique des parcelles et les rendements. Cette méthode repose sur un modèle d'élaboration du rendement de la culture étudiée, permettant de raisonner les rapports de causalité entre d'une part des observations des diverses causes possibles des limitations de la croissance de la culture, et d'autre part la chronologie et l'ampleur des limitations de croissance constatées.

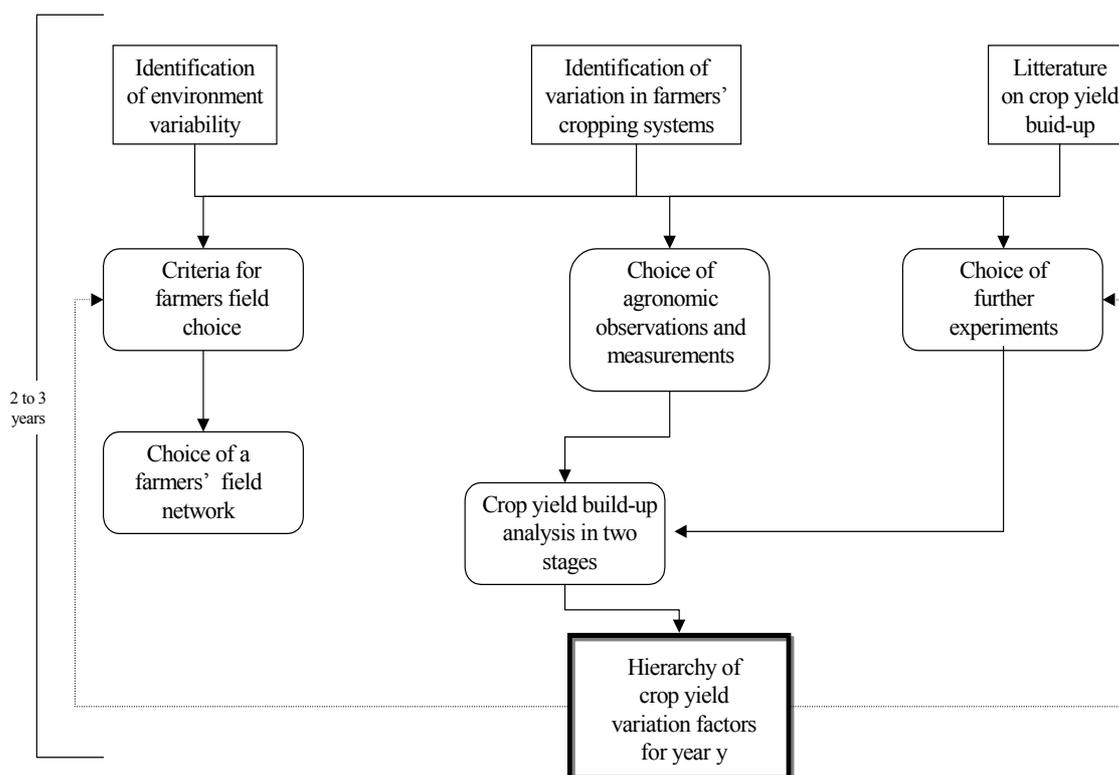
Dans tous ces travaux, un modèle est utilisé pour évaluer le rendement potentiel par rapport auquel sont définies des pertes de productivité. Le plus souvent, il s'agit d'un modèle décrivant l'influence du rayonnement, parfois également de la température, sur la croissance et le développement, toutes autres contraintes étant nulles. Chez la plupart des auteurs, le recours à un modèle de simulation est limité à cet usage (Aubry *et al.*, 1994; Boiffin *et al.*, 1981; Leterme *et al.*, 1994; Manichon et Sebillotte, 1973; Meynard et Sebillotte, 1983; Wey *et al.*, 1998).

Dans certains autres des travaux cités par Doré *et al.* (Diouf, 1990; Latiri-Souki *et al.*, 1992; Scopel, 1994), ainsi que chez Reyniers (1987), il est fait appel en outre à des modèles quantitatifs pour évaluer l'intensité des contraintes, tout particulièrement la contrainte hydrique, dont les modèles de bilan hydrique fournissent des estimations robustes. L'intérêt de la démarche de ces auteurs, par rapport à la seule utilisation d'indicateurs observés des contraintes, est triple:

- la plupart des indicateurs accessibles à l'observation ne le sont pas de manière continue, et la pertinence de l'information dépend du moment où la mesure est effectuée. Le recours à des simulations dynamiques, c'est à dire prenant en compte le temps, permet au contraire d'accéder à des données continues;

- le recours à des simulations permet d'accéder à des indicateurs difficiles à mesurer mais mieux corrélés à la production que d'autres moins coûteux à observer directement;

- par analyse de sensibilité du modèle, peuvent être analysés les facteurs responsables de la variabilité de la contrainte. Ainsi, Reyniers (1987) a pu montrer que la principale cause de stress hydrique pour le riz pluvial n'était pas la pluie, dans les sols ferrallitiques de la région des Cerrados, mais les faibles profondeurs d'enracinement dues à la toxicité aluminique. Scopel (1994), a quant à lui montré l'importance des pertes d'eau par ruissellement dans l'occurrence des stress hydriques dans l'ouest du Mexique, et donc l'intérêt de la technique du semis direct



Source: T. Doré, M. Sebillotte, J.M. Meynard, 1996.

Figure 1.6.- Schéma conceptuel de la méthode de diagnostic synthétisée par Doré *et al.*, (1996).

sur paillis, connue pour limiter fortement ces pertes.

Par contre, dans tous ces travaux de diagnostic agronomique, les effets des diverses contraintes sur la culture sont toujours analysés à l'aide d'un modèle conceptuel. Celui-ci, extrait de la théorie agronomique, fournit des informations de nature purement qualitative, telles que la période du cycle de la culture à laquelle celle-ci est plus sensible à telle ou telle contrainte, les organes les plus affectés, la liste des variables du milieu et de la plante avec lesquelles les contraintes sont susceptibles d'interagir, etc...

Ainsi, les modèles simulant les contraintes et les modèles simulant le rendement potentiel ne sont pas directement couplés l'un à l'autre, et il existe une discontinuité importante dans la quantification des phénomènes en cause dans l'élaboration du rendement. Cette discontinuité est un facteur important de subjectivité dans la démarche: il est difficile, sinon impossible, de vérifier, lorsqu'un état du milieu est jugé contraignant, s'il est nécessaire et s'il suffit pour expliquer le rendement observé. Elle limite aussi la portée du diagnostic dans la mesure où, l'impact des contraintes sur les rendements n'étant pas quantifié, la hiérarchie de ces dernières est établie principalement sur le critère de la fréquence de leur occurrence. Des contraintes fréquentes mais à faible impact sur le rendement peuvent alors être mises sur le même plan que des contraintes également fréquentes mais réduisant les productivités de façon marquée, tandis

qu'une contrainte intense mais rare apparaîtra comme secondaire alors qu'elle peut avoir des conséquences importantes pour les choix techniques des producteurs.

Deux autres aspects de la méthode sont source d'une subjectivité qui paraît quant à elle difficile à réduire: la liste des causes possibles de réduction du rendement, orientant le dispositif d'enquête (stratification de l'échantillon et choix des mesures à effectuer), est établie à partir de l'ensemble théorique très vaste des facteurs influençant le rendement d'une culture, à l'aide d'une revue préliminaire des données disponibles sur la zone d'étude. On ne peut donc garantir l'exhaustivité de ce diagnostic préliminaire au diagnostic agronomique proprement dit. En outre, les contraintes de suivi de situations culturelles différant par un grand nombre de caractéristiques, dans un espace régional qui peut être assez grand et hétérogène du point de vue des techniques agricoles et des milieux, interdisent en pratique la constitution d'un dispositif permettant l'analyse de variance. Un seul travail à notre connaissance fait exception à cette règle. Le diagnostic y était mené sur riz irrigué en zone tropicale avec des dates de semis peu variables. Le facteur climatique ne jouant ainsi qu'un rôle très réduit, il était possible de tester l'influence des autres facteurs en ajoutant, jouxtant chacune des situations culturelles réelles dispersées dans la région, des situations culturelles modifiées par l'expérimentateur de manière à contrôler isolément les principaux facteurs de variation du rendement (Becker et Johnson, 1999).

Une voie de réduction de cette subjectivité, qui fait par ailleurs l'objet de travaux de physiologie végétale, est la recherche de signaux mesurables sur la plante elle-même et caractéristiques de la réaction de cette dernière à des stress spécifiques, permettant ainsi de valider un diagnostic tout comme une radiographie ou une analyse sanguine permettent en médecine de valider ou d'invalider le diagnostic d'une fracture ou d'une infection par un pathogène particulier. La présente thèse ne s'inscrit pas dans cette perspective.

La présente thèse assume d'emblée la part de subjectivité d'un diagnostic agronomique conduit à partir d'un diagnostic préliminaire dans un dispositif où les facteurs de variation du rendement ne sont pas contrôlés par l'expérimentateur. Elle se situe par contre dans la réduction de la part de subjectivité provenant, dans les méthodes existantes, de l'identification des contraintes en termes de fréquences d'occurrences, sans évaluer la part de chacune dans les pertes de productivité.

Dans un de nos travaux antérieurs, (Affholder, 1994), un diagnostic de la variabilité des rendements du mil au Sénégal a été réalisé en appliquant les principes énoncés par Doré *et al*,

(1997), mais en ayant recours cette fois à un modèle quantitatif simulant un rendement potentiel réduit par la contrainte hydrique. Ce travail avait permis de détecter les autres contraintes responsables de la variabilité des rendements pour l'ensemble du bassin arachidier Sénégalais. Il fournissait en outre une estimation des impacts relatifs des différentes contraintes sur les rendements, et mettait en évidence une interaction forte entre la contrainte hydrique et la fertilité du sol, qu'un travail mené avec un modèle qualitatif dans la même région n'avait pas permis de détecter (Diouf, 1990). L'étude de cette interaction avait fait l'objet d'un autre travail (Affholder, 1995b), montrant que sous certaines conditions de distribution des pluies, l'augmentation en début de cycle de la demande hydrique de la culture provoquée par une augmentation de fertilité pouvait entraîner postérieurement un stress hydrique et une réduction de croissance. Cette étude fournissait les bases pour une modélisation empirique de cette interaction, que le modèle utilisé au départ n'était pas capable de simuler, faute d'une prise en compte dynamique (reproduisant la chronologie des phénomènes), des effets des stress sur la demande en eau de la culture. Le nouveau modèle obtenu avait ensuite été appliqué à des séries historiques de 20 années de données pluviométriques représentatives du climat de localités contrastées du bassin arachidier, de manière à quantifier le risque que des gains de fertilité ne se traduisent pas par des gains de productivité (Affholder, 1997). Les résultats obtenus convergeaient avec ceux de Dugué (1989) justifiant les systèmes de culture extensifs (par rapport à la terre) pratiqués par les agriculteurs des régions Sahélienne et Soudano-sahélienne (Boulier et Jouve, 1990). C'est le recours à un modèle dynamique de simulation du rendement qui avait permis d'extrapoler à des années représentatives du climat local, un diagnostic établi au cours d'un petit nombre d'années qui risquait de fournir une image erronée des contraintes les plus souvent rencontrées par les producteurs. Plus généralement, de nombreux travaux ont montré l'intérêt d'analyser la variabilité des rendements en tenant compte du climat grâce à des simulations pour des séries historiques de données de l'ordre de la vingtaine d'années (Forest et Clopes, 1994; Jouve, 1984; Muchow et Bellamy, 1991).

Enfin une synthèse de nos travaux antérieurs et de ceux précédemment cités de Reyniers et Scopel, en dégagait le principe d'une démarche itérative de diagnostic et de modélisation, dans laquelle un modèle de calcul de la productivité potentielle servait de base à un diagnostic réalisé conformément à la méthode synthétisée par Doré *et al*, les contraintes les plus significatives ainsi détectées étant ensuite incorporées au modèle en utilisant les connaissances disponibles sur leur déterminisme et leurs effets sur le rendement (Affholder, 1995a; Affholder

et al., 1994). Le nouveau modèle obtenu pouvait être à son tour utilisé comme base pour un diagnostic plus fin, la démarche étant ensuite répétée jusqu'à obtenir le niveau de précision souhaité au départ pour le modèle ou pour le diagnostic selon les objectifs de l'étude.

Ce travail se limitait cependant à l'énoncé de ces principes, qui n'avaient pas été appliqués dans leur totalité dans les études de terrain sur lesquelles il s'appuyait, et ne constituait ni une formalisation de la méthode, ni sa mise à l'épreuve.

4.- Une méthode itérative de diagnostic et modélisation

L'objet de ce sous-chapitre est de proposer une formalisation de cette nouvelle méthode d'analyse régionale de la variabilité des rendements dans l'écosystème cultivé, aboutissant à la fois:

- à un modèle de simulation du rendement adapté au contexte local et aux applications envisagées pour ce modèle,

- et à une liste hiérarchisée des problèmes- techniques et liés au milieu naturel- limitant les productivités, cette hiérarchie tenant compte non seulement de la fréquence des contraintes mais aussi de leur impact sur le rendement pour une série d'années représentative du climat local.

La méthode proposée, schématisée à la figure 1.7, est en grande partie dérivée de l'approche générale décrite par Doré *et al.*, qui sera qualifiée dans ce qui suit de méthode de référence.

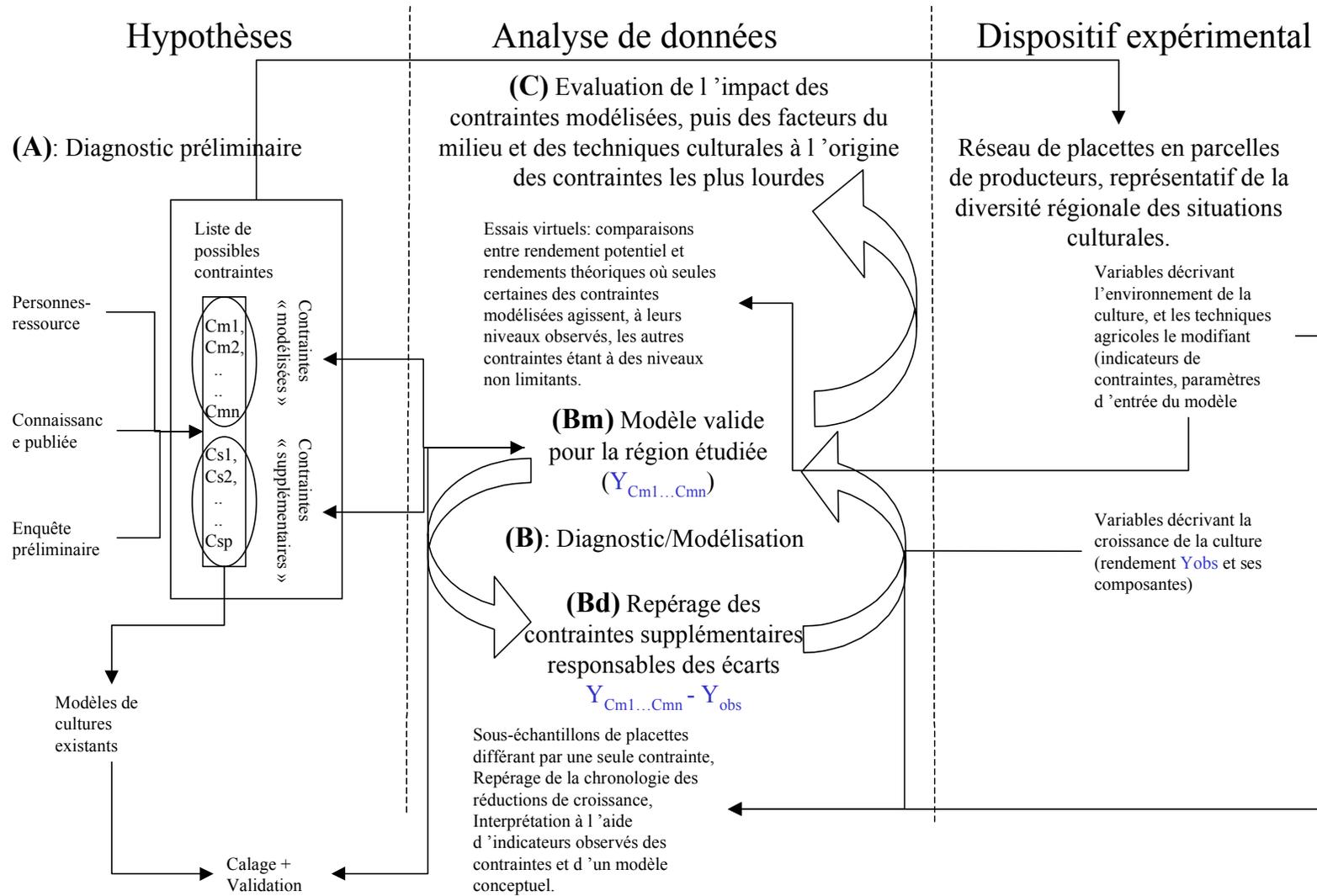


Figure 1.7.- Schéma récapitulatif de la méthodologie proposée.

4.1.- *Le point de départ de la démarche: un diagnostic préliminaire*

(étape "A" dans le schéma de la figure 1.7)

Le point de départ de l'analyse est le même que pour la méthode de référence: un diagnostic préliminaire établi à partir de la littérature, de l'interrogation de personnes-ressource et d'enquêtes rapides. Ceci vise à établir une liste, la plus complète possible, des contraintes susceptibles de limiter les rendements dans la région étudiée. Un modèle de culture, construit selon le paradigme d'un rendement potentiel réduit par des contraintes, doit ensuite être choisi. Ce choix vise à maximiser à la fois:

-l'adéquation entre les contraintes prises en compte par le modèle et les contraintes repérées au diagnostic préliminaire,

-le nombre de composants du modèle ayant fait l'objet d'une validation pour l'environnement étudié ou proches de tels composants sur le plan théorique.

Ces critères étant contradictoires, il s'agit d'un compromis dont le résultat le plus probable est un modèle ne prenant en compte de manière correcte que certaines des contraintes identifiées au diagnostic préliminaire. On considère que la variabilité régionale des rendements est due (i) à la variabilité du rendement potentiel provenant de la variabilité des conditions de température de rayonnement et des cultivars, (ii) de la variabilité des contraintes prises en compte par le modèle, les "*contraintes modélisées*", et (iii) de la variabilité des contraintes non prises en compte par le modèle, les "*contraintes supplémentaires*".

4.2.- *Phase itérative de "diagnostic et modélisation élémentaires"*

(étape "B" dans le schéma de la figure 1.7)

A partir du diagnostic préliminaire ayant orienté le choix d'un modèle de départ, est conduite une phase où se succèdent de manière itérative des étapes de modélisation et des étapes de diagnostic s'appuyant notamment, comme dans la méthode de référence, sur un réseau de situations culturelles observées durant deux à trois années chez les agriculteurs de la région. Soient M_1 le modèle choisi comme point de départ, M_i un modèle obtenu à une étape intermédiaire quelconque de la démarche et M_4 un modèle idéal simulant de manière valide, pour l'environnement considéré, l'ensemble des contraintes repérées au diagnostic préliminaire. Le rendement Y^* mesuré sur une situation culturelle quelconque de la région est donné par

$$Y = Y^* - \varepsilon_y = M_1(x^*_1, p_1) - \varepsilon_1,$$

$$Y = Y^* - \varepsilon_y = M_i(x^*_i, p_i) - \varepsilon_i$$

$$Y = Y^* - \varepsilon_y = M_4(x^*_4, p_4) - \varepsilon_4$$

où:

ε_y est l'erreur de mesure sur Y , x^*_i est le vecteur des paramètres d'entrée du modèle i , mesurés et variables avec la situation culturelle, p_i est le vecteur des paramètres "fixes" du modèle i , indépendants de la situation culturelle, mais pouvant en fait varier avec la région de l'étude, et ε_i l'écart au modèle i .

ε_i intègre donc à la fois la propagation par M_i des erreurs de mesure sur x , $M_i(\varepsilon_x)$, et les variations dues aux individus et non expliquées par le modèle i , ces dernières pouvant être décomposées entre celles provenant de l'inexactitude du modèle pour des situations culturelles où les contraintes supplémentaires sont nulles, ε_{im} et celles provenant de l'effet des contraintes supplémentaires relativement à M_i , ε_{is} :

$$\varepsilon_i = M_i(\varepsilon_x) + \varepsilon_{im} + \varepsilon_{is}$$

Par définition de M_4 , la moyenne de ε_4 est nulle et $3\varepsilon_4^2$ est minimale, ε_4 ne dépendant plus que des erreurs de mesure sur x . Si ε_{is} est élevé par rapport à $M_i(\varepsilon_x) + \varepsilon_{im}$, c'est à dire si l'effet des contraintes supplémentaires est élevé par rapport aux autres sources d'erreurs, la moyenne de ε_1 , quant à elle, est positive, le rendement réel Y étant inférieur au rendement potentiel réduit exclusivement par les contraintes modélisées. Il est possible de construire expérimentalement un échantillon de situations culturelles dans lequel les contraintes supplémentaires sont absentes, de telle sorte que pour un tel échantillon, la moyenne de ε_1 est nulle et $3\varepsilon_1^2$ est faible.

L'objectif de cette phase est d'une part de construire un modèle M_n s'approchant le plus possible du modèle M_4 et d'autre part de produire une hiérarchie détaillée des contraintes à l'oeuvre dans la région pour les années d'observation du réseau de situations culturelles.

L'étape de modélisation élémentaire (étape Bm) pour l'itération i consistera à construire, caler et valider empiriquement un nouveau modèle M_i , simulant les effets des contraintes diagnostiquées à l'étape $i-1$, qui deviennent donc des contraintes modélisées pour le modèle M_i . Lors de la première itération, c'est le diagnostic préliminaire qui sert de base à cette étape. Quelle que soit l'itération, l'écriture du modèle exploite les connaissances disponibles dans la littérature.

On privilégie autant que possible les connaissances formalisées dans des modèles déjà existants, qui pouvaient ne pas convenir pour l'étape A en tant que modèle de simulation mais qui peuvent être adéquats en tant que bases de connaissances.

Une étape de diagnostic élémentaire (étape Bd) pour l'itération i consistera à établir des relations causales entre les contraintes supplémentaires de M_i , appréhendées par des "indicateurs de contrainte" observés, et les écarts ε_i . Les contraintes "diagnostiquées à l'itération i " seront celles dont l'influence sur ε_i est prépondérante par rapport à l'ensemble des contraintes supplémentaires du modèle i . Les principes utilisés sont identiques à ceux du "first diagnosis stage" de la méthode de référence, dans laquelle toutes les contraintes possibles sont des contraintes supplémentaires pour le modèle, puisque ce dernier ne simule que le rendement potentiel permis par le rayonnement et la température. Ces principes sont les suivants:

- (1) comparer des situations culturelles ne différant entre elles que par une seule des contraintes supplémentaires,

- (2) établir la chronologie des réductions de croissance qui se sont produites dans les situations culturelles, par des comparaisons entre le parcours de croissance observé et le parcours, simulé à l'aide du modèle M_i , qu'aurait eu la culture si à partir d'un certain état de croissance observé à une certaine date, et résultant donc de toutes les contraintes ayant effectivement agi jusqu'à cette date, seules les contraintes prises en compte par M_i étaient présentes,

- (3) mobiliser la théorie de l'élaboration du rendement pour restreindre la liste des contraintes pouvant être en cause à celles dont le mode d'action est compatible avec la chronologie des réductions de croissance pour chaque situation culturelle observée,

- (4) vérifier, sur l'échantillon entier de situations culturelles, les hypothèses qui peuvent ainsi être formulées sur les contraintes supplémentaires ayant agi dans chaque placette, en établissant des relations entre les indicateurs des contraintes impliquées et les écarts de rendements ou de croissance à certaines phases entre observation et simulation.

Le processus itératif prend fin à l'itération n lorsqu'il n'est plus possible de mettre en évidence des relations entre les ε_n et les contraintes supplémentaires du modèle M_n . Ceci intervient quand les effets des contraintes supplémentaires, relativement au rendement simulé par M_n , sont du même ordre de grandeur que les autres causes des erreurs ε_n . Pour s'assurer que les effets des contraintes supplémentaires sont négligeables *compte tenu des erreurs de mesures sur x_n* , il faut que soient satisfaites simultanément les deux conditions suivantes:

- ε_{nm} est faible par rapport à $M_n(\varepsilon_x)$, c'est à dire que la simulation des contraintes modélisées ne peut être améliorée compte tenu des erreurs de mesures,

- ε_{ns} est faible par rapport à $M_n(\varepsilon_x) + \varepsilon_{nm}$, c'est à dire que la modélisation des contraintes supplémentaires n'améliorerait pas la précision du modèle.

L'évaluation de la première condition sera traitée *à posteriori*, à la fin de l'étape suivante (C), car les résultats qu'elle produit facilitent grandement l'analyse de la propagation des erreurs de mesure par le modèle. A la fin de l'étape B, on se contente ainsi de vérifier que la deuxième condition est réalisée. Pour cela, les écarts ε_n sont évalués pour deux sous-échantillons de situations culturelles: dans un premier sous-échantillon les contraintes supplémentaires sont nulles, et $\varepsilon_n(1) = M_n(\varepsilon_x) + \varepsilon_{im}$, tandis que dans le second, on a $\varepsilon_n(2) = M_n(\varepsilon_x) + \varepsilon_{nm} + \varepsilon_{ns}$. Si les écarts $\varepsilon_n(1)$ et $\varepsilon_n(2)$ sont du même ordre de grandeur, alors la deuxième condition est supposée vérifiée. Dans ce cas, on ne sait pas encore si la précision des mesures autoriserait une amélioration du modèle (il faudrait pour cela que la première condition ne soit pas satisfaite), mais on sait que si une telle amélioration était possible, il faudrait la faire porter d'abord sur la modélisation des contraintes déjà modélisées, avant de tester à nouveau l'intérêt d'intégrer les effets des contraintes supplémentaires.

A l'issue de cette phase, on dispose donc:

- d'un modèle M_n capable de restituer, avec une certaine précision, la variabilité des rendements de la région sous l'effet des contraintes contribuant le plus à cette variabilité,

-d'une hiérarchie des contraintes présentes dans la région étudiée, hiérarchie essentiellement en termes de fréquence d'occurrence.

4.3.- *Diagnostic final*

(étape "C" dans le schéma de la figure 1.7)

Disposer d'un modèle de simulation reproduisant fidèlement les variations de rendement pour le contexte étudié ne suffit pas à fournir des simulations pertinentes au modèle d'exploitation, comme cela ne suffirait pas à orienter une action de développement visant à stabiliser les productivité à un niveau élevé. Certes, la construction du modèle s'est appuyée sur un diagnostic, mais d'une part ce diagnostic a été réalisé en termes de fréquence d'occurrence, avec les inconvénients évoqués plus haut, et d'autre part il porte sur des contraintes, telles que la contrainte hydrique, azotée, ou biotique, et il reste nécessaire d'établir la hiérarchie des facteurs de l'environnement et des systèmes de culture qui sont à l'origine de ces contraintes.

C'est cette hiérarchie qui fournira aussi bien les clefs de la typologie des situations culturelles requise par le modèle de décision dans les exploitations, qu'une information sur les problèmes techniques sur lesquels agir pour augmenter les productivités et réduire leur variabilité inter-annuelle dans la région. Ces facteurs à hiérarchiser sont les paramètres d'entrée du modèle M_n , formant le vecteur x_n . Il s'agit donc de réaliser une analyse de sensibilité de M_n .

Le principe général est d'exploiter M_n pour quantifier le rôle des différentes composantes de x_n dans les variations de rendement, à l'aide de protocoles de simulation isolant leurs effets simples et leurs interactions et en distinguant les facteurs environnementaux des facteurs techniques. Or, dès que le nombre de paramètres d'entrée du modèle dépasse trois ou quatre, la combinatoire de ces paramètres permettant de tester par simulation tous les effets simples et toutes les interactions, pour des niveaux représentatifs des valeurs prises dans la région par chacun des paramètres, devient rédhibitoire, même si l'on dispose de moyens de calcul très puissants. En effet, en supposant que le nombre de paramètres du modèle soit k et que chacun de ces paramètres prenne un même nombre N de valeurs possibles, le nombre de combinaisons à tester de ces paramètres serait N^k . Pour 50 paramètres, soit un nombre raisonnable pour un modèle de culture, et trois niveaux pour chacun des paramètres, le nombre de simulations à effectuer serait de l'ordre de 10^{23} .

L'alternative est d'utiliser les principes du *screening* ou *protocoles supersaturés*. Ceux-ci reposent sur un processus itératif, là encore, dans lequel on teste d'abord les effets d'agrégats de facteurs, les agrégats ayant les effets prépondérants sur les simulations de rendement étant ensuite progressivement décomposés jusqu'à parvenir au niveau des paramètres élémentaires du modèle (Coquillard et Hill, 1997). Le niveau d'agrégation pris comme point de départ, dans notre cas, est le niveau des contraintes: si une contrainte est à la fois peu fréquente et sans effet notable sur les rendements dans la localité, il sera inutile d'étudier le rôle des différents facteurs potentiellement responsables de cette contrainte dans la théorie. Ainsi, à travers le paramétrage du modèle, des situations fictives sont simulées, dans lesquelles aucune, une ou deux contraintes exclusivement sont présentes à leurs niveaux observés sur des situations culturelles réelles, tandis que les autres contraintes présentes dans la réalité sont artificiellement fixées à des niveaux non limitants dans les simulations. Ceci permet l'évaluation des effets simples et conjugués des contraintes. Pour chaque contrainte repérée ainsi comme ayant un impact important sur les rendements, sont recherchés ensuite les facteurs du milieu et des techniques de gestion du milieu qui sont à l'origine de la contrainte, en appliquant la même démarche basée sur des situations fictives isolant les effets simples et les interactions de ces facteurs.

Le facteur climat a un statut particulier dans cette analyse, car il contribue de façon particulièrement forte à la taille élevée de la combinatoire théorique du protocole. En effet:

- il est *à priori* susceptible d'interagir avec un très grand nombre d'autres facteurs,
- un grand nombre de données climatiques, de l'ordre de la vingtaine d'années d'observations consécutives, est nécessaire pour représenter correctement sa variabilité naturelle locale.

Afin de limiter le nombre de simulations, quelques années au climat contrasté peuvent être utilisées pour révéler les facteurs interagissant nettement avec le climat, facteurs pour lesquels une analyse plus poussée sera ensuite menée à l'aide de séries historiques étendues de données climatiques.

A ce stade de l'étude, l'analyse de la propagation des erreurs de mesure par le modèle, restée en suspens à la fin de l'étape B, est facilitée. En effet, quelle que soit la méthode retenue pour évaluer la propagation d'erreurs de mesure par des modèles ayant de nombreux paramètres d'entrée, la combinatoire des simulations à effectuer est gigantesque (Leenhardt, 1991). Elle n'est réalisable en pratique qu'à condition de la restreindre à quelques paramètres auxquels le modèle est particulièrement sensible. L'analyse conduite à l'étape C fournit à la fois la liste de ces paramètres et la réponse du modèle à des variations de ces paramètres. Bien que cela impose de réaliser l'étape C sans savoir si le modèle sur lequel elle repose est adéquat pour cette tâche, repousser l'étude de la propagation des erreurs par le modèle après l'étape C présente donc l'avantage important de permettre l'économie d'une analyse de sensibilité spécifique pour l'analyse des erreurs du modèle, et d'éviter de faire des choix arbitraires concernant les paramètres auxquels restreindre l'analyse. A condition de disposer d'estimations des erreurs de mesure associées à chacun de ces paramètres dans le dispositif utilisé pour le diagnostic et la construction du modèle, il est possible d'estimer la part des erreurs de mesure dans les écarts constatés à la fin de l'étape B entre les rendements simulés et observés. Si cette source d'erreur domine, c'est que le modèle construit ne peut être amélioré avec les données dont on dispose, et que les contraintes supplémentaires ont bien des effets négligeables compte tenu de la précision de ces données. Dans le cas contraire, des possibilités d'amélioration du modèle existent, qui permettraient de mieux évaluer l'influence des contraintes supplémentaires.

4.4.- Caractéristiques générales du dispositif expérimental

Le dispositif expérimental doit idéalement permettre une réalisation de M_4 , c'est à dire un ensemble d'observations de couples formés par Y et le vecteur x_4 , une valeur de ce dernier définissant une situation culturelle. Une enquête en parcelles de producteurs est ainsi conduite sur un échantillon couvrant la diversité régionale des situations culturelles. Cet échantillon n'est pas nécessairement représentatif, au sens où il peut être utile que les situations extrêmes soient sur-représentées par rapport à la réalité, compte tenu des informations qu'elles peuvent fournir sur le fonctionnement de la culture sous les contraintes les plus sévères ou au contraire lorsqu'on se rapproche du potentiel. On pourra veiller cependant à ce qu'un sous-échantillon représentatif puisse être extrait, lors de la quantification du poids des différentes contraintes pour la région étudiée, si l'objectif est d'établir des priorités dans les actions régionales d'appui aux producteurs.

De même que dans la méthode de référence, c'est le diagnostic préliminaire et la théorie agronomique, dont la conjugaison forme une version conceptuelle du modèle M_4 , qui renseignent sur les variables à observer pour caractériser les situations culturelles, variables constituant idéalement les différentes coordonnées du vecteur x_4 et qui doivent permettre de calculer des indicateurs de contraintes, sous-modèles de M_4 . Le dispositif doit rechercher un compromis équilibré entre les objectifs suivants, contradictoires au plan pratique:

- mesurer dans chaque situations culturelle un vecteur x_i le plus proche possible de x_4 ,
- maximiser la précision de ces mesures et de celles de Y ,
- mesurer x_i et Y pour la plus grande diversité possible de situations culturelles.

Le dispositif expérimental doit également permettre le calage et la validation des modèles de départ et intermédiaires M_1 et M_i . Le réseau de situations culturelles en parcelles de producteurs peut contribuer à ces opérations s'il est possible, à partir des indicateurs mesurés de contrainte, de créer des sous-échantillons où certaines contraintes sont à des niveaux non limitants. Mais des dispositifs annexes pourront être nécessaires, éventuellement en milieu contrôlé, pour caler ou valider certains composants du modèle. Ces dispositifs jouent un rôle similaire à celui des "expérimentations spécifiques" prévues dans la méthode de référence pour compléter les connaissances disponibles dans la littérature sur les effets, mal connus pour l'environnement étudié, de certaines contraintes (Doré *et al.*, 1997).

Enfin, le protocole expérimental doit permettre une estimation des erreurs de mesure sur

le vecteur x_4 .

5.- Conclusion: les objectifs du travail et ses principales étapes

Une question partagée par les différents chercheurs participant à un projet de recherche-développement au Brésil impliquait le recours à la modélisation bio-économique des exploitations. La contribution de l'agronomie des systèmes de cultures à cette question exigeait des innovations méthodologiques pour *la construction, basée sur un diagnostic, d'un modèle de simulation de culture adapté à la région d'étude et à la question traitée*. Ce sont ces innovations méthodologiques qui font l'objet de la présente thèse.

Ainsi, l'objectif général était de mettre au point un modèle de simulation des rendements du maïs capable de restituer de manière réaliste pour la région de Silvânia les distributions inter-annuelles des rendements résultant des interactions entre le climat, les principaux types de milieu naturel, et les principaux types de gestion technique des parcelles - les systèmes de cultures.

Atteindre cet objectif supposait d'atteindre un objectif intermédiaire, la validation d'une méthode de diagnostic et de modélisation et devait permettre de contribuer à deux objectifs complémentaires :

- produire des recommandations pour améliorer localement la gestion de l'écosystème cultivé, à partir du diagnostic agronomique associé à la modélisation,
- tirer de la modélisation locale des enseignements généraux pour la modélisation des écosystèmes cultivés tropicaux.

En complément de la figure 1.7, une autre présentation synthétique de cette méthode de diagnostic et de modélisation est donnée à la figure 1.8, en la re-situant par rapport à la méthode de référence résumée à la figure 1.6, et en tenant compte du fait que deux itérations de la phase de "diagnostic et modélisation élémentaires" ont été pratiquées dans la présente thèse. Le plan du mémoire est déduit de cette présentation synthétique comme suit.

Le chapitre 2 correspond à l'étape A, dont le but était de constituer un diagnostic préliminaire des principales causes de la variabilité du rendement à Silvânia, sur lequel fonder:

- le choix du modèle à prendre comme point de départ,

- la construction d'un dispositif expérimental en vue de permettre le calage de ce modèle, le diagnostic agronomique et la modélisation complémentaire à conduire.

Dans une deuxième étape correspondant à une première itération de l'étape B (chapitre 3), le modèle a été calé et validé, puis confronté aux situations culturelles réelles de la région de manière à identifier, parmi les contraintes non prises en compte par le modèle, celles qui avaient un poids important dans la variabilité des rendements.

Le chapitre 4 décrit l'introduction dans le modèle de nouveaux modules simulant ces contraintes, par une utilisation critique des connaissances disponibles dans d'autres modèles plus ou moins complexes que notre modèle de départ. Le nouveau modèle obtenu est ensuite confronté aux situations culturelles observées chez les producteurs, complétant ainsi une seconde itération de l'étape B.

Dans le chapitre 5, correspondant à l'étape C, le nouveau modèle est appliqué pour établir une hiérarchie détaillée des causes de variations du rendement à Silvânia, en tenant compte de la variabilité inter-annuelle des précipitations telle que représentée par une série historique de données pluviométrique. Ce diagnostic final fournit ainsi à la fois des éléments d'amélioration des systèmes de culture et les clefs de la typologie des situations culturelles requise par la modélisation des exploitations.

Enfin, le chapitre 6 discute et conclut sur chacun des objectifs énoncés plus haut.

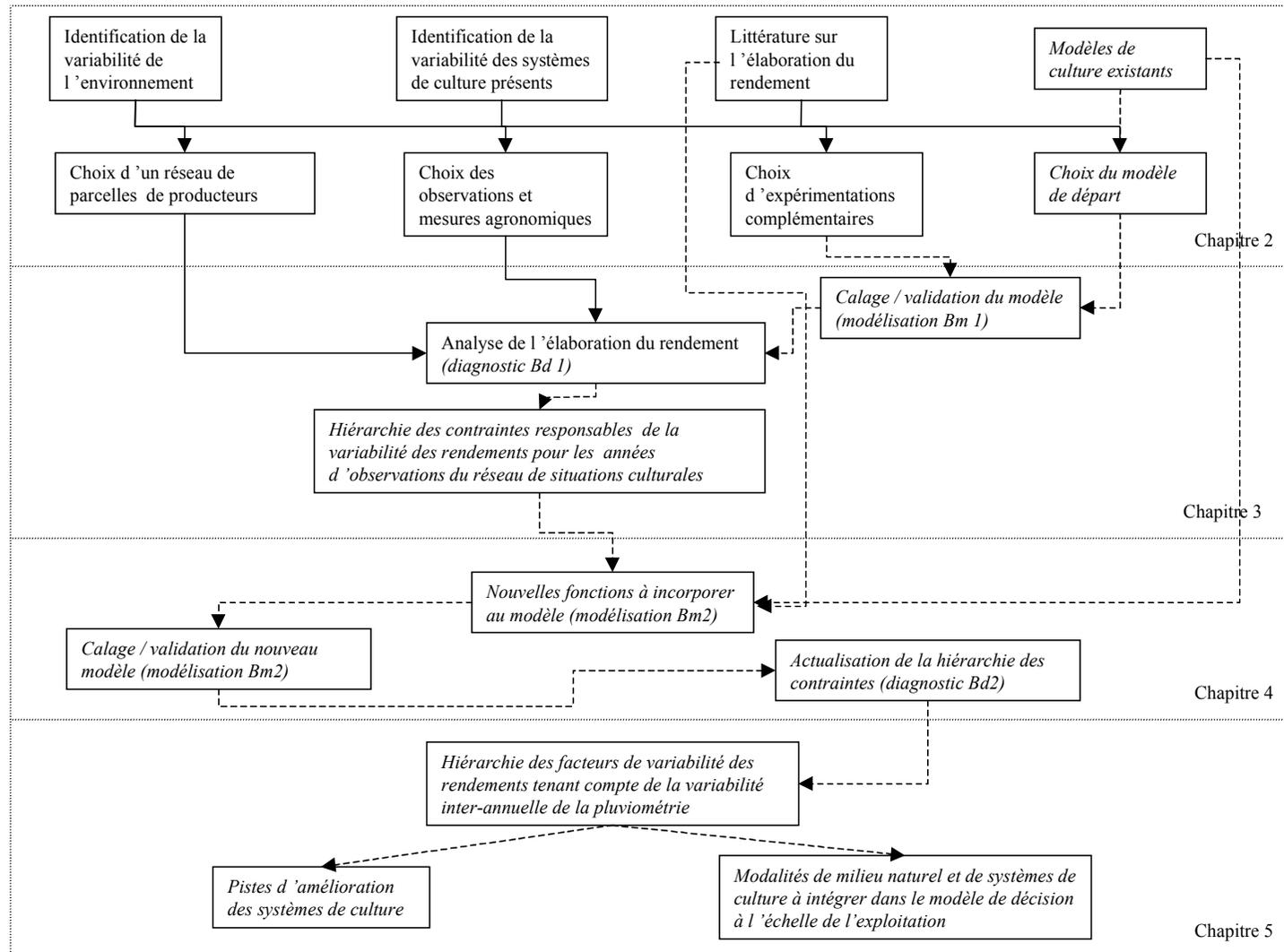


Figure 1.8.- Diagramme de la méthode proposée et plan de la thèse. Le texte en italique et les flèches en pointillés correspondent à des innovations méthodologiques par rapport au diagramme de Doré et al., présenté à la figure 1.6.

Chapitre 2:
choix du modèle de départ et d'un dispositif expérimental.

1.- Diagnostic préliminaire de la variabilité des rendements à Silvânia.

Le but du diagnostic préliminaire était d'établir une liste, la plus complète possible, des contraintes susceptibles d'avoir une influence non négligeable sur la variabilité des rendements à Silvânia. Cette liste devait permettre d'une part de raisonner le choix du modèle à prendre comme point de départ de la modélisation, et d'autre part de construire le dispositif de diagnostic agronomique en fournissant les critères à retenir pour structurer l'échantillon de parcelles et les variables à observer dans ces parcelles.

Ce pré-diagnostic a été construit d'une part à partir de la littérature existante concernant la région et d'autre part grâce à une pré-enquête comprenant une interrogation informelle des producteurs de Silvânia et des chercheurs et techniciens agricoles intervenant sur le territoire du *município*, ainsi qu'un "tour de plaine" avec réalisation de profils culturaux (Manichon, 1982) sur des parcelles particulièrement contrastées du point de vue du développement du maïs et du point de vue de la situation morphopédologique.

1.1.- Informations fournies par la littérature

Des données bibliographiques générales sur la région de Silvânia ont déjà été présentées sommairement dans le chapitre 1, et sont précisées ici. Blancaneaux et al (1993) ainsi que Madeira (Comm.. Pers.) indiquent d'importantes contraintes édaphiques, avec une très grande variabilité spatiale déterminée en première approximation par la position dans la toposéquence et le substrat géologique, ce dernier ayant une influence très faible sur les sols de plateau, et très nette sur les sols de versant, son influence sur les sols de bas de toposéquence étant atténuée par rapport aux précédents, du fait des flux latéraux de matériaux (colluvionnement et alluvionnement) impliqués dans leur formation.

Typiquement, les sols de plateau sont des *latossolos* rouge sombre ou rouge jaune selon que le drainage est bon ou modéré, développés sur une couverture détrito-latéritique du quaternaire. Leurs caractéristiques physiques sont très favorables à l'activité agricole: infiltrabilité élevée, réserve utile de l'ordre de 110mm/m, profondeur supérieure à 300cm et propriétés mécaniques proches de celles des sols sableux malgré des taux d'argile élevés, en raison de la floculation des argiles en "pseudo-sables" résultant d'un pH fortement acide. Cette acidité élevée, la présence éventuelle d'aluminium échangeable, ainsi que leur faible CEC et la faible disponibilité du phosphore constituent en revanche des contraintes chimiques sévères. Ces sols reçoivent la dénomination vernaculaire de "*terra de cerrado*", correspondant à l'usage de

parcours pour le bétail qui en était fait jusqu'à leur mise en valeur, grâce au chaulage, par les migrants venus du sud du Brésil. En bordure de plateau se rencontrent des *latossolos plinticos* ou *petroplinticos*, caractérisés par la présence, à faible profondeur, de concrétions ferrugineuses ou de cuirasse, respectivement. Ces derniers sols ne sont en général pas cultivés. Un terme intermédiaire entre eux et les *latossolos*, dans lequel la cuirasse est à une profondeur proche du mètre, est plus fréquemment exploité; les *latossolos endo-pétoplinticos*.

Les versants sont exploités traditionnellement en pâturages, mais avec une progression sensible et récente des surfaces en maïs. Les sols les plus fréquents y sont des *cambissolos*, peu profonds, à forte charge en graviers et cailloux, dont les caractéristiques chimiques dépendent étroitement du matériau d'origine. Sur roches riches en minéraux ferro-magnésiens ils reçoivent la dénomination vernaculaire de "*terra de meia-cultura*" (approximativement traduisible par "terre de culture moyenne") et sont qualifiés d'eutrophiques par la systématique brésilienne, tandis que sur substrat plus pauvre ils sont dénommés "*terra de campo*" ("terre de prairie") et sont classés par les pédologues dans les *cambissolos distroficicos*, voire *alicos* dans le cas où leur teneur en aluminium échangeable est élevée dès la surface. Dans le contexte de versants longs sur granites, constituant des surfaces d'érosion plus anciennes que sur les fortes pentes, des *Latossolos* ou des *Podzolicos* (caractérisés par la présence d'un horizon B textural résultant d'une migration des argiles) peuvent apparaître.

Dans les bas de pente, une bande de quelques centaines de mètres de largeur de part et d'autre des axes de drainage comprend des sols très variés, avec une prédominance de *Podzolicos*, influencés par le colluvionnement voire l'alluvionnement, de fertilité chimique généralement élevée et regroupés sous la dénomination vernaculaire de "*terra de cultura*" (terre de culture). Immédiatement de part et d'autre du cours d'eau, une zone de sols hydromorphes encadre un talus qui supporte généralement une forêt galerie (Blancaneaux *et al.*, 1993).

Tous ces sols sont plus ou moins sujets à la compaction et à l'érosion, la pente et la structure "*po de café*" ("café en poudre", ou pseudo-sable) des *Latossolos*, ainsi que le gradient de texture dans le cas des *Podzolicos* étant des facteurs aggravants (Reatto *et al.*, 1998). Une table de correspondance entre la taxonomie brésilienne, qui sera employée dans l'ensemble de la thèse, et la taxonomie de la FAO, est fournie en annexe 5.

Les risques de veranicos, périodes de pause des précipitations en cours de saison des pluies, évalués par Assad (1994), sont importants en janvier et février, soit au coeur de la saison (tableau 2.1).

mois	pluviométrie atteinte ou dépassée (mm)			Probabilité d'occurrence de <i>Véranico</i> d'une durée		
	2 années sur 10	5 années sur 10	8 années sur 10	> 10 jours	> 15 jours	> 20 jours
septembre	60-90	15-30	< 10			
octobre	200-250	100-150	60-90	0.5-0.75	0.15-0.25	0.05-0.15
novembre	300-350	150-200	100-150	0.25-0.5	0.05-0.15	<0.05
décembre	350-400	200-250	150-200	0.15-0.25	< 0.05	<0.05
janvier	350-400	250-300	150-200	0.25-0.5	< 0.05	< 0.05
février	250-300	200-250	100-150	0.25-0.5	0.05-0.15	< 0.05
mars	250-300	150-200	100-150	0.5-0.75	< 0.05	< 0.05
avril	150-200	50-100	30-50			
mai	50-100	< 30	< 30			

Tableau 2.1. Profil de la saison des pluies dans la région de Silvânia et risques de véranicos. Adapté de: Assad *et al.*(1994).

1.2.- Pré-enquête

Les chercheurs et techniciens du “projet Silvânia” ainsi que les producteurs interrogés confirmaient l'importance de ces contraintes édaphiques et climatiques, et signalaient en outre que les productivités du maïs étaient limitées par des contraintes d'enherbement, des densités de semis très faibles et des fertilisations insuffisantes, tout particulièrement en ce qui concerne l'azote, ainsi que par des attaques localisées et occasionnelles de foreurs des tiges (*spodoptera spp*).

Afin de compléter ces informations, et notamment compte tenu d'incertitudes sur l'occurrence et l'intensité de la contrainte aluminique dans les sols exploités par les petits producteurs, beaucoup moins étudiés par la recherche brésilienne que les sols de plateau, un tour

de plaine a été réalisé à travers la région. Un ensemble de 12 profils culturaux (Manichon, 1982) a ainsi été constitué en cherchant, pour chacune des 4 régions géo-morphologique du municipio identifiées par Madeira (comm. pers), à observer deux situations particulièrement contraintes, et un terme de comparaison plus favorable. Le critère retenu pour l'ouverture d'un profil était l'aspect du maïs à la floraison.

Les observations sur ces profils (annexe 1), réalisées par le Pr. Manichon, ont conduit à éliminer la compaction des sols par le trafic de machines agricoles, et plus généralement la structure des sols, en tant que contraintes majeures à la productivité. De légers symptômes de compaction ont certes pu être observés sur un *latossolo* (annexe 1, profil 8), réputé sensible à la compaction, mais il s'agissait d'une parcelle cultivée aux disques depuis plus de 15 ans soit une durée exceptionnellement longue pour les exploitations de notre étude, pour lesquelles le recours à la mécanisation est en général beaucoup plus récent. La structure du sol travaillé est apparue hautement pulvérisée dans la plupart des cas, ce qui n'est pas surprenant compte tenu du recours exclusif aux outils à disques, souvent en condition relativement sèches. Ceci, associé à des pentes parfois importantes et au fait que le sol est le plus souvent nu dans les parcelles durant le premier mois de la saison des pluies, est théoriquement favorable à une érosion importante. Cependant, peu de symptômes d'érosion ont été observés dans le paysage, par rapport à ce qu'on pouvait attendre compte tenu non seulement de ce qui précède, mais aussi de la littérature (Blancaneaux *et al.*, 1993; Dedecek *et al.*, 1986). Il est probable que les taux de pierrosité élevés des sols de pente soient un facteur stabilisateur (Madeira, comm. pers.). Il n'en reste pas moins que, l'expansion de la mécanisation n'étant que très récente dans la région, particulièrement sur les sols comportant à priori les risques d'érosion le plus élevés, la situation devrait logiquement s'aggraver avec le temps, si l'évolution actuelle des systèmes de culture se poursuit.

Les profils culturaux ont révélé clairement une grande variabilité des volumes de sol exploités par les racines, due dans la majorité des cas à la variabilité de l'épaisseur des sols et de leur teneurs en éléments grossiers. Dans cinq cas, cependant, la profondeur atteinte par les racines n'excédait pas 100cm sans que cela puisse être attribué à une contrainte physique (profils 3,4,5,7,et 8, annexe 1), des profils morphologiquement voisins présentant des enracinements atteignant 150 voire 170cm de profondeur. Les analyses de sols réalisées sur des échantillons prélevés sur les profils culturaux ont montré, pour trois de ces cinq cas, que la toxicité aluminique (2 cas, profils 7 et 8) ou une déficience en calcium (1 cas, profil 5) pouvait expliquer ces enracinements limités, confirmant la nécessité de tenir compte de cette contrainte pour la

suite de l'étude. Dans les deux cas restants (profils 3 et 4), cette hypothèse ne pouvait être faite, mais des symptômes d'hydromorphie temporaire observés sur les profils conduisaient à suspecter une anoxie du sol pendant la période de croissance des racines. Cette contrainte était donc à ajouter à la liste des contraintes susceptibles d'avoir une influence sur la variabilité des rendements dans la région (tableau 2.2).

Contrainte	Cause possible
stress hydrique	période sèche de durée variable se produisant souvent au milieu de la saison des pluies (<i>veranico</i>)
faible disponibilité en éléments nutritifs (particulièrement N, et P)	nature du sol et fertilisation insuffisante
faible densité de peuplement	faible densité de semis
toxicité aluminique (et déficience en Ca)	nature du sol
mauvaises herbes	sarclages tardifs et mauvaise préparation du sol
attaques de borers (<i>spodoptera spp</i>)	absence de contrôles
excès d'eau	fortes précipitations sur sols mal drainés

Tableau 2.2. Diagnostic préliminaire des contraintes pouvant agir sur les rendements du maïs à Silvânia.

2.- Choix du modèle

La démarche que nous nous proposons de mettre en oeuvre exigeait que le modèle choisi comme point de départ du travail de diagnostic et de modélisation soit construit:

- selon le paradigme d'un rendement potentiel limité par des contraintes,

- pour l'échelle de la parcelle cultivée,

- dans la recherche d'un compromis entre précision et robustesse tel que ses données d'entrées soient toutes accessibles à la mesure dans le contexte d'une étude en parcelles de producteurs.

Ce dernier critère conduisait à écarter les modèles fonctionnant à un pas de temps inférieur à la journée, pour lesquels les données climatiques, en particulier, auraient été extrêmement coûteuses à obtenir. Par ailleurs, s'il existe des modèles de bilan hydrique fonctionnant à un pas de temps supérieur à celui de la journée tel que la pentade ou la décade (Forest et Kalms, 1984), les modèles simulant des interactions entre contraintes fonctionnent tous au plus au pas de temps journalier, qui semble ainsi le meilleur compromis actuel entre les exigences en données et la précision des calculs.

Aucun des modèles de simulation du rendement du maïs proposés par la littérature et répondant à ces critères n'avait été évalué pour la région des cerrados brésiliens. Les seuls travaux de modélisation menés dans ce domaine pour la région concernaient un modèle de croissance potentielle couplé à un modèle de bilan hydrique (Buttler, 1989), puis plus récemment nos propres travaux de calage et de validation d'un modèle de bilan hydrique (Affholder *et al.*, 1997), par ailleurs déjà éprouvé pour une grande variété de situations tropicales (Affholder, 1995b; Albergel *et al.*, 1991; Chopart et Vauclin, 1990; Freteaud *et al.*, 1987; Maraux, 1994; Scopel, 1994).

Il était indispensable de disposer d'un module de bilan hydrique fiable pour notre étude, non seulement pour la raison triviale que nous avons à évaluer des risques climatiques, mais aussi parce que la précision de la simulation d'éventuelles contraintes nutritionnelles est étroitement dépendante de la précision de l'estimation des flux hydriques vers la plante ou sortant de la zone de sol exploitée par la culture. Il paraissait donc légitime de retenir un modèle dont le module de bilan hydrique soit assez proche des modules de bilan hydrique déjà validés pour la région, ce qui orientait le choix vers le modèle STICS (Brisson *et al.*, 1998), proposé par une équipe de l'INRA, et dont le calcul de la croissance potentielle était en outre similaire à celui

évalué par Buttler à Brasilia. STICS contenait un module de bilan azoté et prenait en compte l'influence de la densité de peuplement. Le modèle CropSyst (Stockle *et al.*,) offrait les mêmes possibilités. Le fait qu'il soit issu de l'approche de Tanner et Sinclair (1983), c'est à dire basé sur un calcul de la transpiration à partir du déficit de pression de vapeur et non pas à partir des conditions hydriques du sol, limitait les possibilités de mettre à profit l'expérience acquise avec Sarra-Br pour la région des Cerrados. Le modèle CERES (Jones et Kiniry, 1986) devait être écarté, compte tenu des résultats très mauvais relevés par plusieurs auteurs en situations tropicales à niveaux d'intrants faibles à modérés, attribués en particulier à de mauvaises simulations des stress hydriques (du Toit *et al.*, 1999; Fetcher *et al.*, 1991; Mbabaliye et Wojtkowski, 1994; White et Grace, 1999).

Un autre modèle, EPIC (Williams *et al.*, 1984), répondait aux critères généraux énoncés plus haut et semblait couvrir mieux que STICS la liste des contraintes établie au diagnostic préliminaire. En effet, outre la simulation des bilans hydrique et azoté, il tenait compte de la toxicité aluminique, de la déficience en P et de l'anoxie du sol. Cependant, il ne tenait pas compte explicitement de densités de peuplement variables et son module de bilan hydrique différait très sensiblement de ceux qui avaient déjà été éprouvés pour la région.

La nécessité de modifier le modèle dans un cas comme dans l'autre nous incitait à privilégier celui des deux dont le programme informatique était le plus accessible et le plus facilement modifiable. STICS l'emportait sur EPIC pour ce critère, grâce à son architecture modulaire facilitant la modification de fonctions déjà existantes et l'ajout de nouvelles, et surtout compte tenu de la possibilité de bénéficier à tout moment d'un appui de la part de ses auteurs. Enfin STICS avait été développé récemment sur la base d'une analyse critique des modèles plus anciens, dont EPIC.

Il nous a donc paru plus approprié, sans prétendre pour autant réaliser en cela un choix idéal, de retenir STICS comme modèle de départ de notre démarche, et d'utiliser EPIC, entre autres, comme une bibliothèque de modules alimentant la modélisation complémentaire à conduire à partir du diagnostic agronomique.

3.- Dispositif expérimental

3.1.- Situations culturales en parcelles de producteurs

Le dispositif utilisé pour le diagnostic agronomique comprenait un échantillon de 50 placettes correspondant chacune à une situation culturelle, délimitées à l'intérieur de parcelles de producteurs de Silvânia, la culture y étant gérée par ces derniers sans intervention de notre part. Cet échantillon était construit de manière à:

- être représentatif de la diversité des situations édaphiques rencontrées par les petits producteurs du *município*,
- couvrir toute la gamme des systèmes de culture à base de maïs appliqués à ces milieux.

La très forte hétérogénéité spatiale des conditions édaphiques a conduit à retenir une superficie de 25 m² pour ces placettes, soit le plus souvent cinq rangs de maïs de 5 à 6 m de longueur, superficie paraissant un compromis satisfaisant entre une variabilité intra-placette des conditions édaphiques, que l'on souhaitait la plus faible possible, et une quantité de plantes pouvant être prélevées pour les mesures sur la végétation, que l'on souhaitait la plus élevée possible.

Cet échantillon distribué dans l'ensemble du *município* de Silvânia a fait l'objet d'un suivi pendant trois campagnes agricoles, de 1994-1995 à 1996-1997. On espérait ainsi augmenter la diversité des pratiques culturales (variations à l'intérieur d'un itinéraire techniques), de la pression parasitaire et des conditions climatiques des situations culturales étudiées, sans pour autant prétendre constituer un échantillon "représentatif" des conditions climatiques locales.

Le diagnostic préliminaire permettait de définir l'ensemble des variables décrivant les états du milieu qu'il était nécessaire d'observer et la façon dont l'échantillon devait être structuré. Ainsi, sur la base des travaux déjà évoqués de Blancanneaux *et al.* (1993) et de Madeira, (comm. pers.), quatre types d'unités géomorphologiques ont été retenues, correspondant à quatre toposéquences différentes dans lesquelles étaient considérées deux ou trois unités selon les cas, l'unité "*chapada*" étant absente pour deux toposéquences. Il en résultait dix situations édaphiques (tableau 2.3).

Numéro situation édaphique	Position dans la topo-séquence	Unité géologique	Associations et lieux-dits échantillonnés	Nom vernaculaire des sols	Sols (classification brésilienne)
1	bas	ARAXA (A)	Variado Quilombo	terra de cultura	Podzólico eutrófico, Podzólico distrófico, Latossolo vermelho-amarelo, Solo aluvial
2		GRANITO modalité Leucocrático (B)	Quilombo Santa Rita		
3		GRANITO (C)	João de Deus Barrinha		
4		GRANULITO ou GRANITO modalité "riche en biotite" (D)	Bom Jardim Limeira		
5	versant raide	ARAXA (A)	Variado Quilombo	terra de campo	cambissolo álico, cambissolo distrófico, cambissolo eutrófico
6		GRANITO modalité "Leucocrático" (B)	Quilombo Santa Rita		
7		GRANITO (C)	João de Deus Barrinha	terra de meia cultura	cambissolo eutrófico
8		GRANULITO ou GRANITO modalité "riche en biotite" (D)	Bom Jardim Limeira		
9	versant faible pente ou plateau	ARAXA (A)	Variado Quilombo	terra de cerrado	Latossolo vermelho-amarelo, Latossolo vermelho escuro, Podzólico vermelho amarelo, Podzólico vermelho escuro
10		GRANITO (C)	João de Deus Limeira Santa Rita		

Tableau 2.3. Modalités édaphiques retenues pour la stratification de l'échantillon

Ces dix situations édaphiques ont été croisées avec une typologie des itinéraires techniques établie par (Bonnal *et al.*, 1992) par enquête large et actualisée par Affholder (1995c) en exploitant les données recueillies dans un réseau de fermes de référence. Ces itinéraires techniques se distinguaient principalement par la technique utilisée pour le semis (canne semeuse, traction animale ou tracteur) et le niveau de fertilisation employé. Cinq types d'itinéraires étaient distingués (tableau 2.4).

Code	Préparation du sol	semis	fertilisation			sarclages	symbole ⁽¹⁾	
			type	dose moyenne (kg/ha)				
				N	P ₂ O ₅			K ₂ O
1	Charrue (occasionnel) + déchaumeuse + pulvérisateur (tous les outils sont à disques)	manuel (houe ou canne semeuse)	pas de fertilisation				manuels (houe) ou en traction animale (cultivateur à dents)	M0
2	comme 1	comme 1	engrais NPK au semis plus N entre 20 et 40 jours	15	40	20	comme 1	M1
3	comme 1	traction animale (semoir mono-rang)	comme 2 avec apports N plus importants	40	70	40	traction animale (cultivateur à dents) complétée par sarclage manuel sur le rang si nécessaire.	A1
4	comme 1	tracteur (semoir à 4 rangs)	comme 3	40	70	40	comme 3	T1-
5	comme 1	comme 4	comme 3, avec dose N plus élevée	60	70	40	comme 3	T1+

Tableau 2.4: Typologie des itinéraires techniques, adaptée de Bonnal et al (1992), et Affholder (1994). La récolte est manuelle dans tous les cas. (1): Le symbole combine le type de semis (M: manuel; A: traction animale; T:tracteur) avec la présence (1) ou l'absence (0) de fertilisation, les itinéraires 4 et 5 se distinguant par les doses utilisées pour l'azote, (faibles: -; fortes: +)

Certaines des 50 combinaisons possibles entre itinéraires techniques et types de sol se

sont révélées inexistantes. Par contre, certaines situations différant par d'autres critères que les critères principaux de stratification de l'échantillon, ont parfois été incorporées dans ce dernier au moment de la mise en place du dispositif: il s'agissait de situations appartenant à une même combinaison d'itinéraire technique et de sol, contrastées du point de vue de l'aspect, tel qu'observable à l'oeil, de la végétation et du sol en surface. Sur l'ensemble du suivi, 6 placettes ont été perdues à la suite d'une récolte anticipée du producteur due à des malentendus entre ce dernier et nous-même sur le protocole de suivi. Au total, 144 situations culturales ont ainsi été suivies jusqu'à la récolte. Les conditions climatiques auxquelles ces situations étaient soumises dépendaient non seulement de leur localisation et de l'année, mais aussi fortement de la date de semis pratiquée. Celle-ci est apparue très variable, y compris pour une année et un itinéraire technique donnés. Bien que l'on ait maintenu chaque année la distribution des modalités croisant itinéraire technique et sol, le facteur "année" ne pouvait donc être considéré comme structurant l'échantillon du point de vue des conditions climatiques.

Enfin, signalons que de nombreux producteurs ont changé d'itinéraires techniques d'une année à l'autre, ce qui nous a conduit à reconstruire notre échantillon à chaque campagne sur la base d'une enquête rapide au moment de la mise en culture, et nous a empêché de suivre l'évolution inter annuelle des rendements d'une situation culturale invariante.

Les composantes du rendement suivantes étaient mesurées dans chaque placette: rendement en grain (Yobs), nombre de plantes par unité de surface (NPha), indice de surface foliaire à floraison mâle (LAI_f), nombre de grains par plante (NGP) et poids d'un grain à maturité (PIG). LAI_f était obtenu par mesure de l'extinction du rayonnement par le couvert de maïs sur une surface de 5m², à l'aide d'un appareil *Picqhélios*, mesurant simultanément le rayonnement au-dessus du couvert et au niveau du sol. La relation entre l'extinction et le LAI avait été étalonnée sur des mesures directes de LAI au planimètre optique *LICOR*. Le recours au *Picqhélios* avait l'avantage de permettre une mesure non destructrice intégrant un grand nombre de plantes (de 15 à 35 selon la densité de peuplement), mais présentait l'inconvénient d'exiger que la mesure soit pratiquée à horaires fixes proches du midi solaire, avec un ciel clair. Du fait de ces conditions contraignantes, LAI_f n'a été mesuré que pour 92 placettes. Toutes les mesures sur le matériel végétal étaient réalisées en individualisant chaque rang de maïs, de manière à disposer d'une évaluation de la variabilité interne à la placette.

Des échantillons de sol ont été prélevés au début et à la fin de chaque campagne,

respectivement pour une tranche 0-20cm et pour 5 tranches de 20 cm d'épaisseur de 0 à 100 cm de profondeur, en quatre sondages distincts pour chaque placette. Les analyses réalisées au laboratoire des sols de l'EMBRAPA-CPAC étaient la texture, la caractérisation du complexe d'échange, le pH (Kcl), l'azote total, le phosphore disponible (P Bray-I), le taux de matière organique, et la courbe de rétention des sols. Cette dernière était obtenue par centrifugation (protocole de routine du CPAC) sur échantillons remaniés et tamisés (maille= 2mm). Les cailloux pouvant être considérés non poreux (dominance de quartz), les valeurs des humidités volumiques Teta étaient ensuite calculées en tenant compte de la charge en éléments grossiers, selon la formule:

$$\text{Teta} = W_{\text{tf}} \cdot d_{\text{a,tf}} \cdot (1 - \text{CVc}),$$

où W_{tf} est l'humidité pondérale mesurée sur terre fine, $d_{\text{a,tf}}$ la densité apparente de la terre fine, et CVc la charge volumique en cailloux, elle-même calculée par:

$$\text{CVc} = d_{\text{a,tf}} \cdot P_c / (\rho_c(1 - P_c) + d_{\text{a,tf}} \cdot P_c)$$

avec P_c = teneur massique en cailloux et ρ_c = masse volumique des cailloux déduite de mesures volumétriques par plongée dans un liquide.

L'observation des stades phénologiques était pratiquée par l'exploitant, avec un contrôle lors de nos passages à 10, 30, 60, 90 et 130 jours après semis, où étaient notés, à l'aide d'échelles à cinq niveaux, l'enherbement, les dégâts causés par les insectes ainsi que ceux causés par les maladies. Les dates de toutes les interventions techniques du producteur étaient enregistrées, ainsi que leur nature et les outils employés. Les profondeurs de travail du sol et de semis étaient mesurées immédiatement après l'opération correspondante, avec des répétitions dans chaque placette de manière à évaluer la régularité du travail dans les deux dimensions horizontales.

Compte tenu de leur faible variabilité spatiale dans la région des Cerrados (Adámoli *et al.*, 1987), la température, le rayonnement, l'humidité relative et la vitesse du vent étaient mesurées par une station automatique (CIMEL) occupant une position centrale dans le dispositif. Beaucoup plus variables, les pluies étaient en revanche relevées quotidiennement à proximité immédiate de chaque placette d'observation.

Des indicateurs de contraintes ont été construits pour chacune des contraintes identifiées au diagnostic préliminaire et non prises en compte par STICS, et sont décrits au tableau 2.5.

Symbole	contrainte	indicateur	dates auxquelles l'indicateur était évalué
A	toxicité aluminique/ déficience en Ca	première profondeur (de la surface à 100cm) à laquelle SatAL >45% ou Ca <0.05meq/100g ⁽¹⁾	une valeur de l'indicateur pour le cycle (prélèvements de sols avant mise en place de la culture)
H	Mauvaises herbes	Attribution visuelle d'une note sur une échelle de 1 à 5 (1: pas de contrainte visible; 5: contrainte touchant gravement toutes les plantes; 2 à 4: niveaux intermédiaires entre ces extrêmes).	à 10, 30, 60, 90 et 130 jours après semis
I	Maladies des plantes		
	Dégâts d'insectes		
C	symptômes de carences sur le feuillage (en relation avec les contraintes N, P et K)		
E	excès d'eau (anoxie du sol)	séquences de jours consécutifs où un drainage sous la zone racinaire était simulé par STICS	quotidiennement
P (niveau de la contrainte P obtenu en combinant le niveau de déficience du sol avec le niveau d'apport fertilisant)	déficience en P du sol	P(Bray I) < 5.5ppm (sur échantillon 0-20cm): sol déficient. Sinon: sol non déficient ⁽²⁾	une valeur de l'indicateur pour le cycle
	Fertilisation phosphorée	classes d'apports de P ₂ O ₅ par fertilisation (division de l'échantillon de placettes selon l'apport de P, en 4 classes d'effectif constant)	une valeur de l'indicateur pour le cycle
K (même remarque que pour P)	déficience en K du sol	K < 0.15 meq/100g (sur échantillon 0-20cm): sol déficient. Sinon: sol non déficient ⁽³⁾	une valeur de l'indicateur pour le cycle
	Fertilisation potassique	classes d'apports de K ₂ O par fertilisation (division de l'échantillon de placettes selon l'apport de K ₂ O, en 4 classes d'effectif constant)	une valeur de l'indicateur pour le cycle

Tableau 2.5. Indicateurs de contraintes utilisés pour le diagnostic agronomique (cas des contraintes non prises en compte par le modèle STICS). **(1)**:(Dias *et al.*, 1985; Gomes de Souza *et al.*, 1985; Ritchey *et al.*, 1984); **(2)**:(Goedert *et al.*, 1987); **(3)**:(Vilela *et al.*, 1987).

Compte tenu de données manquantes pour diverses variables observées de cette enquête agronomique, particulièrement, comme évoqué plus haut, le LAI, mais aussi certaines date d'interventions culturales, quelques résultats d'analyse de sol (pertes d'échantillons), et quelques valeurs d'apports fertilisants, deux sous-échantillons ont été constitués sans distorsion majeure, par rapport à l'échantillon de toutes les placettes récoltées (tableau 2.6 et figure 2.1), de la distribution de ces placettes entre les différentes modalités de sol et d'itinéraire technique. Ils correspondaient à deux jeux de variables sans données manquantes. Le premier contenait 86 placettes sans données manquantes pour toutes les variables sauf les dates de sarclage et les analyses de sol pour la tranche 40-100cm. Le second, comprenant 54 placettes, ne contenait aucune donnée manquante sauf pour le LAI.

modalité	sol	ITK	typsol	unité	toutes les placettes récoltées		sous-échantillon 86 placettes		sous-échantillon 54 placettes	
					nombre	%	nombre	%	nombre	%
1	2	1	bas	B	5	3.47	3.00	3.49	2	3.70
2	3	1	bas	C	4	2.78	1.00	1.16	0	0.00
3	4	1	bas	D	2	1.39	0.00	0.00	0	0.00
4	1	2	bas	A	6	4.17	0.00	0.00	0	0.00
5	2	2	bas	B	12	8.33	7.00	8.14	3	5.56
6	6	2	mi-versant raide	B	1	0.69	1.00	1.16	0	0.00
7	3	3	bas	C	7	4.86	2.00	2.33	2	3.70
8	10	3	haut de versant plat ou plate	C	1	0.69	1.00	1.16	1	1.85
9	7	3	mi-versant raide	C	1	0.69	0.00	0.00	0	0.00
10	8	3	mi-versant raide	D	3	2.08	3.00	3.49	3	5.56
11	1	4	bas	A	2	1.39	0.00	0.00	0	0.00
12	2	4	bas	B	12	8.33	7.00	8.14	3	5.56
13	3	4	bas	C	4	2.78	2.00	2.33	1	1.85
14	4	4	bas	D	10	6.94	4.00	4.65	4	7.41
15	9	4	haut de versant plat ou plate	A	8	5.56	1.00	1.16	1	1.85
16	10	4	haut de versant plat ou plate	B	6	4.17	0.00	0.00	0	0.00
17	5	4	mi-versant raide	A	1	0.69	0.00	0.00	0	0.00
18	6	4	mi-versant raide	B	5	3.47	3.00	3.49	2	3.70
19	8	4	mi-versant raide	D	9	6.25	6.00	6.98	5	9.26
20	1	5	bas	A	6	4.17	6.00	6.98	3	5.56
21	2	5	bas	B	7	4.86	7.00	8.14	3	5.56
22	3	5	bas	C	6	4.17	6.00	6.98	3	5.56
23	4	5	bas	D	5	3.47	5.00	5.81	2	3.70
24	9	5	haut de versant plat ou plate	A	7	4.86	7.00	8.14	4	7.41
25	5	5	mi-versant raide	A	3	2.08	3.00	3.49	3	5.56
26	6	5	mi-versant raide	B	2	1.39	2.00	2.33	0	0.00
27	7	5	mi-versant raide	C	1	0.69	1.00	1.16	1	1.85
28	8	5	mi-versant raide	D	8	5.56	8.00	9.30	8	14.81
TOTAL					144	100.00	86.00	100.00	54	100

Tableau 2.6. Distributions des modalités sol x itinéraire technique dans les échantillons

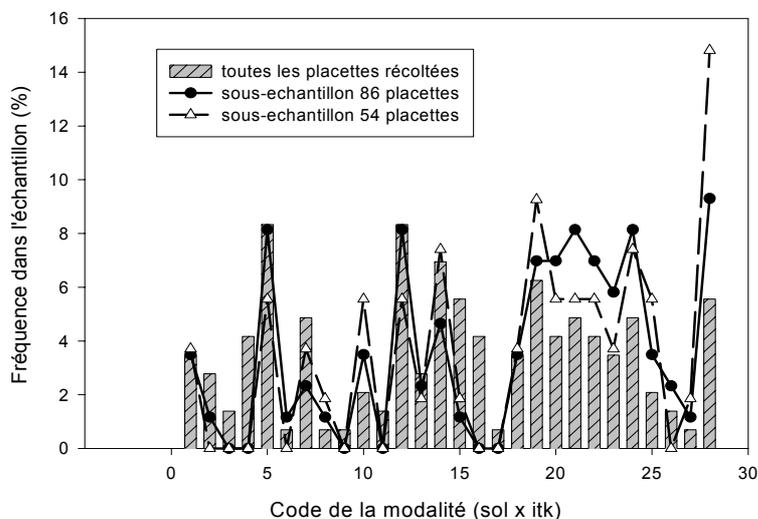


Figure 2.1.- Distribution des modalités sol x itinéraire technique dans les échantillons

3.2.- Dispositif de calage et de validation du modèle

Les données expérimentales utilisées pour le calage et la validation de STICS comprenaient d'une part des données publiées par Buttler (1989) et provenant d'un essai de station à l'EMBRAPA-CPAC (Centro de Pesquisa Agropecuaria dos Cerrados, latitude: 15.5°S, longitude: 27.5°W, altitude 1000m) en 1987, et d'autre part notre propre dispositif conduit en 1994 sur six parcelles de producteur à Silvânia.

3.2.1.- Essai "Line Source Experiment" (LSE) au CPAC

Dans cet essai de saison sèche sur *latossolo* rouge sombre, comprenant des parcelles en maïs et des parcelles en sol nu, des niveaux variables d'apport d'eau avaient été appliqués, dont un niveau non limitant, tous autres facteurs étant maintenus non limitants. Les parcelles de maïs sans aucun facteur limitant permettaient le calage du module de croissance en absence de contrainte, le calage du module de bilan hydrique exploitant l'ensemble des placettes.

Un système d'irrigation par aspersion de type "Line Source" (Hanks *et al.*, 1976) permettait de générer un gradient d'irrigation sur les parcelles de l'essai, selon un axe perpendiculaire à la rampe d'asperseurs. Le coefficient de variation des doses reçues selon des axes parallèles à la rampe d'asperseurs n'excédait pas 5%. De cette manière, avec une fréquence d'irrigation constante, la dose reçue par la culture ou le sol nu, mesurée par des pluviomètres placés au dessus du couvert pouvait être considérée comme une fonction de la seule distance à la rampe d'asperseurs. Huit sites de mesure in situ du stock hydrique du sol à la sonde à neutrons, dont quatre sites sur sol nu et quatre sous maïs, avaient été placés à quatre distances différentes de la ligne d'asperseurs. Les doses d'eau reçues sur les quatre distances définissaient le traitement hydrique et correspondaient en moyenne à 1.6, 1.0, 0.6 et 0.3 fois l'évapotranspiration potentielle.

Parmi les mesures effectuées, celles qui ont été retenues pour cette étude étaient:

- des mesures in situ du stock hydrique du sol tous les 15 jours jusqu'à une profondeur de 180cm par la méthode gravimétrique puis à l'aide d'une sonde à neutrons préalablement étalonnée

- des mesures de l'indice de surface foliaire par planimétrie optique, ainsi que des mesures de biomasse aérienne totale, réalisées chaque semaine jusqu'à 60 jours après levée puis tous les quinze jours.

Le profil d'humidité le plus sec observé, obtenu après flétrissement de la culture sur le site de mesure le plus éloigné de la rampe d'asperseurs et ayant reçu 0.3ETP, a été considéré comme le profil d'humidité au point de flétrissement permanent. Le stock hydrique total cumulé jusqu'à 180cm correspondant à ce profil était de 365mm. Conformément aux données présentées par Luchiari et al, (1985), une valeur de 110mm/m a été retenue pour le Paramétrage de la réserve utile lors des simulations. Les données d'évapotranspiration potentielle utilisées pour les simulations étaient les données du bac "classe A" du CPAC, situé à faible distance de l'essai. Ces valeurs ont été corrigées d'un coefficient 0.85 pour être comparables aux ETP calculées par la formule de Penman, conformément aux résultats obtenus par Martins et al (1988).

3.2.2.- Dispositif "sonde à neutrons" à Silvânia

Un dispositif complémentaire avait été construit à Silvânia, permettant d'une part une évaluation du module de bilan hydrique de STICS après calage, et d'autre part un calage du module de bilan azoté.

Ce dispositif comprenait six situations cultivées en maïs: deux en partie haute de toposéquence sur *latossolo* rouge sombre et sur *latossolo* endopetroplinthique, deux sur versant sur *latossolo* rouge-jaune et sur *cambissolo eutrófico*, et deux en bas de toposéquence sur *Podzólicos*. On disposait ainsi des situations contrastées les plus typiques des parcelles cultivées en maïs dans le *município*. La distance entre les situations et des différences entre leurs dates de semis permettaient une relative variabilité des distributions de précipitations. Les apports d'engrais minéraux étaient également variables entre les parcelles. L'enherbement des parcelles avait été maintenu à des niveaux peu limitants, et la pression parasitaire était négligeable. Deux de ces parcelles ont été récoltées par erreur pour ensilage par le producteur avant que les mesures des composantes du rendement puissent être pratiquées. Dans chaque site avait été implanté un tube d'accès pour humidimètre neutronique, autorisant des mesures jusqu'à 180cm de profondeur. L'humidimètre avait été étalonné par la méthode gravimétrique, en utilisant deux séries de prélèvements, en conditions humides et sèches. Les mesures d'humidité étaient effectuées avec un pas de temps approximatif de 15 jours, de 10 en 10 cm, et se sont prolongées au delà de la récolte pour permettre une validation de la fonction de calcul de l'évaporation du sol nu.

A proximité immédiate de chaque tube, l'indice de surface foliaire LAI était mesuré à trois reprises au cours du cycle de la culture: pendant la phase de croissance végétative, entre

l'épiaison et le début de la sénescence des feuilles et au cours de la maturation des grains. A chacune de ces dates, quatre pieds étaient prélevés, ainsi qu'un échantillon d'une dizaine de feuilles de toutes tailles prélevées sur quatre autres pieds. La surface spécifique du maïs pour la variété et le stade de développement considérés était déterminée à l'aide de ce dernier échantillon par planimétrie optique et pesée de la matière sèche des feuilles. La surface spécifique était ensuite utilisée pour déduire la surface foliaire des pieds prélevés aux environs des tubes à partir de simples mesures du poids sec de leurs feuilles.

Des observations des profondeurs maximales atteintes par l'enracinement ont été effectuées en ouvrant des fosses à la fin du cycle de culture. La réserve en eau utile du sol a été déterminée au laboratoire pour chaque type de sol et chaque horizon pédologique sur échantillons non remaniés prélevés dans ces fosses, les courbes de rétention d'eau étant déterminées par presse à membrane. La densité apparente, utilisée pour calculer les humidités volumiques à partir des données gravimétriques était mesurée sur prélèvements au cylindre.

Les données du climat et du sol étaient obtenues de la même manière que pour le dispositif de diagnostic agronomique.

Le tableau 2.7 résume le dispositif expérimental utilisé dans cette étude.

opération	dispositif	période	traitements	principales observations et mesures
calage STICS (module de croissance, module de bilan hydrique)	essai Line Source CPAC (Buttler, 1989)	saison sèche 1987	4 niveaux d'irrigation, avec maïs et en sol nu	stock hydrique in situ (bimensuel), LAI et biomasse totale (hebdomadaire), composantes du rendement (récolte)
validation bilan hydrique et calage bilan azoté STICS,	dispositif "sonde à neutron" Silvânia	septembre 1994 à septembre 1995	6 parcelles de producteurs de Silvânia, sur sol, engrais et pluviométrie variables, enherbement et pression parasitaire peu limitants	stock hydrique in situ (bimensuels), LAI (30, 65 et 100 jours, approximativement), composantes du rendement (récolte)
diagnostic agronomique, calage et validation du modèle modifié	enquête agronomique à Silvânia	septembre 1994 à juillet 1997	50 parcelles de producteurs de Silvânia, représentatives de la diversité régionale des contraintes (type et niveau): itinéraires techniques (5 types) et sols variables (10 types)	-analyses physico-chimiques sol avant (0-20cm) et après culture (0-100cm). - à 5 dates dans le cycle, enherbement et pression parasitaire (notations visuelles), stade de développement atteint, symptômes foliaires, -dates et résultat de chaque intervention technique -LAI à floraison (95-96 et 96-97) -composantes du rendement à la récolte.

Tableau 2.7. Résumé du dispositif expérimental utilisé.

RÉSULTATS

Chapitre 3.

Premier cycle de modélisation et de diagnostic

Dans ce chapitre, l'objectif est de repérer, parmi les contraintes non prises en compte par STICS mais figurant dans la liste établie au diagnostic préliminaire, celles qui ont une influence forte sur les rendements à Silvânia. Pour parvenir à cet objectif, une première étape de modélisation est nécessaire: l'adaptation, le calage et la validation du modèle afin de s'assurer qu'il rend compte de façon satisfaisante des variations de productivité dues à la densité de peuplement, au bilan hydrique et au bilan azoté pour le contexte local. Dans une deuxième étape, où le modèle ainsi validé sert d'outil de diagnostic, les autres causes de la variabilité des rendements sont repérées. Ce chapitre doit ainsi conduire à définir les tâches de modélisation à accomplir dans l'étape suivante de l'étude (chapitre 4).

1.- Modélisation

Cette étape du travail comporte une description générale du modèle STICS choisi comme point de départ de la modélisation, des adaptations préliminaires de ce modèle au milieu tropical, fondées sur notre expérience antérieure, puis son calage et enfin sa validation.

1.1.-Description générale du modèle STICS

La version de STICS utilisée au départ de l'étude était la version 1.0 décrite en détail par Brisson *et al* (1996). Nous nous bornerons ici à décrire ses principales caractéristiques pour le cas du maïs.

Le modèle fonctionne au pas de temps journalier et décrit la croissance et la production finale d'une culture pure placée sur un sol où peuvent être considérés jusqu'à cinq horizons différents.

Un module de développement calcule les dates des stades phénologiques de la culture par la méthode classique des cumuls de temps thermique, la température de référence étant au choix celle de l'air ou de la culture. Faute de données en termes de température de culture pour les cultivars tropicaux de maïs, nous avons choisi de retenir la température de l'air pour l'ensemble de l'étude. Les stades phénologiques considérés par STICS sont donnés au tableau 3.1. La germination et la levée sont contrôlées par:

- la température du sol, qui détermine la germination et l'allongement quotidien potentiel de l'épicotyle,

- l'humidité du sol qui limite la germination et l'allongement de l'épicotyle lorsqu'elle est inférieure au point de flétrissement permanent au voisinage des semences.

stades végétatifs contrôlant la simulation de l'indice foliaire	stades reproducteurs contrôlant l'évolution de la production de grains
PLT: date du semis	
LEV: date de levée	
AMF: date de fin de phase juvénile (date à laquelle la croissance de l'indice foliaire est maximale)	
	DRP-NBJGRAIN: date de début de la phase de latence pendant laquelle est déterminé le nombre de grains
LAX: date à laquelle l'indice foliaire atteint sa valeur maximale pour le cycle	
	DRP: fin de la phase de latence et début du remplissage des grains (début de croissance de l'indice de récolte)
SEN: date de début de sénescence nette (décroissance de l'indice foliaire)	
FIR=(MAT dans le cas du maïs): date de fin d'augmentation de l'indice de récolte= maturité physiologique= date où l'indice foliaire devient nul	
REC: date de récolte	

Tableau 3.1.- Stades de développement considérés par STICS (adapté de Brisson et al, 1997)

L'indice de surface foliaire, LAI, dépend de la densité de semis, des dates de certains des stades phénologiques, de la température et, dans la phase de croissance, des stress hydriques et azotés (fig.3.1). Cette approche, empruntée à EPIC se distingue en particulier de celle de CERES, où le LAI est déduit chaque jour de la biomasse accumulée, par le biais d'un coefficient de répartition de cette biomasse vers les feuilles (dépendant du stade), en tenant compte de la surface spécifique des feuilles (également dépendante du stade de développement) (Ritchie *et al.*, 1998).

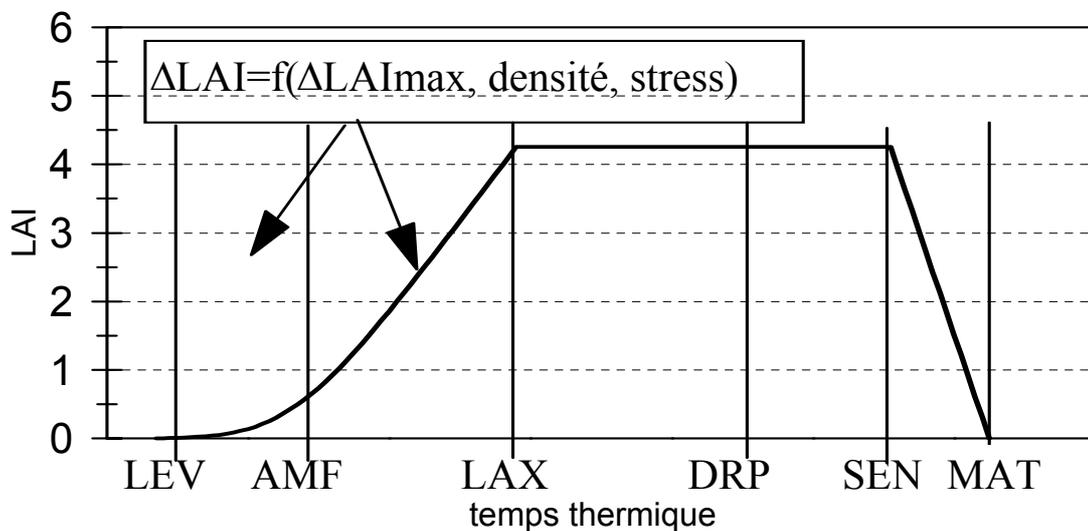


Fig.3.1: Simulation de l'indice de surface foliaire (LAI) par stics. Les abréviations des stades sont explicitées au tableau 3.1.

Le rayonnement solaire est intercepté par les feuilles selon la classique loi d'extinction de Beer:

$$PAR_i = 0.95 * PAR \times (1 - \exp(-k \cdot LAI))$$

où PAR et PAR_i sont les rayonnements photosynthétiquement actifs respectivement disponibles au sommet du couvert et interceptés par la culture, et k le coefficient d'extinction de l'espèce valant 0.7 pour le maïs.

Le rayonnement intercepté est transformé en biomasse selon une fonction faisant intervenir une efficacité de conversion et la température, les stress hydriques et azotés réduisant le taux de conversion. On peut aisément comprendre pourquoi le choix de ne pas tenir compte de la biomasse accumulée, pour le calcul du LAI, rend EPIC, et STICS notablement plus robustes que CERES: avec ce dernier modèle, une faible sous-estimation du LAI initial entraînera une sous-estimation plus que proportionnelle du rayonnement intercepté, et donc de la production de biomasse et du LAI atteint le jour suivant. Au pas de temps suivant l'erreur sera plus forte, et ainsi de suite avec donc une amplification de l'erreur au cours du cycle, amenant le modèle à diverger rapidement. Cette amplification sera d'autant plus forte qu'on est à des

valeurs faibles de LAI, telles que l'interception du rayonnement est fortement sensible au LAI. Lorsqu'on se situe au contraire à des LAI élevés, le rayonnement intercepté devient pratiquement constant et maximum, et les erreurs sur le LAI ont moins de conséquences sur la production totale de biomasse. Les situations d'agriculture familiale en milieu tropical sont typiquement des situations où le rayonnement intercepté est fortement dépendant du LAI, celui-ci restant faible sur une partie significative du cycle soit à cause de densités de semis faibles, soit en raison de stress importants. Ceci devrait conduire à davantage de prudence lors de l'emploi de CERES pour ce contexte particulier.

STICS considère la biomasse totale accumulée et la part de cette biomasse stockée dans les grains, déduite de la précédente à l'aide d'un indice de récolte qui augmente linéairement avec le temps à partir de la date de début de remplissage du grain et jusqu'à la date où la maturité physiologique est atteinte. Un calcul annexe amène au nombre de grains, fonction linéaire de la vitesse moyenne de croissance de la biomasse pendant une "phase de latence" durant un nombre fixe de jours (NBJGRAIN) précédant le début du remplissage des grains.

La biomasse racinaire n'est pas calculée, mais le modèle considère une distribution de la densité de racines dans le sol en fonction de la profondeur. Cette distribution évolue au cours du temps en fonction de la cote maximale atteinte par les racines qui dépend d'une vitesse de descente du front racinaire, contrôlée par le temps thermique, θ_{rac} . Si les racines rencontrent un obstacle physique, un front racinaire fictif est calculé comme si l'obstacle n'existait pas, mais seule les racines présentes au-dessus de l'obstacle sont prises en compte pour l'extraction de l'eau et de l'azote. L'évolution de la distribution de racines au-dessus de l'obstacle est ainsi identique à ce qu'elle serait en l'absence d'obstacle.

STICS 1.0 contient en outre un module de bilan hydrique, dans lequel l'évaporation et la transpiration sont calculées séparément en tenant compte de l'énergie radiative interceptée par la culture. La transpiration potentielle, fonction principalement de l'indice de surface foliaire et de l'évapotranspiration potentielle, est régulée par la teneur en eau du sol, comme suit:

- l'évapotranspiration potentielle de la culture, E_0 , est déduite de l'ETP et du LAI à l'aide d'un coefficient cultural, k_c , croissant entre 1 (lorsque LAI=0) et une valeur maximale,

Kmax (lorsque LAI >=5):

$$E0 = ETP(1 + (K_{max} - 1) / (1 + \exp(-1.5 \times LAI - 3)))$$

- la transpiration potentielle E0p est obtenue par différence entre E0 et l'évaporation, mais un facteur correctif, faisant intervenir un paramètre beta, permet de majorer la transpiration potentielle pour tenir compte de phénomènes advectifs liés à l'assèchement du sol en surface:

$$E0p = (E0 - E0s) \times (\beta + (1 - \beta) \cdot E_s / E0s)$$

- enfin la transpiration réelle, Ep, est obtenue à partir de E0p en tenant compte de l'offre en eau du sol et de la distribution des racines dans le sol: en dessous d'un seuil TESTOMATE, la teneur en eau moyenne dans la zone de sol colonisée par les racines, le rapport Ep/E0p décroît linéairement entre 1 (transpiration au potentiel) et 0 (transpiration nulle), cette dernière valeur étant obtenue lorsque le sol est au point de flétrissement sur toute la zone racinaire. Le seuil TESTOMATE dépend des caractéristiques des racines et de leur distribution, et de E0p.

Le stress hydrique dérive du rapport entre transpirations réelle et potentielle.

La distribution de l'eau dans le sol est appréhendée en considérant des couches élémentaires de 1 cm d'épaisseur, assimilées à des réservoirs dont la teneur en eau maximale correspond à la capacité au champ. Un apport d'eau par les pluies ou des irrigations remplit d'abord la couche supérieure jusqu'à la capacité au champ, l'excès drainant en cascade dans les couches inférieures. Si l'apport est excédentaire par rapport à l'ensemble de la capacité de stockage du sol, cet excès est imputé à un drainage à la base du sol. L'évaporation génère un mulch dont l'épaisseur est calculée à partir du cumul d'évaporation depuis un élément pluvieux, et dans lequel l'évaporation d'un jour donné est répartie uniformément. La transpiration est répartie dans le sol en proportion des densités relatives de racines dans chaque couche élémentaire. Si la teneur en eau d'une couche est insuffisante pour fournir l'évapotranspiration ainsi calculée, l'eau manquante est extraite des couches inférieures. Les couches ne peuvent se dessécher au delà d'une humidité résiduelle HA.

Le module de bilan azoté considère l'azote provenant des apports fertilisants, des eaux de pluies, du stock organique humifié du sol et d'éventuels résidus de culture enfouis. L'azote minéral est considéré comme étant exclusivement sous la forme de nitrate. La décomposition des résidus produit une biomasse microbienne puis de l'humus qui se minéralise. Ces phénomènes suivent des cinétiques influencées par le rapport C/N de chaque pool, la température et l'humidité du sol. L'azote minéral est entraîné dans le sol par le flux hydrique descendant. Une demande en azote de la culture est calculée, fonction de la biomasse accumulée et de la croissance au jour considéré. Une offre en azote du sol est calculée pour chaque couche élémentaire en tenant compte de l'humidité, de la concentration d'azote, de la densité de racines, de l'absorption d'eau de transpiration dans cette couche, et d'une cinétique d'absorption racinaire. L'azote absorbé finalement est limité soit par l'offre soit par la demande, et l'absorption sera répartie dans le sol au prorata de l'offre de chaque couche. Le stress azoté dérive du rapport entre la concentration d'azote dans la plante le jour considéré et une concentration critique en dessous de laquelle une contrainte s'exerce mais au dessus de laquelle la production de biomasse n'augmente pas.

Enfin, pour l'ensemble des fonctions ainsi décrites, on notera que STICS fait appel à de nombreux paramètres plus ou moins directement mesurables, ayant chacun une dépendance plus ou moins forte aux variétés, aux sols et aux climats simulés. Sauf pour les paramètres ayant fait l'objet d'un calage de notre part, décrits ci-après, les valeurs proposées par les auteurs de STICS ont systématiquement été employées dans toutes les simulations évoquées dans l'ensemble du présent travail.

1.2.- Adaptations préliminaires au contexte tropical

Notre expérience de modélisation des céréales pour le contexte tropical, particulièrement pour ce qui concernait le bilan hydrique, nous a amené à introduire d'emblée des modifications du modèle. Celles-ci portaient sur l'interaction entre la descente des racines et celle du front d'humectation du sol, sur le calcul de l'évaporation du sol, et sur l'influence d'un stress post-floraison sur l'indice de surface foliaire.

1.2.1.- Descente des racines et descente du front d'humectation

STICS (1.0) négligeait une interaction importante entre le régime hydrique du sol et la descente des racines en profondeur: la limitation de la descente des racines par le front d'humectation du sol. Dans le monde tropical a saison sèche marquée, contrairement aux situations tempérées, en début de saison de culture le sol est sec, c'est à dire au point de flétrissement permanent, voire à des humidités inférieures, et il existe dans ces milieux un front d'humectation du sol qui progresse vers la profondeur à chaque fois qu'une pluie excède la capacité de stockage du sol déjà utilisée par les pluies antérieures (Charreau et Nicou, 1971). En deçà de ce front le sol est au point de flétrissement, teneur en eau pour laquelle la résistance du sol à la pénétration des racines est extrêmement élevée (Eavis, 1972; Monteith et Banath, 1965; Taylor *et al.*, 1966). En milieu tempéré, où le profil de sol est à la capacité au champ en début de saison de culture, ce front d'humectation n'existe pas et il est légitime de considérer que la progression des racines en profondeur est indépendante du régime des pluies. Par contre, en situation tropicale à saison sèche, la dynamique du front d'humectation est très variable en fonction du profil pluviométrique de la saison et de la gestion technique de la culture. Le travail du sol agit ainsi sur cette dynamique en modifiant les caractéristiques physiques du sol gouvernant l'infiltration (Charreau et Nicou, 1971; Chopart *et al.*, 1979; Scopel, 1994). La gestion technique a également un effet plus indirect, car en modifiant la demande en eau de la culture, le rythme auquel les plantes assèchent le sol est modifié, et ainsi la quantité d'eau pouvant être stockée par les horizons supérieurs à chaque nouvelle pluie. Ceci, ainsi que l'effet résultant sur la dynamique d'enracinement, a été décrit par Chopart (1990) pour le cas du travail du sol, et par Affholder (1995b) pour le cas de la fertilisation. Pour ce qui concerne l'influence du profil de pluviométrie, on peut logiquement supposer que des saisons avec des pluies importantes en début de culture favorisent une descente en profondeur des racines, tandis que des saisons avec des pluies faibles avant floraison limitent la profondeur d'enracinement, qui ne varie pratiquement plus pendant la phase sexuée du cycle, chez les céréales. Dans ce dernier cas, cet enracinement limité en profondeur peut être contraignant ou non, en fonction de la distribution des précipitations pendant la seconde moitié du cycle. STICS (1.0) considérant une évolution des racines sous la dépendance exclusive de la température, il ne pouvait rendre compte de cette composante de l'influence des interactions climat-techniques sur la variabilité de la production. La modification du module de croissance racinaire que nous avons introduite (et qui a été retenue dans les versions ultérieures de STICS), a simplement consisté à stopper la croissance racinaire pour les jours où l'humidité du sol est inférieure au point de flétrissement à la cote du front de croissance racinaire. On notera que cette

modification n'est pas entièrement satisfaisante, car compte tenu du mode de calcul de la distribution des racines, totalement déterminée par la cote maximale atteinte, lorsque la descente des racines est ainsi limitée par la position du front d'humectation, la densité de racines n'augmente pas dans les horizons supérieurs éventuellement humides, ce qui n'est vraisemblablement pas conforme à la réalité. Le modèle sous-estime ainsi la densité racinaire des horizons proches du front de colonisation racinaire. Une solution alternative consisterait à assimiler le front d'humectation à un obstacle physique mobile, l'inconvénient dans ce cas serait au contraire une surestimation de la densité racinaire dans les couches proches du front racinaire. Toute autre solution aurait toutefois nécessité une modification importante du modèle.

On remarquera enfin que les modèles CERES et EPIC négligent également l'interaction entre la dynamique du front d'humectation et la progression des racines en profondeur, alors même qu'ils considèrent tous deux, à profondeur donnée, une limitation de la croissance en masse des racines par les teneurs en eau faibles.

1.2.2.- Calcul de l'évaporation du sol

La fonction d'évaporation du sol, dans la version de STICS utilisée pour cette étude, considérait deux stades après un événement pluvieux, conformément à l'approche employée par Ritchie (Ritchie, 1972) dans le modèle CERES: un premier stade (stade I) pendant lequel l'évaporation (E_s) est égale à l'évaporation potentielle (E_{0s}), et qui dure jusqu'à ce que le cumul d'évaporation depuis l'événement pluvieux atteigne une valeur seuil, q_0 , puis un second stade (stade II) pendant lequel E_s est réduite par rapport à E_{0s} de manière à simuler l'effet d'une offre en eau du sol limitante par rapport à la demande. E_{0s} est calculée de manière à tenir compte de l'interception d'une partie du rayonnement par la culture:

$$E_{0s} = ETP \cdot \text{Exp}(-0.5 \times LAI)$$

où ETP est l'évapotranspiration potentielle de référence (calculée par la formule de Penman).

Alors que le passage d'un stade à l'autre ainsi que l'évolution de l'évaporation au cours du stade II sont contrôlés, dans le modèle de Ritchie, par le temps écoulé depuis le début du stade concerné, ils sont contrôlés par l'évaporation cumulée depuis le début du stade concerné dans la fonction de STICS, empruntée à Brisson et Perrier (1991). Le calcul de E_s en stade II fait en outre intervenir un paramètre caractéristique du climat local (en particulier du vent), ACLIM. L'eau est extraite du sol depuis les couches de sol superficielles vers la profondeur jusqu'à ce que le cumul de l'eau extraite atteigne E_s , en considérant une limite inférieure pour la teneur en

eau du sol dans chaque couche. Cette limite, HA, est inférieure au point de flétrissement permanent et dépend de la texture du sol.

L'évaporation est ainsi, dans STICS, influencée de manière très indirecte par l'état hydrique du sol: pour un état hydrique donné du sol, plus sec que la capacité au champ, et pour une évaporation potentielle donnée, l'évaporation calculée varie en fonction du temps écoulé entre le dernier événement pluvieux et le moment où cet état hydrique du sol a été atteint, alors que la théorie indique que l'évaporation devrait être constante pour ces conditions données. Là encore, les simplifications de la théorie contenues dans STICS peuvent être légitimes pour le milieu tempéré. En effet, toujours à cause du fait que le profil de sol est en général à la capacité au champ au début de la saison de culture, on peut considérer pour ces milieux que toute pluie, au moins avant l'installation de la culture, provoquera un retour du sol à cet état hydrique particulier. Autrement dit, les conditions initiales de sol, pour la simulation de l'évaporation après un événement pluvieux seront très peu variables d'un événement pluvieux à l'autre, et le temps nécessaire pour atteindre un état hydrique donné du sol sera très peu variable également: il ne dépendra que de l'évaporation potentielle.

Dans le contexte de notre région d'étude, comme pour tout environnement tropical à saison sèche marquée, cependant, cette simplification ne nous a pas paru appropriée. En effet, plusieurs mois peuvent s'écouler entre la première pluie de la saison et un événement pluvieux suffisamment important pour humidifier le sol à la capacité au champ sur l'ensemble du profil. Les états hydriques du sol après chaque événement pluvieux, au cours de cette période, vont donc être très variables en fonction des hauteurs de précipitations et des intervalles de temps entre les pluies. Ceci permet de prévoir deux conséquences très importantes pour la simulation du bilan hydrique en milieu tropical:

- en absence de mesures de l'état hydrique du sol avant la mise en culture, pouvant fournir les conditions initiales d'une simulation, ces conditions initiales ne peuvent être approximées de manière satisfaisante que pour la fin de la saison sèche, en considérant que le sol est au point de flétrissement permanent à cette époque.

- une faible erreur sur la simulation de l'évaporation journalière pendant la période comprise ainsi entre la date de semis et la seule date possible pour le démarrage des simulations, provoquera une erreur importante sur les conditions hydriques du sol au début du cycle de la

culture et donc sur son bilan hydrique (et, par voie de conséquence, azoté, l'extraction d'azote étant pilotée par celle de l'eau dans le modèle).

Il a donc paru indispensable de tenir compte explicitement de l'état hydrique du sol dans la simulation de l'évaporation, et d'abandonner l'approche dérivée de celle de Ritchie, pour retenir une modélisation proche de celle du modèle EPIC. Dans ce dernier, cependant, la profondeur maximum concernée par l'évaporation est arbitrairement fixée à 20cm, et nous avons préféré introduire un paramètre de calage permettant de régler l'épaisseur de la tranche de sol concernée par l'évaporation. Dans la nouvelle fonction introduite, l'évaporation potentielle est répartie dans le sol suivant une loi exponentielle décroissante. La contribution effective d'une couche est son évaporation potentielle pondérée par un facteur d'humidité de la couche:

$$E0s(z) = \text{gamma} * E0s * (10^{-3})^{(z-1)/(z_{\text{max}}-1)}$$

$$Es(z) = E0s(z) * ((W(z) - W_{\text{min}}(z)) / (W_{\text{max}}(z) - W_{\text{min}}(z)))^{\text{delta}}$$

$$Es = \text{Min}(E0s, \sum_{z=1, 200} ES(z))$$

où:

$E0s(z)$ est l'évaporation potentielle pour la couche z , z_{max} la cote à laquelle l'évaporation potentielle est $1/1000e$ de l'évaporation potentielle de la couche supérieure du sol, $Es(z)$ l'évaporation de la couche z , $W(z)$, $W_{\text{min}}(z)$ et $W_{\text{max}}(z)$ sont respectivement les teneurs en eau actuelles, minimum et maximum pour la couche z , et $\text{Min}(\text{liste})$ la valeur minimale parmi les éléments de la liste, et gamma et delta une paire de paramètres.

On notera qu'alors que dans la fonction originale de STICS, l'évaporation totale est d'abord calculée puis répartie entre les couches, avec cette nouvelle fonction, inversement, l'évaporation totale est obtenue en sommant les contributions des couches élémentaires.

1.2.3.- Effet de stress post-floraison sur la sénescence foliaire

STICS, de même ici que le modèle EPIC, ne prévoit pas de réduction directe du LAI par les stress au-delà du stade LAX, stade à partir duquel le LAI cesse de croître et qui est voisin de la floraison mâle pour le maïs. On notera cependant que lorsqu'on choisit d'utiliser la température de culture dans les simulations, pour le contrôle des stades de développement, les

stress hydriques, en augmentant la température de culture, réduisent la durée du stade phénologique en cours au moment du stress, ce qui est une manière indirecte de simuler un effet du stress hydrique sur le LAI après le stade LAX. Dans la mesure où nous ne disposons pas de données permettant de caler le calcul de la température de culture et des stades de développement en fonction de cette dernière, on risquait, en négligeant l'effet sur le LAI des stress après la date LAX:

- de sous-estimer l'influence des stress, notamment hydriques, qui se produisent durant la phase sexuée du cycle dans la région des cerrados, les veranicos se produisant comme on l'a vu en janvier ou février, soit au milieu de la saison de culture.

- de surestimer la demande hydrique et azotée de la culture après un stress post-floraison, c'est à dire de négliger des mécanismes de compensation par lesquels la culture réduit ses besoins lorsqu'un stress se produit.

Nos travaux au Sénégal (Affholder, 1995b; Affholder, 1997) avaient montré, dans le cas du mil, l'importance de ces mécanismes de compensation pour l'interaction entre intensification agricole et risque climatique. Nous avons donc introduit une modification de la fonction de calcul du LAI (Annexe 7) permettant de simuler une accélération de la sénescence foliaire en cas de stress, par un simple facteur multiplicatif à déterminer par calage.

1.3.- Calage

Le calage est l'opération consistant à rechercher les valeurs des paramètres empiriques du modèle qui conduisent à la meilleure simulation de la réalité. Il est décrit ci-après en trois étapes: calage du module de croissance en l'absence de stress hydrique ou azoté, puis calage successif des fonctions calculant ces deux stress, respectivement les modules de bilan hydrique et de bilan azoté. Le dispositif expérimental permettait en outre une validation indépendante du module de bilan hydrique, qui fournit ainsi une base solide pour le calage du module de bilan azoté, fortement dépendant des flux hydriques dans le sol. Cette validation du bilan hydrique est donc présentée dans ce qui suit, entre le calage du bilan hydrique et celui du bilan azoté.

1.3.1.- Modules de croissance et de développement en l'absence de contrainte

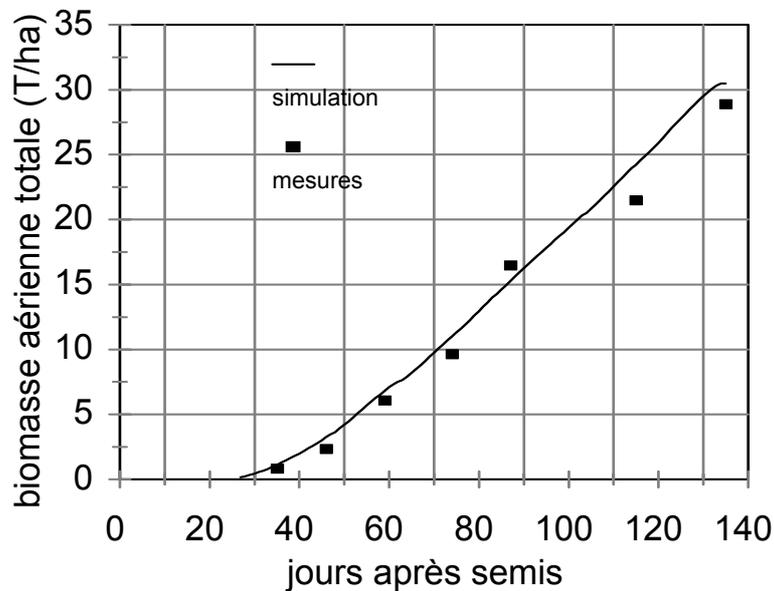


Figure 3.2.- Validité des paramètres de simulation de la biomasse aérienne totale en absence de contraintes

Le traitement 1.6EV de l'essai LSE pouvant être considéré comme un traitement sans limitations de croissance, il a été utilisé pour le calage de certains paramètres non variétaux et donc en principe propres à l'espèce cultivée, mais qui étaient susceptibles de prendre, pour les cultivars tropicaux de maïs, des valeurs sensiblement différentes de celles connues pour les cultivars tempérés.

Dans une première étape, les fonctions de STICS calculant la biomasse journalière ont été écrites sur tableur. On leur fournissait en entrée des données journalières de LAI interpolées linéairement entre les mesures, ainsi que les données mesurées de rayonnement et de température. Les valeurs de biomasse totale ainsi calculées sont très proches des mesures, en utilisant pour tous les paramètres les valeurs proposées par les auteurs du modèle (fig. 3.2). Ce paramétrage a donc été retenu pour l'ensemble de l'étude.

Une deuxième étape a consisté à caler le calcul du LAI sur les valeurs observées, en tenant compte des stades phénologiques observés, la densité de peuplement utilisée dans l'essai étant supposée optimale. Ceci a conduit à modifier légèrement la valeur indiquée par les auteurs du modèle pour la vitesse maximale de croissance du LAI par unité de température, ΔLAI_{MAX} , ($1,38 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{°C}$), et à retenir une valeur de $1,7 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{°C}$ pour ce paramètre.

La croissance journalière de l'indice de récolte, vitircarb et la date DRP ont ensuite été calées simultanément en ajustant la production de grain aux données observées, disponibles pour deux dates. Ceci a conduit à retenir pour vitircarb la valeur de 0.01g de grains par gramme de matière sèche et par jour, sensiblement inférieure à la valeur indiquée par les auteurs (0.012 j-1), ce qui est cohérent, les cultivars tropicaux étant connus pour avoir des indices de récolte inférieurs à ceux des cultivars tempérés (Edmeades, comm. Pers.).

Le calage a ensuite été poursuivi en exploitant des données de l'enquête agronomique, comme indiqué dans ce qui suit.

Le calage des constantes thermiques variétales contrôlant le développement de la culture a été réalisé par régression entre les sommes de température relevées et les dates des stades phénologiques observées dans un sous-échantillon de placettes du dispositif d'enquête agronomique, pour lequel une observation précise de la phénologie avait pu être conduite (observation directe du stade par nous-même). Ceci concernait les stades LEV-LAX et LAX-MAT, la date LAX étant assimilée à la date de floraison mâle. Les dates AMF et SEN ont été assimilées aux dates situées respectivement au premier tiers du stade LEV-LAX et à la moitié du stade LAX-MAT. Il n'est pas apparu nécessaire de s'écarter des valeurs suggérées par les auteurs de STICS pour la température-base et la température-limite utilisées pour les cumuls de température.

Le calage des paramètres Adens et Bdens de la fonction décrivant l'effet de la densité de semis sur le LAI a fait appel à une adaptation d'une méthode fréquemment employée dans les études de diagnostic agronomique pour caler un modèle calculant les valeurs potentielles des composantes du rendement en tenant compte de compétitions entre plantes, la méthode des courbes-enveloppe.

La fonction à caler était la suivante:

$$\Delta\text{LAI} = \text{DLAI} \times d \times (d/\text{Bdens})^{\text{Adens}}$$

où ΔLAI et DLAI sont les croûts élémentaires de LAI pour un jour considéré entre LEV et LAX, respectivement après et avant prise en compte de l'effet de la densité, d est la densité de semis, Bdens le seuil de densité en dessous duquel il n'y a pas de compétition entre plantes pour la croissance foliaire, et Adens un paramètre décrivant la sensibilité du cultivar à la compétition entre plantes. DLAI est fonction des cumuls de température entre LEV et LAX et entre LEV

et le jour considéré, et dépendant du paramètre ΔLAI_{MAX} précédemment calé.

En appliquant la méthode des courbes enveloppes développées par Fleury (1990), nous avons considéré que la limite supérieure du nuage de points, dans un graphique des LAI à floraison en fonction des densités de semis, était définie par des situations culturales où le LAI avait été limité exclusivement par les conditions de rayonnement, de température et de densité de semis. Des simulations de STICS ont été réalisées en annulant l'effet des contraintes hydriques et azotées, par le biais d'un paramétrage où les ressources correspondantes étaient en excès. Les paramètres Adens et Bdens ont été recherchés, par essais/erreurs, de manière à faire coïncider les LAI simulés à floraison avec la courbe enveloppe des points observés (fig. 3.3)

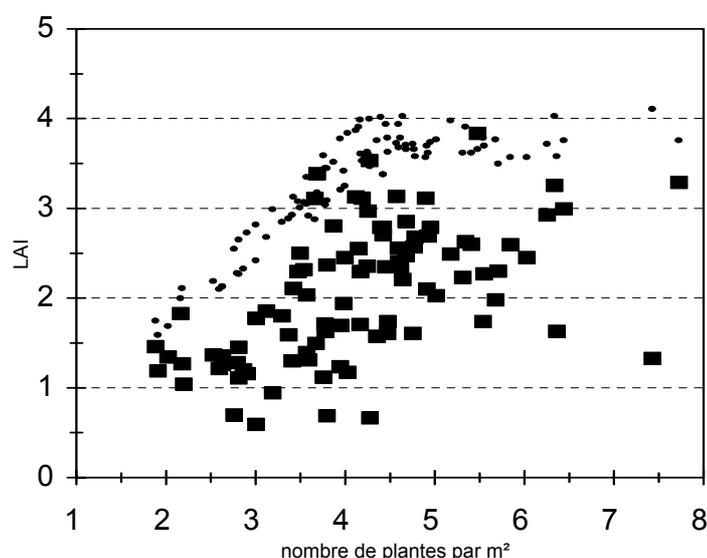


Figure 3.3.-Calage du module de STICS calculant le LAI en l'absence de contrainte, à l'aide de la courbe-enveloppe des LAI observés à la floraison dans les placettes de l'enquête agronomique (). Les paramètres de la fonction ont été ajustés par essais/erreurs de manière à faire coïncider les valeurs simulées () avec cette courbe-enveloppe. Le coefficient de variation des LAI observés, par rapport à la moyenne des 4 mesures de chaque placette est inférieur à 17% pour les LAI supérieurs à 2, mais atteint 31% pour certains LAI inférieurs à 2. Pour les points constituant la courbe enveloppe, ces CV sont compris entre 5 et 18%.

La fonction calculant le nombre de grains a été calée en procédant de la même manière. Les nombres de grains simulés en désactivant les contraintes hydriques et azotées dans le modèle ont été ajustés à la courbe enveloppe des nombres de grains observés en fonction de la densité de semis, en jouant sur les paramètres de cette fonction, dont la durée de la phase de latence (fig.3.4).

Enfin, pour chaque cultivar, les valeurs les plus élevées de poids d'un grain rencontrées dans l'échantillon de placettes de l'enquête agronomique ont été considérées pour le poids

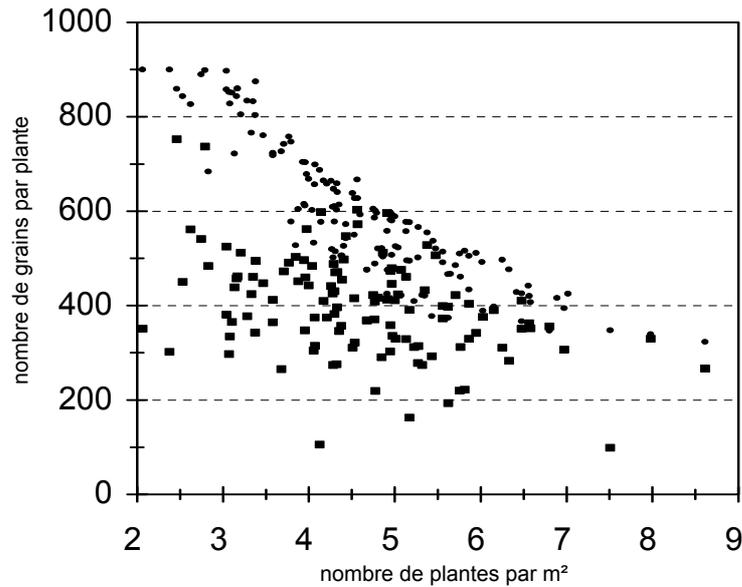


Figure 3.4.-Calage du module de STICS calculant le nombre de grains par plante en l'absence de contrainte, à l'aide la courbe-enveloppe des nombres de grains observés dans les placettes de l'enquête agronomique (). Les paramètres de la fonction ont été ajustés par essais/erreurs de manière à faire coïncider les valeurs simulées () avec cette courbe-enveloppe.

maximal d'un grain (P1G0).

1.3.2.- Module de bilan hydrique

Les opérations de calage et de validation du module de bilan hydrique ont été réalisées en répétant pour STICS un travail précédemment conduit pour un autre modèle de bilan hydrique du maïs, Sarra-br, basé comme STICS sur l'analogie réservoir (Affholder *et al.*, 1997) et sur l'approche de Ritchie pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle de la culture à partir du LAI.

Pour le calage et la validation du module de bilan hydrique de STICS, le module de croissance a été désactivé, et les données journalières de LAI requises par le module de bilan hydrique n'étaient pas les valeurs simulées mais des données obtenues par interpolation linéaire entre les données observées. Par contre, la fonction de croissance racinaire ne faisait pas l'objet d'un tel forçage, qui aurait exigé un travail important de programmation informatique. En toute rigueur on doit donc considérer que ce qui suit porte sur le calage et la validation non pas seulement du module bilan hydrique mais aussi de la fonction de croissance racinaire.

Sauf indication contraire dans le texte pour un cas particulier, toutes les simulations avaient pour date initiale celle de la première mesure d'humidité du sol, en utilisant cette valeur mesurée comme valeur initiale du stock pour le modèle.

1.3.2.1.- CALAGE

Le calage du modèle sur les données de l'essai LSE a été effectué par régression non linéaire, à l'aide d'un logiciel approprié couplé au programme de simulation du bilan hydrique. Le logiciel recherche les valeurs des paramètres de calage qui, fournis au modèle, minimisent la somme des carrés des écarts entre les valeurs observées et simulées du stock hydrique utile cumulé jusqu'à 180cm. Les valeurs du stock utile ont été déduites des stocks totaux mesurés en leur soustrayant la valeur du stock au point de flétrissement permanent. Dans un premier temps, on a procédé au **calage de la fonction d'évaporation du sol**, à l'aide des données des parcelles maintenues sans végétation. Un calage satisfaisant a été obtenu pour $z_{max}=45\text{cm}$, $\gamma=0.4$, et $\delta=3.5$. Ces valeurs ont ensuite été introduites dans le modèle, qui a été appliqué aux parcelles semées en maïs pour le calage du paramètre K_{max} de la fonction reliant le LAI au coefficient cultural, et le calage du paramètre $croirac$ donnant la vitesse de croissance du front racinaire par rapport au temps thermique. Le meilleur calage a été obtenu pour une valeur de $croirac$ de $0.2\text{cm}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$, conduisant à des profondeurs maximales de racines de 180cm en l'absence d'obstacle et pour des conditions moyennes de température, et une valeur de 1.4 pour K_{max} , soit une valeur, très proche de celle qui avait été obtenue précédemment pour le modèle Sarra-Br (Affholder *et al.*, 1997), confirmant la similarité entre les deux modèles. La comparaison après calage entre stocks simulés et mesurés pour le sol nu et le maïs est donnée à la figure 3.5.

Le calage de l'effet du stress hydrique sur la sénescence a été réalisé en libérant la simulation du LAI et en ajustant les LAI simulés sur les valeurs observées, conduisant à retenir une accélération de la sénescence de 20% au plus, pour une journée où le stress hydrique serait maximum

1.3.2.2.- VALIDATION

L'adéquation correcte entre les stocks hydriques mesurés et simulés par STICS pour les 6 parcelles de Silvânia équipées de tubes d'accès pour humidimètre (fig. 3.6), a permis de considérer que le module de bilan hydrique de STICS était valide pour les conditions de notre étude.

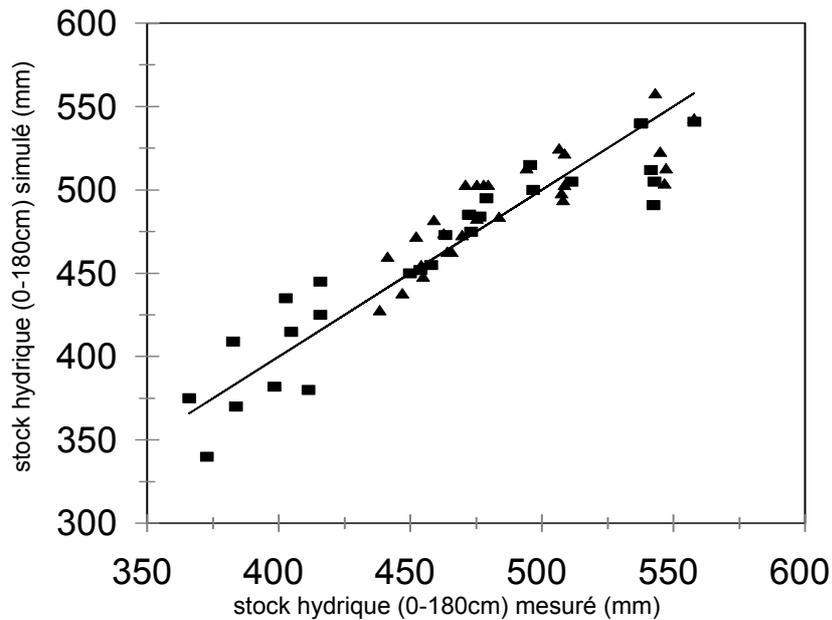


Fig.3.5. Calage du module de bilan hydrique de STICS. Données de l'essai "Line Source Experiment", comprenant des parcelles en sol nu (•) et cultivées en maïs sans limitation en nutriments (▲). Les traitements se distinguaient par des apports d'eau variant entre 30% et 160% de l'évapotranspiration potentielle. Les simulations étaient forcées par des données de LAI interpolées entre des mesures hebdomadaires

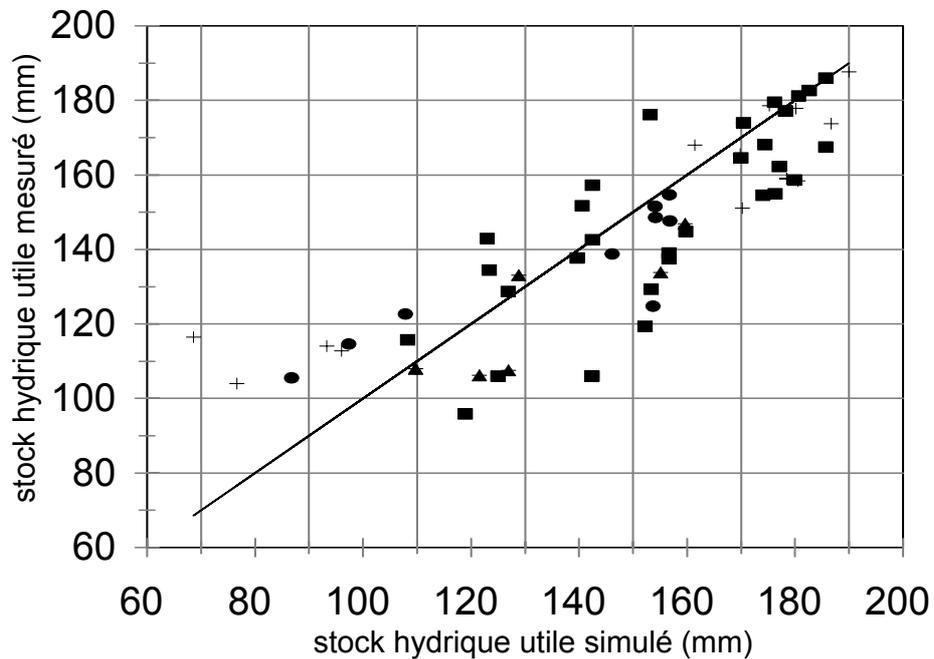


Fig. 3.6. Validation in situ du bilan hydrique de STICS. Stock hydrique utile (0-180cm) des parcelles de Silvânia sur (■) Cambissolo, (+) Podzólicos (Acrisols) (▲) Latossolos VE et VA (Ferralsols) et (•) Latossolo endopetroplintico (Ferralsol). Les simulations ont été conduites en utilisant les LAI observés comme variable de forçage.

De nouvelles simulations de ces situations ont été conduites, non plus en partant de la date de la première mesure du stock hydrique du sol, mais en faisant démarrer la simulation au début de la saison sèche, en partant du profil d'humidité observé à la dernière mesure, soit à la fin de la saison des pluies. De cette manière, le modèle était utilisé pour simuler l'évolution de l'humidité du sol au cours de la saison sèche par évaporation du sol nu, puis le remplissage du sol par les premières pluies, jusqu'à la date de la première mesure de la saison. Les valeurs observées et simulées du stock hydrique du sol à cette date sont cohérentes pour toutes les situations sauf une, où le modèle surestimait de 30 mm le stock hydrique. Il ne paraissait pas y avoir de raison pour que la fonction d'évaporation sous-estime l'évaporation du sol de cette parcelle, puisqu'une autre parcelle, ayant des caractéristiques voisines du point de vue des paramètres impliqués dans l'évaporation, avait été correctement simulée. La placette incorrectement simulée différait par contre des autres par sa pente, de l'ordre de 3% contre moins de 0.5 %. Il était donc probable que des pertes d'eau par ruissellement y aient eu lieu et soient à l'origine de l'essentiel de l'erreur de simulation, le modèle négligeant ces pertes. Si ces 30mm d'excès de stock par rapport aux observations sont entièrement imputables au ruissellement, on notera qu'ils représentent moins de 5 % des précipitations accumulées entre la première pluie et la date de la mesure neutronique. Cependant, des placettes du dispositif agronomique ayant des pentes atteignant 5%, il est vraisemblable que des ruissellements plus importants s'y produisent.

1.3.3.- Module de bilan azoté

Le calage du module de bilan azoté a été conduit sur les parcelles de validation du bilan hydrique, en libérant la simulation du LAI. Les parcelles présentaient des entrées d'azote contrastées, comme en témoignent les données mesurées fournies en entrée au modèle, présentées au tableau 3.2.

Type de sol	N organique du sol (T/ha)	N minéral apporté (kgN/ha)	Formules (SA= Sulfate d'ammonium, U= Urée)	Réserve Utile Racinaire totale (mm)
Cambissolo Eutrófico	6.5	61	SA (semis) + SA (30jours)	120
Podzólico 1	4	61	SA (semis) + SA (30jours)	215
Podzólico 2	2.9	61	SA (semis) + SA (30jours)	180
Latossolo Rouge	3.6	128	SA (semis)+ SA(30jours)+ U(55jours)	205
Latossolo rouge-jaune	2.6	70	SA (semis)+ SA(30jours)+ U(55jours)	130
Latossolo endopétrolithique	2.6	70	SA (semis)+ SA(30jours)+ U(55jours)	108

Tableau 3.2. Entrées d'azote mesurées dans les parcelles utilisées pour le calage du bilan azoté de STICS

Faute d'un suivi de l'azote du sol ou de la plante, qui aurait permis un calage directement sur des variables spécifiques du module de bilan azoté, la variable de calage était le LAI. Pour la même raison, il était impossible de caler séparément les différentes fonctions impliquées dans le calcul du bilan azoté. Il paraissait notamment illusoire de tenter un calage des nombreux paramètres intervenant dans les fonctions contrôlant les flux d'azote entre les compartiments organiques, bien qu'on puisse légitimement douter, en particulier, de l'invariance entre le milieu tropical et le milieu tempéré, des paramètres de sensibilité à la température de la cinétique de minéralisation. Cependant, il paraissait légitime de faire l'hypothèse d'un faible poids, dans le déterminisme des stress azotés à Silvânia, de la variabilité des températures du sol comparativement au poids de l'offre initiale en azote minéral et organique, extrêmement variable dans l'échantillon. Une autre limitation de ce module pouvant être identifiée a priori pour nos milieux, était l'absence de prise en compte de l'azote sous forme

ammonium. Dans les sols acides de notre région d'étude, en effet, la proportion d'ammonium peut en principe être importante, la nitrification étant ralentie (Gomes de Souza *et al.*, 1985; Sierra, 2000). L'ammonium étant très peu lessivable, STICS risquait de surestimer les pertes d'azote par lessivage dans ces sols.

Le calage a porté sur deux paramètres empiriques permettant un réglage du lessivage de l'azote et de la nitrification de l'azote minéral fourni:

- le paramètre *effengr*, réglant l'efficacité des apports d'engrais, c'est à dire la proportion de l'azote minéral apporté passant effectivement sous forme de nitrate dans la solution du sol,
- le paramètre *concseuil*, concentration en azote de la solution du sol au-dessus de laquelle l'azote est entraîné par l'eau drainant d'une couche à une autre.

Le modèle est relativement sensible à ces deux paramètres, mais les meilleurs résultats pour la simulation du LAI (fig. 3.7) ont été obtenus avec les valeurs proposées par les auteurs de STICS, ceci quel que soit le type d'engrais apporté (sulfate d'ammonium ou urée). Ce paramétrage original a donc été conservé.

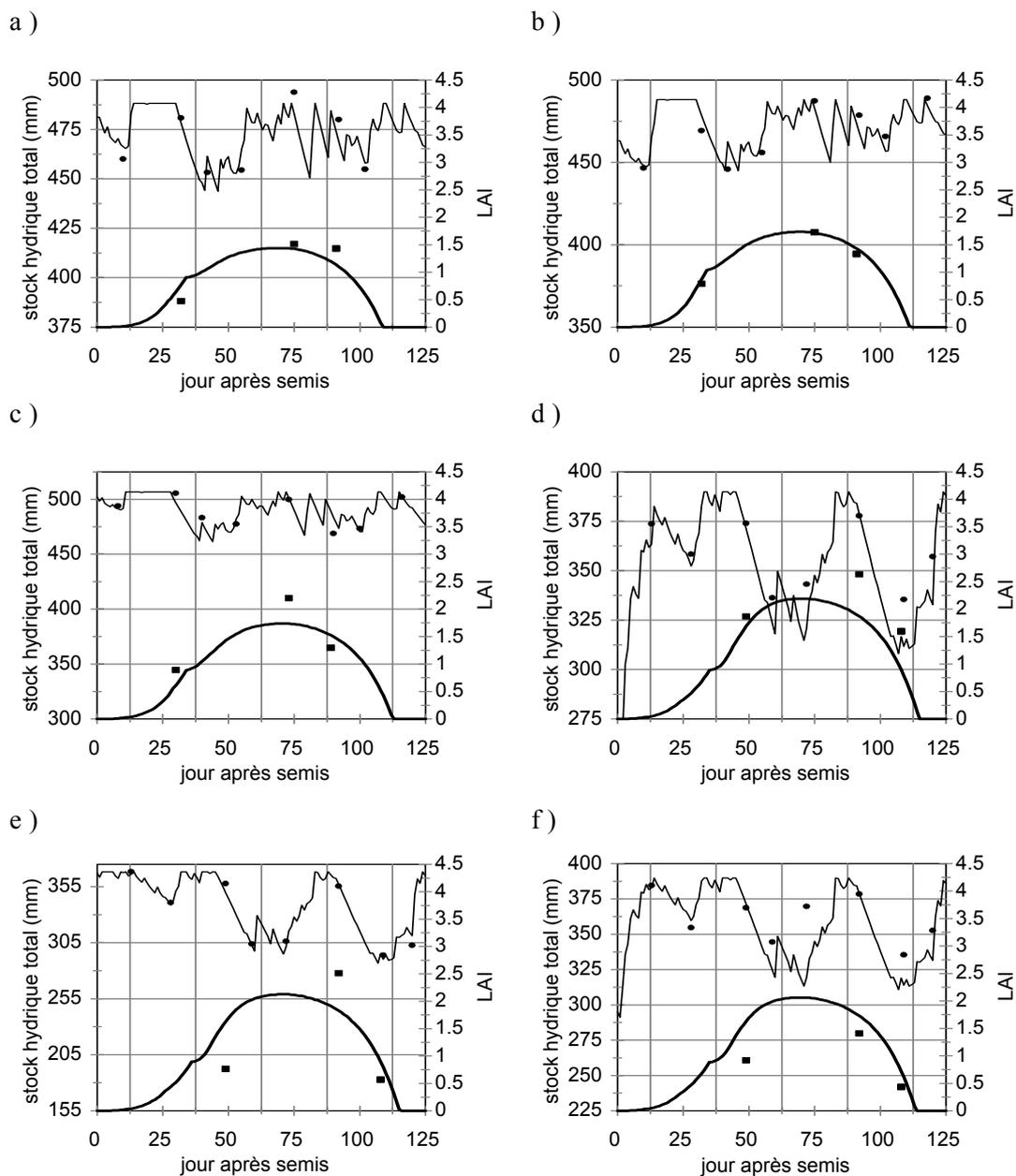


Fig.3.7. Evolutions comparées des stocks hydriques simulés (—) et observés (●) et du LAI simulé (, ,) et observé (■), après calage du bilan azoté de Stics pour les parcelles de Silvânia sur a) latossolo endopetroplintico, b) latossolo rouge-jaune, c) latossolo rouge sombre, d) cambissolo eutrófico, e) podzólico (RU=215mm), et f) podzólico (RU=180mm).

1.4.- Validation de la simulation du rendement et du LAI

Dans le but de valider globalement STICS pour les conditions de notre étude, ont été extraites du dispositif d'enquête agronomique toutes les placettes pour lesquelles on pouvait raisonnablement faire l'hypothèse qu'elles n'avaient subi aucune autre contrainte que celles prises en compte par le modèle, compte tenu des valeurs observées des indicateurs de contrainte définis au chapitre 2 (tableau 2.5). Seules 8 placettes de ce dispositif satisfaisaient à ce critère, soit un nombre trop faible pour autoriser une validation qui soit indépendante des situations utilisées pour le calage. Ces dernières ont donc été incluses dans la validation. Pour le cas des situations du dispositif "sonde à neutrons Silvânia" (6 situations dont 2 pour lesquelles seul le LAI était disponible, cf chapitre 3 paragr. 3.2.2), signalons toutefois qu'elles n'ont en fait pas joué un rôle important dans le calage, puisque le paramétrage d'origine du modèle a été conservé pour le module de bilan azoté, pour le calage duquel elles ont été utilisées. Les seules situations ayant joué un rôle dans le calage du modèle et réutilisées dans cette validation sont donc les quatre traitements de l'essai "LSE". Le jeu de données ainsi constitué couvrait des précipitations reçues au cours du cycle variant entre 276 et 1610mm, des réserves utiles de sol comprises entre 90 et 200mm, des densités de semis comprises entre 3.4 et 6.6 plantes/m², des stocks d'azote organique du sol variant entre 3 et 9 T/ha et des fertilisations azotées allant de 30 à 200kgN/ha. Les rendements observés sur ces situations variaient quant à eux entre 0.8 et 9.2 T/ha, avec toutefois une forte proportion de rendements compris entre 4 et 6 T/ha. Ces situations couvraient ainsi largement la gamme des situations culturales du dispositif d'enquête agronomique, pour ce qui concerne les facteurs pris en compte par le modèle testé. On ne disposait malheureusement pas de données de nombre de grains ni de poids de grain pour l'essai "LSE", et la comparaison entre observations et simulations pour ces variables s'en trouve appauvrie.

Les graphiques 3.8 et 3.9 montrent une qualité satisfaisante des simulations de rendement et, bien qu'un peu moindre, du LAI, pour ce jeu de données. La simulation du nombre de grain apparaît plus décevante, et il en est logiquement de même pour le poids d'un grain, obtenu dans le modèle par le rapport entre le rendement et le nombre de grain surfacique. Cela ne témoigne pas cependant d'une mauvaise aptitude du modèle à rendre compte d'effets sur le rendement de contraintes agissant après la floraison, puisque le calcul du nombre de grains est en fait un calcul "annexe", à l'aide d'une fonction dont le calage n'a qu'une très faible influence sur la simulation du rendement. En effet, ce dernier est d'abord calculé comme le produit de la biomasse totale et

de l'indice de récolte, puis divisé par le nombre de grains de manière à obtenir le poids d'un grain. Si ce dernier excède le potentiel du cultivar, toutefois, c'est cette valeur potentielle qui est retenue et le rendement simulé devient le produit du nombre de grains surfacique et du poids d'un grain. Ce qui est en cause est probablement un mauvais calage du calcul du nombre de grain à partir de la courbe enveloppe des données de Silvânia (cf supra, fig. 3.4).

Les distributions des écarts relatifs des variables simulées, en fonction de la variable observée correspondante (cf figure 3.9), indiquent qu'un intervalle de confiance au seuil de 94 % peut être estimé pour les simulations de rendement, d'une valeur de +/- 23% (15 données simulées sur les 16 sont dans cet intervalle autour de la valeur observée qui leur correspond). Au seuil de 75% cet intervalle est de +/- 20%. Pour le LAIf, le modèle a surestimé fortement (plus de 40%) certains LAI parmi les plus faibles du jeu de données. 83% des données simulées sont dans un intervalle de +/- 22% autour de la donnée observée, mais seulement 67% dans un intervalle de +/-20%. Les LAI les moins bien simulés correspondent à des situations dont les conditions hydriques n'apparaissent pas particulièrement contraignantes mais avec de faibles densités et de faibles apports d'azote. Les situations hydriques extrêmes de l'essai LSE sont quant à elles plus correctement simulées, mais les stress appliqués dans cet essai étaient surtout importants après floraison. En tout état de cause, il sera nécessaire d'être prudent pour interpréter des écarts, même importants, entre LAIf simulés et mesurés. Pour les LAI au-delà de 3, des écarts de l'ordre de 20% semblent suffisants pour conclure avec un risque raisonnable à la présence d'une contrainte supplémentaire. Un critère du même ordre paraît acceptable pour le nombre de grains et le poids d'un grain, avec une réserve supplémentaire compte tenu du plus faible nombre de données disponibles pour l'évaluation de la simulation de ces variables. Pour toutes ces variables, en retenant un seuil de 20% d'écart par rapport à la valeur observée, on pourra conclure avec un risque de l'ordre de 25% que cet écart est dû à au moins une contrainte supplémentaire, sauf pour le cas du LAI lorsque la valeur simulée est inférieure à 3, où il faudra davantage de prudence. Le risque d'erreur accepté ici peut paraître élevé par rapport au niveau de risque habituellement retenu dans les études expérimentales. Cependant, rappelons que les simulations viennent ici en complément des informations fournies par les indicateurs de contraintes. En outre, lors de l'utilisation qui va suivre de ce modèle pour diagnostiquer les impacts supplémentaires, le risque que l'on prend de juger à tort qu'un rendement observé est réduit par une contrainte supplémentaire se traduit par le risque d'avoir, pour permettre la

réalisation de l'étape C de la démarche, à modéliser des contraintes ayant en fait un impact négligeable sur les rendements, ce qui n'apparaîtrait alors en principe qu'à l'étape C. En revanche, être trop prudent de ce point de vue conduirait à augmenter le risque inverse de ne pas modéliser des contraintes ayant en réalité un impact non négligeable.

Avec ces seuils de confiance et ces précautions, le modèle obtenu à ce stade est utilisable pour le diagnostic des situations culturales de Silvânia.

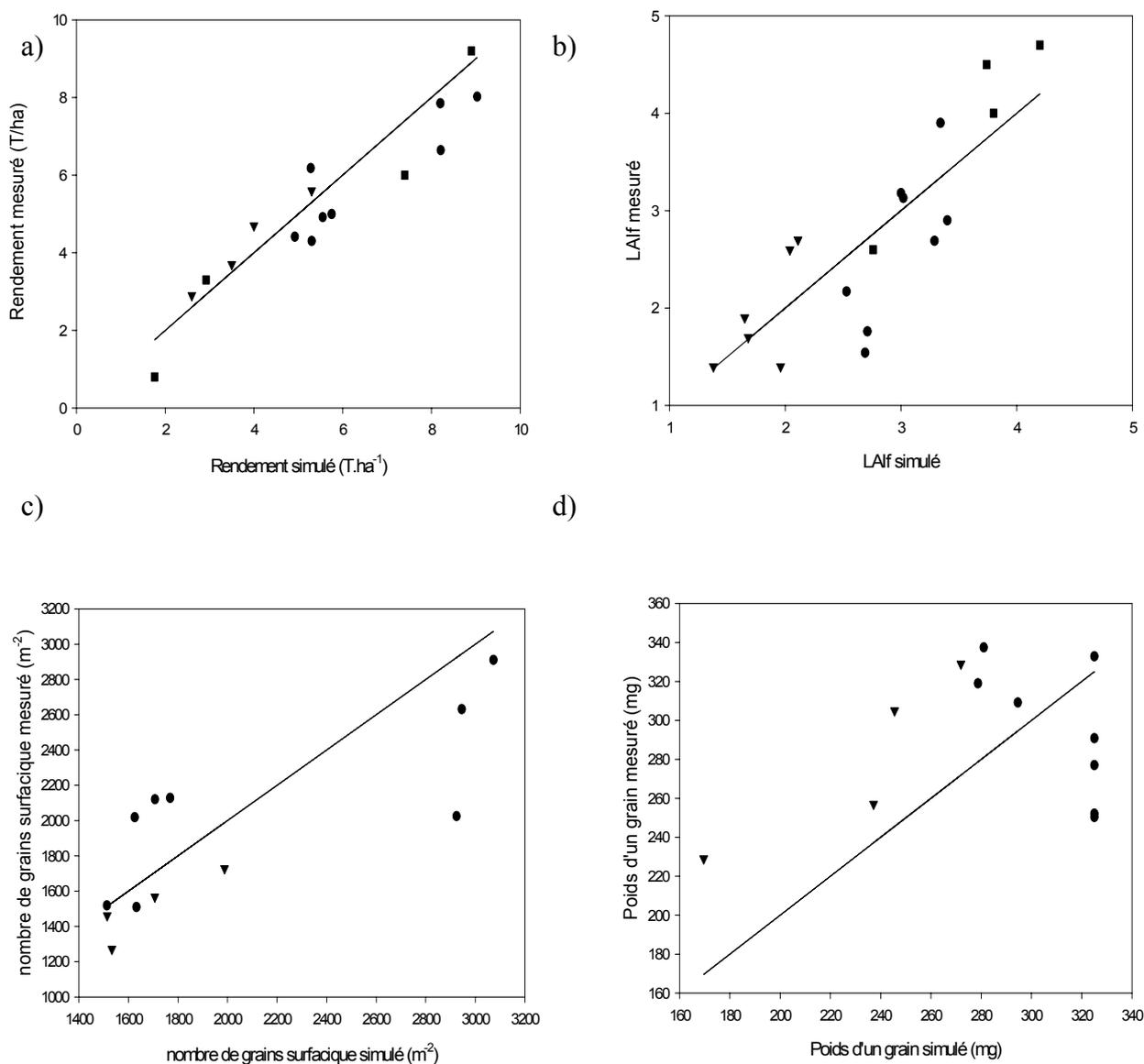
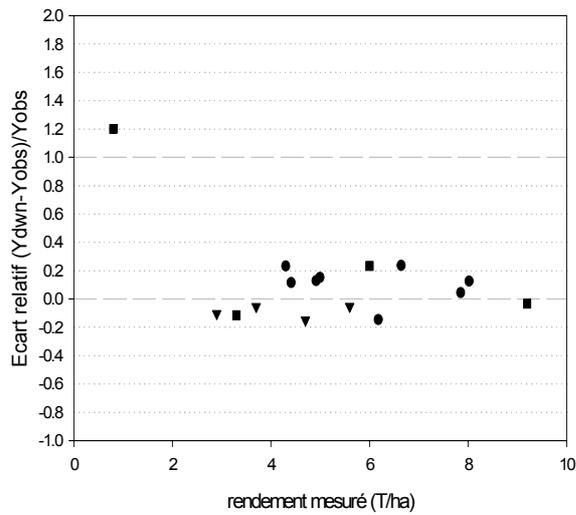
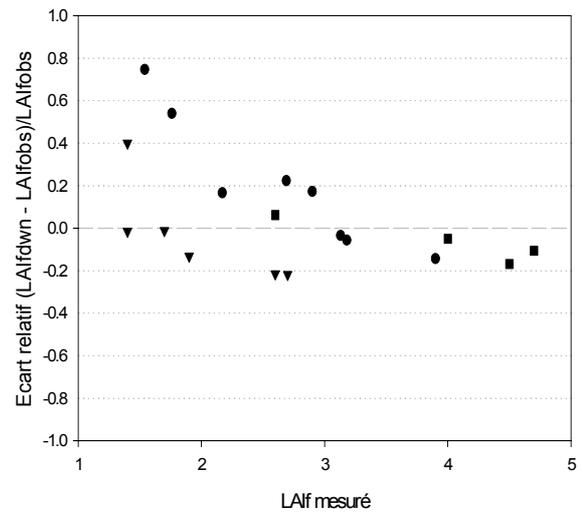


Fig. 3.8. Validation de STICS a) pour le rendement, b) pour le LAI, c) pour le nombre de grains surfacique, et d) pour le poids d'un grain. Points provenant du dispositif d'enquête agronomique (ronds), de l'essai "LSE" (carrés), et des parcelles de validation du bilan hydrique de Silvânia (triangles). Ligne épaisse: bissectrice (Y=X).

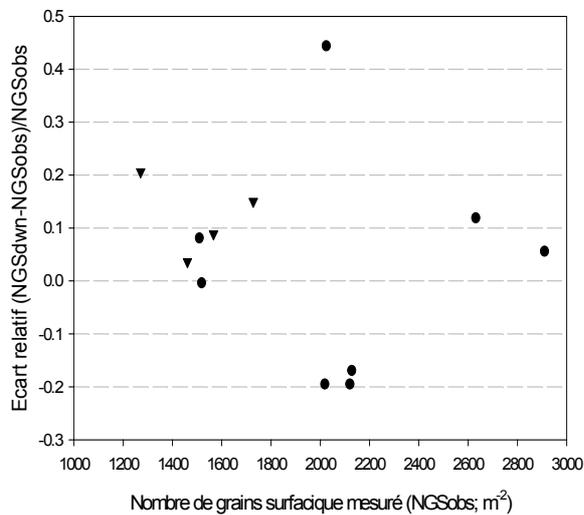
a)



b)



c)



d)

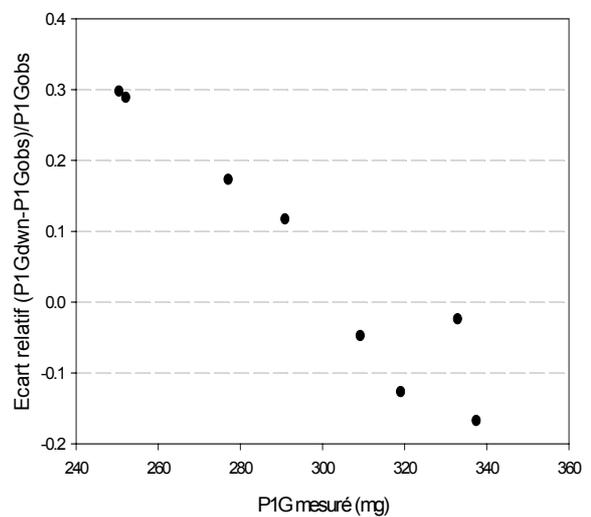


Fig. 3.9. Ecart relatif entre variables simulées par STICS et observées pour a) le rendement, b) LAI, c) le nombre de grains surfacique, et d) le poids d'un grain. Points provenant du dispositif d'enquête agronomique (ronds), de l'essai "LSE" (carrés), et des parcelles de validation du bilan hydrique de Silvânia (triangles).

2. Diagnostic

2.1.- Ecart entre rendements simulés et mesurés

Pour chaque placette et chaque année du dispositif d'enquête agronomique, le rendement a été simulé à l'aide de STICS, avec un paramétrage aussi proche que possible des situations réelles. Le rendement simulé obtenu, YDWN, a été considéré comme le rendement que le producteur aurait obtenu sur la placette si les contraintes de faible densité de peuplement, de stress hydrique et de stress azoté avaient été les seules contraintes limitant la productivité par rapport au potentiel permis par les conditions de rayonnement et de température auxquelles la culture avait été exposée.

La figure 3.9 montre l'importance des écarts entre Yobs et Ydwn, et donc de l'impact global des contraintes non prises en compte par STICS, qu'il s'agissait de diagnostiquer.

2.2.- Profils de réduction de croissance

Les contraintes suspectées pouvant interagir entre elles ou avec les contraintes prises en compte par le modèle, il était nécessaire d'établir la chronologie des réductions de croissance, afin de circonscrire, pour chaque situation culturale, l'ensemble des contraintes suspectées à celui des contraintes dont le mode d'action et les dates d'occurrence observées étaient compatibles avec

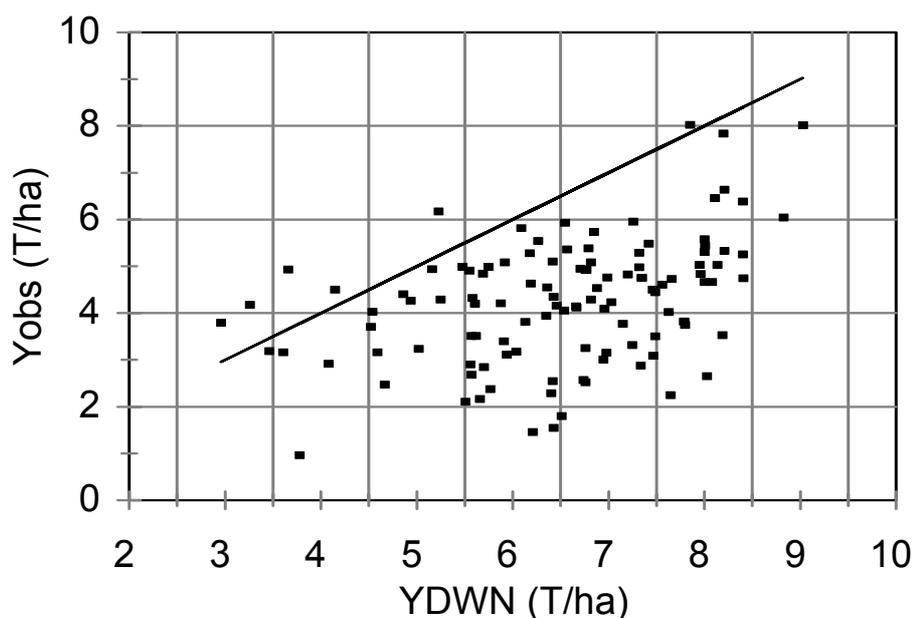


Fig.3.10. Ecart restant à expliquer entre les rendements observés à Silvânia (Yobs) et le rendements simulés par Stics (YDWN) en tenant compte des contraintes densité (D), hydrique (W) et azotée (N).

cette chronologie.

Il est relativement aisé de localiser la date de la première occurrence d'une limitation de croissance due à une ou plusieurs autres contraintes que celles prises en compte par le modèle, dans la mesure où l'on dispose d'observations de l'état de la culture à divers moments du cycle. Cette date est celle à partir de laquelle la croissance observée diverge de la croissance simulée. Les mesures de LAI à la floraison (LAI(f)), ainsi que les mesures de nombre de grain et de poids d'un grain permettaient ainsi un premier tri des situations.

Soient LAI(f)dwn, NGPdwn, et P1Gdwn les valeurs simulées par STICS respectivement pour le LAI à la floraison, le nombre de grains par plante et le poids d'un grain.

- cas 1: si LAI(f)dwn = LAI(f) et NGPdwn=NGP et P1Gdwn=P1G alors aucune limitation de croissance n'a eu lieu ($Y_{dwn}=Y_{obs}$)

- cas 2: si LAI(f)dwn = LAI(f) et NGPdwn=NGP et P1Gdwn>P1G alors la seule période à laquelle des réductions de croissance ont eu lieu est la phase de remplissage des grains. Seules les contraintes dont les indicateurs mesurés sont compatibles avec une limitation du remplissage des grains sont à retenir,

- cas 3: si LAI(f)dwn = LAI(f) et NGPdwn \geq NGP, alors des contraintes peuvent avoir agi à partir du début de la phase de détermination du nombre de grains. La croissance végétative n'a pas été affectée,

- cas 4: si LAI(f)dwn \geq LAI(f), alors des contraintes non prises en compte par STICS peuvent avoir agi dès le début du cycle.

On remarquera que la localisation dans le cycle des périodes d'action de contraintes est d'autant moins précise que la date de divergence entre simulation et réalité est précoce dans le cycle. En effet, si une contrainte a agi à une date d, le modèle et la réalité divergent à partir de cette date mais il peut s'agir d'une contrainte ayant une action limitée dans le temps comme d'une contrainte limitant de manière permanente la croissance ou encore d'une combinaison de ces deux types de contraintes. Pour affiner l'analyse, il faudrait disposer d'une information sur le comportement qu'aurait la culture, après la première limitation de croissance due à une contrainte non simulée, si les contraintes prises en compte par le modèle étaient de nouveau les seules contraintes présentes. Or ce type d'information peut être fourni par des simulations réalisées avec des dates de début échelonnées dans le cycle de la culture.

En effet, pour tout modèle simulant la dynamique temporelle de phénomènes, une simulation peut être réalisée avec une date de démarrage quelconque pourvu que les conditions du système simulé, les conditions initiales, soient connues à cette date. Dans notre cas, pour une date de début de simulation placée après la date de semis de la culture, ces conditions initiales concernent non seulement l'état du sol et du climat, mais aussi l'état du couvert végétal (biomasse aérienne, LAI, distribution des racines, et stade de développement courant, dans le cas de STICS). En supposant que l'on dispose de mesures, à plusieurs dates du cycle, des paramètres définissant les conditions initiales d'une simulation, il est donc possible de simuler la culture en considérant plusieurs dates de débuts échelonnées dans le cycle de la culture, et en comparant chacune de ces simulations à la situation réelle, d'établir la chronologie des réductions de croissance (fig.3.11).

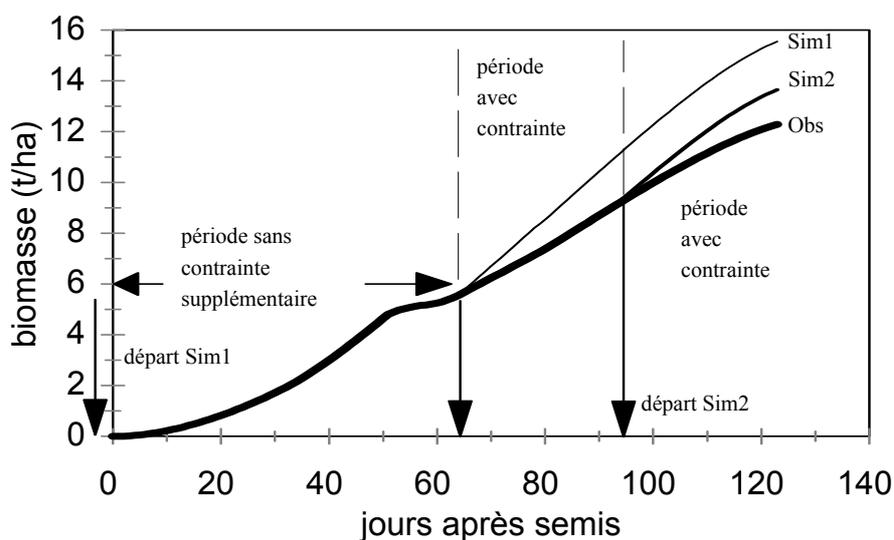


Fig. 3.11. Repérage théorique de la période où des contraintes non prises en compte par le modèle sont à l'origine d'une divergence entre simulation et observation du parcours de croissance de la culture.

En pratique, il aurait été très coûteux de mesurer à des dates répétées les conditions initiales d'une simulation. Comme pour la plupart des modèles de culture, le LAI est dans STICS une variable de forçage pour la plupart des sous-modules. Ceci signifie que le LAI est une donnée d'entrée pour ces modules, comme le sont les données climatiques pour l'ensemble du modèle. Des simulations peuvent être réalisées dans lesquelles le LAI simulé est remplacé par des valeurs observées. Les simulations des flux d'azote et d'eau, ainsi que du rayonnement intercepté et

transformé en lumière sont ainsi plus proches de la situation observée que lorsque le LAI est simulé. Dans notre cas, nous disposons de mesure du LAI à floraison et d'une mesure vers 30 jours après levée pour la plupart des placettes. Le LAI de chaque jour entre la levée et la floraison a été interpolé en ajustant une courbe logistique à ces deux valeurs observées, puis ces données journalières ont été fournies en entrée du modèle, remplaçant les valeurs simulées par le module de calcul du LAI. Le modèle ainsi forcé à suivre le LAI observé jusqu'à la floraison nous a donc servi à estimer les conditions initiales pour des simulations débutant à la floraison. De cette manière, pouvaient être simulées les composantes NGPdwn(f) et P1Gdwn(f), soit les valeurs qui auraient été atteintes respectivement pour le nombre de grains par plante et pour le poids d'un grain, si seules les contraintes prises en compte par STICS avaient agi après floraison et compte tenu de l'état observé de la culture à la floraison.

Par comparaison avec les valeurs observées de ces composantes, les cas 3 et 4 ont pu être précisés et 6 profils de chronologie des limitations de croissance ont finalement été obtenus, dans lesquels ont été classées les situations de l'enquête agronomique (Tableau 3.3). Des seuils de 20% d'écart entre variables simulées et observées ont été retenus à ce stade, pour conclure à un écart significatif entre simulation et observation, conformément à ce qui a été exposé précédemment (paragr. 1.4), et bien que comme on l'a vu ceci entraîne un risque important de classer à tort certaines situations dans la catégorie des situations affectées par des contraintes supplémentaires avant floraison, compte tenu de l'imprécision sur la simulation du LAI. Du fait de nombreuses données manquantes pour le LAI mesuré à la floraison, cette classification n'a pas été possible pour l'ensemble de l'échantillon, mais seulement le sous-échantillon de 86 placettes pour lesquelles étaient disponibles simultanément le LAI à floraison et tous les paramètres nécessaires aux simulations. Dans la plupart des cas, des limitations de croissance s'étaient produites pendant la croissance végétative, et dans la moitié de ces situations des limitations de croissance s'étaient également produites pendant la seconde partie du cycle (profils 5 et 6), menant aux plus forts écarts de rendement de l'échantillon.

	critère définissant le profil	Stade auquel une réduction de croissance s'est produite (relativement aux simulations de Ydwn)	
--	-------------------------------	--	--

numéro de profil	LAI _{fobs} <0.8x Laid _{wn} (0)	NGP _{Obs} <0.8x NGP _{dwn} (f)	P1G _{Obs} <0.8x *P1G _{dwn} (f)	levée- floraison mâle	floraison - début de remplissage des grains.	Remplissage des grains	% des placettes
1	0	0	0	0	0	0	15
2	0	0	1	0	0	1	7
3	0	1	-	0	1	?	20
4	1	0	0	1	0	0	25
5	1	0	1	1	0	1	2.5
6	1	1	-	1	1	?	31

Tableau 3.3. Définition des profils de réduction de croissance par rapport aux simulations. Les variables portant l'indice "Obs" sont des valeurs observées, celles portant l'indice "dwn" sont simulées par STICS en tenant compte de la densité, du stress hydrique et du stress azoté. (0): simulations démarrant à la date normale (fin de la saison sèche précédant la culture). (a): simulations démarrant à la floraison mâle (conditions initiales à la floraison fournies par des simulations forcées par LAI_{Obs}, démarrant à la date normale et s'arrêtant à la floraison).

	Pourcentage de placettes où la contrainte a été observée (par rapport au total des placettes)								
		Total		par profil de réduction de croissance					
		1	2	3	4	5	6		
enherbement (H)	38.3	pré-floraison	27.7	1.2	2.4	6.0	3.6	1.2	13.3
		post-floraison	37.3	1.2	2.4	7.2	8.4	2.4	15.7
Insectes et maladies (I)	14.5	pré-floraison	8.4	1.2	0.0	0.0	3.6	0.0	3.6
		post-floraison	5.9	3.6	0.0	1.2	0.0	1.2	0.0
Toxicité aluminique (A)	25.3		25.3	1.2	0.0	1.2	2.4	1.2	19.3
P	16.9		16.9	2.4	0.0	2.4	4.8	0.0	7.2
K	21.7		21.7	2.4	0.0	3.6	1.2	1.2	13.3
E	22.1	pré-floraison	19.3	0.0	0.0	6.0	7.2	0.0	6.1
		post-floraison	13.3	0.0	0.0	2.4	4.8	1.2	4.8

Tableau 3.4. Fréquence d'observation des contraintes non prises en compte par STICS.

2.3.- *Diagnostic en termes de fréquence d'apparition des contraintes*

La distribution des contraintes en fonction des profils de réduction de croissance (tableau 3.4) montre que les cas où une contrainte a été observée sans réduction de croissance sont relativement rares: le contraire aurait invalidé les indicateurs de contrainte utilisés. Il n'y a pas de profil typiquement associé à une contrainte (aucune colonne comprenant un pourcentage élevé pour une contrainte et tous les autres pourcentages faibles), sauf pour le cas des limitations de croissance cantonnées à la période de remplissage des grains (profil 2), associé exclusivement aux stress biotiques. Dans un certain nombre de cas, particulièrement pour les contraintes enherbement et excès d'eau post-floraison, des placettes ont des profils de croissance nettement différents de ceux qui résulteraient de l'effet exclusif de la contrainte (cellules grisées du tableau). Ceci est dû au fait que plusieurs contraintes sont fréquemment combinées dans les placettes (la somme de la colonne "Total" excède 100%), de telle sorte qu'il n'était pas possible d'inférer directement les impacts sur le rendement des différentes contraintes suspectées.

Deux sous-échantillons de placettes ont été constitués, dans lesquels les deux critères suivants étaient satisfaits:

- au plus deux contraintes sont présentes dans chaque placette avant floraison (sous-échantillon 1) et après floraison (sous-échantillon 2),
- au moins trois placettes ont la même combinaison de contraintes agissant à la période considérée du cycle.

Le sous-échantillon 1 contenait ainsi 65 placettes dont 31 sans aucune contrainte non simulée, et le sous-échantillon 2 52 placettes dont 27 sans aucune contrainte non simulée. Ces sous-échantillons permettaient de comparer des situations différant par un faible nombre de caractéristiques, et ainsi devaient faciliter l'analyse des impacts des contraintes non simulées, relativement à la croissance limitée exclusivement par les contraintes simulées, sur la croissance avant et après floraison. Ces impacts pouvaient être mesurés respectivement par les rapports LAIfobs / LAIfdwn(0) et Yobs / Ydwn(f), comme on l'a vu plus haut. Les résultats de cette analyse (annexe 2), indiquent qu'on ne peut écarter un impact des contraintes A, P, K, E et H sur la croissance pré-floraison (pour E et H, il s'agit de cas où les indicateurs correspondants suggéraient leur présence avant floraison). Pour la croissance post-floraison, ont été retenues les contraintes dont l'action s'exerce tout au long du cycle (A, P, et K) et les contraintes d'action limitée dans le temps lorsqu'elles avaient été repérées après floraison. Seule la contrainte A semble réduire la croissance, tandis que les contraintes E, H, et P sont sans effets sur la croissance post-floraison et que la contrainte K paraît interagir négativement avec la contrainte A sur les

limitations de croissance à cette période. La contrainte I, quant à elle, n'est pas suffisamment souvent présente seule ou associée à moins de deux autres contraintes pour avoir été retenue dans le sous-échantillon, qu'elle ait été repérée avant comme après floraison. Cependant, la faiblesse des effectifs de placettes ayant les mêmes contraintes limite considérablement la portée de cette analyse, et surtout interdit d'établir une hiérarchie des contraintes en fonction de leur impact sur la croissance, compte tenu d'une forte variabilité, dans l'échantillon, de l'intensité des contraintes non simulées, cette intensité n'étant pas prise en compte dans la constitution des groupes de placettes comparés entre eux.

Une hiérarchie entre contraintes restait cependant possible en termes de fréquence d'occurrence. L'annexe 3 fournit le détail des comparaisons de données permettant de raisonner sur les occurrences de contraintes et leurs causes probables. Lorsque l'indicateur associé à une contrainte suggérait sa présence dans une parcelle, la contrainte a été considérée comme présente si le profil de réduction de croissance de la placette ne permettait pas de l'écarter en appliquant les critères suivants:

- les contraintes P et K n'ont été considérées que lorsqu'associées à des réductions de croissance végétative (profils 4, 5, et 6);

- la contrainte A, supposée agir principalement à travers une réduction de la descente des racines en profondeur et donc pouvant provoquer des contraintes hydriques, était susceptible de réduire la croissance à tout moment du cycle, et a donc été retenue pour tous les profils sauf le profil 1;

- la contrainte E, a été considérée comme agissant également avant tout sur la croissance en profondeur des racines, mais à la différence du cas précédent, la date à partir de laquelle la contrainte peut avoir des conséquences dépend de la date à laquelle l'excès d'eau se produit. Dans le cas où ce dernier était relevé dans la première partie du cycle, on a considéré que la présence de la contrainte n'était invalidée que pour les placettes du profil 1. Pour les cas où un excès d'eau n'était signalé qu'après floraison, cette contrainte n'était écartée que pour les placettes appartenant aux profils 1 et 4;

- les contraintes H et I ont été considérées comme des contraintes ayant une action immédiate et éventuellement limitée dans le temps. Ainsi lorsqu'elles étaient relevées sur le terrain avant la floraison, elles ont été écartées de la liste des contraintes pouvant être en cause pour les placettes appartenant aux profils 1, 2 et 3. Observées sur le terrain après floraison, elles ont été écartées pour les placettes appartenant aux profils 1 et 4. Lorsqu'observées à la fois avant et après floraison, elles n'étaient écartées que pour le profil 1.

Les fréquences d'occurrence obtenues après application de ces critères ne modifient pas la hiérarchie des contraintes obtenue sans correction (figure 3.12), à l'exception du fait que la contrainte K devient sensiblement moins fréquente que la contrainte E, alors que leurs fréquences paraissaient similaires en première approximation. Rappelons encore que ces fréquences restent probablement plutôt surestimées que l'inverse, compte tenu des seuils qui ont été pris en particulier pour les écarts entre LAIfdwn et LAIfobs lors du repérage de la chronologie des réductions de croissance (on notera cependant que dans leur grande majorité les LAIf observés étaient nettement inférieurs au seuil retenu). Dans le détail, en combinant les informations fournies par les données d'impact des contraintes sur la croissance (annexe 2) et les données concernant leurs fréquences d'occurrence (annexe 3), le diagnostic de chacune des contraintes non simulées est formulé ci-après.

La contrainte enherbement (annexe 3.1) était celle qui apparaissait le plus souvent, que l'on considère l'indicateur observé brut (38% du total des placettes) ou corrigé en tenant compte

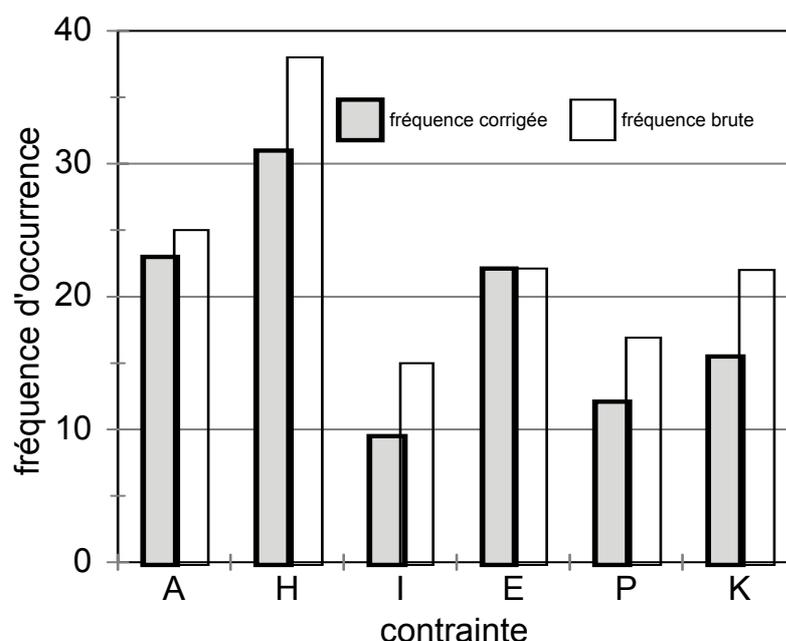


Figure 3.12. Hiérarchie des contraintes non simulées, en termes de fréquence d'occurrence.

de ces critères de cohérence avec le profil de réduction de croissance (31% des placettes). Les enherbements tardifs dominent (37% du total des placettes), mais correspondent dans leur grande majorité à des placettes dont l'enherbement était important dès la première partie du cycle (28% du total des placettes et 71% des placettes enherbées). Pour les placettes enherbées où l'écart entre rendements simulés et observés n'est pas très élevé ($Y_{obs} \geq 0.6 Y_{dwn}$), le profil de réduction de croissance n'est pas cohérent avec les indicateurs de contrainte, ces derniers étant le plus

souvent apparemment surestimés, le profil de croissance n'indiquant pas de réduction de croissance pour des périodes où au moins une contrainte était supposée avoir agi. La contrainte enherbement était le plus souvent associée à une ou plusieurs autres, de telle manière que son impact réel sur le rendement n'a pu être inféré avec précision à ce stade de l'analyse. La théorie des interactions entre espèces associées (Baldy et Stigter, 1993) indique que la compétition pour la lumière entre la culture et les adventices dépend des distributions relatives des indices foliaires des deux membres de l'association dans l'espace, et qu'il existe également une compétition pour l'eau et les éléments minéraux. Il s'agissait pour nous d'évaluer quelles simplifications de la théorie étaient possibles pour la modélisation dans le contexte de Silvânia. En particulier, une pondération du rendement par une biomasse d'adventice vue soit comme un aléa soit comme résultant des conditions initiales de la culture, comme proposée par certains auteurs, aurait simplifié le travail de modélisation. Or, parmi les placettes où aucune autre contrainte que l'enherbement n'avait été relevée, l'enherbement de début de cycle était présent non seulement avec des profils de réduction de croissance 4 à 6, dans lesquels la croissance végétative avait été réduite, mais aussi dans des placettes classées dans les profils 2 et 3, dans lesquelles la croissance végétative avait été correctement simulée sans tenir compte de la pression des adventices. L'enherbement de fin de cycle était aussi relevé dans des placettes du profil 4, où la croissance post-floraison n'avait pas été limitée. Ceci n'indiquait pas si les adventices pouvaient être considérées comme un aléa ou si l'on devait tenir compte des mécanismes gouvernant leur croissance, mais indiquait qu'à quantité d'adventices donnée, les effets sur le rendement étaient variables. Une simple pondération du rendement en fonction de la quantité d'adventices n'était donc pas suffisante pour simuler l'impact des mauvaises herbes sur le rendement.

Les fortes pressions d'adventices étaient associées fréquemment aux causes possibles suivantes, souvent simultanément présentes dans les placettes:

- faibles densités de levées,
- écarts importants entre date du dernier travail du sol et date de semis,
- sarclages tardifs ou ayant échoué, selon les dires des exploitants, à cause de conditions climatiques défavorable,
- faible développement foliaire du maïs en début de cycle dû éventuellement à une autre contrainte.

Ces causes étant liées aux conditions du milieu et à la gestion technique de ce milieu, il apparaissait indispensable, pour notre étude, de les modéliser explicitement et de ne pas considérer l'enherbement comme un aléa indépendant de la situation culturale.

La contrainte “toxicité aluminique et/ou carence en Ca” (annexe 3.2) apparaissait dans 25% des placettes (23% après application des critères de cohérence), sans qu’il soit possible, là non plus, d’isoler clairement son impact sur le rendement. Cette contrainte était nettement associée avec le profil 6, où l’élaboration du rendement avait été affectée pendant l’ensemble du cycle de la culture, ce qui est cohérent avec le fait qu’il s’agit d’une contrainte limitant la croissance racinaire et ayant ainsi des effets permanents sur l’extraction de l’eau et des éléments minéraux, à partir du moment où les racines atteignent un horizon toxique. En effet, dans la plupart des placettes concernées par cette contrainte, les taux élevés d’aluminium échangeable ou les très faibles teneurs en Ca apparaissaient à des profondeurs comprises entre 50 et 100cm. En considérant une croissance racinaire, en l’absence de contrainte, de 2.5cm/jour pour le maïs, les racines devaient donc atteindre ces horizons toxiques à des dates comprises entre 20 et 40 jours après levée. Compte tenu de la variabilité des conditions pédoclimatiques des situations concernées par la toxicité aluminique, on pouvait s’attendre à une réponse très variable du maïs à cette contrainte, qui ne pouvait donc pas non plus être modélisée de façon statique, via une simple pondération du rendement. Le fait que la contrainte aluminique et la contrainte enherbement étaient simultanément présentes dans un nombre non négligeable de placettes amenait d’ailleurs à penser qu’on ne pouvait négliger l’interaction entre ces deux contraintes, ce qui constituait un argument supplémentaire en faveur d’une modélisation dynamique de l’une comme de l’autre.

De faibles teneurs en K associées à de faibles fertilisations potassiques apparaissaient dans 22% des placettes au total (annexe 3.3). Après application des critères de cohérence avec les profils de réduction de croissance, toutefois, cette proportion était réduite à 15,5%. La contrainte K n’est présente seule que dans une placette, où la réduction de croissance est très faible. En revanche, dans les cas relativement nombreux où d’autres contraintes étaient présentes simultanément, notamment les adventices et la contrainte aluminique, les pertes de rendement sont souvent importantes. Dans un petit nombre de cas où la contrainte A est simultanément présente, en particulier, correspondant au tiers des situations où la contrainte K a été repérée, cette dernière aggrave les limitations de croissance pré-floraison. Cependant, compte tenu de la faible présence relative de cette contrainte dans les parcelles de Silvânia, il n’apparaissait pas prioritaire d’en modéliser les effets, dans un premier temps.

19% des placettes avaient subi un excès d’eau pendant plus de deux jours consécutifs pendant la phase de croissance végétative, et dans moins de 15% des placettes cette contrainte

apparaissait après la floraison. Toutes périodes d'occurrence confondues, la fréquence d'apparition de cette contrainte était de 22.1%, et aucune placette ne pouvait être écartée pour incohérence entre le profil de réduction de croissance et le mode d'action de la contrainte excès d'eau (annexe 3.4). Bien que les effets de cette contrainte sur la croissance paraissaient faibles dans les cas où ces effets pouvaient être analysés, ces cas étaient relativement rares, la contrainte E étant fréquemment combinée à de nombreuses autres contraintes. Compte tenu de sa fréquence d'occurrence élevée et de sa dépendance directe aux conditions climatiques, il n'était pas possible de négliger à priori la modélisation de cette contrainte.

La contrainte "dégâts d'insectes et maladie", constituée en fait pour l'essentiel d'attaques de borers *spodoptera* spp, apparaît dans moins de 15% des placettes. Après application des critères de cohérence avec les profils de réduction de croissance, la proportion n'est plus que de 9.5% (annexe 3.5). Cette contrainte étant combinée de façon très diverse avec les autres contraintes non simulées, son impact sur le rendement n'était pas analysable directement avec précision. Cependant, elle n'est associée à de fortes limitations de rendement que dans deux cas sur les douze où elle a été observée. Dans ces deux placettes, un faible indice foliaire observé à la floraison pouvait être attribué à des attaques assez importantes de larves foreuses, et l'on pouvait faire l'hypothèse que l'enherbement important observé dans ces placettes avait ensuite été favorisé par cette réduction du LAI du maïs, mais les impacts en général faibles de ces attaques sur le feuillage suggéraient que l'on pouvait négliger ce type d'interactions entre la pression parasitaire et le fonctionnement de la culture, pour se contenter d'une pondération statique du rendement pour tenir compte de ces dégâts. De plus, cette contrainte est apparue indépendante de la gestion technique des parcelles et des conditions édapho-climatique, et pouvait donc être traitée comme un aléa.

Enfin la contrainte "faible teneur en P dans le sol et faible niveau de fertilisation phosphorée" concernait 16.9% des placettes d'après l'indicateur utilisé. Après correction, seules 12.1% des placettes pouvaient être retenues comme effectivement concernées par cette contrainte (annexe 3.6). Pour cette contrainte, un effet sur la croissance végétative pouvait être mis en évidence (annexe 2) pour la moitié des situations où elle était présente. La contrainte P apparaissait ainsi comme moins fréquente que la contrainte K mais avec un impact plus important lorsqu'elle était présente, de telle sorte que la simulation de ces deux contraintes apparaissait comme devant être incorporée au modèle avec un même niveau relativement faible de priorité.

3.-Conclusion

Le graphique 3.13 récapitule les analyses réalisées dans ce chapitre, portant sur le calage et la validation de STICS et sur son application pour le diagnostic des contraintes non simulées.

Le modèle STICS a été calé et validé pour les conditions de notre étude. Certaines spécificités du fonctionnement du système sol-plante-atmosphère en milieu tropical ont cependant rendu nécessaires quelques modifications de son module de calcul du bilan hydrique:

- introduction d'une prise en compte de l'interaction entre les dynamiques d'humectation du sol et de descente des racines en profondeur,

- abandon de l'algorithme de calcul de la fonction d'évaporation dérivé de l'algorithme de Ritchie, pour le substituer par une fonction tenant compte explicitement de la teneur en eau du sol lorsque cette dernière limite l'évaporation

- incorporation d'une accélération de la sénescence foliaire par les stress hydriques post-floraison.

Mises à part ces modifications, les paramètres du modèle dont le calage a conduit à des valeurs sensiblement différentes de celles proposées par les auteurs de STICS pour le milieu tempéré sont:

- les paramètres de la fonction simulant l'effet de la densité de peuplement sur l'indice foliaire, les cultivars tropicaux étant nettement moins tolérants aux densités élevées que les cultivars tempérés,

- l'indice de récolte maximal, inférieur à celui des maïs du monde tempéré.

Cependant, le calage du module de bilan azoté a été réalisé sur deux paramètres auxquels ce module est sensible mais qui ne représentent que très grossièrement les variations entre le monde tropical et le monde tempéré, comparativement au compromis entre robustesse et complexité choisi par les auteurs de STICS, qui autoriserait un calage plus proche des mécanismes du bilan azoté. Il en résulte que le calage obtenu est probablement très spécifique de la région étudiée, et qu'il ne fournit aucune information sur la validité pour le monde tropical des autres paramètres impliqués dans la simulation du bilan azoté. Il faut relever à ce propos une surprenante rareté, dans la littérature, des travaux visant à évaluer des modèles de simulation du bilan azoté en milieu tropical (Sierra, 2001, comm. pers); (Findeling, 2001; Hétier *et al.*, 1990; Recous *et al.*, 2000), qui auraient permis de discuter davantage la pertinence de notre calage.

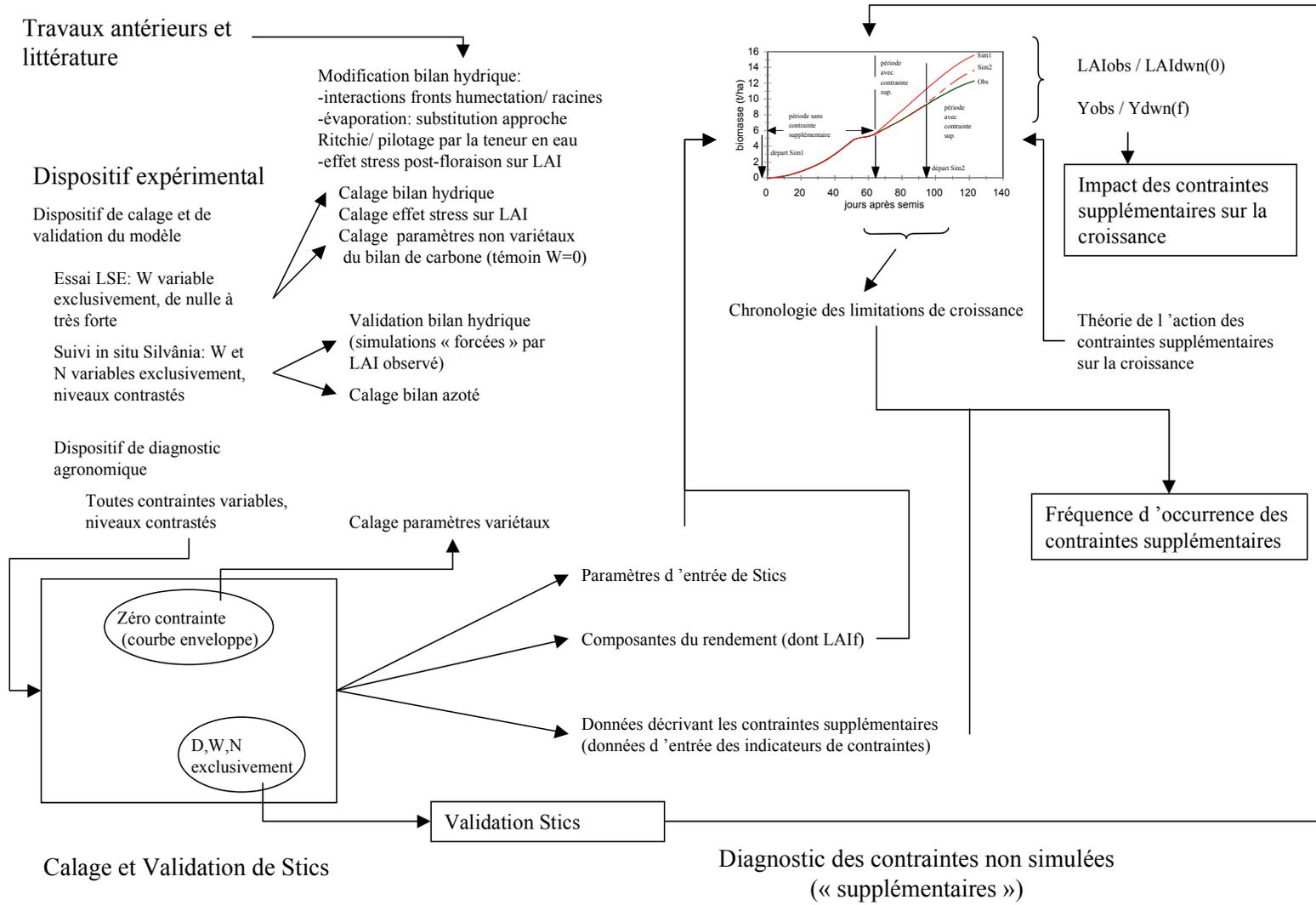


Figure 3.13. Schéma récapitulatif de la méthodologie mise en oeuvre pour le repérage des contraintes supplémentaires

Les rendements atteints à Silvânia sont très fréquemment et très nettement inférieurs aux rendements simulés par le modèle STICS ainsi modifié, calé et validé, qui ne prenaient en compte que les contraintes hydrique, azotée et de densité de peuplement: l'effet des contraintes non prises en compte par ce modèle est important. Le diagnostic réalisé dans ce chapitre montre que les contraintes toxicité aluminique/ déficience en CA, enherbement et excès d'eau doivent faire l'objet d'une modélisation complémentaire car (tableau 3.5):

- elles sont fréquentes dans les parcelles,
- elles sont, *a priori*, fortement dépendantes des aléas climatiques, dont les conséquences sur le rendement sont au centre de la question pour laquelle le modèle devait être construit,
- leurs interactions entre elles et avec les contraintes déjà simulées sont telles qu'il est impossible de considérer qu'elles avaient un simple effet additif sur les contraintes déjà simulées.

Au moins dans un premier temps, par contre, les contraintes phosphorée et potassique peuvent être écartées de cette modélisation compte tenu de leur plus faible fréquence dans l'échantillon. La contrainte biotique autre que les adventices pouvait également être négligée dans la modélisation, non seulement du fait de sa faible fréquence, mais également du fait de son indépendance des autres contraintes et en particulier des contraintes d'origine climatique, rendant possible son assimilation à un aléa indépendant lors de l'analyse bio-économique des risques subis par les exploitations, à laquelle cette étude devait servir de base.

Contrainte	Fréquence	Impact lorsque présente	Fiabilité relative de l'estimation d'impact	Interactions avec climat et autres contraintes	Retenue pour la modélisation complémentaire
A	élevée	important	élevée	oui	oui
H	très élevée	modéré	élevée	oui	oui
E	élevée	faible	faible	oui	oui
K	faible	faible	faible	oui	non
P	très faible	modéré	faible	oui	non
I	très faible	faible	très faible	non	non

Tableau 3.5. Synthèse du diagnostic des contraintes non prises en compte par le modèle.

Au plan méthodologique, ce chapitre valide les modifications de la méthode de référence du diagnostic agronomique liées à la substitution d'un modèle théorique, qualitatif, d'élaboration du rendement, par un modèle de culture, quantitatif:

- la méthode des courbes-enveloppe, utilisée classiquement pour l'obtention des valeurs maximales d'une composante du rendement en fonction des compétitions entre puits d'allocation des ressources, a été étendue au calage de certaines fonctions du modèle, définissant le potentiel de croissance en fonction de la densité de peuplement,

- la chronologie des limitations de croissance est établie non plus en situant les placettes de l'enquête agronomique dans des graphes représentant, l'une en fonction de l'autre, deux composantes du rendement successivement élaborées, mais en repérant les périodes à partir desquelles les données observées divergent de simulations "forcées" par des valeurs observées du LAI jusqu'à un certain point du cycle, puis "normales" au-delà de ce point,

- les impacts des contraintes sur la croissance sont étudiés non plus à travers les écarts entre composantes observées et potentielles, mais entre les composantes observées et simulées sous contraintes hydriques, azotées et de faibles peuplements.

Un inconvénient non négligeable de la méthode est cependant le rôle très important qu'y joue l'indice de surface foliaire, plus lourd à mesurer dans le contexte d'un dispositif d'enquête agronomique que les composantes nombre de grains et poids d'un grain qui jouent le même rôle dans la méthode de référence. Des mesures de biomasses totales à plusieurs dates du cycle, auraient pu se substituer- ou mieux s'ajouter- au LAI comme critère pour le repérage de la chronologie des réductions de croissance comme pratiqué par Lemaire (1985). Cette grandeur est cependant elle aussi beaucoup plus difficile d'accès que les composantes du rendement évaluables à la récolte (Meynard et David, 1992). En effet la mesure directe de la biomasse est destructive, ce qui peut constituer une difficulté importante pour un dispositif en parcelles d'agriculteurs. Elle peut être remplacée par des estimations à partir de mesures du diamètre et de la hauteur des tiges (Navarro Garza, 1984), mais il faut alors étalonner la relation entre la biomasse et ces variables pour chaque variété présente et chaque stade d'observation (Scopel, 1994).

L'avantage majeur de l'approche utilisée est que les contraintes les plus fréquentes dans la grande majorité des écosystèmes cultivés étant déjà intégrées dans les simulations par rapport auxquelles les rendements observés sont analysés, les autres contraintes deviennent plus faciles à repérer, les causes possibles des écarts analysés étant moins nombreuses. Dans notre étude, toutefois, le nombre des contraintes non prises en compte par le modèle et présentes dans les parcelles restait élevé, et plusieurs contraintes étaient simultanément présentes dans un grand nombre de placettes, de telle sorte que l'analyse de l'impact des contraintes sur la croissance est restée peu précise à l'issue de ce premier cycle de modélisation et de diagnostic.

Chapitre 4:
Second cycle de modélisation et de diagnostic

1.- Introduction

Le chapitre précédent a permis d'identifier, parmi les contraintes non prises en compte par STICS, celles dont les effets sur la croissance et le rendement devaient être incorporés au modèle. Le présent chapitre décrit d'une part ce travail de modélisation basé sur une analyse critique des solutions déjà proposées dans la littérature, pour la simulation des effets de la toxicité aluminique et de la déficience en calcium, de l'excès d'eau, et des adventices. D'autre part un nouveau diagnostic est réalisé à l'aide du nouveau modèle ainsi construit, pour les trois années du suivi agronomique. Ce diagnostic est en fait un test de l'hypothèse que les autres contraintes identifiées au diagnostic préliminaire, qui deviennent les contraintes supplémentaires du nouveau modèle, ont des effets négligeables sur les rendements à Silvânia. Il s'agit donc d'une validation finale du modèle.

2. Modélisation

2.1.- Généralités sur la démarche utilisée

La description des modifications apportées au modèle comprend la description de l'état de l'art pour la modélisation de chaque contrainte considérée, le raisonnement du choix qui a été effectué parmi les solutions rencontrées dans la littérature, et le calage de la fonction finalement retenue.

Le choix de chaque fonction de simulation a été réalisé sur le triple critère:

- de sa compatibilité avec le pas de temps et les variables de STICS modifié au chapitre 3,
- de son aptitude à tenir compte des causes et de l'intensité locales des contraintes considérées à Silvânia, telles que détectées au diagnostic du chapitre précédent,
- de sa compatibilité, pour le paramétrage, le calage et la validation, avec les informations recueillies sur les placettes.

Lorsque les fonctions proposées par la littérature ne permettaient pas de satisfaire simultanément à ces critères, nous avons introduit une approche nouvelle, en modifiant aussi peu que possible la fonction existante qui nous paraissait le plus près de les satisfaire.

Toutefois, le développement d'un modèle est fondamentalement une démarche par tâtonnements qui ne permet pas de garantir que le meilleur choix est réalisé. Il serait à notre avis vain de vouloir décrire de manière exhaustive toutes les fausses pistes rencontrées au cours de ce processus d'essais et d'erreurs et de justifier systématiquement les raisons de leur rejet, et malhonnête de prétendre avoir testé toutes les solutions proposées par la littérature, bien que les contraintes que nous avons à traiter n'avaient fait l'objet que de relativement peu d'efforts de

modélisation de la part de la communauté scientifique, comparativement en particulier aux contraintes hydrique et azotée. Nous nous sommes cependant efforcés de détailler les choix que nous avons opérés entre les approches proposées par les modèles les plus couramment rencontrés dans la littérature.

Enfin, dans le cas de la simulation des effets des adventices, la modélisation réalisée était nettement plus complexe que pour les autres contraintes, justifiant un découpage plus détaillé du texte en fonction des différentes étapes de la construction du modèle, la démarche restant la même que pour les contraintes anoxie et toxicité aluminique.

2. 2.- Effets de la toxicité aluminique et de la déficience en Ca

La toxicité aluminique limite la croissance racinaire, par inhibition de la division du méristème apical (Horst *et al.*, 1987), le taux de saturation par l'aluminium du complexe d'échange cationique étant l'index le plus couramment utilisé pour évaluer l'intensité de la contrainte (Abruna *et al.*, 1982; Boyer, 1976; Brenes et Pearson, 1973; Pavan *et al.*, 1982; Pieri, 1976; Sanchez, 1976).

Le modèle EPIC (Sharpley et Williams, 1990; Williams *et al.*, 1984) propose une prise en compte de cette toxicité basée sur cet index:

si $ALS > AL0$, $ATS = 1/(100-AL0)$,

si $ALS \leq AL0$, $ATS = 1$

où ATS est le facteur de stress lié à la toxicité aluminique (Aluminum Toxicity Stress factor), ALS le taux de saturation de la CEC du sol en Aluminium (%), et AL0 la valeur maximum de ALS que la culture peut tolérer sans stress.

EPIC considère d'une part une croissance en profondeur des racines, qui n'est pas affectée par la toxicité aluminique, et une distribution, en fonction de la profondeur, de l'extraction potentielle d'eau du sol par les racines. C'est cette distribution qui est affectée par le facteur de stress aluminique.

STICS considère également une croissance en profondeur et une distribution des racines, mais la transposition à STICS de la prise en compte par EPIC de la toxicité aluminique n'est pas pour autant possible simplement. En effet, les deux modèles diffèrent sensiblement en ce qui concerne la logique de calcul de l'extraction de l'eau du sol par les racines. Dans le cas d'EPIC, l'extraction de l'eau est d'abord évaluée couche par couche puis sommée pour évaluer la transpiration totale. La distribution des racines pilote ainsi directement le calcul de la transpiration à travers un coefficient d'extraction racinaire drac:

$$T = \int_{z=1, z_{rac}} (T_p * drac(z) * ATS(z) * FH(z)),$$

où T est la transpiration réelle totale, z_{rac} la profondeur atteinte par les racines, et $FH(z)$ le facteur hydrique à la cote z, variant entre 0, lorsque l'humidité est au point de flétrissement, et un, lorsque le stock d'eau est supérieur ou égal à 25% de la réserve utile de l'horizon.

La distribution de $drac$ en fonction de la profondeur est décrite par une courbe paramétrable qui prévoit qu'un déficit hydrique dans une couche donnée du sol puisse être compensé par des couches sous-jacentes plus humides. Le taux de compensation entre couche est contrôlé par un coefficient, lui-même réduit en cas de contrainte aluminique: le déficit hydrique d'une couche où la contrainte aluminique s'exerce sera moins compensable par les couches inférieures qu'en absence de contrainte. De cette manière, la contrainte aluminique limite directement l'extraction de l'eau dans les horizons où elle s'exerce. Deux conséquences particulières de ce mode de calcul méritent d'être signalées, car à la fois non évidentes et non confirmées par une littérature par ailleurs très pauvre en études au champ:

- la transpiration est réduite par la contrainte aluminique même lorsque le sol est à la capacité au champ,

- dans un horizon sans contrainte aluminique, le modèle considère un développement racinaire indépendant des contraintes aluminiques éventuellement présentes dans les horizons supérieurs, et l'extraction d'eau n'est affectée par les contraintes des horizons supérieurs qu'à travers le coefficient de compensation.

Dans STICS, la logique de calcul est inverse: la transpiration est d'abord évaluée en fonction de l'humidité moyenne du sol dans l'ensemble de la zone racinaire, puis elle est répartie dans le sol en fonction de la distribution des racines. Comme dans EPIC, un mécanisme est en outre prévu pour le cas où une couche ne contient pas suffisamment d'eau pour fournir la quantité calculée, mais ce mécanisme ne peut commodément être rendu dépendant de la densité racinaire: le déficit est réparti uniformément sur les cinq couches sous-jacentes. Le seuil d'humidité moyenne, testomate, à partir duquel la transpiration est limitée, dépend du cumul de longueur racinaire sur l'ensemble du profil, mais la sensibilité de la transpiration au seuil testomate est beaucoup plus faible que la sensibilité de la transpiration à la teneur en eau moyenne dans la zone racinaire. Il en résulte que, dans le cas où la partie supérieure du sol, caractérisée par de fortes densités racinaire, est au point de flétrissement, la transpiration peut rester relativement élevée si les horizons inférieurs sont à la capacité au champ, et cela même si la densité de racines est très faible dans ces horizons, dès lors que des racines y sont présentes.

Du fait de ces différences fondamentales, et qu'on ne pouvait donc envisager de réduire,

entre les compartiments de bilan hydrique des deux modèles, l'introduction dans STICS d'une prise en compte de la toxicité aluminique à travers une limitation de la densité racinaire, de façon similaire à celle proposée par EPIC, produit des résultats très différents de ceux d'EPIC (Fig.4.1). En particulier, STICS modifié de cette manière simule une influence très faible de la toxicité aluminique sur la transpiration: pour un profil de sol dont le taux de remplissage de la réserve hydrique utile serait de 15% en moyenne sur le premier mètre et de 100% au delà, et pour une transpiration potentielle du jour égale à 5 mm, les transpirations réelles simulées avec et sans contrainte aluminique entre 80 et 110 cm seraient respectivement de 2 et 5 mm avec EPIC et de 3.9 et 4.1 mm avec la fonction d'EPIC introduite dans STICS. Un effet aussi faible de la contrainte aluminique serait en contradiction avec des travaux menés dans les Cerrados et montrant une nette aggravation des contraintes hydriques par cette contrainte (Gomes de Souza *et al.*, 1985; Luchiari *et al.*, 1985). Ce dernier auteur a obtenu en particulier dans un essai de saison sèche une augmentation de 30% du rendement du maïs dans des parcelles où les irrigations avaient été interrompues pendant 33 jours, par réduction de la contrainte aluminique entre 45cm et 110cm de profondeur grâce à un amendement gypsiq, tandis que les traitements correspondants dans un témoin sans arrêt des irrigations ne manifestaient pas de différences significatives de productivité.

Tenant compte du fait que la teneur en Al échangeable a systématiquement tendance à augmenter vers la profondeur dans les sols de notre échantillon, la solution retenue a été d'assimiler la contrainte aluminique à un obstacle physique à la croissance en profondeur des racines, cas pour lequel STICS prévoit une simulation de la distribution des racines selon les principes suivants:

- une évolution virtuelle de la distribution de la densité de racines est simulée en faisant abstraction de l'obstacle,
- les racines ne sont pas affectées dans les horizons supérieurs à l'obstacle.
- la profondeur maximale atteinte par les racines est limitée à la cote de l'obstacle.

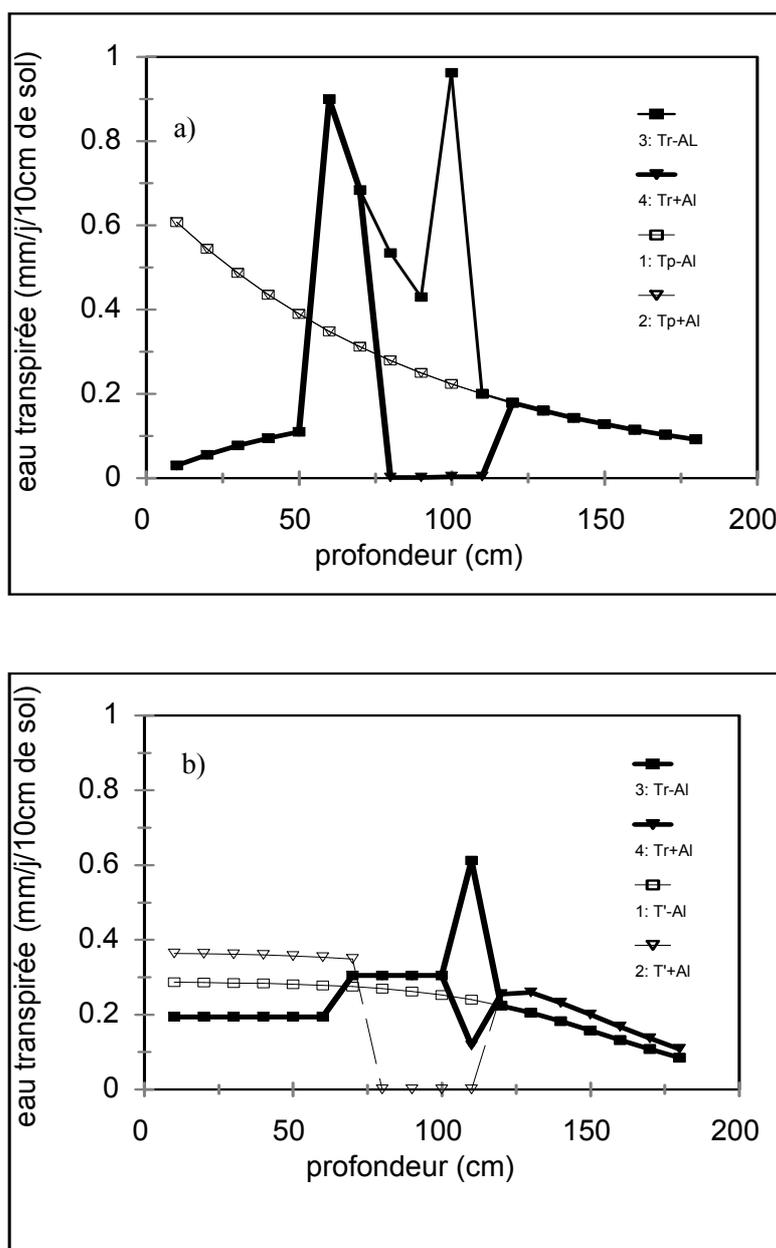


Figure 4.1.- Répartition dans le sol de l'eau transpirée, selon le modèle EPIC (a) et selon STICS modifié pour intégrer de manière similaire à EPIC la prise en compte de la toxicité aluminique (b). Cas d'un sol dont le taux de remplissage de la réserve hydrique est de 10% pour la couche 0-50cm, de 20% de 60 à 90cm et de 100% de 100 à 180cm. La transpiration potentielle du jour est de 5mm, les transpirations réelles simulées (cumuls des transpirations de chaque couche) sont 5mm et 2.9 mm respectivement sans et avec contrainte aluminique pour EPIC, et 4.1 et 3.9 respectivement sans et avec contrainte aluminique pour STICS modifié. Tp= transpiration potentielle (cas d'EPIC), T'=transpiration intermédiaire, calculée avant prise en compte de la distribution de l'eau dans le profil (cas de STICS). Tr= transpiration finale calculée. -Al: profil sans contrainte aluminique, +Al: profil avec contrainte aluminique (Saturation en Aluminium=45% sur l'horizon 80-110).

Les sols des cerrados brésiliens présentent en outre parfois des teneurs en calcium très faibles sans que la teneur en Al échangeable soit pour autant élevée, menant à une restriction de la croissance racinaire similaire à celle produite par la toxicité aluminique (Dias *et al.*, 1985; Ritchey *et al.*, 1982; Ritchey *et al.*, 1984; Silva et Ritchey, 1982). Ces travaux ont montré que les longueurs racinaires décroissent de façon exponentielle lorsque la teneur en Ca est inférieure à 10ppm, soit 0.05 meq/100g. Afin de pouvoir restituer le comportement de quelques cas particuliers observés dans le dispositif de Silvânia, où les très faibles teneurs en Ca observées semblaient être la cause d'enracinements limités, la contrainte de carence en Ca a été assimilée à un obstacle à la croissance racinaire, de la même manière que pour l'aluminium.

Pour le calage des seuils de taux de saturation en aluminium et de teneur en Ca, on s'est borné à retenir les valeurs fournies par la littérature citée plus haut, et ainsi la profondeur de l'obstacle auquel ces contraintes chimiques sont assimilées a été attribuée à celle de la première couche de sol où l'une au moins des deux conditions suivantes est satisfaite:

- la saturation par l'aluminium atteint ou dépasse 45%.
- la teneur en calcium est inférieure ou égale à 0.05meq/100g.

2.3.- Introduction de l'effet de l'anoxie du sol sur la croissance racinaire

Le modèle EPIC propose une prise en compte de l'excès d'eau du sol dans laquelle la croissance aérienne est affectée mais pas la distribution de l'extraction racinaire. Le facteur de stress est calculé en fonction du taux moyen de remplissage de la porosité sur le premier mètre de sol. (fig. 4.2). Lizaso et al.(1997) ont proposé une modification du modèle CERES permettant de tenir compte de l'anoxie du sol. Leur approche repose également sur l'évaluation du taux de remplissage de la porosité du sol par l'eau, mais deux facteurs de stress sont générés, agissant l'un sur la croissance racinaire et le développement de la plante, et l'autre sur la profondeur racinaire, la production de biomasse et sa répartition. Ces facteurs intègrent les conditions d'aération de l'ensemble de la rhizosphère. En outre, si le sol est saturé dans la couche où se trouve le front de croissance racinaire, celui-ci est stoppé, et si ces conditions se maintiennent plus de 5 jours le modèle considère que les racines meurent et un nouveau front est placé au centre du premier horizon supérieur non saturé. Le modèle obtenu semble restituer correctement la croissance aérienne et racinaire ainsi que le rendement de cultures de maïs sur sol temporairement inondé, mais conduit à sous-estimer ces variables dans le cas d'un sol correctement aéré. Les auteurs n'indiquent pas les causes de ce défaut.

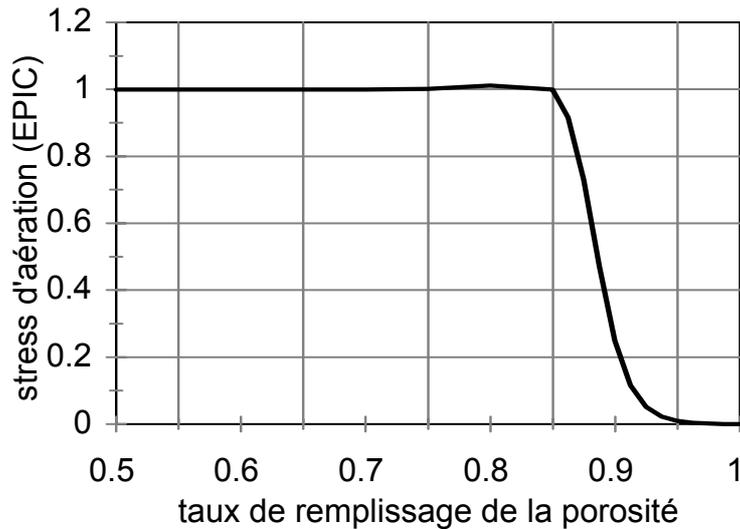


Figure 4.2. Fonction de stress d'anoxie dans la zone racinaire utilisée par le modèle EPIC

La simplification faite par STICS du réservoir-sol ne permet pas de simuler explicitement la saturation, puisque l'humidité maximum admise dans les couches élémentaires est la capacité au champ. Lorsqu'une couche est à cette teneur en eau, tout apport d'eau par drainage depuis les couches supérieures sera drainé vers les couches inférieures. La modification que nous avons introduite dans STICS porte exclusivement sur un ralentissement de la descente en profondeur des racines lorsque le front racinaire est placé dans un horizon dont la teneur en eau est maximale, recevant une quantité d'eau drainée depuis une couche supérieure, la couche immédiatement inférieure étant elle-même en drainage. De cette manière, la prise en compte de sols inondés ou avec une nappe à faible profondeur n'est pas possible. De tels cas existent effectivement à Silvânia (un cas dans l'enquête agronomique, dont le profil cultural est décrit en annexe 1 : profil 12), mais ils représentent des cas particuliers relativement rares de culture sur gleysols dont l'extension en surface est limitée au voisinage immédiat des cours d'eau. Les situations d'excès d'eau repérées au cours du diagnostic correspondent essentiellement à des séquences de pluies quotidiennes et relativement élevées pendant plusieurs jours consécutifs, situations que la condition proposée plus haut permet de décrire en faisant l'économie de l'ajout dans le modèle d'un compartiment supplémentaire du réservoir-sol. Lorsque cette condition supposée rendre compte de la saturation du sol est satisfaite à la cote du front racinaire, la croissance des racines en profondeur pour le jour considéré est multipliée par 0.7, coefficient obtenu par calage sur les deux profils culturaux où

l'excès d'eau était à l'origine d'une limitation de la profondeur racinaire (profils 3 et 4, annexe 1).

2.4.- Simulation d'une population d'adventices et des ses effets sur la culture

2.4.1. Choix d'une approche pour la modélisation

Le diagnostic réalisé montrait que la pression d'adventices était le résultat d'interactions complexes impliquant l'intervalle de temps entre la levée du maïs et la dernière opération de contrôle avant semis, des conditions hydriques pendant cet intervalle, de la densité de semis du maïs, de l'efficacité des contrôles, cette dernière étant sous la dépendance à la fois de facteurs techniques et de facteurs climatiques. Il apparaissait donc qu'on ne pouvait:

- ni se contenter d'assimiler les adventices à un aléa indépendant de l'itinéraire technique appliqué et des conditions du milieu,

- ni se référer aux travaux employant une modélisation simplifiée, du type régression, réduisant le rendement du maïs en fonction d'un nombre limité de variables caractéristiques de la population d'adventices, telles que la densité d'adventices à certaines dates (Cousens, 1985; Wilkerson *et al.*, 1987) ou le stock de semences de mauvaises herbes dans le sol (Buhler *et al.*, 1996).

Il était donc nécessaire de modéliser les interactions entre l'environnement, les techniques appliquées, la population d'adventices, et la culture, ces dernières jouant manifestement un rôle essentiel dans l'influence des itinéraires techniques sur le risque climatique. La simulation des adventices devait en particulier être effectuée au même pas de temps que celui employé pour le maïs.

Les modèles EPIC et CERES ne proposent pas de simulation des adventices au pas de temps journalier, mais on rencontre dans la littérature de nombreux travaux proposant des modélisations plus ou moins sophistiquées des interactions entre une culture et une ou plus rarement plusieurs espèces de mauvaises herbes. La modélisation de la compétition pour la lumière entre les espèces présentes est dans ces travaux basée sur une représentation plus ou moins schématique de la distribution relative des feuillages dans le plan vertical (Kiniry *et al.*, 1992; Kropff et Spitters, 1992; Wiles et Wilkerson, 1991). De même, les modèles qui traitent de la compétition pour l'eau et les éléments minéraux décrivent la distribution relative des racines au moins dans le plan vertical (Graf *et al.*, 1990; Kiniry *et al.*, 1992; Wilkerson *et al.*, 1990). L'intégration directe de ces travaux dans STICS, comme d'ailleurs dans EPIC ou CERES,

nécessiterait une modification profonde du modèle, le feuillage y étant assimilé à une feuille unique dont la position verticale est indifférente. En outre, ces approches supposent l'acquisition de nombreux paramètres caractéristiques de chaque espèce présente dans la population d'adventices, qui aurait nécessité un alourdissement considérable du dispositif expérimental. Nous avons donc cherché à introduire une modélisation qui soit un compromis entre la prise en compte des principales interactions culture-adventices détectées dans nos diagnostic, et un niveau de simplification compatible avec STICS et avec les informations recueillies sur le terrain.

2.4.2 Modifications résultant de l'introduction de nouvelles fonctions

Un nouveau module a été ajouté au modèle, pour simuler la levée, la croissance d'une population d'adventices ainsi que l'effet sur cette dernière des opérations culturales de lutte contre les adventices réalisées par le producteur.

2.4.2.1.- Levée des adventices

Le modèle fait l'hypothèse d'une levée initiale en trois jours des adventices après le dernier nettoyage mécanique ou après la première pluie si il n'y a pas de travail du sol. A la date de ces événements, première pluie ou dernier travail du sol, on considère que le sol est vierge de toute population d'adventices. La durée de levée est retardée, comme pour le maïs dans la version originale de STICS, chaque fois que le sol est à une teneur en eau inférieure au point de flétrissement permanent pour les trois couches voisines de celle où se trouvent les semences, en proportion du nombre de couches satisfaisant à cette condition; le retard est d'un jour lorsque les trois couches sont au point de flétrissement. Pour les adventices ces couches sont celles situées entre 2 et 4 cm sous la surface.

2.4.2.2.- Croissance aérienne des adventices

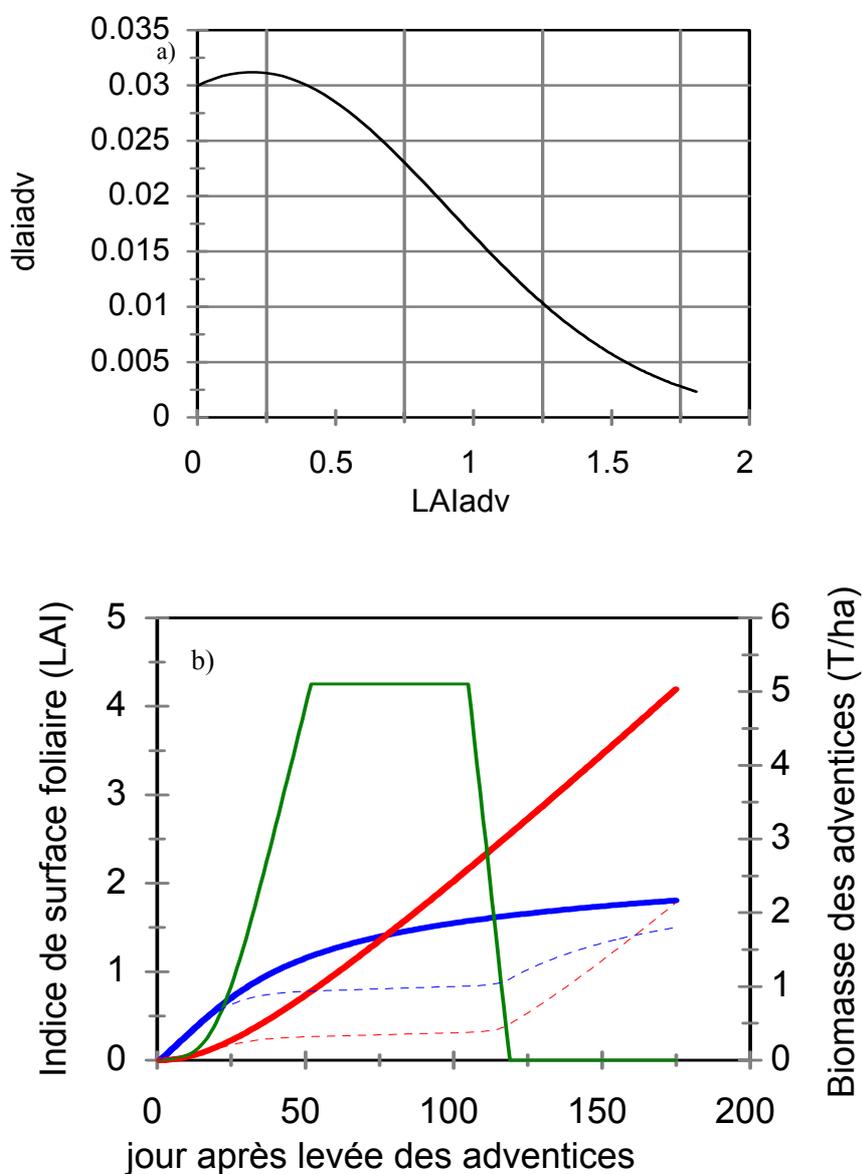
La croissance des adventices en indice de surface foliaire (L_{iadv}) et biomasse (M_{sadv}) est calculée par les équations suivantes pour un jour j :

$$L_{iadv}(j) = L_{iadv}(j-1) + dl_{iadv}(j) * I_{cont}$$

$$M_{sadv}(j) = M_{sadv}(j-1) + dmsadv * (1 - \exp(-0.7 * L_{iadv}(j))) * I_{cont},$$

où $dmsadv$, croît journalier potentiel de biomasse des adventices, est considéré comme constant sur l'ensemble de la simulation, $dl_{iadv}(j)$, le croît journalier potentiel de l'indice de surface

foliaire des adventices évolue en fonction du LAI atteint par les adventices le jour précédent (fig. 4.3a) de manière à produire une évolution asymptotique de LAI_{adv} en fonction du temps (fig.4.3b), et I_{cont} est l'indice de contrainte limitant la croissance des adventices. Le terme $(1-\exp(-$



$0.7 \cdot LAI_{adv}(j))$ exprime la dépendance du croît de biomasse à l'interception du rayonnement par le feuillage des adventices (fig. 4.3b), en considérant un coefficient d'interception du rayonnement par les adventices égal à 0.7.

Figure 4.3. Fonctions de simulation de la croissance des adventices. a) Croit journalier de l'indice de surface foliaire et b) croissance en fonction du temps du LAI (laiadv, courbes en bleu) et de la biomasse (msadv, courbes en rouge) des adventices, sans (courbes pleines) et avec (courbes en pointillé) réduction du rayonnement par un maïs dont l'indice de surface foliaire serait décrit par la courbe verte (LAI du maïs calculé sans tenir compte de la compétition exercée par les mauvaises herbes, et en considérant une levée le même jour que pour les adventices).

Icont intègre l'effet de l'interception par le maïs d'une partie du rayonnement disponible ainsi que les stress hydriques et azotés:

$$I_{cont} = \exp(-0.7 * LAI) * \text{Min}(Sw_{fac}, Inn_{adv}),$$

où LAI est l'indice de surface foliaire du maïs, Sw_{fac} le stress hydrique subi par l'association maïs-adventices et Inn_{adv} le stress azoté appliqué aux adventices.

2.4.2.3.- Effet de la lutte contre les adventices par le producteur.

Les sarclages mécaniques et les herbicides de contact sont supposés avoir des effets identiques sur la population d'adventices. Ils réduisent Laiadv et Msadv, avec un coefficient d'efficacité. Les herbicides préémergents sont supposés maintenir à zéro Laiadv et Msadv pendant la durée de rémanence de l'herbicide, éventuellement réduite par le coefficient d'efficacité, à condition que le jour du traitement, Laiadv soit inférieur à un seuil fixé à 0.85. Au-delà de ce seuil, l'herbicide pré-émergent est sans effet. Quel que soit le type de lutte contre les adventices, le coefficient d'efficacité est une variable d'entrée du modèle, qui représente la maîtrise technique de l'opération culturale par l'exploitant et varie entre 0 (pas d'effet de l'opération sur la croissance des adventices) et 1 (efficacité totale de l'opération). La valeur du coefficient est en outre modulée par les conditions climatiques des deux journées suivant immédiatement l'opération de lutte: le coefficient est réduit si une pluie survient respectivement le jour de l'opération ou le jour suivant.

2.4.3.- Modification introduites sur des modules pré-existants de STICS.

La modélisation de l'influence des adventices sur la croissance du maïs, à travers la compétition pour la lumière, l'eau et l'azote, a été réalisée à travers des modifications limitées de modules existants. Les modules concernés sont ceux impliqués dans le calcul de l'indice foliaire et des contraintes hydriques et azotées.

2.4.3.1.- Réduction du rayonnement par les adventices

Selon une approche empruntée à (Wiles et Wilkerson, 1991) de manière à tenir compte du fait que le feuillage du maïs couvre peu les inter-rangs en début de cycle, l'effet de la réduction par les adventices du rayonnement disponible pour le maïs n'est simulé que lorsque la somme des indices foliaires des membres de l'association excède 1. Au delà de ce seuil, la croissance foliaire du maïs est réduite par le facteur multiplicatif suivant:

$$\exp(-0.7 \cdot \text{laiadv})$$

2.4.3.2.- Modification du bilan hydrique

L'adaptation du module de bilan hydrique a consisté à substituer le maïs par une association adventices - maïs dont l'indice de surface foliaire est égal à la somme des indices foliaires des deux composantes. La transpiration et l'évaporation potentielles, dépendantes du LAI, sont ainsi celles de l'association et non plus celles d'un maïs pur. Le système racinaire est commun et obéit au même paramétrage que celui qui était considéré pour un maïs pur, mais sa croissance commence dès que la levée de l'une des composantes de l'association est réalisée. Le calcul du stress hydrique n'est pas modifié directement, mais uniquement à travers l'altération de la dynamique du stock hydrique du sol qui résulte de la modification de la transpiration potentielle. L'effet du stress hydrique sur les adventices est simulé de la même manière que pour le maïs, à la simplification près qu'un seul facteur de stress est considéré pour ralentir la croissance de laiadv comme de msadv, le facteur SWFAC. Ce facteur est le même que celui qui s'applique au LAI du maïs, un autre facteur, TURFAC, s'appliquant à la biomasse du maïs. SWFAC et TURFAC sont tous deux déduits de la teneur en eau moyenne du sol, mais différent par le seuil de teneur en eau à partir duquel une contrainte apparaît.

2.4.3.3.- Modification du bilan d'azote.

De la même manière, une demande totale en azote est calculée pour le peuplement, en remplaçant dans les équations originales concernées, la biomasse du maïs par la somme des biomasses des deux composantes. L'absorption d'azote, dont la cinétique reste simulée en

conservant les constantes propres au maïs, est répartie entre ce dernier et les adventices au prorata des biomasses. Un stress azoté appliqué aux adventices, $Innadv$, est calculé, de manière similaire à celui du maïs, en considérant une concentration critique d'azote en dessous de laquelle une contrainte s'exerce, proportionnelle au rapport entre concentration atteinte et concentration optimale. La concentration critique des adventices a été arbitrairement choisie égale à celle du maïs, le calage de l'effet des adventices sur le bilan azoté étant réalisé à travers le calage de la fonction de croissance de la biomasse d'adventices, biomasse qui n'intervient dans notre modèle que pour le calcul de la demande en azote de telle sorte qu'un calage sur la concentration critique ou sur le croit de biomasse journalier sont équivalents tant que l'on ne cherche pas à comparer à des observations les valeurs simulées de biomasses d'adventices simulées.

2.4.4.-Calage sur des situations contrastées

Le calage a porté sur les paramètres $dlaiadv$, $dmsadv$ ainsi que sur l'amplitude de réduction de l'efficacité des contrôles par d'éventuelles pluies. Le calage a été réalisé par essais/erreurs pour quatre situations contrastées du dispositif de diagnostic agronomique (tableau 4.1).

Le contraste entre situations portait:

- directement sur la dynamique observée de l'enherbement,
- sur le type de sol, correspondant à des fertilités chimiques et physiques différentes,
- sur la composition observée de la flore adventice.

En ce qui concerne ce dernier critère, toutefois, notons que pour ces quatre situations comme pour la grande majorité des situations du dispositif de diagnostic agronomique, l'espèce *Pennisetum setosum* était fortement présente, même s'il ne s'agissait pas toujours de l'espèce dominante. Elle le devenait en général à la fin du cycle.

Faute d'observations directe de $laiadv$ et de $msadv$, une première étape a consisté à relier les observations qualitatives de l'enherbement, réalisées sur le dispositif de diagnostic agronomique, à une grandeur comparable aux grandeurs simulées par le modèle. Rappelons que ces observations consistaient à attribuer à la placette, par observation visuelle, une note entre un et cinq, croissant avec la pression d'adventices. De un à quatre, la note était attribuée à partir d'une évaluation du taux de couverture du sol par les adventices, la note 4 correspondant à une couverture totale du sol. La note 5 était donnée à des placettes dans lesquelles non seulement le sol était totalement couvert, mais où la progression sur la placette était en outre rendue difficile

par les adventices présentes. Ceci nous a conduit à considérer qu'entre un et quatre, la note attribuée était assimilable à un indice de surface foliaire avec un coefficient de proportionnalité, et que ce dernier pouvait être déduit de la correspondance approximative de la note 4 avec un LAI égal à 1.

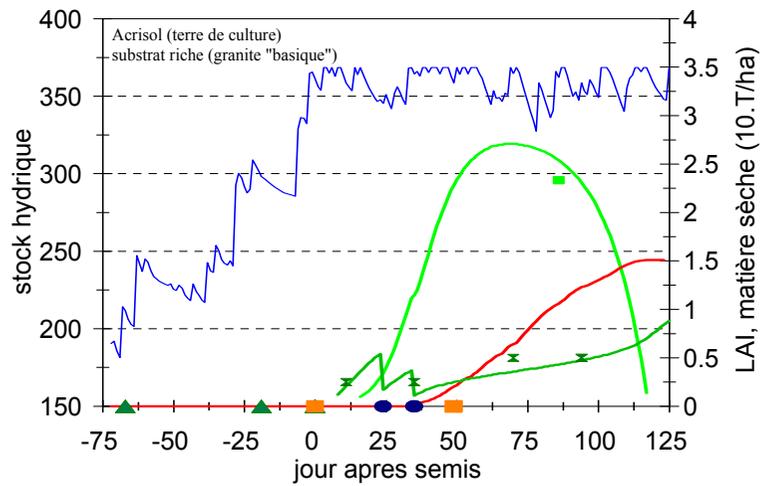
code placette	Evaldo1196	Adair1196	JLucio1196	JRibeiro2196
RU (mm/m)	122	146	115	94
limite physique du sol (cm)	> 180	> 180	160	> 180
limite chimique du sol ([AI]/CEC >0.45)	non	non	non	60
N total 0-20cm (%)	0.16	0.15	0.17	0.12
pH (H2O) 0-20cm	6.2	5.2	5.4	5.0
PH (H2O) 80-100cm	5.2	5.7	5.9	4.7
Ca+Mg 0-20cm (meq/100g)	6.83	3.64	11.91	2.96
[S]/CEC	-	0.41	0.62	0.47
Notes enherbement à 10-30-60 et 90 jours après levée (1=enherbement mini, 5= maxi)	2-2-4-4	1-1-2-2	2-2-2-2	2-3-2-3
nombre de sarclages	1	2	1	2
Espèce adventice dominante lors des trois premières observations	<i>Digitaria horizontalis</i>	<i>Ageratum conyzoides</i>	<i>Sida rhombifolia</i>	<i>Ipomoea acuminata</i> (sur le rang)/ <i>Pennisetum setosum</i> (inter-rang)

Tableau 4.1. Caractéristiques des placettes choisies pour la calage du module de simulation des adventices.

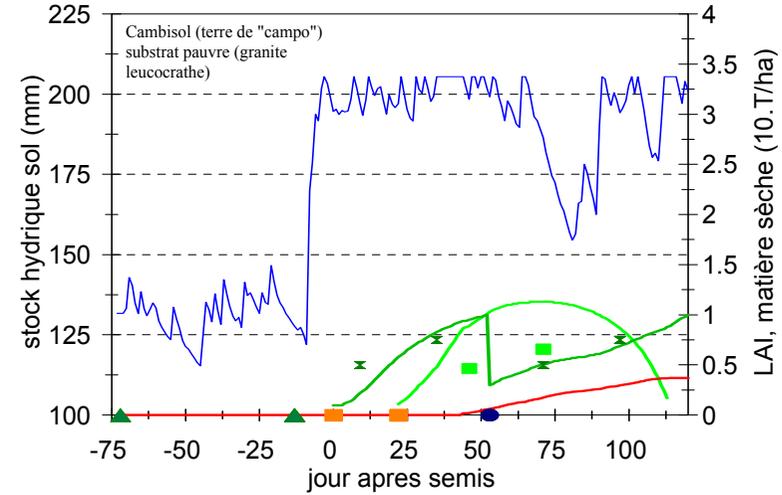
Le calage a donc été réalisé en comparant la variable simulée $laiadv$ à $note/4$. Compte tenu du caractère grossier du lien ainsi obtenu entre les observations et une variable du modèle, $laiadv$, le calage du modèle sur ces observations limite la portée des simulations des adventices à des valeurs relatives: le modèle peut être considéré comme simulant en réalité des notes d'enherbement, avec l'hypothèse, raisonnable pour les notes entre 1 et 4, que ces dernières sont caractéristiques de la compétition exercée par les adventices sur le maïs pour le rayonnement. Comme signalé plus haut, la variable $msadv$ n'a pas de signification physique dans notre étude, compte tenu du fait qu'elle n'a pas été calée sur des mesures de biomasse, mais doit être vue comme un simple coefficient de calage de la fonction du modèle calculant la compétition entre le maïs et les adventices pour l'azote. Ces limites du modèle ne proviennent pas de la construction de ce dernier mais bien des données disponibles pour le calage. La nomenclature utilisée pour les variables utilisées dans la simulation des adventices reste justifiée par la possibilité de caler le modèle sur des mesures d'indice de surface foliaire et de biomasse des adventices, dans une éventuelle utilisation ultérieure du modèle.

Les simulations après calage, pour les quatre situations sélectionnées, sont données à la figure 4.4, qui illustre la diversité des situations que la modélisation des adventices introduite dans STICS permet de simuler. L'interprétation de ces situations, en faisant appel non seulement aux données présentées sur les graphiques mais aussi à d'autres informations, simulées ou acquises lors de l'enquête agronomique, est fournie ci-après. Afin de faciliter la compréhension par le lecteur de cette interprétation, les informations qui ne sont pas directement déduites des graphiques ont été signalées entre parenthèses dans le texte.

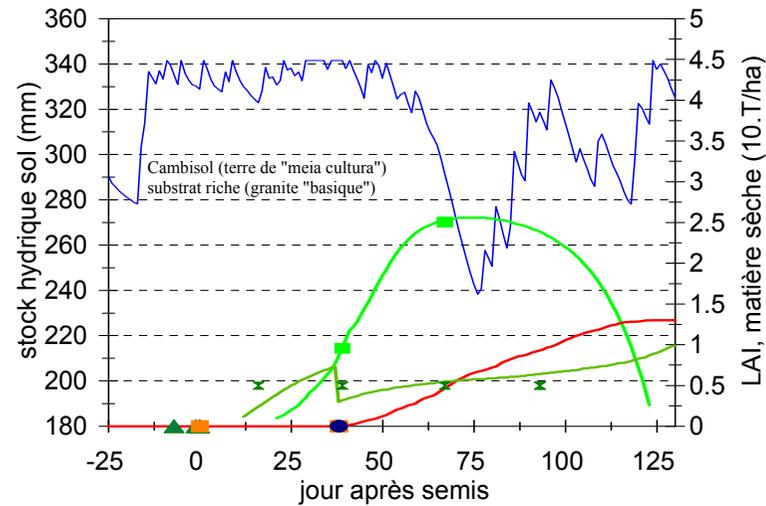
a) Adair1196



b) Evaldo1191



c) JLucio1196



d) JRibeiro2196

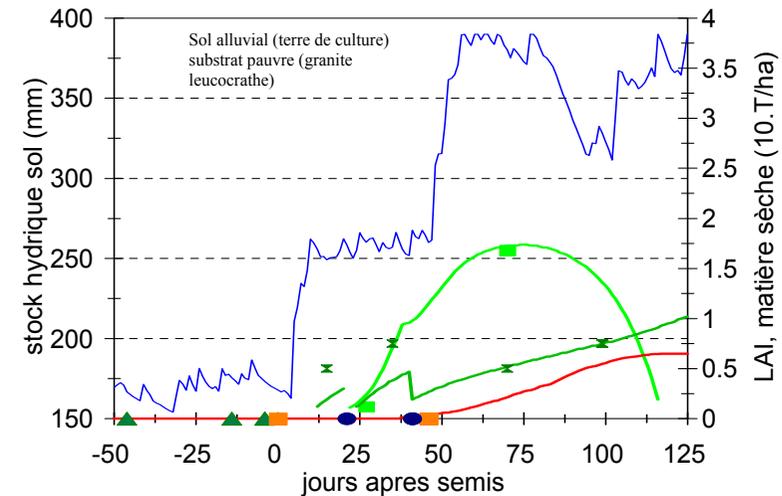


Figure 4.4.- Données journalières simulées et observées pour quatre situations agricoles contrastées du dispositif brésilien. Courbes en bleu: stock hydrique sous culture. En vert foncé: LAI du maïs simulé (courbe) et mesuré (carrés); courbes en vert clair: LAI des adventices simulé; A notes d'enherbement/4; courbe en rouge: biomasse aérienne simulée du maïs. Calendrier cultural sur l'axe des abscisses: • : travail du sol; □ : apports d'engrais; ○ : sarclages.

Dans la situation a), le semis est effectué immédiatement après le dernier travail du sol (pulvérisateur à disques). La levée du maïs et des adventices a lieu rapidement, les conditions hydriques étant favorables. Deux sarclages réalisés dès le début de la phase de croissance rapide du maïs permettent de réduire le LAI des adventices à des valeurs très faibles, les conditions hydriques restant favorables, et malgré un léger ralentissement de la croissance du maïs (imputable à des contraintes azotées qui auraient vraisemblablement pu être évitées si l'apport d'entretien avait été plus précoce), la croissance ultérieure des adventices est fortement limitée par le rayonnement disponible sous le couvert de maïs.

Dans la situation b), le dernier nettoyage du sol est antérieur d'une dizaine de jours au semis du maïs. Les conditions hydriques les jours suivant ce nettoyage sont favorables à une levée rapide des adventices, tandis qu'elles sont au contraire défavorables après le semis du maïs, dont la levée est ainsi très tardive par rapport à celle des adventices. Dans cette situation les adventices réduisent significativement le rayonnement disponible pour le maïs. Ceci est aggravé par un LAI faible du maïs dès le départ, (lié à une densité de semis faible résultant d'un chantier de mise en culture mal maîtrisé sur sol pentu et pierreux avec du matériel en mauvais état et mal réglé). Une tentative tardive de contrôle des adventices échoue à cause de pluies suivant le sarclage. Une contrainte hydrique en phase de remplissage des grains du maïs achève de réduire la croissance (et le rendement) de la culture.

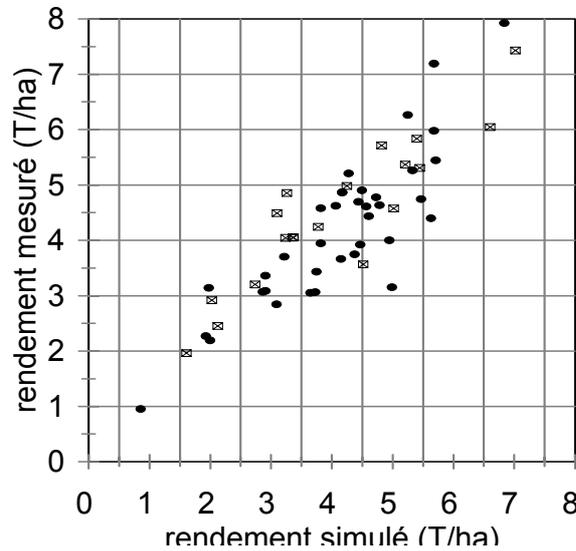
Dans la situation c) le semis est réalisé immédiatement après le dernier travail du sol (pulvérisateur à disques), les conditions hydriques permettent une levée rapide du maïs et des adventices. L'efficacité du seul sarclage effectué est faible, en raison des conditions climatiques, et le LAI des adventices atteint par la suite de ce fait une valeur sensiblement plus élevée que dans le cas a). La croissance du maïs est d'abord limitée par ces adventices mais la contrainte reste faible car le LAI du maïs a déjà atteint une valeur supérieure à un lors du sarclage. Ensuite, une contrainte hydrique relativement forte intervient, vers 70 jours après semis. La prise en compte de l'effet de cette contrainte hydrique sur la croissance des adventices permet de restituer le ralentissement observé de l'évolution du LAI de ces dernières.

Dans le cas d), le semis du maïs intervient deux jours après le dernier travail du sol, mais les adventices ne bénéficient pas de ce décalage, leur levée étant retardée par des conditions hydriques défavorables. Par contre la croissance des mauvaises herbes après le dernier sarclage est relativement rapide, du fait d'un faible développement aérien du maïs (le détail de la simulation montre par ailleurs que ce faible développement aérien du maïs est causé par un taux élevé d'aluminium échangeable à partir de 60 cm).

3.- Diagnostic et validation empirique du modèle

L'objectif était ici de s'assurer que le modèle construit fournissait une estimation satisfaisante des rendements pour la gamme de systèmes techniques et de milieux étudiés, en comparant les simulations à la réalité, et ainsi à vérifier l'hypothèse que les contraintes supplémentaires du modèle construit pouvaient bien être négligées. Dans le cas contraire, un nouveau cycle de modélisation et de diagnostic aurait été nécessaire. La méthode retenue est l'analyse graphique de la distribution, pour la gamme de variation des rendements réels, des écarts relatifs entre simulations et observations, préférable aux régressions et analyses des écarts quadratiques (Mitchell et Sheehy, 1997).

a)



b)

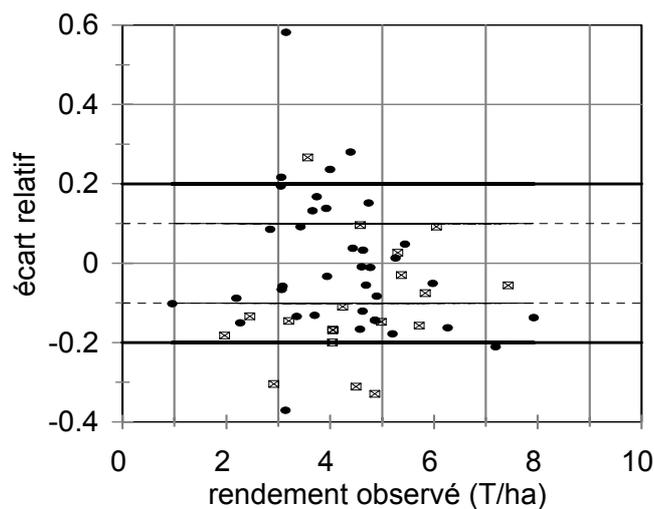


Figure 4.5.- Validation empirique de STICS modifié pour tenir compte des contraintes A, E et H, par a) comparaison directe entre rendements observés (Y_{obs}) et simulés ($Y_{DWN\text{AEH}}$), et b) par comparaison entre écarts relatifs ($(Y_{DWN\text{AEH}} - Y_{obs})/Y_{obs}$) et rendements observés. Placettes avec (⊠) et sans (●) occurrence d'au moins une des trois contraintes négligées par le modèle, I, P et K.

Les données utilisées pour cela sont celles de l'enquête agronomique de Silvânia. De ce fait, une partie des données de validation avaient déjà été impliquées dans les opération de calage. Il s'agit des données provenant:

- des quatre placettes utilisées pour le calage de la simulation des adventices, pour les variables-clé du modèle que sont le LAI et la biomasse du maïs et des adventices,
- de l'ensemble des placettes utilisées pour le calage des caractéristiques variétales.

Certains de ces paramètres variétaux déterminent la simulation du développement en fonction de la température. Ils n'ont qu'une influence très limitée dans les simulations du fait de la faible variabilité spatio-temporelle de la température, à l'intérieur des zones d'utilisation de chaque variété, pour les régions étudiées et pour la saison de culture. Les durées totales de cycle, pour une variété donnée, diffèrent au maximum de 7 jours dans l'échantillon. Les autres paramètres variétaux décrivent le potentiel productif des cultivars. Le fait qu'ils aient été calés sur le même jeu de données ne réduit donc pas la portée de la validation des nouvelles fonctions de stress introduites, pour les régions étudiées.

L'échantillon de placettes utilisé était celui de 54 placettes, pour lequel on disposait de mesures à la fois du rendement, de tous les paramètres d'entrée du nouveau modèle et des indicateurs de contraintes pour les six contraintes A, E, H, I, K et P.

La comparaison entre rendements simulés et observés de ces 54 placettes montre que le modèle simule sans biais notable (fig. 4.5). Pour 81% des placettes, l'écart relatif entre Y_{obs} et $Y_{DWN_{AEH}}$, rendement simulé avec le nouveau modèle, est inférieur ou égal à 20%. En revanche, pour 61% des placettes, cet écart relatif est supérieur à 10%. Les écarts relatifs les plus élevés sont associés aux rendements observés compris entre 3 et 5 T/ha, qui sont également les valeurs les plus fréquemment rencontrées. Le tableau 4.2 montre que tous les nouveaux modules introduits et leurs interactions sont mis à l'épreuve avec cet échantillon. Il indique également qu'il n'est pas possible de relier les écarts relatifs élevés aux occurrences de l'une des contraintes nouvellement introduites, ce qui témoignerait d'une prise en compte incorrecte de celle-ci. Ces écarts ne sont pas non plus associés à l'occurrence des contraintes encore négligées par le modèle que sont les contraintes I, P, et K (figure 4.5 et tableau 4.2), ce qui témoignerait d'un poids important de l'une au moins de ces contraintes dans la variabilité des rendements, comparativement à la variabilité déjà expliquée par le modèle. Ceci nous autorise à négliger, pour la suite de l'étude, les contrainte "Insectes et maladies", "phosphore" et "potassium", dont l'introduction dans le modèle n'améliorerait pas la précision de ce dernier.

Contraintes relevées						nombre de placettes telles que Δ^*			
A	E	H	I	K	P	# 0.2	>0.2	#0.1	>0.1
0	0	0	0	0	0	12	1	7	6
0	0	0	0	0	1	3	1	2	2
0	0	0	0	1	0	2	0	2	0
0	0	1	0	0	0	7	3	2	8
0	1	0	0	0	0	2	0	2	0
1	0	0	0	0	0	2	0	1	1
0	0	0	0	1	1	1	0	1	0
0	0	0	1	0	1	2	0	1	1
0	0	1	0	0	1	0	1	0	1
0	1	1	0	0	0	2	1	1	2
1	0	0	0	1	0	3	0	0	3
1	0	0	1	0	0	2	1	0	3
1	0	1	0	0	0	4	0	2	2
1	0	1	0	1	0	1	0	0	1
1	0	1	0	1	1	0	1	0	1
1	1	1	0	0	0	1	1	0	2
Totaux						44	10	21	33
						54		54	

Tableau 4.2.- Distribution des placettes dans les écarts relatifs entre rendements mesurés et simulés ($\Delta = (Y_{obs} - Y_{DWNAEH}) / Y_{obs}$) en fonction de la présence (1) ou de l'absence (0) des contraintes A, E, H, I, K et P dans les placettes. Lignes en gris foncé: effectif de placettes au moins égal à trois.

4.- Conclusion

La précision des simulations peut être jugée suffisante pour comparer les rendements de systèmes de culture contrastés pratiqués sur des milieux contrastés. Rappelons toutefois que les effets, sur les simulations, des erreurs de mesure des paramètres d'entrée du modèle seront étudiés plus loin (chapitre 6), et qu'un jugement plus complet sur la qualité du modèle construit pourra alors être formulé. Il nous est seulement possible, à la fin du présent chapitre, de donner une conclusion qualitative, affirmant que le modèle qui a été construit fournit une information plus riche et plus précise que les typologies d'itinéraires techniques et de milieux qui ont servi à structurer l'échantillon de placettes, et qui étaient une première représentation de la variabilité des situations culturelles de Silvânia.

Le modèle mis au point peut, compte tenu d'une validation satisfaisante, être considéré

comme capable de reproduire la variabilité du rendement à Silvânia, telle que résultant des contraintes les plus significatives à l'origine de cette variabilité. Ce modèle requiert en entrée les paramètres suivants:

- paramètres du climat: température, vent, humidité relative, rayonnement, pluviométrie,
- paramètres du sol: profil de teneurs en eau caractéristiques et de densité apparente, profondeur d'un éventuel horizon limitant physiquement ou chimiquement la descente des racines, texture de surface, stock en azote organique, état hydrique et azoté du profil au début de la simulation,

- paramètres liés aux choix techniques de l'exploitant: quantité de résidus de la culture précédente et leur rapport C/N, dates et profondeurs du travail du sol et du semis, densité de peuplement, dates et types des sarclages, cultivar choisi et ses constantes de développement, dates et doses des apports d'azote minéral.

Ces paramètres n'ont pas tous la même variabilité dans le contexte écologique et technique de Silvânia, et les rendements ne sont pas dépendants de la même manière de la variabilité de tous ces paramètres.

Qu'il s'agisse de formuler des recommandations, à l'échelle de la parcelle, pour réduire l'impact des contraintes sur les rendements, comme d'établir une typologie des systèmes de culture et des milieux du point de vue de la variabilité du rendement, telle que celle requise par l'analyse des choix techniques à l'échelle des exploitations, c'est cette sensibilité des rendements aux facteurs du milieu et aux actes techniques modifiant l'interaction plante - milieu qui doit maintenant être analysée.

Chapitre 5:
Facteurs édaphiques et techniques responsables des
principales contraintes

A l'issue du chapitre 3 nous disposons d'une liste des principales contraintes en cause dans la variabilité des rendements de Silvânia. Le chapitre 4, quant à lui, nous a fourni un modèle de simulation qui relie un certain nombre de paramètres, caractéristiques des situations culturales, à ces contraintes et au rendement qui résulte de leur action sur le rendement potentiel. Par exemple, nous savons ainsi que la contrainte azotée dépend du stock d'azote organique du sol et des résidus de culture, des doses d'azote minéral fournies, et de l'interaction du climat et des caractéristiques physiques et chimiques du sol avec les flux d'azote dans le sol et la plante. Nous savons que la contrainte aluminique dépend de la profondeur à laquelle le sol présente un horizon toxique, etc... Mais nous ne savons pas, parmi tous ces paramètres, quels sont ceux qui ont un poids prépondérant dans la variabilité des rendements de Silvânia, ceux par lesquels les milieux et les systèmes de culture se distinguent effectivement, ceux enfin sur lesquels il est possible d'agir pour réduire l'impact des contraintes.

Dans le présent chapitre, le modèle mis au point est utilisé pour réaliser un diagnostic plus précis des principaux facteurs responsables de la variabilité des rendements à Silvânia. Ce diagnostic permet en particulier d'établir une hiérarchie de ces facteurs, en considérant non plus seulement la fréquence avec laquelle ils limitent les rendements par rapport au potentiel, mais également leur impact sur la productivité. La méthodologie, dont les grandes lignes ont été exposées dans la première partie de la thèse, est d'abord précisée. L'analyse porte ensuite sur les trois campagnes agricoles étudiées, puis est extrapolée à une série de 20 années de données climatiques, représentative du climat local. Les influences relatives de la gestion technique de la culture et de la situation édaphique sur les pertes de productivité, avec leurs interactions, sont ensuite étudiées avec le double objectif de:

- déterminer les clés d'une typologie des situations culturales pour le critère de la variabilité inter-annuelle des rendements. C'est à partir de cette typologie que, par un travail interdisciplinaire qui sort du champ de la présente thèse, devra être réalisé le couplage entre le modèle économique de décision à l'échelle des exploitations et notre modèle biophysique à l'échelle des parcelles,

- fournir des recommandations pour une amélioration de la gestion de la culture en termes de productivité moyenne, de sa variabilité inter-annuelle et de leur évolution à long terme.

1.- Détails de la méthodologie.

Rappelons tout d'abord que le principe général de la méthode est de mener une analyse de sensibilité du modèle mis au point au chapitre précédent, afin de repérer progressivement les paramètres des situations culturelles ayant la plus forte influence sur les rendements. Comme nous le permet le chapitre précédent, on accepte ici l'hypothèse que le modèle construit rend fidèlement compte des effets sur le rendement du maïs des principales contraintes agissant à Silvânia. Ce modèle permet de simuler non seulement les situations culturelles observées, où les contraintes sont associées et peuvent avoir des impacts relatifs variables d'une situation à l'autre, mais aussi des situations culturelles fictives dans lesquelles certaines de ces contraintes agissent à leurs niveaux observés dans les situations réelles, tandis que d'autres contraintes sont fixées artificiellement, *via* le paramétrage du modèle, à des niveaux non limitants. Par exemple, il est possible de simuler des irrigations qui maintiendraient le sol proche de la capacité au champ, ou des apports d'engrais en excès par rapport aux besoins de la culture, tout en tenant compte de sa date de semis réelle et des caractéristiques observées du sol.

1.1.- Hiérarchie des contraintes

Le modèle est ainsi utilisé pour générer des "traitements virtuels" se substituant à des traitements expérimentaux qu'il serait extrêmement coûteux de mettre en place dans la réalité, compte tenu du nombre de facteurs à comparer. A travers le paramétrage du modèle, voire en activant ou désactivant, dans le programme informatique, le calcul de certaines fonctions de stress, il est possible de calculer, pour chaque situation culturelle réelle, les rendements théoriques:

- Y_0 , qui aurait été obtenu sur la placette en l'absence de toute contrainte, et qui est donc entièrement déterminé par le rayonnement et la température,

- Y_c obtenu si la contrainte C était seule susceptible de limiter la productivité, C étant une des contraintes principales identifiées à Silvânia.

- $Y_{c_1c_2}$ obtenu si les contraintes c_1 et c_2 étaient les seules susceptibles de limiter la productivité

- et par extension $Y_{c_1c_2\dots c_n}$ obtenu si les n contraintes c_1 à c_n , exclusivement, étaient responsables de limitations de la productivité (fig. 5.1).

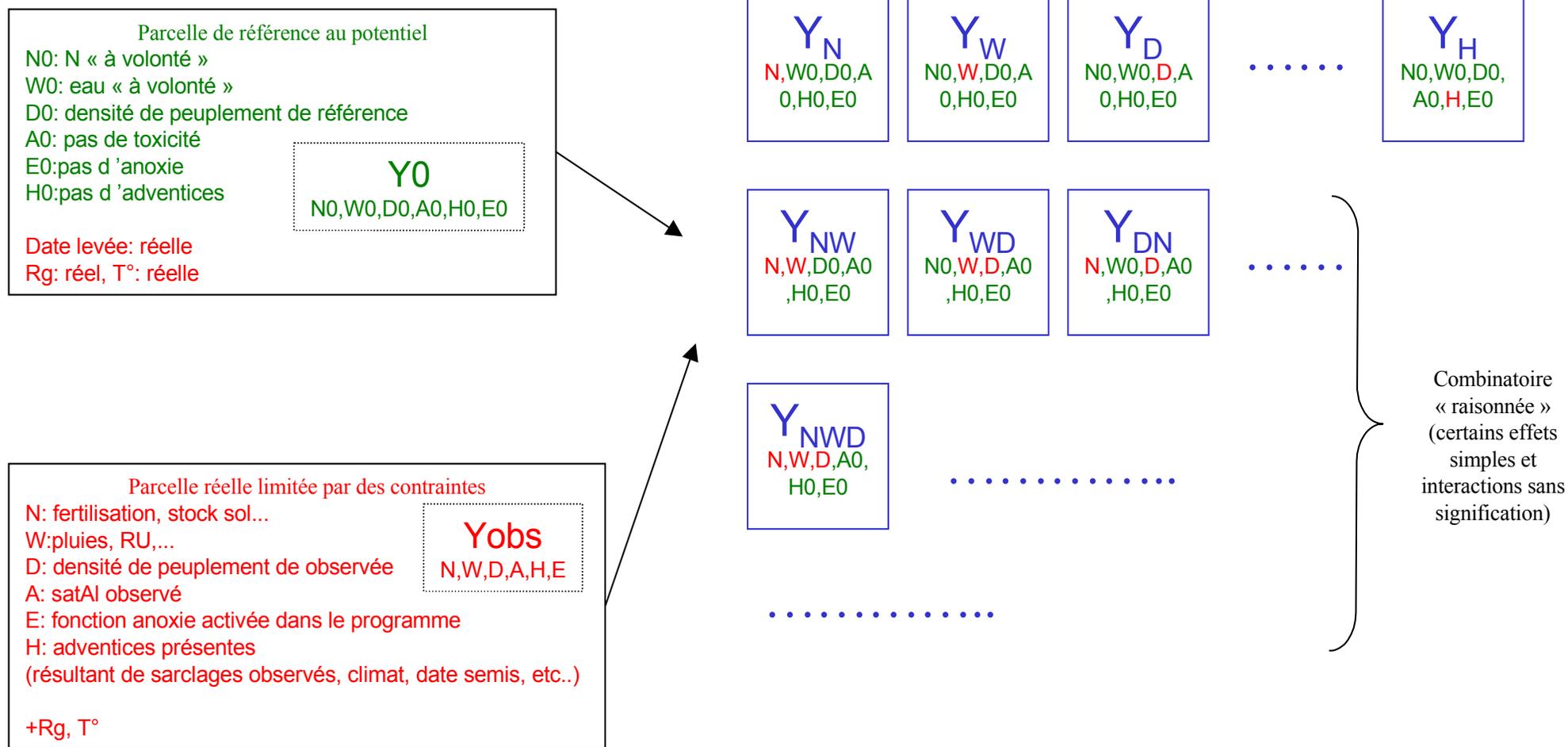


Figure 5.1.- Construction du jeu de simulations permettant d'isoler les effets simples et conjugués des contraintes affectant la productivité de la culture.

A l'aide de ces simulations, sont quantifiés:

- l'effet simple d'une contrainte c_1 : Y_{c1} comparé à Y_0
- ou d'un ensemble de contraintes ($Y_{c1...cn}$ comparé à Y_0),
- ainsi que les interactions entre deux contraintes c_1 et c_2 :

$$1 - Y_{c1c2}/Y_0 \text{ comparé à } (1 - Y_{c1}/Y_0) + (1 - Y_{c2}/Y_0)$$

- ou encore les interactions entre deux ensembles de contraintes $c_1...c_j$ et $c_k...c_n$:

$$(1 - Y_{c1...c_jc_k...c_n}/Y_0) \text{ comparé à } (1 - Y_{c1...c_j}/Y_0) + (1 - Y_{c_k...c_n}/Y_0).$$

1.2.- Hiérarchie des paramètres d'entrée du modèle

1.2.1.- Cas général

La même démarche est ensuite appliquée aux facteurs du milieu et du système de culture dont dépendent les contraintes ainsi repérées comme ayant un effet important sur les rendements. Par exemple, si la contrainte hydrique apparaît comme une contrainte importante, il faudra explorer les effets simples et conjugués de la pluviométrie, de la réserve utile et de l'infiltrabilité du sol, de la date de semis, etc... Des "traitements virtuels" peuvent là aussi être définis, permettant d'isoler le rôle d'une variable d'entrée dans la variabilité des rendements simulés. L'usage d'un modèle de culture permet donc de traiter ces causes "élémentaires" de variabilité des rendements de la même manière que les contraintes elles-mêmes.

1.2.2.- Cas des facteurs interagissant avec le climat

Dans cette démarche, certains facteurs climatiques jouent un rôle particulier à cause de leur très grande variabilité inter-annuelle et du grand nombre de facteurs avec lesquels ils sont susceptibles d'interagir. Pour un climat tropical continental sans grandes variations d'altitude comme celui de Silvânia, c'est essentiellement le cas du facteur pluviométrique. Le traiter de manière similaire aux autres facteurs amènerait à considérer un niveau "non limitant" à l'aide d'irrigations virtuelles en excès, comparé au niveau observé sur les placettes de l'enquête agronomique. On prendrait alors le risque d'établir une hiérarchie des facteurs limitants qui ne soit pas représentative de ce que rencontrent les producteurs le plus souvent, car il est probable que les années de l'enquête agronomique ne soient pas suffisamment représentatives du climat local.

Mais à l'inverse, prendre d'emblée des séries historiques de pluviométries pour représenter le niveau "réel", conduirait à un nombre trop élevé de simulations. L'alternative est d'utiliser un petit nombre d'années contrastées pour repérer les facteurs interagissant le plus nettement avec la pluviométrie, et d'étudier ensuite l'influence de séries historiques de précipitations en se limitant à ces facteurs. Si ces derniers sont nombreux, la combinatoire de situations culturelles fictives à confronter aux données pluviométriques peut être encore trop élevée pour les capacités de calcul disponibles, et il est alors nécessaire de procéder là encore progressivement, en considérant notamment, dans un premier temps, un nombre faible de niveaux pour les facteurs interagissant avec la pluie, puis en "zoomant" sur les régions à fort relief des courbes de réponse du rendement à ces facteurs, courbes dont on précise ainsi les contours.

En fait, ces courbes de réponse ne sont alors plus celles du rendement des situations culturelles à divers facteurs, mais celles de la *distribution du rendement* en fonction des conditions pluviométriques. La méthode retenue pour caractériser ces distributions est celle de l'analyse fréquentielle, méthode statistique simple de caractérisation de distributions de variables, qui consiste à repérer les événements rares, moyennement fréquents et fréquents ("valeur atteinte ou dépassée avec une fréquence x "). Par rapport à la caractérisation de la distribution par la moyenne et l'écart type, cette approche présente l'avantage de mieux décrire la forme de la distribution pour les valeurs extrêmes. Son emploi est classique pour l'analyse des risques en agriculture, car associé à l'idée que les agriculteurs sont davantage sensibles aux situations extrêmes, pouvant remettre définitivement en cause leur activité, qu'à la moyenne des situations (nombreux exemples dans Reyniers et Netoyo (1994), ainsi que dans Muchow et Bellamy (1991)). Par exemple, si une année sur deux la sécheresse est très contraignante pour la production et qu'une année sur deux les conditions sont au contraire très favorables, la moyenne des conditions peut paraître acceptable, alors qu'elle ne l'est en réalité qu'à condition de disposer de mécanismes financiers permettant de faire face à une séquence de plusieurs années défavorables, ce qui est rarement le cas en agriculture. Il est donc important de connaître avant tout le niveau de contrainte des situations les plus fréquentes, ce qui nous amènera à privilégier en particulier le rendement atteint ou dépassé huit années sur dix, Y_8 .

Ce que nous étudierons, ce sont donc les courbes de réponse de Y_8 aux principaux facteurs interagissant avec la pluviométrie. Ces courbes permettront non seulement de préciser la hiérarchie de ces facteurs, mais aussi de repérer les valeurs de ces facteurs pour lesquelles Y_8 est maximal.

Dans notre cas, les années de l'enquête agronomique étant relativement contrastées (figure 5.2), il était possible d'utiliser directement ces années pour circonscrire les facteurs à traiter avec la série historique. Dans le cas d'années suivies majoritairement plus sèches ou majoritairement plus pluvieuses que la normale, il aurait été judicieux de substituer une ou plusieurs des années

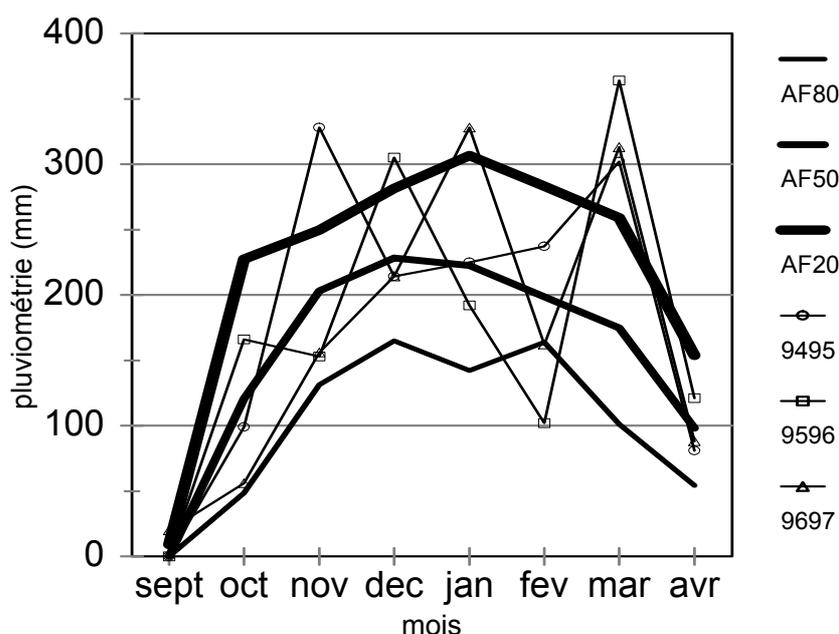


Figure 5.2.- Pluviométrie des années de l'enquête agronomique (campagnes agricoles 1994-95, 1995-96 et 1996-97) comparées à l'analyse fréquentielle mensuelle de la région. AF20, AF50 et AF80: cumul de précipitations mensuelle atteint ou dépassé respectivement 2, 5, et 8 années sur 10.

par d'autres choisies dans une série historique représentative.

1.3.- Typologie des situations culturales et possibilités de réduction des écarts entre rendements potentiels et rendements observés.

Cette dernière étape de la démarche vise à établir le lien entre d'une part les paramètres d'entrée du modèle repérés, grâce à ce qui précède, comme ayant un poids prépondérant dans la variabilité des rendements dans la région étudiée, et d'autre part des caractéristiques du milieu et

des systèmes de culture facilement identifiables et pouvant constituer les clefs d'une typologie des situations culturelles. Elle consiste à étudier la distribution, dans les placettes de l'enquête agronomique, de ces paramètres d'entrée du modèle, en prenant soin de distinguer les facteurs du milieu peu modifiables par la gestion technique de la culture et les facteurs propres au système de culture et pouvant avoir des conséquences favorables ou défavorables sur les rendements à travers leurs interactions avec le milieu. Ces distributions sont analysées à la lumière des informations fournies par les courbes de réponse de Y_8 aux différents paramètres d'entrée, ce qui conduit à proposer des voies d'augmentation de cette productivité "inter-annuelle".

L'ensemble de la méthodologie de ce chapitre, qui vient ainsi d'être détaillée, est récapitulée à la figure 5.3.

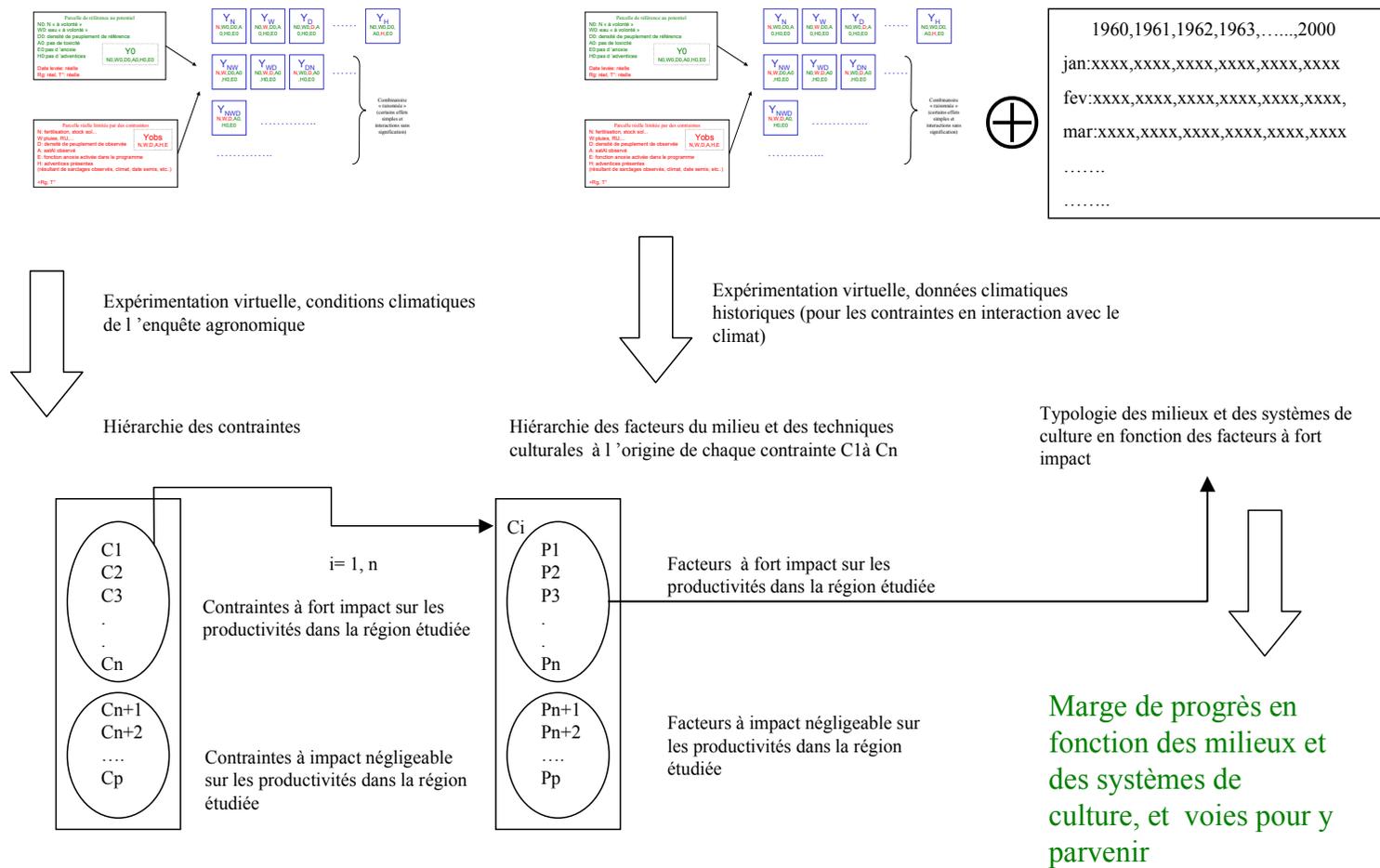


Figure 5.15.- Schéma récapitulatif de la méthode mise en oeuvre pour détecter et hiérarchiser les facteurs du milieu et du système de culture responsables des pertes de productivité par rapport au potentiel permis par le rayonnement et la température.

2.- Fréquence et impact des contraintes et de leurs causes pour les trois années de l'enquête agronomique

Dans ce qui suit, l'échantillon de situations culturales utilisé est le sous-échantillon sans données manquantes de l'enquête agronomique, soit 86 placettes.

2.1.- Effets simples des contraintes

Le rendement potentiel était relativement peu variable en fonction de la date de semis et de l'année. Il s'inscrivait entre 7.7 T/ha et 10.8 T/ha, avec un coefficient de variation de 8% alors que les rendements observés étaient compris entre 0.6 T/ha et 8 T/ha, avec un coefficient de variation de 37%.

Les effets simples moyens des principales contraintes sont représentés à la figure 5.4. Les contraintes y apparaissent classées en termes de fréquence d'occurrence (axe des X), donnée par le nombre de situations où la perte de rendement due à l'effet simple de la contrainte considérée est supérieure à 10%, mais aussi en termes d'impact sur le rendement (axe des Y), donné par la moyenne des pertes de rendement pour les situations où cette perte est supérieure à 10%.

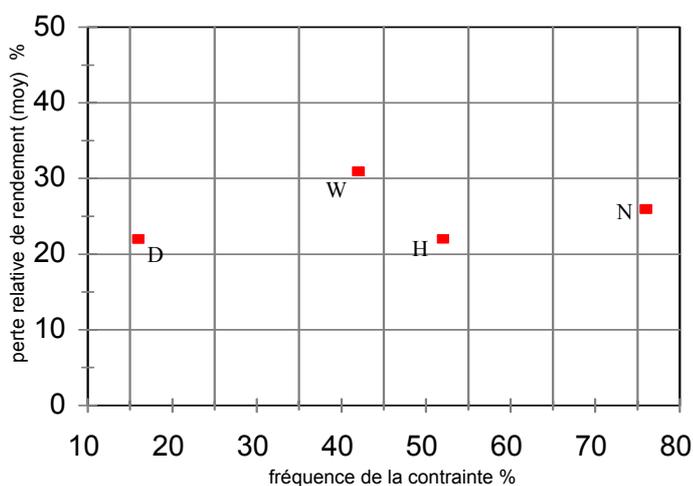


Figure 5.4.- Hiérarchie des effets simples des contraintes, en fréquence (nombre de cas où la contrainte a provoqué une perte de rendement au moins égale à 10% relativement au rendement potentiel Y0, sur le nombre total de placettes suivies) et en impact moyen sur le rendement (moyenne des pertes relatives de rendement dues à la contrainte pour les cas où cette perte atteignait au moins 10%). Contraintes D: densité de peuplement, W: stress hydrique, N: stress azoté, H: adventices. Les effets simples des contraintes A (toxicité aluminique) et E (excès d'eau) sont nuls.

La densité de peuplement, bien qu'extrêmement variable dans l'échantillon, et comprise

entre 1.8 et 7.7 plantes par m², n'avait qu'un faible effet sur le rendement à travers les variations de rayonnement intercepté qu'elle provoque. Yd est inférieur à Y0 dans un petit nombre de cas seulement, dans lesquels la réduction de rendement est faible également.

La contrainte hydrique est une contrainte plus sévère, à la fois en termes de fréquence et d'impact moyens. Le tableau 5.1 fournit le détail de la distribution de cette contrainte dans l'échantillon de situations culturales et montre que les précipitations ne sont que très peu limitantes, même en considérant près de 30% des pluies perdues par ruissellement, et ceci alors que l'une des années suivies comprenait une sécheresse très importante en février, plaçant cette année parmi les 20% les plus sèches observées dans la région pour ce mois (fig. 5.2). Par contre, les faibles réserves utiles de nombreux sols de la région apparaissent comme l'origine principale de la contrainte hydrique. La figure 5.5 montre que pour les réserves utiles totales les plus basses rencontrées à Silvânia, comprises entre 75 et 120mm, la date de semis interagit fortement avec la réserve utile dans l'expression des contraintes hydriques, tandis qu'avec des capacités de stockage plus élevées, la marge de manoeuvre des producteurs pour la date de semis est considérable.

Perte relatives de rendement (%) par rapport au potentiel Y0	Fréquence (% des placettes) des pertes de rendement selon les variables considérées dans la simulation du bilan hydrique:		
	effet offre pluviométrique: Précipitations observées RU fixée à 180mm (100mm/m de sol) Ruissellement nul	Addition de l'effet de la réserve utile: Précipitations et RU observées Ruissellement nul	Addition de l'effet du ruissellement: Précipitations et RU observées, Ruissellement fixé à 30% des précipitations excédant 15mm
#10	83	58	58
#30 et >10	7	22	22
#50 et >30	10	15	15
#70 et >50	0	5	5
>70	0	0	0

Tableau 5.1.- Rôle des principales variables du bilan hydrique dans la réalisation des contraintes hydriques.

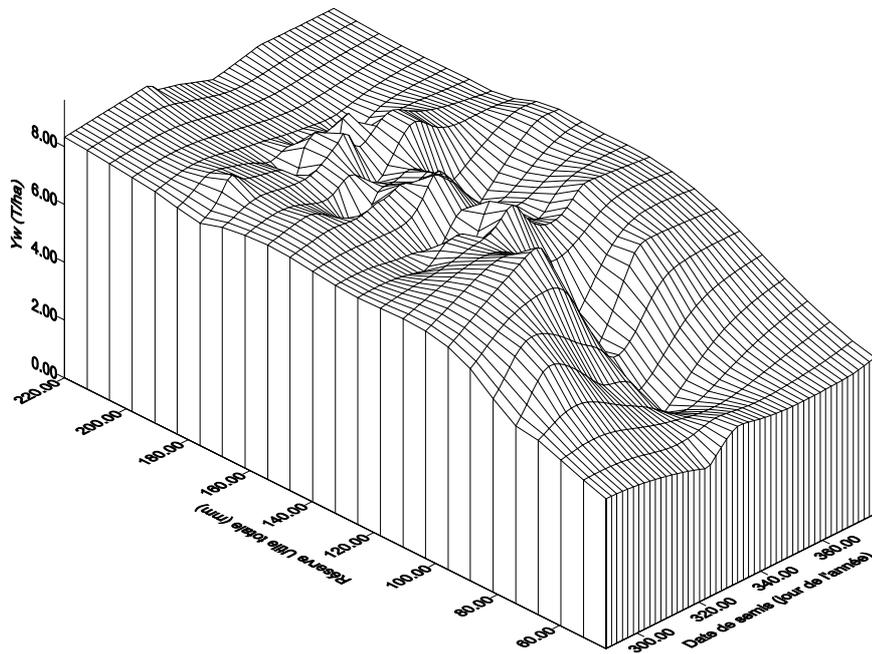


Figure 5.5.- Surface de réponse simulée de la productivité sous contrainte hydrique exclusive (Y_w) à la date de semis et à la réserve utile totale du sol.

La contrainte azotée est légèrement supérieure à la contrainte hydrique en termes de fréquence d'occurrence, avec cependant un impact moyen légèrement plus faible. Le taux de minéralisation de l'azote organique est apparu très peu variable dans les simulations. La contrainte azotée est, dans notre échantillon de placettes, principalement corrélée à la somme des apports fertilisants et des stocks organiques des sols, avec une influence sensible de la date de la fumure d'entretien, ainsi qu'aux pertes par lixiviation, comme l'indique le tableau 5.2, dont la dernière colonne à droite fournit par ailleurs le détail de la distribution de la contrainte azotée dans l'échantillon. Ces dernières sont variables avec la date de semis et la réserve utile des sols, le régime d'apports d'eau étant le même, rappelons-le, pour toutes les placettes dans le jeu de simulations utilisé pour évaluer les effets simples de la contrainte azotée.

Fréquence (% des placettes) des pertes de rendement selon les hypothèses sur les principales variables du bilan azoté:				
Perte relatives de rendement (%) par rapport au potentiel Y ₀	Effet des engrais minéraux: fertilisation observée, sol de référence (RU=180mm, stock N organique =5T/ha, 35% argile), pas de fumure organique	Addition de l'effet du N organique du sol: Idem colonne précédente mais stock organique du sol observé	Addition de l'effet de la réserve utile du sol sur la lixiviation de N: entrées N observées, sauf matière organique, et sol observé	Addition de l'effet des apports de N organique: toutes entrées d'azote observées et sol observé
#10	54	44	22	25
#30 et >10	44	44	54	49
#50 et >30	2	16	22	25
#70 et >50	0	0	2	1
>70	0	0	0	0

Tableau 5.2.- Rôle des principales variables du bilan azoté dans la réalisation des contraintes azotées.

Les effets simples des contraintes “toxicité aluminique” et “anoxie racinaire” sont nuls compte tenu de la façon dont ces contraintes ont été modélisées ($Y_A=Y_0$ et $Y_E=Y_0$). L'effet de ces contraintes résulte exclusivement de l'interaction entre la limitation de la profondeur d'enracinement qu'elles provoquent, d'une part, et d'autre part la dynamique de l'eau et de l'azote. Dans des situations de disponibilités en eau et en azote non limitantes, qu'il aurait fallu utiliser pour le calcul des effets simples de la toxicité aluminique et de l'anoxie racinaire, la profondeur atteinte par l'enracinement n'aurait pas eu d'influence sur les résultats de simulation.

L'effet simple des mauvaises herbes, tel que simulé, concerne exclusivement la compétition entre le maïs et les adventices pour le rayonnement. Cet effet est du même ordre que celui de la densité maïs concerne un nombre beaucoup plus élevé de situations, dépassant 50% de l'échantillon. Dans un quart des situations, le calendrier de sarclage ne permet pas de maintenir à moins de 10% les pertes de rendement dues aux adventices, et cette proportion est proche de 45% des situations si l'on tient compte d'échecs de sarclage dus aux précipitations, mais les pertes de rendement demeurent dans ces deux cas inférieures à 30%. Si l'on tient compte en outre des intervalles de temps entre la dernière opération de travail du sol et le semis du maïs, le nombre de parcelles subissant des pertes de rendement augmente peu, mais ces pertes de productivité sont aggravées (Tableau 5.3).

Fréquence (% des placettes) des pertes de rendement selon les hypothèses sur les variables de la croissance des adventices			
Perte relatives de rendement (%) par rapport au potentiel Y0	1:Effet du calendrier de sarclage sans interaction avec les précipitations: - jour du dernier travail du sol fixé au jour du semis -calendrier de sarclage observé, -pas d'effet des pluies sur l'efficacité des sarclages (fonction correspondante désactivée dans le programme)	2:Addition de la réduction de l'efficacité des sarclages par les précipitations (activation de la fonction correspondante dans le programme, autres hypothèses de simulation comme colonne 1)	3:Addition de l'effet de l'intervalle observé entre le dernier travail du sol et le semis
#10	74	55	48
#30 et >10	26	45	44
#50 et >30	0	0	7
#70 et >50	0	0	1
>70	0	0	0

Tableau 5.3.- Rôle des principales variables de simulation des adventices dans la réalisation de la contrainte enherbement.

2.2.- Interactions entre contraintes

Parmi les interactions possibles entre contraintes, n'ont été retenues dans ce qui suit que celles dont les effets sur le rendement excédaient 10 % pour plus de 10% des placettes. Par contre, on a distingué, pour une interaction donnée, les cas où son effet sur les pertes de rendement était positif (synergie, aggravation de la perte de rendement par rapport à la somme des effets simples des deux ensembles de contraintes comparés) des cas où son effet était négatif (antagonisme, réduction de la perte de rendement par rapport à la somme des pertes des ensembles de contraintes comparés). Les résultats sont donnés à la figure 5.6.

On remarque notamment que la contrainte de faible densité de peuplement, qui était presque négligeable en termes d'effet simple, a des effets importants à travers ses interactions avec les contraintes hydriques et azotées. Ces dernières sont réduites lorsque la densité de peuplement est faible, les besoins en eau et en azote de la culture étant ainsi réduits par rapport à ceux d'un peuplement dense.

L'interaction entre les contraintes hydrique et azotée est positive dans plusieurs cas, correspondant à des niveaux faibles de chacune des deux contraintes prises isolément. Les rapports

détaillés des simulations montrent que ceci s'explique par une diminution de la quantité d'azote absorbé lorsque les conditions hydriques sont limitantes. Toutefois, expliquant la petite majorité de cas où cette interaction est négative, lorsque la contrainte hydrique est sévère et précoce dans le cycle, cette réduction de l'offre en azote liée à la contraintes hydrique est plus que compensée par une réduction de la demande en azote, résultant de la réduction de croissance provoquée par le stress hydrique. Autrement dit, dans les placettes concernées, le stress azoté aurait été plus fort si un stress hydrique ne s'était pas d'abord produit. Ceci suggère donc une dépendance entre la chronologie des apports d'azote et la dynamique hydrique dans l'expression des contraintes hydriques et azotées.

La contrainte "toxicité aluminique/déficience en Ca" est responsable de pertes de rendement importantes pour un quart des situations, du fait de son interaction avec les contraintes hydriques et azotées. L'intensité de la contrainte dépend de la profondeur de l'horizon toxique et de la réserve utile par mètre de sol.

La contrainte excès d'eau apparaît finalement négligeable pour les années étudiées. Elle se produit en fait une seule année, dans de nombreuses placettes, mais avec de très faibles conséquences sur les rendements, la période où des pluies excessives ont provoqué une anoxie dans la zone racinaire n'ayant pas été suivie d'une période de sécheresse susceptible d'avoir un impact aggravé sur les situations où l'enracinement avait été limité par l'anoxie.

Enfin, la contrainte enherbement est favorisée par les autres contraintes agissant sur la croissance du LAI du maïs, qui augmentent le rayonnement disponible pour les adventices. Elle aggrave les contraintes hydriques et azotées par compétition entre la culture et les mauvaises herbes. On retrouve ici une influence des faibles densités de peuplement, qui contribuent à favoriser un enherbement important. Dans un petit nombre de situations où les contraintes A, W ou N étaient particulièrement sévères, cependant, l'interaction de ces contraintes avec les mauvaises herbes est négative, la croissance des adventices étant également limitée par ces contraintes, sans que cela soit compensé par le gain de rayonnement disponible via une réduction de l'extinction de ce dernier par le maïs.

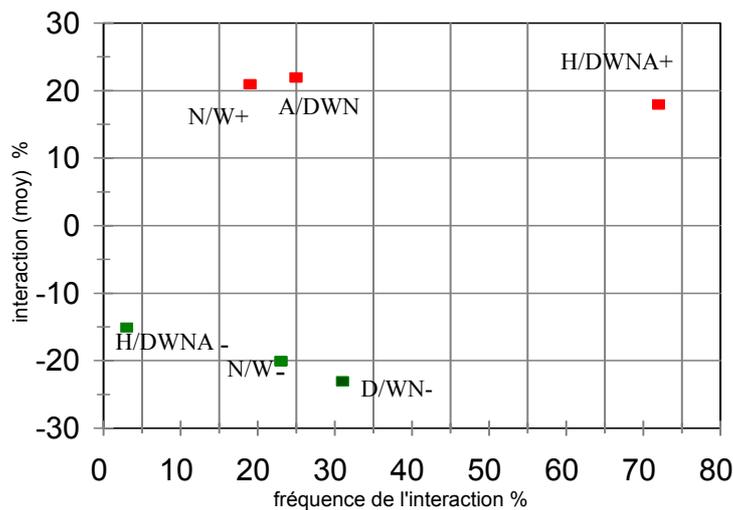


Figure 5.6.- Hiérarchie des effets conjugués des contraintes. Interaction de C1/C2: interaction entre deux combinaisons de contraintes C1 et C2, égale à $(1-YC1C2/Y0)-(1-YC1/Y0+1-YC2/Y0)$, en moyenne des placettes pour lesquelles cette interaction atteint au moins 10% en valeur absolue, avec fréquence de C1/C2 = nombre de cas où l'interaction est supérieure à +10% (C1/C2+) ou inférieure à -10% (C1/C2-), divisé par le nombre total de placettes de l'échantillon. Contraintes D: densité de peuplement, W: stress hydrique, N: stress azoté, H: adventices, A: toxicité aluminique. Les interactions de la contrainte E (excès d'eau) avec les autres contraintes sont toujours comprises entre -10% et +10%.

3.- Extrapolation du diagnostic pour une série historique de données pluviométriques

La série historique utilisée était celle des données pluviométriques journalières de 21 années du poste de Goiânia, situé à 80km à l'ouest de Silvânia. Pour la température et le rayonnement, ont été utilisées les moyennes pentadaires sur cinq ans du même poste.

Il s'agissait:

- de vérifier l'hypothèse, pouvant être formulée à partir de l'étude des années de l'enquête agronomique, que ni le ruissellement ni l'excès d'eau n'avaient d'influence sensible sur les productivités,

- de préciser l'influence de la date de semis et de la réserve utile sur le rendement, compte tenu de l'importance de ces facteurs dans la contrainte hydrique pour les années du suivi, et des nombreuses interactions repérées entre la contrainte hydrique et les autres contraintes.

- de préciser également l'influence du calendrier de mise en culture et de désherbage sur le rendement, compte tenu de l'influence, détectée plus haut, du régime des pluies sur la contrainte enherbement.

Cette liste de facteurs interagissant potentiellement avec la pluviométrie étant relativement abondante, on se trouvait dans le cas de figure où il était difficile de réaliser d'emblée un protocole idéal d'expérimentation virtuelle combinant tous ces facteurs avec des modalités couvrant leurs intervalles de variation dans la région de Silvânia. En effet, si l'on tient compte du fait que le

calendrier de mise en culture et de désherbage doivent être décomposés respectivement en facteurs “dates du dernier travail du sol” et “date de semis”, et en facteurs “date du premier sarclage” et “date du second sarclage”, nous avons 4 facteurs à ajouter aux facteurs “réserve utile”, “ruissellement”, “excès d’eau”, soit 6 facteurs. Pour une moyenne de 5 niveaux par facteurs, ce qui est *à priori* faible pour les dates de semis ou la réserve utile mais élevé pour le ruissellement, compte tenu de leurs intervalles de variation observés dans l’échantillon de situations culturales, on obtiendrait 5⁶ situations à simuler chacune 21 fois (pour les 21 années de données pluviométriques), soit 328125 simulations. Ceci n’était pas théoriquement impraticable dans un temps raisonnable, mais aurait nécessité des aménagements importants au programme informatique contenant le modèle. Il a été jugé préférable de procéder progressivement en considérant tout d’abord deux niveaux contrastés pour chacun des facteurs de manière à repérer les interactions les plus significatives devant impérativement être testées et celles pouvant être négligées. Le nombre de niveaux pris en compte pour chaque facteur était ensuite augmenté ou réduit, et leurs valeurs fixées, en fonction de leur influence sur la distribution inter-annuelle de rendement simulé, et ainsi de suite. Il aurait été fastidieux de relater ici l’ensemble des ces tâtonnements successifs ayant permis de construire l’analyse de sensibilité du modèle, et seuls les protocoles correspondant à la dernière étape de la procédure sont décrits dans ce qui suit.

3.1.- Influence du ruissellement

De même que pour les années du suivi agronomique, a été testée pour les 21 années de données pluviométrique l’hypothèse, correspondant à la limite haute des valeurs observées en région tropicale sur sols peu battants (Affholder *et al.*, 1997; Perez, 1994; Scopel *et al.*, 1999), d’un ruissellement de 30% de chaque pluie journalière excédant un seuil de 10mm. Dans la mesure où la date de semis, la réserve utile des sols et l’offre en azote avaient été repérés comme interagissant fortement avec la contrainte hydrique, une modification de cette dernière par le ruissellement devait être étudiée en tenant compte de ces interactions. Le dispositif de simulation qui a été retenu considérait un maïs semé à une densité de 6 plantes par mètre carré, sur un sol ayant une réserve utile de 100mm/m uniformément répartie sur le profil et un taux d’azote de 0.15%, avec outre le facteur ruissellement, les facteurs:

- profondeur du sol, avec deux modalités extrêmes; 50 et 180 cm,
- date de semis, avec 17 modalités espacées de 10 jours, du 20/09 au 27/02,
- apport d’engrais azoté, avec deux modalités; 0 kg/ha et 80 kg/ha (10kg au semis + 60 kg à 30jours).

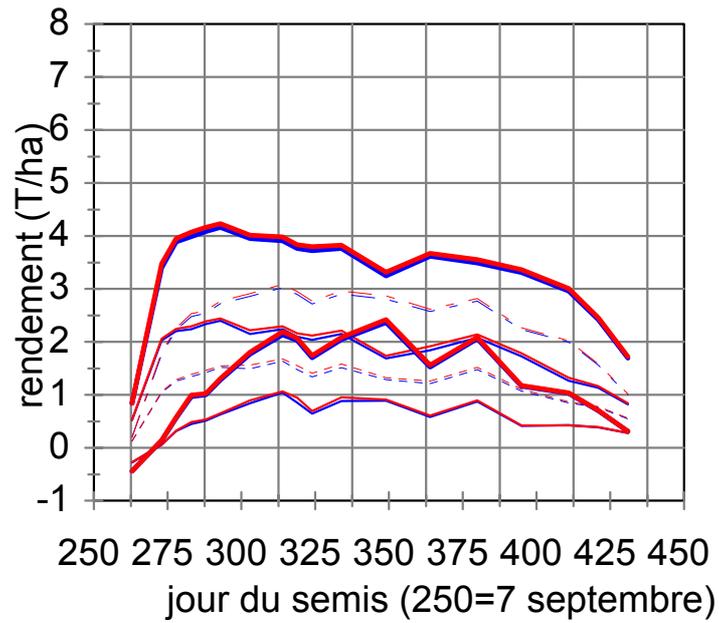
Le sol était considéré vierge d'adventices le jour du semis, un sarclage étant en outre effectué à 30 jours. On se plaçait dans l'hypothèse d'une efficacité totale du sarclage (le LAI des adventices étant ramené à 0 le jour du sarclage) quelles que soient les précipitations.

Les résultats de ces simulations montrent la faible influence du ruissellement, quelles que soient les conditions de date de semis, de réserve utile et de fourniture d'azote testées (fig. 5.7). Dans le détail, cependant, le modèle simule un effet légèrement positif du ruissellement sur les rendements moyens, sans modifier leur variabilité, pour le cas où la réserve utile totale du sol est élevée. Ceci provient du fait que le ruissellement n'affecte que très peu le stress hydrique alors que le modèle simule une réduction des pertes d'azote par lixiviation dans le cas d'un ruissellement important. Dans le cas d'un sol ayant une très faible réserve utile, cette économie d'azote est négligeable par rapport aux pertes de toutes façons très élevées qui se produisent en l'absence de ruissellement (tableau 5.4). Dans la mesure où il est probable que dans la réalité, contrairement à nos simulations, le ruissellement entraîne également des éléments minéraux dont de l'azote, le faible effet positif simulé est sans doute exagéré. Nous négligerons le ruissellement dans la suite de l'analyse.

profondeur du sol (cm)	50				180			
	0		80		0		80	
N engrais (kgN/ha)								
Ruissellement simulé	sans	avec	sans	avec	sans	avec	sans	avec
str1	0.96	0.96	0.96	0.96	0.99	0.99	0.99	0.99
str2	0.87	0.87	0.85	0.85	0.99	0.99	0.99	0.99
inn1	0.69	0.70	0.78	0.79	0.75	0.76	0.87	0.88
inn2	0.48	0.48	0.62	0.62	0.55	0.57	0.78	0.8
Qles (kg/ha)	53	50	82	77	27	23	32	26
rendement (T/ha)	1.52	1.58	2.91	2.86	2.83	3.01	5.45	5.62
c.v. %	42.1	39.8	29.5	29.3	28.9	28.5	24.9	24.9

Tableau 5.4.- Effet du ruissellement sur les stress hydriques et azotés. Date de semis du jour 334 (28 novembre). Moyennes sur 21 ans des valeurs simulées des stress hydriques avant (str1) et après floraison (str2), des stress azotés avant (inn1) et après (inn2) floraison, de la quantité d'azote lessivé à la base du profil de sol (Qles) et des rendements. C.V: coefficient de variation des rendements résultant de la variabilité inter-annuelle des pluies pour chaque modalité simulée. Cas avec ruissellement: $\text{Ruissellement} = 0.3 \times \text{Pluie}$ si $\text{Pluie} > 10\text{mm}$.

a)



b)

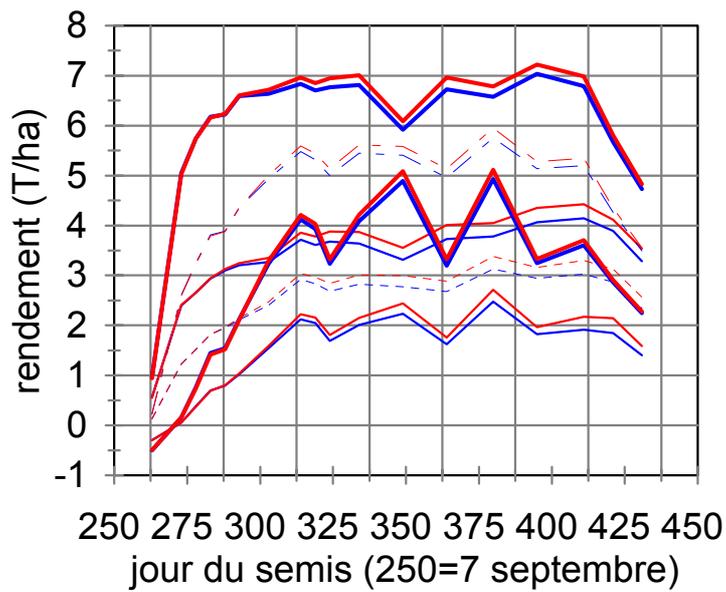


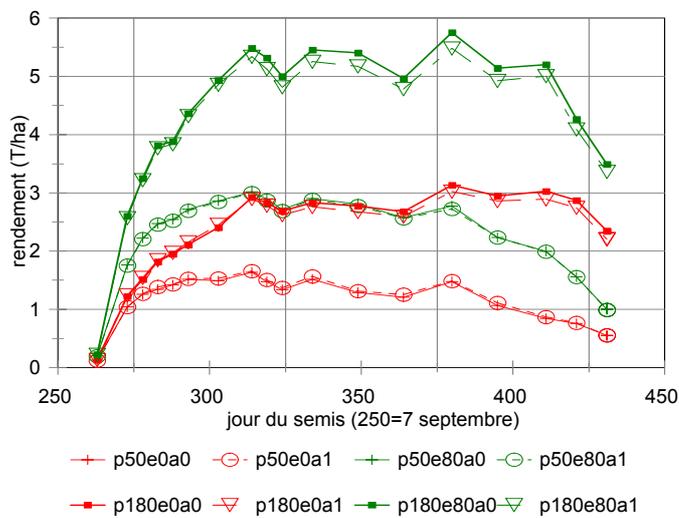
Figure 5.7.- Rendements moyens (m , courbes en pointillés) et leur variabilité inter-annuelle ($m \pm \sigma$ = moyenne \pm écart type, courbes continues) avec (rouge) et sans (bleu) ruissellement, en fonction de la date de semis et des apports d'engrais (0kgN/ha: traits fins et pointillés; 80kgN/ha: traits gras et tirets), pour un sol ayant une réserve utile de 100mm/m et une profondeur de 50 cm (a) et 180cm (b).

3.2.- Influence de l'anoxie dans la zone de croissance des racines.

Les simulations utilisées sont les mêmes que pour l'étude du ruissellement, en substituant les modalités avec et sans ruissellement par les modalités avec et sans activation de la fonction de simulation du ralentissement de la croissance racinaire par l'excès d'eau, et en se plaçant dans l'hypothèse d'un ruissellement nul, c'est à dire dans l'hypothèse la plus haute d'offre en eau, de manière à estimer par excès l'influence de l'anoxie dans la zone racinaire.

La figure 5.8 montre le faible effet de l'anoxie sur les rendements moyens (fig.5.8a) et sur la variabilité inter-annuelle par rapport à ces moyennes (fig.5.8b).

a)



b)

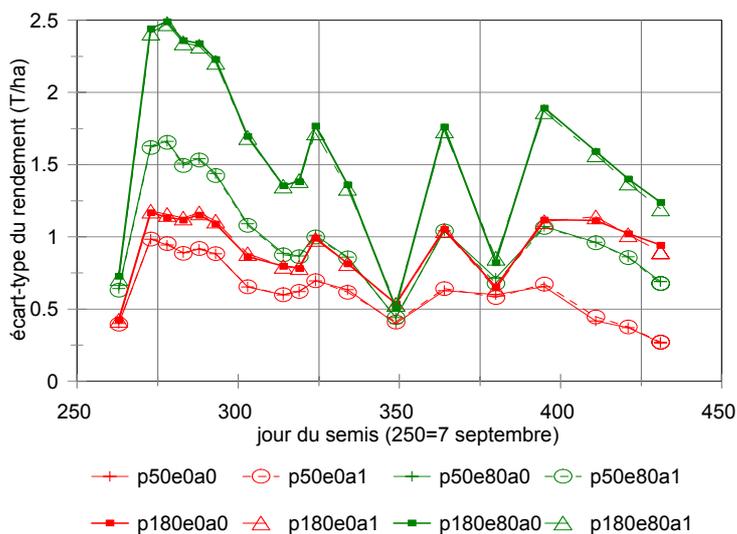


Figure 5.8.- Effet de l'anoxie (a0 et a1: respectivement sans et avec simulation de l'anoxie) dans la zone racinaire, simulé pour la série historique de précipitations, en fonction de la date de semis, de la profondeur du sol (p50=50cm; p180=180cm) et de la fertilisation (e0: 0kgN/ha; e80: 80kgN/ha), sur le rendement moyen (a) et son écart-type (b).

3.3.- Sensibilité du rendement à la date de semis

Le dispositif de simulation utilisé visait à tester les facteurs:

- profondeur du sol, avec sept modalités; 50, 70, 90, 110, 130, 150 et 180 cm conduisant à des réserves utiles totales respectivement de 50, 70, 90, 110, 130, 150 et 180mm,
- date de semis, avec 20 modalités espacées de 10 jours du 20/09 au 10/04,
- apport d'engrais azoté, avec trois modalités; 0 kg/ha, 50 et 90 kg/ha (25% au semis, 75% à 30jours).
- densité de peuplement, avec deux modalités; 3 et 6 plantes par m²,
- stock d'azote organique du sol, avec deux modalités: 0.1% de N et 0.35% de N.

Il en résultait 84 situations croisées avec 20 dates de semis et simulées pour les 21 années de données pluviométriques. Le sol était considéré comme vierge d'adventices le jour du semis, un sarclage étant effectué à 30 jours, avec une efficacité totale et indépendante de la pluviométrie.

Une première étape, dans l'exploration de la sensibilité du rendement simulé à la date de semis, était de se doter d'un critère simple décrivant l'évolution de la distribution inter-annuelle des rendements en fonction de la date de semis. Le rendement atteint ou dépassé 8 années sur 10 et le rendement atteint ou dépassé 2 années sur 10 croissent ou décroissent simultanément en fonction de la date de semis, pour des conditions d'offre en azote, de réserve utile et de densité de peuplement contrastées (fig. 5.9). Il en résulte que le critère du rendement atteint ou dépassé 8 années sur 10 (Y_8) apporte une information suffisante pour le repérage de la période la plus favorable pour les semis.

Une première exploration de l'espace de réponse de Y_8 aux facteurs testés montre que ce rendement croît avec la date de semis, atteint un plateau grossièrement horizontal puis décroît, dans toutes les situations culturelles simulées (fig.5.10). Compte tenu du caractère discret des modalités prises par les facteurs dans les situations testées, une deuxième étape de l'analyse consistait à s'assurer, autant que possible, qu'il n'existait pas de situations particulières, parmi les situations non testées, pour lesquelles la réponse du rendement à la date de semis s'écarte sensiblement de ce comportement général. Ceci supposait d'étudier les évolutions respectives des stress hydriques et azotés en fonction de la date de semis, afin d'en déduire leur mode d'interaction prédominant pour les 21 années étudiées.

a)

b)

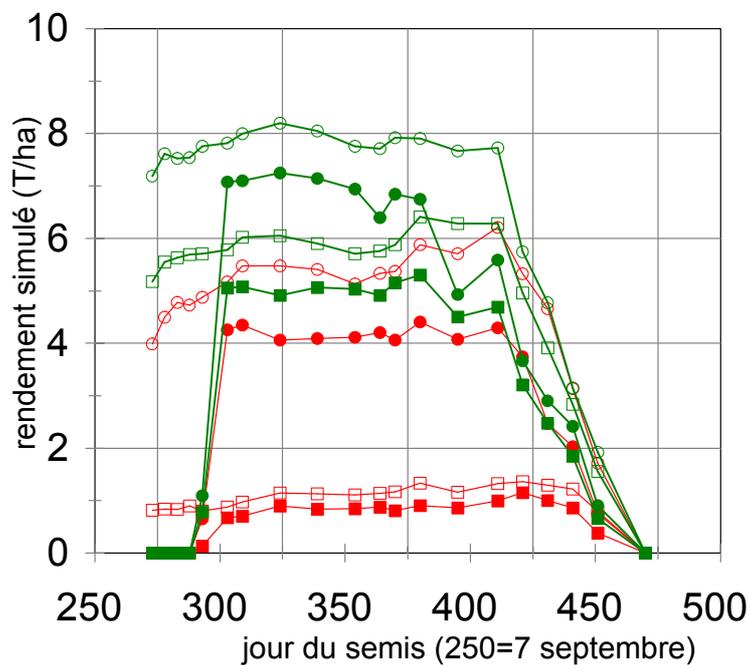
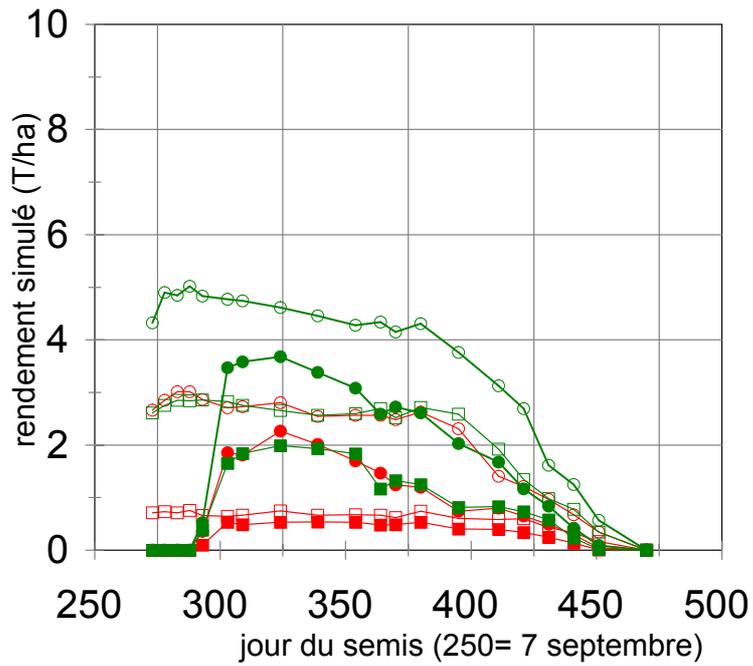
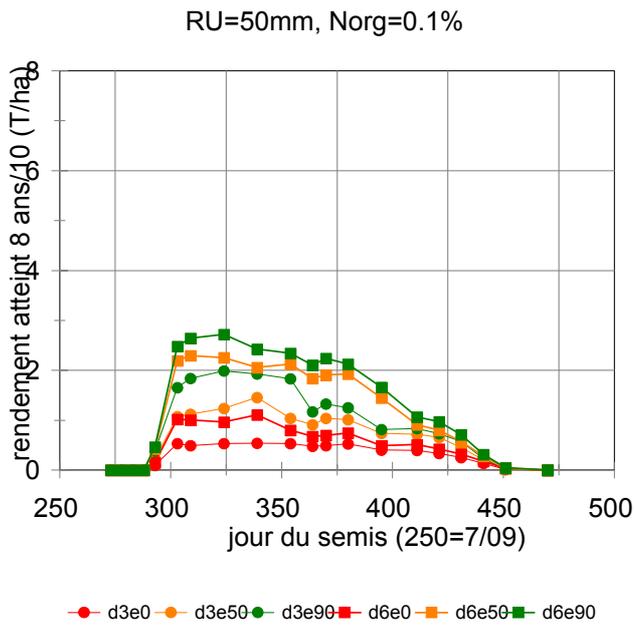
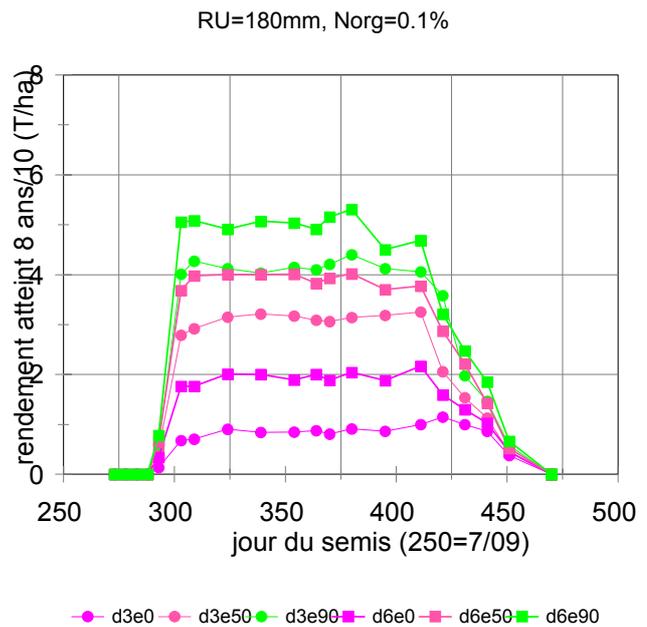


Figure 5.9.- Rendement atteint ou dépassé 8 années sur dix (symboles pleins) et 2 années sur dix (symboles vides), pour un sol de a) 50mm et b) 180 mm de réserve utile. Traits fins: densité=3plantes/m², traits gras: densité=6plantes/m². Traits rouges: fertilisation = 0kgN/ha, traits verts: fertilisation= 90kgN/ha. Symboles carrés: stock N organique= 0.1%, symboles ronds: stock N organique = 0.35%.

a)



b)

RU=50mm, Norg=0.35%

rendement atteint 8 ans/10 (T/ha)

jour du semis (250=7/09)

● d3e0 ● d3e50 ● d3e90 ■ d6e0 ■ d6e50 ■ d6e90

RU=180mm, Norg=0.35%

rendement atteint 8 ans/10 (T/ha)

jour du semis (250=7/09)

● d3e0 ● d3e50 ● d3e90 ■ d6e0 ■ d6e50 ■ d6e90

Figure 5.10.- Rendement atteint ou dépassé 8 années sur 10 simulé en fonction de la date de semis, de la fertilisation azotée (e0: 0kgN/ha, e50: 50kgN/ha; e90: 90kgN/ha) et de la densité de peuplement (d3: 3 plantes/m²; d6: 6 plantes/m²), pour un sol de 50 mm (a et c) et de 180mm (b et d) de réserve utile totale (RU), et de 0.1% (a et b) et 0.35% (c et d) d'azote organique.

L'analyse des moyennes pour ces 21 années des indicateurs de stress azoté et hydrique simulés pour une situation culturale intensive (densité=6 plantes/m², 50kgN/ha) sur sol de faible

167

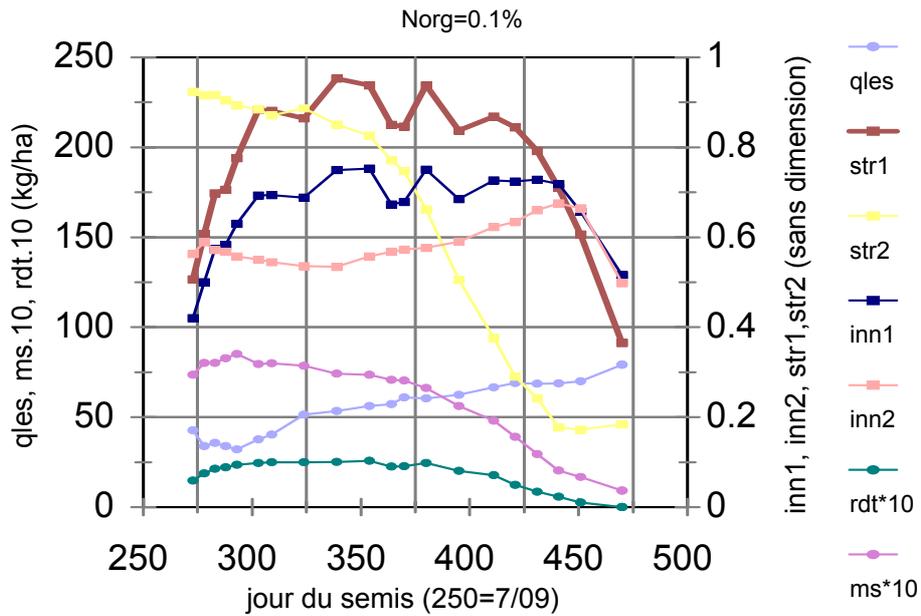
réserve utile (50mm au total), montre que la période favorable aux semis est déterminée avant tout par les conditions hydriques (fig.5.11). Les évolutions en fonction de la date de semis du stress azoté avant floraison et du stress hydrique avant floraison sont parallèles. En outre, le coefficient de stress azoté post-floraison évolue également dans le même sens, en décroissant (augmentation de la contrainte), que le coefficient stress hydrique post-floraison, pour les dates de semis comprises entre le début de la saison des pluies et début décembre (jour 340). Ensuite, leur évolution diverge.

En fait, l'augmentation du coefficient de stress à partir de décembre est due à la diminution des besoins en azote de la culture, elle-même provenant de la diminution de la production de biomasse provoquée par la contrainte hydrique post-floraison. Il est ainsi plus pertinent de s'intéresser à l'offre totale en azote (fertilisation+minéralisation-lessivage) qu'au coefficient de stress azoté. Cette offre en azote diminue en moyenne lorsque la date de semis augmente, et ceci du début à la fin de la saison, en raison d'une augmentation des pertes d'azote moyennes par lessivage à la base du profil. On retiendra donc qu'en moyenne, à mesure que la date de semis devient tardive, les conditions hydriques et azotées de début de cycle s'améliorent tandis que les conditions hydriques et azotées de fin de cycle se dégradent.

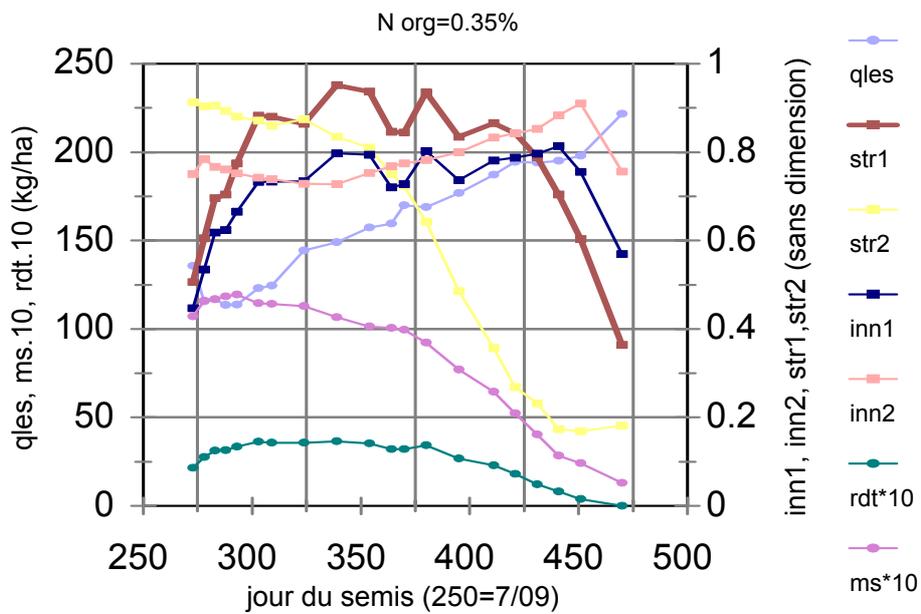
Un stock d'azote élevé dans le sol (fig.5.11b) augmente en moyenne la satisfaction des besoins azotés de la culture principalement pendant la deuxième moitié du cycle, comparativement à un stock faible (fig.5.11a), sans modifier la logique d'évolution des stress azotés et hydriques en fonction de la date de semis. Il en résulte qu'on se situe à Silvânia dans un cas relativement simple où la période optimale de semis sera d'autant plus longue que les besoins en eau de la culture seront faibles par rapport à l'offre en eau, c'est à dire augmentant avec la réserve utile du sol et diminuant lorsque l'offre en azote ou la densité de peuplement augmentent.

Ceci n'est vrai, cependant, que si le rendement est le seul critère d'optimisation et qu'on fait l'hypothèse, comme c'était le cas dans les simulations réalisées, que le stock d'azote du sol est constant au cours du temps et indépendant de la date de semis pratiquée. Or d'une part les producteurs valorisent une grande partie des résidus de maïs pour l'élevage, de telle manière que la biomasse totale produite est un critère important à retenir, et d'autre part l'évolution du stock d'azote organique du sol au cours des années dépend de la quantité de résidus incorporée au sol et des pertes par lessivage.

a)



b)



Figure

5.11.- Analyse de l'interaction entre contrainte hydrique et contrainte azotée en fonction de la date de semis. Valeurs moyennes des simulations de 21 années, pour les indicateurs de stress (axe Y de droite, sans dimension; 1= stress nul; 0= stress maximal) hydrique (str1: avant floraison, str2: après floraison) et azoté (inn1: avant, et inn2: après floraison), et pour les grandeurs (axe Y de gauche, kg/ha) quantité d'azote lessivée sous la zone racinaire (qlés), 10 x matière sèche aérienne totale (ms*10) et 10 x rendement (rdt*10). Cas d'un sol de 50 mm de réserve utile totale, recevant une fertilisation azotée de 50kgN/ha, avec une densité de peuplement de 6 plantes /m², pour deux niveaux de teneur en N organique: a) 0.1% et b) 0.35%.

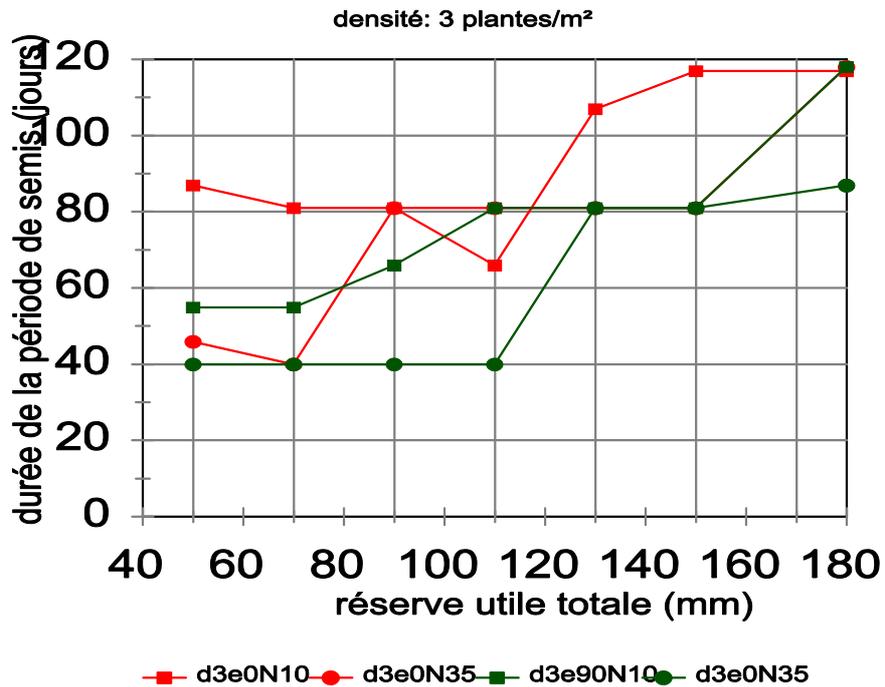
On a vu que pour des dates de semis croissantes incluses dans la période où le rendement en grain est stable et proche du maximum, les pertes d'azote par lessivage augmentent et la biomasse totale diminue. Les dates de semis les plus précoces sont donc favorables à une production de paille plus importante, stockant de l'azote qui serait perdu par lessivage pour des dates plus tardives. Cette production de paille (équivalente ici à une économie d'azote) étant un atout pour l'exploitation, qu'elle soit valorisée dans l'alimentation animale ou restituée au sol, il était important d'en tenir compte dans la définition de la période de semis optimale.

Quelles que soient la réserve utile, la dose ou les réserves d'azote, ou la densité de peuplement testée parmi les 84 situations de l'expérimentation virtuelle, les pertes d'azote par lessivage croissent rapidement à partir du début de la saison des pluies, de telle sorte que la date de semis optimale du point de vue du rendement et du bilan azoté est toujours la date la plus précoce de la période optimale définie du strict point de vue du rendement (annexe 6).

Si l'on définit la période de semis optimale du strict point de vue du rendement comme celle où le rendement atteint ou dépassé 8 années sur 10 est compris entre la valeur qu'il obtient au maximum pour la date la plus favorable et 90% de cette valeur, la date de début de la période favorable aux semis est peu variable avec la réserve utile, la densité de peuplement ou l'offre en azote du sol, et se situe à la première décennie de novembre; du jour 303 au jour 313 (fig.5.10). C'est donc cette décennie qui est la plus favorable, quels que soient le niveau d'intensification de la culture et la réserve utile du sol, dès lors que l'on cherche, outre un rendement maximal, des pertes minimales d'azote par lessivage (ou une production maximale de biomasse totale). La durée de la période de semis où le rendement est stable dépend, par contre des facteurs de l'offre en eau du sol et de la demande de la plante, comme indiqué à la figure 5.12. Cette période atteint à Silvânia une trentaine de jours au minimum, pour les situations culturales les plus intensives sur les sols les plus contraignants.

Enfin, pour la date de semis la plus favorable, le rendement atteint est très variable avec tous les facteurs testés, pour une année donnée: il croit avec la densité, la fertilisation azotée, le stock en azote du sol et la réserve utile. La réponse, à l'ensemble de ces facteurs, du rendement atteint ou dépassé 8 années sur 10, obtenue par un nouveau jeu de simulation pour un semis à la première décennie de novembre, est donnée dans les abaques de la figure 5.13.

a)



b)

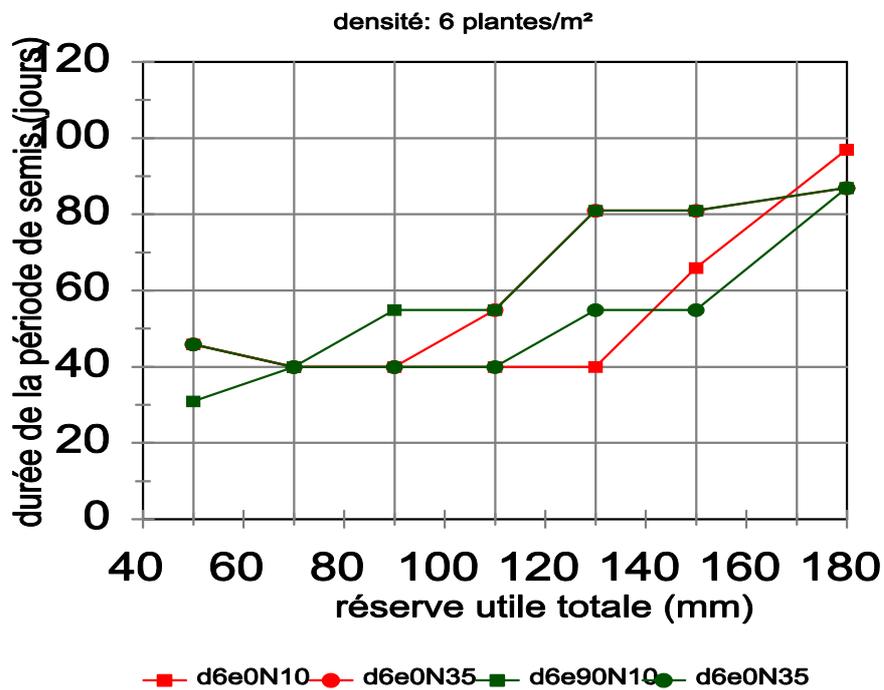
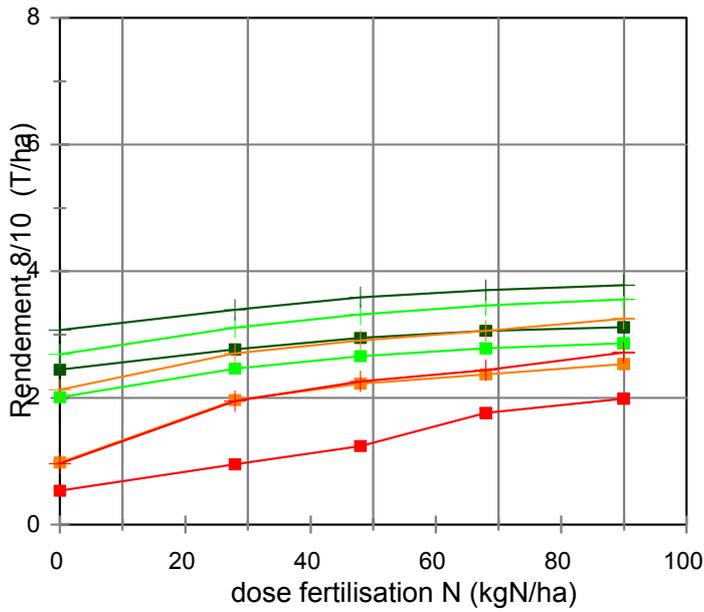
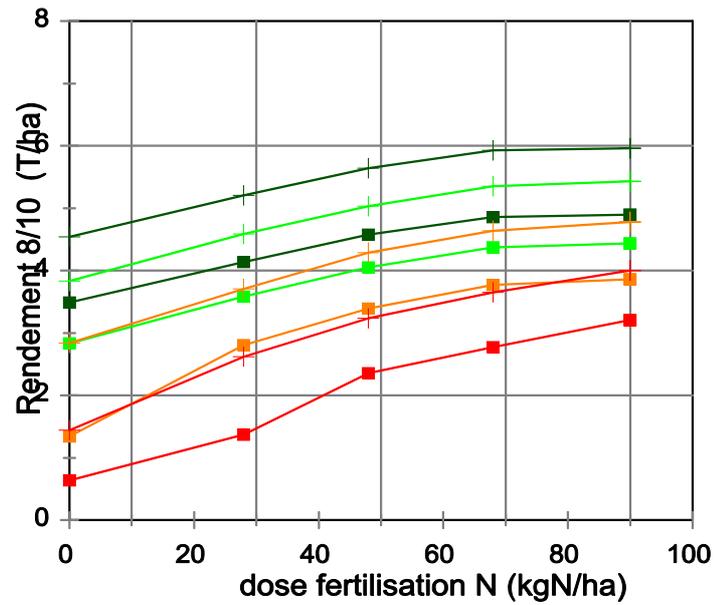


Figure. 5.12.- Effet de la réserve utile du sol, de la densité de semis et de l'offre en azote sur la durée de la période optimale de semis. Densité de peuplement de a) 3 plantes /m² (d3) et b) 6 plantes /m² (d6); e0 et e90: apports d'azote par fertilisation, respectivement 0 et 90kgN/ha; N10 et N35, teneur en azote du sol respectivement de 0.1% et 0.35%.

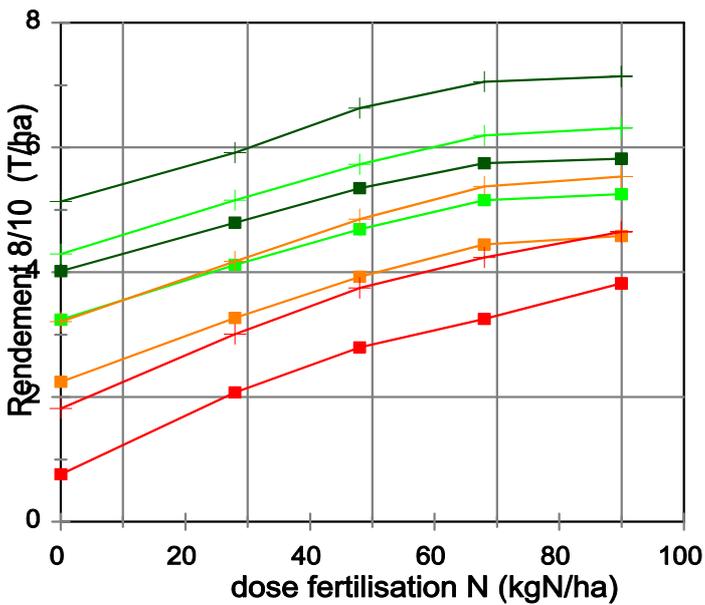
RU=50mm (100mm/m x 0.5m); semis j=309



RU=90mm (100mm/m x 0.9m); semis j=309



RU=130mm (100mm/m x 1.3m); semis j=309



RU=180mm (100mm/m x 1.8m); semis j=309

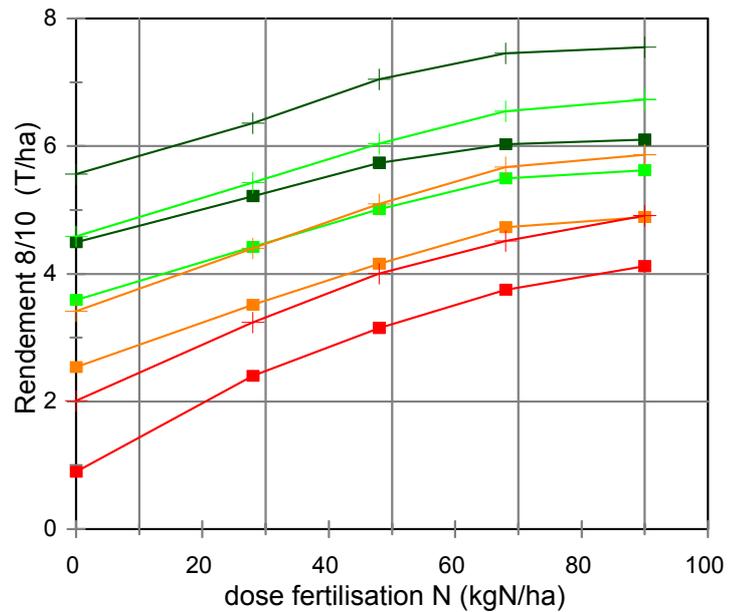


Figure 5.13.- Rendement atteint ou dépassé huit années sur dix ("rendement 8/10", ordonnées) en fonction de la dose d'azote apportée par fertilisation, pour la date de semis optimale (du point de vue des contraintes hydrique et azotée) et pour des niveaux variés de réserve utile du sol, de densité de peuplement (d), et de teneur en azote organique du sol(Norg):
 d=3pl/m², Norg=0.1%: ; d=3pl/m², Norg=0.2%: ; d=3pl/m², Norg=0.3%: ; d=3pl/m², Norg=0.4%: ;
 d=6pl/m², Norg=0.1%: [; d=6pl/m², Norg=0.2%: [; d=6pl/m², Norg=0.3%: [; d=6pl/m², Norg=0.4%: [.

3.4.- Sensibilité du rendement au calendrier de lutte contre les adventices

Le diagnostic des causes de la contrainte enherbement conduisait à formuler les hypothèses suivantes concernant son interaction avec le climat local:

- pour des dates de semis précoces, à une période de faible fréquence des pluies, la levée des adventices après le dernier travail du sol devrait être en moyenne moins rapide et donc moins préjudiciable au maïs que pour des dates de semis ayant lieu lorsque les pluies sont fréquentes, d'où une influence de la date de semis sur l'effet sur le rendement d'un décalage entre le dernier travail et le semis,

- le risque d'échec des sarclages varie avec la probabilité que la fréquence des pluies soit élevée à la date du sarclage, et donc varie avec la date de semis,

- la contrainte enherbement est sensible à l'écart entre la date de sarclage et la date de semis,

- et enfin ces réponses de la contrainte enherbement aux conditions pluviométriques dépendent du rapport entre les exigences de la culture et l'offre du milieu pour l'eau et l'azote, dans la mesure où comme on l'a vu la croissance des adventices est favorisée par les autres contraintes.

Afin de tester ces hypothèses, le dispositif de simulation qui a été utilisé comprenait 448 situations fictives résultant des combinaisons des facteurs suivants:

- facteur date de semis avec 7 dates de dix en dix jours à partir du jour 303 ("zoom" sur les dates de la période de semis optimale définie ci-dessus)

- facteur risque d'échec des sarclages du à la pluviométrie sur l'efficacité des sarclages, avec deux modalités; "avec risque" (telle que modélisée au chapitre précédent) et "sans risque" (fonction désactivée dans le programme),

- facteur écart entre le dernier hersage et le semis, avec deux modalités; 0 et 10 jours,

- facteur date de sarclage, avec quatre modalités; 20, 25, 30 et 35 jours après semis.

- facteur offre du milieu, avec deux modalités, "favorable" (profondeur du sol=180cm, soit RU=180mm et stock N=0.35%) et "contraignante" (profondeur=50cm, soit RU=50mm, et stock N=0.1%)

- facteur exigences de la culture avec deux modalités, "intensive" (dose de 50kgN/ha dont 25% au semis et 75% à 30jours, peuplement de 6 plantes/m²), et "extensive" (pas d'apport de N, 3 plantes/m²).

Les résultats sont donnés à la figure 5.14. Pour la culture intensive, le risque d'échec des sarclages est plus élevé pour les semis de la troisième décennie de novembre (date 324), lorsque le semis est retardé par rapport au dernier hersage, ce qui est attribuable à la fréquence particulièrement élevée des précipitations dans la deuxième moitié de décembre. Il s'agit de la seule interaction importante entre la date de semis et le calendrier de lutte contre l'enherbement révélée par ces simulations.

Quelle que soit la date de semis, la culture intensive est sensible au calendrier de désherbage pour les deux types de sol, avec un effet plus important du risque d'échec des sarclages lorsque le sol est contraignant et que le semis est retardé par rapport au hersage. Dans le cas de la culture extensive, l'effet du calendrier de lutte contre les adventices n'est important que lorsque le sol est peu contraignant, les conditions étant alors très favorables aux adventices (milieu favorable et culture exerçant une compétition faible).

Le sarclage à 25 jours permet de limiter légèrement les risques d'échecs de sarclages, par rapport aux sarclages plus tardifs, mais en condition de réussite systématique des sarclages, la productivité est faiblement plus élevée lorsque ces derniers sont réalisés à 30 jours après semis, les dates 20 et 35 jours étant défavorables dans tous les cas (fig.5.15).

Dans toutes les situations où le rendement atteint ou dépassé huit années sur dix est sensible aux caractéristiques de la lutte contre les adventices, le facteur ayant l'influence la plus forte est le risque d'échec des sarclages, suivi du décalage entre hersage et semis, puis de la date de sarclage.

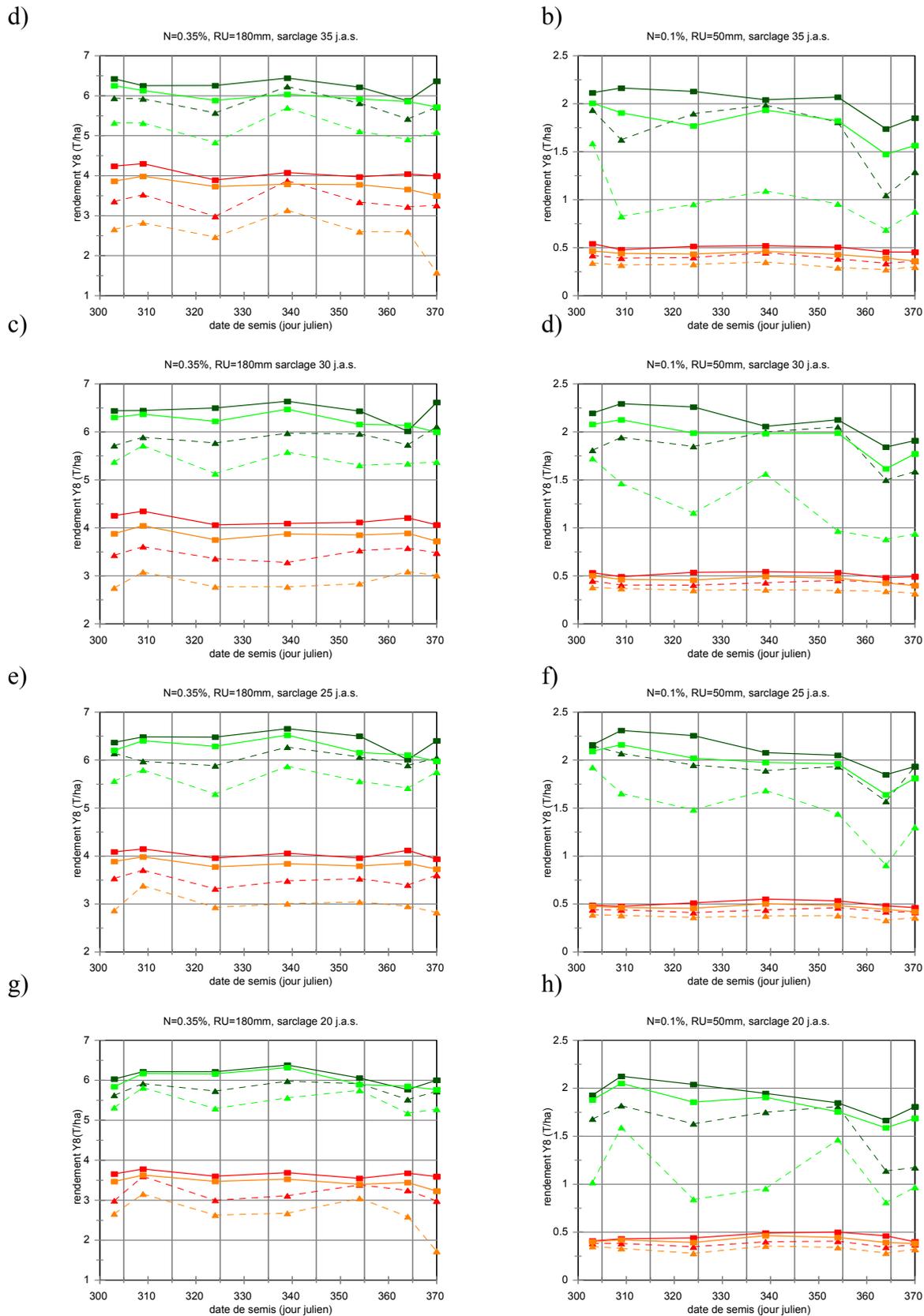


Figure 5.14. Sensibilité du rendement atteint ou dépassé 8 années sur 10 (Y8) aux facteurs de la contrainte enherbement et à leurs interactions avec les contrainte azotée et hydrique. Maïs intensif (tracés vert foncé et vert clair, 50kgN/ha, 6pl/m²) et extensif (tracés rouge et orange, 0kgN/ha, 3pl/m²), sans (traits continus) et avec (pointillés) influence des pluies sur l'efficacité des sarclages et avec (vert clair, orange) et sans (vert foncé, rouge) écart de 10 jours entre dernier travail du sol et semis. Sol profond et fertile (a, c, e, g) et sol peu profond et pauvre (b, d, f, h). Sarclage à 35, 30, 25 et 20 jours après semis (j.a.s, respectivement a et b, c et d, e et f, g et h)

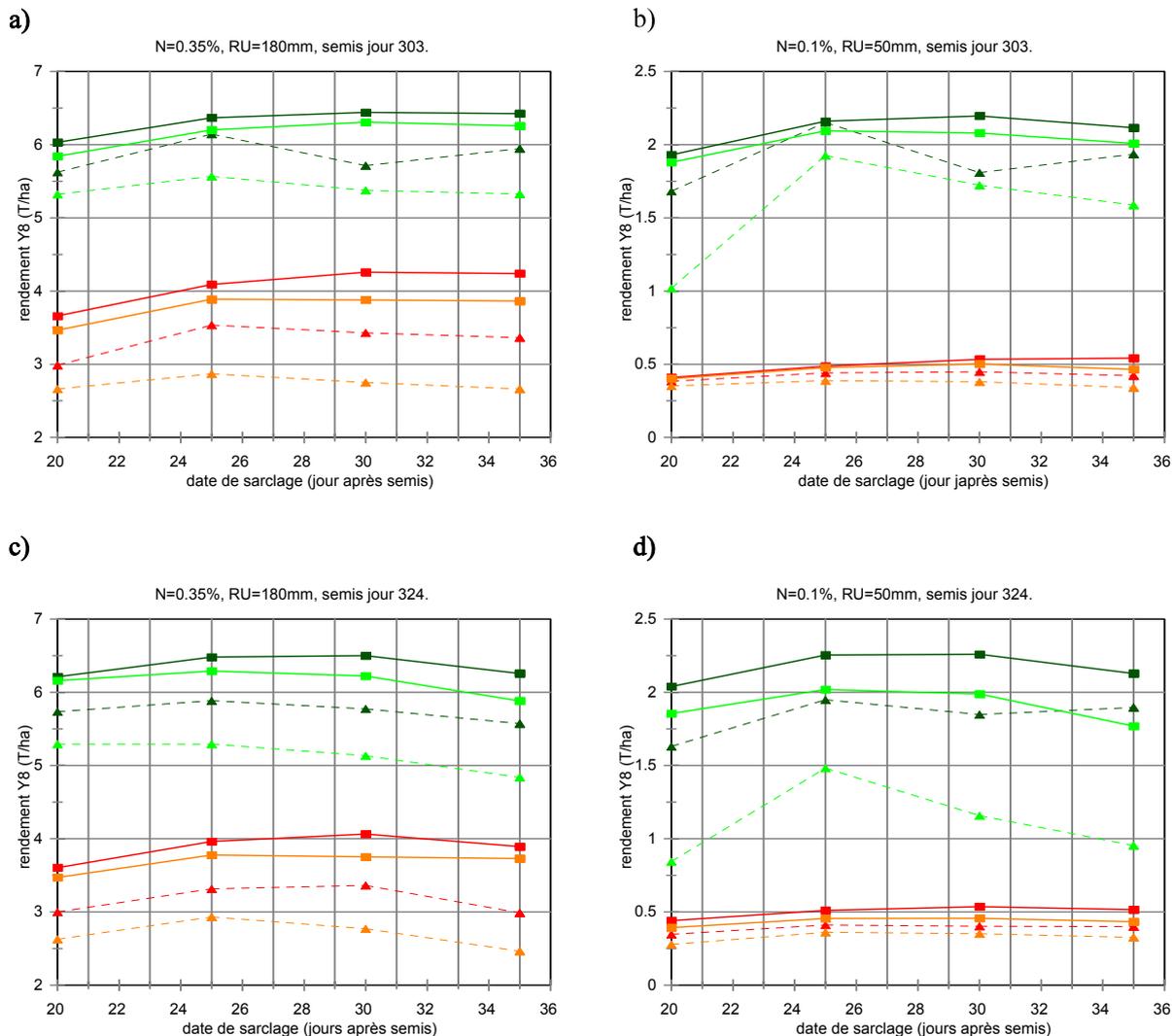


Figure 5.15.- Effet, sur le rendement atteint ou dépassé huit années sur 10, du calendrier de sarclage et ses interactions avec les facteurs des contraintes hydrique et azotée, pour deux dates de semis: jour 303 (30 octobre, a et b) et jour 324 (20 novembre, c et d). Maïs intensif (tracés vert clair et vert foncé, 50kgN/ha, 6pl/m²) et extensif (tracés rouge et orange, 0kgN/ha, 3pl/m²), sans (traits continus) et avec (pointillés) influence des pluies sur l'efficacité des sarclages et avec (vert clair, orange) et sans (vert foncé, rouge) écart de 10 jours entre dernier travail du sol et semis. Sol profond et fertile (a et c) et sol peu profond et pauvre (b et d)

4.- Synthèse de la hiérarchie des contraintes et de leurs causes élémentaires

A l'issue de cette partie, la hiérarchie des contraintes (fig.5.4 et 5.6) peut être enrichie d'une information sur les causes "élémentaires" de ces contraintes (fig. 5.16). Ces causes "élémentaires" sont les paramètres d'entrée du modèle prenant fréquemment, dans l'échantillon de situations culturales réelles, des valeurs telles que les contraintes se manifestent pour les années du suivi agronomique, et dont on a vérifié que les effets seraient similaires pour une série de données pluviométriques représentative du climat local. En d'autres termes, on a donc obtenu, à ce stade de l'étude, un repérage des paramètres du modèle responsables des pertes de productivité à Silvânia. En outre, on dispose, grâce aux analyses de sensibilité utilisant la série historique de données climatique, d'une évaluation des valeurs de ces paramètres maximisant la productivité atteinte ou dépassée huit années sur 10.

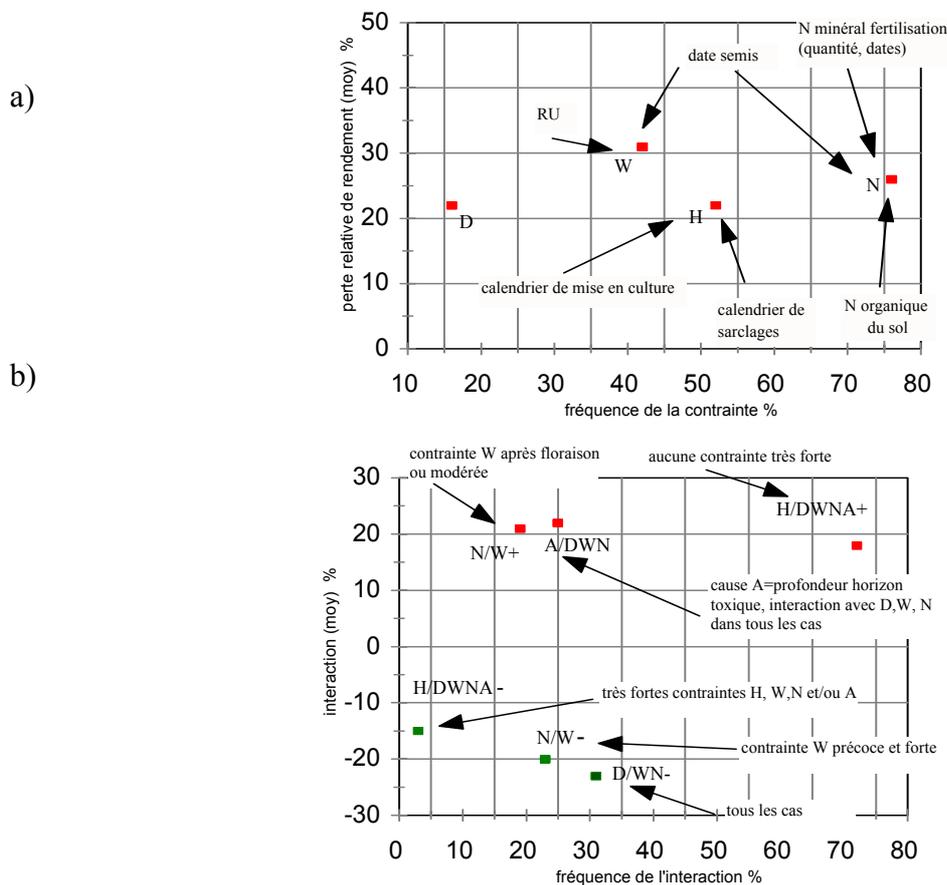


Figure 5.16.- Mise à jour (a) de la figure 5.4 et (b) de la figure 5.6 pour y incorporer les facteurs détectés comme étant à l'origine des contraintes prépondérantes à Silvânia et de leurs interactions, pour les trois années de l'enquête agronomique.

5.- Distribution, chez les producteurs, des facteurs techniques et édaphiques à l'origine des contraintes

L'objet du présent paragraphe est d'analyser le lien entre la diversité des situations techniques et édaphiques et les valeurs prises par les paramètres d'entrée du modèle repérés dans ce qui précède comme à l'origine des principales contraintes présentes à Silvânia. Cette étape finale du diagnostic doit en effet permettre de comprendre les interactions entre la gestion technique des parcelles et le milieu dans la réalisation des contraintes limitant la productivité de la culture. Elle doit:

-fournir des voies d'amélioration de la productivité dans la région, dans les limites permises par un raisonnement cantonné à l'échelle de la parcelle cultivée,

-déboucher sur une typologie des situations édapho-techniques du point de vue de la variabilité inter-annuelle des productivités, typologie requise pour l'étude, à l'échelle des exploitations, du rôle des risques dans les choix techniques des producteurs.

5.1.- Contrainte Aluminique et calcique à l'enracinement.

Le chaulage est couramment pratiqué à Silvânia pour corriger l'acidité des sols. L'attribution de crédits d'équipement aux producteurs est d'ailleurs conditionnée, entre autres, à la réalisation d'analyses de sol sur les différentes parcelles de l'exploitation, et au chaulage si ce dernier s'avère nécessaire conformément à une formule empirique mise au point par l'EMBRAPA-CPAC et établie pour ramener le pH du sol entre 5.5 et 6 dans l'horizon 0-20cm. Cette formule conduit en général à annuler la toxicité aluminique et la déficience en Ca jusqu'à 40 cm de profondeur un an après l'application et pour une durée de l'ordre de 5 ans, dans les *latossolos* pour lesquels elle a été développée. Beaucoup des sols cultivés par les producteurs de Silvânia se distinguent de ces *latossolos* en particulier par des charges élevées en cailloux et graviers non poreux. Or la formule de chaulage y est appliquée sur la base des analyse de la terre tamisée, sans tenir compte de la teneur en éléments grossiers. Ceci doit logiquement conduire, à profil de pH égal au départ, et compte tenu de la mobilité du calcium, à une correction du sol jusqu'à des profondeurs plus élevées que pour les *latossolos* presque totalement exempts d'éléments grossiers. Les apports de calcaire effectués par les producteurs de Silvânia sont donc à priori plutôt excessifs qu'insuffisants, par rapport au critère appliqué par les grands producteurs de maïs et de soja sur *latossolos*.

Par ailleurs, la carte des sols de Silvânia fournit une information sur la distribution de cette contrainte. Nos données sont cohérentes avec la carte des sols, mais la profondeur où la contrainte apparaît est très variable, tout en étant très rarement inférieure à 60cm. Nos données ne permettent pas de savoir si ceci est le résultat d'une correction généralisée de sols où, avant amendement la contrainte pouvait apparaître dès la surface, ou bien d'une caractéristique des sols indépendante de leur gestion par les agriculteurs, mais ces profondeurs relativement élevées observables actuellement sont telles que la contrainte aluminique ne peut guère être davantage réduite via des amendements calciques.

En tout état de cause, on retiendra donc que pour une amélioration de la gestion technique de la contrainte Al/Ca dans le sens d'une réduction de l'effet de la contrainte sur le rendement, on ne peut guère envisager que l'optimisation des dates de semis, de la même manière que pour les causes physiques de réduction de la réserve utile racinaire, qui conduit donc à retenir la date la plus précoce possible à partir de la première décade de novembre. Dans le sens d'une réduction des coûts de production, par contre, la réduction des doses de calcaire employées devrait être étudiée en adaptant la formule utilisée au contexte particulier des sols de Silvânia.

5.2.- Faibles densités de plantes à la levée

La variabilité des densités de peuplement à la levée pouvait provenir:

- de réglages délibérés et variables des densités de semis par les producteurs,
- de difficultés de contrôle de la densité de semis par les producteurs,.
- de problèmes de germination dus à des contraintes sanitaires, hydriques, ou de conservation des semences.

Dans le cas des itinéraires techniques où le semis est manuel, la densité de peuplement à la levée est bien le résultat de la densité de semis: les observations sur la géométrie de levée font apparaître une grande régularité dans les levées avec peu de manques, la forte proportion de plantes "agglutinées" témoignant simplement de semis à plusieurs graines par poquets. Par contraste, les semis réalisés au semoir attelé à un tracteur ou en traction animale cumulent fréquemment des problèmes de pieds manquants et de pieds anormalement rapprochés (tableau 5.4). Ces pieds "agglutinés" témoignent d'une mauvaise distribution des semences sur la ligne de semis. Les manques peuvent provenir de cette même cause comme de problèmes de germination.

type de semis	proportion de pieds ou poquets manquants	proportion de pieds agglutinés	nombre de placettes	% de placettes dans le type de semis
manuel (18 placettes)	faible	faible	1	5.5
	faible	forte	16	89
	moyenne	moyenne	1	5.5
traction animale (9 placettes)	faible	forte	2	22.2
	moyenne	faible	1	11.1
	moyenne	forte	3	33.3
	forte	moyenne	2	22.2
	forte	forte	1	11.1
tracteur (77 placettes)	faible	faible	4	5.2
	faible	moyenne	6	7.8
	faible	forte	2	2.6
	moyenne	faible	13	16.9
	moyenne	moyenne	9	11.7
	moyenne	forte	6	7.8
	forte	faible	23	29.9
	forte	moyenne	11	14.3
	forte	forte	3	3.9

Tableau 5.4: géométrie de levée dans le sous-échantillon de placettes où elle a été observée. Repérage visuel d'espaces anormalement importants ("manquants") ou faibles ("plantes agglutinées") entre plantes par rapport à la répartition moyenne observée sur deux segments de rang de 2m de longueur. Proportions de "manquants" faible: moins d'un manquant; moyenne: de 1 à 2 manquants; forte: plus de deux manquants par mètre de rang. Proportion de "plantes agglutinées" faible: moins d'un cas; moyenne: de 1 à 4 cas; forte: plus de 4 cas pour 4 mètres de rang.

ps: profondeur de semis (cm)	avec contrainte hydrique au semis		sans contrainte hydrique au semis	
	densité moyenne de plantes à la levée (m ⁻²)	nombre de placettes	densité moyenne de plantes à la levée (m ⁻²)	nombre de placettes
ps<2.4 (min(ps)=1.4)	3.2	2	4.7	10
2.4<=ps<3.3	4.3	12	5.4	7
ps<3.3	4.1 ^a	14	5.0 ^b	17
3.3<=ps<3.7	4.2	22	4.1	12
ps>3.7 (max(ps)=4.9)	4.8	6	4.1	5

Tableau 5.5. Effet d'une contrainte hydrique au semis sur les densités de levée en fonction de la profondeur de semis, pour les placettes semées en traction animale ou au tracteur. Une contrainte hydrique a été considérée lorsque STICS simulait que le sol était à pF4.2 pendant au moins une journée sur la couche 0-5 cm au cours des cinq jours suivant le semis. Différence significative entre (a) et (b), P=0.016. Pas de différences significatives au seuil de 5% entre les autres valeurs.

D'éventuels problèmes de qualité des semences étaient hors de cause dans les problèmes de levée, compte tenu des résultats de tests de germination effectués systématiquement sur des échantillons de semences prélevés chez chaque producteur de l'enquête agronomique. De plus, l'observation directe des semences sur des lignes de semis avec de fortes proportions de manquants, à proximité immédiate des placettes, indiquait selon les cas des absences de semences, suggérant un problème de distribution par le semoir, ou des semences non germées et non imbibées, et parfois des plantules fanées, orientant le diagnostic vers une contrainte hydrique. L'hypothèse d'attaques parasitaires semblait devoir être écartée dans la plupart des cas, faute de symptômes tels que débris de semences ou de plantules, semences ou plantules pourries, ou encore plantes ou semences partiellement atteintes au voisinage des plantes mortes ou des semences non germées. Dans de rares cas, toutefois, des prélèvements de semences par des fourmis ont été identifiés, provoquant des tâches plus ou moins circulaires vierges de toute végétation, la fourmilière étant visible à faible distance.

Les données quantitatives confirment qu'au moins certains manques à la levée sont imputables à une contrainte hydrique suivant le semis, pour des situations semées mécaniquement et où la profondeur de semis est faible (tableau 5.5). Les placettes semées en traction animale, bien qu'ayant des profondeurs de semis parfois faibles subissent rarement une contrainte hydrique, les semis étant dans ce cas, contrairement au cas des semis au tracteur presque systématiquement réalisés immédiatement après une pluie. L'analyse des données collectées sur la préparation du sol et les semis montre que les profondeurs de travail du sol et de semis réalisés au tracteur sont fréquemment faibles pour les situations où la pente est forte, la pierrosité de surface est importante ou le précédent cultural est un pâturage, ces trois contraintes à la mise en culture étant diversement combinées dans les placettes de telle manière que leur hiérarchie ne peut être clairement établie (tableaux 5.6 a et b), la pierrosité de surface ou la pente semblant toutefois peu contraignantes lorsque seules en cause. La très grande majorité des situations sur *cambissolos* et quelques situations sur "terre de culture", en sol alluvial notamment, présentent simultanément ces deux contraintes, tandis que toutes les situations sur *latossolos* en sont remarquablement exemptes (annexe 4.1).

	nombre de placettes		situations avec forte contrainte de mise en culture (précédent=pâturage ou pierrosité forte en surface ou pente forte)						
	total	non	oui						
ps:profondeur de semis (cm)			total	pierrosité seule (1)	pente seule (2)	précédent pâturage seul (3)	(1) et (2)	(1) et (3)	(1) et (2) et (3)
1.4<=ps<2.4	13	2	11	2	2	3	2	2	0
2.4<=ps<3.3	26	14	12	0	0	0	8	0	4
3.3<=ps<3.7	23	15	8	3	1	0	3	0	1
3.7<=ps<4.9	13	10	3	2	1	0	0	0	0

Tableau 5.6a. Influence de contraintes à la mise en culture sur la profondeur de semis pour les placettes semées au tracteur.

	nombre de placettes		situations avec forte contrainte de mise en culture (précédent=pâturage ou pierrosité forte en surface ou pente forte)						
	total	non	oui						
pt:profondeur de travail (cm)			total	pierrosité seule (1)	pente seule (2)	précédent pâturage seul (3)	(1) et (2)	(1) et (3)	(1) et (2) et (3)
pt<10	9	4	5	2	1	2	0	1	3
10<=pt<14	26	14	12	1	3	1	3	1	2
14<=pt<17	31	17	14	2	2	0	7	0	0
pt >=17	26	20	6	2	1	0	3	0	0

Tableau 5.6b. Influence de contraintes à la mise en culture sur la profondeur de travail du sol.

Les problèmes de distribution de semences par les semoirs, provoquant des manques et/ou des plantes anormalement rapprochées, ainsi que les faibles profondeurs de semis s'expliquent en grande partie par des contraintes liées à la gestion collective du matériel de mise en culture, aggravant ces contraintes édaphiques. Rappelons que le matériel concerné est constitué des tracteurs, des engins de travail du sol utilisés pour tous les itinéraires techniques observés et des semoirs utilisés pour tous les semis au tracteur, matériel acquis et géré par les associations de producteurs et conduit par du personnel recruté par ces associations. Le matériel de semis manuel et en traction animale appartient au contraire aux producteurs qui ont ainsi l'entière maîtrise de l'opération de semis. Dans la plupart des associations de producteurs, les tractoristes n'avaient pas reçu de formation appropriée, l'utilisation des équipements était extrêmement intensive, avec de très nombreux trajets sur des pistes difficiles, favorisant une usure rapide des semoirs et des disques des déchaumeuses et pulvérisateurs, et les règles de gestion n'étaient pas favorables à une prise en compte adéquate de la diversité des états des sols en surface. Le réglage des semoirs était, dans plusieurs associations, effectué une fois pour toutes au début de la campagne agricole. L'ordre de passage du tracteur chez les différents associés était le plus souvent tiré au sort, sans possibilité de tenir compte des états hydriques des sols, ce qui explique la forte proportion de parcelles subissant une contrainte hydrique au semis pour les itinéraires avec semis au tracteur comparativement aux semis manuels et en traction animale où le choix de la date de semis était davantage sous le contrôle de l'exploitant. Enfin, il est arrivé, au cours de la campagne 1994-1995, que le disque distributeur du semoir ne soit pas adapté au calibre des semences, sans possibilité pour l'exploitant d'y remédier.

Synthétisant ces informations, un modèle simplifié -et qualitatif, cette fois-ci- d'élaboration de la densité de peuplement peut être proposé, dans le but de compléter le modèle de simulation précédemment construit et pour lequel la densité de peuplement était une donnée d'entrée. Pour ce "module de densité", les paramètres d'entrée sont l'itinéraire technique et les caractéristiques de surface du sol; pente et pierrosité:

- si le semis est manuel, la densité de semis est un choix de l'exploitant et est indépendante de la situation édaphique et du précédent. Le semis est réalisé sur une pluie garantissant l'absence de contrainte hydrique pour cinq jours, la densité de levée étant égale à la densité de semis. La profondeur de semis est également un choix de l'exploitant,

- si le semis est en traction animale, la densité de semis est un choix de l'exploitant si le sol est non pentu et non pierreux et si le précédent cultural n'est pas un pâturage. Dans le cas

contraire, elle échappe à la maîtrise de l'exploitant, l'intervalle de variation de la densité de levée dépendant de la qualité de la gestion du matériel de travail du sol par l'association à laquelle appartient le producteur. Le semis est effectué sur une pluie garantissant l'absence de contrainte hydrique pour cinq jours, et la densité de levée est égale à la densité de semis,

- si le semis est réalisé au semoir attelé à un tracteur, la densité de semis est un choix de l'exploitant si le sol est non pentu et non pierreux et si le précédent cultural n'est pas un pâturage. Elle est aléatoire sinon, l'intervalle de variation de la densité dépendant de la qualité de la gestion du matériel de travail du sol et du matériel de semis par l'association à laquelle appartient le producteur. La date de semis est indépendante des événements pluvieux et la densité de levée est inférieure à la densité de semis si des contraintes hydriques se produisent et si la profondeur de semis est faible, ce qui se produit sur les situations pentues et pierreuses ou lorsque le précédent cultural est un pâturage.

5.3.- Lutte contre les adventices

Les placettes en semis manuel et en traction animale se distinguent des situations semées au tracteur par un premier sarclage plus précoce (22 jours après semis contre 30, en moyenne) avec un nombre légèrement plus fréquent de deuxième sarclage corrigeant un échec du premier. Ceci est à mettre en relation avec le fait que les exploitations pratiquant le semis manuel, et dans une moindre mesure celles ayant recours à la traction animale, sont des exploitations où l'élevage est extensif et où la force de travail est davantage disponible pour les cultures que dans les exploitations d'élevage laitier intensif qui sont celles ayant le plus recours à la mécanisation et où la gestion des cultures est en compétition, pour la force de travail, avec l'alimentation et la traite des animaux. L'emploi des herbicides est exceptionnel dans notre échantillon, mais semble augmenter la dernière année de l'étude. Sa généralisation, bien qu'exigeant une maîtrise technique nouvelle de la part des exploitants, serait une évolution logique du système de culture des exploitations laitières en cours d'apparition, dans la mesure où cela permettrait de libérer de la force de travail tout en améliorant, certes après une période d'apprentissage de la technique, la lutte contre les adventices.

Les semis au tracteur s'opposent également aux autres pour ce qui concerne les délais entre le passage de pulvérisateur et le semis, de 6 jours en moyenne pour les semis manuels et en traction animale contre 10 jours pour les semis au tracteur, et l'on retrouve ici les difficultés liées à la

gestion du matériel collectif, évoquées lors de l'analyse de la densité de levée. Le tirage au sort du tour de rôle pour l'utilisation du matériel est en effet réalisé dans la plupart des associations sans dépendance entre les opérations de travail du sol et de semis. Ceci a été aggravé dans certains cas par le fait que les semences ou les engrais, achetés collectivement afin de bénéficier de prix avantageux, ont été livrés tardivement après la préparation des sols. Ce cas de figure a concerné également les semis manuels et en traction animale. Si certains producteurs ont opté alors pour un nouveau passage de pulvérisateur, beaucoup, dans l'incertitude de disposer du pulvérisateur puis du semoir dans un délai bref ont préféré semer malgré un enherbement déjà préoccupant.

Aucune dépendance n'a été détectée entre les différents types de milieux et le calendrier de lutte contre les adventices.

5.4.- Entrées d'azote

Compte tenu de l'absence quasi générale d'apports de matière organique dans les parcelles et du fait que pour la très grande majorité de celles-ci le maïs succède au maïs depuis une défriche remontant à plus de quinze ans, le stock d'azote organique est essentiellement une variable du milieu, peu influencée à court terme par la gestion technique des parcelles. Les sols de "terre de culture" de la région sud-ouest du municipio (communautés de Bom Jardim et Limeira), sur granites "basiques", c'est à dire en fait riches en minéraux ferro-magnésiens, constitués de *Podzolicos eutroficicos*, et de terra roxa estruturada, se distinguent par des valeurs sensiblement plus élevées du stock d'azote, avec des teneurs voisines de 0.20% (teneur en azote total en fin de saison sèche), tandis que les sols les plus pauvres se rencontrent dans le nord-est, sur les *cambissolos* développés sur granites leucocrathes, avec des teneurs inférieures à 0.10%. Dans la grande majorité des autres situations, ces teneurs sont comprises entre 0.11 et 0.17%. La variabilité reste élevée à l'intérieur de toutes les unités géologiques (annexe 4.2). Dans les rares cas où le précédent cultural est un pâturage, toutefois, le taux d'azote est nettement supérieur, tous milieux confondus, approchant 0.3%.

La fertilisation azotée est fournie le plus souvent (62% des cas) par un apport au semis constituant le tiers de la dose totale fournie, le reste étant apporté à 37.6+/-1.4 jours après semis (moyenne et intervalle de confiance à 95%). Dans 12% des cas, la dose est fractionnée en trois apports: 20% au semis, puis 50% à 33.4+/-2.4 jours après semis, et 30% à 50.2+/-2.9 jours après semis. Pour les 26% de cas restants, seul l'apport du semis à lieu et il s'agit:

- des situations sur précédent pâturage, où l'offre du sol en azote organique est très élevée,
- de situations où une pause dans les précipitations avait eu lieu pendant la période prévue pour cet apport, entre 30 et 40 jours après semis,
- de quelques parcelles où l'enherbement était très important dès le début du cycle.

On peut supposer qu'il s'agit dans ces deux derniers cas d'un choix tactique cohérent des agriculteurs, renonçant à un apport fertilisant compte tenu de conditions défavorables pour son application mais aussi pour sa valorisation en termes de gains de productivité.

La dose apportée est très variable dans l'échantillon. Elle est reliée à l'itinéraire technique, par définition de ces derniers, mais est indépendante de l'offre en azote organique du sol et de la densité de peuplement, en dehors des cas où le précédent est un pâturage (annexe 4.3).

A court terme, pour la gestion de la fertilité azotée, les apports fertilisants pourraient être davantage ajustés à l'offre organique des sols, à l'aide de courbes de réponse à l'engrais azoté du revenu par hectare, courbes à construire à partir de celles de la figure 5.11 en intégrant les données de prix des engrais et du grain de maïs. A long terme, cependant, compte tenu de l'absence d'apports organiques dans la plupart des parcelles, et de la culture continue du maïs dans la très grande majorité des cas, cette offre risque de se réduire d'autant plus qu'avec l'intensification récente de la culture les exportations augmentent, et il serait utile de rechercher des alternatives à la gestion actuelle de la matière organique par les agriculteurs. Avec la croissance actuelle de l'activité laitière dans ces exploitations, la quantité de fumier disponible devrait logiquement s'accroître, et son utilisation dans les parcelles de maïs pourrait, entre autres, être une réponse à ces inquiétudes à long terme.

5.5.-Réserve utile des sols

La réserve utile des sols cultivés à Silvânia est extrêmement variable en fonction de la profondeur des sols, de leur charge en graviers et cailloux, et dans une moindre mesure de la capacité de rétention de la terre fine. La dépendance de la réserve utile à la charge en cailloux suggère une fréquence plus élevée de stress hydriques à la levée, dont on a vu l'influence sur la densité de peuplement, pour les situations où cette charge en cailloux est élevée dans l'horizon de surface du sol. La réserve utile par mètre de sol est comprise entre 58 et 138 mm/m dans l'échantillon de placettes, avec une forte variabilité à l'intérieur des classes de situations

édaphiques (annexe 4.4). La profondeur du sol varie entre 50cm et plus de 200cm, et les réserves utiles totales de 35 à 220 mm.

Sur les “terras de culturas”, situées en bas de toposéquence, la pierrosité en surface est faible à nulle (inférieure à 10 % en volume) et les sols sont profonds. La variabilité des réserves utiles dans ces terroirs est peu élevée, sauf sur l’unité géologique “ARAXA”, où la teneur en cailloux est elle-même plus élevée et plus variable qu’ailleurs.

Sur versants longs de pente faible à moyenne où se trouvent les *latossolos* correspondants à la dénomination “terra de cerrados”, présents dans toutes les régions sauf sur les extrêmes constitués par les granites leucocrathes d’une part et par les granites riches en minéraux ferromagnésiens d’autre part, les pierrosités sont nulles sur tout le profil, les sols sont presque toujours très profonds, et les réserves utiles varient autour de 100mm/m de sol, en fonction de la teneur en argile.

Sur pentes fortes où se rencontrent les *cambissolos*, la pierrosité et la profondeur du sol, et ainsi les réserves utiles sont extrêmement variables dans toutes les régions où ces sols sont présents.

5.6.- *Date de semis*

Les dates de semis sont relativement variables dans l’échantillon de placettes. Elles sont significativement plus précoces, de près de trois semaines en moyenne, pour les semis manuels et en traction animale (entre le 5 et le 15 novembre pour 95% des situations semées manuellement) que pour les semis réalisés au tracteur (entre le 26 novembre et le 1er décembre pour 95% des situations). Cette relation entre le type et la date du semis reste inchangée lorsque cette dernière est exprimée en jours après la première pluie de la saison, dont la date a été peu variable pour les années étudiées. Quel que soit l’itinéraire technique pratiqué, la date de semis est indépendante du type de sol. Elle est par contre liée à l’association à laquelle appartient l’exploitant pour le cas des semis au tracteur (annexe 4.5).

6. Conclusion: Synthèse des causes édapho-techniques des contraintes et typologie des systèmes de cultures et des milieux.

Le diagnostic détaillé ainsi obtenu conduit à proposer une typologie des situations technico-édaphiques, dont la clé est formée par les facteurs suivants, identifiés comme prépondérants dans la variabilité des rendements:

- mode de semis, manuel, en traction animale ou au tracteur,
- caractère contraignant ou non du sol pour la réussite du semis et de la levée (pente et cailloux en surface ou non) dans le cas des itinéraires où le semis est réalisé au tracteur ou en traction animale
- réserve utile par mètre de sol
- profondeur d'un obstacle physique ou chimique à l'enracinement
- stock d'azote du sol.

Les autres facteurs de variabilité du rendement identifiés au cours du diagnostic sont dépendants de ces critères. La date de semis et son retard par rapport au dernier hersage, ainsi que le calendrier de sarclage et la fertilisation sont liés au mode de semis. La densité de peuplement résulte à la fois du mode de semis et du type de sol sur lequel il est réalisé (tableau 5.7).

La variabilité intra-classe des facteurs conditionnant la productivité reste élevée, qu'il s'agisse des facteurs à dominante technique, notamment pour la densité de peuplement et les doses d'azote apportées par fertilisation (tableau 5.7) ou qu'il s'agisse des facteurs spécifiquement édaphiques, notamment pour ce qui concerne les facteurs de la capacité de stockage en eau du sol (tableau 5.8). La typologie des sols distingue au total 10 classes, mais pour chaque région géologique du municipio et ainsi pour une exploitation donnée appartenant à l'une de ces régions, seules deux (zones I et II) ou quatre classes (zone III), peuvent être simultanément présentes.

La principale voie d'amélioration des productivités concerne les itinéraires techniques ayant recours au tracteur pour les semis, et porte sur une amélioration du calendrier des travaux de mise en culture, qui suppose une amélioration de la gestion collective du tracteur. Des améliorations sont possibles, pour tous les itinéraires techniques intensifs, à travers une meilleure adéquation des doses d'azote avec l'offre du sol et grâce à des dates de semis plus précoces.

itinéraire technique	date du dernier travail avant semis (jour depuis le 01/01)	date de semis (jour depuis le 01/01)	profondeur du semis (cm)	densité de peuplement à la levée (plantes/m ²)	N engrais(*) (kgN/ha)	calendrier de sarclage	
						date 1er sarclage (jours après semis)	date 2e sarclage (jours après semis). Entre (): fréquence moyenne d'un 2e sarclage
1:M	302+/-7j	311+/-5j, sur première pluie>10mm après dernier hersage.	4.2+/-0.5	3.7+/-0.6	10.8+/-10.2(1)	24+/-6	37+/-3 (0.33)
2: TA0: sol non pierreux ou non pentu			3.0+/-0.6	5.8+/-1.0	48.3+/-3.8(1)		
3: TAc: Tta sol pentu et pierreux				4.6+/-1.0			
4: T0: sol non pierreux ou non pentu	325+/-3.5j	332+/-3j, indépendant de la pluie	3.4+/-0.2	5.4+/-0.3	48.3+/-3.8(1) Ou 60.3+/-10.2(2)	32+/-3	44+/-5 (0.25)
5: Tc: sol pierreux et pentu			2.9+/-0.3	4.5 +/-0.5			
6: Tch: sol pierreux ou pentu et stress H à la levée				3.9+/-0.4			

(*) Doses d'engrais moyennes calculées en excluant les cas où seul l'apport au semis a été réalisé, correspondants soit à des précédents pâturages (cas rares) soit à un choix tactique en cours de cycle.(1): deux apports: 30% au semis, 70% à 38 jours après semis. (2): trois apports: 20% au semis, 50% à 33 jours, et 30% à 50 jours après semis.

Tableau 5.7.- Relation itinéraire technique x milieu et paramètres densité de peuplement, calendrier de mise en culture et de semis.

penne	pierrosité 0-20 (% vol.)	obstacle physique	horizon tox.	RUmm/m	Ntotal 0-20 (%)	nom vernaculaire	nom sol ¹	zone ²	code (nouvelle numérotation)				
faible à moyenne	nulle à faible moy: 3% min: 0% max: 16% cv:116%	non, prof >150cm	non	moy:95 min: 58 max: 114 (cv:16%)	moy:0.19 min:0.13 max:0.27 cv: 26%	cultura	Pe, TR	D (I)	1 (Dcu)				
							Pe	A et C (II)	2 (Ccu)				
			Pe, Pd	B (III)	3 (BcuAl-)								
	Pd, Lve	4 (BcuAl+)											
	nulle moy: 2% min: 0% max: 9% cv: 200%	non, prof > 200cm	non	moy: 100 min:71 max: 116, cv: 17%	moy: 0.15 min: 0.12 max: 0.17 cv: 16%		cerrado	Lva, Lve	A et C (II)	5 (CceAl-)			
								Lva, Lve, Lva alicos		6 (CceAl+)			
forte	moyenne à forte moy:18% min:1% max:37% cv: 55%	prof variable de 50 cm à 180cm (90% des cas: prof comprise entre 80 et 130 cm)	non	moy: 101 min: 68 max:138 cv: 22%	moy:0.15 min:0.09 max:0.23 cv:30%	meia-cultura	Cbe	D (I)	7 (Dmc)				
			non						moy:0.1 min: 0.04 max:0.15 cv:46%	meia-cultura	Cbe	A et C (II)	8 (Cmc)
			non						Campo	Cbe	B (III)	9 (Bmc/caAl-)	
			oui prof 90 à 120 cm						Campo	Cbd	B (III)	10 (Bca/Al-)	

1: Lve: Latossolo vermelho-escuro, Lva: Latossolo vermelho -amarelo, Pe: Podzólico eutrófico, Pd: Podzólico distrófico, TR: Terra roxa, Cbe: Cambissolo eutrófico, Cbd: Cambissolo distrófico.

2: Zones: I= Bom Jardim et Limeira, unités géologiques Granulito et Granitos "à biotite"; II: Variado, João de Deus, Quilombo, Santa Rita, unités Araxa et granitos (sauf modalités "à biotite" et "leucocrathes"), III: Santa Rita, Quilombo, unité granitos leucocraticos.

Tableau 5.8.- Nouvelle typologie des situations édaphiques

L'intérêt de ces augmentations de la productivité reste à évaluer en complétant les informations fournies par notre analyse strictement biophysique:

- par une analyse du revenu à l'hectare qui suppose de combiner nos informations sur la variabilité des rendements avec des informations sur le coût des intrants, la valeur des produits et le coût de la main d'oeuvre associés à chaque système de culture,

- par une analyse à l'échelle des exploitations permettant de tenir compte en particulier des contraintes de gestion de la main d'oeuvre à cette échelle, notamment pour ce qui concerne le raisonnement de la date de semis,

- et par une analyse au niveau des associations de producteurs, de manière à vérifier si les modifications de la gestion des chantiers de mise en culture suggérées sont possibles sans augmentation prohibitive des coûts d'exploitation.

Chapitre 6:
Discussion et Conclusion Générales

Les résultats obtenus dans les chapitres 4 à 5 nous permettent de revenir tout d'abord sur la question des erreurs du modèle, laissée en suspens à la fin du chapitre 4 et dont l'analyse peut être poursuivie grâce aux informations fournies par le chapitre 5. L'ensemble des résultats obtenus depuis le chapitre 3 nous permettra ensuite, avant de conclure, de proposer une discussion portant d'une part sur le diagnostic local réalisé et d'autre part sur la méthode élaborée, selon qu'on privilégie un objectif de diagnostic régional ou un objectif de production d'un modèle d'ingénieur.

1.- Sur les erreurs du modèle.

L'analyse de sensibilité que constituent les sections 2 à 4 du chapitre précédent nous a renseigné sur les paramètres d'entrée du modèle auxquels ce dernier est sensible. Ceux d'entre eux pour lesquels l'erreur d'estimation était importante, soit à cause d'une forte variabilité intra situation culturale, soit en raison d'imprécision de la mesure, soit encore pour les deux raisons, étaient:

- le profil de réserve utile du sol, intégrant la profondeur limite (physique ou chimique) d'enracinement,
- le profil de stock organique du sol, produit de la teneur en azote organique et de la profondeur d'humification,
- les doses d'azote minéral apporté par fertilisation.

Dans les trois cas, l'erreur commise était de l'ordre de 20%, selon une approximation à partir de mesures de référence particulièrement précises obtenues pour un petit nombre de placettes lors de la première année de l'enquête agronomique et en particulier pour les réserves utiles sur le dispositif de suivi du bilan hydrique in situ (densités apparentes mesurées au cylindre et courbes de rétention obtenues à la presse à membrane sur échantillons non remaniés, prélevés sur tranchées) pour lesquelles on disposait également des valeurs obtenues en employant le protocole opératoire appliqué à l'ensemble des placettes pendant toute la durée de l'étude (courbes de rétention obtenues sur échantillons remaniés, par centrifugation, et densités apparentes extrapolées à chaque placette à partir des valeurs obtenues au cylindre sur les profils culturaux correspondant au même type de sol que la placette).

Afin d'évaluer grossièrement la part de la propagation de ces erreurs par le modèle dans les écarts entre rendements observés et simulés, on a suivi une approche dérivée de la méthode de

Monte-Carlo en la simplifiant. De nouvelles simulations ont été réalisées pour les placettes ayant servi à la validation du modèle et pour lesquelles les contraintes supplémentaires étaient nulles (chapitre 4, §5), soit 36 placettes sur les 54 du jeu sans données manquantes de situations culturales. Trois niveaux ont été attribués à chacun des trois paramètres cités ci-dessus: la valeur utilisée dans la simulation originale, c'est à dire la valeur estimée du paramètre dans la placette, et cette estimation + et - 20%. Tous les autres paramètres étaient fixés à leur valeur estimée comme dans la simulation originale. Vingt-sept simulations du jeu de données ont donc été conduites, la simulation sans introduction d'erreur étant la simulation de référence, par rapport à laquelle était calculé, pour chacune des vingt-six autres, l'écart résultant de la combinaison des erreurs qui la caractérisait. L'intervalle de confiance à 95% du rendement simulé ainsi pour chaque placette a été retenu comme critère de caractérisation de l'erreur propagée. Le "bruit" ainsi obtenu par propagation des erreurs de mesures par le modèle a été comparé, en valeur absolue, aux écarts entre rendement simulé et rendement observé (fig.5.17).

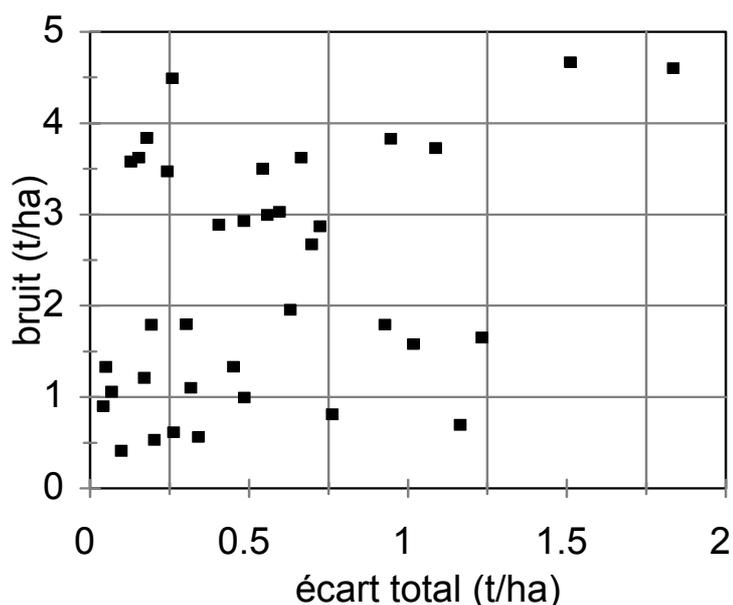


Figure 5.17.- Bruit des simulations résultant de la propagation des erreurs de mesures, comparé (en valeur absolue) à l'écart total entre rendement simulé et mesuré, pour les 37 placettes sans contraintes supplémentaires. Le bruit est l'intervalle de confiance des rendements simulés en faisant varier la réserve utile et le stock d'azote du sol ainsi que la dose de N minéral entre les extrêmes de leurs intervalles de confiance.

Il en résulte que pour la majorité des placettes, l'écart et le bruit sont du même ordre de grandeur, le bruit étant le plus souvent supérieur à l'écart. Ceci confirme que la source d'erreur dominante dans les simulations est l'erreur de mesure propagée. Avec le jeu de données dont on dispose, il aurait donc été vain de tenter d'améliorer la simulation des contraintes déjà modélisées ou de modéliser les effets des contraintes supplémentaires.

Les validations de ce modèle qui ont été réalisées aux différents stades de sa construction n'en demeurent pas moins très imparfaites, dans la mesure où elles ont été pratiquées en ayant recours à des données ayant servi à son calage et sans pouvoir comparer simulation et réalité pour certaines variables importantes qui n'étaient pas mesurées, notamment concernant l'azote dans le sol et la plante, qui auraient permis de mieux évaluer la pertinence du module de bilan azoté.

Rappelons en outre que ce modèle doit servir à fournir des simulations de rendement à un autre modèle simulant quant à lui les choix stratégiques de l'exploitant en termes de systèmes de culture et de systèmes d'élevages appliqués aux différentes unités de milieu de son exploitation, selon une méthodologie évoquée au chapitre 1. La question de savoir si les simulations de rendements permises par le modèle que nous avons mis au point sont d'une précision suffisante pour les besoins de l'analyse à l'échelle des exploitations, ne peut, quant à elle, être traitée sans tenir compte de la sensibilité du modèle d'exploitation au paramètre d'entrée qu'est pour lui le rendement.

2.- Sur le diagnostic local des contraintes limitant la productivité et des moyens de les réduire.

Si l'on se réfère aux données de rendement de maïs mesurées de 1992 à 1994 dans le réseau de fermes de référence de Silvânia on constate un doublement des productivités moyennes, de 2.5 T/ha à 5T/ha, imputables à l'évolution des itinéraires techniques depuis des itinéraires manuels ou en traction animale, sans intrants et avec recours à des variétés locales, vers les itinéraires actuels mécanisés, fertilisés et utilisant des hybrides (Affholder, 1995c). Le diagnostic réalisé dans la présente thèse a montré qu'une croissance importante des rendements est encore possible sous réserve de résoudre les difficultés de gestion du matériel collectif de préparation des sols et de semis, de manière à favoriser une meilleure maintenance et une adaptation aux conditions de chaque parcelle des réglages des outils et du calendrier de mise en culture. La marge de progrès et les risques associés aux itinéraires les plus intensifs, cependant, sont variables selon

les régions du *municipio*: dans les zones les plus défavorables, la toxicité aluminique en profondeur reste un obstacle difficilement surmontable par les techniques actuelles, et dans bien des sols de versant la pierrosité et la pente rendent la mise en culture toujours délicate.

A long terme, et bien que les symptômes d'érosion et de compaction des sols soient encore peu importants et sans conséquences mesurables sur les rendements, on peut craindre qu'ils s'amplifient avec l'usage répété d'instruments à disque sur des sols *à priori* relativement sensibles. En outre, l'absence d'apports organiques et de rotation culturale est d'autant plus préoccupante que les exportations de biomasse hors des parcelles augmentent avec la généralisation de l'ensilage.

Des améliorations des pratiques culturales deviendront nécessaires tôt ou tard afin de garantir la conservation à long terme des potentialités des sols. On peut espérer une augmentation de l'offre en fumier dans les exploitations, en relation avec le développement de l'élevage laitier pour lequel l'ensilage est pratiqué, et que ce fumier permette davantage de restitutions vers les parcelles de maïs, mais aussi des transferts de fertilité depuis les pâturage vers les cultures. Le recours aux semis direct dans des plantes de couverture, qui semble déjà séduire certains grands producteurs des "*chapadas*", pourrait aussi être une alternative intéressante et qui mérite d'être étudiée.

3.- Sur la méthode lorsque l'objectif est le diagnostic

Cette discussion renvoyant aux différentes étapes de la méthodologie formalisée au premier chapitre, il a été jugé utile de présenter ici à nouveau le diagramme synthétique correspondant (figure 6.1).

3.1.- Principaux points forts de la méthode

Un des principaux défis du diagnostic agronomique est ce que nous avons appelé "l'étape Bd" de repérage des contraintes responsables des écarts entre le rendement réel et un rendement de référence, étape correspondant au "*first diagnosis stage*" selon la terminologie employée par Doré et al. (1997). Le rendement de référence par rapport auquel nous avons analysé les rendements réels n'était pas le rendement potentiel permis par le rayonnement et la température, mais un rendement simulé intégrant déjà les effets des contraintes hydrique, azotée et de faible densité de peuplement, pour lesquelles on pouvait supposer *à priori* un poids important dans la

variabilité des rendements de la région étudiée. Le nombre de contraintes restant à diagnostiquer était ainsi réduit. A condition de disposer d'un modèle valide pour simuler les effets de contraintes dont on est certain qu'elles ont une influence importante dans la région, cette approche est particulièrement utile pour les contextes où de très nombreuses autres contraintes peuvent *a priori* être soupçonnées de limiter les rendements sans que l'une d'entre elles ait un effet nettement prépondérant sur les autres, comme c'était le cas dans notre région d'étude. En effet, toutes les opérations d'analyse de données impliquées pour la détection des contraintes sont alors facilitées:

- la probabilité de rencontrer des placettes ne différant entre elles que par une seule contrainte est plus élevée que lorsque le rendement de référence est le rendement potentiel, et cette probabilité est d'autant plus élevée que le nombre de contraintes intégrées au modèle est lui-même élevé,

- les profils de réduction de croissance à analyser sont théoriquement moins nombreux,
- et enfin les chances sont augmentées d'établir une relation générale dans l'échantillon ou une partie de ce dernier entre un unique indicateur de contrainte et la croissance à un certain moment du cycle.

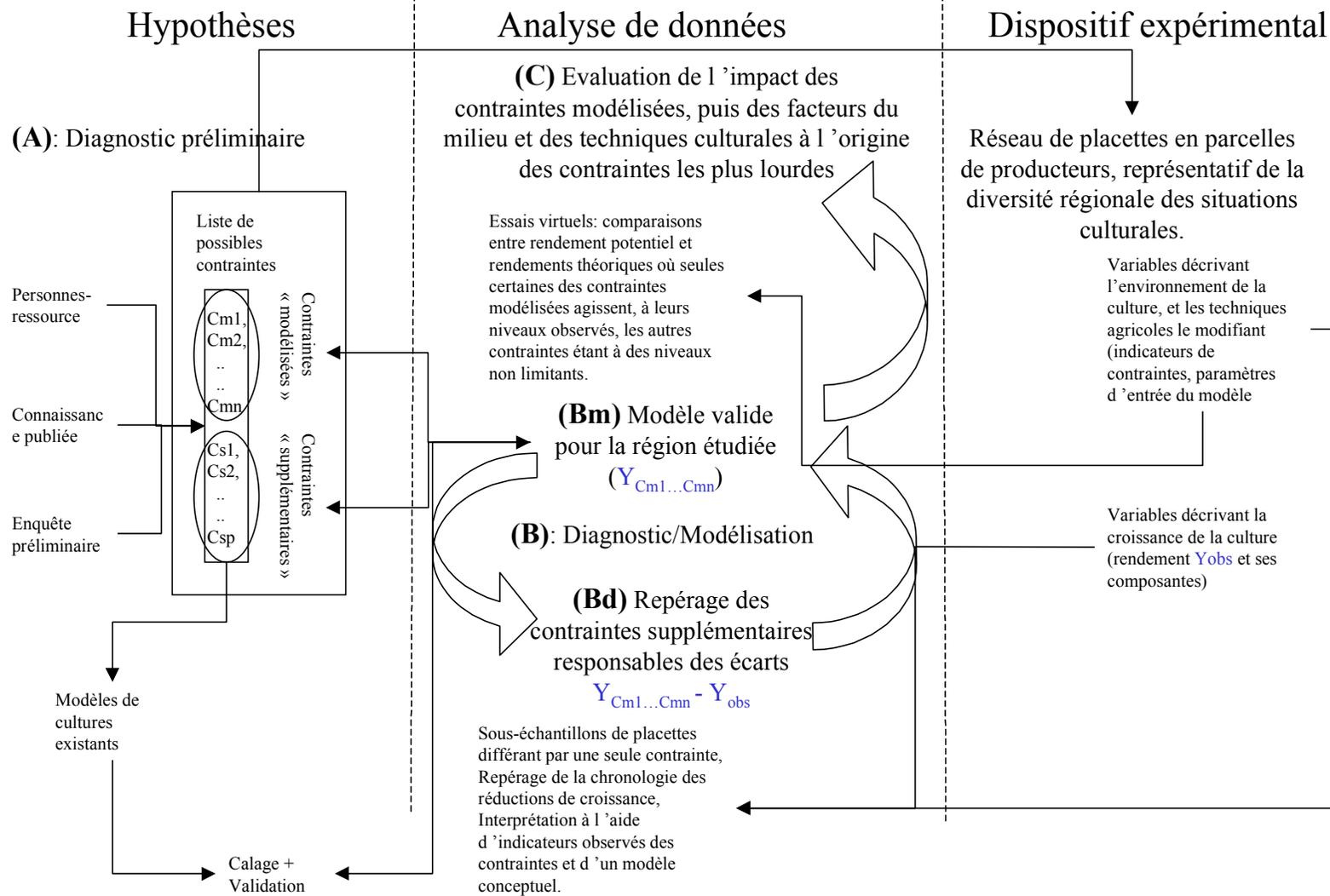


Figure 6.1.- Rappel schématique de la méthodologie.

Les étapes suivantes de notre méthodologie, Bm et C, fournissent:

- la possibilité de vérifier la cohérence du diagnostic réalisé, dans la mesure où le modèle qui est construit et qui contient des hypothèses sur le mode d'action des contraintes et leurs interactions peut (et en réalité doit) être validé pour le contexte local par les observations: la validation empirique du modèle constitue également une validation du diagnostic, malgré les imperfections qui la caractérisaient dans notre étude de cas de Silvânia et qui seront de toutes façons difficile à éviter dans le contexte en parcelles de producteurs imposé par le diagnostic.

- la possibilité de hiérarchiser les contraintes non pas simplement en termes de fréquence d'occurrence, mais également en termes d'impact sur les rendements,

- un repérage clair des interactions entre contraintes,

- une prise en compte étendue de la variabilité climatique, grâce à l'extrapolation à une série de données représentative du climat local, des informations recueillies au cours d'un nombre limité d'années pouvant conduire à un diagnostic fortement biaisé de l'influence de certaines contraintes interagissant avec le climat.

Ceci s'est également révélé particulièrement efficace pour le contexte de notre étude, où la diversité régionale des milieux et des techniques étant très élevée, de nombreuses contraintes étaient présentes simultanément dans les parcelles, sans qu'il soit possible, à l'issue de l'étape Bd, de les hiérarchiser quant aux écarts au rendement potentiel qu'elles provoquent. En particulier, la contrainte excès d'eau, repérée avec une fréquence élevée, était en réalité négligeable en termes d'impact sur le rendement.

Le diagnostic fourni par cette méthode, exprimé dans des diagrammes des impacts et de la fréquence des contraintes, donne une image synthétique de l'écosystème cultivé et met clairement en évidence les leviers sur lesquels il est possible d'agir pour réduire les écarts à la productivité potentielle, ainsi que les interactions entre ces leviers. Dans le but de comparer des environnements dans une démarche de zonage agro-écologique (Kho, 2000), on pourrait explorer la possibilité de faire appel à ce type de diagrammes: dans notre étude, ils ont été construits en considérant un échantillon de situations culturelles couvrant la diversité des milieux et des systèmes de culture présents dans la région étudiée, mais ils pourraient aussi être construits individuellement pour chacun des types de milieu et de systèmes de culture identifiés, de manière à faire ressortir les équilibres entre contraintes propres à chaque type de situation culturelle.

3.2.- *Limites et possibilités d'amélioration*

Un premier groupe de reproches qui peuvent être faits à notre méthode nous paraît concerner assez généralement les approches du diagnostic régional qui s'appuient sur des suivis agronomiques de situations culturelles. Ainsi, le caractère exhaustif du diagnostic préliminaire n'est pas évident à garantir, des biais sont possibles à cause d'erreurs d'échantillonnage des situations culturelles suivies, et enfin la durée des travaux est élevée (quelques années) par rapport aux quelques mois accordés à l'analyse précédant l'action par les projets de développement auxquels le diagnostic agronomique est censé servir de base (Pillot, 1988).

Il est toujours possible que des contraintes ayant en réalité un poids important dans la variabilité des rendements aient été omises lors du diagnostic initial ou n'apparaissent pas comme telles dans l'échantillon de placette. Toutefois, la fréquentation assidue des champs des producteurs nécessitée par l'enquête agronomique laisse peu de chance à ce que des symptômes d'un dysfonctionnement majeur initialement négligé échappe à l'oeil des observateurs, même s'ils se manifestent en dehors des placettes échantillonnées, et rien n'empêche d'adapter le dispositif en cours de route pour y intégrer de nouveaux indicateurs si l'on est ainsi conduit à suspecter de nouvelles contraintes. Dans notre approche, en outre, la validation finale du modèle permet précisément de s'assurer qu'aucun facteur important n'a été négligé, au moins pour l'échantillon utilisé.

Concernant la lourdeur des méthodes basées sur un suivi de situations culturelles, Doré *et al.* (1997) opposent à cet inconvénient, citant Byerlee *et al.* (1991), qu'il est compensé par une meilleure validité du diagnostic, et que les connaissances obtenues sur les systèmes de cultures facilitent la mise au point d'innovations. Il nous semble qu'on peut ajouter que la fréquentation assidue du dispositif de diagnostic en parcelles de producteur, en elle-même, fournit de manière continue des connaissances mobilisables pour l'action. Il n'est donc pas nécessaire de mener l'étude jusqu'à son terme pour commencer à orienter un programme d'appui aux producteurs dans la région étudiée, ce programme pouvant s'ajuster progressivement et devenir d'autant plus cohérent et précis que l'analyse approche de son terme et fournit des résultats rigoureux.

Notre méthode peut cependant paraître particulièrement lourde à cause des travaux de modélisation qui ajoutent des tâches, dont certaines expérimentales, à celles liées au dispositif de

situations culturelles. Le calage et la validation du modèle ont en effet nécessité, pour notre étude, un dispositif de terrain particulier, intégrant des expérimentations nouvelles, mais valorisant également des données d'essais anciens réalisés dans un contexte édapho-climatique et avec du matériel végétal comparables à ceux de notre étude. On remarquera cependant que dans de nombreux travaux de diagnostic, des essais annexes ont été nécessaires, en plus du dispositif en parcelles de producteurs, pour obtenir des références sur le potentiel des cultivars présents dans la zone étudiée (Leterme *et al.*, 1994), voire pour évaluer l'effet de certaines contraintes dans un milieu ou pour une culture mal connus (Boiffin *et al.*, 1981; Diouf, 1990; Scopel, 1994). Les travaux de calage et de validation du modèle sont donc en fait à mettre sur le même plan que ces expérimentations annexes, non seulement en termes de charge de travail additionnelle, mais également en termes de finalité.

Outre ces tâches de terrain, la méthode proposée requiert des révisions bibliographiques, des tâches de programmation informatique qui incluent l'écriture du modèle proprement dit et son interfaçage avec l'utilisateur et avec les données, ainsi que de tâches de gestion de données. Les tâches de programmation informatique sont en réalité peu exigeantes par rapport à toutes les autres, les activités de terrain étant de loin les plus lourdes. Les progrès constants dans les environnements de programmation et de gestion de données facilitent d'ailleurs chaque jour davantage l'écriture du modèle (Sinclair et Seligman, 1996), et surtout son interfaçage avec la base de données où sont stockées les observations de terrain. Ceci en particulier diminue considérablement le temps requis pour les nombreuses simulations en séquence de l'ensemble des situations culturelles observées qui sont nécessaires pour les "essais virtuels" isolant les contraintes, et rend immédiate la comparaison entre données observées et simulées. Les tâches de programmation sont donc en fait largement compensées par un gain de temps considérable pour l'analyse des données et par les informations supplémentaires qui sont ainsi obtenues. Enfin on peut imaginer une certaine automatisation du calcul du poids des contraintes et de l'analyse de sensibilité du modèle, et un travail complémentaire associant la biométrie pourrait être conduit dans ce sens.

Par ailleurs, un autre groupe de critiques, plus spécifiques de notre approche, cette fois-ci, nous paraît pouvoir être constitué. La première d'entre elles porte sur la caractérisation de la chronologie des réductions de croissance. Lorsque ces réductions de croissances sont analysées par rapport au potentiel permis, pour chaque cultivar, par la température et le rayonnement,

l'analyse des composantes successives du rendement permet d'identifier l'ensemble des phases du cycle de la culture auxquelles la croissance a été réduite:

- compte tenu de l'état atteint effectivement par la culture au début de chaque phase,
- et par rapport à ce qu'aurait été cette croissance en l'absence de contrainte pendant la phase considérée.

Wey et al. (1998) ont fourni une méthode particulièrement aboutie pour cette tâche, qui permet de distinguer les contraintes à effets ponctuel de celles ayant une action prolongée sur la croissance, et facilite ainsi le diagnostic, avec un effort de mesure en cours de cycle relativement raisonnable. Dans l'analyse que nous avons pratiquée dans le même but au chapitre 3, pour le cas de réductions de croissance survenant après floraison, il était seulement possible de repérer la date à partir de laquelle une réduction de croissance se produisait, sans pouvoir affirmer si cette réduction était ponctuelle ou si elle se prolongeait sur une longue période. Ce défaut important n'est cependant pas du au principe de la méthode proposée, car celui-ci indique que si l'on dispose de mesures de l'état du système simulé pour deux dates quelconques, alors il est possible de dire si, entre ces deux dates, la situation réelle a subi une réduction de croissance par rapport à la situation simulée. Le défaut provient de la difficulté de disposer de mesures de cet état du système simulé de manière exhaustive pour plusieurs dates, et des approximations qui en résultent. En effet, nous avons pratiqué une estimation grossière de l'état de la culture à floraison par forçage du modèle par un nombre réduit de valeurs mesurées du LAI. Les mesures de nombre de grains par unité de surface et de poids d'un grain fournissaient quant à elles des indicateurs de l'état de la culture pour les dates où ces composantes du rendement cessent d'évoluer, mais le modèle ne pouvant être forcé par ces composantes, nous avons vu que leur portée était limitée dans le cas de réductions de croissance se manifestant entre la floraison et la date où le nombre de grains est fixé. Afin d'améliorer l'efficacité de la méthode, il serait nécessaire:

- de multiplier les mesures de LAI en cours de cycle, cette variable étant particulièrement adaptée au forçage de la plupart des modèles simulant un rendement sous contrainte,
- et/ou de multiplier les mesures de biomasse aérienne en cours de cycle, mesures relativement moins coûteuses que celles du LAI, mais variable moins bien adaptée au forçage de ce type de modèles, au moins dans les environnements limités en eau, car pilotant moins directement le sous-modèle de bilan hydrique.

La difficulté de caractérisation de l'état initial du système simulé entraîne un autre défaut spécifique de notre méthode pour une éventuelle application dans des environnements où il n'est

pas possible de formuler une hypothèse générale réaliste sur l'état du sol en début de saison de culture. Dans notre cas cette hypothèse, applicable sous la plupart des climats à saison sèche marquée et déficit hydrique annuel, était que le sol est au point de flétrissement permanent sur l'ensemble de la zone potentiellement colonisée par les racines à la fin de la saison sèche. Ceci a facilité considérablement le paramétrage du modèle. Dans le cas où cet état initial est inconnu et variable selon la situation culturale, l'effort de mesure à réaliser dans l'échantillon de situations culturales peut être rédhibitoire pour l'emploi d'un modèle de culture.

Une troisième critique spécifique à notre approche peut être émise, portant sur les possibilités de modélisation. En effet, il n'est pas toujours évident *a priori* que l'on dispose des connaissances suffisantes pour permettre l'incorporation dans le modèle de toutes les contraintes repérées à l'étape (Bd), et selon la contrainte à modéliser, la modélisation empirique peut être plus ou moins complexe et exiger des mesures qui n'avaient pas été prévues dans le dispositif. Dans le cas de Silvânia, la modélisation des effets de l'aluminium et de l'excès d'eau a été possible de manière presque triviale, tandis que la prise en compte des effets de l'enherbement a exigé une modélisation plus complexe. Cette complexité de la modélisation nécessaire ne peut être connue au début de l'analyse, et pour certaines plantes et certains types de milieux, il est possible que les connaissances disponibles et déjà capitalisées sous forme de modèles soient insuffisantes pour permettre une modélisation du type de celle qui a été menée ici pour les adventices, que les données collectées sur les placettes de l'enquête agronomique soient insuffisantes pour renseigner le modèle construit et que des travaux expérimentaux supplémentaires soient nécessaires. On a pu voir en particulier dans notre étude une diminution, lorsque la complexité du modèle augmentait, de la quantité de placettes pour lesquelles toutes les mesures nécessaires aux simulations étaient disponibles avec une précision suffisante.

En réponse à cette critique et à la précédente, notons qu'il n'est pas toujours nécessaire de conduire la modélisation jusqu'à son terme pour élaborer un diagnostic pertinent. Les poids des contraintes prises en compte par le modèle peuvent être quantifiés en suivant l'étape (C) de la méthodologie, le poids des contraintes supplémentaires, que l'on a renoncé à incorporer au modèle étant alors analysé uniquement par rapport au rendement simulé. Ceci n'est réalisable que si peu de contraintes restent ainsi exclues du modèle, et qu'il est possible de constituer des sous-échantillons de placettes où elles sont présentes isolément, et ne donne de toutes façon pas accès aux interactions entre contraintes mais seulement à l'effet "résiduel" des contraintes

supplémentaires. Une telle situation a par ailleurs le mérite de mettre en évidence des questions de recherche pertinentes pour la région considérée.

Enfin, pour compléter la construction de la méthode proposée, il serait nécessaire d'explorer la quantification des erreurs associées aux évaluations des poids des variables impliquées dans les limitations de rendement, en tenant compte des erreurs liées à la façon dont les processus bio-physiques sont représentés dans le modèle et des erreurs de mesure propagées.

4.- Sur la modélisation

La méthode formalisée au chapitre 1 puis mise en oeuvre dans les chapitres suivants a permis de compléter la méthodologie générale de construction des modèles d'ingénieurs de simulation de culture ("engineering crop models"), telle que ressortant des principes énoncés par Passioura (1996), Monteith (1996) et Sinclair et Seligman (1996) et rappelés au chapitre 1. En effet, elle permet d'établir la hiérarchie des paramètres et processus responsables des variations de la variable à simuler, hiérarchie à partir de laquelle ces principes peuvent être appliqués. Il en résulte un modèle offrant un compromis satisfaisant entre les erreurs provenant de la simplification de la réalité (les erreurs de structure du modèle) et les erreurs liées à l'estimation des paramètres.

Une démarche alternative (Maraux, 1994) aurait consisté à prendre comme point de départ de la modélisation un modèle mécaniste supposé rendre compte de la manière la plus détaillée possible de l'ensemble des processus à l'oeuvre dans l'élaboration du rendement d'une culture, et, par une analyse de sensibilité de le simplifier progressivement pour aboutir à un bilan comparable entre erreurs de structure et erreurs de paramètres. Tout d'abord, s'il existe bien des modèles mécanistes valides au sens théorique pour certains sous-composants du système sol-plante-atmosphère, il n'est pas certain que cela soit le cas pour l'ensemble du système simulé. Ensuite, à supposer qu'un tel modèle existe, l'étude de sa sensibilité aurait imposé un effort de mesure rédhibitoire pour connaître, dans le contexte de Silvânia, la gamme de variation de chacun de ses paramètres.

Le travail réalisé dans cette thèse ne permet pas de formuler un jugement sur l'adéquation du modèle construit à son objectif d'application. En effet, rappelons que cet objectif est de fournir

à un modèle de décision stratégique des exploitants, une prédiction des rendements de maïs qui seraient obtenus en fonction du climat et des grands types d'itinéraires techniques et de sols. La question de savoir si les simulations de rendements permises par le modèle que nous avons mis au point - ainsi que la typologie des sols et des itinéraires techniques- sont d'une précision suffisante pour les besoins de l'analyse à l'échelle des exploitations, ne peut être traitée sans tenir compte de la sensibilité du modèle d'exploitation au paramètre d'entrée qu'est pour lui le rendement. Il faudrait donc analyser la propagation des erreurs du modèle de culture à travers le modèle de décision. Si l'erreur résultante sur la simulation des choix techniques est trop élevée, le travail de modélisation que nous avons réalisé devra être poursuivi. Notre analyse de la précision du modèle de culture nous enseigne que ceci impliquerait un dispositif de mesure plus précis que celui qui a été utilisé dans la présente thèse. Ceci ne serait à notre avis réaliste, compte tenu des contraintes de mesures en parcelles de producteurs, qu'à condition de restreindre l'analyse à certains types de milieux et d'itinéraires techniques.

Il est possible d'utiliser notre modèle comme outil d'aide à la décision pour raisonner les apports fertilisants, les dates de semis et les sarclages, en optimisant le revenu par hectare, à condition de tenir compte d'un intervalle de confiance (à 80%) des simulations de l'ordre de 20% (figure 4.5 du chapitre 4), de paramétrer le modèle avec des mesures d'une précision au moins équivalente à celle de notre dispositif, et de rester dans des conditions d'environnement similaires à celles de Silvânia.

A ce propos, rappelons que la question du domaine de validité de notre modèle, de par sa nature de modèle d'ingénieur, n'a qu'une réponse rigoureuse: ce domaine est celui où il a été mis au point, tant qu'il n'aura pas été validé empiriquement ailleurs. A ce titre, un article se réduisant à une description du modèle et de sa confrontation aux données de terrain n'aurait que peu de chance d'être publié par une revue appliquant les critères proposés par Sinclair et Seligman (2000) pour les publications portant sur les modèles de culture. Ces critères nous paraissent en effet viser à juger si un modèle peut être classé dans la catégorie des modèles scientifiques telle que définie par Passioura. Cette apparemment faible portée du modèle construit peut paraître frustrante si l'on se conforme à l'idée, communément répandue chez les agronomes, que l'écriture d'un modèle sous forme d'un programme exécutable est une tâche trop lourde pour être répétée souvent. Suivant en cela à nouveau Sinclair et Seligman (1996), notre position est que les environnements modernes de développement de programmes (dont le Fortran ne fait pas partie)

réduisent considérablement la lourdeur de cette tâche, qui devient négligeable comparativement aux tâches expérimentales requises dans tous les cas par la modélisation.

Le modèle élaboré a cependant une portée générale dans la mesure où il démontre qu'il est possible de modéliser simplement les interactions entre les adventices et la culture, en tenant compte de la compétition pour l'eau, l'azote et la lumière, pour des sols et des flores adventices pourtant contrastés.

Il confirme également la grande robustesse des modules de bilan hydrique basés sur l'analogie-réservoir, en ajoutant à une liste déjà longue de travaux équivalents pour des environnements variés, une validation locale de l'un de ces modules. Cette robustesse nous semble conférer aux bilans hydriques à réservoir un statut comparable à l'interception exponentielle du rayonnement, à l'efficacité de conversion du rayonnement, et la relation transpiration-photosynthèse, citées par Sinclair et Seligman (1996) comme modèles synthétiques robustes et pouvant être intégrés à un grand nombre de modèles. Rappelons toutefois que cette validation du bilan hydrique a été réalisée avec des fonctions d'évaporation et de croissance racinaire sensiblement différentes de celles que l'on rencontre dans certains modèles mis au point en milieu tempéré. Nous ne prétendons pas avoir apporté la preuve de la supériorité, par rapport aux fonctions originales, des modifications du bilan hydrique que nous avons introduites dans STICS. Mais le raisonnement que nous avons conduit à partir du fait que le sol est sec en début de saison de culture dans la plupart des situations tropicales, et qui nous a incité à introduire ces modifications, incite à mener à des travaux de comparaison, pour des environnements tropicaux variés, de notre approche avec l'approche originale de STICS ainsi que celle d'autres modèles répandus basés sur l'analogie-réservoir. Ceci permettrait en effet de définir plus efficacement les contours d'un compartiment de bilan hydrique de portée générale pour les modèles d'ingénieur en milieu tropical.

Le module de simulation du bilan azoté de STICS, en revanche, n'a été calé et validé que grossièrement, sur des paramètres sans grande signification physique. Cela a été possible à cause du poids particulièrement élevé, dans la contrainte azotée à Silvânia, des doses d'azotes apportées par fertilisation et des stocks d'azote organique du sol, tous deux très variables dans l'échantillon tandis que les quantités de résidus de culture, très faibles et peu variables n'avaient qu'une faible influence. Malheureusement, ce type de calage ne renseigne pas sur la capacité du module à rendre compte, pour le milieu tropical où, à notre connaissance, il n'a pas subi d'autres tests que les nôtres, de l'influence des autres facteurs du bilan azoté pour des situations moins contrastées du

point de vue de l'offre totale en azote.

5. Conclusion générale

L'étude réalisée fournit un apport méthodologique pour le diagnostic des causes des écarts entre les rendements réels et les rendements potentiels d'une culture à l'échelle d'une petite région agricole. Cet apport repose sur l'emploi et l'enrichissement progressif d'un modèle de culture de type "modèle d'ingénieur", facilitant d'une part le repérage des facteurs limitants et d'autre part la quantification des effets de ces facteurs. L'adéquation entre le modèle finalement construit et les situations culturelles réelles permet de vérifier la pertinence du diagnostic. La méthode peut être appliquée avec une certaine souplesse, l'effort de modélisation pouvant être plus ou moins important selon les exigences de précision du diagnostic, les connaissances disponibles, et les moyens de mesure pouvant être mobilisés. Il serait toutefois judicieux de poursuivre des travaux visant une amélioration de la procédure d'identification de la chronologie des réductions croissance de la culture par forçage du modèle, ainsi que la quantification des erreurs sur les poids des contraintes.

Localement, pour la région de Silvânia, le diagnostic réalisé a mis en évidence des pistes d'augmentation des rendements du maïs, par une optimisation des chantiers de mise en culture nécessitant une amélioration de la gestion des machines par les associations de producteurs, et dans une moindre mesure par optimisation des apports fertilisants et des dates de semis.

La méthode proposée, vue cette fois-ci comme méthode de production de modèles d'ingénieur, part du constat que si ce type de modèle est à construire en fonction d'un objectif d'application pour une région donnée, alors cette construction doit être basée sur la hiérarchie locale des causes de variations de la variable à simuler. Elle nous a permis d'obtenir un modèle capable de simuler sans biais notable les rendements pour le contexte technique et environnemental de Silvânia à l'époque de l'étude, avec un bilan satisfaisant entre complexité du modèle et erreurs de propagation des erreurs de mesure. L'étude de l'adéquation de la précision du modèle à son objectif reste à conduire, par l'étude de la propagation des erreurs de notre modèle dans le modèle d'exploitation agricole qu'il est supposé renseigner.

Enfin, si notre modèle n'a aucune prétention à servir tel quel pour un autre contexte que

celui pour lequel il a été élaboré, et si nous revendiquons même le caractère très étroit de son domaine de validité, certains de ses composants peuvent être réutilisés et adaptés pour un nouveau contexte: la modélisation réalisée peut donc être qualifiée de “jetable mais recyclable”.

RÉFÉRENCES

- Abruna, F., Rodriguez, J., et Silva, S., 1982. Crop response to soil acidity factors in Ultisols and Oxisols in Puerto Rico. VI. Grain sorghum. *J. Agric. Univ. P.R.* **61**, 28-38.
- Adámoli, J., Macedo, J., Azevedo, L. G., et Madeira Netto, J. S., 1987. Caracterização da região dos cerrados. In "Solos dos cerrados: tecnologias e estratégias de manejo." (W. J. Goedert, ed.), pp. 33-98. Nobel, São Paulo.
- Addiscott, T. M., et Wagenet, R. J., 1985. Concepts of solute leaching in soils: A review of modelling approaches. *J. of Soil Sci.* **36**, 411-424.
- Affholder, F., 1994. Influence de la fertilisation et du contrôle de l'enherbement sur la réponse des rendements du mil pluvial à un indice hydrique synthétique. In "Bilan hydrique agricole et sécheresse en Afrique tropicale. Vers une gestion des flux hydriques par les systèmes de culture ? (Actes Sem. Int., Bamako, Mali, December 1991)." (Reyniers, F. N. et Netoyo, L., eds.), pp. 191-203. J.Libbey, Paris.
- Affholder, F., 1995a. Couplage de modèles biophysiques et socioéconomiques: quelques questions posées par un agronome. In "Couplage de modèles en agriculture" (F. N. Reyniers and M. Benoit-Cattin, eds.), pp. 22-27. Colloques, CIRAD, Montpellier.
- Affholder, F., 1995b. Effect of organic matter input on the water balance and yield of millet under tropical dryland condition. *Field Crop Res.* **41**, 109-121.
- Affholder, F., 1995c. "La culture du maïs dans les fermes de référence de Silvânia de 1993 à 1995. Typologie actualisée des itinéraires techniques à l'aide de la base de données du réseau de fermes de référence." EMBRAPA-CPAC/CIRAD-CA, Brasilia, pp. 20.
- Affholder, F., 1997. Empirically modelling the interaction between intensification and climatic risk in semiarid regions. *Field Crops Research* **52**, 79-93.
- Affholder, F., Bonnal, P., Jourdain, D., et Scopel, E., 1998. Small-scale farming diversity and bioeconomic environment variability: a modelling approach. In "15th international symposium of the association for farming systems research and extension. Rural Livelihoods, empowerment and the environment. Going beyond the farm boundary." (AFSRE, ed.), Vol. 2, pp. 952-959, Pretoria, South Africa.
- Affholder, F., Bonnal, P., et Scopel, E., 1995. Analyse des interactions entre risques climatiques et risques économiques dans les choix techniques des agriculteurs. In "Couplage de modèles en agriculture" (F. N. Reyniers and M. Benoit-Cattin, eds.), pp. 101-108. Colloques, CIRAD, Montpellier.
- Affholder, F., Reyniers, F. N., et Scopel, E., 1994. L'eau et l'activité agricole: diagnostic et modélisation du fonctionnement de quelques hydrosystèmes agricoles tropicaux. In "Recherches-systèmes en agriculture pour le développement rural./ Systems-Oriented Research in Agriculture and Rural Development. International Symposium.", pp. 411-419. CIRAD-SAR, Montpellier, France.
- Affholder, F., Rodrigues, G. C., et Assad, E. D., 1997. Modelo agroclimático para avaliação do comportamento do milho na região dos Cerrados (Agroclimatic model for evaluation of maize behavior in the cerrado region). *Pesquisa Agropecuária Brasileira* **32**, 993-1002.
- Albergel, J., Perez, P., et Vaskmann, M., 1991. Amélioration des modèles de bilan hydrique sur parcelle par la prise en considération des états de surface. In "Soil water balance in the Sudano-Sahelian zone." (M. V. K. Sivakumar, J. S. Wallace, C. Renard and C. Giroux,

- eds.), pp. 483-496. Int. Assoc. of Hydrol. Sci., Niamey, Niger.
- Alvim, P. T., 1996. Repensando a teoria da formação dos campos cerrados. In "Simpósio sobre o Cerrado, 8. Biodiversidade e produção sustentável de alimentos e fibras nos Cerrados.", pp. 56-58. EMBRAPA-CPAC, Brasília, DF.
- Assad, E. D., 1994. "Chuva no cerrado. Análise e espacialização", EMBRAPA-CPAC, Brasília, pp. 423.
- Aubry, C., Latiri Souki, K., Doré, T., et Griner, C., 1994. Analysis of factors limiting durum wheat yield in farmers' fields in a small semi-arid area in Tunisia. *Agronomie* **14**, 213-227.
- Bainville, S., 2000. Le développement de l'agriculture familiale: processus d'interactions entre changements techniques et changements institutionnels. Un "cas d'école": la commune de Silvânia-Brésil. These, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, Montpellier, France, pp. 241.
- Baldy, C., et Stigter, C. J., 1993. "Agro-météorologie des cultures multiples en régions chaudes", INRA, pp. 247.
- Barbier, B., et Hazell, P., 1998. Induced innovation and land degradation: results from a bioeconomic model of a village in West Africa. *Special issue: Food security, diversification, and resource management refocusing the role of agriculture?. Agricultural Economics* **19**, 1-2.
- Becker, M., et Johnson, D. E., 1999. Rice yield and productivity gaps in irrigated systems of the forest zone of Cote d'Ivoire. *Field Crops Research* **60**, 201-208.
- Blancaneaux, P., De Carvalho, W., Da Motta Jr, P. E. F., De Carvalho Filho, A., et Pereira, N. R., 1993. "Sistemas pedológicos no Cerrado de Goiás. Município de Silvânia Região Centro-oeste do Brasil". EMBRAPA -CPAC, Brasília, pp. 32.
- Boiffin, J., Caneill, J., Meynard, J. M., et Sebillotte, M., 1981. Elaboration du rendement et fertilisation du blé d'hiver en champagne crayeuse (France): 1.- Protocole et méthode d'étude d'un problème technique régional. *Agronomie* **1**, 549-558.
- Bonnal, P., Chaib Filho, H., Madeira, J. S. N., Paniago, J. R. E., Santos, N. A., Souza, G. L. C., Sperry, S., et Zoby, L. F., 1994. "Síntese do projeto Silvânia (1986-1994)". EMBRAPA-CPAC/CIRAD-SAR, Brasília, pp. 94.
- Bonnal, P., Clément, D., Gastal, M. L., et Xavier, J. H. V., 1992. "Les petits et moyens producteurs du Sylvania - Etat du Goiás/Brésil. Caractéristiques générales et typologie des exploitations agricoles". CIRAD, Montpellier, pp. 87.
- Boulier, F., et Jouve, P., 1990. "Evolution des systèmes de production sahéliens et leur adaptation à la sécheresse.", R3S-CORAF-CILSS-CIRAD, Montpellier, pp. 135.
- Boyer, J., 1976. L'aluminium échangeable: incidence agronomique. Evaluation et correction de sa toxicité dans les sols tropicaux. *Cah. ORSTOM, Sér. Pédol.* **14**, 259-269.
- Brenes, E., et Pearson, R. W., 1973. Root response of three gramineae species to soil acidity in an Oxisol and an Ultisol. *Soil Sci.* **116**, 295-302.
- Brisson, N., Mary, B., King, D., Ruget, F., Nicoulaud, B., Devienne, F., Gate, P., Antonioletti, R., Jeuffroy, M. H., et Recous, S., 1996. "STICS, modèle de simulation de culture. Bilan hydrique, bilan azoté. Version 1.0, Octobre 1996". INRA, Avignon.
- Brisson, N., Mary, B., Ripoche, D., Jeuffroy, M. H., Ruget, F., Nicoulaud, B., Gate, P., Devienne Barret, F., Antonioletti, R., Durr, C., Richard, G., Beaudoin, N., Recous, S., Tayot, X., Plenet, D., Cellier, P., Machet, J. M., Meynard, J. M., et Delecolle, R., 1998. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie* **18**, 311-346.
- Brisson, N., et Perrier, A., 1991. A Semiempirical Model of Bare Soil Evaporation for Crop Simulation Models. *Water Resources Research* **27**, 719-727.
- Buhler, D. D., King, R. P., Swinton, S. M., Gunsolus, J. L., et Forcella, F., 1996. Field evaluation of a bioeconomic model for weed management in corn (*Zea mays*). *Weed sci. Lawrence*,

- KS : *Weed Science Society of America. Oct/Dec*, 915-923.
- Buttler, I. W., 1989. Predicting water constraints to productivity of corn using plant-environmental simulation models. PhD. Thesis, Cornell University, pp. 237.
- Byerlee, D., Triomphe, B., et Sebillotte, M., 1991. Integrating agronomic and economic perspectives into the diagnostic stage of on-farm research. *Expl. Agric.* **27**, 95-114.
- Charreau, C., et Nicou, R., 1971. L'amélioration du profil cultural dans les sols sableux et sablo-argileux de la zone tropicale sèche ouest-africaine et ses incidences agronomiques. *Agron. Trop.* **26**, 209-255; 903-978; 1183-1247.
- Chopart, J. L., 1990. Rôle du travail du sol sur les termes du bilan hydrique, enracinement et rendement des cultures pluviales. In "Agronomie et ressources naturelles en régions tropicales", pp. 223-237. IRAT, Montpellier.
- Chopart, J. L., Nicou, R., et Vachaud, G., 1979. Le travail du sol et le mulch pailleux. Influences comparées sur l'économie de l'eau dans le système arachide mil au Sénégal. In "Isotopes and radiation in research on soil plant relationships.", pp. 199-221. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- Chopart, J. L., et Vauclin, M., 1990. Water balance estimation model: field test and sensitivity analysis. *Soil Sci. Soc. America J.* **54**, 1377-1384.
- Coquillard, P., et Hill, D. R. C., 1997. "Modélisation et simulation d'écosystèmes : des modèles déterministes aux simulations à événements discrets", Masson, Paris, pp. 293.
- Cousens, R., 1985. A simple model relating yield loss to weed density. *Ann. Appl. Biol.* **107**, 239-252.
- Cretenet, M., 1995. La question du couplage de modèles pour le développement local. Le cas des zones cotonnières d'Afrique Noire francophone. In "Couplage de modèles en agriculture." (F. N. Reyniers and M. Benoit Cattin, eds.), pp. 49-54. CIRAD, Montpellier.
- De Jong, R., 1981. "Soil water models: a review.", Rep. No. 23. Land Resource Research Institute, Ottawa, pp. 39.
- Dedecek, R. A., Resck, D. V. S., et De Freitas Jr, E., 1986. Perdas de solo, agua e nutrientes por erosão em latossolovermelho-escuro dos cerrados em diferentes cultivos sob chuva natural. *R. Bras. Ci. Solo* **10**, 265-272.
- Deybe, D., 1995. L'apport de modèles de simulation de la croissance des plantes à la modélisation des exploitations agricoles. In "Couplage de modèles en agriculture" (F. N. Reyniers and M. Benoit-Cattin, eds.), pp. 66-70. CIRAD, Montpellier.
- Dias, L. E., Carvalho, L. J. C. B., et Ritchey, K. D., 1985. Avaliação da deficiência de Ca em diferentes solos de cerrado, por meio de crescimento de raízes. *Revista Ceres* **32**, 102-109.
- Diouf, M., 1990. Analyse de l'élaboration du rendement du mil (*Pennisetum typhoides* Stapf et Hubb.). Mise au point d'une méthode de diagnostic en parcelles paysannes. These, INA-PG, Paris, pp. 227.
- Donnars, C., Peyrache, X., Marzin, J., et Kalms, J. M., 1993. Evolution de l'agriculture dans une région de savane: l'exemple de Sylvania, Goiás, Brésil. *Cahiers de la Recherche-Développement* **33**, 61-69.
- Doré, T., Sebillotte, M., et Meynard, J. M., 1997. A diagnostic method for assessing regional variations in crop yield. *Agricultural Systems* **54**, 169-188.
- du Toit, A. S., Booyesen, J., et Human, J. J., 1999. Use of Linear Regression and a Correlation matrix to Evaluate CERES3 (Maize). In "Modeling Extremes of Wheat and Maize Crop Performance in the Tropics. Proc. of a workshop." (J. W. White and P. R. Grace, eds.), pp. 19-31. CIMMYT, Natural Resource Group., El Batán, Mexico.
- Dugué, P., 1989. Possibilités et limites de l'intensification des systèmes de cultures en zone soudano-sahélienne: le cas du Yatenga (Burkina Faso). These, ENSAM, Montpellier, pp. 259.
- Eavis, B. W., 1972. Soil physical conditions affecting seedling root growth. I. Mechanical

- impedance, aeration, and moisture availability as influenced by bulk density and moisture levels in a sandy loam soil. *Plant Soil* **36**, 613-622.
- Eiten, G., 1994. Vegetação do Cerrado. In “Cerrado: caracterização, ocupação e perspectivas.” (M. N. Pinto, ed.), pp. 9-65. UnB/SEMATEC, Brasília.
- Eldin, M., et Milleville, P., 1989. “Le risque en agriculture.”, ORSTOM, Paris, pp. 619.
- Ferri, M. G., 1980. “Vegetação brasileira.”, EDUSP/ Itatiaia, São Paulo, Belo Horizonte, pp. 157.
- Fetcher, J., Allison, B. E., Sivakumar, M. V. K., Van der Ploeg, R. R., et J., B., 1991. An evaluation of the SWATRER and CERES-Millet models for southwest Niger. In “Soil water balance in the Sudano-Sahelian zone. Proceedings of a workshop.” (M. V. K. Sivakumar, J. S. Wallace, C. Renard and C. Giroux, eds.), pp. 505-513. Int. Assoc. of Hydrol. Sci., Niamey, Niger.
- Figuié, M., 2001. La construction sociale d'un savoir sur la dégradation des ressources naturelles: le cas des pâturages dans les exploitations agricoles familiales de la commune de Silvânia au Brésil. These, INA-PG, Paris, pp. 326.
- Findeling, A., 2001. Etude et modélisation de certains effets du semis direct avec paillis de résidus sur les bilans hydrique, thermique et azoté d'une culture de maïs pluvial au Mexique. These, ENGREF, Paris, pp. 327.
- Fleury, A., 1990. Methodologie de l'analyse de l'élaboration du rendement. In “Physiologie et production du Maïs”, pp. 279-290. INRA, Pau.
- Flichman, G., 1995. L'évaluation micro-économique de la réforme de la PAC par un modèle bio-économique: une illustration sur la région de Toulouse. Montpellier 14-15 juin 1995. In “Couplage de modèles en agriculture.” (F. N. Reyniers and M. Benoit-Cattin, eds.), pp. 71-75. CIRAD, Montpellier.
- Forest, F., et Clopes, A., 1994. Contribution à l'explication de la variabilité du rendement d'une culture de maïs plus ou moins intensifiée à l'aide d'un modèle de bilan hydrique amélioré. In “Bilan hydrique agricole et sécheresse en Afrique tropicale. Vers une gestion des flux hydriques par les systèmes de culture ? (Actes Sem. Int., Bamako, Mali, Decembre 1991)” (F. N. Reyniers and L. Netoyo, eds.), pp. 3-15. J. Libbey, Paris.
- Forest, F., et Kalms, J. M., 1984. Influence du régime d'alimentation en eau sur la production de riz pluvial. *Agron. Trop.* **39**, 42-50.
- Freteaud, J. P., Poss, R., et Saragoni, H., 1987. Ajustement d'un modèle de bilan hydrique à des mesures tensio-neutroniques in situ sous culture de maïs. *Agronomie Tropicale* **42**, 94-103.
- Fujisaka, S., 1991. A set of farmer-based diagnostic methods for setting post 'green revolution' rice research priorities. *Agricultural Systems* **36**, 191-206.
- Goedert, W. J., Gomes de Souza, D. M., et Lobato, E., 1987. Fosforo. In “Solos dos cerrados: tecnologias e estratégias de manejo.” (W. J. Goedert, ed.), pp. 129-166. Nobel, São Paulo.
- Gomes de Souza, D., Carvalho, L. J., et Miranda, L. N., 1985. Correção da acidez do solo. In “Solos dos Cerrados” (W. J. Goedert, ed.), pp. 99-127. Nobel, São Paulo.
- Goodland, R. A., et Ferri, M. G., 1979. “Ecologia do Cerrado”, Itatiaia, Belo Horizonte, pp. 193.
- Goudriaan, J., 1995. Predicting crop yields under global change. In “Global change and terrestrial ecosystems.” (B. H. Walker and W. Steffen, eds.). Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- Graf, B., Gutierrez, A. P., Rakotobe, K., Zahner, P., et Delucchi, V., 1990. A simulation model for the dynamics of rice growth and development: Part II-The competition with weeds for nitrogen and light. *Agric. Sys.* **32**, 367-392.
- Hammer, G. L., Holzworth, D. P., Mulo, S., et Wade, L. J., 1989. Modelling adaptation and risk of production of grain sorghum in Australia. In “Australian Sorghum Workshop” (M. A. Foale, B. W. Hare and R. G. Henzell, eds.), pp. 257-267. Australian Institute of Agricultural Science, Toowoomba.
- Hammer, G. L., et Muchow, R. C., 1994. Assessing climatic risk to sorghum production in water-limited subtropical environments. I. Development and testing of a simulation model. *Field*

- Crop Research* **36**, 221-234.
- Hanks, R. J., Keller, J., Rasmussen, V. P., et Wilson, G. D., 1976. Line source sprinkler for continuous variable irrigation-crop production studies. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* **40**, 426-429.
- Hanks, R. J., Klute, A., et Bresler, E., 1969. A numeric method for estimating infiltration, redistribution drainage and evaporation of water from soil. *Water Resour. Res.* **5**, 1064-1069.
- Hétier, J. M., Zuvia, M., Houot, S., et Thiéry, J. M., 1990. Comparaison de trois modèles choisis pour la simulation du cycle de l'azote dans les agro-systèmes tropicaux. *Cahiers ORSTO, sér. Pédol.* **25**, 443-451.
- Horst, W. J., Wagner, A., et Marschner, H., 1987. Effect of Aluminum on root growth, cell division rate and mineral content in roots of *Vigna unguiculata* genotypes. *Z. Pflanzenphysiol.* **109**, 45-103.
- Jones, C. A., et Kiniry, J. R., 1986. "CERES-Maize: a simulation model of maize growth and development.", Texas A & M University Press, College Station, Texas, pp. 194.
- Jourdain, D., 1999. "Introduction du risque dans les modèles de décision: une synthèse bibliographique.", Rep. No. 1-98. CIRAD, Montpellier, pp. 112.
- Jouve, P., 1984. Relation entre déficit hydrique et rendement des céréales (blé tendre et orge) en milieu aride. *Agron. Trop.* **39**, 308-316.
- Kho, R. M., 2000. On crop production and the balance of available resources. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **80**, 71-85.
- Kiniry, J. R., Williams, J. R., Gassman, P. W., et Debaeke, P., 1992. A general, process-oriented model for two competing plant species. *Trans. ASAE* **35**, 801-810.
- Kropff, M. J., et Spitters, C. J. T., 1992. An eco-physiological model for interspecific competition, applied to the influence of *Chenopodium album* L. on sugar beet. I. Model description and parameterization. *Weed Research* **32**, 437-450.
- Latiri-Souki, K., Aubry, C., Doré, T., et Sebillotte, M., 1992. Elaboration du rendement du blé dur en conditions semi-arides en Tunisie: relations entre composantes du rendement sous différents régime de nutrition azotée et hydrique. *Agronomie* **12**, 31-43.
- Leenhardt, D., 1991. Spatialisation du Bilan Hydrique. Propagation des erreurs d'estimation des caractéristiques du sol au travers des modèles de bilan hydrique. Cas du blé dur d'hiver. These, ENSA, Montpellier, pp. 129.
- Lemaire, G., 1985. Cinétique de croissance d'un peuplement de fétuque élevée (*Festuca arundinacea* S.) pendant l'hiver et le printemps. Effet des facteurs climatiques. These, Univ. de Caen, Caen, pp. 96.
- Leterme, P., Manichon, H., et Roger-Estrade, J., 1994. Analyse intégrée des rendements du blé tendre et de leurs causes de variation dans un réseau de parcelles d'agriculteurs du Thymerais. *Agronomie* **14**, 341-361.
- Lizaso, J. I., et Ritchie, J. T., 1997. A modified version of CERES to predict the impact of soil water excess on maize crop growth and development. In "Applications of Systems Approaches at the Field Level" (K. M.J., ed.), pp. 153-167. Kluwer Academic Publishers.
- Luchiari, A. J., Resende, M., Ritchey, K. D., Freitas, E. J., et Mello de Souza, P. I., 1985. Manejo de solo e aproveitamento de água. In "Solos dos Cerrados" (W. J. Goedert, ed.), pp. 285-322. Nobel, São Paulo.
- Manichon, H., 1982. Influence des systèmes de culture sur le profil cultural: élaboration d'une méthode de diagnostic basée sur l'observation morphologique. These, INA-PG, Paris, pp. 214.
- Manichon, H., et Sebillotte, M., 1973. "Etude de la monoculture du maïs. Résultats d'une enquête agronomique dans les régions de Garlin et Navarrenx (Pyrennées Atlantique, France)". Chaire d'agronomie INA-PG, Paris, pp. 140.

- Maraux, F., 1994. Modélisation mécaniste et fonctionnelle du bilan hydrique des cultures. Le cas des sols volcaniques du Nicaragua. Thèse, Institut National Agronomique, Paris-Grignon, pp. 260.
- Martins, S. R., Aparício, D. J., et Castillo, F. E., 1988. Contribuição ao estudo da evaporação e evapotranspiração de referência. Determinação de coeficientes de tanque Classe A. In "VIII Congresso nacional de irrigação e drenagem.", Vol. 2, pp. 1023-1036. ABID, Florianopolis, Brésil.
- Matlon, P. J., 1990. Farmer risk management strategies: the case of the west african semi-arid tropics. In "Risk in agriculture" (D. Holden, P. Hazell and A. Pritchard, eds.), pp. 51-79. World Bank, Washington D.C.
- Mbabaliye, T., et Wojtkowski, P. A., 1994. Problems and perspectives on the use of a crop simulation model in an African research station. *Experimental Agriculture* **30**, 441-446.
- Meynard, J. M., et David, G., 1992. Diagnostic de l'élaboration du rendement des cultures. *Cahiers Agricultures* **1**, 9-19.
- Meynard, J. M., et Sebillotte, M., 1983. Diagnostic sur les causes de variation du rendement du blé dans une petite région. In "La fatigue des sols", Vol. 17, pp. 157-168. INRA.
- Mitchell, P. L., et Sheehy, J. E., 1997. Comparison of predictions and observations to assess model performance: a method of empirical validation. In "Applications of System Approaches at the Field Level" (M. J. Kropff, ed.), pp. 437-451. Kluwer Academic Publishers.
- Monteith, J. L., 1989. Preface. In "Modeling the growth and development of sorghum and pearl millet." (S. M. Virmani, H. L. S. Tandon and G. Alagarswamy, eds.), pp. 2. ICRISAT, Patancheru.
- Monteith, J. L., 1996. The Quest for Balance in Crop Modelling. *Agronomy Journal* **88**, 695-697.
- Monteith, N. H., et Banath, C. L., 1965. The effect of soil strength on sugarcane growth. *Tropical Agriculture* **42**, 293-296.
- Muchow, R. C., et Bellamy, J. A., eds., 1991. "Climatic Risk in Crop Production: Models and Management for Semiarid Tropics and Subtropics. (Proc. Int. Symposium, Brisbane, Australia, July 1990).", pp. 1-548. C.A.B. International, Wallingford, U.K.
- Navarro Garza, H., 1984. L'analyse des composantes du rendement du maïs. Application à l'étude de la variabilité du rendement dans une petite région. These, INA-PG, Paris, pp. 238.
- Passioura, J. B., 1996. Simulation models: science, snake oil, education, or engineering? *Agron. J.* **88**, 690-694.
- Pavan, M. A., Bingham, F. T., et Pratt, P. F., 1982. Toxicity of aluminum to coffee in Ultisols and Oxisols amended with CaCO₃, MgCO₃, and CaSO₄.2H₂O. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **46**, 1201-1207.
- Penning de Vries, F. W. T., et Van Laar, H. H., eds., 1982. "Simulation of plant growth and crop production.", Pudoc, Wageningen.
- Perez, P., 1994. Genèse du ruissellement sur les sols cultivés du sud Saloum (Sénégal). These, ENSAM, Montpellier.
- Pieri, C., 1976. L'acidification des terres de culture exondées au Sénégal. *L'Agron. Trop.* **31**, 339-368.
- Pillot, D., 1988. Francophone and anglophone farming system research: similarities and differences. In "Farming Systems Research and Development in Thailand. Illustrated Methodological considerations and Recent Advances.", pp. 3-24. GRET/ Prince of Songkla University, France /Thailand.
- Reatto, A., Correia, J. R., et Spera, S. T., 1998. Solos do bioma Cerrado: aspectos pedológicos. In "Cerrado ambiente et flora." (S. M. Sano and S. P. de Almeida, eds.), pp. 47-86. EMBRAPA-CPAC, Planaltina DF.
- Recous, S., Fillery, I. R., Zhu, C., et Mary, B., 2000. Concurrent measurements of soil N

- biotransformations using ^{15}N dilution and modelling techniques. In "Poster Meeting SSSA 2000". University of California, Davis (USA).
- Reyniers, F. N., et Netoyo, L., eds., 1994. "Bilan hydrique agricole et sécheresse en Afrique tropicale. Vers une gestion des flux hydriques par le système de culture. Séminaire int., Bamako, 9-13 décembre 1991.", pp. 1-415. John Libbey Eurotext, Paris.
- Reyniers, F. N., Steinmetz, S., et Forest, F., 1987. Impact de l'enracinement et de la réserve en eau utile sur la productivité du riz pluvial au Brésil. In "Mémoires et travaux de l'IRAT", Vol. 13, pp. 65-74. CIRAD, Montpellier.
- Reynolds, J. F., et Acock, B., 1985. predicting the response of plants to increasing carbon dioxin: A critique of plant growth models. *Ecol. Modell.* **29**, 107-129.
- Ritchey, K. D., Silva, J. E. d., et Costa, U. F., 1982. Calcium deficiency in clayey B horizons of savanna Oxisols. *Soil Sci.* **133**, 378-382.
- Ritchey, K. D., Sousa, D. M. G., et Silva, J. E., 1984. Calcium and root penetration in highly weathered soils. In "Sorghum for acid soils. Evaluating sorghum for tolerance to Al-toxic tropical soils in Latin America", pp. 117-132. Centro Internacional de Agricultura Tropical, Cali, Columbia.
- Ritchie, J. T., 1972. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Wat. Resour. Res* **8**, 1204-1213.
- Ritchie, J. T., 1991. Specifications of the ideal model for predicting crop yields. In "Climatic risk in crop production: models and management for the semiarid tropics and subtropics." (R. C. Muchow and J. A. Bellamy, eds.), pp. 97-122. CSIRO, Brisbane, Australia.
- Ritchie, J. T., Singh, U., Godwin, D. C., et Bowen, W. T., 1998. Cereal growth, development and yield. In "Understanding options for agricultural production" (G. Y. Tsuji, G. Hoogenboom and P. K. Thornton, eds.), pp. 79-98. Kluwer Academic Publishers.
- Sanchez, P. A., 1976. "Properties and management of soils in the tropics", John Wiley and sons, New York, pp. 618.
- Scopel, E., 1994. Le semis direct avec paillis de résidus dans la région de V. Carranza au Mexique: intérêt de cette technique pour améliorer l'alimentation hydrique du maïs pluvial en zones à pluviométrie irrégulière. These, INA-PG, Paris, pp. 211.
- Scopel, E., Chavez Guerra, E., et J.M., A. T., 1999. Le semis direct avec paillis de résidus dans l'ouest Mexicain : Une histoire d'eau ? *Agricultures et Développement* **21**, 76-86.
- Sebillotte, M., 1990. Système de culture, un concept opératoire pour les agronomes. In "Les systèmes de cultures" (L. Combe and D. Picard, eds.). INRA, Paris.
- Sharpley, A. N., et Williams, J. R., 1990. "EPIC-Erosion/Productivity Impact Calculator.", Rep. No. 1768. USDA Tech. Bull.
- Shorter, R., Lawn, R. J., et Hammer, G. L., 1991. Improving genotypic adaptation in crops - a role for breeders, physiologists and modeller. *Exp. Agric.* **27**, 155-175.
- Sierra, J., 2000. Prise en compte de la distribution ammonium/nitrate dans les sols ferrallitiques acides. In "Réunion STICS 21/22 septembre 2000", pp. 49. INRA Avignon, Montpellier.
- Silva, J. E. d., et Ritchey, K. D., 1982. Lixiviação de cálcio e crescimento de raízes em oxissolos de cerrados. In "VI Simpósio sobre o Cerrado. Savanas: Alimento e Energia", pp. 707-725. EMBRAPA-CPAC, Brasília DF.
- Sinclair, T. M., et Seligman, N. G., 1996. Crop modelling: from infancy to maturity. *Agron. J.* **88**, 698-704.
- Sinclair, T. R., et Seligman, N., 2000. Criteria for publishing papers on crop modelling. *Field Crops Research* **68**, 165-172.
- Spitters, C. J. T., 1990. Crop growth models: their usefulness and limitations. *Acta Horticulturae* **267**, 349-368.
- Steinmetz, S., Reyniers, F. N., et Forest, F., 1988. "Caracterização do regime pluviométrico e do balanço hídrico do arroz de sequeiro em distintas regiões produtoras do Brasil: síntese e

- interpretação dos resultados. Documentos N°23”, EMBRAPA-CNPAP, Goiânia, pp. 66.
- Stockle, C. O., Martin, S., et Campbell, G. S., 1994. CropSyst, a cropping systems model: water/nitrogen budgets and crop yield. *Agricultural Systems* **46**, 335-359.
- Tanner, C. B., et Sinclair, T. R., 1983. Efficient water use in crop production: Research or Research? In “Limitations to Efficient Water Use in Crop Production.” (H. M. Taylor, W. R. Jordan and T. R. Sinclair, eds.), pp. 1-27. Amer. Soc. Agron., Madison, WI, USA.
- Tauer, L. W., 1983. Target MOTAD. *American Journal of Agricultural Economics* **65**, 606-610.
- Taylor, H. M., Robertson, G. M., et Parker, J. J., 1966. Soil strength-root penetration relations for medium to coarse-textured soil materials. *Soil Science* **102**, 18-22.
- Van Keulen, H., et de Wit, C. T., 1982. A hierarchical approach to agriculture production modelling. In “Modelling agricultural-environmental processes in crop production.” (G. Gobulev and I. Shytov, eds.). IIASA, Laxenburg, Austria.
- Van Keulen, H., et Van Beek, G. E. M., 1971. Water movement in layered soils. A simulation model. *Neth J. Agric. Sci.* **19**, 138-153.
- Vilela, L., Euripides da Silva, J., Ritchey, K. D., et Gomes de Sousa, D. M., 1987. Potássio. In “Solos dos cerrados: tecnologias e estratégias de manejo.” (W. J. Goedert, ed.), pp. 129-166. Nobel, São Paulo.
- Wey, J., Oliver, R., Manichon, H., et Siband, P., 1998. Analysis of local limitations to maize yield under tropical conditions. *Agronomie* **18**, 545-561.
- White, J. W., et Grace, P. R., 1999. Challenges in Modeling Extremes of Wheat and Maize Yields in the Tropics. In “Modeling Extremes of Wheat and Maize Crop Performance in the Tropics. Proc. of a workshop.” (J. W. White and P. R. Grace, eds.), pp. 5-10. CIMMYT, Natural Resource Group., El Batán, Mexico.
- Wiles, L. J., et Wilkerson, G. G., 1991. Modeling Competition for Light between Soybean and Broadleaf Weeds. *Agricultural Systems* **35**, 37-51.
- Wilkerson, G. G., Coble, H. D., et Modena, S. A., 1987. A post-emergence herbicide decision model for soybeans. *Abstr. Weed Sci. Soc. Am.* **27**, 95.
- Wilkerson, G. G., Jones, G. W., Coble, H. D., et Gunsolus, J. L., 1990. SOYWEED: A simulation model of soybean and common cocklebur growth and competition. *Agron. J.* **82**, 1003-1010.
- Williams, J. R., Jones, C. A., et Dyke, P. T., 1984. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Trans. ASAE* **27**, 129-144.
- Zandstra, H. G., Price, E. C., Litsinger, J. A., et Morris, R. A., 1981. “A Methodology for On-farm Cropping Systems Research”. IIRI, Los Baños.
- Zoby, L. F., 1998. “História do processo Silvânia”. EMBRAPA-CPAC, Brasília.

ANNEXES