

N° / / / / / / / / / / / / /

THÈSE

pour obtenir le grade de

Docteur

de

**l'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement
(Agro Paris Tech)**

Spécialité : Agronomie

*présentée et soutenue publiquement
par*

Sophie LEBONVALLET

le 6 mai 2008

IMPLANTATION DU QUINOA ET SIMULATION DE SA CULTURE SUR L'ALTIPLANO BOLIVIEN

*Directeur de thèse : **Nadine BRISSON***

*Travail réalisé : INRA, UE1116 Agroclim, F-84000 Avignon,
IRD, UR60 CLIFA, La Paz BOLIVIE*

Devant le jury :

M. Bertrand NEY , Directeur de Recherche, INRA – Grignon	Président
M. Sylvain PLANTUREUX , Professeur, ENSAIA – Nancy	Rapporteur
M. Guy RICHARD , Directeur de Recherche, INRA – Orléans	Rapporteur
M. Bernardo PAZ BETANTCOURT , Chercheur, Fondation Autapo – La Paz	Examineur
M. Jean VACHER , Directeur de Recherche, IRD – La Paz	Examineur
Mme Nadine BRISSON , Directeur de Recherche, INRA – Avignon	Examineur

REMERCIEMENTS

Et bien voilà, c'est fini!

En premier lieu, je voudrais remercier Nadine. Je ne suis même pas sûre que le plus gros merci du monde suffise pour ton implication, ta patience, tes encouragements et le temps que tu m'as accordé depuis le stage de DEA, l'année de CDD et aujourd'hui la thèse.

Ensuite, Marie et Domi, les super-sticsettes, ou plutôt les pauvres sticsettes que j'ai harcelées de questions, en particulier ces derniers mois.

Et puis, merci à tous les membres d'Agroclim et de CSE/Emmah, qui me voient par intermittence depuis 2002, surtout Rosy et Odile qui ont toujours réussi à régler mes situations administratives compliquées, ou Fred qui a passé plusieurs mois à essayer de me trouver des données météo qui, décidément, n'existent pas, ou Zolando qui m'a accueilli chez lui.

Pour la partie bolivienne, évidemment un grand merci à Jean, pour tout, et surtout pour être toujours présent. Merci également à Jean-Pierre pour les expérimentations et tout le travail sur le terrain (et à Elisabeth pour tous les repas chez vous), à Thierry qui est aussi là depuis le début, ainsi que pour vos conseils à tous les deux, et à l'IRD à La Paz au sens large, pour le soutien logistique entre autres.

Je remercie bien sûr l'IFEA de ces quatre années de financement. Merci aussi à tous ceux qui ont suivi mon travail de thèse depuis 2004, de près ou de loin, Guy Richard, Odile Duval et l'INRA d'Orléans pour les analyses de sol et les conseils, Bertrand Ney, Bruno Mary, Jean-Paul Lhomme, Daniel Bertero et tous les Cacous d'Equeco,...

D'un point de vue personnel maintenant, dans l'ordre et dans le désordre.

Merci à tous les non-permanents qui ont défilé à l'INRA d'Avignon depuis 6 ans, avec une mention spéciale aux plus anciens, Iñaki qui est devenu mon co-bureau occasionnel cette année (je ne sais pas combien de fois j'ai pu dire "Gnak, j'ai encore une question..."), Paul mon 2^{ème} co-bureau occasionnel, François (qui est apparemment destiné à être mon voisin) et bien sûr Marjo.

Merci à mes parents, ma sœur (Georges, gros pétards), et à toute ma famille en général, qui vont bien devoir recommencer à me supporter, après toutes ces années au bout du monde ou de la France, ahah.

Merci à Vinie ma poulette blonde, et à tous les colocs ou les copains qui sont passés par notre appart à La Paz, en particulier Agnès, Céline, Adri, Ludo, Napo, Zamizo... Et puis à Sam, mon co-tesista quinoa, gracias por su colaboración, jajaja.

Enfin, merci à Pabs&Sou (pour tout, tout le temps) – Guigui(ouéééé, coinche)&Céline – Pok&Loic – Gino – Alex – Chouch – Benjouille – Pouic – Mehdi,... bon enfin 'les_fumistes', 'la tribue' et autres agros ou assimilés, mais non on n'est pas un troupeau. Et puis, Simon, maintenant que t'as supporté la fin de thèse, la suite devrait être plus rigolote !

TABLE DES MATIERES

CHAPITRE I – Contexte et problématique	13
1. Introduction.....	17
2. Présentation du quinoa.....	17
2.1. Le quinoa, une pseudo-céréale andine.....	17
2.2. Une valeur nutritive élevée.....	19
2.3. La Bolivie, premier exportateur mondial.....	19
3. Le quinoa et sa culture sur l’Altiplano bolivien.....	21
3.1. L’Altiplano, un milieu difficile.....	21
3.2. Une plante résistante adaptée à son milieu.....	25
3.3. Un système de culture dans chaque région.....	31
3.4. L’implantation de la culture, une phase déterminante.....	39
4. Approche choisie et organisation de l’étude.....	39
4.1. Intérêt de la modélisation.....	39
4.2. Choix du modèle.....	41
4.3. Les questions traitées.....	41
CHAPITRE II – Description du modèle STICS et des jeux de données	43
1. Présentation, fonctionnement et utilisation du modèle	47
1.1. Présentation générale.....	47
1.2. Possibilités d’utilisation et applications.....	47
1.3. Principes de fonctionnement et données nécessaires.....	49
1.4. Méthodologie de paramétrage pour une nouvelle culture.....	49
1.5. Outils statistiques et d’évaluation du modèle.....	51
2. Modules et formalismes.....	55
2.1. Développement.....	55
2.2. Croissance aérienne.....	57
2.3. Elaboration du rendement.....	59
2.4. Croissance racinaire.....	61
2.5. Fonctionnement hydrique.....	61
2.6. Fonctionnement azoté.....	63
2.7. Transferts de chaleur, d’eau et de nitrates.....	63
2.8. Gestion technique de la culture.....	65
2.9. Microclimat.....	65
3. Processus nécessitant une adaptation pour répondre aux conditions de culture du quinoa sur l’Altiplano bolivien.....	65
3.1. Limites du modèle STICS pour notre étude.....	65
3.2. Prise en compte de l’altitude.....	69
3.3. Modification des formalismes de germination et de levée.....	71
3.4. Intégration de l’effet du travail du sol.....	73
3.5. Ajout d’un formalisme pour le semis en poquet.....	75
4. Description des données d’entrée et des mesures utilisées.....	75
4.1. Dispositif expérimental.....	75
4.2. Climat.....	77
4.3. Sol.....	77
4.4. Itinéraire technique.....	79
4.5. Etat initial.....	79
4.6. Mesures biologiques comparables à des données de sortie.....	80

CHAPITRE III – Simulation de l’implantation du quinoa	82
1. Etat des lieux sur la mise en place des cultures.....	87
1.1. Généralités.....	87
1.2. Cas du quinoa.....	89
1.3. Comparaison avec d’autres cultures.....	91
1.4. Passage à la modélisation.....	91
2. Données et paramétrage.....	91
2.1. Données de germination et de levée observées.....	91
2.2. Paramétrage.....	93
2.3. Données utilisées pour l’expérimentation numérique.....	95
3. Intérêt des nouveaux formalismes proposés.....	95
3.1. Pour appréhender des conditions climatiques et des cultures variées.....	95
3.2. Pour représenter l’effet du travail du sol.....	97
3.3. Pour représenter le semis en poquet.....	99
4. Expérimentation numérique sur la levée.....	99
4.1. Fenêtre climatique théorique disponible pour la levée.....	99
4.2. Dispositif expérimental.....	99
4.3. Résultats du test croisé.....	101
4.4. Test de simulation de la date de semis.....	111
CHAPITRE IV – Simulation de la croissance et du rendement	117
1. Ecophysiologie du quinoa.....	121
1.1. Classification botanique et génétique.....	121
1.2. Morphologie.....	121
1.3. Biologie reproductive.....	125
1.4. Physiologie.....	125
1.5. Phénologie.....	125
1.6. Bilan des connaissances.....	129
2. Choix des formalismes.....	129
2.1. Développement.....	129
2.2. Croissance aérienne.....	131
2.3. Elaboration du rendement.....	131
2.4. Croissance racinaire.....	131
2.5. Fonctionnement hydrique.....	131
2.6. Fonctionnement azoté.....	131
3. Paramétrage à partir de la bibliographie, par analogie ou par expérimentation.....	131
3.1. Les températures cardinales.....	133
3.2. Le développement.....	133
3.3. Le feuillage.....	135
3.4. L’interception du rayonnement.....	135
3.5. La croissance en biomasse.....	135
3.6. La répartition de la biomasse entre organes.....	135
3.7. Le rendement.....	137
3.8. Les racines.....	137
3.9. Le gel.....	139
3.10. L’eau.....	139
4. Paramétrage par optimisation.....	139
4.1. Méthodologie.....	141
4.2. Optimisation des paramètres avec forçage du LAI et du développement.....	141
4.3. Optimisation des paramètres avec forçage du développement sans forçage du LAI.....	143
4.4. Optimisation des paramètres avec forçage de la date de levée.....	145
4.5. Cas de la levée.....	145
5. Cas particulier de l’azote.....	147
5.1. Etat des lieux des connaissances sur le comportement azoté du quinoa.....	147

5.2. Formalismes de STICS.....	149
5.3. Hypothèses de travail et méthodologie.....	151
5.4. Paramétrage.....	153
6. Analyse des résultats obtenus.....	155
6.1. Qualité de simulation.....	155
6.2. Cas de l'azote.....	161
6.3. Capacités et limites du modèle, processus encore insuffisamment pris en compte.....	161
CHAPITRE V – Application : étude de cas	165
1. Contexte et problématique.....	169
2. Intérêt d'un semis hétérogène.....	171
2.1. Dispositif expérimental.....	171
2.2. Effet sur le semis en ligne.....	171
2.3. Effet sur le semis en poquet.....	171
3. Effet des techniques d'implantation sur le rendement.....	175
3.1. Dispositif expérimental.....	175
3.2. Comparaison entre les sites.....	175
3.3. Comparaison des techniques dans l'Altiplano Sud.....	181
4. Impact de l'accélération des rotations.....	183
4.1. Dispositif expérimental.....	183
4.2. Effet sur la teneur en eau du sol.....	185
4.3. Effet sur la fertilité du sol.....	185
4.4. Effet sur les rendements et les teneurs en azote.....	191
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....	193
Références bibliographiques.....	199
Annexe 1- Dispositif expérimental des essais.....	213
Annexe 2- Caractéristiques des sols des essais.....	219
Annexe 3- Analyses de stabilité des sols.....	227
Annexe 4- Valeur des paramètres plante de STICS pour le quinoa.....	235

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Cultures de quinoa sur l'Altiplano bolivien.....	16
Figure 2. Graines de différentes variétés de quinoa.....	20
Figure 3. L'Altiplano bolivien.....	22
Figure 4. Risques agroclimatiques – le gel.....	24
Figure 5. Risques agroclimatiques – la sécheresse.....	24
Figure 6. Différents facteurs défavorables à l'agriculture sur l'Altiplano.....	26
Figure 7. Les techniques culturales sur l'Altiplano.....	30
Figure 8. Parcelles hétérogènes à densité de levée faible.....	38
Figure 9. Schéma d'organisation des différents modules du modèle STICS.....	46
Figure 10. Choix des formalismes pour chaque grande fonction de STICS.....	54
Figure 11. Effet de la teneur en eau du sol sur la germination.....	56
Figure 12. Courbe d'élongation de l'hypocotyle.....	56
Figure 13. Calcul des manques à la levée.....	58
Figure 14. Evolution du taux de couverture.....	58
Figure 15. Profil de densité racinaire efficace.....	60
Figure 16. Courbes de dilution de l'azote.....	62
Figure 17. Compartiments du sol et circulation de l'eau et des nitrates.....	64
Figure 18. Comparaison entre le rayonnement net mesuré et calculé.....	68
Figure 19. Nombre de jours disponibles entre imbibition et germination.....	70
Figure 20. Reconstitution des horizons du sol.....	72
Figure 21. Comparaison entre semis en ligne et semis en poquet.....	74
Figure 22. Modification des paramètres d'élongation pour un semis en poquet.....	74
Figure 23. Localisation des parcelles expérimentales sur l'Altiplano.....	76
Figure 24. Distribution des parcelles expérimentales (températures et précipitations).....	78
Figure 25. Texture des sols.....	78
Figure 26. Cinétique d'imbibition des semences.....	86
Figure 27. Cinétique de germination en laboratoire des graines de quinoa.....	90
Figure 28. Cinétiques de levée dans les parcelles.....	90
Figure 29. Courbes d'élongation selon la profondeur du poquet.....	92
Figure 30. Comparaison des précipitations et températures par rapport à la saison agricole.....	94
Figure 31. Comparaison des différentes phases d'émergence de la culture.....	96
Figure 32. Effet du poquet sur l'évaporation du sol.....	98
Figure 33. Fenêtre climatique disponible pour la période semis-levée.....	98
Figure 34. Evolution qualitative de l'humidité dans le profil du sol.....	102
Figure 35. Effet du semis en poquet sur les durées de germination et de levée.....	103
Figure 36. Effet du semis en poquet sur les densités de germination et de levée.....	104
Figure 37. Effet sur les densités avec condition sur la date maximale de levée.....	105
Figure 38. Atténuation de l'effet du sol grâce au semis en poquet.....	106
Figure 39. Variabilité des dates et profondeurs de semis optimales.....	106
Figure 40. Levée hétérogène dans un poquet.....	108
Figure 41. Effet de la battance sur les densités et durées de levée dans le Nord et le Centre.....	110

Figure 42. Evolution de l'épaisseur de la couche sèche en surface du sol.....	112
Figure 43. Date de semis optimale calculée par le modèle sur l'Altiplano Sud.....	113
Figure 44. Date de semis optimale calculée par le modèle sur les trois sites.....	113
Figure 45. Densités de levée en date de semis calculée par le modèle.....	114
Figure 46. Durées de levée en date de semis calculée par le modèle.....	114
Figure 47. Morphologie d'un plant de quinoa.....	122
Figure 48. Inflorescence amaranthiforme et glomérulaire.....	122
Figure 49. Phénologie du quinoa.....	126
Figure 50. Courbe forcée de LAI et paramètres de STICS.....	140
Figure 51. Forçage des LAI.....	140
Figure 52. Détermination du coefficient de stress qui minimise les écarts de développement...	142
Figure 53. Détermination des sommes de température de la courbe de LAI.....	144
Figure 54. Courbes de taux de couverture d'une plante isolée.....	144
Figure 55. Triangle textural de Jamagne.....	152
Figure 56. Courbe de dilution de l'azote pour le quinoa.....	152
Figure 57. Qualité de simulation en LAI forcé.....	154
Figure 58. Qualité de simulation en taux de couverture non forcé.....	156
Figure 59. Simulation de la phénologie.....	157
Figure 60. Qualité de simulation en date de levée non forcée.....	158
Figure 61. Evolution des variables de la plante avec les modifications de paramétrage azoté...	160
Figure 62. Variation du rendement avec la profondeur de semis.....	170
Figure 63. Comparaison entre rendement observé et simulé à la profondeur choisie.....	170
Figure 64. Intérêt d'un semis hétérogène sur la variabilité du rendement.....	172
Figure 65. Effet de la profondeur du poquet sur le rendement.....	173
Figure 66. Effet de la profondeur de la graine dans le poquet sur le rendement.....	173
Figure 67. Pourcentages de parcelles arrivant à maturité.....	176
Figure 68. Pourcentages de parcelles arrivant à maturité (par site).....	177
Figure 69. Pourcentages de parcelles arrivant à maturité (par date ou profondeur de semis).....	178
Figure 70. Rendement des plantes arrivées à maturité en fonction de la date de semis.....	179
Figure 71. Pourcentages de parcelles arrivant à maturité dans l'Altiplano Sud.....	180
Figure 72. Comparaison des rendements dans l'Altiplano Sud.....	180
Figure 73. Evolution de la réserve en eau des trois premiers horizons du sol.....	184
Figure 74. Réserve en eau au moment du semis.....	186
Figure 75. Evolution de la réserve en azote minéral des trois premiers horizons du sol.....	187
Figure 76. Réserve en azote minéral au moment du semis.....	186
Figure 77. Evolution de la teneur en azote organique du sol.....	188
Figure 78. Rendements selon les rotations, en option haute et en option basse.....	190

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Valeur nutritionnelle du quinoa.....	18
Tableau 2. Mécanismes de résistance à la sécheresse et au froid du quinoa.....	28
Tableau 3. Echelles de développement de STICS.....	54
Tableau 4. Comparaison entre le rayonnement net mesuré et calculé.....	68
Tableau 5. Erreur de prédiction, biais et dispersion pour le calcul du rayonnement net.....	68
Tableau 6. Effet de l'altitude sur le calcul de la demande climatique.....	70
Tableau 7. Effet des modifications de structure sur les paramètres physiques du sol.....	72
Tableau 8. Jeux de données disponibles.....	76
Tableau 9. Comparaison des séries climatiques expérimentales avec les séries 1980-2000.....	76
Tableau 10. Indices de battance des sols des essais.....	78
Tableau 11. Itinéraires techniques des essais.....	80
Tableau 12. Teneurs en azote minéral moyennes des sols.....	80
Tableau 13. Mesures biologiques réalisées sur chaque parcelle expérimentale.....	80
Tableau 14. Valeurs des paramètres de croissance racinaire.....	92
Tableau 15. Itinéraires techniques utilisés pour comparer les conditions de culture.....	94
Tableau 16. Températures et précipitations moyennes sur la période 2003-2006.....	94
Tableau 17. Valeurs des paramètres de germination et de levée pour le quinoa et le maïs.....	96
Tableau 18. Caractéristiques des phases d'imbibition, de germination et de levée.....	96
Tableau 19. Effet du labour sur l'état hydrique du sol au moment du semis.....	98
Tableau 20. Dispositif de l'expérimentation numérique.....	100
Tableau 21. Etalement des plages de levée en fonction de la profondeur de semis.....	108
Tableau 22. Effet du labour sur la teneur en eau du sol.....	108
Tableau 23. Valeurs des sommes de température avant et après correction.....	144
Tableau 24. Profondeurs de semis optimisant la levée simulée.....	144
Tableau 25. Paramétrage initial du fonctionnement azoté.....	150
Tableau 26. Quantités d'azote exportées.....	150
Tableau 27. Critères statistiques en LAI forcé.....	154
Tableau 28. Critères statistiques en taux de couverture non forcé.....	157
Tableau 29. Critères statistiques en levée non forcée.....	158
Tableau 30. Coefficient de variation du rendement entre profondeurs de semis.....	170
Tableau 31. Coefficient de variation du rendement entre parcelles.....	172
Tableau 32. Dispositif de l'expérimentation numérique sur les trois sites.....	174
Tableau 33. Dispositif de l'expérimentation numérique sur l'Altiplano Sud.....	174
Tableau 34. Dates butoir de récolte.....	174

CHAPITRE I

Chapitre I : Contexte et problématique

1. INTRODUCTION	17
2. PRESENTATION DU QUINOA.....	17
2.1. LE QUINOA, UNE PSEUDOCEREALE ANDINE.....	17
2.2. UNE VALEUR NUTRITIVE ELEVEE.....	19
2.3. LA BOLIVIE, PREMIER EXPORTATEUR MONDIAL	19
3. LE QUINOA ET SA CULTURE SUR L'ALTIPLANO BOLIVIEN.....	21
3.1. L'ALTIPLANO, UN MILIEU DIFFICILE	21
3.1.1. Généralités	21
3.1.2. Climat	23
3.1.3. Risques agroclimatiques.....	23
3.2. UNE PLANTE RESISTANTE ADAPTEE A SON MILIEU.....	25
3.2.1. Résistance à la sécheresse.....	25
3.2.2. Résistance au froid	27
3.2.3. Résistance à la salinité	29
3.2.4. Vent, neige, grêle,... ..	29
3.2.5. Maladies, parasites et ravageurs.....	29
3.3. UN SYSTEME DE CULTURE DANS CHAQUE REGION	31
3.3.1. Généralités	31
3.3.2. Altiplano Sud	31
3.3.2.1. Système de culture manuel traditionnel	33
3.3.2.2. Système de culture mécanisé	35
3.3.3. Altiplano Centre	35
3.3.4. Altiplano Nord	37
3.4. L'IMPLANTATION DE LA CULTURE, UNE PHASE DETERMINANTE	39
4. APPROCHE CHOISIE ET ORGANISATION DE L'ETUDE	39
4.1. INTERET DE LA MODELISATION.....	39
4.2. CHOIX DU MODELE	41
4.3. LES QUESTIONS TRAITEES	41

Figure 1. Cultures de quinoa sur l'Altiplano bolivien



Photos IRD

1. Introduction

Cette étude a été initiée en 2003 à l'INRA d'Avignon. Elle a été financée grâce à quatre années de bourse de l'IFEA (Institut Français d'Etudes Andines) et du Ministère des Affaires Etrangères. Tout le travail de terrain a été réalisé pendant deux ans et demi en Bolivie grâce à un accueil dans les locaux de l'IRD à La Paz, en collaboration avec les facultés d'agronomie boliviennes. La suite s'est effectuée à l'unité Agroclim de l'INRA d'Avignon. Elle va se poursuivre par une participation au projet Equeco "L'émergence du quinoa dans le commerce mondial : quelles conséquences sur la durabilité sociale et agricole dans l'Altiplano Bolivien ?", du programme fédérateur "Agriculture et Développement Durable", appel d'offre 2006.

Ce travail vise à comprendre les enjeux de l'implantation et les systèmes de culture du quinoa sur l'Altiplano bolivien. Les risques climatiques pour l'agriculture y sont en effet très élevés, avec des précipitations peu importantes et très variables ainsi que du gel fréquent, en particulier pendant les dernières phases de développement de la culture. L'implantation de la culture et son développement pendant les premières phases de croissance sont donc des facteurs décisifs du rendement. La période de semis se situe au tout début de la saison des pluies, avec des précipitations encore faibles et irrégulières ; la teneur en eau du sol à ce moment dépend de l'eau accumulée pendant la saison des pluies précédentes, de sa dynamique pendant l'hiver et des premières pluies de la nouvelle saison humide. Les pratiques culturales employées sont déterminantes pour la suite du cycle. Tous ces aspects seront traités par modélisation, en adaptant le modèle de fonctionnement des cultures STICS au quinoa et à ses conditions de culture sur l'Altiplano bolivien.

Ce premier chapitre introductif permet de définir le sujet dans son contexte, l'émergence du quinoa dans le commerce mondial. Il présente pour cela le quinoa et sa culture sur l'Altiplano. La description des difficultés liées à l'implantation de la culture débouche sur celle de l'organisation de ce travail.

2. Présentation du quinoa (*Chenopodium Quinoa Willd.*)

2.1. Le quinoa, une pseudocéréale andine

Le quinoa (Figure 1) est une espèce native d'Amérique du Sud, originaire de la région andine et plus particulièrement des hauts plateaux (Altiplano) bolivien et péruvien (Wilson, 1990 ; Mujica *et al.*, 2001) où il a été domestiqué entre 3 000 et 5 000 ans BP (before present). Le quinoa cultivé le plus ancien a été trouvé sur les bords du lac Titicaca et daté à 3 500-2 800 ans BP (Bruno et Whitehead, 2003) ; il est mentionné pour des périodes plus anciennes, proches de 5 000 ans BP, mais seulement pour des cueillette (Heiser et Nelson, 1974 ; Planelle et Tagle, 2004). Alors que la pomme de terre et le maïs, autres cultures majeures d'Amérique du Sud, ont atteint une distribution cosmopolite, le quinoa ne s'est pas vraiment répandu en dehors des montagnes andines et de la côte chilienne. Pendant la période Inca, il a toutefois occupé après le maïs une place prédominante parmi les plantes à graines (Hunziker, 1952 cité par Jacobsen et Stolen, 1993) ; Cieza de Leon, lors de son voyage dans les Andes entre 1535 et 1545, cite ainsi de grandes extensions de quinoa dans la région de Quito et sur les hauts plateaux du Sud du Pérou et du Nord de la Bolivie (Cieza de Leon, 1560). Après la conquête espagnole au XVI^{ème} siècle, la culture et l'utilisation du quinoa ont connu un important déclin à cause de l'introduction de cultures européennes (blé, orge) ; de plus, les colons espagnols semblent en avoir activement découragé la culture en raison de son statut religieux dans la société Inca, qui considérait le quinoa comme une graine sacrée (Cusack, 1984 cité par Jacobsen et Stolen, 1993). Il est devenu une culture mineure, dont seules les populations indigènes ont poursuivi la production pour leur consommation locale dans les régions montagneuses, où il est tout de même demeuré la plante à graine la plus cultivée de par sa tolérance aux conditions climatiques difficiles (Rea *et al.*, 1979).

Tableau 1. Valeur nutritionnelle du quinoa

a- Composition des grains de quinoa et de blé (g/100g de matière sèche)

	Quinoa *	Blé * ¹ **
Protéines	11,0 - 21.3	12,5
Lipides	5,3 - 8.4	2 - 3
Glucides	53,5 - 74.3	67 - 71
Fibres	2,1 - 4.9	2- 4
Cendres	3,0 - 3.6	1,5 - 2,5
Humidité	9,4 - 13.4	14,5

Sources :

* *Tapia et al. (2000)*

** *Feillet (2000)*

b- Comparaison des besoins humains en acides aminés et des teneurs en acides aminés essentiels des protéines du lait, du quinoa, du blé et du soja (mg d'acides aminés / g de protéine)

Acides aminés essentiels (mg/g de protéines)	Besoins d'un adulte *	Besoins d'un enfant *	Lait entier de vache **	Quinoa ***	Blé **	Soja **
Histidine	16	19	27	31	25	28
Isoleucine	13	28	47	53	35	50
Leucine	19	66	95	63	71	86
Lysine	16	58	78	64	31	70
Méthionine + Cystine	17	25	33	28	43	28
Phénylalanine + Tyrosine	19	63	102	72	80	88
Thréonine	9	34	44	44	31	42
Tryptophane	5	11	14	9	12	14
Valine	13	35	64	48	47	52
Total	127	339	504	412	375	458

Sources :

* *Adapté de FAO (1985)*

** *FAO (1970)*

*** *Ayala (2001)*

La région traditionnelle de culture du quinoa en Amérique du Sud s'étend de la Colombie au Nord (2°N) au Chili au Sud (40°S), et du niveau de la mer à 4 000 mètres d'altitude. Cette diversité d'écosystèmes est associée à une variabilité génétique importante se traduisant par plus de 1 000 variétés de quinoa (Tapia, 1979 ; 2000) ; le germoplasme bolivien regroupe actuellement 3 121 accessions (Proinpa, 2008). Ces variétés peuvent être réparties en cinq groupes selon les adaptations morphologiques et physiologiques particulières qu'elles ont pu développer pour s'adapter à leur environnement. Le premier groupe est très différent des quatre autres, et se trouve à basse altitude et proche de la mer, dans un climat pluvieux (1 000 à 1 500 mm par an). Le deuxième groupe correspond aux quinoas subtropicaux des vallées humides amazoniennes, entre 1 500 et 2 000 m d'altitude avec une pluviométrie de 1 000 à 2 000 mm. Le troisième se rencontre dans les vallées andines situées entre 2 000 et 3 500 m d'altitude et qui ont des précipitations modérées (500 à 1 500 mm). Le quatrième contient les variétés « altiplaniques », qui se développent entre 3 800 et 4 100 m d'altitude, aux alentours du lac Titicaca ainsi que sur l'Altiplano Nord et Centre, avec des précipitations comprises entre 400 et 800 mm par an. Enfin, le dernier groupe contient les variétés proches des "salars", vastes déserts de sel du sud de l'Altiplano bolivien et de la frontière avec le Chili. Les précipitations annuelles dans la région, caractérisée par un climat aride, sont en moyenne inférieures à 300 mm. Les variétés des trois premiers groupes ont des grains de petite taille, tandis que celles du groupe "Salar" présentent les grains les plus gros (Tapia, 1979 ; Laguna, 2002).

2.2. Une valeur nutritive élevée

Le grain du quinoa possède une valeur nutritive élevée et sa qualité nutritionnelle a été comparée à celle du lait (Tableaux 1 a et b) par l'Organisation pour l'Alimentation et l'Agriculture (Food and Agriculture Organization, FAO). Il est, en termes de quantité et de qualité de protéines, supérieur à de nombreuses céréales. Le quinoa contient ainsi de 11 à 22% de protéines selon les sources, alors que cette teneur n'est généralement que de 7 à 13% chez les céréales (Kozioł, 1992 ; Cardazo et Tapia, 1979 ; Wright *et al.*, 2002 ; Ayala *et al.*, 2001 ; Schlick et Budenheim, 1996). Il possède de plus une composition en acides aminés essentiels complète et relativement équilibrée, qui le rend complémentaire de la plupart des céréales, voire de certaines légumineuses. Il est en particulier riche en lysine, présente en faible quantité chez le blé. Le quinoa s'approche ainsi des besoins en acides aminés pour l'alimentation humaine définis par la FAO (FAO, 1970 ; 1985). Le quinoa ne contient pas de gluten et est également riche en minéraux, en lipides et en fibres (De Bruin, 1964 ; Tapia, 2000).

2.3. La Bolivie, premier exportateur mondial

La culture du quinoa a été réduite et est devenue très localisée à la suite de la colonisation ; le quinoa n'a été revalorisé qu'à partir de la seconde moitié des années soixante grâce à des études sur son potentiel nutritif. Par la suite, dans les années soixante-dix, l'abandon des cultures de quinoa dans diverses zones du Pérou, du Chili et de l'Equateur a entraîné une forte augmentation de la demande de ces pays. Enfin, depuis les années quatre-vingts, l'ouverture du marché vers les pays du Nord et l'augmentation de la demande internationale ont sorti le quinoa de son statut marginal. En particulier, l'attrait croissant depuis le début des années quatre-vingt-dix des pays "développés" pour les produits diététiques, biologiques ou de "commerce équitable", combiné au développement d'une filière biologique de quinoa, continuent d'entraîner une hausse de la demande (Felix, 2004).

La Bolivie joue un rôle majeur dans la production mondiale de quinoa (Laguna, 2002). Cette production est assurée exclusivement par de petits producteurs de l'Altiplano qui cultivent surtout les variétés altiplaniques et du Salar ; 60% de la production vient ainsi de l'Altiplano Sud. En 1981, la Bolivie devient le premier producteur mondial de quinoa devant le Pérou et le reste jusqu'en 1997 ; elle ne cesse pendant cette période d'augmenter sa production, qui passe de 9 000 à 26 000 tonnes par an. La surface cultivée en quinoa est dans le même temps multipliée par 2,5, pour atteindre près de

Figure 2. Graines de différentes variétés de quinoa

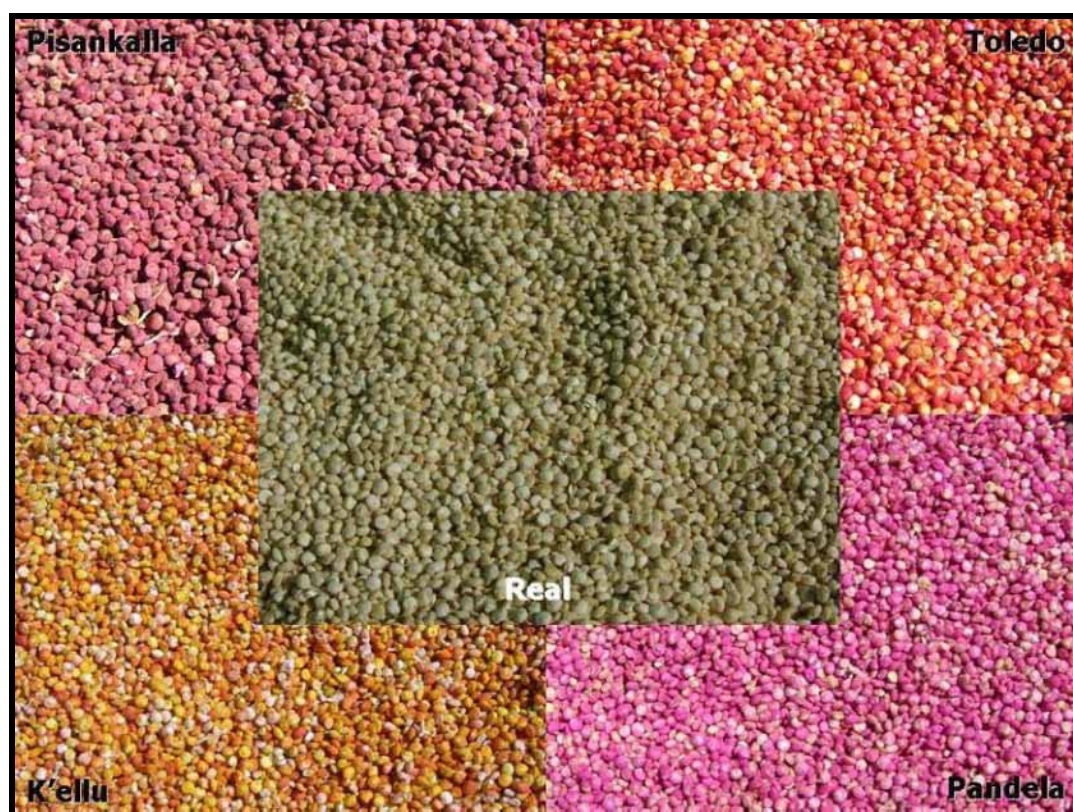


Photo IRD

40 000 ha depuis 1997, avec un pic jusqu'à 50 000 ha à la fin des années quatre-vingts ; cet accroissement concerne principalement la région du Salar dans l'Altiplano Sud. Depuis 1998, la Bolivie est à la seconde place après le Pérou, avec qui elle se partage plus de 90% de la production mondiale, stabilisée aux alentours de 55 000 tonnes ces 10 dernières années. En 2006, la production de quinoa en Bolivie est ainsi de 25 000 tonnes (contre 32 000 au Pérou). L'Equateur, avec moins de 1 000 tonnes par an, occupe la troisième place (Laguna, 2002 ; FAOSTAT, 2007).

Si elle n'est plus que le second producteur, la Bolivie est toutefois le premier exportateur mondial puisqu'elle assure maintenant aux alentours de 90% des exportations, les quinoas péruvien et équatorien n'étant pratiquement destinés qu'à l'autoconsommation (Laguna, 2002). Les exportations boliviennes annuelles ont ainsi augmenté, de moins de 300 tonnes en 1989 à environ 1 700 tonnes actuellement, avec jusqu'à 2 000 tonnes en 1999. Le prix de la tonne a, quant à lui, quintuplé en 20 ans, passant de moins de 250 dollars en 1985, à environ 1 200 dollars aujourd'hui (Laguna, 2002). Moins de 10% de la production bolivienne de quinoa est donc destiné à l'exportation "officielle", la majorité de la production étant en fait consommée par les producteurs eux-mêmes, vendue en interne sur le marché local, ou surtout exportée par contrebande vers le Pérou essentiellement.

Cette position de premier exportateur de la Bolivie est liée à la qualité du grain produit pour répondre à la demande internationale (Etats-Unis et Europe principalement). Le premier critère est un grain blanc de gros diamètre (Figure 2), le second une production en agriculture biologique, ce que permettent les activités agricoles autour du Salar avec les variétés du type "Real", au contraire du Pérou et de l'Equateur. Depuis 1998, pour s'adapter à cette demande, plus de 90% des exportations de quinoa sont ainsi produites en agriculture biologique, alors que celle-ci représentait moins de 10% en 1995. La variété Real est produite essentiellement sur l'Altiplano Sud, car sa faible résistance au mildiou la rend difficile à cultiver dans le Centre et dans le Nord, où les pluies sont plus abondantes, si bien que l'Altiplano Sud est la seule région de Bolivie à produire un quinoa Real certifié biologique. Son prix à l'exportation est plus élevé que celui des autres variétés ; l'autoconsommation dans sa région de production et la vente sur le marché national sont réduites par rapport à l'Altiplano Centre ou Nord (Laguna, 2002).

3. Le quinoa et sa culture sur l'Altiplano bolivien

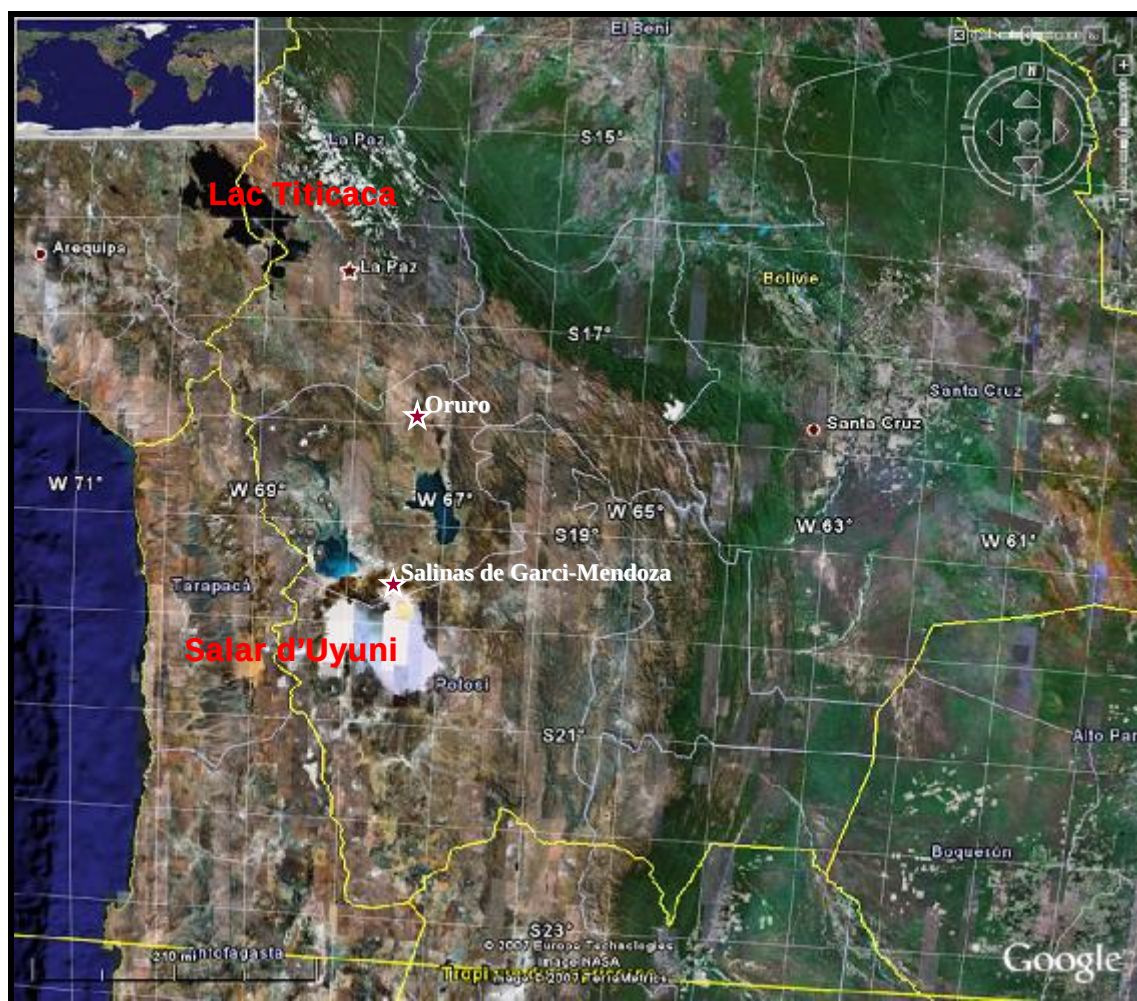
3.1. L'Altiplano, un milieu difficile

3.1.1. Généralités

L'Altiplano bolivien est un vaste plateau de près de 200 000 km², compris entre les latitudes sud 16 et 20°, entre les longitudes ouest 67 et 69° (Figure 3). Son altitude, qui est de 3 800 mètres au-dessus du niveau de la mer en moyenne, varie de 3 600 à 4 600 mètres. Il est délimité au nord par le lac Titicaca, au sud par le Salar de Uyuni et les déserts du Lipez, à l'est et à l'ouest par les cordillères andines (respectivement Real et Occidentale). Il constitue l'une des principales régions agricoles de la Bolivie. La végétation naturelle dominante est constituée d'espèces ligneuses telles que la thola (*Parastrephia lepidophylla*), ou de graminées du genre *Stipa*, toutes d'une hauteur ne dépassant pas 1,5 mètre. L'agriculture repose principalement sur la production de tubercules (pomme de terre, oca), de légumineuses (fève), de plantes fourragères (orge, luzerne) pour bovins, ovins et camélidés, et des grains andins (quinoa, cañahua).

Si, de par sa latitude, le climat se situe dans la zone intertropicale, il est cependant plutôt déterminé par son altitude et le relief andin. Les précipitations annuelles moyennes varient de 200 à 800 mm et présentent une très forte variabilité interannuelle. La température moyenne est inférieure à 10°C avec des amplitudes thermiques journalières très fortes. Le rayonnement global moyen sur l'année dépasse

Figure 3. L'Altiplano bolivien



les 20 MJ.m⁻².j⁻¹ (Vacher *et al.*, 1989 ; 1994). Les refroidissements radiatifs nocturnes, dus au bilan de rayonnement négatif (inférieur à -100 W.m⁻²) la nuit par ciel clair, induisent de fréquents risques de gelées. De plus, les épisodes de grêle, de neige ou de vent fort sont importants toute l'année, en particulier pendant l'hiver où le vent peut atteindre les 25 m/s.

Une année sur trois les précipitations pendant la saison agricole (septembre à avril) sont inférieures à la moitié de la demande climatique, qui est de l'ordre de 3-4 mm par jour sur l'Altiplano (Vacher et Imaña, 1987 ; Vacher *et al.*, 1988 ; Garcia, 2003 ; Garcia *et al.*, 2003), et la probabilité d'occurrence d'une température inférieure à -2°C pendant les mois de développement des cultures (janvier à mars) est souvent supérieure à 40% (Le Tacon *et al.*, 1992).

Les sols sont pour la plupart sableux (plus de 80% de sable dans l'Altiplano Sud), peu fertiles, et certains peuvent présenter une salinité élevée, si bien que les conditions sont en fait très limitantes pour l'agriculture. Les risques très élevés de sécheresse et de gelées pendant le cycle de culture limitent d'autant plus la production, et les rendements moyens des cultures sont très variables et en moyenne faibles (0,6 t.ha⁻¹ pour le quinoa).

3.1.2. Climat

Le climat de l'Altiplano est caractérisé par l'alternance d'une saison sèche, de mai à octobre, et d'une saison humide, de novembre à avril, durant laquelle tombent les trois quarts voire les quatre cinquièmes des précipitations annuelles. Pendant la saison sèche, les amplitudes thermiques quotidiennes sont fortes, conséquence de la sécheresse de l'atmosphère, mais sont réduites pendant la saison des pluies en raison de l'humidité atmosphérique. Les températures maximales varient très peu au cours de l'année, les différences entre le mois le plus chaud et le mois le plus froid étant de l'ordre de 5 à 6°C ; elles sont toujours positives lorsque l'altitude est inférieure à 5 000 mètres. Les saisons thermiques sont en fait différenciées essentiellement par les températures minimales.

Dans l'Altiplano Sud, où les conditions sont les plus difficiles, le climat est froid et semi-aride à aride. Les pluies sont faibles et distribuées irrégulièrement entre les mois de décembre à mars, avec une précipitation moyenne annuelle inférieure à 300 mm. La température moyenne est de l'ordre de 9°C et les températures minimales moyennes annuelles sont inférieures à 0°C. Les variations de températures sont saisonnières et journalières, avec des amplitudes journalières de températures (parfois supérieures à 25°C) plus grandes que les amplitudes saisonnières. Si pendant la période agricole, l'humidité relative minimale journalière se situe autour de 40%, elle peut descendre en dessous de 10% pendant la saison hivernale sèche. Le relief induit des variations microclimatiques sur toute la région, qui se manifestent principalement sur les températures minimales ; des différences de parfois 5°C peuvent ainsi se produire sur moins de 200 m de distance entre une parcelle de versant et une parcelle de plaine, où les masses d'air froid, plus lourd, se concentrent (De Bouet du Portal, 1993).

L'humidité réduite de l'air dans cette région entraîne des déficits radiatifs nocturnes très négatifs et donc un refroidissement nocturne rapide avec des températures minimales qui descendent une grande partie de l'année à des valeurs inférieures à zéro, principalement dans les plaines. Pendant les mois les plus froids, de juin à août, les températures minimales peuvent être inférieures à -20°C.

Les versants, grâce à une humidité plus élevée des sols, sont moins affectés par les gelées que les plaines.

3.1.3. Risques agroclimatiques

Les risques les plus importants sont ceux liés au gel et à la sécheresse. Pour quantifier ces risques, nous avons travaillé sur des séries journalières de températures minimales et de précipitations entre 1980 et 2000 sur les stations de Viacha - La Paz (16°65'S, 68°30'O, 3 870 m) pour l'Altiplano Nord,

Figure 4. Risques agroclimatiques – le gel

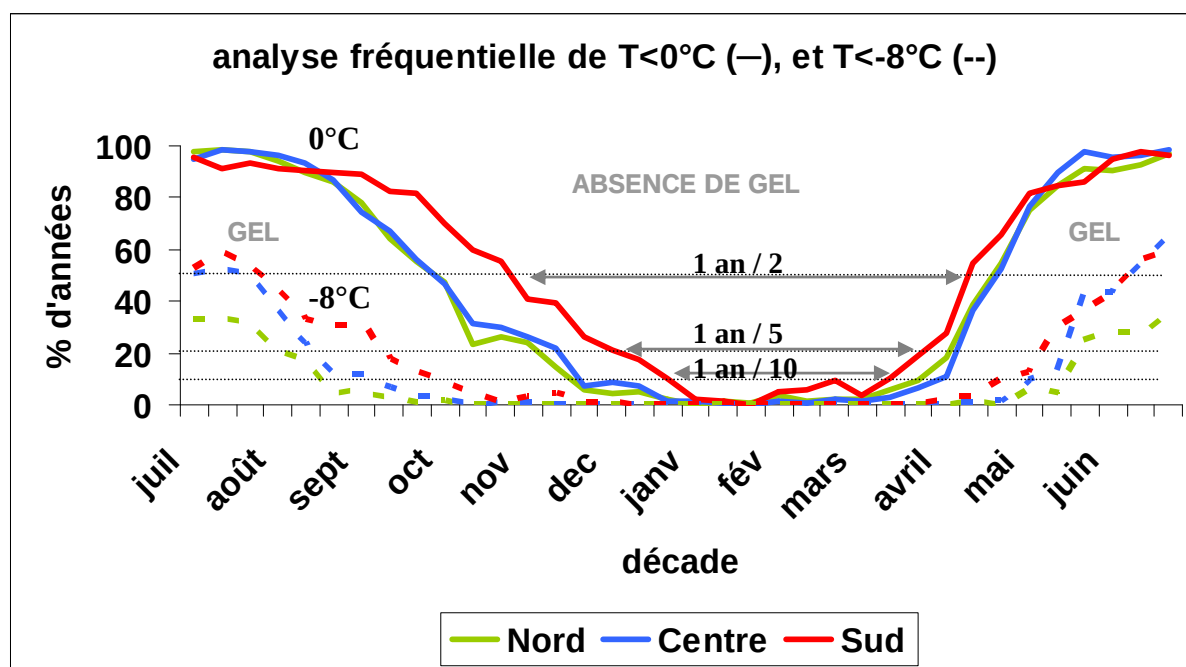
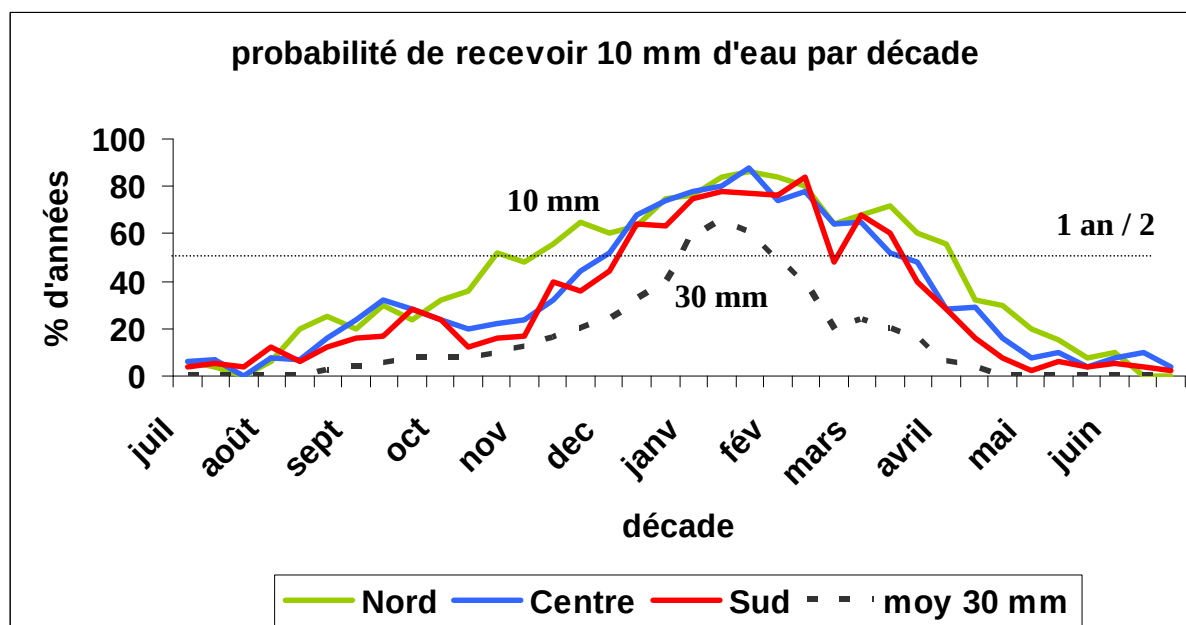


Figure 5. Risques agroclimatiques – la sécheresse



Oruro (17°97'S, 67°07'O, 3 715 m) pour l'Altiplano Centre, Salinas de Garci-Mendoza (19°63'S, 67°20'O, 3 730 m) pour l'Altiplano Sud (Figure 3). A partir de ces données, nous avons calculé, du nord au sud de l'Altiplano et par décade, les probabilités d'occurrence de températures négatives entre 0 et -8°C, ainsi que celles de recevoir une quantité de pluie suffisante pour l'agriculture.

Les courbes d'occurrence d'une température inférieure à 0°C indiquent les périodes avec et sans gel au cours de l'année selon les sites (Figure 4). Une année sur deux, en moyenne de 150 jours (dans le Sud) à 200 jours (dans le Nord) par an sont libres de gel, c'est-à-dire une période qui couvre la quasi-totalité de la saison agricole. Cependant, une année sur cinq, cette durée n'est plus que de 150 jours dans le Nord ; une année sur dix, les risques de gel couvrent les deux-tiers de la saison agricole dans le Sud, ne laissant que 80 jours de libres. Il faut passer à une température de -8°C pour que les risques soient inférieurs à 50% toute l'année dans le Nord, et restent bien inférieurs à 10% sur tous les sites pendant la saison agricole, avec plus de 190 jours de libres dans le Sud.

Concernant les risques de sécheresse, nous avons calculé les probabilités de recevoir 10 mm d'eau par décade. La demande évaporative moyenne annuelle sur l'Altiplano est d'environ 3 à 4 mm par jour, avec des demandes journalières qui peuvent atteindre 6,5 mm (Vacher *et al.*, 1994 ; Garcia *et al.*, 2003) ; 1 mm par jour a été considéré comme une limite minimale de référence pour la plante, sachant bien que les besoins réels sont supérieurs (Garcia, 2004b). Les résultats sont présentés sur la Figure 5. Cette probabilité dépasse 75% pour seulement sept décades dans le Nord et cinq dans le Sud, ce qui est très faible. Nous avons également représenté une probabilité moyenne sur les trois sites de recevoir 30 mm d'eau par décade, soit les 3 mm requis par jour, elle ne dépasse 50% que pendant trois décades, entre janvier et février (Garcia, 2004b).

Le gradient climatique très marqué qui existe entre le nord et le sud de l'Altiplano, explique le fait que les régions près du lac Titicaca, moins froides et moins sèches, soient les plus cultivées et diversifiées, tandis que dans la région du Salar, où le climat est le plus rude, ne sont présentes que les cultures résistant à ces conditions extrêmes, telles que le quinoa ou éventuellement une variété de pomme de terre amère.

3.2. Une plante résistante adaptée à son milieu

Les caractéristiques agroclimatiques de l'Altiplano bolivien, région principale de production du quinoa, font de sa culture une activité à hauts risques (Figure 6). Le quinoa a toutefois développé divers mécanismes de défense contre les différents facteurs abiotiques défavorables, qui lui permettent d'obtenir des rendements économiquement acceptables même dans ces conditions parfois drastiques.

3.2.1. Résistance à la sécheresse

L'effet de la sécheresse sur la plante dépend d'une série de facteurs tels que principalement l'intensité de l'épisode sec, sa durée et le climat pendant cette sécheresse (température, humidité relative et rayonnement), mais aussi la phase phénologique durant laquelle elle se produit, le génotype de la plante ou le fait qu'elle ait déjà souffert de sécheresse à un stade précédent, ou enfin les caractéristiques du sol et la tolérance de la plante au déficit hydrique (Mujica *et al.*, 2001). Ces effets peuvent se manifester par une réduction significative de la taille de la plante, de sa surface foliaire, de la biomasse et du rendement (Mujica *et al.*, 2000 ; Apaza *et al.*, 2001) ; le quinoa maintient cependant des rendements jusqu'à 1,5 t.ha⁻¹ avec moins de 200 mm de pluie pendant son cycle (Mujica *et al.*, 2001). D'après Mujica *et al.* (2000), les phases critiques où un stress hydrique a le plus d'effet sur le rendement sont la floraison et le remplissage des grains. Les travaux de Geerts *et al.* (2006a ; 2008) confirment ce résultat, et montrent même qu'un stress modéré pendant les phases initiales de croissance aura au contraire pour effet une meilleure résistance du quinoa dans la suite du cycle. Des résultats similaires existent sur le blé (Gate, 1995).

Figure 6. Différents facteurs défavorables à l'agriculture sur l'Altiplano

Le gel



La sécheresse



La grêle



Le mildiou



Les chenilles

Photos IRD

Vacher *et al.* (1998) ont montré que pendant les périodes de sécheresse au cours du cycle, une combinaison de facteurs permettait au quinoa une alimentation hydrique régulière du peu d'eau présent dans le sol ainsi qu'une transpiration continue, la fermeture stomatique ne se produisant que très tardivement. L'efficacité d'utilisation de l'eau augmente lors d'une séquence de sécheresse, et lorsque la conductance stomatique diminue à cause d'un déficit hydrique, la photosynthèse diminue moins que la transpiration et la production de biomasse peut être maintenue. Cette capacité du quinoa à continuer de fonctionner en période de stress hydrique est étroitement liée à certains aspects morphologiques de la feuille (relief accidenté du limbe, stomates bien protégés par des cellules épidermiques relativement plus volumineuses, présence de vésicules pouvant recouvrir jusqu'à 80% de la surface foliaire), qui permettent de retenir une pellicule d'eau augmentant l'humidité relative de la couche limite de la feuille (Dizes et Bonifacio, 1992). Ainsi, dans des conditions sèches, les échanges gazeux sont plus importants en début de journée, lorsque les feuilles peuvent profiter de l'humidité accumulée pendant la nuit. Les résultats de Garcia *et al.* (1992) vont dans le même sens, en montrant une transpiration et une consommation en eau continues malgré le déficit hydrique, ce qui signifie une production de biomasse constante. Cette stratégie de tolérance plutôt que d'évitement du déficit hydrique se rapproche du comportement d'une plante xérophyte. Enfin, en phase d'assèchement du sol, un potentiel hydrique foliaire de fermeture des stomates de l'ordre de -1,2 MPa (en début de cycle) à -1,6 MPa (pendant le remplissage des grains) a été observé par Jensen *et al.* (2000), et de l'ordre de -2 MPa par Vacher *et al.* (1998). Ces valeurs sont plus proches de celles de monocotylédones telles que le blé (Shimshi *et al.*, 1982 ; Henson *et al.*, 1989) ou le sorgho (Girma et Krieg 1992a,b), que des autres dicotylédones telles que le lupin (Henson *et al.*, 1989; Jensen *et al.*, 1998) ou le colza (Jensen *et al.*, 1996). Jensen *et al.* (2000) ont également obtenu un potentiel osmotique foliaire bas (de -1,0 à -1,4 MPa, contre -0,7 MPa pour le lupin ou -0,9 pour le colza), qui permet de maintenir un gradient d'entrée d'eau dans la plante même pour un potentiel hydrique du sol faible.

Différents mécanismes de résistance à la sécheresse semblent ainsi présents chez le quinoa, à la fois pour échapper au stress hydrique, pour le tolérer ou pour y faire face. Echapper aux périodes de sécheresse se traduit par un rallongement du cycle lorsque le stress hydrique se produit pendant les premiers stades de croissance (Jacobsen et Mujica, 2001 ; Jacobsen *et al.*, 2003). Le quinoa tolère la sécheresse principalement grâce à l'élasticité de ses tissus, à son potentiel osmotique faible et au maintien de sa turgescence. Enfin, il peut y faire face grâce à son système racinaire très étalé en surface et qui peut être profond quand le sol le permet, à une réduction de sa surface foliaire par la chute des feuilles, à des glandes vésiculaires spéciales, à des cellules petites avec une paroi épaisse qui maintiennent leur turgescence et enfin grâce à un comportement stomatique dynamique (Jensen *et al.*, 2000).

Mujica *et al.* (2001) ont résumé ces mécanismes d'ordre morphologique, physiologique, anatomique, phénologique ou biochimique (Tableau 2).

3.2.2. Résistance au froid

L'effet du gel sur la plante est différent selon son intensité et sa durée, mais aussi selon les phases phénologiques où il se produit, l'humidité relative de l'air et le génotype. Il est généralement admis que la température minimale limite de croissance pour le quinoa est de -5°C (Bois *et al.*, 2006). Des observations au champ ont montré des variétés résistantes jusqu'à -14°C au stade plantule (Vacher *et al.*, 1998), voire jusqu'à -16 à -18°C d'après Catacora et Canahua (1992) durant les premiers stades de croissance. Les phases les plus sensibles sont la mise en place de l'épi, la floraison et le stade grain laiteux (Canahua et Rea, 1979). Jacobsen *et al.* (2000a ; 2005) ont trouvé une baisse de rendement inférieure à 10% consécutivement à un gel de -4°C au stade deux feuilles, mais de 66% lorsque le gel se produit au stade floraison.

Tableau 2. Mécanismes de résistance à la sécheresse et au froid du quinoa

Mécanismes de résistance et de tolérance du quinoa à la sécheresse et au froid (d'après Mujica *et al.*, 2001)

Type de mécanisme	Sécheresse	Froid
Morphologique	- Chute des feuilles ou feuilles plus petites et moins nombreuses pour réduire la surface foliaire et la transpiration - Réduction de la taille de la plante - Forte concentration de cristaux d'oxalate de calcium sur les feuilles autour des stomates pour accumuler l'humidité et refléter le rayonnement solaire - Enroulement des feuilles	- Chute des feuilles ou feuilles plus petites - Réduction de la taille de la plante
Physiologique	- Rôle photosynthétique possible de la panicule et des tiges après la chute des feuilles - Position différente des feuilles entre le jour et la nuit et courbure de la tige - Plasticité de la dynamique de développement - Récupération rapide après un épisode sec - Asynchronie de la floraison - Meilleure résistance après un pré-conditionnement - Elasticité de la membrane cellulaire - Réduction stomatique précoce mais maintien d'une transpiration et d'une photosynthèse pendant la période sèche - Ajustement osmotique	- Accumulation dans les cellules de proline et de sucres solubles - Position différente des feuilles entre le jour et la nuit et courbure de la tige - Osmorégulation pour réduire la formation de glace dans l'espace apoplastique
Anatomique	- Système racinaire plus profond et plus dense - Stomates moins nombreux et plus petits	- Stomates moins nombreux et plus petits
Phénologique	- Modification des durées des phases phénologiques	- Rallongement des phases phénologiques les plus tolérantes au froid
Biochimique	- Présence de cristaux d'oxalate de Calcium sur les feuilles, les tiges et les panicules - Plus grande production d'acide abscissique et de bêtaïne - Plus grande libération de proline	- Accumulation de métabolites (sucres solubles, proline et protéines)

La résistance au gel du quinoa est fondée sur sa capacité à accumuler des sucres solubles, de la proline ou diverses protéines, tout en abaissant la teneur en eau dans ses feuilles pour mieux se défendre contre les températures froides. Monteros et Jacobsen (2001) ont trouvé des concentrations en proline plus élevées de 40% à -4°C qu'à 19°C. Il a de plus été observé une concentration de sucres solubles supérieure de 11% dans une variété résistante au froid que dans une variété non-résistante, les sucres ayant une fonction d'osmorégulateurs en limitant les échanges d'eau lorsque le liquide apoplastique est gelé (Mujica *et al.*, 2001). Lorsque la température diminue, le quinoa est capable d'induire la formation de glace extracellulaire et non dans ses cellules, et donc de tolérer la déshydratation sans dommage irréversible pour les tissus (Jacobsen *et al.*, 2000a). Le quinoa serait ainsi capable d'abaisser de 5°C sa température de nucléation par rapport à sa température de congélation (Jacobsen *et al.*, 2007).

Tout comme pour la résistance à la sécheresse, l'ensemble des mécanismes est résumé dans le Tableau 2 (Mujica *et al.*, 2001)

3.2.3. Résistance à la salinité

La zone majeure de production du quinoa étant située entre les salars boliviens, certains sols ou eaux d'irrigation peuvent avoir des concentrations en sel non négligeables. D'après Bosque *et al.* (2001 ; 2003), les variétés du groupe "Salar" peuvent résister à des niveaux de salinité compris entre 8 et 15 mS/cm sans diminution de leur biomasse. Jacobsen *et al.*, (2000c) ont trouvé chez une de ces variétés un maintien du rendement jusqu'à une salinité de 25 mS/cm, avec une division du rendement par 2 lorsque la salinité de l'eau dépasse les 30 mS/cm. Mujica *et al.* (2001) parlent même d'une germination possible à 52 mS/cm, mais retardée de 25 jours.

Le quinoa est ainsi capable d'accumuler des ions salins dans ses tissus pour ajuster le potentiel hydrique foliaire. Cela lui permet de maintenir la turgescence cellulaire et de limiter sa transpiration, évitant des dommages physiologiques que pourrait causer la sécheresse. En conditions salines, le quinoa se comporte donc comme un halophyte facultatif et pourrait être utilisé pour nettoyer des sols contaminés par le sel (Jacobsen *et al.*, 2000b).

3.2.4. Vent, neige, grêle,...

De nombreuses variétés altiplaniques et du Salar sont relativement résistantes à la grêle, grâce à un enroulement des feuilles, une tige et un épi plus solides, une surface foliaire réduite avec des feuilles plus petites. Certaines peuvent résister à la neige par un système racinaire et une ramification plus importants qui assurent un soutien plus grand de la plante. Enfin, les variétés de petite taille avec une tige épaisse et un système racinaire bien développé peuvent plus facilement résister au vent (Mujica *et al.*, 2001).

3.2.5. Maladies, parasites et ravageurs

La principale maladie rencontrée chez le quinoa est le mildiou. Les variétés altiplaniques et du salar n'y sont pas toutes résistantes, mais le climat sec n'est pas propice à son apparition. En revanche, la forte teneur en saponine de la graine chez la plupart des variétés du salar les rend moins sensibles aux attaques d'oiseaux ou de parasites, grâce à son goût amer et sa toxicité pour les animaux de petite taille (Tapia *et al.*, 2000).

Figure 7. Les techniques culturales sur l'Altiplano

a- Cultures en plaine et sur versant



Photo IRD

3.3. Un système de culture dans chaque région

3.3.1. Généralités

Les quinoas cultivés sur l'Altiplano appartiennent essentiellement au groupe "altiplanique" pour l'Altiplano Nord et Centre, et au groupe "Salar" pour l'Altiplano Sud, où les variétés amères du type "Real" sont les plus utilisées. Des croisements ont été réalisés entre les variétés des groupes "Altiplano" et "Salar" pour obtenir de nouvelles variétés hybrides douces, qui ont un grain de grande taille à faible teneur en saponine, mais leur adaptation hors de leur région de création est parfois difficile en raison de leur faible résistance au mildiou et de leur intolérance à la salinité du sol (Laguna, 2002). Le cycle de culture dure entre 150 et 200 jours selon les régions et les variétés. Le semis doit être fait en conditions humides, généralement début septembre dans la région du Salar où les sols sableux ont conservé l'humidité, ou alors fin septembre-courant octobre dans les autres régions, avec l'arrivée des premières pluies. La densité de semis varie de 5 à 10 kg.ha⁻¹ (100 à 250 plantes par m²), et la profondeur aux alentours de 3 cm. La récolte se fait de mars à mai lorsque les plantes ont atteint la maturité physiologique et que le grain est très sec. Si le potentiel de rendement de quinoa atteint 11 t.ha⁻¹, la production maximale obtenue en conditions optimales est d'environ 6 t.ha⁻¹ (Mujica *et al.*, 2001), et sur l'Altiplano elle n'est en moyenne que de 0,6 t.ha⁻¹ (Laguna, 2002). L'indice de récolte peut être compris entre 0,20 et 0,45, et le poids de 1 000 grains moyen est de 2,30 g. La culture (labour, semis, récolte) a été mécanisée dans l'Altiplano Nord et dans l'Altiplano Centre, mais elle reste encore en partie manuelle dans le Sud (Felix, 2004).

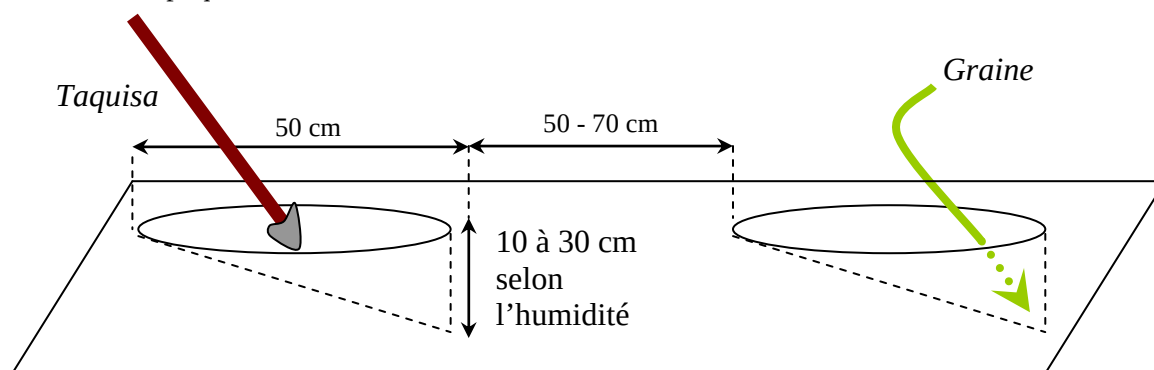
Les agriculteurs utilisent de nombreuses stratégies pour gérer les risques climatiques, et particulièrement les gelées. Tout d'abord, les peuplements de quinoa sont généralement hétérogènes, soit du fait de la grande variabilité intra-variétale et du non calibrage des grains semés (le poids d'un grain peut varier du simple au triple), soit du fait que les variétés traditionnelles consistent généralement en un mélange variétal (Felix, 2004). Cette hétérogénéité est un moyen de lutte contre les effets du gel, les plantes les plus hautes protégeant les plus basses. Des variétés locales de l'Altiplano Centre ont ainsi une production plus stable, avec des plantes de hauteur hétérogène, que des variétés améliorées homogènes mais dont la production est plus irrégulière en cas de gel (Nina, 2003 ; Nina *et al.*, 2004). De plus, dans l'Altiplano Sud, le quinoa était traditionnellement cultivé sur pente car, l'air froid descendant, les pentes bénéficient d'une différence positive de température de quelques degrés qui permet d'allonger la période sans risque de gel (Hervé et Rivière, 1998). Comme les gelées ainsi que les grêles sont souvent des événements localisés, un éparpillement des parcelles évite également que toute la production ne soit touchée par l'un ou l'autre de ces phénomènes climatiques (Felix, 2004). Dans les zones proches du lac Titicaca, les systèmes traditionnels en terrasse et en ados (ou *waru waru*) permettent d'atténuer les gelées nocturnes, les premiers par la modification des écoulements d'air froid et la réduction des pertes radiatives (Morlon, 1992), les seconds grâce à l'effet thermorégulateur de l'eau des canaux (Lhomme et Vacher, 2002 ; 2003). Dans l'Altiplano Sud, où les risques climatiques sont les plus élevés, les agriculteurs réalisent un labour précoce à la fin de la saison des pluies précédente afin de conserver au mieux l'humidité du sol et de limiter au maximum les adventices. Ils sèment également plus en profondeur selon un système de poquet, à l'endroit où se trouve l'humidité, pour initier plus tôt le cycle de la culture et mieux gérer le calendrier agricole en rapport avec les risques élevés de gelées dès mars, lors de la phase de remplissage des grains.

Les différentes techniques évoquées sont détaillées ci-dessous, et illustrées en Figure 7.

3.3.2. Altiplano Sud

Dans l'Altiplano Sud, le quinoa est actuellement présent quasi exclusivement en monoculture.

b- Le semis en poquet



(D'après Félix, 2004)



Photos IRD



Traditionnellement, sa culture se fait sur les versants des montagnes (Figure 7a), moins soumis au gel ; elle est donc manuelle, la présence de pierres et la pente des versants empêchant le passage du tracteur. Ce système de culture ne permet pas de cultiver plus d'1 hectare par actif, du fait de la grande demande en main d'œuvre (Felix, 2004).

Depuis le boom du quinoa et la forte expansion de la mécanisation dans cette région, on le trouve maintenant majoritairement en plaine, avec une culture beaucoup plus mécanisée, ce qui autorise parfois jusqu'à 15 ha par actif (Felix, 2004).

3.3.2.1. Système de culture manuel traditionnel

Dans le cas d'une culture manuelle, la culture du quinoa suit une période de jachère de 1 à 4 ans, avec une mise en friche longue (entre 10 et 50 ans) des parcelles cultivées depuis plus de 20 ans. En situation de pente, les sols, plus pierreux et plus argileux qu'en plaine, sont moins soumis à l'érosion, et les friches longues assurent la régénération de la fertilité en laissant à la végétation naturelle le temps de se mettre en place.

L'itinéraire technique s'étale sur trois années, du fait de la nécessité de caler certaines pratiques à des périodes clés (Felix, 2004).

La défriche : en juin et juillet de la première année a lieu la défriche des parcelles qui seront semées l'année suivante, afin d'arracher la végétation qui a poussé pendant les années de repos avant la saison des pluies. Cette végétation est essentiellement constituée de thola après une friche longue, de graminées peu denses après une friche courte. Après la défriche, le terrain repose pendant 6 mois au cours desquels la matière organique (débris végétaux, cendres et excréments de lamas et de moutons) va s'incorporer lentement au complexe argilo-humique, processus facilité par les pluies qui tomberont à partir de décembre.

Le labour : le travail du sol est réalisé entre fin janvier et début mars, pendant la saison des pluies, pour éliminer les adventices et les gros débris végétaux ainsi que pour économiser au maximum l'eau du sol.

Le semis : à la fin août de la deuxième année, commence le semis sur les parcelles de pente, mais les dates varient en fonction du climat car le terrain doit être suffisamment humide pour permettre la germination de la graine. Il peut s'étendre jusqu'à début octobre en cas de forte sécheresse. Aussi, les agriculteurs doivent prendre garde à ce que de fortes pluies ne viennent pas étouffer les plantules en créant une croûte de battance et à ce que des gelées tardives ou des chutes de grêles ne les détruisent pas. La date de semis joue fortement sur les conditions de développement de la graine et laisse peu de marges aux agriculteurs. La taquisa, sorte de houe, est utilisée pour creuser un trou de 10 à 30 centimètres de profondeur, selon l'humidité de la terre, au fond duquel sont placées les graines (la quantité varie selon le terrain et l'humidité, allant de « ce qui tient entre deux doigts » dans les montagnes humides (à peu près 15-20 graines, 4 kg.ha⁻¹) à « ce qui tient entre trois doigts » dans les plaines arides (environ 30-50 graines, 8 à 15 kg.ha⁻¹). Elles sont ensuite recouvertes de 2 à 5 cm de la fraction de terre la plus humide afin de favoriser au mieux un développement rapide (Figure 7b).

Le contrôle des adventices et des ravageurs : sur pente, la végétation adventice se développe plus rapidement et en plus grande quantité, où les conditions climatiques et les sols sont meilleurs et où le travail avec les outils manuels n'enfouit pas profondément les graines. Il peut donc être nécessaire d'effectuer un ou deux désherbages manuels rapides entre novembre et février, au moment où les pluies permettent la germination des graines. Les jeunes plantules peuvent également être recouvertes d'herbes sèches pour empêcher les rongeurs de les manger mais aussi pour limiter l'érosion éolienne.

c- Récolte manuelle



Photos IRD

d- Battage et tamisage



e- Défrichage mécanique



La récolte : une fois que le grain est mûr, en avril-mai, les pieds de quinoa sont arrachés ou coupés selon que le sol est meuble ou non. Ils sont laissés à sécher dans le champ une à deux semaines (Figure 7c). Les grains sont ensuite séparés des pieds par battage, puis tamisés sur place (Figure 7d). Les rendements sont de 0,4 à 2 t.ha⁻¹ selon les conditions climatiques.

3.3.2.2. Système de culture mécanisé

Dans le cas d'une culture mécanisée, les parcelles cultivées à l'aide de tracteurs, arrivées dans les années 1960-1970, sont situées dans les grandes plaines, aux abords des salars et dans les vallées les plus larges. On en trouve également au pied de certaines montagnes accessibles, sur des sols peu pentus et peu pierreux. La pression foncière élevée sur les parcelles mécanisables a poussé la majorité des agriculteurs à cultiver chaque parcelle une année sur deux. Si les premières années après le défrichage, ce système de culture donnait des résultats très satisfaisants (jusqu'à plus de 1 t.ha⁻¹), les agriculteurs se sont rapidement rendu compte de la baisse des rendements. Les sols en plaine sont sableux et profonds, mais très peu fertiles et avec un apport très faible de matière organique pendant la culture ; leur mise à nu et leur retournement avec une charrue à disque par les tracteurs entraînent, année après année, une perte importante de fertilité et une grande fragilité face à l'érosion éolienne, allant jusqu'à empêcher son renouvellement même par une friche de longue durée.

L'itinéraire technique (rotation jachère - quinoa) s'effectue le plus souvent sur deux années (Felix, 2004).

Le labour : si certains sont revenus à des périodes de jachère de 2 à 3 ans nécessitant un défrichage (Figure 7e) rapide en juin-juillet, la plupart du temps celui-ci n'est pas nécessaire, la végétation n'ayant pas ou peu eu le temps de se développer en un an. Le labour au tracteur, jusqu'à 40 cm, se fait à la même époque que le travail du sol manuel (mi-janvier à début février), c'est-à-dire pendant la saison des pluies.

Le semis : Le semis au tracteur est réalisé avec un semoir muni d'un soc qui creuse un sillon où sont déposées automatiquement les graines (30 à 50 à la fois) après quoi un versoir situé en arrière vient reboucher le sillon. Cela rend la couche superficielle du sol très sensible aux pluies et facilite la formation d'une croûte de battance qui risque d'empêcher la jeune plantule de pouvoir sortir de terre. Les agriculteurs ont la possibilité de ressemer plus tardivement (novembre-décembre) avec des variétés à cycle court ("Noventón"), ce qui ne fournit généralement qu'une maigre récolte (moins de 0,2 t.ha⁻¹).

Le contrôle des adventices et des ravageurs : le peu de temps laissé aux adventices pour se développer et leur enfouissement profond par les charrues rendent le désherbage inutile. En revanche, les populations de coléoptères et de lépidoptères situés dans les plaines ont augmenté considérablement depuis l'extension des cultures. Les plaines sont tout aussi sujettes aux attaques des rongeurs que les montagnes car même si leur habitat est plutôt dans les zones pierreuses, les très grands blocs de parcelle et la même culture une année sur deux favorisent l'accroissement des ravageurs.

La récolte : elle est identique au système manuel.

3.3.3. Altiplano Centre

Quasiment tout l'Altiplano Centre est apte à la culture de quinoa, sur des sols relativement sablo-limoneux et sablo-argileux, plus pierreux que dans l'Altiplano Sud. La plupart du temps le quinoa est inscrit dans une rotation pomme de terre – quinoa – orge – jachère de 3 à 5 ans, mais depuis quelques années certains terrains sont cultivés sans pomme de terre avec le quinoa en tête de rotation (quinoa – orge – jachère de 2-3 ans). Les variétés utilisées sont douces pour la moitié, amères pour l'autre moitié, présentant des grains de taille moyenne. Ce sont généralement des variétés très locales dont le

f- Le semis en ligne



g- Comparaison de semis en ligne et en poquet



Photos IRD

nom varie d'un lieu à l'autre, ou bien utilisées en mélange de taille et de couleur. Il y a peu de quinoa Real en raison du mildiou qui pourrait se développer dans cette région plus humide. De plus, le quinoa sur l'Altiplano Central est destiné davantage à la consommation qu'à la vente.

La préparation du sol se fait normalement à partir de mi-février et peut se prolonger jusqu'à courant mars. Elle est réalisée soit par "yunta" (2 taureaux) (retournement du sol sur 15-20 cm), soit au tracteur avec une charrue à disque (retournement sur 20-30 cm). Selon le type de rotation, ce labour précoce peut être réalisé directement avant une culture de quinoa ou non. Lorsqu'il s'agit d'une rotation où le quinoa suit la pomme de terre, la préparation du sol est réalisée pour la pomme de terre en année 1 ; en année 2 pour le quinoa, elle correspond juste à la récolte de la pomme de terre, effectuée en avril-mai.

Le semis est réalisé en septembre-octobre selon l'occurrence des premières pluies, généralement il s'agit d'un semis "voleo surcado" : les graines sont lancées puis la ligne (surco) est ouverte à la yunta ou au tracteur. Dans certains cas, le "surco" est ouvert en premier, puis les graines y sont semées (Figures 7 f et g). La densité de semis est d'environ 8-9 kg.ha⁻¹ (200 plantes/m²), et la profondeur entre 3 et 5 cm. Si le semis de quinoa ne suit pas une récolte de pomme de terre mais une jachère, il faut au préalable enlever tout ce qui est paille ou thola.

Concernant les interventions en cours de cycle de culture, il s'agit essentiellement de fertilisation, réalisée au moment du semis le cas échéant. Si le quinoa suit un cycle de pomme de terre, alors la fertilisation est apportée au moment du semis de la pomme de terre. C'est une fertilisation principalement organique (fumier), mais également parfois accompagnée de fertilisation chimique (« 1/2 ou 1 sac » d'urée par hectare). Si le quinoa suit une jachère, alors aucune fertilisation n'est apportée. Il peut également y avoir un contrôle des parasites (larves).

La récolte se fait de fin mars à début mai. Sur environ 60% des parcelles, le quinoa est arraché jusqu'à la racine, dans le reste des cas il est coupé. Les graines sont ensuite laissées à sécher dans le champ entre 1 et 2 mois. Les rendements sont en moyenne autour de 0,8 à 0,9 t.ha⁻¹, pour des parcelles de 4 000 m² ou moins. Il arrive également que les quinoas soient laissés sur pied jusqu'en mai ou en juin pour cause d'absence de main d'œuvre, la pomme de terre (qui sinon risque de développer des maladies) et l'orge (indispensable pour alimenter les animaux) étant récoltées avant. Dans ce cas, les grains sont toujours utilisables pour la consommation, mais plus pour les semences si des pluies se sont produites, car ils ont perdu leur qualité germinative.

3.3.4. Altiplano Nord

Les parcelles de quinoa dans l'Altiplano Nord sont généralement plus petites, et le quinoa y est pratiquement tout le temps cultivé en rotation pomme de terre – quinoa – orge. Les sols sont plus humides et plus fertiles (plus riches en matière organique). Le climat étant plus humide, il faut utiliser des variétés améliorées résistantes au mildiou, ce qui se traduit par des variétés douces, aux grains plus petits et au cycle plus long. Le quinoa de cette zone est destiné principalement à l'auto-consommation, avec des prix plus faibles que sur le reste de l'Altiplano.

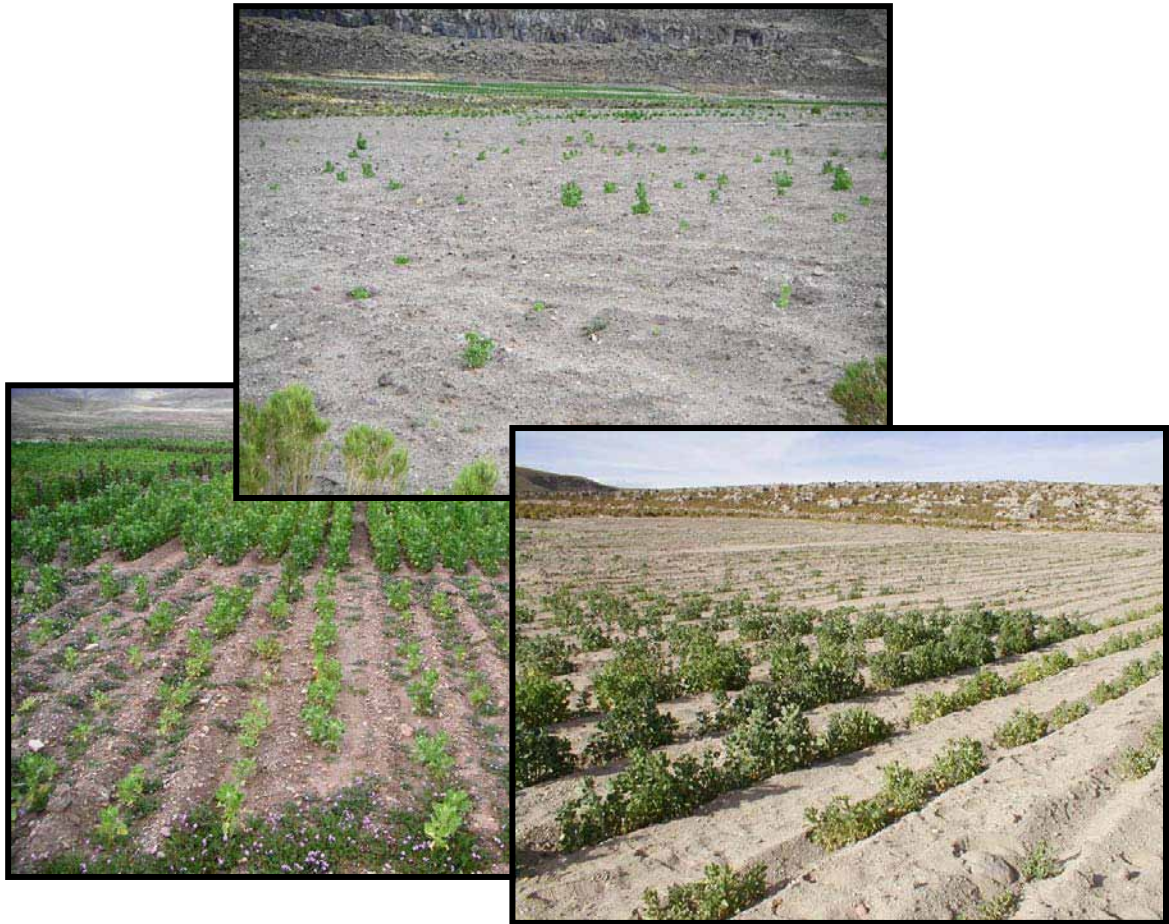
Le semis est tout le temps réalisé en "voleo surcado", le "surco" étant ouvert par "yunta" ou par tracteur, ainsi le quinoa est toujours au dessus du "surco" ce qui permet d'éviter qu'il ne s'asphyxie si le "surco" se remplissait d'eau, dans cette zone où les pluies sont plus fréquentes. Les époques et densités de semis sont similaires à celles de l'Altiplano Centre.

Le quinoa suivant toujours la pomme de terre, la fertilisation est appliquée à cette dernière. Il n'y a pas de contrôle de parasite car en raison du climat plus humide les parasites sont moins présents, et il n'y a pas non plus de contrôle de mildiou, car la résistance partielle des variétés utilisées préserve le rendement.

La récolte est similaire, mais est effectuée un peu plus tardivement que dans le reste de l'Altiplano, en avril – mai. Les rendements sont supérieurs à 1 ou 1,5 tonne par hectare.

Figure 8. Parcelles hétérogènes à densité de levée faible

a- Parcelles en ligne Altiplano Centre, en poquet Altiplano Sud, en ligne Altiplano Sud



Photos IRD

b- Recouvrement des plantules par le sable à cause du vent



3.4. L'implantation de la culture, une phase déterminante

Les observations sur le terrain et les dires d'experts indiquent bien que la phase critique de culture du quinoa se situe au moment de la levée ; si la levée a pu se faire dans de bonnes conditions d'humidité, le reste de cycle ne présente généralement pas de difficultés particulières, sauf événement climatique majeur (gelées, grêles ou sécheresse particulièrement fortes). En revanche, il n'est par exemple pas rare de voir des parcelles avec un pourcentage de levée inférieur à 30%, si le quinoa n'est pas semé au bon moment et dans un sol trop sec, voire entre 0 et 10% dans le cas d'un semis vraiment mauvais (Figure 8a). Dans le cas d'un semis en poquet, l'émergence peut atteindre 100% des graines semées (Figure 7g), mais il existe toujours un risque que les plantules soient recouvertes de sable par le vent (Figure 8b), et donc de réduire fortement la densité de levée.

L'implantation de la culture est difficile car les conditions climatiques sont toujours limitantes, en raison de l'aspect aride et gélif du climat, mais aussi de son importante variabilité interannuelle. L'état de confort de la graine est ainsi très variable, ce qui rend donc sa germination et sa levée aléatoires, avec des densités faibles. En raison des risques de sécheresse et de gel évoqués précédemment, la fenêtre climatique pour réaliser cette implantation est très étroite. Si le quinoa est semé trop tôt, les premières pluies n'auront pas encore humidifié le sol qui sera trop sec (et éventuellement des gelées tardives pourraient affecter la plantule). Mais si le quinoa est semé trop tard, pour attendre l'arrivée des premières pluies effectives, alors les gelées précoces en fin de cycle risquent de diminuer le rendement. La présence relativement fréquente de croûtes de battance est un obstacle supplémentaire à cette levée (Figure 8c).

Cette variabilité, liée à la forte dépendance de la graine aux conditions extérieures pour lever, fait qu'il n'est pas réellement possible de déterminer une date et une profondeur de semis optimales "génériques". Toutefois, les pratiques des agriculteurs peuvent tout de même être un élément de compréhension du succès ou non de la mise en place de la culture. En effet, par exemple, dans le sud, le semis en poquet permet d'aller chercher l'humidité en profondeur et le labour précoce pendant la saison des pluies augmente le stockage d'eau dans le sol.

4. Approche choisie et organisation de l'étude

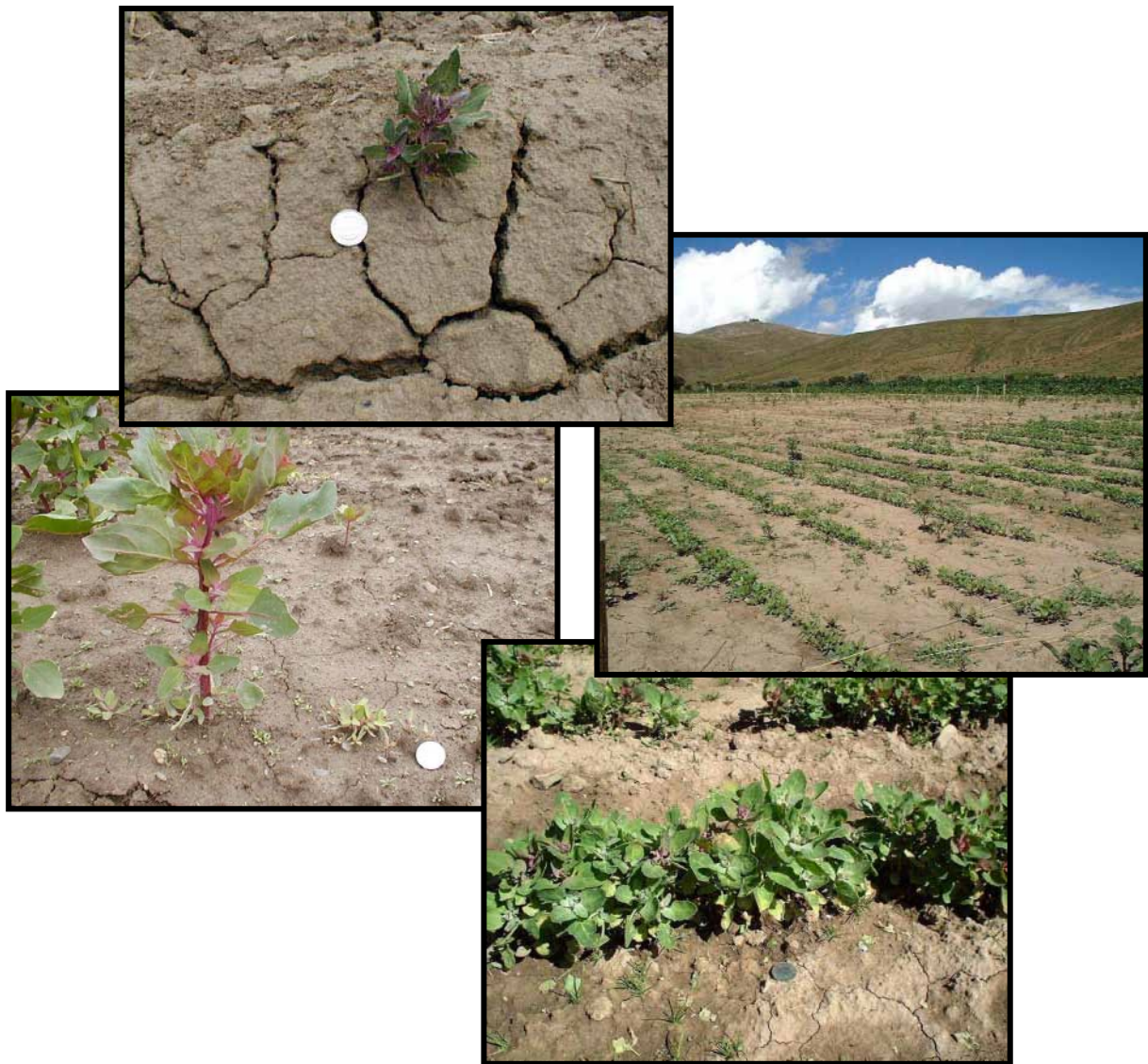
4.1. Intérêt de la modélisation

Un modèle de culture est un ensemble de relations mathématiques permettant de décrire le fonctionnement d'un système sol-plante dans un milieu donné. Selon la complexité de ces relations, les modèles de culture peuvent être divisés en deux catégories, d'une part les modèles empiriques, plus simples, qui ne prennent pas en compte les processus internes du système, d'autre part les modèles mécanistes qui décrivent et quantifient chaque processus, sur des bases physiques ou physiologiques.

Depuis les travaux de Wit en 1978, les modèles de culture se sont multipliés et complexifiés, passant initialement d'une simple production de biomasse, à la génération des compartiments de la plante et à la prise en compte des contraintes du milieu sur la culture. L'intérêt de ces modèles réside dans le fait qu'ils donnent une représentation dynamique de l'action combinée des différents facteurs environnementaux sur le fonctionnement d'ensemble de la culture (Bonhomme, 1997).

Leurs applications opérationnelles potentielles sont diverses, telles qu'une aide à la décision pour l'agriculteur en matière de choix de date de semis, d'irrigation ou de fertilisation, mais aussi une utilisation à l'échelle intra-parcellaire dans le cadre d'une agriculture de précision ou à l'échelle régionale pour des applications agricoles ou environnementales, et enfin, une estimation des risques climatiques, dans le cadre de politiques agricoles prévisionnelles.

c- Emergence des plantules entre les croûtes de battance



Photos IRD

Ici où les connaissances sur le quinoa sont essentiellement empiriques et fragmentaires, l'utilisation d'un modèle va nous permettre de mieux comprendre son fonctionnement ainsi que les interactions des techniques utilisées avec le climat dans l'élaboration du rendement.

4.2. Choix du modèle

Le modèle que nous avons retenu pour cela est STICS (Simulateur mulTIdisciplinaire pour les Cultures Standard), développé à l'INRA depuis 1996 (Brisson *et al.*, 1998 ; 2002 ; 2003), en raison de sa généralité et de sa robustesse.

STICS est un modèle de fonctionnement des cultures à pas de temps journalier. Ses variables d'entrées sont relatives au climat, au sol et au système de culture. Ses variables de sortie sont relatives à la production (quantité et qualité), à l'environnement et à l'évolution des caractéristiques du sol sous l'effet de la culture. L'objet simulé est la situation culturale pour laquelle on peut définir de façon déterministe un milieu physique et un itinéraire technique homogènes. Les grands processus simulés sont la croissance et le développement de la culture ainsi que les bilans hydrique et azoté. Les formalisations choisies reposent le plus souvent sur des analogies connues ou sur la simplification de formalisations plus complexes.

4.3. Les questions traitées

La suite de ce travail est organisée en quatre parties.

Le Chapitre II décrit le modèle ainsi que les adaptations de formalisme nécessaires pour répondre aux conditions de culture du quinoa sur l'Altiplano bolivien ; il présente ensuite le dispositif expérimental mis en place et les jeux de données utilisés.

Le Chapitre III consiste en une analyse de l'implantation de la culture et la gestion des risques climatiques par le biais d'une expérimentation numérique. Divers scénarios sont testés, à partir des techniques et conditions culturales évoquées précédemment (date, profondeur et type de semis, époque de labour, effet de la battance). Le but est de pouvoir identifier l'intérêt du semis en poquet dans le sud par rapport au semis en ligne, l'influence de l'époque de labour sur l'humidité du sol, la gamme de variabilité des profondeurs et des dates de semis optimales selon les sites et les années, et enfin l'effet de la battance.

Le Chapitre IV concerne le paramétrage de l'ensemble du modèle pour le quinoa. Nous nous sommes pour cela appuyés sur la méthodologie développée par Launay *et al.* (2005), qui propose, après choix des options de formalismes les plus adaptées à l'écophysiologie de la plante et aux conditions expérimentales, un paramétrage en plusieurs étapes : tout d'abord par recherche dans la bibliographie ou par analogie avec d'autres plantes ; ensuite par calcul à partir des données expérimentales ; et enfin par optimisation pour les paramètres qui n'ont pu être déterminés par les méthodes précédentes.

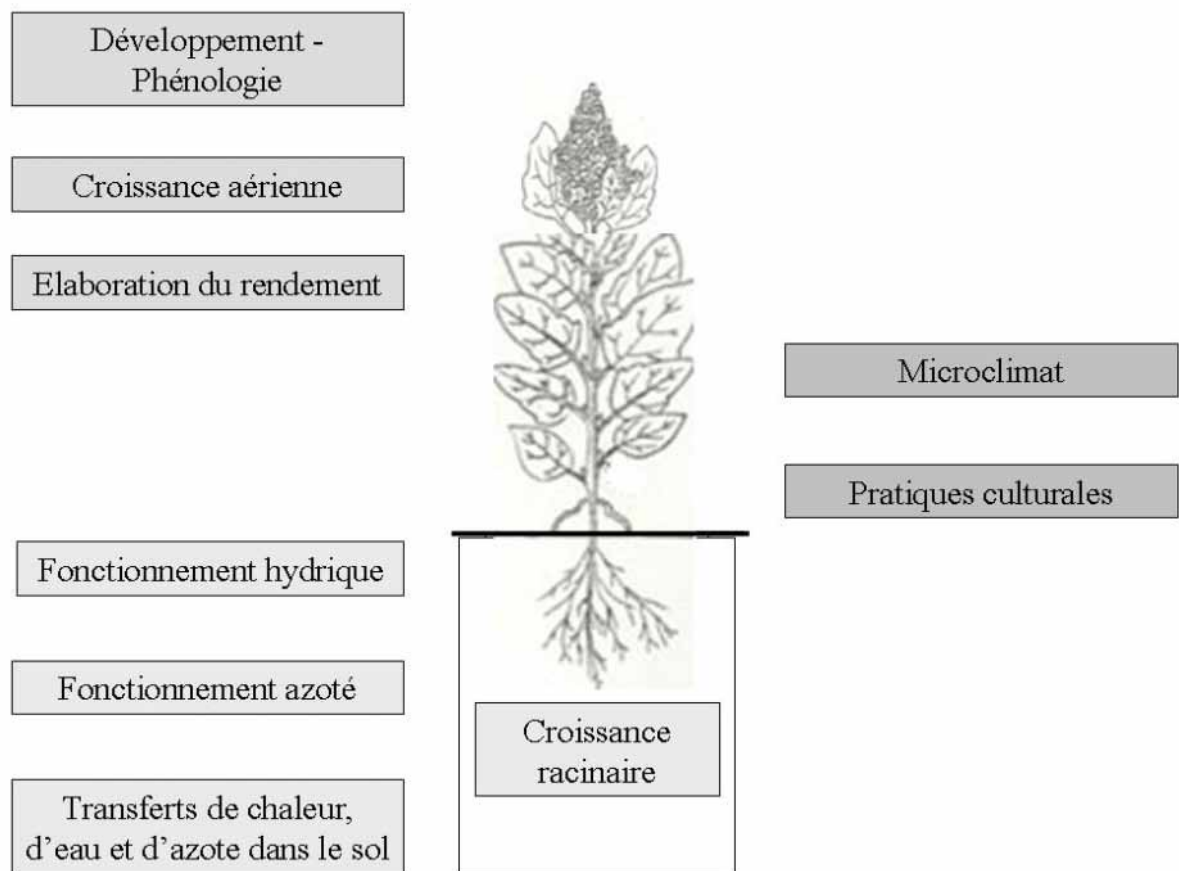
Le Chapitre V est une application avec différentes études de cas sur l'impact des choix techniques sur le rendement. Tout d'abord, l'effet de la profondeur de semis est analysé, visant à montrer l'intérêt d'un semis hétérogène réparti sur plusieurs centimètres pour minimiser les risques sur le rendement. Ensuite, nous verrons l'impact des techniques d'implantation sur la fin du cycle et sur le rendement de la culture. Enfin, la culture du quinoa sera replacée dans un contexte de rotations, et différentes successions culturales seront ainsi simulées (quinoa en monoculture continue ou précédé d'une ou deux années de jachère) afin de voir leur influence sur le sol et sur les rendements.

CHAPITRE II

Chapitre II : Description du modèle STICS et des jeux de données

1. PRESENTATION, FONCTIONNEMENT ET UTILISATIONS DU MODELE.....	47
1.1. PRESENTATION GENERALE	47
1.2. POSSIBILITES D'UTILISATION ET APPLICATIONS	47
1.3. PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT ET DONNEES NECESSAIRES.....	49
1.4. METHODOLOGIE DE PARAMETRAGE POUR UNE NOUVELLE CULTURE.....	49
1.5. OUTILS STATISTIQUES ET D'EVALUATION DU MODELE	51
2. MODULES ET FORMALISMES.....	55
2.1. DEVELOPPEMENT	55
2.1.1. <i>Du semis à la levée</i>	55
2.1.2. <i>Développement post levée</i>	57
2.2. CROISSANCE AERIENNE	57
2.2.1. <i>Feuillage</i>	57
2.2.2. <i>Biomasse</i>	59
2.3. ELABORATION DU RENDEMENT	59
2.4. CROISSANCE RACINAIRE.....	61
2.5. FONCTIONNEMENT HYDRIQUE	61
2.5.1. <i>L'offre du sol</i>	61
2.5.2. <i>La demande de la plante</i>	63
2.5.3. <i>La transpiration réelle</i>	63
2.6. FONCTIONNEMENT AZOTE	63
2.7. TRANSFERTS DE CHALEUR, D'EAU ET DE NITRATES	63
2.8. GESTION TECHNIQUE DE LA CULTURE	65
2.9. MICROCLIMAT.....	65
3. PROCESSUS NECESSITANT UNE ADAPTATION POUR REpondre AUX CONDITIONS DE CULTURE DU QUINOA SUR L'ALTIPLANO BOLIVIEN.....	65
3.1. LIMITES DU MODELE STICS POUR NOTRE ETUDE	65
3.1.1. <i>Pour représenter l'Altiplano</i>	65
3.1.2. <i>Pour représenter les conditions et techniques de culture</i>	67
3.2. PRISE EN COMPTE DE L'ALTITUDE.....	69
3.2.1. <i>Ajout de la pression atmosphérique</i>	69
3.2.2. <i>Calcul du rayonnement net</i>	69
3.2.3. <i>Effet sur le calcul de l'évapotranspiration</i>	71
3.2.4. <i>Calcul de la température du point de rosée</i>	71
3.3. MODIFICATION DES FORMALISMES DE GERMINATION ET DE LEVEE	71
3.3.1. <i>Imbibition</i>	71
3.3.2. <i>Manques à la germination</i>	71
3.3.3. <i>La croûte de battance</i>	73
3.4. INTEGRATION DE L'EFFET DU TRAVAIL DU SOL.....	73
3.5. AJOUT D'UN FORMALISME POUR LE SEMIS EN POQUET	75
4. DESCRIPTION DES DONNEES D'ENTREE ET DES MESURES UTILISEES	75
4.1. DISPOSITIF EXPERIMENTAL.....	75
4.2. CLIMAT	77
4.3. SOL.....	77
4.4. ITINERAIRE TECHNIQUE	79
4.5. ETAT INITIAL	79
4.6. MESURES BIOLOGIQUES COMPARABLES A DES DONNEES DE SORTIE	81
4.6.1. <i>Développement</i>	81
4.6.2. <i>Croissance</i>	81
4.6.3. <i>Rendement</i>	81
4.6.4. <i>Autres</i>	81

Figure 9. Schéma d'organisation des différents modules du modèle STICS



1. Présentation, fonctionnement et utilisations du modèle

1.1. Présentation générale

STICS (Brisson *et al.*, 1998 ; 2002 ; 2003) simule le fonctionnement du système sol-plante. La borne supérieure du système est l'atmosphère caractérisée par les variables climatiques et la borne inférieure correspond à l'interface sol/sous-sol. Le sol est assimilé à une succession de couches horizontales, chacune de ces couches étant caractérisée par sa réserve en eau, en azote minéral et en azote organique. Les interactions entre le sol et la culture sont assurées par les racines, celles-ci étant définies par une distribution de densité racinaire dans le profil de sol. La culture est appréhendée globalement par sa biomasse aérienne, son indice foliaire, ainsi que le nombre et la biomasse des organes récoltés. La croissance est pilotée par le bilan de carbone. Le bilan azoté de la culture est simulé parallèlement au bilan de carbone, dont il dépend en partie. Le développement de la culture est piloté par un indice thermique. Le modèle de développement est utilisé pour faire évoluer l'indice foliaire, les racines et définir la phase de remplissage des organes récoltés. Les conditions limitantes (eau, azote, température) sont prises en compte au travers d'indices qui peuvent réduire la croissance végétative et celle des organes de stockage.

STICS possède une organisation modulaire (Figure 9), où chacun des modules fait appel à un certain nombre de sous-programmes traitant de mécanismes spécifiques. Un premier groupe de trois modules gère l'écophysiologie des parties aériennes de la plante (développement, croissance aérienne, élaboration du rendement). Un second ensemble de quatre modules concerne le fonctionnement du sol en interaction avec les parties souterraines des plantes (croissance racinaire, fonctionnement hydrique, fonctionnement azoté, transferts d'eau, de chaleur et d'azote). Enfin, à l'interface, un troisième groupe s'occupe de la gestion des interactions entre les techniques culturales (apports d'eau ou d'engrais,...) et le système sol-culture, ainsi que du microclimat. Dans chacun des modules, le modèle propose plusieurs options de formalisme correspondant aux grandes caractéristiques écophysiologiques des plantes et permettant l'adaptation à des systèmes de culture variés.

1.2. Possibilités d'utilisation et applications

Un des principaux avantages de STICS est sa généricité, qui lui permet de simuler différentes cultures et itinéraires techniques sans que sa structure globale soit modifiée ; cette généricité est facilitée par son organisation modulaire. Sa robustesse lui confère les capacités à simuler des conditions pédoclimatiques variées.

STICS a été conçu comme un outil de simulation opérationnel en conditions agricoles. Son principal objectif est de simuler les conséquences des variations du milieu et du système de culture sur la production d'une parcelle agricole ou sur l'environnement. Il constitue un outil intéressant pour les recherches agronomiques, en permettant l'intégration des connaissances élémentaires et la gestion des interactions ou en mettant en évidence de nouvelles pistes de recherche.

Ses applications sont variées (Godard *et al.*, 2008 ; Ledoux *et al.*, 2007 ; Di Bella *et al.*, 2005 ; Folliard *et al.*, 2004 ; Gabrielle *et al.*, 2002 ; Beaujouan *et al.*, 2001 ; Bruckler *et al.*, 2000 ;...), aussi bien à l'échelle de la parcelle (diagnostic agronomique ou environnemental, tests d'itinéraires techniques,...) qu'à l'échelle de la région (études de potentialité du milieu, estimations de production,...). STICS peut être spatialisé, couplé à d'autres modèles, ou encore utiliser des données de télédétection en entrée.

Il faut souligner que les modèles de simulation du fonctionnement des cultures sont de plus en plus couramment utilisés comme des outils d'expérimentation numérique, peu coûteux, pour leur capacité à rendre compte de la complexité des interactions entre la plante et son environnement.

L'expérimentation numérique permet en effet de générer rapidement un grand nombre de données, de comprendre le fonctionnement général du système étudié et de mettre en évidence l'impact d'une pratique sur une variable donnée (Launay *et al.*, 2008b). Ainsi, dans le cas de l'implantation par exemple, la seule observation des caractéristiques du travail du sol et des techniques de semis ne peut pas fournir l'information nécessaire pour optimiser l'établissement de la culture, en raison des nombreuses combinaisons climat – pratiques possibles au champ et du nombre limité d'expérimentations qui peuvent être faites ; l'expérimentation numérique est alors une approche complémentaire qui permet de comprendre les interactions avec les conditions environnementales et de simuler l'établissement de la culture selon différents scénarios.

1.3. Principes de fonctionnement et données nécessaires

Les paramètres spécifiques intervenant dans les équations des formalismes sont externes au code, contenus dans un fichier d'entrée du modèle ; ils peuvent donc être modifiés aisément d'une culture à l'autre.

Pour fonctionner, STICS nécessite des données d'entrée caractérisant une situation agronomique supposée homogène, à savoir la parcelle ou une portion de la parcelle si celle-ci est hétérogène. Ces données, détaillées dans Brisson (2002b) et dans le § 4 de ce chapitre, comprennent :

- les variables climatiques journalières,
- les caractéristiques permanentes du sol,
- les pratiques culturales,
- l'état hydrique et azoté initial du sol.

Pour estimer les paramètres ou valider le modèle, sont nécessaires des variables d'état représentant le système à un moment donné de la simulation, telles que la biomasse aux différents stades de développement, la surface foliaire ou le rendement en grain. Ces variables sont choisies en fonction de plusieurs critères, comme la possibilité de les mesurer ou leur pertinence. Elles peuvent servir à réaliser des optimisations pour estimer les paramètres caractérisant la plante ou le sol.

L'unité de base du modèle est l'USM, unité de simulation. Une USM est une combinaison d'une situation pédoclimatique avec une culture et une gestion technique, et rassemble toutes les informations nécessaires pour faire une simulation : les conditions climatiques journalières pendant la période de simulation, les caractéristiques permanentes du sol ainsi que son contenu initial en eau et en azote, les actions de l'itinéraire technique réalisées sur le sol et sur la culture pendant le cycle, et enfin les dates de début et de fin de simulation choisies par l'utilisateur. Dans la pratique, un fichier USM inclut les noms du fichier technique (*.TEC), des fichiers climatiques (un fichier par année calendaire dont l'extension correspond à l'année, par exemple salinas.03 pour l'année climatique 2003 sur la station de l'Altiplano Sud), du fichier plante contenant les paramètres spécifiques de chaque culture (*.PLT) et du fichier sol (*.SOL). Les valeurs des données observées sont incluses dans des fichiers de type *.OBS. Tous ces fichiers ont un format spécifique au modèle. Selon les objectifs de l'utilisateur, l'USM peut être créée pour simuler des cycles annuels ou pour réaliser des enchaînements d'années de culture.

1.4. Méthodologie de paramétrage pour une nouvelle culture

La modularité et la généricité de STICS sont à la base de la méthode d'adaptation et de paramétrage proposée par Flenet *et al.* (2004) et Launay *et al.* (2005), et utilisée par Garcia de Cortázar (2006) pour l'adaptation à la vigne. Le paramétrage de STICS pour une espèce donnée ne concerne pas l'ensemble des paramètres du modèle, mais dépend des options de formalisme. Le nombre final de paramètres à affecter varie d'une espèce à l'autre selon les choix de l'utilisateur.

La première étape consiste donc à sélectionner parmi les options de formalisme possibles celles qui représentent au mieux l'écophysiologie de la plante et son contexte cultural. Certains de ces choix s'appuient sur ce qui est déjà connu de la plante, d'un point de vue écophysiologique ou agronomique. D'autres sont en revanche dictés par le point de vue de l'utilisateur, selon les variables de sortie souhaitées ou les processus qu'il est le plus important de bien représenter. Enfin, certains sont réalisés par défaut, rendus obligatoires par un manque de données sur la plante.

La seconde étape consiste à déterminer les valeurs des paramètres spécifiques contenus dans les équations des formalismes choisis. L'analyse de sensibilité réalisée par Ruget *et al.* (2002) permettant d'identifier les paramètres auxquels le modèle est le plus sensible, cette détermination se réalise successivement par :

- recherche dans la bibliographie existante. La valeur du paramètre est alors directement obtenue à partir de travaux d'écophysiologie déjà réalisés sur la plante, ou même d'autres modèles la représentant. Il faut toutefois s'assurer que le paramètre trouvé dans la bibliographie a bien la même définition que dans STICS ;
- analogie avec d'autres plantes. Il est possible dans certains cas de déterminer un paramètre par analogie avec d'autres cultures qui sont considérées comme ayant un fonctionnement ou un comportement similaire. Cela sera surtout réalisé sur des paramètres auxquels le modèle est peu sensible ;
- données expérimentales. Certains paramètres peuvent être directement mesurés expérimentalement. D'autres résultent d'un calcul analytique, lorsque toutes les variables de l'équation du formalisme considéré ont été mesurées ;
- optimisation. La valeur de tous les paramètres ne peut pas être obtenue uniquement avec les méthodes précédentes. Ceux qui n'ont pas été déterminés le sont alors par optimisation, en testant une gamme de valeurs possibles de ce paramètre. La valeur retenue est celle qui minimise la différence entre les simulations et les mesures expérimentales. Les paramètres restants ne sont généralement pas optimisés seuls, mais par groupe.

1.5. Outils statistiques et d'évaluation du modèle

Le paramétrage par optimisation est réalisé grâce à un programme fourni avec STICS, codé en C et basé sur la méthode du simplexe (Nelder et Mead, 1965 ; Sorooshian et Gupta, 1993). Cette méthode permet d'optimiser plusieurs paramètres sur une ou plusieurs variables. Le critère optimisé est un critère des moindres carrés pondérés (Makowski *et al.*, 2006) :

$$C(\theta) = \frac{1}{N \cdot D} \sum_{n=1}^N \sum_{d=1}^D \frac{(Y_{n,d} - f(X; \theta; t_d))^2}{p_n}$$

où $C(\theta)$ détermine la valeur du critère à minimiser pour le jeu de paramètres θ testé ; N est le nombre de variables d'état considérées ; D est le nombre de dates de mesure ; $Y_{n,d}$ est la valeur observée à la date d de la $n^{\text{ième}}$ variable ; $f(X; \theta; t_d)$ la valeur simulée à la date d de la $n^{\text{ième}}$ variable pour le jeu de valeurs de paramètres θ ; et p_n le facteur de pondération spécifique de la $n^{\text{ième}}$ variable.

Pour l'évaluation du modèle, plusieurs critères mathématiques sont utilisés pour quantifier la divergence entre les données observées et les valeurs simulées (Brisson *et al.*, 2002 ; Wallach *et al.*, 2001).

- La racine carrée de l'erreur quadratique moyenne ("Root Mean Square Error", RMSE).

Elle fournit une valeur de l'erreur de prédiction en donnant beaucoup de poids aux erreurs élevées.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^I (O_i - S_i)^2}$$

où O_i représente la valeur observée, S_i la valeur simulée et n le nombre d'observations.

La RRMSE est la valeur en relatif (%) de la RMSE qui est calculée en divisant la valeur de la RMSE par la moyenne des valeurs observées.

- La RMSEs (systematic)

Elle détermine le biais du modèle en mesurant l'écart entre la droite de régression (entre valeurs simulées et observées) et la première bissectrice.

$$RMSEs = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^I (O_i - P_i)^2}$$

où O_i représente la valeur observée, P_i est la valeur prédite par la régression et n le nombre d'observations.

- La RMSEu (unsystematic)

Elle détermine la dispersion autour de la droite de régression entre valeurs observées et simulées.

$$RMSEu = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^I (S_i - P_i)^2}$$

où S_i est la valeur simulée, P_i est la valeur prédite par la régression et n le nombre d'observations.

- Le biais moyen (Mean Deviation, MD)

Au contraire de la RMSE, ce critère donne le même poids à toutes les erreurs. Il peut donc y avoir une compensation entre erreurs positives et négatives. Une MD proche de 0 indique l'absence de biais.

$$MD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^I (S_i - O_i)$$

où S_i représente la valeur simulée, O_i la valeur observée et n le nombre d'observations.

- L'efficacité du modèle (EF) (Greenwood *et al.*, 1985)

Elle est calculée en comparant la variance du modèle à la variance expérimentale et permet d'estimer la performance du modèle par rapport à la moyenne expérimentale. Si EF est près de zéro, la valeur moyenne des mesures est plus fiable que la simulation.

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^I (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^I (\bar{O}_i - O_i)^2}$$

où O_i représente la valeur observée, S_i la valeur simulée, $\bar{O}_i$ la valeur moyenne des observés et n le nombre d'observations.

Figure 10. Choix des formalismes pour chaque grande fonction de STICS

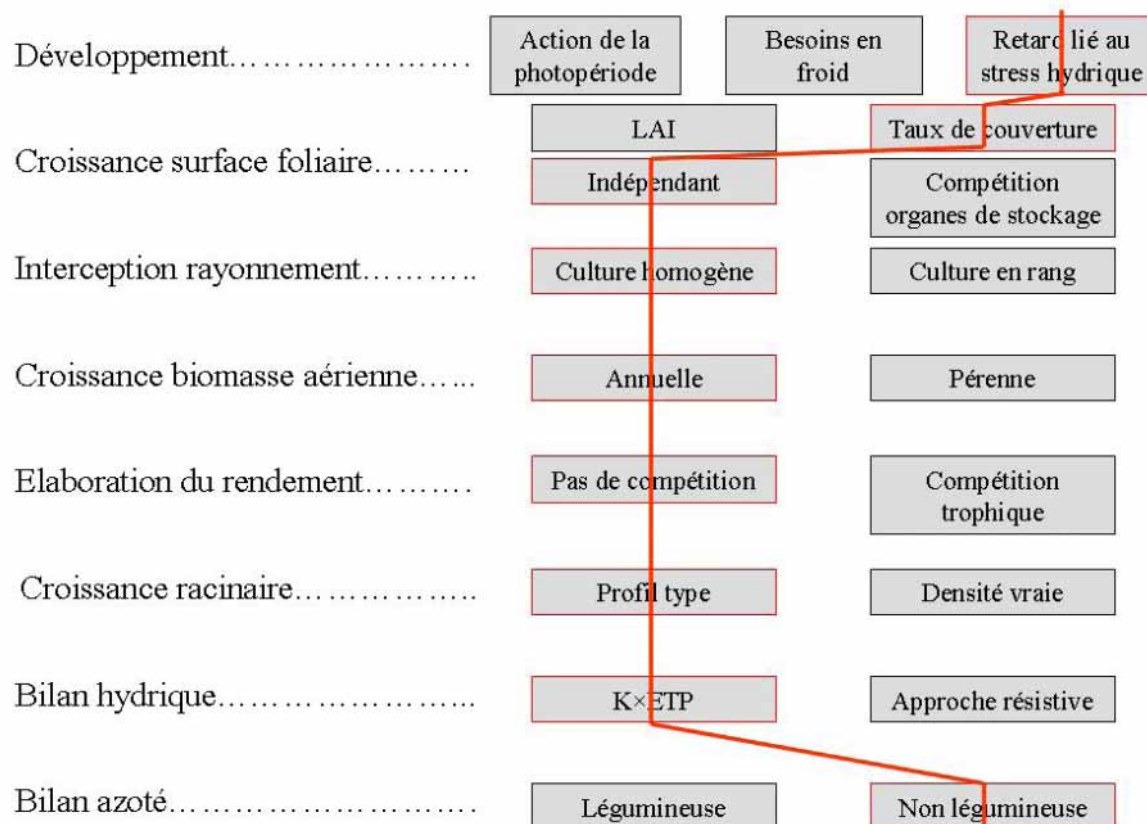


Tableau 3. Echelles de développement de STICS pour les plantes annuelles appropriées pour le quinoa

Stades végétatifs (indice foliaire)	Stades organes récoltés
PLT : semis (plantes annuelles)	
LEV : levée	
AMF : accélération maximale de croissance foliaire, fin de phase juvénile	FLO : floraison (début de la sensibilité au gel des fruits)
LAX : indice foliaire maximal, fin de croissance foliaire	DRP : début du remplissage des organes récoltés
SEN : début de la sénescence nette	MAT : maturité physiologique
LAN : indice foliaire nul	REC : récolte

2. Modules et formalismes

Nous n'allons décrire ici que les formalismes choisis dans chaque module (Figure 10) ; nos choix seront justifiés ultérieurement dans le Chapitre IV. Le développement est retardé en cas de stress hydrique ; la croissance de la surface foliaire est exprimée en taux de couverture et est indépendante de la croissance des organes de stockage ; la culture est considérée comme homogène pour le calcul de l'interception du rayonnement ; il n'existe pas de compétition trophique pour l'élaboration du rendement ; la croissance racinaire se fait selon un profil type optimal par rapport à l'absorption ; enfin, le bilan hydrique est calculé par l'approche du coefficient cultural, et le bilan azoté pour une culture n'appartenant pas aux légumineuses. Les formalismes sur lesquels nous avons porté une attention particulière dans cette étude (l'implantation et la surface foliaire) sont présentés en détail, les autres plus succinctement.

Les indices "p", "s" et "t" font référence aux paramètres appartenant respectivement au fichier plante, au fichier sol et au fichier technique, et dont les valeurs doivent être affectées ; les notations sans indice se rapportent aux variables calculées par le modèle. La description des formalismes ainsi que les graphiques associés sont empruntés à l'ouvrage STICS en cours de préparation, auquel j'ai participé (Brisson *et al.*, 2008).

2.1. Développement

Le développement de la plante est contrôlé dans STICS par la définition de différents stades phénologiques, pour la simulation à la fois de la croissance végétative et du remplissage des grains (Tableau 3). Les deux échelles, végétative et reproductive, sont indépendantes, le maximum de surface foliaire (LAX) pouvant survenir aussi bien avant qu'après le début du remplissage des grains (DRP).

2.1.1. Du semis à la levée

2.1.1.1. Germination

La germination se produit lorsque la somme de température depuis le semis dans le lit de semence (*SOMGER*) atteint une valeur seuil (*STPLTGER_p*), *SOMGER* étant pondérée par une condition sur l'état hydrique du sol (*HUMIRAC*) :

$$SOMGER(I) = \sum_{J=IPLT}^I [(TSOL(SB, J) - TGMIN_p) \cdot HUMIRAC(SB, J)] = STPLTGER_p$$

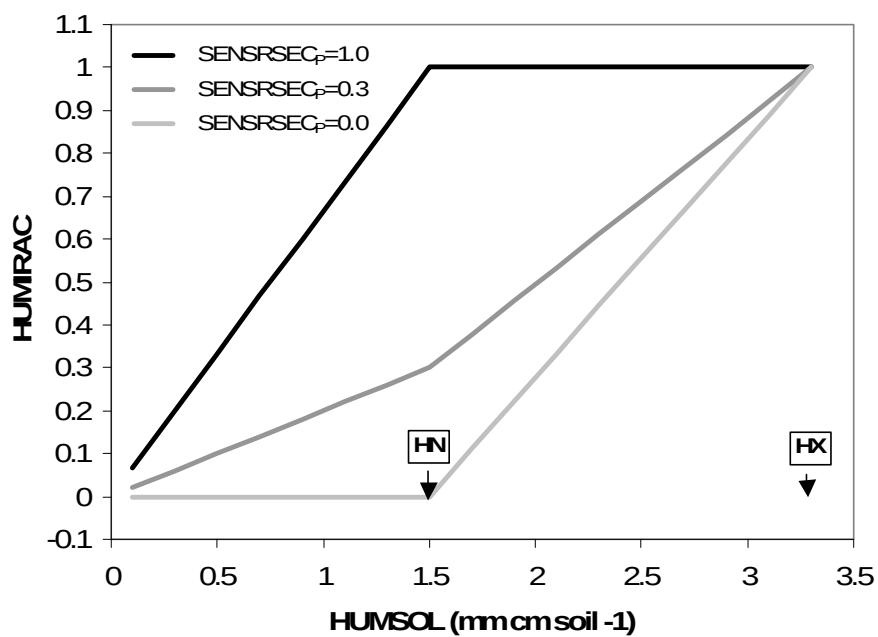
où *SB* correspond au lit de semences et est égal à la profondeur de semis (*PROFSEM_t*) $\pm$ 1 cm, *TSOL* est la température du sol à la profondeur *SB*, et *TGMIN_p* la température de base pour la germination.

L'humidité du lit de semences influence la germination par la variable *HUMIRAC* par le biais du paramètre *SENSRSEC_p* qui détermine la sensibilité de la plante à la sécheresse :

$$\begin{aligned} \text{si } HUMSOL(SB, I) > HN \quad HUMIRAC(SB, I) &= SENSRSEC_p + (1 - SENSRSEC_p) \frac{HUMSOL(SB, I) - HN_s}{HX_s - HN_s} \\ \text{si } HUMSOL(SB, I) \leq HN \quad HUMIRAC(SB, I) &= \frac{SENSRSEC_p}{HN_s} HUMSOL(SB, I) \end{aligned}$$

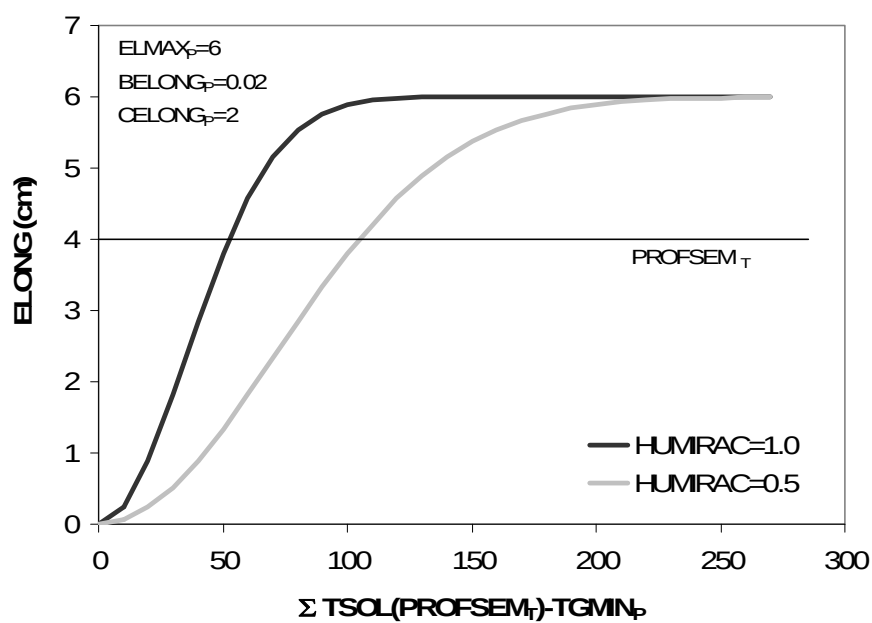
où *HUMSOL*, *HN_s* et *HX_s* sont respectivement la teneur en eau courante, l'humidité au point de flétrissement et l'humidité à la capacité au champ. *SENSRSEC_p* est un paramètre du fichier plante qui peut être affecté à une valeur entre 0 et 1. Lorsque le paramètre *SENSRSEC_p* est à 1, la sécheresse du

Figure 11. Effet de la teneur en eau du sol sur la germination



(Tiré de Brisson et al., 2008)

Figure 12. Courbe d'élongation de l'hypocotyle



(Tiré de Brisson et al., 2008)

sol ne commence à avoir un effet que lorsque la teneur en eau devient inférieure à HN_s . Dans les autres cas, toute diminution sous HX_s est prise en compte. L'évolution de $HUMIRAC$ selon la teneur en eau du sol est représentée en Figure 11 pour plusieurs valeurs de $SENSRSEC_p$.

2.1.1.2. Levée

A la germination démarrent les croissances de la tige et des racines, la vitesse de croissance de la tige étant une fonction logistique de la somme de températures du sol pondérée par la variable $HUMIRAC$. L'émergence se produit lorsque l'élongation de la tige, $ELONG$, pilotée par une élongation maximale qui dépend de l'espèce, devient supérieure à la profondeur de semis.

$$ELONG(I) = ELMAX_p \left[1 - \exp \left(- \left(BELONG_p \sum_{J=IGER}^I ((TSOL(HB,J) - TGMIN_p) \cdot HUMIRAC(HB,J)) \right)^{CELONG_p} \right) \right]$$

où $ELMAX_p$, $BELONG_p$ et $CELONG_p$ sont les paramètres de la courbe d'élongation, illustrée en Figure 12.

Si le temps entre la germination et la levée, spécifique de chaque espèce ($NLEVLIM1_p$ et $NLEVLIM2_p$), est trop long, alors cela se traduit par des manques à la levée par la variable $COEFLEV$:

$$DENSITE_{levée} = DENSITE_{semis,t} \cdot COEFLEV$$

où $DENSITE$ représente le nombre de plantes par m^2 au semis ou à la levée, et $COEFLEV$ est le rapport entre la densité de levée et la densité germée.

Si la levée se produit rapidement, avant le nombre de jours $NLEVLIM1_p$, alors le pourcentage de levée sera maximal. Il diminue ensuite linéairement jusqu'à être nul après la durée $NLEVLIM2_p$ (Figure 13).

2.1.2. Développement post levée

A partir de la levée, le temps entre chaque stade est exprimé en unités de développement ($UPVT$) qui reproduisent le temps physiologique de la plante. Elles sont calculées à partir de la température de l'air suivant le concept de degrés-jour (Bonhomme, 2000), déterminé comme le cumul de la température journalière moyenne à laquelle est retranchée une température de base. Le cumul de ce temps thermique est ralenti par le coefficient de stress hydrique ($STRESSDEV_p$), ce qui amène également à modifier les sommes de température entre stades.

2.2. Croissance aérienne

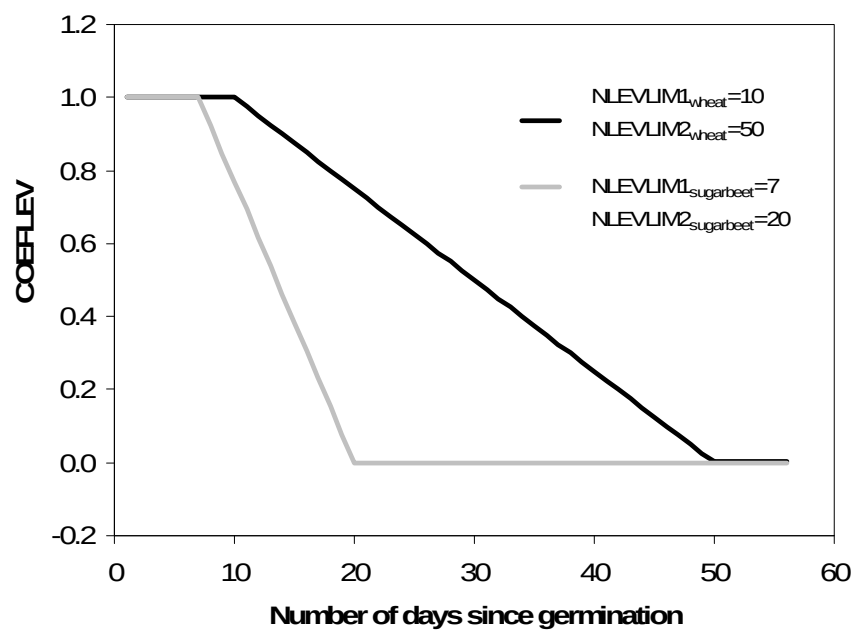
Ce module calcule la croissance des feuilles ainsi que la croissance en biomasse.

2.2.1. Feuillage

Le taux de couverture du sol est calculé en fonction d'une échelle temporelle $ULAI$ qui suit le parcours de développement. $ULAI$ vaut 0 à la levée, 2 au stade de surface foliaire maximale LAX ; entre ces deux stades, le modèle opère une interpolation linéaire des unités de développement $UPVT$, qui intègrent donc l'effet du stress hydrique.

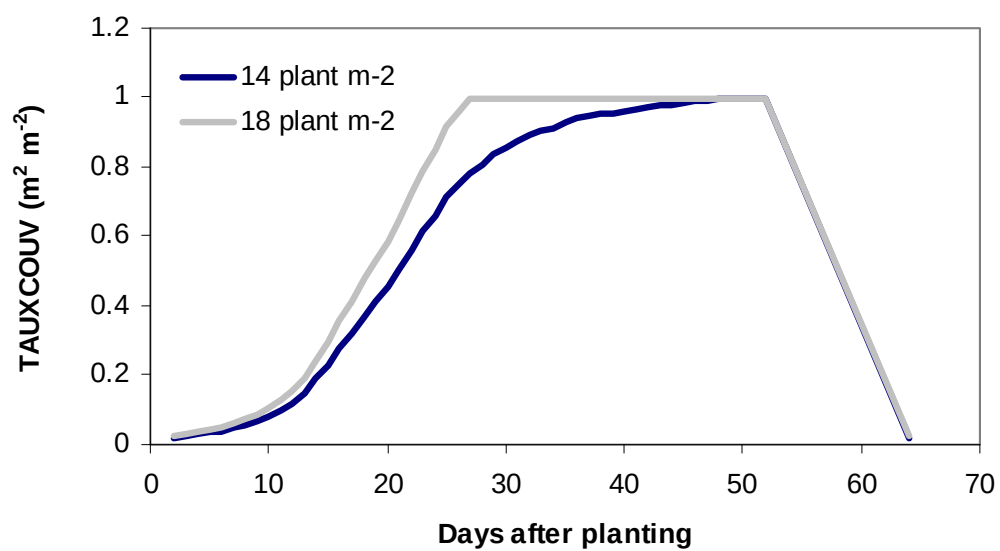
Sa courbe est une logistique d'asymptote $TRECOUVMAX_p$ en proportion du sol couvert par plante isolée, de pente au point d'inflexion $PENTRECOUV_p$, et de point d'inflexion $INFRECOUV_p$. Au stade AMF , $ULAI$ est égal à $INFRECOUV_p$, ce qui permet de définir précisément ce stade dans le temps (Figure 14) :

Figure 13. Calcul des manques à la levée



(Tiré de Brisson et al., 2008)

Figure 14. Evolution du taux de couverture



(Tiré de Brisson et al., 2008)

$$TAUXCOUV(I) = \frac{TRECOUVMAX_p \cdot DELTAI_{dens}(I)}{1 + \exp(PENTRECOUV_p (INFRECOUV_p - LAI(I)))}$$

où $DELTAI_{dens}$ représente l'effet de la densité.

Le taux de couverture est modulé par un effet densité qui agit à partir d'un taux de couverture seuil, $LAICOMP_p$. Il est considéré qu'en dessous d'une densité $BDENS_p$, il n'y a pas de compétition entre les plantes et que le taux de couverture de chaque plante isolée est indépendant de la densité. Au-delà de cette densité, le taux de couverture par plante décroît exponentiellement en fonction d'un paramètre $ADENS_p$ qui représente la capacité de la plante à supporter les densités croissantes :

$$\begin{aligned} \text{si } LAI(I) \geq LAICOMP_p \text{ et } DENSITE(I) \geq BDENS_p \quad DELTAI_{dens}(I) &= DENSITE(I) \left(\frac{DENSITE(I)}{BDENS_p} \right)^{ADENS_p} \\ \text{si } LAI(I) < LAICOMP_p \text{ ou } DENSITE(I) < BDENS_p \quad DELTAI_{dens}(I) &= DENSITE(I) \end{aligned}$$

Le calcul du nombre de feuilles est réalisé jusqu'au stade LAX en fonction du phyllochrone de la plante (paramètre $PLASTOCHROME_p$), soit la durée thermique séparant l'émission de deux feuilles. Ce calcul est essentiellement indicatif, son seul rôle dans le modèle étant de définir la durée de la phase plantule pour le calcul des risques de gel. La hauteur de la culture est déduite du taux de couverture, entre une hauteur de base ($HAUTBASE_p$) et une hauteur maximale ($HAUTMAX_p$). Tout comme le nombre de feuilles, ce calcul est indicatif.

2.2.2. Biomasse

Le calcul du rayonnement intercepté se fait par une loi de Beer, préconisée pour les cultures supposées homogènes, en fonction du rayonnement global et du coefficient d'extinction du rayonnement.

L'accumulation de biomasse aérienne est calculée à partir de l'efficacité de conversion du rayonnement intercepté. Cette efficacité dépend du stade de développement de la plante (juvénile, végétatif ou reproductif), ainsi que des stress auxquels elle est soumise.

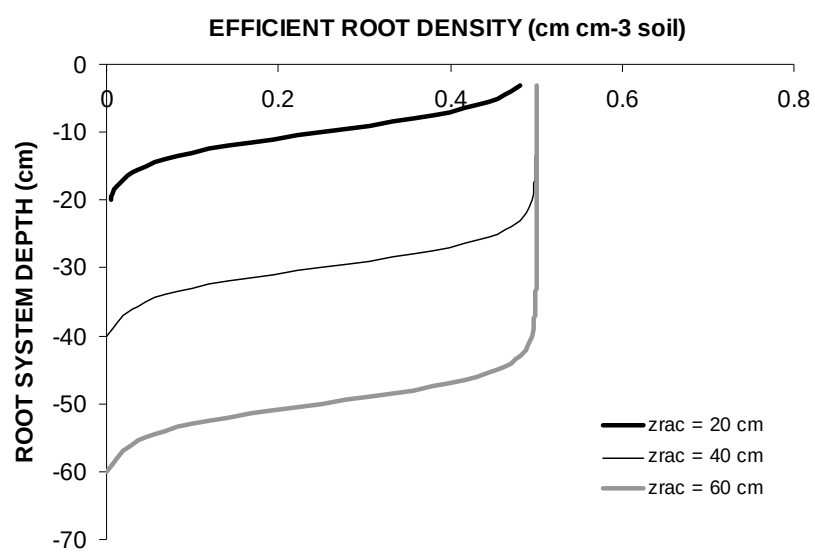
Les différents stress (hydrique ou azoté) sont pris en compte par le biais d'indices variant entre 0 et 1 (0 = effet du stress maximal, 1 = absence d'effet) qui réduisent les fonctions vitales de la plante. L'effet du gel est également inclus, affectant successivement aux différents stades de développement la plantule, la croissance du feuillage, l'efficacité de conversion et le remplissage des grains.

2.3. Elaboration du rendement

Le nombre d'organes récoltés est fixé pendant une phase qui précède le début du remplissage (phase de latence), et dépend de la vitesse de croissance moyenne de la culture durant cette phase. Le nombre de grains croît linéairement avec la vitesse de croissance et dépend d'un paramètre génétique qui est le nombre de grains maximal. La matière sèche accumulée dans les grains est calculée en appliquant un indice de récolte évolutif à la matière sèche de la plante, qui est une fonction linéaire du temps entre les stades DRP et MAT. L'indice de récolte final est limité par le produit du nombre maximal de grains par le poids maximal d'un grain ($NBGRMAX_p \times PGRAINMAXI_p$) et doit être inférieur à un paramètre spécifique ($IRMAX_p$). La masse de chaque grain est ensuite calculée comme le rapport entre le rendement et le nombre de grains, sans pouvoir dépasser la limite génétique fixée.

Le nombre de grains peut être réduit en cas de gel, et il existe une température minimale seuil de translocation sous laquelle le remplissage en carbone des grains est stoppé.

Figure 15. Profil de densité racinaire efficace



(Tiré de Brisson et al., 2008)

La décision de récolter est modulable et se fait ici lorsque la maturité physiologique est atteinte (décision gérée dans le module de gestion technique de la culture). La qualité des organes de récolte peut dans notre cas être exprimée par la teneur en azote des grains. On ne prendra pas en compte les teneurs en eau, sucre, ou huile.

2.4. Croissance racinaire

Le module de croissance racinaire calcule d'une part la croissance du front racinaire, d'autre part la densité racinaire. La croissance des racines est déconnectée de la croissance aérienne et les racines jouent uniquement un rôle fonctionnel d'absorbeur d'eau et d'azote. La croissance racinaire débute à la germination et s'arrête en même temps que la croissance foliaire nette (ou si la profondeur du sol faisant obstacle est atteinte).

La vitesse de progression du front racinaire est fonction de l'espèce ($CROIRAC_p$) et proportionnelle à la température. Elle est modulée en fonction de l'humidité du sol ($HUMIRAC$, Figure 11) et de sa densité apparente, qui peut représenter une contrainte à la pénétration.

La densité racinaire est calculée par un profil racinaire efficace vis-à-vis de l'absorption d'eau et d'azote. Ce profil est défini par la profondeur atteinte par le front racinaire ($ZRAC$) et par une densité racinaire optimale. A chaque profondeur atteinte par le système racinaire, correspond un profil de densité racinaire efficace de forme sigmoïdale. Il évolue d'une valeur optimale, non limitante vis-à-vis de l'absorption, estimée à 0,5 cm de racines par cm^3 de sol (Brisson *et al.*, 1998), jusqu'à une valeur minimale à la profondeur $ZRAC$ atteinte. Pour chaque valeur de $ZRAC$, l'évolution de la sigmoïde (Figure 15) est pilotée par les différences entre une profondeur d'absorption optimale sur l'horizon labouré ($ZLABOUR_p$), une profondeur où l'absorption est réduite de moitié ($ZPENTE_p$) et une profondeur de front racinaire associé à ce profil ($ZPRLIM_p$).

2.5. Fonctionnement hydrique

Ce module estime l'état hydrique du sol et de la plante en se basant sur le calcul des différents termes d'offre et de demande. Il permet ainsi de déterminer le niveau de stress hydrique, résultant d'une inadéquation entre offre et demande, et qui entraîne une limitation de la croissance aérienne.

2.5.1. L'offre du sol

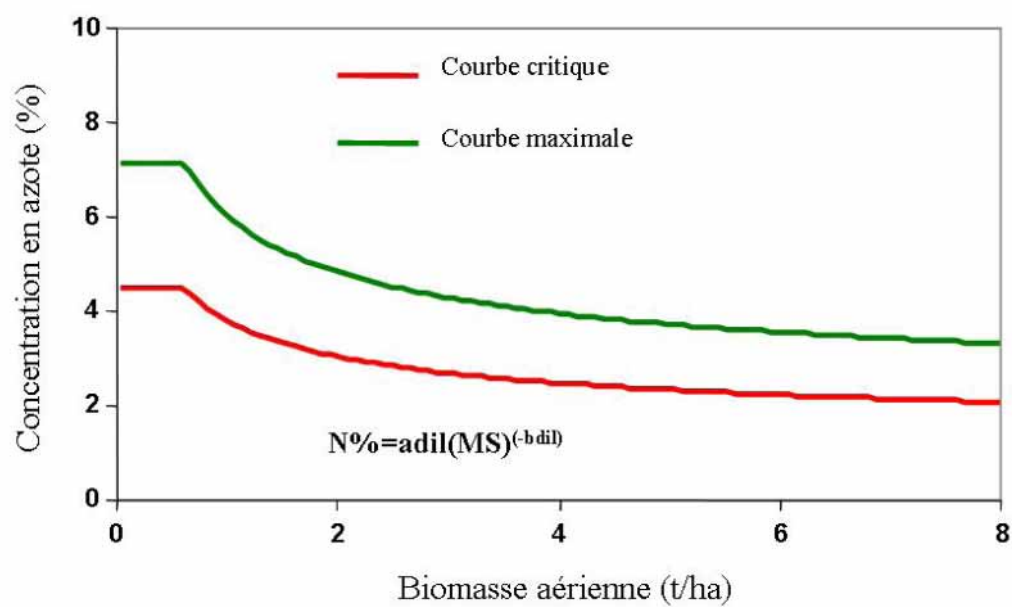
L'évaporation du sol est calculée en deux étapes, d'abord l'évaporation potentielle liée à la quantité d'énergie disponible à la surface du sol, puis l'évaporation réelle liée à la quantité d'eau disponible. Elle est ensuite distribuée dans le profil du sol.

L'évaporation potentielle du sol est calculée par un équivalent de la loi de Beer appliqué au rapport entre évaporation potentielle et évapotranspiration de référence, et fonction du taux de couverture ; l'évapotranspiration de référence est calculée par la formule de Penman (cf. § 3.1 de ce chapitre).

L'évaporation réelle est basée sur les concepts développés par Ritchie (1972) et son calcul est décrit en détail dans Brisson et Perrier (1991). Après une pluie, l'évaporation réelle du sol se fait en deux phases. Elle est potentielle jusqu'à ce que le cumul d'évaporation journalière atteigne un seuil ($Q0_s$) dépendant de la texture et de la structure du sol ; elle est ensuite réduite, selon le climat et le type de sol.

Le calcul de la distribution de l'évaporation journalière dans le profil est basé sur une décroissance exponentielle de la contribution de chaque couche élémentaire de sol depuis la surface jusqu'à une profondeur maximale $ZESX_s$; en dessous de cette profondeur, il n'y a aucune évaporation.

Figure 16. Courbes de dilution de l'azote (adaptée de Lemaire *et al.*, 1997)



2.5.2. La demande de la plante

Les besoins en eau de la plante, au même titre que l'évaporation du sol, sont calculés par une approche de type coefficient cultural $K \times ETP$ (Brisson *et al.*, 1992) en deux temps.

L'évaporation potentielle de la culture est tout d'abord calculée en supposant que l'ensemble des surfaces sol et plante n'est pas limité en eau. Cette évaporation est une fonction linéaire du taux de couverture qui fait intervenir le coefficient cultural maximal ($KMAX_p$).

La transpiration maximale, qui dépend de l'énergie disponible au niveau du couvert, est ensuite estimée par la différence entre l'évaporation potentielle de la culture et celle du sol. Elle dépend également des conditions atmosphériques au sein du couvert, une sécheresse du sol sous la végétation entraînant une augmentation de la demande de la plante ; une relation empirique a ainsi été ajoutée, conduisant à une augmentation des besoins de 40% au maximum lorsque le sol est complètement sec.

2.5.3. La transpiration réelle

Au pas de temps journalier, la transpiration réelle de la plante est supposée égale à l'absorption racinaire, qui est calculée globalement puis distribuée par couche de profil du sol selon la densité racinaire. Le rapport entre cette transpiration réelle et la transpiration maximale est fonction de la teneur en eau disponible dans la zone racinaire entre le point de flétrissement et la capacité au champ. Le seuil de teneur en eau séparant la transpiration maximale de la transpiration réelle dépend à la fois de la densité racinaire, du fonctionnement stomatique de la plante et de la demande climatique (Brisson, 1998).

Les indices de stress hydrique jouent sur la croissance foliaire, la croissance en biomasse et la transpiration. Le rapport entre transpiration réelle et maximale représente l'indice de stress stomatique, qui intervient plus tard que l'indice de stress sur la croissance foliaire.

2.6. Fonctionnement azoté

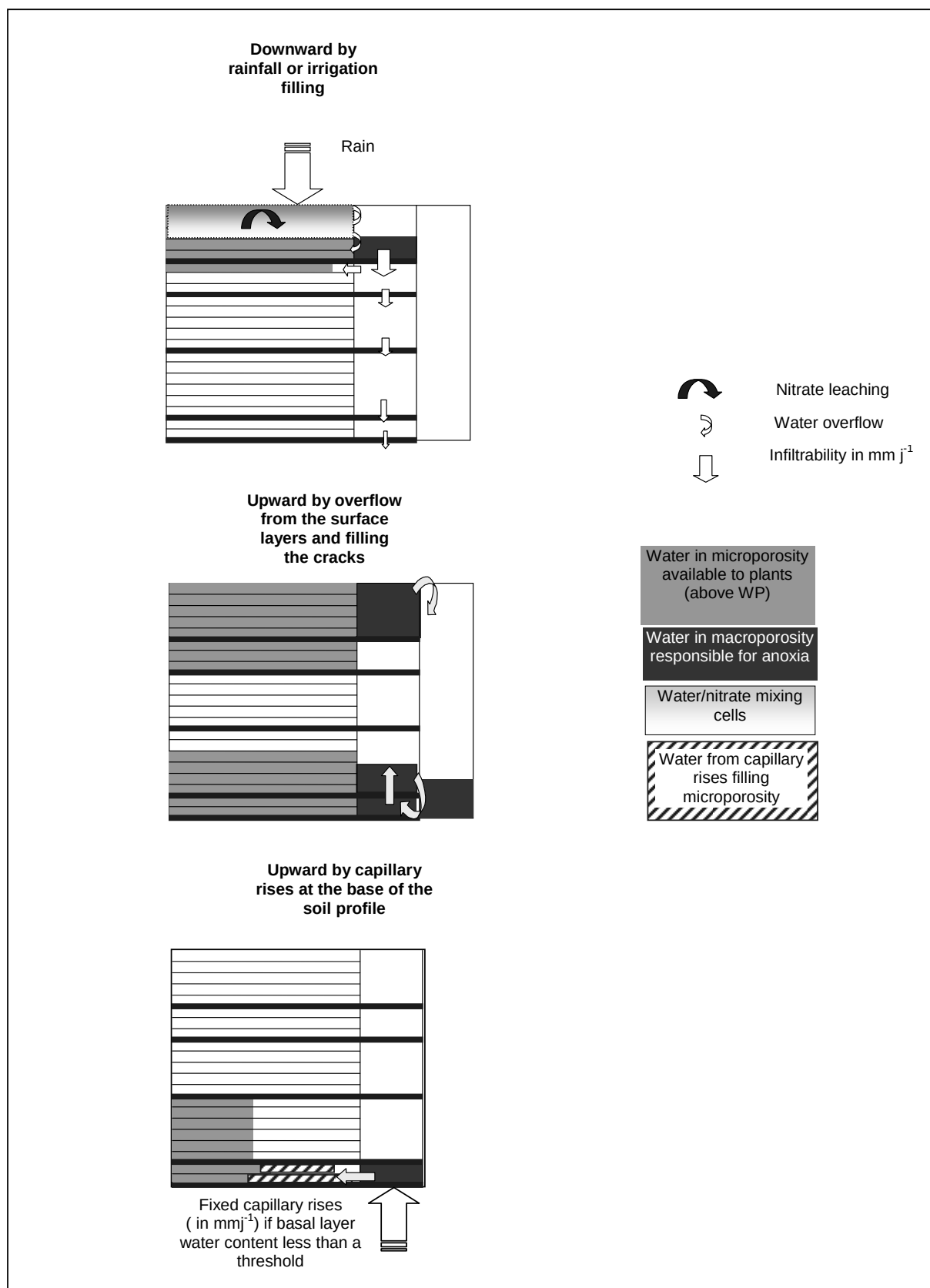
Sur le même principe que le module de fonctionnement hydrique, le module de fonctionnement azoté utilise le concept de facteur limitant et compare chaque jour l'offre du sol et la demande de la culture. L'absorption journalière est égale au plus petit de ces deux termes. La demande de la plante obéit au concept de courbe maximale de dilution de l'azote, tandis que l'offre du sol est déterminée par le transfert du nitrate du sol vers la racine puis l'absorption active par la racine. Les différents indices de stress azoté sont calculés à partir de la courbe critique de dilution (Figure 16, adaptée de Lemaire *et al.*, 1997) et jouent sur la croissance foliaire et la croissance en biomasse.

2.7. Transferts de chaleur, d'eau et de nitrates

Ce module permet de simuler la température du sol à partir de la température de culture calculée dans le module "Microclimat", ainsi que les quantités d'eau et d'azote dans le sol. Pour représenter les transferts d'eau et d'azote, le compartiment sol est divisé en deux compartiments, la microporosité et la macroporosité (Figure 17).

Le transfert de l'eau dans la microporosité du sol est calculé par couche élémentaire de 1 cm en utilisant une analogie de type réservoir. Les apports d'eau remplissent les couches en cascade sachant que la limite supérieure de chaque réservoir élémentaire correspond à la capacité au champ de la couche. Les caractéristiques des couches élémentaires (humidité à la capacité au champ, humidité au point de flétrissement et densité apparente), ainsi que les teneurs en eau initiales, sont déduites de celles de l'horizon du sol auquel elles appartiennent. L'eau excédentaire par rapport à la capacité au champ est affectée au drainage. En surface, jusqu'à la profondeur $ZESX_s$, le sol peut se dessécher jusqu'à l'humidité résiduelle puisque cette zone contribue à l'évaporation.

Figure 17. Compartiments du sol et circulation de l'eau et des nitrates



(Tiré de Brisson et al., 2008)

Le compartiment macroporosité est discrétisé par horizon et non par couche de 1 cm. Au niveau de chaque discontinuité pédologique est défini un paramètre d'infiltrabilité journalier ($INFIL_s$). A la surface du sol, la quantité d'eau journalière qui pénètre dans le sol dépend d'un coefficient de ruissellement qui donne la proportion d'eau ruisselée au-dessus du seuil de déclenchement par rapport à la pluie incidente, lorsque le sol est nu. Ce paramètre globalise les effets de pente et de rugosité du sol sur le ruissellement de surface. Entre deux discontinuités, la circulation "descendante" se fait "par débordement" d'une couche vers la suivante comme pour la microporosité. Au niveau d'une discontinuité, la quantité d'eau infiltrée est limitée par son paramètre d'infiltration, alimentant ainsi la macroporosité. Des remontées capillaires depuis le sous-sol peuvent se produire en fonction de l'état hydrique de la base du sol.

La simulation du transfert de nitrates est basée sur la notion de mélange parfait : tout le nitrate arrivant par convection avec l'eau dans une couche élémentaire se mélange avec le nitrate déjà présent, l'excès d'eau repart ensuite avec la nouvelle concentration du mélange. Dans le cas des nitrates, la couche élémentaire est de 10 cm, sinon la dispersion est trop faible.

2.8. Gestion technique de la culture

Le module de gestion technique de la culture permet de prendre en compte les différents apports à la culture (irrigation, fertilisation).

Il vise également à caractériser l'état de surface du sol et à prévoir les effets de sa modification, due à la présence d'un mulch végétal par exemple, sur les bilans hydrique et thermique du système sol-culture, ayant des répercussions sur les modules de fonctionnement hydrique et de transfert.

Enfin, une option "décision de semis" peut être activée, qui permet le calcul automatique d'une date de semis en fonction de l'humidité du sol et de la température, afin que la levée et la croissance de la plantule puissent se dérouler dans des conditions optimales. L'humidité minimale du sol au niveau du lit de semences ($PROFSEM_t \pm 2$ cm cette fois) doit être supérieure au point de flétrissement pour ne pas entraîner de manques à la germination. Les températures minimales et moyennes sont analysées sur une période de plusieurs jours suivant le semis potentiel. La température moyenne doit être supérieure à la température de base de développement de la culture pour permettre une croissance significative ; la température minimale doit être supérieure à un seuil minimisant les risques de gel. Tant que ces conditions ne sont pas réunies, le semis est repoussé.

2.9. Microclimat

Le module de microclimat a pour but le calcul de la température de culture à partir du bilan d'énergie. La température de culture constitue une synthèse de l'état hydrique de la plante, du taux de couverture et du climat. Elle est utilisée pour le calcul de la température du sol.

3. Processus nécessitant une adaptation pour répondre aux conditions de culture du quinoa sur l'Altiplano bolivien

3.1. Limites du modèle STICS pour notre étude

3.1.1. Pour représenter l'Altiplano

L'équation retenue ici pour le calcul de l'évapotranspiration de référence est celle de Penman, qui est la plus proche de celle validée sur l'Altiplano par Garcia *et al.* (2003 ; 2004a) :

$$TETP(I) = \frac{DELAT(I)}{L(I) \cdot (DELAT(I) + GAMMA)} RNET_{PE}(I) + \frac{GAMMA}{DELAT(I) + GAMMA} \cdot 0.26 \cdot (1 + 0.54 \cdot TVENT(I)) \cdot DSAT(I)$$

où $DELTA T$ est la pente de la relation entre pression de vapeur saturante et température, L la chaleur latente de vaporisation (MJ.kg^{-1}), $RNET$ le rayonnement net journalier ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$), $GAMMA$ la constante psychrométrique ($\text{hPa.}^{\circ}\text{C}^{-1}$), $DSAT$ le déficit de saturation de l'air (mbars) et $TVENT$ la vitesse du vent (m.s^{-1}).

Or, cette formule fait intervenir à deux niveaux l'altitude, qui n'est actuellement pas prise en compte par STICS.

D'une part, dans le modèle, la valeur de la constante psychrométrique $GAMMA$ est fixe, à $0,66 \text{ hPa.}^{\circ}\text{C}^{-1}$, alors qu'elle diminue en fait lorsque l'altitude augmente, conjointement à la pression atmosphérique $PATM$ (hPa), selon :

$$GAMMA = 0.65 \frac{Patm}{1000}$$

La valeur paramétrée est donc correcte au niveau de la mer pour une pression atmosphérique de 1 015 hPa, mais pour une altitude moyenne de l'Altiplano bolivien de 3 800 m et une pression atmosphérique d'environ 660 hPa, $GAMMA$ ne vaut plus que $0.42 \text{ hPa.}^{\circ}\text{C}^{-1}$.

D'autre part, les caractéristiques radiatives de l'Altiplano pourraient affecter le calcul du rayonnement net. La formule employée pour son calcul doit donc être vérifiée.

De plus, en cas de données d'humidité manquantes, la température du point de rosée, considérée comme égale à la température minimale, est utilisée pour la réestimation. Cependant, en zone aride, Allen *et al.* (1998) ont montré que ce calcul pouvait poser problème ; il est en effet fréquent que l'air ne soit pas saturé à la température minimale, si bien que la température du point de rosée lui est en fait inférieure.

3.1.2. Pour représenter les conditions et techniques de culture

Le formalisme actuel de germination et de levée est insuffisant pour représenter les conditions limitantes d'implantation sur l'Altiplano bolivien et expliquer les faibles densités de levée parfois observées. Il ne prend pas en compte les manques possibles à la germination. En effet, une sécheresse importante peut provoquer un retard de germination, ce qui n'a pas de conséquences sur la viabilité de la graine tant que celle-ci n'a pas été imbibée. En revanche, si l'humidité est tout de même suffisante pour qu'il y ait imbibition, Bradford (1990 ; 1995 ; 2002) a montré qu'un temps de germination trop long aura un impact sur le nombre de graines germées. Il ne permet pas non plus de considérer l'effet de la croûte de battance, qui participe à la diminution des densités de levée.

Ensuite, la structure du sol est considérée comme fixe dans STICS. Or, les outils de travail du sol, qu'il s'agisse d'un labour ou d'un travail superficiel, provoquent une fragmentation du sol qui s'accompagne d'une diminution de sa masse volumique. Les travaux de Mumen (2006) ont montré que ces modifications de structure avaient un effet sur les paramètres physiques du sol, et en particulier des conséquences sur le bilan hydrique, dont le modèle ne tient donc pas compte.

Enfin, le semis en poquet pose problème, puisqu'il est en pratique, de par la forme du poquet, un semis à la fois en profondeur et en surface.

Il a donc été nécessaire d'adapter ou d'introduire plusieurs formalismes afin de représenter au mieux les conditions particulières de l'Altiplano.

Tableau 4. Comparaison entre le rayonnement net mesuré et calculé par les formules d'Allen, de STICS et de Vacher (écart-types entre parenthèses)

	Rnet (MJ/m ² /j)			
	mesuré	ALLEN	STICS	Vacher
Altiplano Nord, Centre et Sud	6.5 (3.9)	12.0 (2.9)	8.5 (2.9)	6.1 (3.0)
Altiplano Centre et Sud seuls	9.8 (3.1)	12.2 (2.5)	8.8 (2.5)	6.7 (2.2)
Altiplano Nord seul	6.4 (3.9)	12.0 (2.9)	8.5 (3.0)	6.1 (3.0)

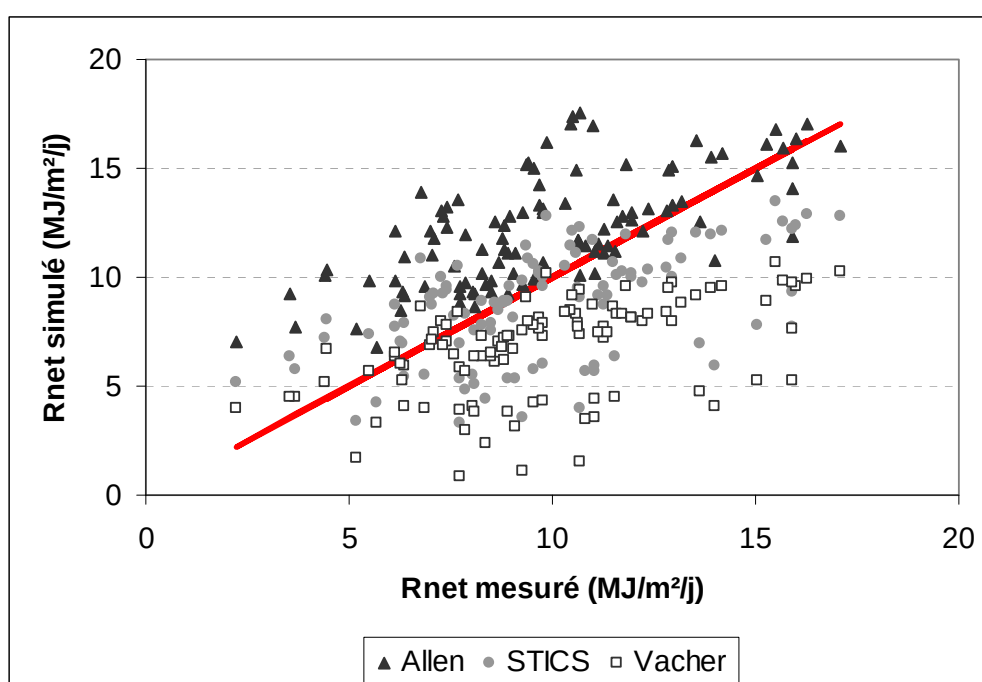
Tableau 5. Erreur de prédiction, biais et dispersion (en MJ.m⁻².j⁻¹) des formules d'Allen, de STICS et de Vacher pour le calcul du rayonnement net sur l'Altiplano bolivien

	ALLEN		
	RMSE	RMSEs	RMSEu
Altiplano Nord, Centre et Sud	6.7	6.1	2.6
Altiplano Centre et Sud	3.3	2.7	1.9

	STICS		
	RMSE	RMSEs	RMSEu
Altiplano Nord, Centre et Sud	4.3	3.4	2.7
Altiplano Centre et Sud	2.9	2.0	2.1

	VACHER		
	RMSE	RMSEs	RMSEu
Altiplano Nord, Centre et Sud	4.1	3.1	2.7
Altiplano Centre et Sud	4.7	4.3	1.9

Figure 18. Comparaison entre le rayonnement net mesuré et calculé sur les sites de l'Altiplano Centre et Sud



3.2. Prise en compte de l'altitude

3.2.1. Ajout de la pression atmosphérique

La pression atmosphérique a été ajoutée en donnée d'entrée du modèle, ce qui permet de faire varier la valeur de la constante psychrométrique avec l'altitude.

3.2.2. Calcul du rayonnement net

Le rayonnement net correspond au bilan des rayonnements de courte longueur d'onde et de grande longueur d'onde. Le rayonnement de courte longueur d'onde (RCLO) tient compte de l'albédo de la surface et du rayonnement solaire global :

$$RCLO = (1 - \alpha) R_g$$

où R_g est le rayonnement global mesuré et α l'albédo. La valeur utilisée pour α est de 0,23.

Le rayonnement de grande longueur d'onde (RGLO) peut lui être exprimé de différentes manières. Nous avons choisi d'en comparer trois, afin de garder celle qui est la mieux adaptée à l'Altiplano bolivien :

- la formule de Brunt utilisée dans STICS

$$RGLO = \sigma [T_{moy,K}]^4 \left[1,45 \frac{R_g}{R_{g0}} - 0,161 \right] \left[0,56 - 0,08 \sqrt{e_a} \right]$$

- la loi de Stefan-Boltzmann modifiée par Allen *et al.* (1998) et utilisée par Garcia *et al.* (2004a) sur l'Altiplano bolivien

$$RGLO = \sigma \left[\frac{T_{min,K}^4 + T_{max,K}^4}{2} \right] \left[\frac{1,35}{0,75 + 2 \cdot 10^{-5}} \frac{R_g}{R_{g0}} - 0,35 \right] \left[0,34 - 0,14 \sqrt{\frac{e_a}{10}} \right]$$

- la formule de Brunt modifiée utilisée par Vacher *et al.* (1988) sur l'Altiplano bolivien

$$RGLO = \sigma [T_{moy,K}]^4 \left[1,17 \frac{R_g}{R_{g0}} - 0,1 \right] \left[0,8 - 0,09 \sqrt{e_a} \right]$$

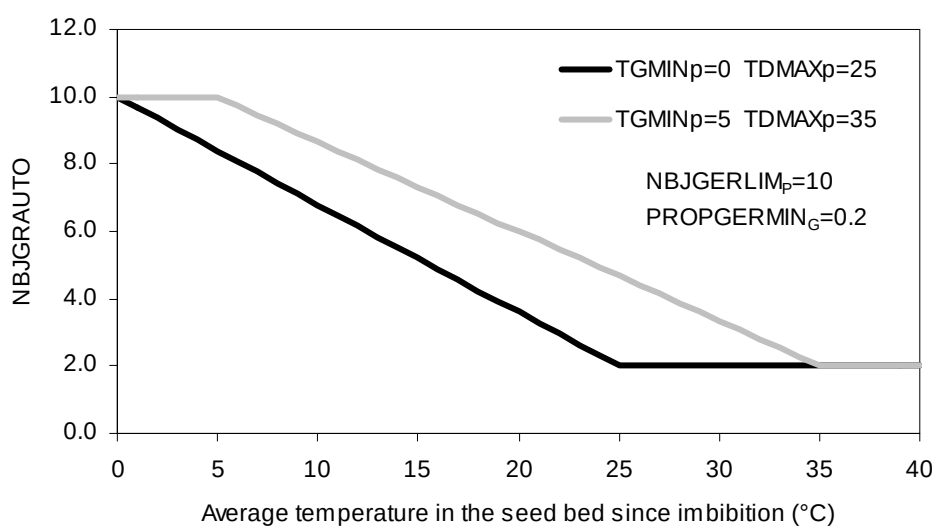
où σ est la constante de Stefan-Boltzman ($4,903 \times 10^{-9}$ MJ.K⁻⁴.m⁻².j⁻¹), $T_{moy,K}$ la température journalière moyenne de l'air en Kelvin ($K = ^\circ C + 273$), $T_{min,K}$ la température journalière minimale de l'air en Kelvin ($K = ^\circ C + 273$), $T_{max,K}$ la température journalière maximale de l'air en Kelvin ($K = ^\circ C + 273$), e_a la tension de vapeur (mbars), R_g le rayonnement global (MJ.m⁻².j⁻¹), R_{g0} le rayonnement extraterrestre (MJ.m⁻².j⁻¹) et z l'altitude (m) fixée ici à 3 800 mètres.

Nous disposons pour cela de 12 années cumulées de mesure de rayonnement net réparties sur quatre sites (1987-1991 sur deux sites de l'Altiplano Nord, 2005 sur l'Altiplano Centre, 2006 sur l'Altiplano Sud). Les résultats des calculs par les différentes formules ont été comparés aux données mesurées et entre eux. Les moyennes et les RMSE associées sont données dans les Tableaux 4 et 5. La formule de STICS entraîne une légère sous-estimation dans le Sud et dans le Centre (où le rayonnement net moyen mesuré est le plus élevé) tandis que les valeurs dans le Nord (rayonnement net mesuré plus faible) sont surestimées. Elle est ainsi intermédiaire entre celle d'Allen et celle de Vacher, qui, de manière systématique sur l'ensemble des sites, surestime le rayonnement pour la première et le sous-estime pour la seconde. Sur l'ensemble des quatre sites, les RMSE, biais et dispersion des formules de STICS et de Vacher sont assez proches, les valeurs de la formule d'Allen étant nettement supérieures.

Tableau 6. Effet de l'altitude sur le calcul de la demande climatique (écart-types entre parenthèses)

	Nord		Centre		Sud	
	etp1000	etp660	etp1000	etp660	etp1000	etp660
janvier	104 (25)	112 (27)	121 (26)	128 (27)	131 (16)	134 (15)
février	103 (20)	112 (22)	117 (18)	123 (18)	98 (15)	103 (14)
mars	96 (23)	104 (24)	110 (22)	114 (21)	108 (23)	109 (19)
avril	87 (15)	91 (15)	95 (16)	96 (14)	103 (20)	99 (16)
mai	77 (10)	84 (23)	90 (17)	86 (13)	87 (16)	80 (12)
juin	66 (12)	74 (31)	81 (16)	75 (12)	76 (18)	68 (14)
juillet	74 (12)	84 (35)	92 (23)	85 (17)	80 (18)	74 (14)
août	89 (16)	105 (49)	114 (22)	109 (17)	96 (16)	92 (12)
septembre	102 (14)	115 (31)	120 (18)	119 (15)	122 (19)	116 (15)
octobre	117 (22)	131 (36)	141 (25)	142 (22)	142 (19)	138 (15)
novembre	115 (23)	132 (38)	140 (23)	142 (22)	160 (16)	153 (13)
décembre	116 (23)	134 (42)	143 (26)	146 (24)	151 (24)	148 (21)
ETP journalière	3.1	3.5	3.7	3.7	3.7	3.6

Figure 19. Nombre de jours disponibles pour la reprise du métabolisme entre imbibition et germination en fonction de la température du sol



(Tiré de Brisson et al., 2008)

Cependant, si on ne considère que les sites de l'Altiplano Centre et Sud (Figure 18), alors la RMSE et le biais de la formule de STICS sont bien plus faibles. Sa dispersion est certes un peu plus élevée, mais cela peut être dû aux erreurs de mesure, tandis que le biais signalerait plutôt un problème de formule. Nous avons donc au final choisi de conserver la formule de STICS, qui semble être le meilleur compromis pour estimer le rayonnement sur l'ensemble de l'Altiplano.

3.2.3. Effet sur le calcul de l'évapotranspiration

Nous avons comparé les calculs de l'évapotranspiration avec STICS sur les sites de l'Altiplano Nord, Centre et Sud (Tableau 6), pour une pression de 1 015 hPa et de 660 hPa. L'altitude augmente la demande climatique annuelle dans le Nord et la diminue dans le Sud, mais toutefois de manière non significative ; elle ne varie pas dans le Centre. Dans le Sud et le Centre, plus secs, elle est diminuée les mois avec peu ou pas de précipitation, et augmentée pendant la saison des pluies.

3.2.4. Calcul de la température du point de rosée

Un écart de 0,4°C à 1°C entre la température minimale et la température du point de rosée a été observé par Geerts *et al.* (2006b) sur l'ensemble de l'Altiplano, et d'environ 0,5°C dans le Nord jusqu'à 3°C dans le Sud par Garcia (2003). Nous avons au final fixé à 1°C la température à retrancher à la température minimale pour obtenir la température du point de rosée.

3.3. Modification des formalismes de germination et de levée

Les formalismes d'imbibition et de manques à la germination s'appuient sur les travaux de Bradford (1990 ; 1995 ; 2002), ceux de la croûte de battance sur les travaux de Dürr (2001) et des propositions de formalisme de Richard (2005, communication personnelle).

3.3.1. Imbibition

L'imbibition de la graine est un phénomène passif. Elle se produit à partir d'une valeur seuil du potentiel de l'eau dans le sol, $HUMEC_{GRAINE_p}$ (en MPa), qui dépend de l'espèce. A partir du moment où la graine est humectée, elle dispose d'un nombre limité de jours ($NBJGRAUTO$) pour la reprise de son métabolisme, c'est-à-dire entre l'imbibition et la sortie de la radicule qui caractérise le démarrage visible de la croissance. Ce nombre de jours présente une composante liée à l'espèce, $NBJGERLIM_p$, et une autre qui dépend de la température. Il est en effet considéré qu'à basse température, la graine a une capacité plus grande qu'à température élevée ; en revanche plus la température augmente, plus la reprise du métabolisme est rapide et la graine ne dispose donc que d'une proportion de $NBJGERLIM_p$.

L'évolution du nombre de jours disponibles pour la reprise du métabolisme est présentée sur la Figure 19. Lorsque la température est inférieure à la température de base de germination $TGMIN_p$, alors le nombre de jours est maximal. Au-delà de la température maximale de développement $TDMAX_p$ (cf. § 3.1 du Chapitre IV), la graine épuise ses capacités de mise en place du métabolisme en un temps minimum, paramétré par défaut à 20% de $NBJGERLIM_p$ ($PROPGERMIN_p$).

3.3.2. Manques à la germination

Si le nombre de jours d'humectation ($NBJHUMEC$) devient supérieur au seuil $NBJGRAUTO$ autorisé par la température, la germination est déclenchée (stade IGER atteint), mais avec un déficit en densité de germination par rapport à la densité semée, proportionnel au déficit en temps thermique :

$$\begin{aligned} \text{si } NBJHUMEC(I) > NBJGRAUTO(I), I = IGER \text{ et } DENSITE_{germination}(IGER) &= DENSITE_{semis,t} \frac{SOMGER(I)}{STPLTGER_p} \\ \text{si } NBJHUMEC(I) \leq NBJGRAUTO(I), DENSITE_{germination}(IGER) &= DENSITE_{semis,t} \end{aligned}$$

Figure 20. Reconstitution des horizons du sol pour respecter les opérations techniques pratiquées

Cas d'un sol initial composé de 3 horizons a, b et c de 20 cm chacun, reconstitué en 4 horizons pour un travail superficiel du sol sur 5 cm (horizon 1) et un labour sur 30 cm (horizons 1 et 2)

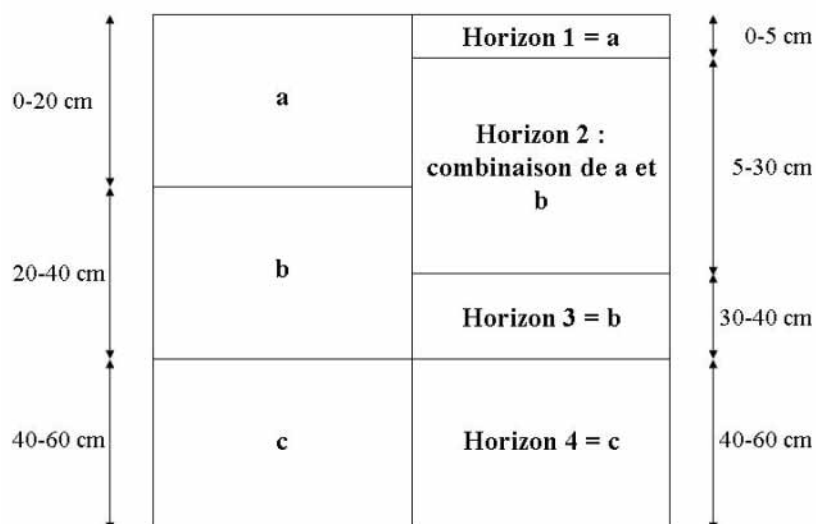


Tableau 7. Effet des modifications de structure sur les paramètres physiques du sol

DA _S in en g cm ⁻³	INFIL _S en mm d ⁻¹	ZESX _S en cm	Q0 _S en mm
1.1	5.2	19	5.4
1.2	4.5	22.2	4.62
1.3	3.5	25.4	3.84
1.4	2.8	28.6	3.06
1.5	2	31.8	2.28
1.6	1.3	35	1.5

La loi de diminution de la densité de levée du § 2.1.1.2 devient donc :

$$DENSITE_{levée} = DENSITE_{germination} \cdot COEFLEV$$

3.3.3. La croûte de battance

Une croûte de surface peut se former après le semis à partir d'une certaine quantité de pluie ($PLUIEBAT_s$). La croûte est considérée sèche lorsque le mulch naturel ($XMLCH$, variable calculée avec la formule de l'évaporation du sol) devient plus épais que la valeur du paramètre seuil $MULCHBAT_s$.

Le retard de levée induit par la croûte peut, tout comme le déficit en eau dans le lit de semences, être à l'origine de manques à la levée. En raison de l'hétérogénéité de la croûte, plus ou moins épaisse ou fissurée, ainsi que du différentiel de vigueur au sein de la population de plantes, toutes les plantes ne sont pas concernées par ces manques. La facilité à traverser la croûte est prise en compte par le biais du paramètre $VIGUEURBAT_p$. Le retard de levée est formalisé par un arrêt de l'accumulation de temps thermal dans l'équation de $ELONG$ lorsque l'hypocotyle atteint la croûte ($CRUST = 0.0$) :

si $XMLCH(I) \geq MULCHBAT_s$ et $ELONG(I) \geq PROFSEM_t - XMLCH(I)$ alors $CRUST(I) = 0.0$
 si $XMLCH(I) < MULCHBAT_s$ ou $ELONG(I) < PROFSEM_t - XMLCH(I)$ alors $CRUST(I) = 1.0$

La loi de diminution de densité est spécifique au phénomène de croûte de battance mais analogue à la loi $COEFLEV$ présentée précédemment ; elle possède toutefois une valeur seuil minimale, correspondant au paramètre $VIGUEURBAT_p$. Les deux lois agissent de manière dynamique : si un jour donné on est en condition de battance ($CRUST = 0.0$) alors on réduit la levée selon la loi "battance", sinon ($CRUST = 1.0$) c'est la loi $COEFLEV$ qui prévaut. Ainsi dès qu'une pluie importante se produit, l'épaisseur de la croûte sèche diminue ou devient nulle et le processus de croissance de l'hypocotyle peut reprendre normalement.

3.4. Intégration de l'effet du travail du sol

S'appuyant sur l'expertise des chercheurs du projet "DST" (Dégradation physique des sols agricoles et forestiers liée au tassement, Programme GESSOL2 et Programme fédérateur ADD de l'ANR, appel d'offre 2005), les modifications de structure induites soit par un tassement du sol, soit par un passage d'outil, ont été formalisées dans STICS (Moulin, 2006 ; Echeverria, 2007) ; notre travail découle des résultats obtenus (Richard *et al.*, 2007).

Pour chaque type d'outil, une masse volumique "après travail" a été définie, 1,3 dans le cas d'un labour et 1,1 après un travail superficiel du sol, pour des densités initiales de sol supérieures à 1,3 (Richard *et al.*, 2007). Ces modifications de densité apparente concernent l'horizon de surface pour un travail superficiel du sol, ou l'ensemble de l'horizon travaillé pour un labour. La division du sol en horizons doit donc être en accord avec les différentes opérations pratiquées (Figure 20). Ces modifications de masse volumique induisent de plus, à masse constante de sol, des modifications d'épaisseur des horizons, par une simple règle de proportionnalité.

Dans STICS, deux paramètres caractérisent la structure de chaque horizon, sa masse volumique (DA_s) et l'infiltrabilité ($INFIL_s$) au niveau de la macroporosité ; le sol est également défini par une profondeur affectée par l'évaporation ($ZESX_s$) et une limite d'évaporation potentielle ($Q0_s$). Les travaux de Mumen (2006), Viloingt (2005) et Echeverria (2007) ont permis d'estimer les valeurs de ces différents paramètres en fonction des variations de la masse volumique (Tableau 7), valeurs qui seront donc réaffectées lors des modifications de structure en cours de simulation. Ce travail n'a porté

Figure 21. Comparaison entre semis en ligne et semis en poquet

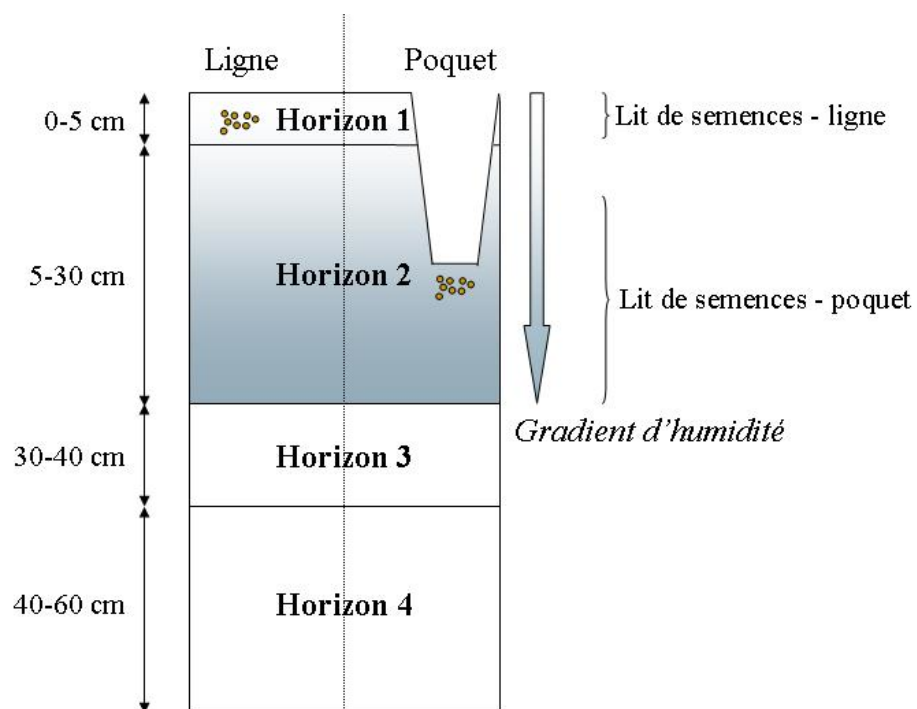
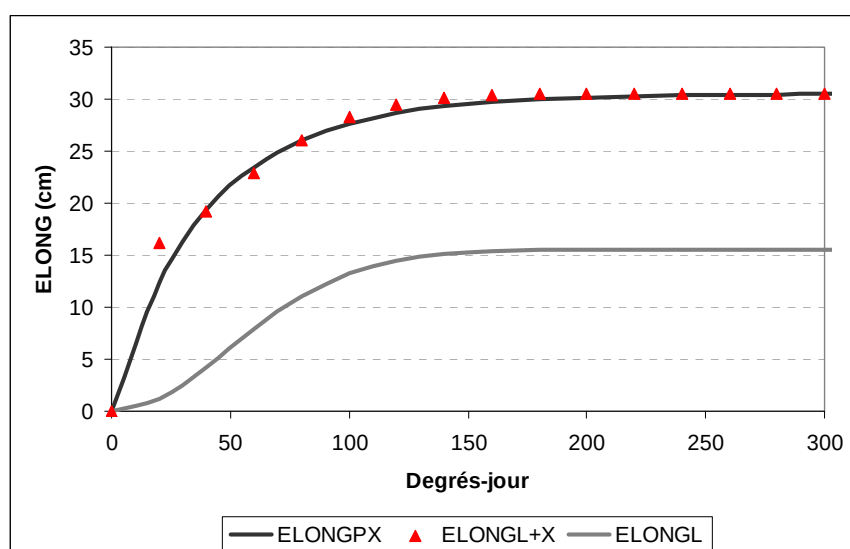


Figure 22. Modification des paramètres d'élongation pour un semis en poquet



jusqu'ici que sur un nombre de sols limité, la thèse en cours de Marie-Pierre Lefebvre à l'INRA d'Orléans ("Spatialisation des risques de tassement à l'échelle de la France") vise à une application à plus grande échelle et sur davantage de sols.

3.5. Ajout d'un formalisme pour le semis en poquet

Dans le cas d'un semis en poquet, la graine se retrouve dans l'horizon de sol correspondant à la profondeur du poquet, et non plus dans l'horizon de surface, soit à une humidité différente, plus élevée, après plusieurs mois d'assèchement du sol (Figure 21). Il aurait été possible de modifier le sol pour supprimer les horizons de surface et le faire commencer à la profondeur du poquet donc à l'humidité adéquate, seulement l'évaporation en surface aurait été beaucoup plus élevée qu'en réalité. De plus, les poquets ont l'avantage par rapport au semis en ligne de concentrer l'eau des pluies à l'endroit où sont les graines. Nous avons donc choisi de considérer que la graine était bien semée à la profondeur du poquet (augmentée des 2 cm de terre qui recouvrent les graines), en transformant les pluies en des irrigations à la profondeur du semis. La battance est donc impossible avec un semis en poquet.

Le chemin à parcourir par la plantule avant d'atteindre la surface étant évidemment plus grand, nous avons également modifié les valeurs des paramètres d'élongation de l'hypocotyle pour que sa croissance soit similaire en poquet et en ligne, valeurs qui varient selon la profondeur choisie du poquet. Pour un poquet à une profondeur X , les paramètres $ELMAX_p$, $BELONG_p$ et $CELONG_p$ doivent donc répondre aux équations (Figure 22) :

$$ELMAX_{pPoquet} = ELMAX_{pLigne} + X$$

$$ELONG_{Poquet} = ELONG_{Ligne} + X$$

où $ELONG_{Poquet}$ est la courbe d'élongation dans un poquet en profondeur à X cm et $ELONG_{Ligne}$ la courbe d'élongation dans une ligne en surface.

4. Description des données d'entrée et des mesures utilisées

4.1. Dispositif expérimental

Dans le cadre d'un projet quinoa élaboré par l'IRD, un réseau agronomique de quinoa a été développé sur l'Altiplano entre 2003 et 2006, soit trois cycles culturaux (Raffaillac, 2007). Le réseau est réparti sur quatre sites (Figure 23) : près du lac Titicaca, l'Altiplano Nord, l'Altiplano Central, et un ou deux sites selon les années dans l'Altiplano Sud. Toutes les parcelles sont identiques, d'une surface d'environ 2 000 m², divisées en quatre blocs comptant chacun dix variétés. Le dispositif expérimental exact est détaillé en Annexe I.

Nous avons choisi de ne travailler que sur une seule variété, nommée Surumi, pour laquelle nous avons davantage de données et qui est une variété d'un programme de sélection de l'IBTA (Instituto Boliviano de Tecnología Agropecuaria). Elle a un cycle végétatif de 175 jours (semi-tardif) ; à maturité la plante atteint une hauteur de 130 cm et prend une coloration rose. Son épi est de forme glomérulaire et ses grains sont doux. La variété Surumi est tolérante aux gelées, moyennement tolérante à la grêle, et présente un rendement moyen de 1,1 t.ha⁻¹ (Bonifacio, 2002).

Pour chaque essai, nous disposons des données climatiques, des caractéristiques du sol, ainsi que de mesures effectuées sur la plante au long du cycle (levée, biomasse, surface foliaire, phénologie, rendement). L'absence de données climatiques continues sur le site près du lac nous a empêchés d'en utiliser et d'en exploiter les mesures biologiques ; nous n'avons donc au final travaillé que sur les trois sites Nord, Centre et Sud.

Figure 23. Localisation des parcelles expérimentales sur l'Altiplano

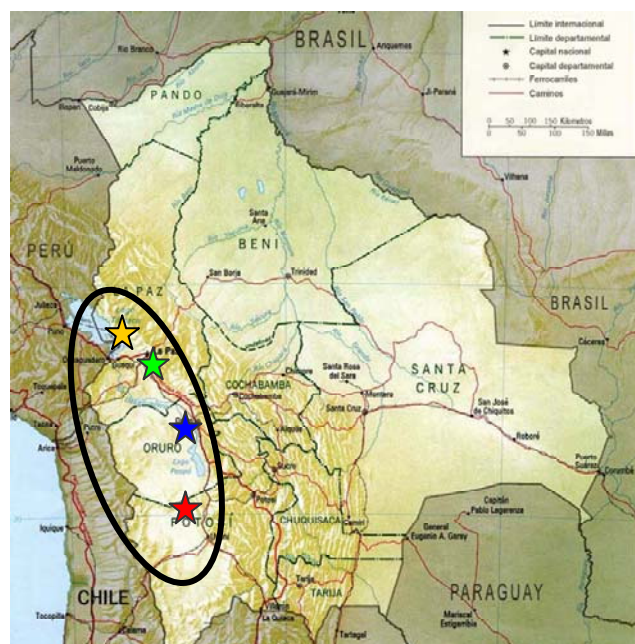


Tableau 8. Jeux de données disponibles

	2001-2002	2002-2003	2003-2004	2004-2005	2005-2006
Nord	X	XXX	X	XX	X
Centre			X	X	X
Sud			X	X	X

Tableau 9. Comparaison des séries climatiques (températures et précipitations) des années expérimentales avec les séries 1980-2000 sur la période 1^{er} septembre – 30 avril (écart-types annuels entre parenthèses)

	2001-2006				1980-2000			
	Tmin °C	Tmax °C	Tmoy °C	P mm	Tmin °C	Tmax °C	Tmoy °C	P mm
Altiplano Nord	2.5 (0.3)	17.8 (1.9)	10.2 (0.9)	476 (75)	2.0 (0.7)	16.7 (1.1)	9.1 (0.8)	497 (137)
Altiplano Centre	2.0 (0.3)	17.3 (0.7)	9.6 (0.4)	411 (24)	2.1 (0.7)	18.5 (0.6)	10.3 (0.4)	378 (122)
Altiplano Sud	1.8 (0.3)	21.9 (1.4)	11.8 (0.6)	239 (32)	4.5 (0.7)	19.7 (1.3)	12.1 (0.6)	177 (107)

Nous disposons également sur le site de l'Altiplano Nord pour la variété Surumi des données d'une parcelle en 2001-2002, de trois parcelles en 2002-2003 et d'une parcelle hors réseau en 2004-2005, où le même type de mesures que celles évoquées précédemment a été réalisé.

Nous avons ainsi pu réunir 14 jeux de données sur l'ensemble des trois sites (Tableau 8).

4.2. Climat

Les données climatiques journalières nécessaires sur l'ensemble de la période de simulation sont les températures minimales et maximales, le rayonnement global, les précipitations, l'humidité moyenne de l'air et la vitesse du vent. La latitude de la station météorologique doit également être connue. Les données dont nous disposons proviennent en partie de mesures faites directement sur la parcelle au moyen d'une station Campbell, et en partie de stations proches. Dans le cas de données manquantes, nous avons utilisé les moyennes décennales disponibles pour compléter les séries, ou nous les avons recalculées à partir de la température de rosée dans le cas de données d'humidité par exemple.

La température moyenne ainsi que la pluviométrie cumulée sur la période de culture (1^{er} septembre au 30 avril) des années d'expérimentation ont été comparées aux valeurs moyennes de la même période entre les années 1980 à 2000, pour des séries de 10 à 20 ans selon les sites (Figure 24 et Tableau 9).

Ces données illustrent bien l'importante gamme climatique existant sur l'Altiplano avec, en moyenne sur nos 20 années, 300 mm de pluviométrie et 3°C de température de différence entre les sites extrêmes. On retrouve le gradient négatif de pluviométrie du Nord (500 mm) vers le Sud (200 mm), avec un gradient positif des températures (9°C dans le Nord contre 12°C dans le Sud), qui s'explique par un rayonnement plus élevé dans le Sud, donc des températures maximales un peu plus hautes, associées à des températures minimales pas encore trop basses sur cette période.

Nos années d'expérimentation se situent dans la moyenne des 20 années précédentes en ce qui concerne la pluviométrie, même s'il s'agit plutôt de la moyenne haute dans le sud. En revanche pour la température moyenne les valeurs sortent un peu plus de la gamme, avec des années un peu plus chaudes dans le nord (jusqu'à environ 2°C de plus pour le cycle 2004-2005), et un peu plus froides dans le centre (jusqu'à environ 1°C de moins pour le cycle 2005-2006). Il faut toutefois être prudent avec ces écarts qui peuvent aussi être dus à des effets très locaux ; les valeurs obtenues restent globalement satisfaisantes.

4.3. Sol

Les données décrivant les sols proviennent de prélèvements *in situ* réalisés à la tarière au moment du semis. Les analyses ont permis de renseigner directement les valeurs de certains paramètres de surface, à savoir la quantité d'argile, la teneur en azote organique et en CaCO₃, ainsi que le pH. La profondeur d'humification a été considérée constante et égale à la profondeur de labour, que nous avons choisi de fixer à une valeur moyenne de 30 cm. Les caractéristiques hydrodynamiques du sol (capacité au champ, point de flétrissement et densité apparente) ont été estimées à partir de fonctions de pédotransfert. Nous avons ici utilisé celle de Rawls et Brakensieks (1989) programmée dans le logiciel SOILPAR2 (Acutis et Donatelli, 2003). Les paramètres d'évaporation du sol et d'infiltrabilité ont été calculés en fonction de la densité apparente comme vu précédemment ; ceux d'albédo et d'obstacle racinaire ont été renseignés d'après la notice STICS (Brisson, 2002a ; 2002b). Le ruissellement et la composante ammoniacale du sol ont été négligés. Toutes ces valeurs sont présentées en Annexe II.

Les caractéristiques texturales sont présentées dans la Figure 25. Les sols du Sud sont très sableux (plus de 80% de sable), ceux du Centre moins avec seulement 50% de sable et une plus grande variabilité des teneurs en limon et argile. On peut distinguer deux groupes pour les sols du Nord, d'une

Figure 24. Distribution des parcelles expérimentales en fonction de la température moyenne et de la pluviométrie pendant la période de culture (1^{er} septembre – 30 avril)

Les graphismes ouverts montrent les moyennes et écart-types historiques (1980-2000) sur les trois sites ; les points sont nos années d'expérimentation. (◇ Nord, □ Centre, △ Sud)

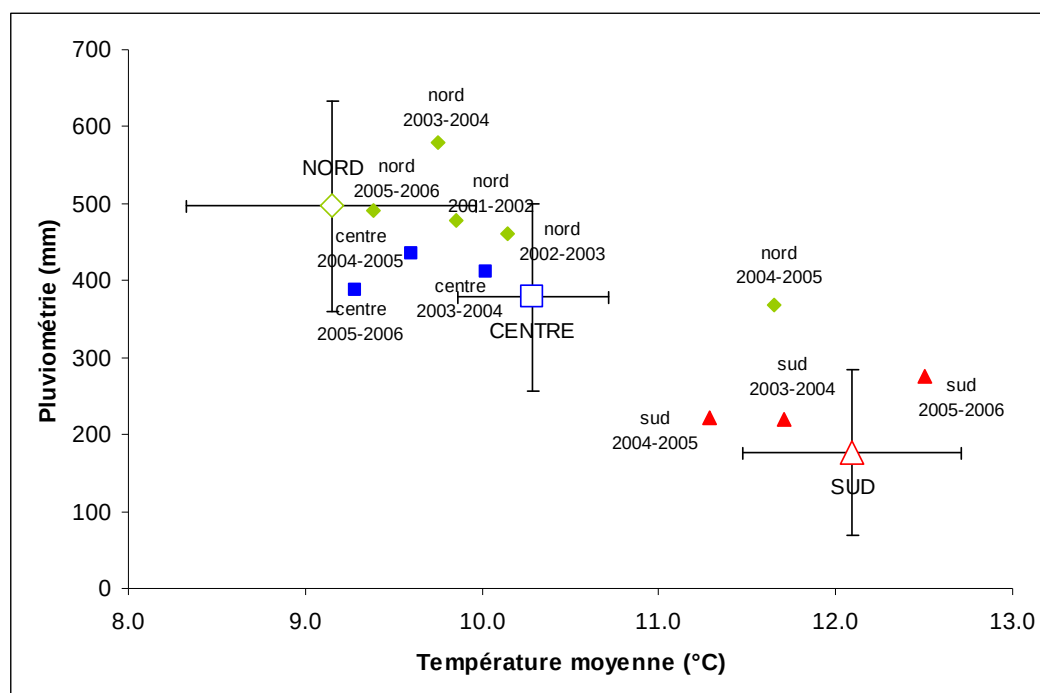
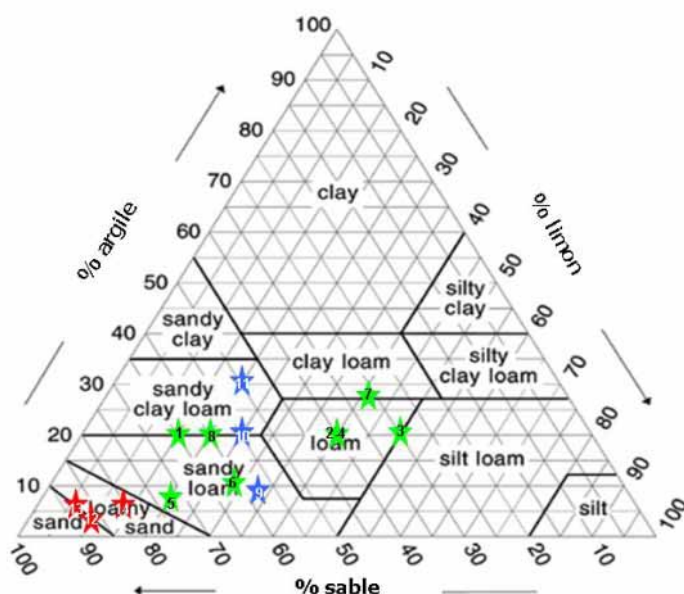


Figure 25. Texture des sols



Légende des sols

Hors-réseau :

- 1 Nord 2001-2002
- 2 Nord 2002-2003
- 3 Nord 2002-2003
- 4 Nord 2002-2003
- 7 Nord 2004-2005

Réseau :

- 5 Nord 2003-2004
- 6 Nord 2004-2005
- 8 Nord 2005-2006
- 9 Centre 2003-2004
- 10 Centre 2004-2005
- 11 Centre 2005-2006
- 12 Sud 2003-2004
- 13 Sud 2004-2005
- 14 Sud 2005-2006

Tableau 10. Indices de battance des sols des essais

	Nord	Centre	Sud	région du lac
2003	0.26	0.26	0.19	0.95
2004	0.45	0.5	0.06	0.7
2005	0.27	0.44	0.08	0.49
Moyenne	0.33	0.40	0.11	0.71

part ceux du réseau qui sont sablo-argileux ou sablo-limoneux, et d'autre part ceux des années précédentes qui ont pour la plupart une texture plus limoneuse.

Ce sont globalement des sols avec des humidités à la capacité au champ faibles (inférieures à 25% pour la plupart). Leurs teneurs en matière organique sont faibles à très faibles (0.06% d'azote organique sur les sols du réseau en moyenne), pour certains sols 10 fois inférieure à ce qu'elle peut être sur un sol moyen en France par exemple.

Des croûtes de battance ont pu être observées, en plus ou moins grande quantité selon les sites et les années, sur toutes les parcelles étudiées. Des analyses de stabilité structurale ont été réalisées par le laboratoire de Sciences du Sol de l'INRA d'Orléans, afin d'évaluer la sensibilité à la battance des sols étudiés (protocole en Annexe III). Les résultats (Annexe III) montrent une battance occasionnelle sur les sols de l'Altiplano Nord, fréquente sur ceux de l'Altiplano Centre. Le protocole utilisé n'a pas permis d'analyser ceux de l'Altiplano Sud, trop sableux ; l'hypothèse peut néanmoins être faite qu'en raison de la faible teneur en carbone organique, ces sols sont peu liants et donc sensibles à la battance.

Nous avons de plus calculé les indices de battance (IB) de certains des sols de nos essais d'après leur texture. Parmi les différents indices de battance existant dans la littérature, nous avons choisi un de ceux utilisés par Riffard *et al.* (2003), le seul calculable avec nos données :

$$IB = \frac{\text{argile}}{\text{limon fin} + \text{sable très fin}}$$

Les valeurs des teneurs en argile, limon fin et sable très fin sont exprimées en pourcentage. Un indice de battance inférieur à 0,25 caractérise les sols très battants ; en dessous de 0,4, le sol est considéré comme assez battant. Les résultats figurent dans le Tableau 10. Les valeurs s'étalent entre 0,11 et 0,4 sur les parcelles du Nord, Centre et Sud. Les sols sont donc plutôt battants, en particulier dans le Sud d'après cet indice. Nous avons fait figurer à titre indicatif les résultats obtenus pour les parcelles proches du lac Titicaca, région plus humide avec des sols beaucoup plus argileux, et sur lesquelles nous n'avions pas observé de croûte de battance ; la valeur de 0,7 semble être en accord avec les observations et cohérente avec les valeurs obtenues sur les autres sites.

4.4. Itinéraire technique

Les parcelles expérimentales ont été conduites comme la plupart des parcelles agricoles sur l'Altiplano, à savoir sans irrigation ni fertilisation. Les données utiles pour renseigner le modèle sont les dates et profondeurs de travail du sol, ainsi que les dates, profondeurs, densités et type (ligne ou poquet) de semis. Les itinéraires techniques suivis sont présentés dans les Tableaux 11 a, b et c. Tous les labours ont été réalisés à environ 30 cm de profondeur, et environ 5 cm pour ce qui concerne le travail superficiel du sol.

Il faut rappeler que STICS ne simule pas l'interaction entre la plante et les bio-agresseurs, ni les traitements phytosanitaires. La présence de mildiou a été enregistrée sur certaines parcelles, mais n'est donc pas prise en compte.

4.5. Etat initial

Pour initialiser correctement l'état hydrique du sol, nous avons fait commencer toutes les expérimentations pendant la saison des pluies précédant le semis, soit huit à dix mois avant, avec une teneur en eau du sol à la capacité au champ. La réserve en eau est en effet considérée totalement remplie durant cette période.

L'état azoté initial a été paramétré à partir des teneurs en azote minéral mesurées. Le Tableau 12 présente les valeurs moyennes par horizon pour chacun des sites.

Tableau 11. Itinéraires techniques des essais

a- Nord

	1 Nord 2001-2002	2 Nord 2002-2003	3 Nord 2002-2003	4 Nord 2002-2003	5 Nord 2003-2004	6 Nord 2004-2005	7 Nord 2004-2005	8 Nord 2005-2006
date labour	15/09/2001	01/10/2002	15/09/2002	15/09/2002	01/11/2003	17/10/2004	25/10/2004	10/10/2005
date travail superficiel	10/12/2001	15/10/2002	30/09/2002	30/10/2002	05/11/2003	18/10/2004	28/10/2004	16/10/2005
date semis	11/12/2001	10/12/2002	30/10/2002	30/10/2002	06/11/2003	20/10/2004	19/11/2004	17/10/2005
prof semis ligne (cm)	3	3	3	3	3	3	3	3
densité semis (pl/m ²)	400	220	220	220	220	220	220	220
date récolte	14/05/2002	03/05/2003	13/04/2003	30/04/2003	27/04/2004	16/04/2005	05/05/2005	19/04/2006
rendement (t/ha)	0.8	0.25	1.25	2.3	0.7	3.4		2.3

b- Centre

	Centre 2003-2004	Centre 2004-2005	Centre 2005-2006
date labour	25/09/2003	07/10/2004	10/10/2005
date travail superficiel	15/10/2003	12/10/2004	15/10/2005
date semis	28/10/2003	13/10/2004	18/10/2005
prof semis ligne (cm)	3	3	3
densité semis (pl/m ²)	220	220	220
date récolte	15/04/2004	03/05/2005	26/04/2006
rendement (t/ha)	0.7		0.5

c- Sud

	Sud 2003-2004	Sud 2004-2005	Sud 2005-2006
date labour	01/02/2003	01/02/2004	01/02/2005
date semis	12/10/2003	22/09/2004	22/09/2005
prof poquet (cm)	15	15	15
densité semis (pl/m ²)	110	110	110
date récolte	12/04/2004	13/04/2005	
rendement (t/ha)	0.9	0.8	

Tableau 12. Teneurs en azote minéral moyennes des sols

horizon	Azote minéral (kg/ha)		
	Nord	Centre	Sud
0-5	40	20	15
5-30	35	20	15
30-40	30	10	10
40-80	20	10	10

Tableau 13. Mesures biologiques réalisées sur chaque parcelle expérimentale

	date floraison	date maturité physio	LAI	biomasse	rendement	azote	racines
Nord	1- 2001-2002	X	X	X	X		
	2- 2002-2003	X	X	X	X		
	3- 2002-2003	X	X	X	X		
	4- 2002-2003	X	X	X	X		
	5- 2003-2004	X	X	X	X	X	
	6- 2004-2005	X	X	X	X		
	7- 2004-2005	X	X	X			X
	8- 2005-2006	X	X	X	X		
Centre	2003-2004		X	X	X	X	
	2004-2005	X	X	X			
	2005-2006			X	X		
Sud	2003-2004	X	X	X	X	X	
	2004-2005	X	X	X	X		
	2005-2006			X			

4.6. Mesures biologiques comparables à des données de sortie

Les mesures principales concernent le développement, la croissance et le rendement. Elles n'ont pas été complètement identiques sur toutes les parcelles. Le détail en est présenté dans le Tableau 13.

4.6.1. Développement

Les stades phénologiques levée, floraison et maturité physiologique ont été relevés pour contrôler le développement du quinoa. La date qui définit le stade est déterminée lorsque 50% de la population a atteint le stade phénologique observé.

4.6.2. Croissance

Les mesures de croissance (LAI et biomasse) ont été réalisées au minimum à quatre moments du cycle du quinoa selon les sites et les années, à 60, 90 et 120 jours après le semis puis à la récolte. Sur certaines parcelles jusqu'à neuf mesures ont été faites, tous les 15 jours à partir du 45^{ème} jour après le semis. Il s'agit toujours de mesures destructives. Chaque prélèvement était réalisé sur un mètre linéaire, avec trois répétitions par bloc. Le nombre de plants présents sur ce mètre linéaire était comptabilisé, puis les échantillons séparés en feuilles, tiges et épis.

Pour la biomasse, les différentes parties de la plante ont été pesées séparément en frais, puis passées à l'étuve à 105°C pour obtenir leur poids sec.

Pour le LAI, un sous-échantillon de chaque prélèvement est constitué, sur lequel sont en plus réalisées des mesures de surface à partir de photographies numériques traitées par le logiciel SigmaScan. Le rapport de surface massique est ensuite appliqué à l'ensemble de l'échantillon.

4.6.3. Rendement

Le même système d'échantillonnage que pour la croissance a été adopté pour le rendement, à savoir prélèvement d'un mètre linéaire avec plusieurs répétitions. De là sont extraits le rendement en grain, l'indice de récolte et le poids de 1 000 grains. Le nombre de grains est déterminé par le calcul du rapport entre le rendement et le poids de 1 000 grains.

4.6.4. Autres

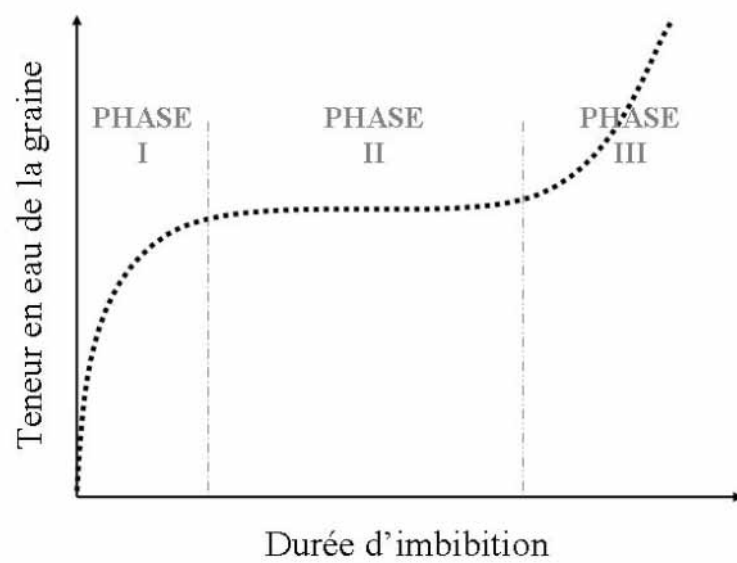
Quelques mesures d'azote plante et d'azote grain ont été réalisées ponctuellement, ainsi que quelques mesures de croissance racinaire. Ces mesures demeurent toutefois trop peu nombreuses pour pouvoir être correctement exploitées.

CHAPITRE III

Chapitre III : Simulation de l'implantation du quinoa

1. ETAT DES LIEUX SUR LA MISE EN PLACE DES CULTURES	87
1.1. GENERALITES	87
1.1.1. <i>La germination</i>	87
1.1.2. <i>La levée</i>	87
1.1.3. <i>Facteurs influençant la germination et la levée</i>	89
1.2. CAS DU QUINOA.....	89
1.3. COMPARAISON AVEC D'AUTRES CULTURES	91
1.4. PASSAGE A LA MODELISATION.....	91
2. DONNEES ET PARAMETRAGE	91
2.1. DONNEES DE GERMINATION ET DE LEVEE OBSERVEES	91
2.2. PARAMETRAGE	93
2.2.1. <i>L'imbibition</i>	93
2.2.2. <i>La germination</i>	93
2.2.3. <i>La levée</i>	93
2.2.4. <i>La battance</i>	93
2.3. DONNEES UTILISEES POUR L'EXPERIMENTATION NUMERIQUE	95
3. INTERET DES NOUVEAUX FORMALISMES PROPOSES.....	95
3.1. POUR APPREHENDER DES CONDITIONS CLIMATIQUES ET DES CULTURES VARIEES	95
3.2. POUR REPRESENTER L'EFFET DU TRAVAIL DU SOL	97
3.3. POUR REPRESENTER LE SEMIS EN POQUET	99
4. EXPERIMENTATION NUMERIQUE SUR LA LEVEE	99
4.1. FENETRE CLIMATIQUE THEORIQUE DISPONIBLE POUR LA LEVEE.....	99
4.2. DISPOSITIF "EXPERIMENTAL"	99
4.3. RESULTATS DU TEST CROISE.....	101
4.3.1. <i>Evolution de l'humidité du sol</i>	101
4.3.2. <i>Rôle du semis en poquet</i>	101
4.3.3. <i>Variabilité des profondeurs et des dates de semis optimales</i>	107
4.3.4. <i>Intérêt d'un semis hétérogène</i>	109
4.3.5. <i>Influence de la date de labour précoce</i>	109
4.3.6. <i>Effet de la battance</i>	111
4.4. TEST DE SIMULATION DE LA DATE DE SEMIS	111

Figure 26. Cinétique d'imbibition des semences



Ce chapitre a pour but l'étude de l'implantation de la culture de quinoa, par le biais d'une expérimentation numérique permettant de tester différents scénarios techniques. Dans un premier temps, nous revenons sur les connaissances actuelles relatives à la mise en place des cultures ; dans un deuxième temps, nous présentons le paramétrage de STICS pour la germination et la levée du quinoa ainsi que l'intérêt des formalismes utilisés ; enfin, dans un troisième temps nous donnons les résultats de l'expérimentation numérique.

1. Etat des lieux sur la mise en place des cultures

La réussite de la germination puis de la levée détermine la mise en place du peuplement végétal et conditionne donc généralement le succès d'une culture. Dans les milieux très limitants (secs et/ou froids), la germination et l'émergence des semences constituent la première phase critique cruciale de cette implantation. Les quelques centimètres de sol qui composent le lit de semences, directement placés à l'interface sol-atmosphère, sont en effet particulièrement affectés par les conditions climatiques. Les variations hydriques et thermiques importantes se produisant dans ces horizons superficiels peuvent ainsi être à l'origine de retards de cinétiques d'imbibition et de germination ainsi que de diminutions de taux de germination et de levée (Bruckler et Bouaziz, 1991). C'est particulièrement vrai pour de petites graines à très faibles réserves amylacées comme le quinoa (Mujica *et al.*, 2001)

1.1. Généralités

1.1.1. La germination

Les graines qui se déshydratent à maturité (teneur en eau inférieure à 15% environ) sont métaboliquement inactives, et la germination correspond au passage d'un état de vie ralentie à un état de vie active. Elle peut être définie comme un processus qui commence par l'imbibition en eau de la graine et se termine par la percée de la radicule à travers le tégument de la graine. Trois phases successives peuvent être distinguées : (i) tout d'abord une hydratation rapide qui initie la reprise du métabolisme, (ii) puis une phase d'activation qui constitue la germination au sens strict, (iii) et enfin une phase de croissance et d'élongation cellulaire permettant la sortie de la radicule (Bradford, 1995 ; Nykiforuk, 1999).

La Figure 26 présente la cinétique d'imbibition des semences. Le potentiel hydrique d'une semence à l'état sec est généralement très faible (entre -350 et -50 MPa ; Robert et Ellis, 1989), alors que pour que la germination puisse se produire, le potentiel de l'eau dans le sol doit être compris entre 0 et -2 MPa environ (Bradford, 1995). L'entrée d'eau se fait donc selon un gradient très fort. La vitesse initiale d'imbibition dépend principalement de la perméabilité du tégument de la graine et de la conductivité hydraulique du sol. Au fur et à mesure de l'imbibition (i), le potentiel de la graine augmente et le gradient d'entrée d'eau diminue. La teneur en eau de la graine devient ainsi quasi-stationnaire, avec une augmentation très lente, ce "palier" correspondant à la phase d'activation (ii). La durée de cette phase dépend des conditions externes, soit essentiellement l'humidité du sol ainsi que sa température. L'imbibition n'est complète que lorsque la teneur en eau de la graine dépasse une valeur critique, à partir de laquelle le métabolisme est activé. La graine peut alors entrer en phase de croissance (iii), et la sortie de la radicule est liée à une nouvelle entrée d'eau importante.

1.1.2. La levée

Après la germination, l'eau et les réserves sont utilisées pour assurer la croissance souterraine de la plantule jusqu'à la levée, à partir de laquelle elle acquiert son autotrophisme photosynthétique. Il s'agit d'une germination hypogée lorsque le cotylédon reste dans le sol, et épigée lorsqu'il en sort.

1.1.3. Facteurs influençant la germination et la levée

Les graines sont sensibles aux conditions physiques dans le lit de semences. La température et l'humidité sont généralement les facteurs les plus importants, en particulier si le climat est très variable pendant la période de semis avec des conditions défavorables fréquentes, telles que le froid, ou la sécheresse empêchant l'imbibition des graines. Ils vont jouer à la fois sur la germination et sur l'élongation de l'hypocotyle, les ralentissant ou les arrêtant complètement.

Les contraintes peuvent également être mécaniques telles que la présence de mottes, ou la formation d'une croûte de battance qui peut constituer un obstacle à la levée (Boiffin, 1984 ; Guérif *et al.*, 2001). La sensibilité des sols à la battance est fonction de leurs caractéristiques physico-chimiques, et en particulier de leur teneur en argile, en matière organique, en oxydes de fer et en cations dispersants. L'apparition de cette croûte est donc plus ou moins rapide selon le type de sol et les caractéristiques texturales de la couche superficielle. Son développement dépend aussi de l'état de fragmentation de la surface du sol, lui-même lié à la préparation du lit de semences. En effet, les pluies post-semis provoquent une désagrégation des fragments du sol et l'apparition d'une fine couche continue de sol, d'épaisseur inférieure à 1 cm. Le dessèchement peut ensuite rendre cette croûte quasi infranchissable. Différents mécanismes sont possibles pour y parvenir : pénétration, courbure et rupture, soulèvement d'une motte détachée, ou passage dans les fissures (Arndt, 1965a,b ; Guérif *et al.*, 2001). La réponse de la graine dépend principalement de la teneur en eau de la croûte, de la disposition des fissures et de la taille et de la forme de la graine. Pour de nombreuses espèces, une croûte qui reste humide n'est pas un obstacle difficile à franchir. En revanche une croûte qui se dessèche peut empêcher toute levée des plantules. Le caractère franchissable ou non d'une croûte dépend donc du climat à travers l'intensité de l'évaporation de l'eau du sol après une période pluvieuse. De plus, la force d'émergence de la plantule dépend de l'espèce et de la variété, de la taille de l'hypocotyle, du poids et de l'âge de la graine. Les espèces monocotylédones ont généralement une forme effilée qui les rend plus à même de franchir la croûte que les dicotylédones. Les graines les plus faibles émergent généralement par les fissures (Arndt, 1965a).

Pour faire face à ces risques climatiques, il faut déterminer la meilleure combinaison de techniques entre dates de semis, profondeur de semis, qualité et placement de la graine.

1.2. Cas du quinoa

Le quinoa est très sensible aux conditions défavorables pendant la germination, en raison en partie de la petite taille de ses graines, ce qui conduit à une différence importante entre les taux de germination observés en laboratoire et ceux obtenus au champ (Jacobsen *et al.*, 1994 ; Sigstad et Prado, 1999). Des problèmes de germination ont ainsi été observés autant en conditions andines qu'en conditions européennes. Le problème vient également fréquemment de la qualité des graines, beaucoup présentant une capacité germinative très faible ; Canahua (1994) estime par exemple qu'il serait possible de doubler les rendements avec des graines de meilleure qualité. L'établissement d'une culture de quinoa à une densité définie est donc difficile à réaliser, sachant que la densité de levée n'excède parfois pas 40% (Kaul *et al.*, 2002).

Les études pour améliorer la germination et l'émergence du quinoa en champ sont pourtant encore très peu nombreuses.

En conditions andines, la contrainte essentielle à la germination est la sécheresse (Bonifacio, 1988). Au contraire d'autres Chénopodiacées telle que la graine d'Amaranthe (Aufhammer, 1998), la lumière n'a pas d'influence sur le taux de germination du quinoa (Jacobsen *et al.*, 1997). En revanche, l'époque de récolte de la semence, la teneur en eau du grain à la récolte et surtout la température ont un effet sur le nombre de graines qui germent. Ainsi, à 20°C le taux de germination moyen est de 99%

Figure 27. Cinétique de germination en laboratoire des graines de quinoa utilisées dans les essais

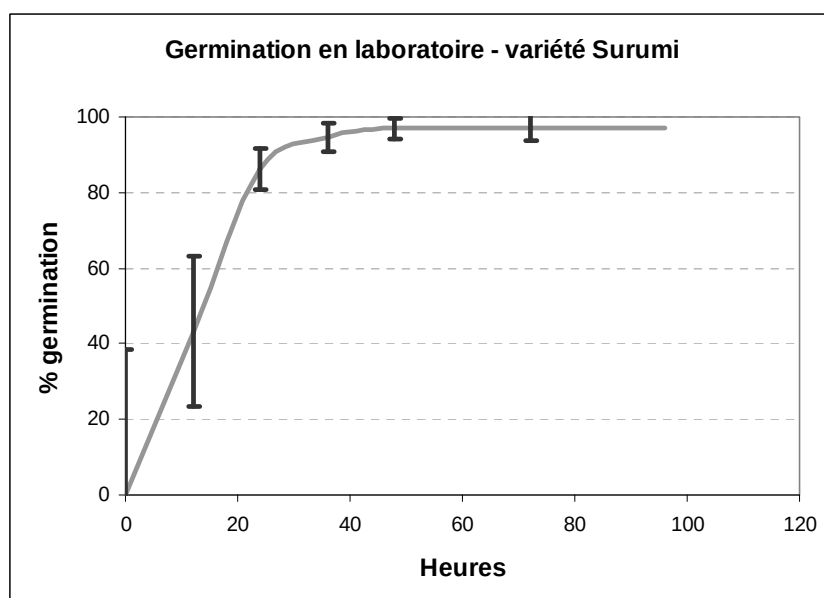
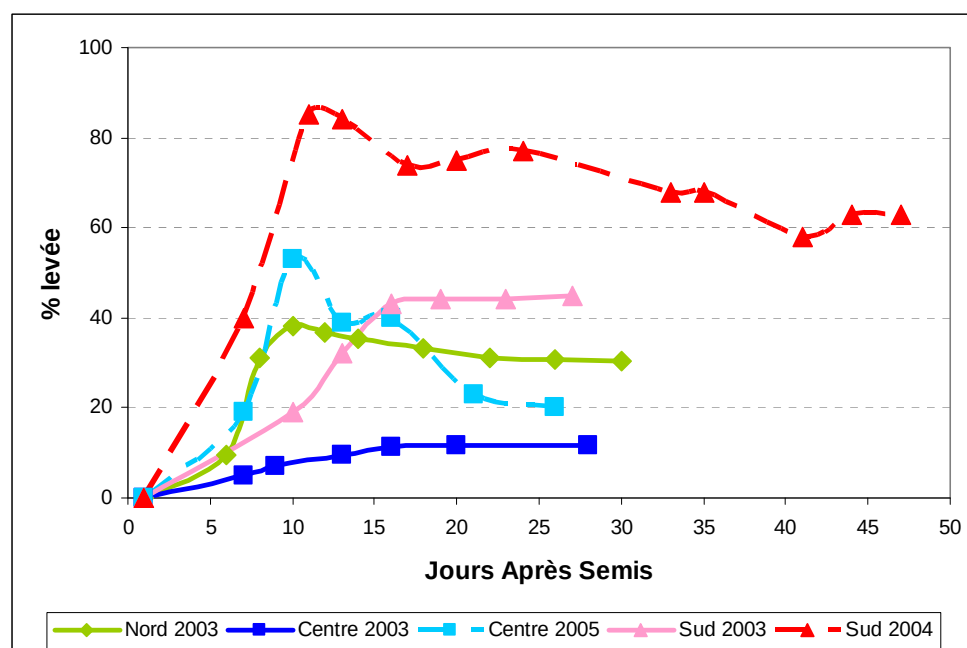


Figure 28. Cinétiques de levée dans les parcelles



(Jacobsen *et al.*, 1999) ; il est réduit à 85% à 10°C et à 25% en dessous de 6°C, les graines récoltées tardivement montrant à cette température un meilleur taux de germination. Les durées de germination sont également rallongées avec la diminution de la température. Jacobsen *et al.* (1999) recommandent ainsi de semer le quinoa quand le sol a une température de 8-10°C au minimum. Les travaux de Rosa (2004) montrent de plus qu'à faible température, l'imbibition de la graine est ralentie et la croissance de la racine est à la fois réduite et ralentie. Les études microcalorimétriques de Sigstad et Prado (1999) ont déterminé une température optimale de germination du quinoa de 25°C. Des différences de taux de germination entre cultivars à cette température ont été mises en évidence, qui sont dues à une absorption plus rapide de l'eau au début de la phase d'imbibition. Le zéro de germination a été déterminé entre des températures de -0.7°C (Bois *et al.*, 2006) et +3°C (Jacobsen, 1998).

1.3. Comparaison avec d'autres cultures

La levée et la mise en place du couvert constituent toujours une période importante quant au succès d'une culture annuelle. Elles déterminent en effet la structure du peuplement, qui doit par exemple permettre une interception optimale du rayonnement, minimiser la compétition interplantes ou encore avantager temporellement et spatialement la culture par rapport aux mauvaises herbes, et le niveau de biomasse produit dépend de cette étape (Gosse *et al.*, 1986 ; Jaggard, 1994 ; Tamet *et al.*, 1996 ; Soltani *et al.*, 2006).

Dans le cas de l'Altiplano, les conditions sont particulièrement difficiles, rendues limitantes en termes à la fois de sécheresse et de température par le climat aride et froid de la région, mais les problématiques liées à la levée se retrouvent également en milieu tempéré. C'est le cas notamment d'espèces très sensibles aux conditions physiques du lit de semences (Boiffin *et al.*, 1992 ; Tamet *et al.*, 1996 ; Couture *et al.*, 2004), ou encore d'espèces semées en conditions non favorables telles que les cultures intermédiaires pièges à nitrates (Dorsainvil, 2002).

L'analyse des effets des conditions de semis a donné lieu à de nombreuses approches par modélisation (Tamet *et al.*, 1996 ; de Louvigny *et al.*, 2002 ; Carrera et Dürr, 2003 ; Dorsainvil *et al.*, 2005), en particulier par le modèle SIMPLE développé par Dürr *et al.* (2001). Ces travaux ont ainsi permis de montrer sur la betterave à sucre un impact important de la date de semis sur les conditions de levée, avec des durées de levée pouvant aller de 15 à 60 jours, pour des densités résultantes comprises entre 30 et 90% environ (Carrera et Dürr, 2003). Dans le cas du lin, où un cycle de culture très rapide ainsi qu'une graine de petite taille font de la levée une période particulièrement critique, des résultats expérimentaux au champ ont montré un fort effet de la profondeur de semis, avec des densités de levée comprises entre 25 et 90% et des rendements variant du simple au triple (Couture *et al.*, 2004) ; une modélisation de la levée du lin cultivé est en cours (Launay *et al.*, 2008a).

1.4. Passage à la modélisation

Les formalismes utilisés dans STICS ont été décrits dans le Chapitre II ; ils prennent en compte les mécanismes que nous venons de décrire.

2. Données et paramétrage

2.1. Données de germination et de levée observées

Des tests de germination des graines utilisées dans nos essais ont été réalisés en laboratoire à une température moyenne de 15°C avec des comptages toutes les 12 heures environ. Les résultats présentés sur la Figure 27 intègrent les différentes années de tests ainsi que les répétitions dans chaque cas. Le maximum de germination (97%) est considéré atteint et stationnaire après 48h.

Figure 29. Courbes d'élongation selon la profondeur du poquet

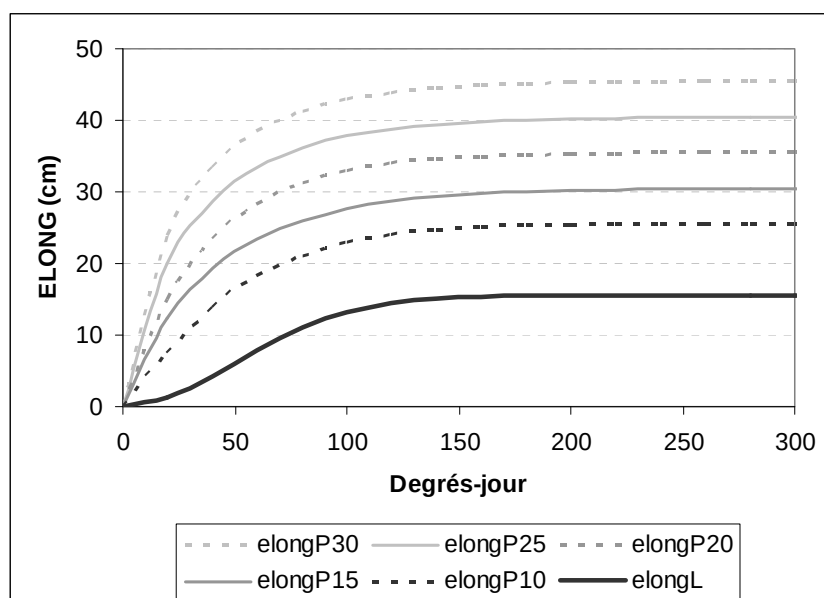


Tableau 14. Valeurs des paramètres de croissance racinaire selon la profondeur du poquet

	<i>BELONG</i> (°C.j-1)	<i>CELONG</i>	<i>ELMAX</i> (cm)
ligne poquet	0.014	1.9636	15.5
10 cm	0.02015	1.185	25.5
15 cm	0.025	0.941	30.5
20 cm	0.0269	0.985	35.5
25 cm	0.032	0.86	40.5
30 cm	0.035	0.842	45.5

Quelques mesures de levée en champ ont été effectuées sur les parcelles Nord en 2003, Centre en 2003 et 2005, Sud en 2003 et 2004 (Figure 28). Les diminutions observées du nombre de plantes / m² sont dues au recouvrement des plantules par la terre en raison du vent, ou à des plantules mangées par des animaux. Les densités moyennes de levée s'étalent après stabilisation entre 10 et 60% de la quantité semée, avec des pourcentages plus élevés dans le Sud.

2.2. Paramétrage

Les valeurs des différents paramètres pilotant la germination et la levée ont été déterminées par la bibliographique, les dires d'experts sur le terrain ou nos mesures. L'ensemble du paramétrage et son origine sont donnés dans les tableaux de l'Annexe IV.

2.2.1. L'imbibition

Le début d'imbibition de la graine (*HUMECGRAINE*) a été fixé à un potentiel de l'eau dans le sol de -2.4 MPa, soit inférieur au point de flétrissement, d'après les travaux de Bradford (1995) et en raison de la petite taille de la graine de quinoa qui facilite l'entrée passive de l'eau. La durée d'imbibition avant l'apparition de manques à la germination (*NBJGERLIM*) est de dix jours à 0°C et de deux jours à 23°C, soit 20% de la durée maximale (*PROPJGERMIN*), toujours tirée des travaux de Bradford (1995 ; 2002).

2.2.2. La germination

La température de base de germination (*TGMIN*) a été choisie égale à 0°C d'après les résultats de Bois *et al.* (2006). Nous avons obtenu expérimentalement un cumul de degrés-jour nécessaires à la germination (*STPLTGER*) de 30°C.j⁻¹, ce qui correspond aux valeurs données dans la bibliographie (Jacobsen, 1998). La sensibilité de la graine à la sécheresse (*SENSRSEC*) a été déterminée par analyse de sensibilité sur les levées observées et s'est révélée maximale (Rodriguez, 2006), soit à une valeur de 0.

2.2.3. La levée

Pour la levée, dans le cas d'un semis en ligne "classique", les paramètres d'élongation *BELONG*, *CELONG* et *ELMAX* ont été pris identiques à ceux de la moutarde, par analogie avec la petite taille de la graine, soit respectivement 0,014 °C.j⁻¹, 1,9636 et 15,5 cm. Dans le cas du poquet, ils ont été modifiés de manière à ce que la profondeur du poquet ne joue pas sur la cinétique d'élongation et que celle-ci reste identique à celle d'un semis en ligne, comme décrit dans le § 3.5 du Chapitre II. Les courbes pour des poquets à 10, 15, 20, 25 et 30 cm de profondeur, ainsi que les valeurs respectives des paramètres, sont données dans la Figure 29 et le Tableau 14. Les durées d'élongation possibles avant le début des manques à la levée (*NLEVLIM1*) et jusqu'à une levée de densité nulle (*NLEVLIM2*) sont respectivement de 10 et 60 jours, d'après les dires d'experts sur le terrain.

2.2.4. La battance

La quantité de pluie à partir de laquelle une croûte de battance peut se former après le semis (*PLUIEBAT*) a été fixée à 10 mm, d'après les valeurs indiquées par Dürr *et al.* (2001). Nous avons estimé que cette croûte pouvait être considérée comme sèche, donc faire obstacle, lorsqu'elle dépassait les 2 cm (*MULCHBAT*).

Par expertise et d'après les observations sur le terrain, les manques à la levée maximaux dus à la présence d'une croûte de battance ont été évalués à environ deux-tiers de la parcelle. La valeur de 0,35 a ainsi été choisie pour *VIGUEURBAT*. Dans le cas du semis en poquet, la plante est supposée ne pas être affectée par la battance (*VIGUEURBAT*=1).

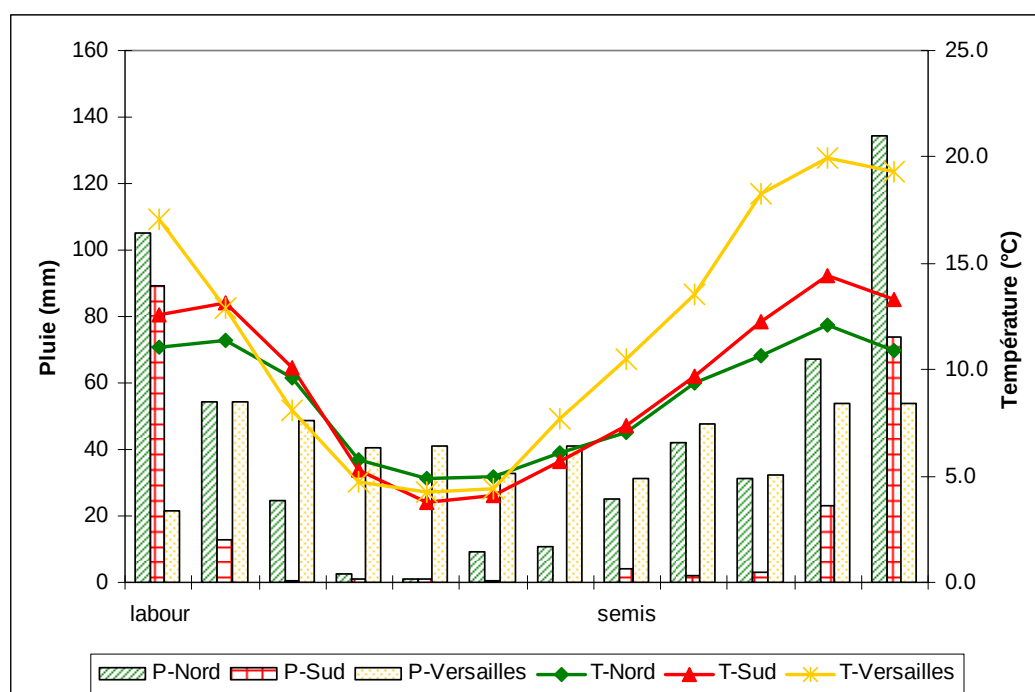
Tableau 15. Itinéraires techniques utilisés pour comparer les conditions de culture sur l'Altiplano et à Versailles

	Altiplano Nord	Altiplano Sud	Versailles	Versailles
	quinoa	quinoa	quinoa	maïs
date labour	1-févr.	1-févr.	1-sept.	1-sept.
profondeur labour (cm)	30	30	30	30
date travail superficiel	31-août	31-août	31-mars	31-mars
profondeur travail superficiel (cm)	5	5	5	5
date semis	1-sept.	1-sept.	1-avr.	1-avr.
profondeur de semis (cm)	3	3	3	3
densité semis (pl/m²)	220	220	220	10

Tableau 16. Températures et précipitations moyennes sur la période 2003-2006 pour l’Altiplano Nord, l’Altiplano Sud et Versailles (écart-types mensuels entre parenthèses)

	2003-2006			
	Tmin °C	Tmax °C	Tmoy °C	P mm
Altiplano Nord	0.1 (3.9)	17.2 (1.8)	8.7 (2.7)	508 (42)
Altiplano Sud	0.3 (4.2)	18.3 (4.5)	9.3 (3.9)	211 (31)
Versailles	7.3 (4.7)	16.1 (7.2)	11.7 (6.0)	498 (11)

Figure 30. Comparaison des précipitations et températures moyennes par rapport à la saison agricole



2.3. Données utilisées pour l'expérimentation numérique

Pour réaliser les expérimentations numériques, nous avons utilisé les données pédoclimatiques des trois sites (Altiplano Nord, Centre et Sud) des cycles 2003-2004, 2004-2005 et 2005-2006, soit un travail sur neuf parcelles. Concernant les itinéraires techniques, ils sont adaptés des conditions réelles moyennes de chaque région. Les actes techniques testés sont dates, profondeur et type de semis (ligne ou poquet), ainsi que date de labour. Les dates de semis sont comprises entre le 15 août et le 15 novembre ; pour le semis en ligne, la densité est de 220 graines par m² semées entre 1 et 5 cm de profondeur ; pour le semis en poquet, 110 graines sont semées par m² dans un poquet entre 10 et 30 cm de profondeur, et recouvertes de 2 cm de terre. Le labour est effectué précocement en saison humide ou tardivement en saison sèche sur 30 cm ; il est complété d'un travail superficiel du sol sur 5 cm la veille du semis dans le Nord et dans le Centre. Aucune irrigation ni fertilisation n'est apportée. L'ensemble des situations testées sera présenté en détail dans le § 4 de ce chapitre.

3. Intérêt des nouveaux formalismes proposés

3.1. Pour appréhender des conditions climatiques et des cultures variées

En conditions européennes, ou en climat tempéré de manière générale, le milieu est généralement moins limitant et la levée moins incertaine que dans les conditions altiplaniques. La prise en compte de manques à la levée uniquement pouvait donc jusqu'ici être considérée comme suffisante dans STICS. L'ajout des manques à la germination permet d'appréhender des conditions plus drastiques de sécheresse et/ou de froid. La décomposition en deux étapes imbibition/germination constitue également un outil pour mieux comprendre le déroulement du processus, selon les lieux et les cultures.

Pour illustrer ces différences, nous avons comparé d'une part les climats de l'Altiplano Nord, de l'Altiplano Sud et de Versailles entre 2003 et 2006, et d'autre part, sur ce dernier site, une culture de quinoa et une autre culture de printemps, le maïs. Le processus de levée est simulé en considérant un semis au 1^{er} septembre sur l'Altiplano, au 1^{er} avril à Versailles. L'itinéraire technique complet adopté sur chaque site est présenté dans le Tableau 15. Le sol utilisé est le même partout (sol "5 Nord 2003-2004", décrit à la Figure 25 et en Annexe II), afin de ne pas introduire d'effet supplémentaire.

En termes de moyenne annuelle, le climat de Versailles sur les années considérées n'est pas très différent de celui de l'Altiplano Nord, avec une pluviométrie similaire et une température moyenne légèrement supérieure (Tableau 16). En revanche les précipitations moyennes mensuelles présentent des différences beaucoup plus marquées, avec des écart-types 3 à 4 fois supérieurs dans l'Altiplano qu'à Versailles ; le phénomène est inverse pour les températures, en raison de la très faible variation de la température maximale sur l'Altiplano. En particulier, pour comprendre les conditions d'implantation, sur la période de six mois précédant le semis, les pluies à Versailles sont 3 fois plus importantes que sur l'Altiplano Nord, et 20 fois que sur l'Altiplano Sud (Figure 30).

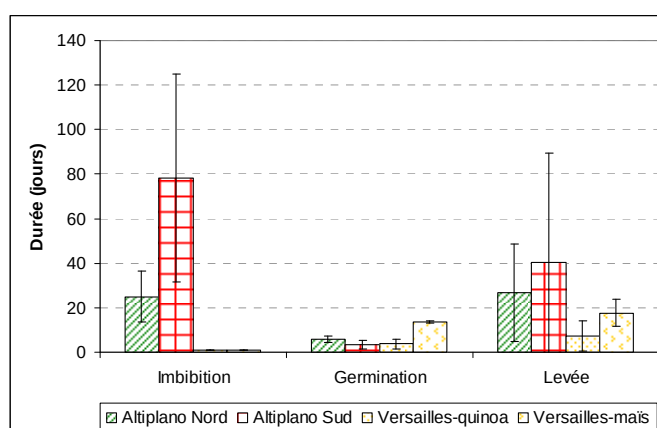
Le paramétrage de germination et de levée du maïs est donné dans le Tableau 17, en comparaison avec celui du quinoa. Les valeurs des paramètres déjà existants sont issues de Brisson *et al.* (1998) ; les paramètres correspondants au nouveau formalisme ont été déterminés grâce aux travaux de Bruckler et Bouaziz (1991) sur la germination des semences en conditions sèches. Les valeurs obtenues traduisent bien la différence de taille entre la graine de quinoa et la graine de maïs : une graine plus grosse, donc une imbibition passive qui débute à un potentiel plus élevé, mais également des réserves plus importantes qui permettent une autonomie plus longue et une mortalité moins forte à la germination.

Tableau 17. Valeurs des paramètres de germination et de levée pour le quinoa et le maïs

		Maïs	Quinoa
HUMECGRAINE	(Mpa)	-1.6	-2.4
NBJGERLIM	(jours)	15	10
PROPJGERMIN		0.2	0.2
TGMIN	(°C)	8	0
STPLTGER	(°C.j-1)	35	30
SENSRSEC		1	0
ELMAX	(cm)	8	15.5
BELONG	(°C.j-1)	0.022	0.014
CELONG		2.04	1.9636
NLEVLIM1	(jours)	10	10
NLEVLIM2	(jours)	50	60

Figure 31. Comparaison des différentes phases d'émergence de la culture pour l'Altiplano Nord, l'Altiplano Sud et Versailles

a- Durées des phases d'imbibition, de germination et de levée



b- Pourcentages de germination et de levée

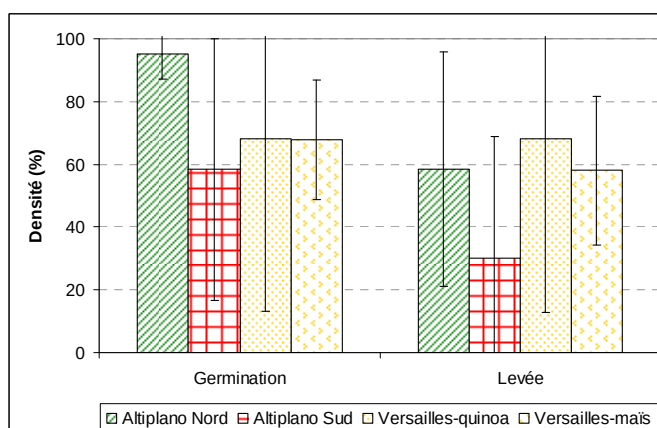


Tableau 18. Caractéristiques des phases d'imbibition, de germination et de levée (écart-types entre parenthèses)

	Date semis	Humidité du lit de semences (%)			Tmoy (°C)	NBJGRAUTO (jours)	Degrés-jour cumulés	Date levée
		Imbibition	Germination	Levée				
Altiplano Nord	01-sept	3 (1.7)	17 (2.3)	9 (9.2)	11 (2.5)	6 (1.0)	29 (2.3)	28-oct (16)
Altiplano Sud	01-sept	1 (0.1)	14 (4.8)	8 (9.7)	14 (1.9)	4 (1.5)	18 (12.5)	31-déc (6)
Versailles-quinoa	01-avr	21 (6.7)	17 (8.5)	14 (3.8)	11 (0.5)	6 (0)	21 (16.2)	13-avr (9)
Versailles-maïs	01-avr	21 (6.7)	16 (5.9)	12 (3.1)	10 (0.3)	14 (0.6)	24 (7.0)	03-mai (7)

La Figure 31 donne les durées des phases d'imbibition, de germination et de levée (a), ainsi que les densités résultantes de germination et de levée (b). Le Tableau 18 répertorie pour chacune de ces phases les teneurs moyennes en eau du sol (exprimées en humidité volumique), la température moyenne, le nombre maximal de jours possibles entre imbibition et germination avant le début des manques à la germination à la température moyenne considérée (*NBJGRAUTO*), les degrés-jour effectivement cumulés pour atteindre la germination et la date de levée obtenue.

Le phénomène limitant sur l'Altiplano est clairement l'humidité du sol entre le semis et l'imbibition de la graine, avec des teneurs en eau du sol 10 à 20 fois plus faibles qu'à Versailles sur cette période. L'imbibition de la graine ne peut ainsi se produire qu'après plus de trois semaines dans l'Altiplano Nord et près de trois mois dans l'Altiplano Sud, alors qu'elle est instantanée à Versailles.

Concernant la germination, la situation est différente dans les quatre cas. Sur l'Altiplano Nord, les pluies ayant permis l'imbibition, combinées à une température permettant le cumul des degrés-jour requis, sont suffisantes pour assurer la germination, pratiquement sans manques. Sur l'Altiplano Sud, la température, un peu plus élevée, diminue le nombre de jours autorisés entre imbibition et germination, et l'humidité plus faible ne permet pas le cumul des degrés-jour requis, d'où une densité de germination réduite. Sur Versailles, pour le quinoa, les manques obtenus ne surviennent en fait qu'une des trois années, où l'humidité avait été suffisante pour l'imbibition mais pas pour garantir une germination rapide, au contraire des deux autres années où humidité et température avaient permis une germination totale. Pour le maïs, les manques observés à la germination sont essentiellement liés à la température, raison pour laquelle le maïs ne peut généralement pas être semé trop précocement en sortie d'hiver. En effet, sa température de base plus élevée fait de la température le facteur limitant, et le cumul de degrés-jour requis n'est ici jamais atteint complètement, malgré une humidité généralement suffisante.

Enfin, sur l'Altiplano, l'humidité du sol à nouveau basse, en raison de pluies trop faibles et irrégulières après la germination, ne permet pas une élongation rapide de l'hypocotyle. Des manques à la levée sont observés en raison de cette durée trop longue. A Versailles, les pluies globalement moins importantes pendant le mois d'avril entraînent une diminution progressive de l'humidité du sol. Le quinoa a germé suffisamment rapidement pour ne pas être affecté par cette baisse et sa levée est rapide, sans perte par rapport à la densité de germination. En revanche, pour le maïs qui a germé dix jours plus tard, l'humidité est désormais un peu trop faible, ce qui rallonge la durée de levée et est à l'origine de manques à la levée.

Ce formalisme permet ainsi de déterminer le facteur limitant selon le site et la culture, à savoir l'humidité sur l'Altiplano, la température sur Versailles dans le cas d'une culture de printemps telle que le maïs, le quinoa étant lui plus adapté au froid. Il permet également de comprendre comment une durée aussi longue entre semis et levée (jusqu'à quatre mois dans l'Altiplano Sud) ne se traduit pas par une mortalité complète des semences et une densité de levée nulle ; la période limitante se situe en effet entre le semis et l'imbibition, donc sans conséquence sur la viabilité de la graine.

3.2. Pour représenter l'effet du travail du sol

Le bilan hydrique du sol est largement affecté par les paramètres liés à la structure. La circulation de l'eau est améliorée par le fractionnement dû aux opérations de travail du sol en raison de l'augmentation de l'infiltrabilité (*INFIL*). L'évaporation du sol (Q_0) est par ailleurs augmentée par le labour, même si elle intéresse une couche moins épaisse (*ZESX*). La résultante de ces effets peut ainsi expliquer l'intérêt du labour précoce pendant la saison des pluies dans l'Altiplano Sud, pour favoriser l'humidité de l'horizon en profondeur dans lequel seront semées les graines en poquet (horizon 5-30 cm).

Tableau 19. Effet du labour sur l'état hydrique du sol au moment du semis (Altiplano Sud)

	Cumul d'évaporation (mm)			Humidité de l'horizon 5-30 cm (% pondéral)		
	2003	2004	2005	2003	2004	2005
Labour	115	125	153	6	5	10
Non labour	118	111	110	4	1	10

Figure 32. Effet du poquet sur l'évaporation du sol

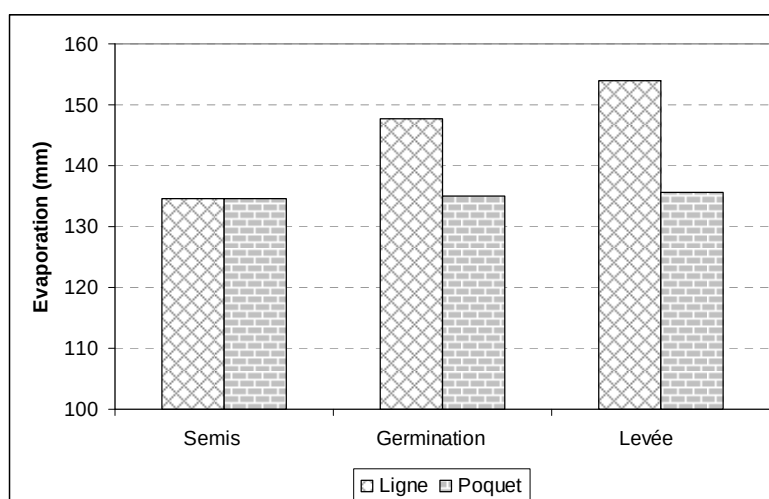
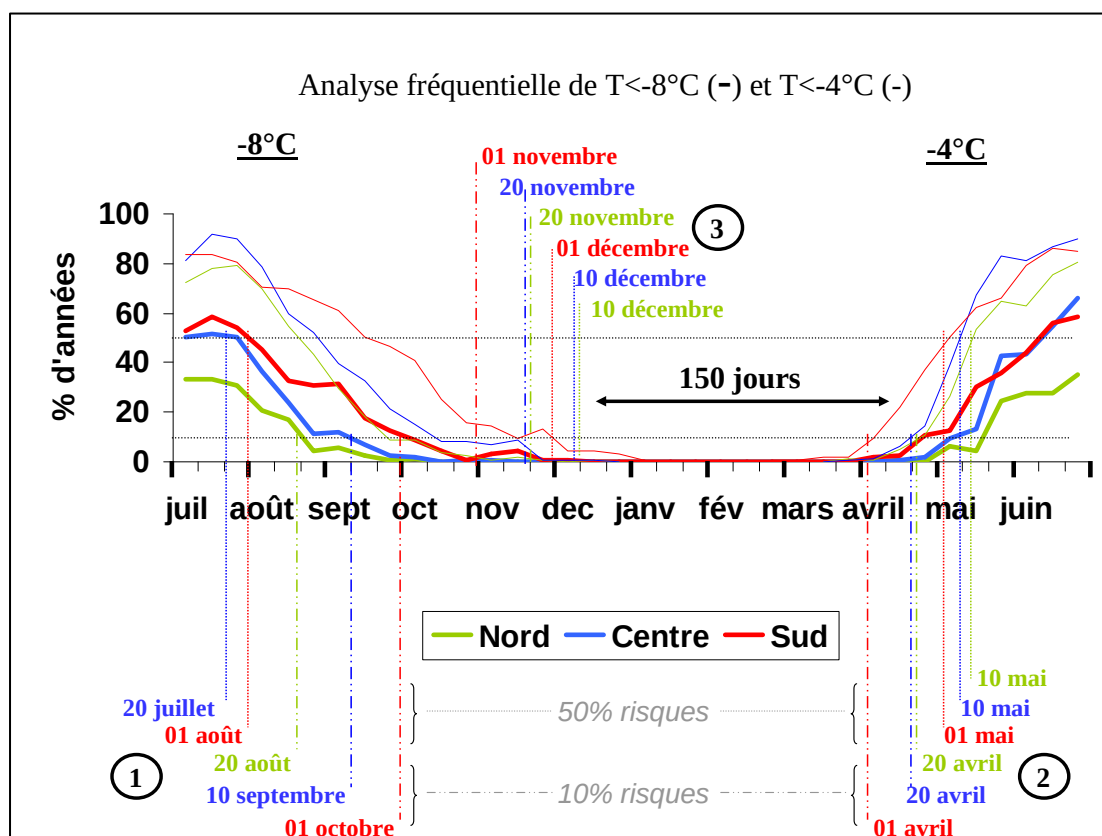


Figure 33. Fenêtre climatique disponible pour la période semis-levée



Un exemple de simulation a été réalisé sur trois années dans le Sud, avec un semis au 1^{er} septembre précédé ou non d'un labour au 1^{er} février. Les cumuls d'évaporation sur la période ainsi que l'humidité à la date du semis de l'horizon accueillant le lit de semences sont donnés dans le Tableau 19. L'état hydrique du sol au moment du semis est ainsi plus favorable avec labour que sans labour.

3.3. Pour représenter le semis en poquet

Le semis en poquet pratiqué dans l'Altiplano Sud permet de concentrer l'humidité au niveau du lit de semences. Sa forme et son mode de réalisation évitent également qu'une croûte de battance puisse se former au-dessus des graines.

Le formalisme que nous avons adopté pour le représenter s'en rapproche en diminuant l'évaporation du sol. La Figure 32 compare l'évolution de cette évaporation (évaporation cumulée depuis le labour au 1^{er} février) au semis, à la germination et à la levée, simulée pour un semis au 1^{er} septembre en poquet ou un semis en ligne dans l'Altiplano Sud. L'évaporation augmente à partir du semis dans le cas d'un semis en ligne, mais reste constante pour le semis en poquet.

Notre formalisme permet de plus d'empêcher la formation d'une croûte sèche à la surface du sol, donc de s'affranchir de l'effet de la battance.

4. Expérimentation numérique sur la levée

4.1. Fenêtre climatique théorique disponible pour la levée

A partir des courbes d'occurrences de températures négatives, il est possible de déterminer une période théorique de semis et de levée plus ou moins sûre, en fonction du degré de risque autorisé. La date de début de période doit permettre d'éviter les gelées tardives qui pourraient avoir un impact sur la plantule ; la date de fin de période est dictée par la condition impérative d'avoir atteint la maturité physiologique avant les gelées précoces d'hiver. Nous avons choisi des températures de respectivement -8°C pour le début de cycle, -4°C pour la fin de cycle, et considéré une durée moyenne de 150 jours entre la levée et la récolte, la levée devant donc se produire au plus tard 150 jours avant l'apparition des gelées à -4°C. Les dates d'apparition des températures choisies sont déterminées pour un risque d'une année sur deux (50%) et d'une année sur dix (10%).

La Figure 33 permet de calculer la durée de ces périodes semis-levée selon le site et le degré de risque voulu. En (1) figurent les dernières occurrences de températures inférieures à -8°C, qui constituent les dates de début de la période. En (2) apparaissent les premières occurrences de températures inférieures à -4°C, qui permettent de déterminer, 150 jours auparavant, les dates de fin de période en (3). Les plages résultantes les plus élevées se trouvent dans le Nord (trois mois au risque 10%, pas de borne inférieure au risque 50%). Elles sont comprises entre environ deux et cinq mois dans le Centre, un et quatre mois dans le Sud ; si la date de début de période est déterminée par les températures inférieures à -6°C et non plus -8°C, pour davantage de sécurité, alors la période semis-levée est réduite à dix jours dans le Sud (données non représentées). Il sera considéré par la suite que la date de levée ne peut pas être postérieure au 10 décembre dans le Nord et le Centre, au 1^{er} décembre dans le Sud.

4.2. Dispositif "expérimental"

Le but de cette expérimentation numérique est de pouvoir répondre aux interrogations soulevées par l'implantation, et de mieux comprendre les pratiques des agriculteurs. Nous avons ainsi testé un grand nombre de situations :

- trois sites, Altiplano Nord, Centre et Sud ;
- trois cycles culturels, 2003-2004, 2004-2005, 2005-2006 ;

Tableau 20. Dispositif de l'expérimentation numérique

SITE		Nord	Centre	Sud				
CYCLE		2003-2004	2004-2005	2005-2006				
SOL <i>(d’après les sols définis à la Figure 25)</i>	Nord	Sol n°5	Sol n°6	Sol n°8				
	Centre	Sol n°9	Sol n°10	Sol n°11				
	Sud	Sol n°12	Sol n°13	Sol n°14				
LABOUR		1 ^{er} février (saison humide)	15 mai (saison sèche)	Non-labour				
DATE DE SEMIS		15 août	1 ^{er} sept.	15 sept.	1 ^{er} oct.	15 oct.	1 ^{er} nov.	15 nov.
TYPE DE SEMIS		Ligne	Poquet					
PROFONDEUR DE SEMIS	Ligne	1 cm	2 cm	3 cm	4 cm	5 cm		
	Poquet	10 cm	15 cm	20 cm	25 cm	30 cm		
BATTANCE		OUI (=BATTANCE)	NON (= Ø)					

- trois sols, afin de s'affranchir d'un éventuel effet du sol, au sein d'un même site, les variations "temporelles" des sols d'une année sur l'autre ont été transformées en des variations "spatiales" et chacun des trois types de sol a été testé sur les trois cycles culturaux ;
- trois types de travail du sol, au vu des pratiques de chaque région et des itinéraires techniques suivis sur nos parcelles expérimentales, nous avons choisi de comparer un labour en saison des pluies (1^{er} février), un labour en saison sèche (15 mai), ou un semis direct sans labour ;
- sept dates de semis, tous les quinze jours entre le 15 août et le 15 novembre ;
- deux types de semis, en ligne (densité 220 graines par m²) ou en poquet (110 graines par m²) ;
- cinq profondeurs de semis, tous les cm de 1 à 5 cm en surface pour les semis en ligne, tous les 5 cm de 10 à 30 cm de profondeur pour les semis en poquet ;
- deux réactions face à la battance, capacité de franchir la croûte sans manques à la levée (VIGUEURBAT = 1) ou non (VIGUEURBAT = 0,35).

Cela nous amène à la simulation de plus de 11 000 cas. Le Tableau 20 résume l'ensemble des situations testées.

Les variables de sortie analysées sont les dates de germination et de levée, les durées de chaque phase et les densités résultantes respectives. L'humidité du sol sur les différents horizons, l'épaisseur de la croûte sèche en surface, ainsi que l'évaporation dans le sol, sont utilisées comme variables explicatives et leur évolution est suivie du labour à la levée.

4.3. Résultats du test croisé

Les résultats obtenus permettent de mettre en évidence le rôle positif du semis en poquet dans le sud sur la réussite de l'implantation, la variabilité des profondeurs et des dates de semis optimales selon les sites et les années, l'intérêt d'un semis hétérogène, l'influence de la date de labour sur l'état hydrique du sol au semis et l'effet de la battance sur les densités de levée.

4.3.1. Evolution de l'humidité du sol

Nous avons en premier lieu extrait des simulations l'évolution de l'humidité des 30 premiers centimètres de sol, pour chaque site et chaque année (Figure 34). Il s'agit d'une reconstitution qualitative, dans le sens où elle ne donne aucune indication de la teneur exacte en eau du sol, mais simplement de la progression des fronts humides et secs selon des valeurs seuils de gradient de teneur en eau choisies arbitrairement.

Cette figure illustre la variabilité, aussi bien entre les sites qu'entre les années, de l'état hydrique du sol, et plus particulièrement du lit de semences pendant la période potentielle de semis, du mois d'août au mois de novembre. Cette variabilité explique en grande partie la variabilité des dates et profondeurs de semis, et l'intérêt d'un semis profond en poquet dans le Sud.

4.3.2. Rôle du semis en poquet

La Figure 35 compare, pour chaque site et chaque année, les durées de germination (a) et de levée (b) depuis le semis selon qu'il s'agit d'un semis en ligne ou d'un semis en poquet. Dans le cas présenté, le labour a été effectué en février et l'effet de la battance n'est pas pris en compte ; la profondeur de semis est de 3 cm en ligne et de 20 cm en poquet ; les valeurs obtenues sont une moyenne sur les trois sols testés ; la variabilité liée à la date de semis figure en écart-type.

La première observation est que le semis en poquet réduit fortement la durée entre le semis et la levée, avec une moyenne de 23 jours, contre 58 jours pour un semis en ligne, tous sites et années confondus ;

Figure 34. Evolution qualitative de l'humidité dans le profil du sol d'une saison des pluies à l'autre

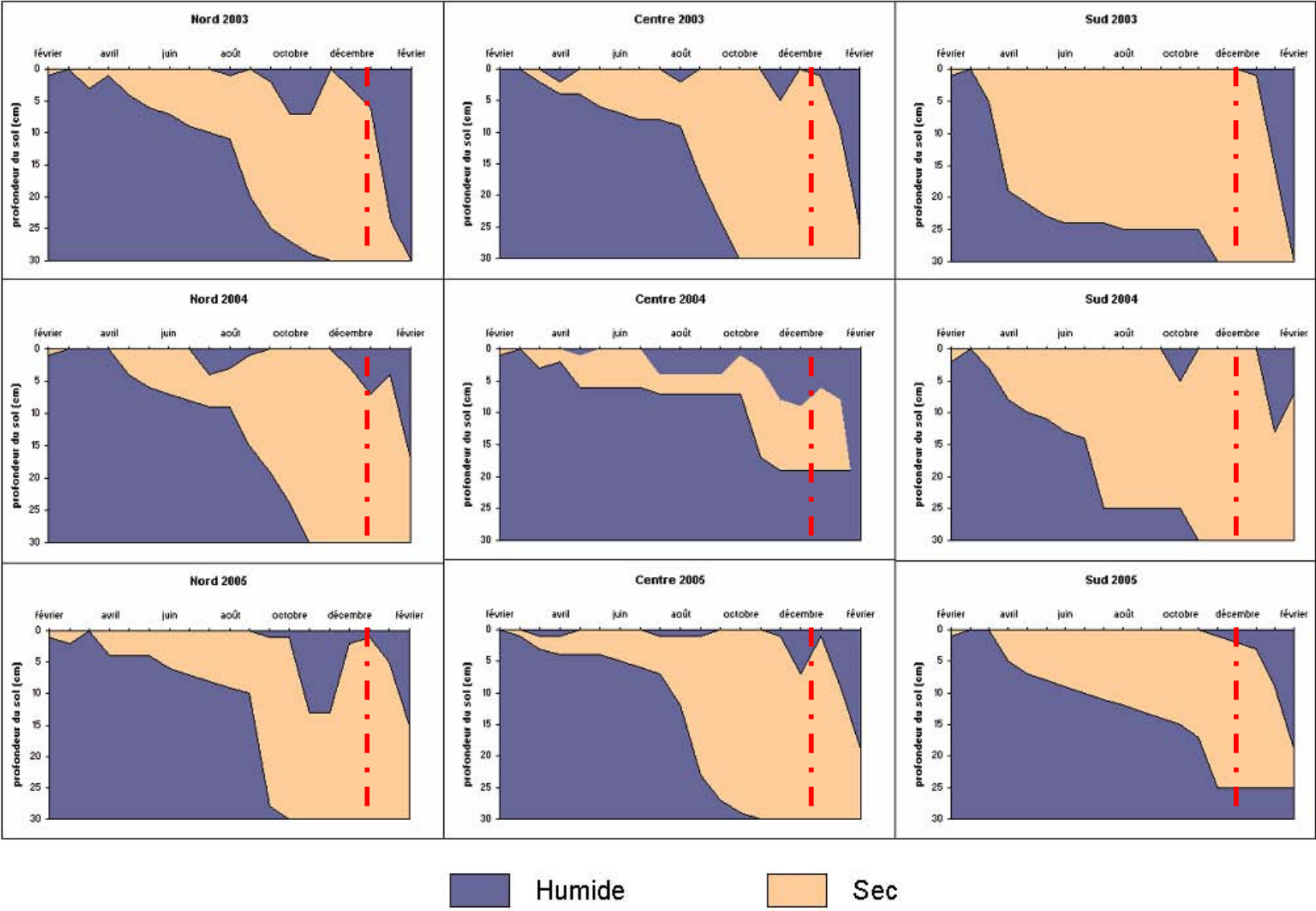
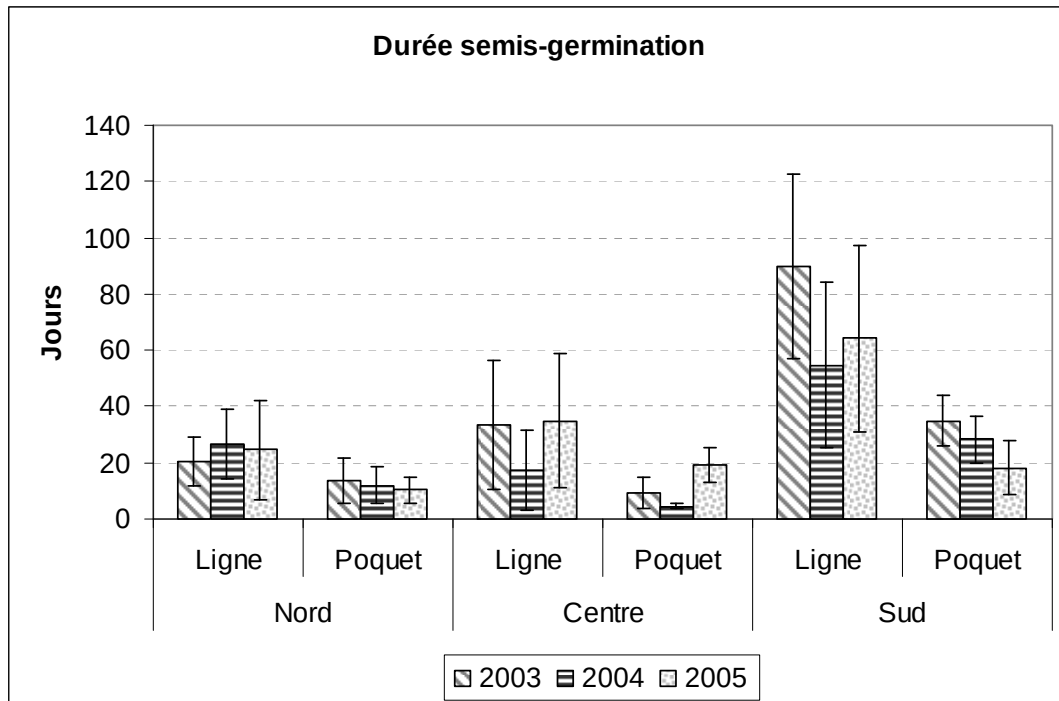


Figure 35. Effet du semis en poquet sur les durées de germination et de levée

a- Germination



b- Levée

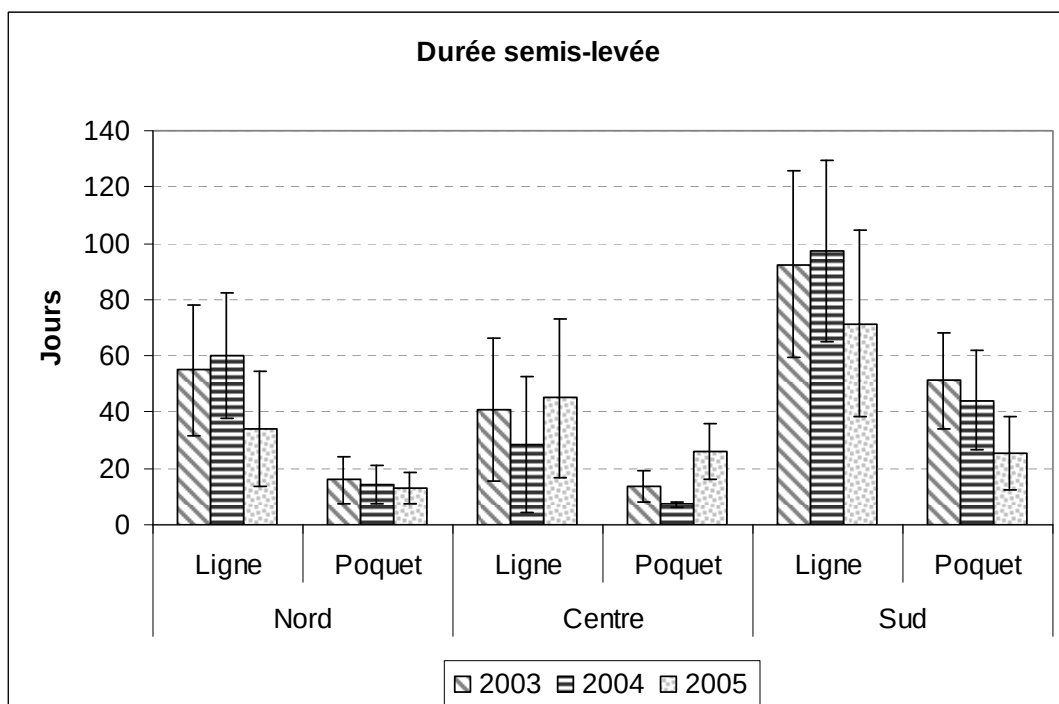
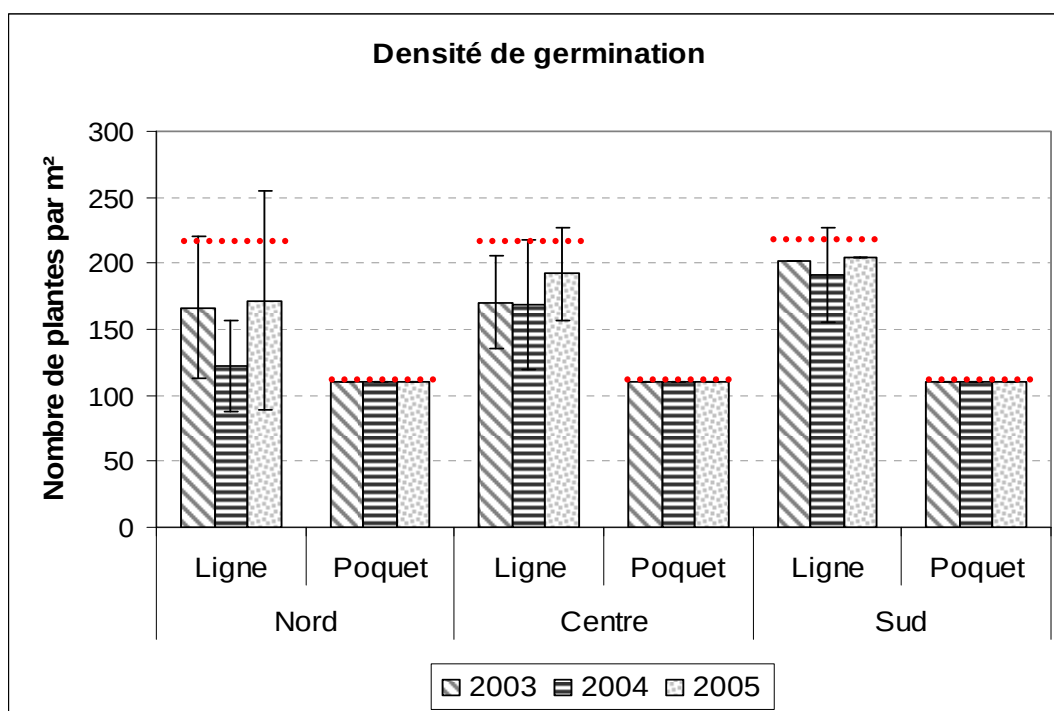


Figure 36. Effet du semis en poquet sur les densités de germination et de levée

a- Germination



b- Levée

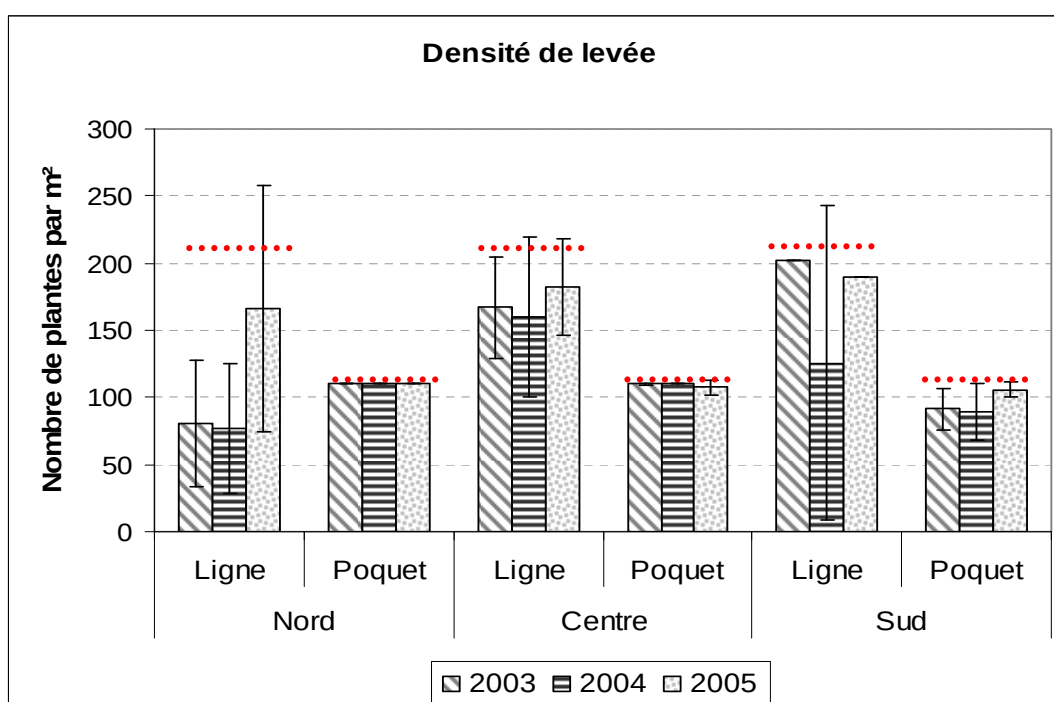
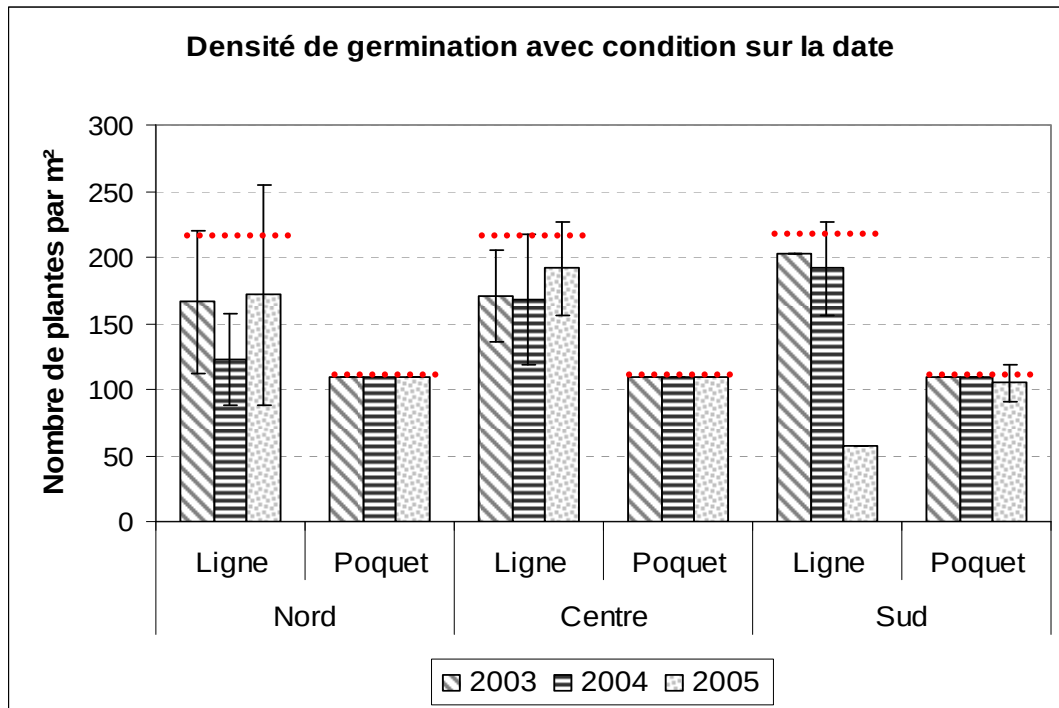


Figure 37. Effet du semis en poquet sur les densités de germination et de levée, avec condition sur la date maximale

a- Germination



b- Levée

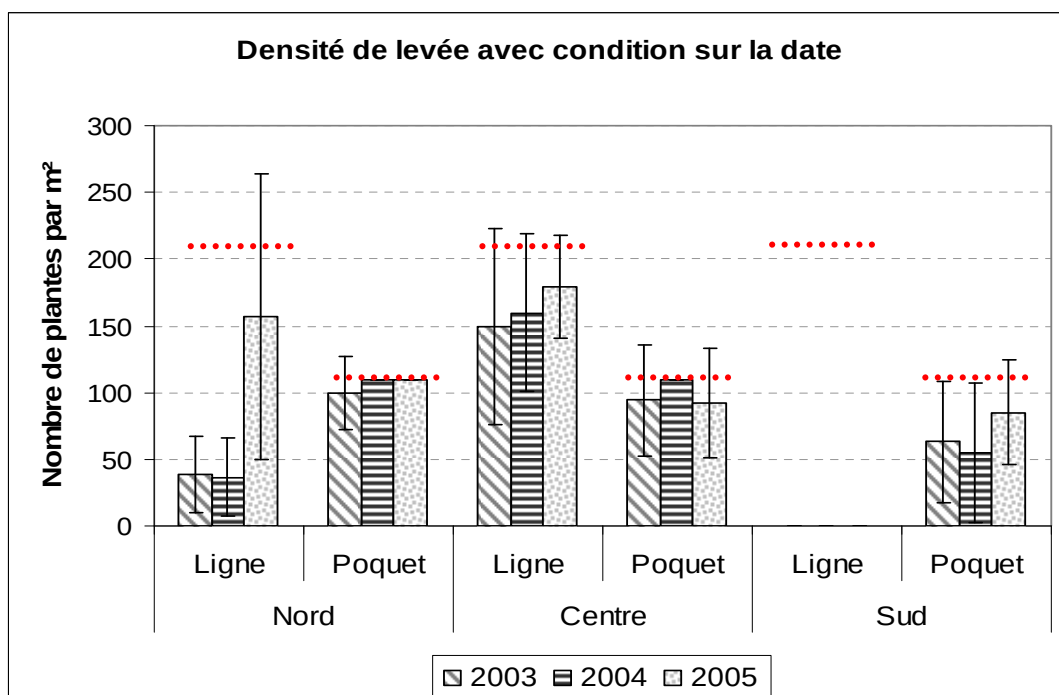


Figure 38. Atténuation de l'effet du sol grâce au semis en poquet

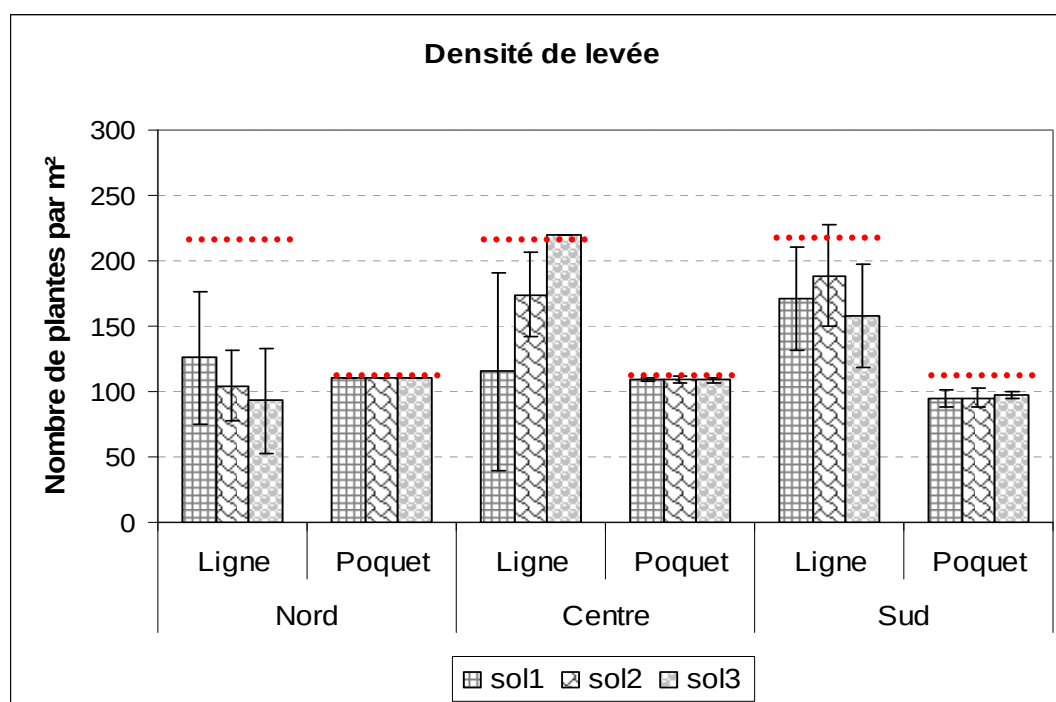
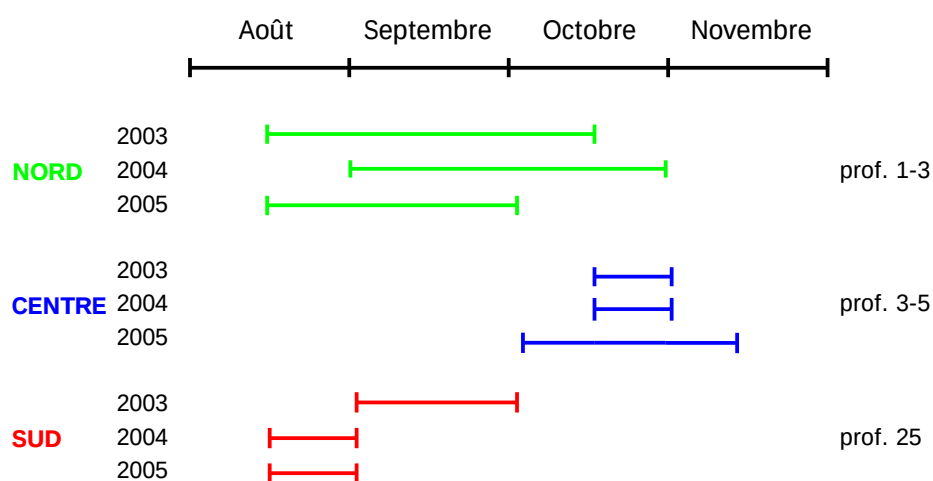


Figure 39. Variabilité des dates et profondeurs de semis optimales



comme vu dans le § 3.1 de ce chapitre, la phase la plus longue est celle séparant le semis de la germination, liée à une imbibition tardive de la graine. Les différences entre sites sont marquées, avec des durées environ 2 fois plus importantes dans le Sud que dans le Nord ou le Centre. Le rôle du semis en poquet est donc d'autant plus essentiel sur l'Altiplano Sud. Il permet ainsi de ramener les durées de germination et de levée à des valeurs similaires à celles simulées en moyenne avec des semis en ligne sur l'Altiplano Nord et l'Altiplano Centre, à savoir environ 40 jours, dont les deux-tiers de germination.

L'effet de la date de semis est fort, faisant varier les durées du simple au double, mais cet effet est atténué par le semis en poquet (40% de variation contre 52% en ligne).

Nous n'avons pas représenté l'effet de la profondeur de semis, qui sera explicité davantage dans le § 4.3.4 de ce chapitre. A titre indicatif, la variabilité de la durée de levée liée à la profondeur de semis est un peu moins importante que celle liée à la date. Les différences entre ligne et poquet sont moins marquées lorsque les semis sont proches de la surface (1 à 3 cm en ligne, 10 à 20 cm pour le poquet). Elles sont en revanche accentuées pour des semis plus profonds (4 et 5 cm en ligne, 25 et 30 cm pour le poquet), pour lesquels un semis en poquet peut réduire la durée de levée de 90% par rapport à un semis en ligne.

Dans les mêmes conditions que la Figure 35, la Figure 36 compare les densités résultantes de germination (a) et de levée (b) ; la variabilité liée à la date de semis figure toujours en écart-type ; une marque a été faite pour rappeler les densités de semis dans chaque cas. Le poquet permet d'assurer un pourcentage de germination de 100% dans tous les cas, indifféremment de la date de semis. Dans le cas du semis en ligne, le pourcentage de germination n'est que de 55 à 90%, et varie selon les sites, les années et la date de semis. La même logique s'observe pour les densités de levée, avec les baisses engendrées par les manques à la levée. Ces manques sont à nouveau bien moins importants en poquet qu'en ligne, avec une variabilité réduite.

Toutefois, la Figure 35 nous a montré que ces densités étaient atteintes après des durées généralement très longues, en particulier dans le Sud. Or, d'après la fenêtre climatique déterminée au § 4.1 de ce chapitre, la date de levée ne doit pas dépasser le 1^{er} décembre dans le Sud, et le 10 décembre dans le Nord et le Centre. Nous avons donc considéré les densités comme nulles, car non viables, dans les cas où la germination ou la levée se produisaient plus tard que ces dates limites. Les résultats ainsi obtenus sont présentés à la Figure 37. Si l'effet est quasiment nul sur la densité de germination (a), celui sur la levée est beaucoup plus important (b). Les diminutions de densité s'observent principalement pour les semis en ligne, allant même jusqu'à une densité réduite à 0 dans le sud, où le semis en poquet apparaît donc comme la seule technique viable. Le poquet permet par ailleurs l'obtention dans le sud de densités de l'ordre de 70 plantes/m², qui se rapprochent de celles obtenues par un semis en ligne dans le nord et dans le centre.

Enfin, les densités de levée ne sont plus présentées en fonction des années, mais en fonction des différents sols sur chaque site (Figure 38). Les variations d'un sol à l'autre au sein d'un même site sont très faibles, voire nulles, dans le cas d'un semis en poquet, alors qu'elles sont importantes pour les semis en ligne. Le poquet permet ainsi de s'affranchir de l'hétérogénéité fréquente des sols.

En conclusion, le poquet permet essentiellement de diminuer les durées de levée et de réduire la variabilité interannuelle. Comme vu précédemment, il empêche également la formation d'une croûte de battance.

4.3.3. Variabilité des profondeurs et des dates de semis optimales

Nous avons déterminé pour chaque site et chaque année, les dates et profondeurs de semis permettant d'atteindre les densités de levée les plus importantes, sans toutefois dépasser les dates limites de levée.

Tableau 21. Etalement des plages de levée en fonction de la profondeur de semis

Pour chaque ligne, « 0 » représente les premières plantes levées et les autres cases le nombre de jours jusqu'aux vagues suivantes de levée. L'absence de valeur dans la case Sud-2005-1 cm indique une levée nulle à cette profondeur.

		Profondeur de semis				
		1 cm	2 cm	3 cm	4 cm	5 cm
Nord (ligne)	2003	0	14	15	16	28
	2004	0	12	13	15	24
	2005	0	1	1	2	2
Centre (ligne)	2003	0	6	6	10	27
	2004	0	2	1	0	0
	2005	13	16	12	9	0
Sud (poquet)	2003	9	0	1	1	2
	2004	0	1	1	2	11
	2005		1	0	0	1

Figure 40. Levée hétérogène dans un poquet



Tableau 22. Effet du labour sur la teneur en eau du sol dans l'Altiplano Sud

Les résultats sont exprimés en termes d'augmentation de la teneur en eau des différents horizons du sol induite par un labour en février, par rapport à un labour en mai d'une part, à un non-labour d'autre part.

	Horizon 0-5		Horizon 5-30		Horizon 30-40	
	Labour février / labour mai	Labour février / non labour	Labour février / labour mai	Labour février / non labour	Labour février / labour mai	Labour février / non labour
2003	=	+3%	+51%	+17%	+5%	+1%
2004	=	+3%	+25%	+79%	+3%	+23%
2005	=	+3%	+31%	+7%	+4%	=

Les effets des différents sols et de la battance ont été intégrés. L'itinéraire technique appliqué, en termes de date de labour et de type de semis, est celui propre à chaque site, c'est-à-dire labour en saison sèche et semis en ligne pour le Nord et le Centre, labour en saison humide et semis en poquet dans le Sud.

Les résultats obtenus sont présentés dans la Figure 39. Les périodes optimales sont très variables d'un site et d'une année à l'autre ; les profondeurs optimales varient plutôt entre sites qu'entre années.

C'est sur l'Altiplano Nord, qui possède le climat le moins sec, que la période optimale de semis est la plus étalée. Elle est ainsi comprise entre un mois et demi et deux mois selon les années, avec une plage d'un mois commune aux trois années, le mois de septembre. La profondeur optimale se situe entre 1 et 3 cm. Sur l'Altiplano Centre, la période est un peu plus courte, s'étalant de deux semaines à un mois et demi ; elle est également plus tardive, avec une plage commune correspondant à la deuxième quinzaine d'octobre. Le semis est plus profond que dans le nord, entre 3 et 5 cm de profondeur. Enfin, l'Altiplano Sud présente les périodes les plus précoces et les plus courtes, entre deux semaines et un mois, réparties entre mi-août et fin septembre. La plage commune est réduite à une seule date, début septembre. Les poquets doivent être profonds, au moins à 25 cm de profondeur.

Ces résultats montrent la dépendance des choix techniques aux conditions climatiques et leur variabilité interannuelle.

4.3.4. Intérêt d'un semis hétérogène

En pratique, le lit de semences est rarement homogène et les graines peuvent se retrouver réparties sur plusieurs centimètres de profondeur, soit du fait même de l'agriculteur, soit de par une mauvaise préparation du sol par exemple. Nous avons donc simulé sur les trois sites la durée de levée obtenue pour chaque profondeur de semis. Les itinéraires techniques sont ceux propres à chaque région, c'est-à-dire labour en février et semis en poquet dans l'Altiplano Sud, labour en mai et semis en ligne dans l'Altiplano Nord et Centre. Une date de semis commune au 1^{er} octobre a été employée sur les trois sites. Dans le cas de l'Altiplano Sud, les profondeurs de poquet ont été fixées ici à 25 cm en 2003, 10 cm en 2004, 15 cm en 2005 ; c'est la profondeur à laquelle la graine est placée dans le poquet, jusqu'ici fixée constante à 2 cm, qui varie entre 1 et 5 cm.

Le Tableau 21 présente les résultats obtenus en termes d'étalement des plages de levée dus à la profondeur de semis, c'est-à-dire le nombre de jours entre les premières et les dernières plantes levées sur une même parcelle et pour une date de semis fixe. Cette durée est très variable selon les sites et les années ; elle est ainsi de moins de deux jours dans le Nord en 2005, le Centre en 2004 ou le Sud en 2005, soit une levée relativement homogène, mais peut s'étaler sur environ deux semaines dans les autres cas, et jusqu'à un mois en 2003 dans le Nord et le Centre.

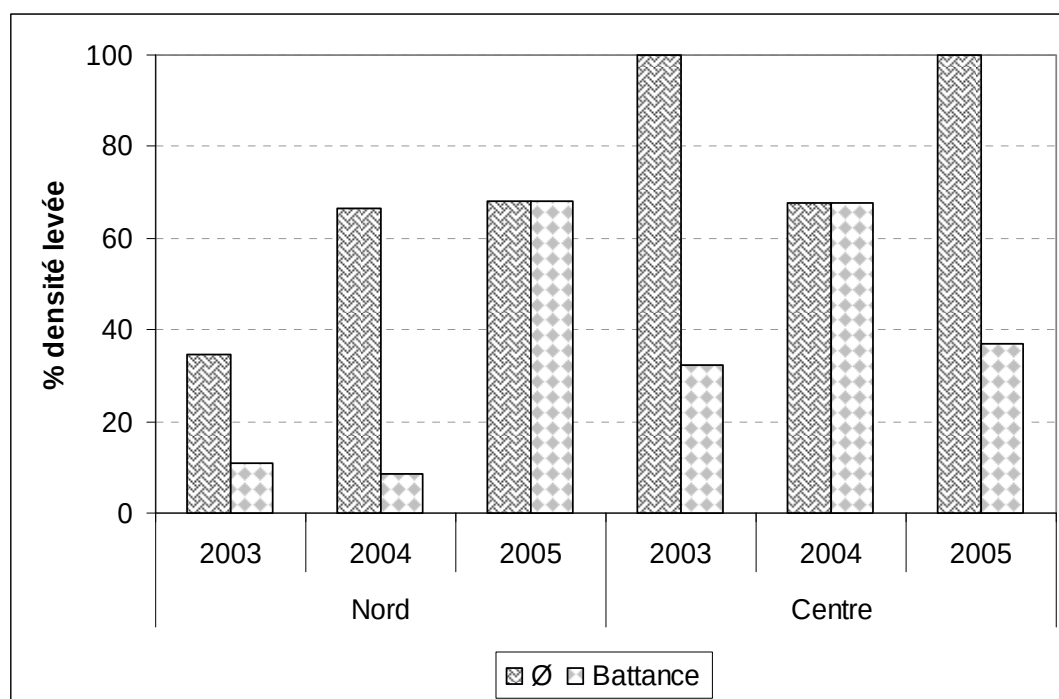
Cette asynchronie de levée (Figure 40) avec la profondeur, comme observé par Rodriguez (communication personnelle à partir de Rodriguez, 2005), peut présenter deux avantages. Tout d'abord, elle participe à la gestion des risques climatiques, si les plantules d'une vague de levée sont atteintes par un épisode ponctuel de gel ou de sécheresse, les plantules de la vague suivante ne le seront peut-être pas et pourront garantir un minimum de levée. Ensuite, elle va amener, dans un même poquet ou sur une même ligne, à la cohabitation de plantes d'âges donc de tailles différents, ce qui équivaut à l'emploi de mélanges variétaux hétérogènes où les plantes les plus grandes protègent les plus petites du gel (Winkel *et al.*, 2008)

4.3.5. Influence de la date de labour précoce

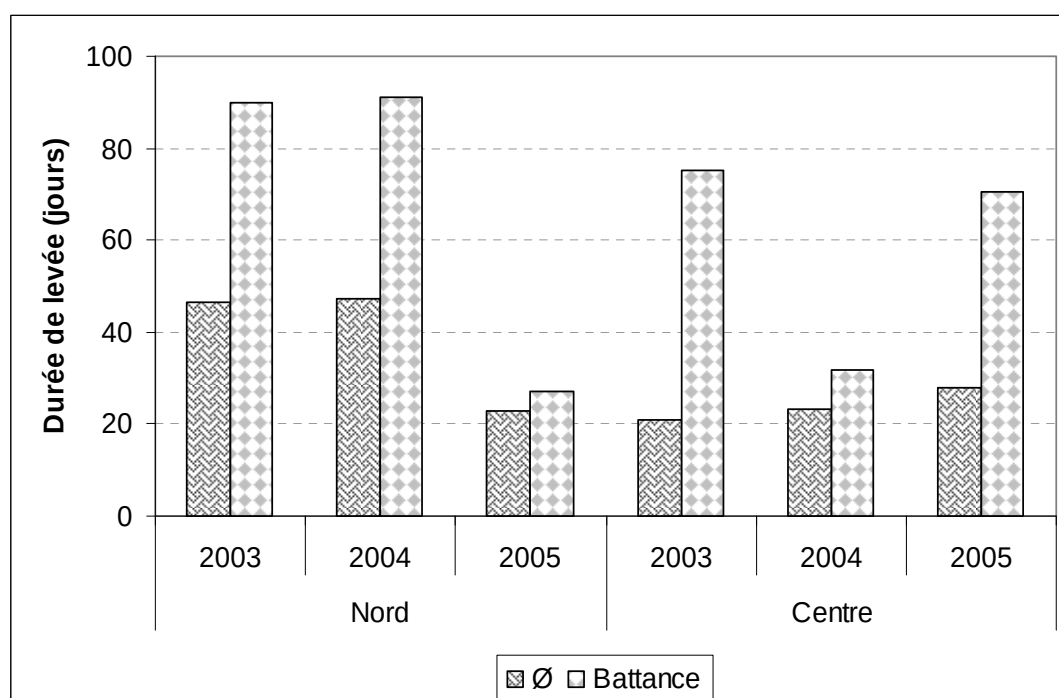
Pour comprendre l'influence du labour précoce dans l'Altiplano Sud, nous nous sommes intéressés à l'état hydrique du sol au moment du semis. Les conditions de semis sont celles déterminées au § 4.3.3

Figure 41. Effet de la battance sur les densités et durées de levée dans le Nord et le Centre

a- Densités



b- Durées



de ce chapitre, c'est-à-dire le 1^{er} septembre avec un poquet à 25 cm de profondeur. Les teneurs en eau de chacun des horizons du sol sont calculées à la levée, dans le cas d'un labour en février, d'un labour en mai ou d'un non-labour.

Les résultats sont présentés dans le Tableau 22, en termes d'augmentation (exprimée en pourcentage) de la teneur en eau dans le cas d'un labour en février par rapport aux deux autres situations. L'humidité du sol n'est pas modifiée sur l'horizon 0-5 cm, qui est l'horizon le plus sec et le plus soumis à l'évaporation. En revanche, elle est augmentée d'environ 35% sur l'horizon 5-30 cm, qui est l'horizon du lit de semences et des racines de la plantule ; elle l'est également légèrement sur l'horizon suivant, de 4% par rapport à un labour en mai, de 8% par rapport à un non-labour.

Le labour précoce en saison des pluies permet ainsi d'augmenter le stock d'eau du sol, par une plus grande infiltrabilité, pour permettre à la plante de satisfaire ses besoins en eau en attendant l'arrivée des pluies. Il n'est pas nécessaire dans l'Altiplano Nord, où les pluies sont plus précoces et plus importantes.

4.3.6. Effet de la battance

Pour estimer l'effet de la battance, nous avons repris les conditions moyennes de semis déterminées précédemment pour l'Altiplano Nord et l'Altiplano Centre. Le labour est effectué en mai et le semis se fait en ligne, le 15 septembre à 2 cm de profondeur dans le Nord, le 15 octobre à 4 cm de profondeur dans le Centre. Les durées et densités de levée sont comparées en absence ou en présence de croûte de battance, et les résultats obtenus sont présentés Figure 41 a et b.

La battance entraîne une diminution de la densité, liée à un allongement de la durée de levée. L'effet est variable selon les années, en raison de la distribution des pluies par rapport à la date de semis. Il est par exemple nul en 2005 dans le Nord et en 2004 dans le Centre, avec des densités identiques et une durée de levée allongée de moins de dix jours (15 à 30%). Les densités sont en revanche réduites de 3 à 8 fois les autres années, avec des durées de levée jusqu'à quadruplées.

La Figure 42 présente l'évolution de l'épaisseur de la croûte sèche de surface du sol, du semis à la levée. Une diminution est bien observée sur l'Altiplano Nord et l'Altiplano Centre, due aux pluies survenus après le semis et permettant la levée ; en revanche elle reste importante sur l'Altiplano Sud, ce qui souligne l'intérêt du semis en poquet qui permet de se soustraire au phénomène de battance.

4.4. Test de simulation de la date de semis

L'option de calcul automatique de la date de semis a été activée. L'humidité du lit de semences doit donc être supérieure au point de flétrissement. Les températures moyennes et minimales sont analysées sur une période de 15 jours suivant le semis potentiel. Elles ont été fixées respectivement à +4°C (température de base pour le développement, cf. § 3.1 du Chapitre IV) et à -5°C (un peu supérieure à la température de 10% de dégâts par le gel déterminée aux stades juvénile et plantule, pour minimiser les risques, cf. § 3.9 du Chapitre IV).

Les situations simulées sont celles décrites au § 4.2 de ce chapitre, à l'exception de la date de semis qui est fixée au 15 août et sur laquelle est appliquée la règle de décision.

La Figure 43 illustre à nouveau l'intérêt du poquet dans l'Altiplano Sud. Sur l'année 2003, le nombre de jours dont est repoussé le semis est comparé pour les différentes profondeurs de semis en ligne et en poquet. Dans le cas d'un semis en poquet profond, à 25 ou à 30 cm, le semis n'est pas repoussé, c'est-à-dire que les conditions optimales sont déjà réunies. En revanche, pour des poquets moins profonds, ou a fortiori pour un semis de surface en ligne, le semis est repoussé de trois à cinq mois, ce qui amène à dépasser la fenêtre climatique disponible.

Figure 42. Evolution de l'épaisseur de la couche sèche en surface du sol

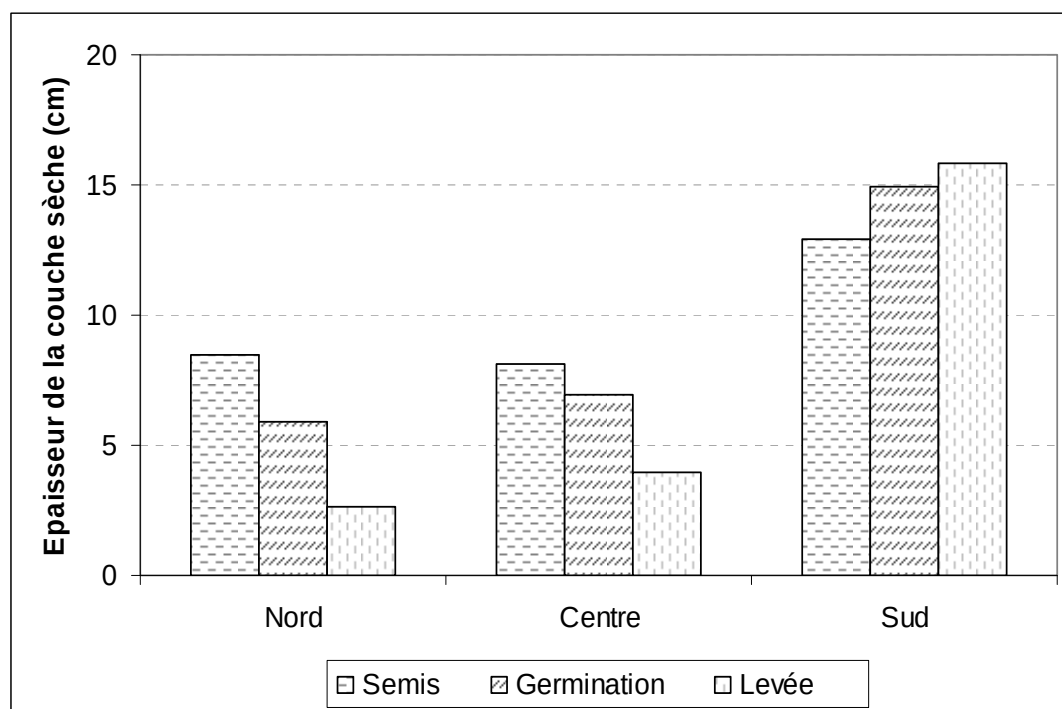


Figure 43. Date de semis optimale calculée par le modèle à partir du 15 août dans l'Altiplano Sud (en ligne et en poquet) pour l'année 2003, selon la profondeur du semis

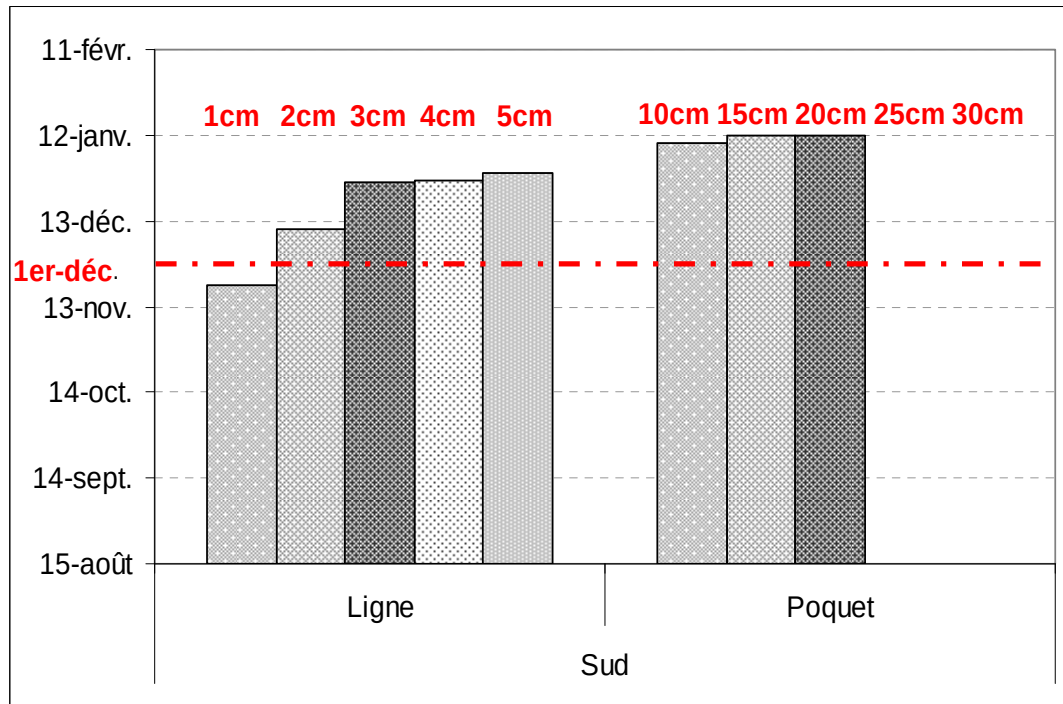


Figure 44. Date de semis optimale calculée par le modèle à partir du 15 août sur les trois sites (en ligne dans le Nord et le Centre, en poquet dans le Sud) en moyenne sur les trois années, selon la profondeur de semis

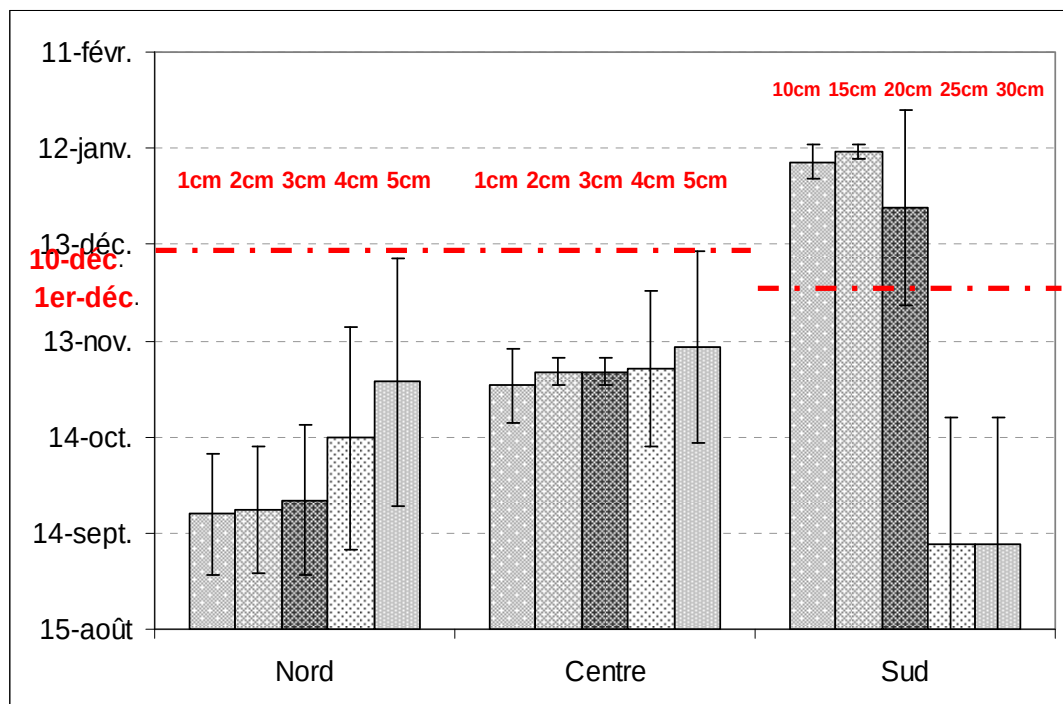


Figure 45. Densités de levée en date de semis calculée par le modèle

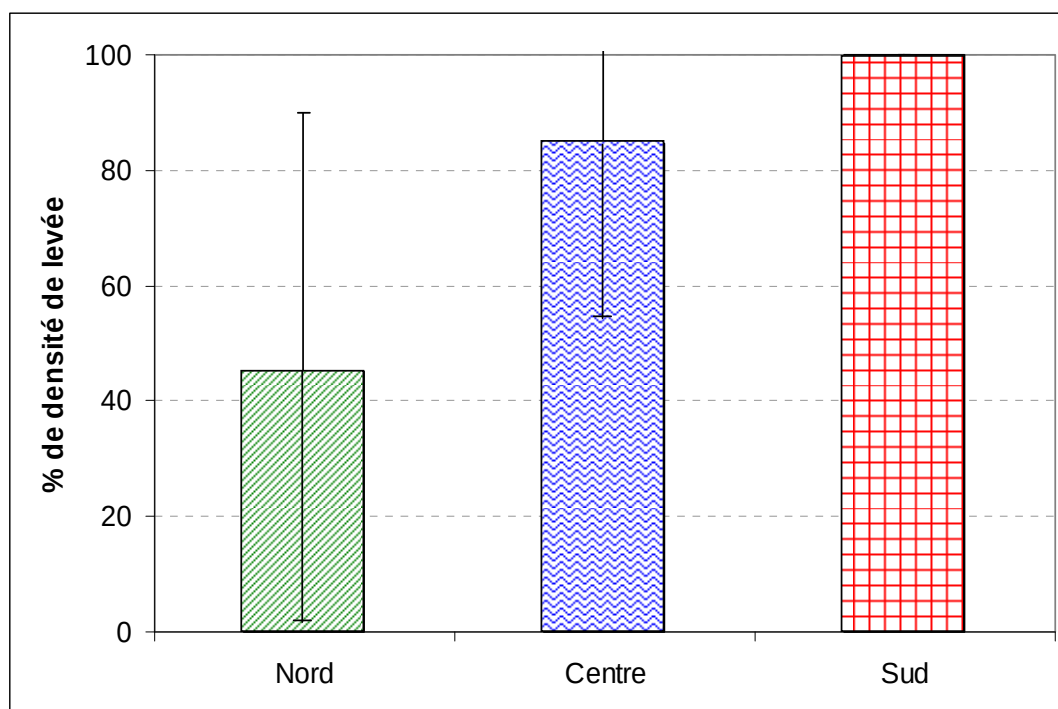
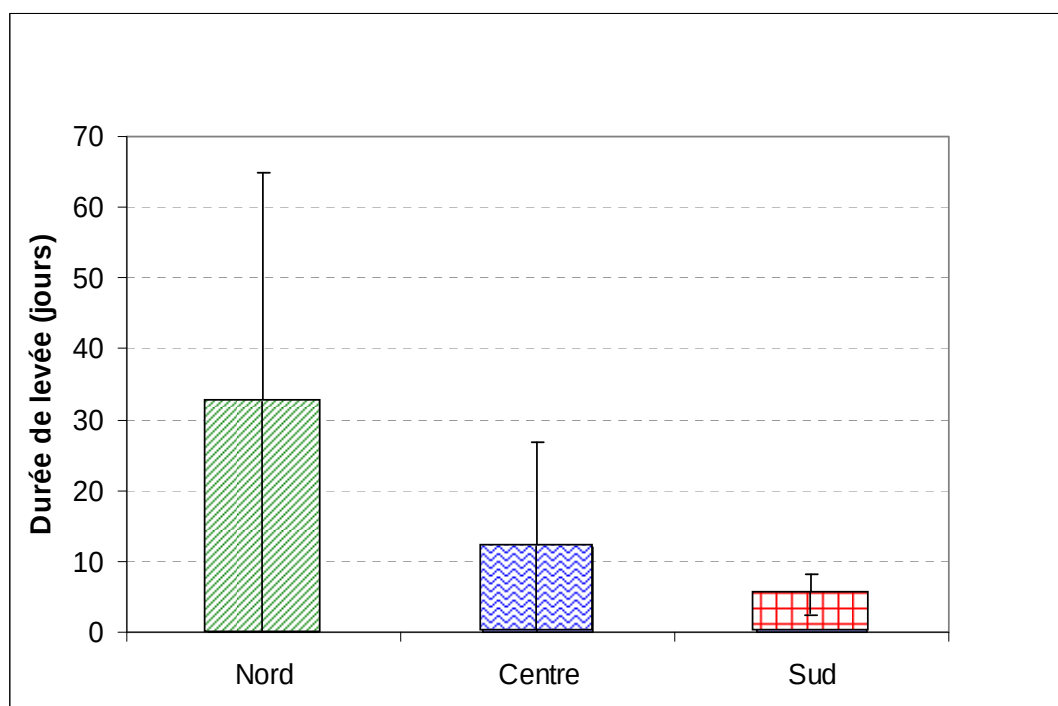


Figure 46. Durées de levée en date de semis calculée par le modèle



La Figure 44 présente les dates de semis calculées par le modèle sur chaque site en fonction de la profondeur de semis. Les valeurs sont des moyennes sur les trois années. Les simulations ont été réalisées selon les pratiques propres à chacun des sites, c'est-à-dire labour en février et semis en poquet dans l'Altiplano Sud, labour en mai et semis en ligne dans l'Altiplano Nord et l'Altiplano Centre. La date optimale calculée dépend de la profondeur du semis, mais cette dépendance diffère selon les sites. Dans l'Altiplano Sud, ce sont donc les poquets les plus profonds, à 25 et 30 cm, qui permettent les semis les plus précoces, pendant la première quinzaine de septembre. Ce sont en revanche les semis les plus proches de la surface, entre 1 et 3 cm, qui permettent des semis pendant la deuxième quinzaine de septembre dans l'Altiplano Nord. Enfin, l'effet de la profondeur est peu marqué dans l'Altiplano Centre, avec un semis calculé fin octobre. Ces périodes sont cohérentes avec les dates permettant les densités de levée les plus élevées déterminées au § 4.3.3 de ce chapitre (Figure 39).

Les densités de levée résultantes sont présentées dans la Figure 45. Elles sont ainsi de 100% pour l'Altiplano Sud grâce au semis en poquet, et de respectivement 85 et 45% pour les Altiplano Centre et Nord. Ces différences peuvent être reliées à la durée de levée (Figure 46). La levée se fait en effet très rapidement dans le Sud et dans le Centre, en cinq et dix jours, mais est beaucoup plus longue dans le Nord, ce qui pourrait expliquer les manques obtenus.

Pour conclure, nous avons donc pu mettre en évidence la variabilité des conditions de semis, ainsi que l'effet des techniques sur l'implantation de la culture. Il faut également signaler la vertu explicative du modèle quant aux actes techniques pratiqués sur l'Altiplano. Les chapitres qui suivent consistent en un paramétrage de l'ensemble du modèle STICS, pour simuler la croissance et le rendement du quinoa, et une analyse de l'impact des techniques à l'échelle du cycle complet.

CHAPITRE IV

Chapitre IV : Simulation de la croissance et du rendement

1. ECOPHYSIOLOGIE DU QUINOA.....	121
1.1. CLASSIFICATION BOTANIQUE ET GENETIQUE	121
1.2. MORPHOLOGIE.....	121
1.2.1. <i>Caractères végétatifs</i>	121
1.2.2. <i>Caractères floraux</i>	123
1.2.3. <i>Le fruit</i>	123
1.3. BIOLOGIE REPRODUCTIVE	125
1.4. PHYSIOLOGIE	125
1.5. PHENOLOGIE.....	125
1.6. BILAN DES CONNAISSANCES	129
2. CHOIX DES FORMALISMES.....	129
2.1. DEVELOPPEMENT.....	129
2.2. CROISSANCE AERIENNE	131
2.3. ELABORATION DU RENDEMENT.....	131
2.4. CROISSANCE RACINAIRE	131
2.5. FONCTIONNEMENT HYDRIQUE	131
2.6. FONCTIONNEMENT AZOTE	131
3. PARAMETRAGE A PARTIR DE LA BIBLIOGRAPHIE, PAR ANALOGIE OU PAR EXPERIMENTATION	131
3.1. LES TEMPERATURES CARDINALES.....	133
3.2. LE DEVELOPPEMENT	133
3.3. LE FEUILLAGE.....	135
3.4. L'INTERCEPTION DU RAYONNEMENT	135
3.5. LA CROISSANCE EN BIOMASSE	135
3.6. LA REPARTITION DE LA BIOMASSE ENTRE ORGANES	135
3.7. LE RENDEMENT.....	137
3.8. LES RACINES.....	137
3.9. LE GEL	139
3.10. L'EAU	139
4. PARAMETRAGE PAR OPTIMISATION.....	139
4.1. METHODOLOGIE	141
4.2. OPTIMISATION DES PARAMETRES AVEC FORÇAGE DU LAI ET DU DEVELOPPEMENT.....	141
4.2.1. <i>Forçage des LAI</i>	141
4.2.2. <i>Optimisation des paramètres jouant sur la biomasse</i>	141
4.2.3. <i>Détermination du coefficient de stress et des paramètres de développement par utilisation des courbes de LAI</i>	143
4.3. OPTIMISATION DES PARAMETRES AVEC FORÇAGE DU DEVELOPPEMENT SANS FORÇAGE DU LAI.....	143
4.3.1. <i>Détermination des courbes de taux de couverture</i>	143
4.3.2. <i>Optimisation des paramètres de taux de couverture</i>	145
4.4. OPTIMISATION DES PARAMETRES AVEC FORÇAGE DE LA DATE DE LEVEE	145
4.5. CAS DE LA LEVEE.....	145
5. CAS PARTICULIER DE L'AZOTE.....	147
5.1. ETAT DES LIEUX DES CONNAISSANCES SUR LE COMPORTEMENT AZOTE DU QUINOA	147
5.1.1. <i>Effets sur la croissance et sur le rendement</i>	147
5.1.2. <i>Prélèvements et efficacité d'utilisation de l'azote</i>	147
5.2. FORMALISMES DE STICS.....	149
5.2.1. <i>L'offre du sol</i>	149
5.2.2. <i>La demande de la plante</i>	149
5.2.3. <i>Les stress azotés</i>	151
5.2.4. <i>Paramétrage initial</i>	151
5.3. HYPOTHESES DE TRAVAIL ET METHODOLOGIE	151

5.4.	PARAMETRAGE	153
5.4.1.	<i>Les paramètres "sol"</i>	<i>153</i>
5.4.2.	<i>Les paramètres "plante"</i>	<i>153</i>
6.	ANALYSE DES RESULTATS OBTENUS.....	155
6.1.	QUALITE DE SIMULATION	155
6.1.1.	<i>En LAI et stades forcés.....</i>	<i>155</i>
6.1.2.	<i>En taux de couverture non forcé et date de levée forcée.....</i>	<i>155</i>
6.1.3.	<i>En levée non forcée</i>	<i>159</i>
6.2.	CAS DE L'AZOTE	161
6.3.	CAPACITES ET LIMITES DU MODELE, PROCESSUS ENCORE INSUFFISAMMENT PRIS EN COMPTE	161

Dans ce chapitre, nous allons déterminer le paramétrage de STICS pour le quinoa. Pour cela, nous rappelons tout d'abord les principales caractéristiques de la plante de quinoa, afin de justifier les choix de formalisme au sein de chaque module. Nous présentons ensuite l'adaptation du paramétrage en deux étapes successives (les paramètres obtenus par bibliographie, analogie ou expérimentation, puis les paramètres obtenus par optimisation) ; un paragraphe est consacré au cas particulier de l'azote. Enfin, les résultats obtenus et la qualité de simulation du modèle sont analysés.

1. Ecophysiologie du quinoa

1.1. Classification botanique et génétique

Le quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) est une plante dicotylédone angiosperme de la famille Chenopodiaceae, genre *Chenopodium*, section *Chenopodia*, sous-section *Cellulata*. *Chenopodium* est le genre le plus important de la famille des Chenopodiacées avec plus de 250 espèces répandues mondialement (Giusti, 1970). Parmi celles-ci, la plupart sont sauvages telles que *Chenopodium album* ; cinq sont cultivées comme plante alimentaire, en Amérique du Sud et au Mexique, pour le grain comme le quinoa, ou comme légume (Mujica *et al.*, 2001). L'espèce est allotétraploïde et possède 36 chromosomes (Gandarillas, 1979 ; Mujica *et al.*, 2001).

1.2. Morphologie

La morphologie du quinoa varie selon les génotypes et les zones agroécologiques où on le cultive. D'importantes variations peuvent être trouvées dans la couleur de la plante et du grain, le type d'inflorescence et l'adaptabilité aux conditions du milieu. Gandarillas (1979) indique que la morphologie de la plante a une importance spéciale pour l'identification des variétés de quinoa, essentielle pour le producteur puisqu'associée à des caractéristiques fondamentales telles qu'une résistance plus élevée à la grêle ou aux oiseaux. Tous les caractères morphologiques n'ont pas la même valeur pour la classification. Les principaux sont d'une part la couleur, le port de la plante et la morphologie des feuilles, d'autre part le type d'inflorescence et la taille et la couleur des graines.

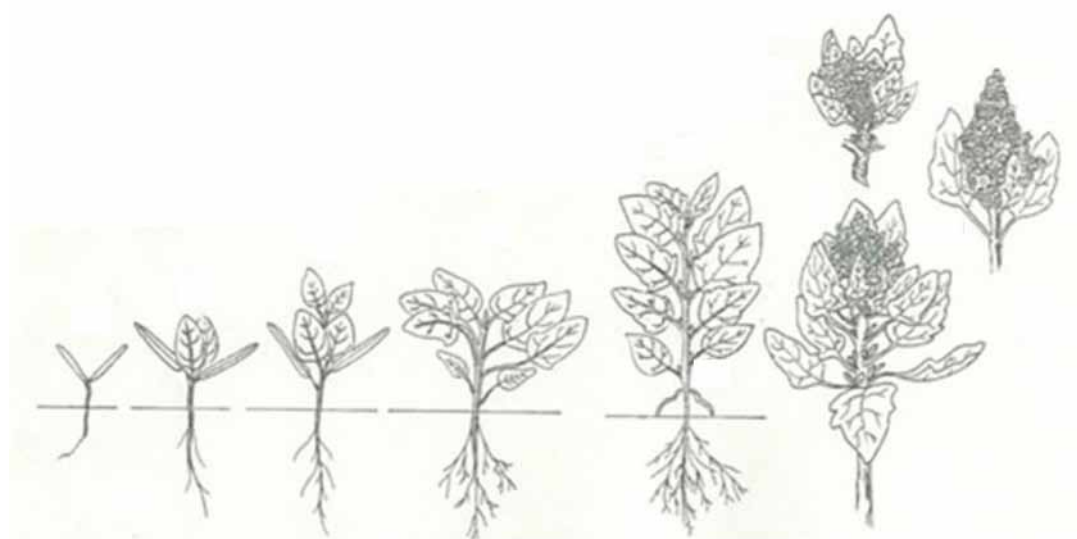
1.2.1. Caractères végétatifs

Le quinoa est une plante annuelle de printemps, qui atteint une hauteur comprise entre 0,5 et 3 m, la hauteur la plus fréquente étant de 1 m à 1,5 m. Son degré de ramification est contrôlé par des facteurs génétiques et environnementaux. Les couleurs communes du quinoa sont le vert, le violet et le rouge. Les plants verts peuvent devenir blancs, jaunes, orange ou rouges à maturité, les violets peuvent devenir jaunes ou rester violets, et les rouges restent rouges tout au long du cycle (Jacobsen et Stølen, 1993).

La Figure 47 présente un schéma général d'une plante de quinoa et les caractéristiques des différents organes sont décrites ci-dessous (Gandarillas, 1979 ; Jacobsen et Stølen, 1993 ; Mujica *et al.*, 2001).

Le quinoa possède une racine en pivot vigoureuse avec un enracinement qui peut être profond. Juste sous le collet, le pivot se divise pour donner naissance à des racines secondaires et tertiaires. Le pivot est généralement d'une longueur proportionnelle à la hauteur de la plante. Il a ainsi déjà été observé des plantes hautes de 1,70 m avec des racines atteignant 1,50 m de profondeur, aussi bien que des plantes de 0,90 m avec des racines de 0,80 m (Pacheco et Morlon, 1978). Canahua (1977) a évoqué des profondeurs d'enracinement de 14 à 18 cm pour différentes variétés dix semaines après le semis, et Gandarillas (1979) a lui mentionné que le pivot pouvait atteindre à maturité une longueur de 30 cm (les racines secondaires et tertiaires n'ayant pas été mesurées). Ce système racinaire profond et ramifié pourrait être une des raisons expliquant la résistance à la sécheresse du quinoa.

Figure 47. Morphologie d'un plant de quinoa



(Tiré de Mujica et al., 2001)

Figure 48. Inflorescence amaranthiforme et glomérulaire



Photos IRD

La tige est cylindrique au niveau du collet, puis anguleuse à partir des ramifications. Son diamètre peut varier de 1 à 8 cm, et sa hauteur entre 50 cm et 2 m, selon la variété et les conditions culturales (densité de semis ou fertilisation par exemple). A l'intérieur de la tige, on trouve une moelle non fibreuse, de couleur blanche à crème, qui dans les premiers stades de développement est massive, mais devient aérée et spongieuse à l'approche de la maturité. Au contraire, le cortex est ferme et compact. L'épiderme de la tige peut être vert, à rayures violettes ou rouges, ou encore entièrement rouge (Gandarillas, 1979).

Les feuilles sont alternes sur la tige. Elles sont pétiolées, avec un pétiole long, fin et cannelé. Les feuilles inférieures sont triangulaires ou rhomboïdales, de grande taille, pouvant atteindre 15x12 cm. Les feuilles supérieures sont lancéolées et plus petites, certaines ne dépassant pas 1 cm de long sur 2 mm de large au sommet de la plante. Les limbes sont généralement plans, mais peuvent parfois être ondulés et épais, et sont plus ou moins dentelés selon les variétés. Les jeunes feuilles sont recouvertes sur les deux faces de papilles blanches, rouges ou violettes, à forte teneur en oxalate de calcium. Outre la présence de ces cristaux, la couleur des feuilles varie d'un génotype à l'autre selon les pigments qu'elles contiennent (Jacobsen et Stølen, 1993 ; Mujica *et al.*, 2001).

Les ramifications prennent leur origine aux aisselles de chaque feuille de la tige. Leur longueur peut varier entre quelques centimètres et la même longueur que la tige principale, en fonction de la variété et des conditions de culture. Il existe des variétés qui ramifient et d'autres pas. Cela dépend toutefois de la densité de plantation, puisque à faible densité même les variétés simples pourront présenter quelques ramifications.

1.2.2. Caractères floraux

La variabilité dans la coloration des plants n'est pas due qu'à la tige et aux feuilles, mais également à un large spectre de couleurs présent dans l'inflorescence et qui évolue au cours de la maturation des grains de quinoa.

L'inflorescence du quinoa est une panicule constituée d'un axe principal duquel émergent des axes secondaires et tertiaires (Risi et Galwey, 1984). Deux types d'inflorescence ont été décrits chez le quinoa : l'amaranthiforme et le glomérulaire (Figure 48), ce dernier étant le plus fréquent. Chez le type amaranthiforme, les glomérules (ramifications courtes portant un groupe de fleurs ou de grains) sont insérés directement sur les axes de second ordre, alors que chez le type glomérulaire, ils sont insérés sur les axes de troisième ordre (Bertero *et al.*, 1996 ; Gandarillas, 1979). Ces deux types d'inflorescence peuvent être plus ou moins compacts selon la longueur des axes secondaires et tertiaires et des pédicelles, mais les glomérulaires ont de toute façon toujours une apparence beaucoup plus compacte que les amaranthiformes (Jacobsen et Stølen, 1993). La longueur de la panicule est variable selon les variétés et les conditions environnementales, pouvant atteindre 30 à 80 cm de long avec un diamètre de 5 à 30 cm. Le nombre de glomérules par panicule varie de 80 à 120, et celui de grains par glomérule de 100 à 3 000 (Mujica *et al.*, 2001).

Les fleurs du quinoa sont petites et incomplètes, ne possédant pas de pétale, et peuvent être femelles ou hermaphrodites. Les fleurs hermaphrodites font de 2 à 5 mm, ont un périanthe sépaloïde constitué de cinq sépales, un pistil et un stigmate à cinq étamines. Les fleurs femelles, composées uniquement d'un périanthe et d'un pistil, ne font qu'entre 1 et 3 mm (Jacobsen et Stølen, 1993 ; Mujica *et al.*, 2001).

1.2.3. Le fruit

Le fruit est un akène recouvert par le périanthe, duquel il se sépare facilement à l'état sec. Le péricarpe du fruit contient de la saponine, entre 0,02 et 0,51% selon les espèces (Jacobsen *et al.*, 1994). La

gamme de couleur du péricarpe va du blanc, jaune, orange, orange, rouge, au marron ou noir. Les espèces sauvages présentent souvent un péricarpe noir. La graine est ensuite entourée d'un fin épisperme, qui peut lui aussi avoir des colorations diverses. L'embryon, formé de deux cotylédons et de la radicule, représente 30% du volume total de la graine et enveloppe comme un anneau la majeure partie du péricarpe, essentiellement constitué d'amidon. Les graines peuvent être de forme conique, cylindrique ou ellipsoïdale, leur taille varie environ entre 1 et 3 mm, leur poids entre 2 et 6 mg (Jacobsen et Stølen, 1993 ; Mujica *et al.*, 2001).

1.3. Biologie reproductive

D'après Gandarillas (1967), chaque fleur reste ouverte de cinq à sept jours, et la floraison d'une panicule complète dure de 12 à 15 jours. La déhiscence du pollen peut se produire tout au long de la journée.

Le quinoa est considéré comme une espèce à fertilisation autogame, le pourcentage de fécondation croisée ne dépassant pas 10% (Rea, 1969 ; Gandarillas, 1979). Ce pourcentage d'allogamie oblige toutefois à prendre certaines précautions dans les processus d'amélioration génétique et dans les programmes de production et de distribution de semence.

1.4. Physiologie

Le quinoa est une culture de régions tempérées ou subtropicales où les températures maximales ne dépassent pas 35°C. Son efficacité de fixation du CO₂ et la structure anatomique de ses feuilles sont celles d'une plante en C3 (Zvietcovich, 1976, cité par Jacobsen et Stølen, 1993 ; Dizes et Bonifacio, 1992).

De par sa grande variabilité génétique, il présente des variétés de jours courts, de jours longs ou indifférentes à la photopériode ; le quinoa s'adapte facilement à des conditions de luminosités très différentes (Frere *et al.*, 1975). D'après Bertero (2003), Bertero *et al.* (1999a ; 2000) ou Tapia (1979), le quinoa est "plutôt" une plante de jours courts, mais les variétés de l'Altiplano et du Salar sont moins sensibles à la photopériode que les autres.

Jacobsen et Stølen (1993) ont montré que la vitesse de croissance des variétés précoces était plus importante pendant les 60-70 premiers jours, leur conférant une hauteur de plante supérieure à celle des variétés tardives. Après 70 jours, les variétés tardives continuent à croître alors que les variétés précoces cessent leur croissance.

1.5. Phénologie

Plusieurs échelles de développement ont été décrites pour le quinoa, telles que celle de Espindola (1994) en neuf phases, ou celle de Mujica et Canahua (1989) en 12 phases. C'est cette dernière que nous avons choisi de présenter ici. Les durées indiquées de chaque phase sont des nombres de jours moyens. Un stade est atteint lorsque 50% des plantes sont à ce stade. Les différents stades sont illustrés en Figure 49.

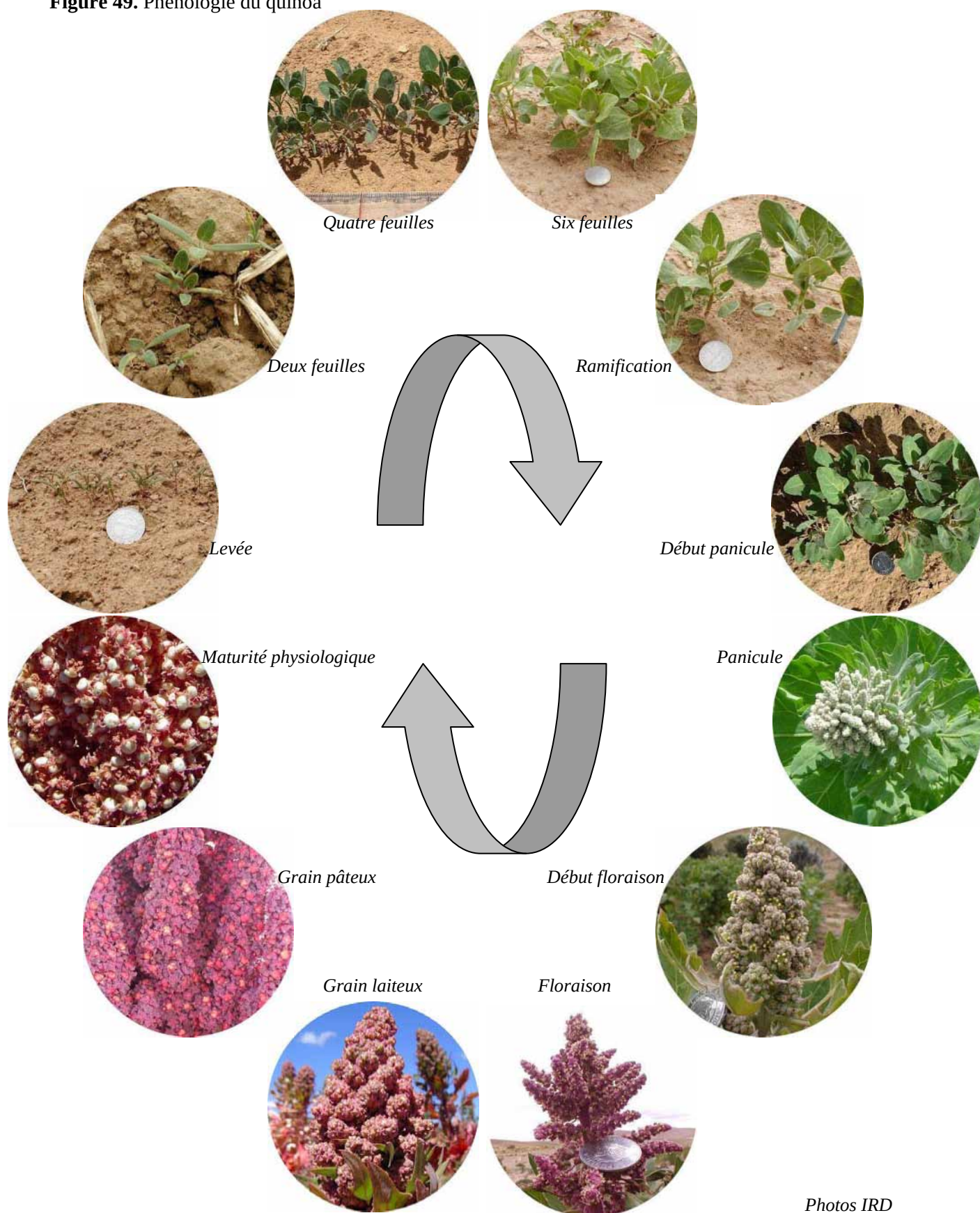
- Levée

Elle correspond à la sortie de la plantule et au déploiement des feuilles cotylédonaires (germination épicée). Elle se produit entre sept et dix jours après le semis, en conditions de germination optimales.

- Deux feuilles vraies

Les deux premières feuilles vraies apparaissent 15 à 20 jours après le semis, conjointement à une croissance rapide des racines. Elles sont de forme rhomboïdale au contraire des feuilles cotylédonaires, lancéolées. Elles sont très sensibles aux attaques d'insectes.

Figure 49. Phénologie du quinoa



- Quatre feuilles vraies

La deuxième paire de feuilles vraies se déploie 25 à 30 jours après le semis. Les feuilles cotylédonaire sont toujours vertes. La plantule montre dans cette phase une assez bonne résistance au froid et à la sécheresse, mais ses feuilles tendres constituent une alimentation de choix pour les ruminants.

- Six feuilles vraies

L'apparition de la troisième paire de feuilles vraies se produit 35 à 45 jours après le semis, alors que les feuilles cotylédonaire commencent à se flétrir. L'apex végétatif est nettement protégé par les feuilles les plus âgées, en particulier lorsque la plante est soumise à un stress (thermique, hydrique ou salin).

- Ramification

A partir du stade huit feuilles, soit 45 à 50 jours après le semis, on peut observer pour les variétés qui ramifient la présence de bourgeons axillaires jusqu'au troisième nœud. Les feuilles cotylédonaire, jaunies, tombent et laissent une cicatrice sur la tige. L'inflorescence n'est pas encore visible, recouverte et protégée par les feuilles.

- Début de formation de la panicule

L'inflorescence commence à apparaître à l'apex de la plante au bout de 55 à 60 jours, entourée d'une agglomération de feuilles de toute petite taille qui la recouvrent encore en partie. Parallèlement, la première paire de feuilles vraies jaunit et n'est plus photosynthétiquement active. La tige s'allonge et son diamètre augmente.

- Panicule

L'inflorescence est désormais clairement visible au-dessus des feuilles, ainsi que les glomérules qui la composent. Des boutons floraux individualisés apparaissent, 65 à 70 jours après le semis.

- Début de floraison

Les premières fleurs s'ouvrent 75 à 80 jours après le semis. La plante commence à être plus sensible au froid et à la sécheresse.

- Floraison

L'ouverture de 50% des fleurs de l'inflorescence se produit aux environs du 90^{ème} ou 100^{ème} jour. Cette observation doit se faire à la mi-journée, les fleurs se refermant pendant la nuit. C'est durant cette phase que la plante est la plus sensible aux gelées. Les feuilles inférieures, flétries, tombent.

- Grain laiteux

Le grain est qualifié de laiteux 100 à 130 jours après le semis, car un liquide blanchâtre en sort lorsqu'une pression est exercée sur le fruit. Un déficit hydrique pendant cette phase peut entraîner une forte diminution du rendement.

- Grain pâteux

L'intérieur des fruits devient d'une consistance pâteuse, toujours de couleur blanche, 130 à 160 jours après le semis.

- Maturité physiologique

Le grain, plus résistant à la pression, est à maturité au bout de 160 à 180 jours, avec une teneur en eau inférieure à 15%. Pendant le remplissage des grains depuis la floraison, la plupart des feuilles ont jauni et sont tombées si bien que la défoliation est presque complète à maturité.

1.6. Bilan des connaissances

La plupart des connaissances sur le quinoa sont empiriques, en tout cas *in situ*. Beaucoup des travaux contribuant aux apports récents en agronomie ou en physiologie ont été effectués en milieu contrôlé ou en climat européen. Les processus modélisés demeurent encore minoritaires et embryonnaires (Bois et Germain, 2004 ; Germain, 2004 ; Bertero, 1999b). Une thèse est actuellement en cours sur l'étude de l'efficacité d'utilisation de l'eau et la réponse du quinoa au stress hydrique par le modèle AquaCrop de la FAO (Geerts, 2007 ; Fereres *et al.*, 2006).

Cette absence de travaux préalables nous a ainsi conduits à devoir choisir les formalismes de STICS les moins complexes.

2. Choix des formalismes

2.1. Développement

Le quinoa est une culture annuelle semée. Parmi les stades proposés par STICS, les seuls correspondant à des stades observés connus du quinoa sont la levée (LEV), la floraison (FLO) et la maturité physiologique (MAT). Le stade AMF ne correspond pas à un stade connu, mais sera déterminé à partir de la courbe de taux de couverture. On suppose que le remplissage des grains démarre concomitamment à la floraison, soit que les stades FLO et DRP sont confondus.

Nous avons choisi de piloter le développement par la température de l'air et non par la température de culture pour plusieurs raisons :

- tout d'abord, nos conditions expérimentales ne nous permettaient pas de distinguer des situations optimales (où la température de culture est censée être proche de la température de l'air) de situations non optimales (où la température de culture serait donc plus forte sous l'effet du stress hydrique) ;
- ensuite, la température de culture permet de restituer les raccourcissements de cycle induits par la sécheresse, or c'est plutôt le phénomène inverse qui a été observé chez le quinoa (rallongement du cycle dû à des stress hydriques précoces) ;
- enfin, la température de l'air est une donnée accessible de manière simple, et les résultats obtenus, en termes de sommes de température notamment, sont donc plus facilement transposables.

Le quinoa est considéré comme une plante n'ayant pas de besoin en froid, et non-photopériodique. En effet, la durée du jour aux latitudes considérées (16 à 19°S), calculée sous STICS par les fonctions astronomiques classiques (Sellers, 1965), varie d'un peu plus de 1h (pour une durée moyenne d'environ 13h) pendant la période de culture (1^{er} septembre – 30 avril). De plus, notre dispositif expérimental ne nous permettait pas de tester l'effet de la photopériode, et nous n'avons aucune donnée à disposition. Nous avons donc fait l'hypothèse que cette faible variation de photopériode n'était pas suffisante pour exercer une action sur la plante, même si les variétés utilisées pourraient être légèrement sensibles à la photopériode sous d'autres latitudes (Bertero *et al.*, 1999a ; 2000 ; Bertero, 2003).

En revanche, comme nous l'avons évoqué précédemment, on considère que les stress (*STRESSDEV*) vont rallonger la durée du cycle du quinoa (Jacobsen et Mujica, 2001) et, en particulier pour les stress hydriques précoces, en retarder la floraison.

2.2. Croissance aérienne

Nous avons choisi d'exprimer la surface foliaire en termes de taux de couverture du sol et non de LAI. En effet, ce formalisme simple nous permettait d'une part de nous affranchir de notre jeu de données insuffisant pour un paramétrage plus complexe, et d'autre part de pouvoir plus facilement relier notre travail à des études de télédétection et de spatialisation à venir (Projet Equeco).

Le calcul du rayonnement intercepté par la loi de Beer est la seule option permise lorsque la croissance foliaire est exprimée en taux de couverture.

2.3. Elaboration du rendement

Le quinoa est considéré comme une plante à croissance déterminée, si bien qu'on fait l'hypothèse que le nombre de grains et leur remplissage n'influe pas sur la croissance végétative.

Le critère de récolte choisi est la maturité physiologique, même si elle peut s'avérer difficile à observer avec précision. En pratique, la récolte se fait lorsque le grain "est mûr", c'est-à-dire lorsqu'il a atteint un niveau de dessèchement considéré comme suffisant, mais aucune mesure de l'évolution de la teneur en eau du grain n'était disponible.

2.4. Croissance racinaire

Nous avons choisi ici l'option de répartition par profil type, plus simple à paramétrer que celle en densité vraie en raison du peu de données expérimentales dont nous disposons à ce sujet. La croissance racinaire calculée par le modèle correspondra donc à la densité efficace d'absorption et non à la véritable densité racinaire.

2.5. Fonctionnement hydrique

Le choix de l'approche de type coefficient cultural $K \times ETP$ est rendu obligatoire dans le modèle par l'option "taux de couverture".

2.6. Fonctionnement azoté

Nous avons choisi ici de ne pas activer le stress azoté dans les options générales de simulation. En effet, le manque de données bibliographiques et expérimentales ne nous permettait pas de paramétrer correctement ce module, surtout que le comportement azoté du quinoa semble particulier : malgré une croissance dans des sols très pauvres en azote et en matière organique, le grain de quinoa présente toujours une teneur en protéines élevée. Cette réalité tendrait à montrer que la plante n'est peut-être pas limitée par l'azote, contrairement aux apparences, et qu'une simplification où le stress azoté serait ignoré serait peut-être plus juste que de le prendre en compte avec des paramètres non calibrés. Tout le paramétrage du quinoa sera donc réalisé "comme si" les conditions étaient non limitantes en azote et l'effet du stress azoté sera en fait directement intégré dans les paramètres de croissance aérienne et souterraine. Nous reviendrons sur les différentes hypothèses qui permettraient d'expliquer le fonctionnement azoté du quinoa dans un second temps.

3. Paramétrage à partir de la bibliographie, par analogie ou par expérimentation

Les options de formalisme choisies ci-dessus ont amené à la détermination de 120 paramètres pour le quinoa. Parmi ces 120 paramètres, une trentaine correspond aux choix eux-mêmes des formalismes, et environ 70 ont pu être déterminés par bibliographie, analogie avec d'autres plantes ou mesures expérimentales. Ils sont présentés ici par grandes fonctions de STICS.

La signification et la valeur des différents paramètres sont données dans les différents tableaux de l'Annexe IV.

3.1. Les températures cardinales

Des températures seuils pilotent le fonctionnement de la plante à différents niveaux : la germination (*TGMIN*), le développement (*TDMIN* et *TDMAX*), la croissance foliaire (*TCMIN* et *TCMAX*), la photosynthèse et la croissance en biomasse (*TEMIN*, *TOPT*, *TEMAX*), la croissance et le remplissage des fruits (*TMINREMP* et *TMAXREMP*).

Il est difficile de s'accorder sur les températures cardinales dans la bibliographie, car les références sont d'une part peu nombreuses, d'autre part variables d'une variété à l'autre.

Les températures de base du développement s'étalent ainsi sur une gamme comprise entre -2°C et +6°C (Bertero *et al.*, 1999 ; 2000 ; Bois *et al.*, 2006), selon les origines des variétés et les conditions expérimentales. Pour notre variété altiplanique Surumi, nous avons fixé *TDMIN* à +4°C, ce qui correspond à ce qui avait été utilisé par Germain (2004) et par Bois et Germain (2004) sur cette même variété. Des valeurs plus faibles ont été trouvées en conditions contrôlées sur plusieurs variétés altiplaniques, de +1°C par Bois *et al.* (2006) et de +2°C par Bertero *et al.* (1999b). Cela peut toutefois être expliqué par des réponses à la température différentes entre des conditions contrôlées et une expérimentation en champ, qui font que les valeurs obtenues en conditions contrôlées sont plus faibles (Bertero *et al.*, 1999b). Cette température de base sera considérée valable pour le développement, la croissance foliaire et la croissance en biomasse, à l'exception donc de la germination présentée précédemment (§ 2.3.2. du Chapitre III). La température minimale pilotant le remplissage des grains sera déterminée ultérieurement par optimisation.

Concernant les températures maximales, elles oscillent également, entre 23°C (Germain, 2004, Bois, communication personnelle) et 35°C (Jacobsen et Stolen, 1993) ; nous l'avons fixée à 23°C pour le développement et la croissance, elle sera déterminée par optimisation pour le remplissage des grains.

Le plateau optimal de photosynthèse a été déterminé entre 18°C et 23°C, ce qui est en accord avec les résultats de Bertero (1999b), de Germain (2004) et de Bois *et al.* (2006).

3.2. Le développement

Les différentes valeurs du parcours de développement ont été déterminées en base 4 à partir des données expérimentales.

De l'observation directe de la phénologie, nous avons ainsi obtenu les sommes de température entre la levée et la floraison (*STLEVDRP* = 600°C.j⁻¹) et entre la floraison et la maturité (*STDRPMAT* = 550°C.j⁻¹). La durée de floraison correspond aux travaux de Bois sur la même variété en 2004 (600°C.j⁻¹ en base 4) et en 2006 (870°C.j⁻¹ en base 2), mais est supérieure aux valeurs de Bertero (1999, 2003) sur d'autres variétés en conditions contrôlées (inférieure à 400°C.j⁻¹ en base 3).

Des valeurs de respectivement 200 et 300°C.j⁻¹ ont été choisies pour *STLEVAMF* et *STAMFLAX* d'après les travaux de Bois (2004), AMF correspondant donc au point d'inflexion de la courbe de surface foliaire mais non à un stade "connu" chez le quinoa, et LAX étant défini par une surface foliaire maximale ; celles entre les stades de STICS LAX, SEN et LAN seront déduites ultérieurement des courbes de LAI.

Toutes ces sommes de température seront ré-estimées lors de la détermination du coefficient de stress (*STRESSDEV*) et des paramètres de l'élaboration du rendement pour les dates de floraison et de maturité, ou de taux de couverture pour celles de croissance foliaire.

3.3. Le feuillage

Les paramètres de la courbe de taux de couverture seront déterminés à partir des courbes de LAI mesuré, transformé en taux de couverture, et par optimisation.

LAICOMP est exprimé en LAI pour les autres cultures de STICS et paramétré à une valeur de 0,304, il ne peut donc pas être déterminé par analogie et devra l'être par optimisation. La densité seuil de compétition *BDENS* a été fixée à 7 plantes.m⁻², par analogie avec les autres plantes paramétrées dans STICS et d'après ce qui a été utilisé par Bois et Germain (2004). Dans le cas de la variété Surumi qui peut ramifier, *ADENS* agit comme un paramètre de compensation entre le nombre de ramifications et la densité de plantes. Il est différent entre un semis en ligne et un semis en poquet ; la compétition liée à l'effet de densité est en effet a priori beaucoup plus importante dans un poquet, qui concentre toutes les plantes au même point, que sur une ligne. Pour déterminer *ADENS*, nous avons donc fait l'hypothèse que la densité de semis plus faible en poquet qu'en ligne avait pour but d'homogénéiser les effets de densité subis par les plantes entre les deux types de semis ; autrement dit, l'effet de compétition subi en ligne pour une densité de 220 plantes.m⁻², serait identique à celui subi en poquet pour une densité de 110 plantes.m⁻². Les valeurs obtenues sont de -0,5 pour un quinoa semé en ligne et de -0,8 pour un quinoa semé en poquet.

Le paramètre *PLASTOCHROME* a été estimé à 17°C.j⁻¹ en base 4 d'après nos mesures. Les valeurs trouvées dans la bibliographie pour la variété Surumi ou d'autres variétés altiplaniques sont diverses, 10,5°C.j⁻¹ en base 4 pour Bois et Germain (2004), entre 12,9 et 17,1°C.j⁻¹ en base 1 pour Bois *et al.* (2006), entre 14,9 et 18,7°C.j⁻¹ en base 2 pour Bertero *et al.* (2000), selon les variétés. Bertero (2001) a observé une variation du phyllochrone de 12,6 à 17,1°C.j⁻¹ en base 2 pour une même variété altiplanique selon les conditions expérimentales. Ces valeurs sont toutes plus faibles que la nôtre, mais le fait qu'elles aient été obtenues en conditions contrôlées doit être à l'origine de cette diminution.

Les hauteurs de base (*HAUTBASE*) et maximale (*HAUTMAX*) du couvert ont été fixées à respectivement 0 et 1,50 m d'après Jacobsen et Stolen (1993).

3.4. L'interception du rayonnement

La valeur du coefficient d'extinction de la loi de Beer a été fixée à 0,75, correspondant à celle utilisée par Germain (2004) et Bois (2004).

3.5. La croissance en biomasse

L'efficience de croissance potentielle est définie par 3 paramètres successifs au cours du cycle de la plante. Le premier (*EFCROIJUV*) agit pendant la phase juvénile entre les stades LEV et AMF, le second (*EFCROIPEG*) pendant la phase purement végétative entre les stades AMF et DRP, et enfin le troisième (*EFCROIPEPRO*) pendant la phase de reproduction jusqu'à la sénescence totale des feuilles, entre les stades DRP et LAN. Les trois seront déterminés par optimisation.

3.6. La répartition de la biomasse entre organes

Les paramètres de répartition de la biomasse dans les différents compartiments (feuilles, tiges, organes de récolte) sont utilisés dans le calcul d'un effet trophique sous forme d'un seuil maximal de croissance foliaire, en cas de rayonnement intercepté trop faible pour assurer cette croissance. Dans le cas d'une plante annuelle à croissance déterminée comme le quinoa, l'effet sur le fonctionnement trophique est toutefois très faible. Les paramètres ont tout de même pu être déterminés grâce aux mesures expérimentales de biomasse et de surface.

Les valeurs minimale et maximale de surface spécifique foliaire ont été fixées respectivement à $50 \text{ cm}^2.\text{g}^{-1}$ (*SLAMIN*) et $250 \text{ cm}^2.\text{g}^{-1}$ (*SLAMAX*), du même ordre de grandeur que la valeur moyenne de $150 \text{ cm}^2.\text{g}^{-1}$ utilisée par Germain (2004). Le quinoa étant une dicotylédone, le rapport tige/feuilles est dans le modèle supposé constant au cours du cycle et a été fixé à 0,5. Le poids de l'enveloppe entourant le grain par rapport au poids maximal du grain a été négligé (*ENVFRUIT* = 0), et l'apport de la panicule à la photosynthèse de la plante, donc en équivalent de surface foliaire, également (*SEA* = 0).

3.7. Le rendement

Le nombre de grains produits par gramme de matière sèche par jour (*CGRAIN*) a été fixé à 0,05 par analogie avec les autres plantes paramétrées dans STICS. La durée de la période (*NBJGRAIN*) pendant laquelle le nombre de grains final est établi sera déterminée par optimisation. Les nombres de grains minimal (*NBGRMIN*) et maximal (*NBGRMAX*) par unité de surface ont été estimés dans un premier temps à respectivement 2 500 et 250 000 grains par m^2 , à partir de nos observations sur le terrain et des valeurs moyennes de nombre de grains données dans la bibliographie (Bertero et Ruiz, 2008 ; Bhargava *et al.*, 2007). *NBGRMAX* sera réévalué dans un second temps par optimisation.

La masse de grains est calculée au moyen d'un indice de récolte qui est incrémenté chaque jour selon la vitesse d'augmentation de l'indice de récolte carbone (*VITIRCARB*). Cet indice évolue donc sur la durée de la période entre floraison et maturité physiologique. Nous avons estimé cette durée à environ 85 jours d'après nos mesures, pour atteindre un indice de récolte moyen évalué à 0,35, soit une valeur de *VITIRCARB* fixée à 0,004 grammes de grain par gramme de plante et par jour, avant optimisation. L'indice est borné par une valeur maximale (*IRMAX*), estimée ici à 0,6, à partir de nos observations et de la bibliographie (Bertero *et al.*, 2004 ; Bertero et Ruiz, 2007 ; Bhargava *et al.*, 2007). La masse de chaque grain est bornée génétiquement par une valeur maximale (*PGRAINMAXI*) que nous avons établie à 0,0055 grammes d'après nos mesures expérimentales, mais qui sera optimisée par la suite.

Comme nous l'avons vu précédemment, les températures minimale et maximale autorisant le remplissage des grains seront déterminées par optimisation.

3.8. Les racines

La vitesse de progression du front racinaire (*CROIRAC*) a été fixée en première approche à 0,08 cm de racine par degré-jour (communication personnelle de N. Germain), mais sera réestimée par optimisation.

Concernant le profil type de densité racinaire, la valeur de *ZLABOUR* a été affectée à 30 cm comme dans les fichiers techniques. Par expertise, lors de nos expérimentations ou sur d'autres parcelles cultivées avec des quinoas de même hauteur que les nôtres, nous avons noté que la plupart des racines secondaires du quinoa se trouvaient dans cette couche labourée, relativement étalées en surface, et qu'en dessous ne demeurait que le pivot, sur une profondeur généralement assez faible. Nous avons donc considéré que l'absorption se faisait essentiellement dans les 30 à 50 premiers centimètres, et choisi 40 et 50 cm comme valeurs respectives de *ZPENTE* et de *ZPRLIM*.

Par analogie avec le blé, nous avons considéré une sensibilité à la sécheresse et à l'anoxie maximale (*SENSRSEC* et *SENSANOX* = 0), une sensibilité forte à la contrainte de pénétration dans le cas de sols compacts (*CONTRDAMAX* = 0.3) et un arrêt de la croissance racinaire lorsque débute la sénescence nette de la plante (stade *SEN*).

3.9. Le gel

Différents indices de stress permettent de représenter les dégâts du gel sur la plante selon la température minimale de culture. Ils sont définis par quatre paramètres, d'une part les températures de début d'action du gel (*TDEBGEL*) et létale (*TLETALE*), qui sont valable tout au long du cycle, d'autre part les températures correspondant à 10% (*TGEL_10*) et à 90% (*TGEL_90*) de dégâts par le gel, qui dépendent du stade de développement. Au stade plantule, ils agissent sur la densité de peuplement (*TGELLEV*). Le stade plantule est défini par son nombre de feuilles (*NBFGELLEV*) qui est fixé à 2, d'après la phénologie du quinoa et par analogie avec les autres plantes paramétrées dans STICS. Aux stades juvénile (jusqu'au stade AMF, *TGELJUV*) et végétatif adulte (*TGELVEG*), ils décrivent les impacts du gel sur les feuilles. Enfin, à partir de la floraison, ils sont appliqués pour les effets du gel sur les fleurs et les fruits (*TGELFLO*).

Plusieurs travaux décrivent les effets du gel sur le quinoa à différents stades de développement.

Jacobsen *et al.* (2000b ; 2007) ont observé sur une variété altiplanique des températures de congélation entre -2°C et -3°C pour les tiges et les feuilles, et d'environ -1,5°C à la floraison. Nous avons donc fixé *TDEBGEL* à -1°C. Les travaux de Catacora (1992) ont permis d'estimer *TLETALE* à -16°C.

Les *TGEL10* ont été fixées à -8°C aux stades plantule et juvénile, -4°C au stade végétatif adulte et -2°C au stade reproductif, d'après les résultats de Jacobsen *et al.* (2000a, 2005) et de Monteros et Jacobsen (2001) aux stades deux feuilles, 12 feuilles et floraison. Les *TGEL90* ont quant à elles été évaluées à -14°C aux stades plantule et juvénile (Vacher, 1998), -10°C au stade végétatif adulte en fonction des travaux précédents et par analogie avec le blé, et -5°C pour les fleurs et les fruits (Jacobsen *et al.*, 2000a ; 2005 ; Monteros *et al.*, 2001). Les seuils de dégâts sur les fleurs et les fruits seront optimisés par la suite, en raison de la difficulté à les déterminer précisément à partir des données bibliographiques.

3.10. L'eau

Le calcul de l'évapotranspiration potentielle du système repose sur le coefficient cultural maximal de la culture, *KMAX*. Il a été fixé à une valeur de 1, par analogie avec le blé.

Les stress hydriques et leurs effets sur la transpiration et sur la croissance foliaire sont déterminés au moyen, respectivement, d'un potentiel critique de fermeture stomatique (*PSISTO*), qui intervient dans le calcul du seuil de teneur en eau du sol entre transpiration maximale et réelle, et d'un potentiel de turgescence qui contrôle l'expansion cellulaire (*PSISTURG*). La valeur de *PSISTO* a été établie à 14 bars par Vacher (1998) et Jensen (2000). Celle de *PSISTURG*, par analogie avec le blé, est laissée à 4 bars.

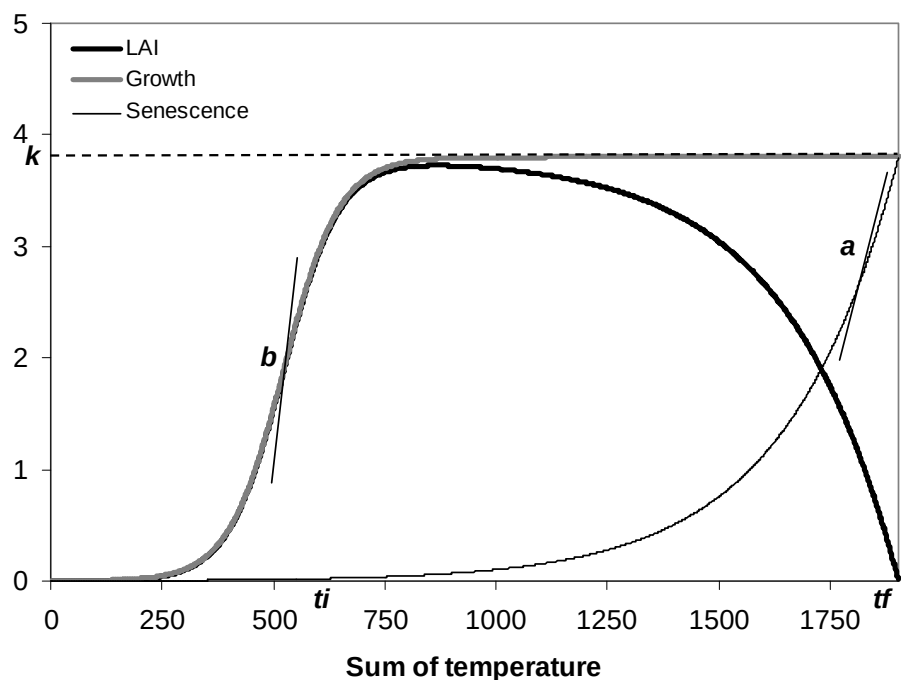
Rappelons que nous ne prenons pas en compte les teneurs en eau des différents organes non récoltés, ni le processus de déshydratation du grain, ce calcul n'étant qu'indicatif et n'ayant pas d'effet dans le modèle.

4. Paramétrage par optimisation

Les paramètres décrits précédemment et dont le calcul nécessite l'utilisation d'une méthode d'optimisation sont présentés dans les différents tableaux de l'Annexe IV.

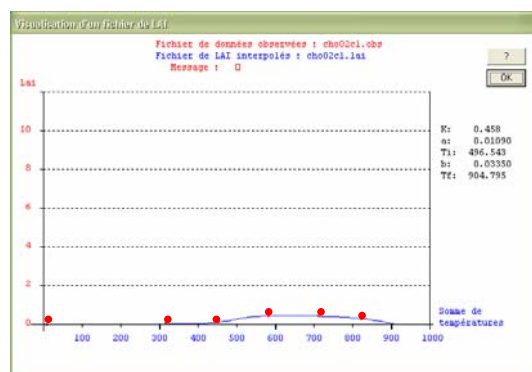
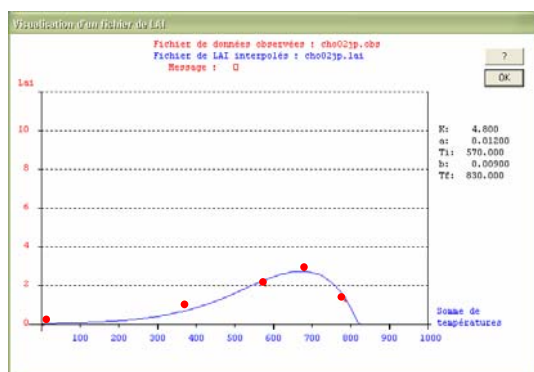
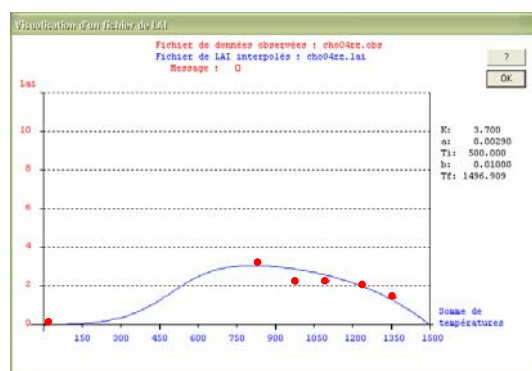
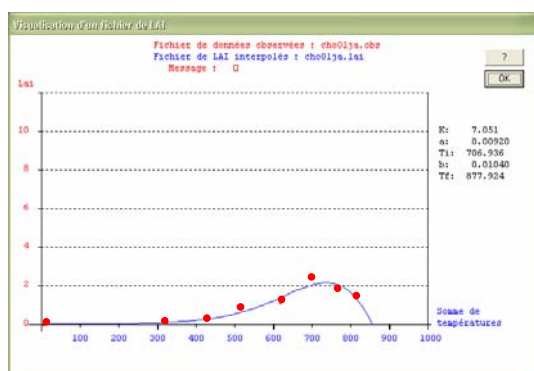
Figure 50. Courbe forcée de LAI et paramètres de STICS

$$LAI(I) = K_{LAI} \left(\frac{1}{1 + \exp(-B_{LAI}(ST_{LAI}(I) - TI_{LAI}))} - \exp(A_{LAI}(ST_{LAI}(I) - TF_{LAI})) \right)$$



(Tiré de Brisson et al., 2008)

Figure 51. Forçage des LAI



4.1. Méthodologie

La méthode d'optimisation utilisée est la méthode d'estimation séquentielle par module (Makowski *et al.*, 2006), qui a déjà été utilisée avec succès pour l'adaptation de STICS à de nouvelles espèces ou de nouvelles variétés (Ghiloufi, 1999 ; Dorsainvil, 2002 ; Houlès, 2004 ; Flenet *et al.*, 2004 ; Launay *et al.*, 2005 ; Brisson *et al.*, 2005 ; Garcia de Cortázar, 2006). Cette méthode procède par des optimisations successives de groupes de paramètres et comporte plusieurs étapes.

La première étape utilise la version de STICS qui permet de forcer le LAI à partir des valeurs expérimentales (version "feuille"). La surface foliaire n'est donc pas calculée mais devient une variable d'entrée journalière, ce qui implique d'interpoler le LAI entre les dates de mesures. Cela permet de réaliser l'optimisation des paramètres des modules dépendant de cette variable capitale sans faire d'erreur sur sa prévision. Les dates observées de levée, floraison et récolte sont également forcées, afin de pouvoir contrôler le cycle de croissance et de développement.

Pour la seconde étape, la version "normale" de STICS est utilisée, qui simule le taux de couverture. L'étape précédente a permis d'obtenir la proportion de rayonnement intercepté et ainsi de transformer nos LAI en taux de couverture observés. Les paramètres régissant la mise en place de ce taux de couverture peuvent donc être déterminés. Le développement est toujours forcé.

Enfin, le développement est simulé sans forçage, et les derniers paramètres sont optimisés.

Nous utiliserons donc nos neuf jeux de données présentant des observations de LAI pour les deux premières étapes, et les cinq derniers seront rajoutés pour la dernière étape.

4.2. Optimisation des paramètres avec forçage du LAI et du développement

4.2.1. Forçage des LAI

La version "feuille" de STICS (Ripoche *et al.*, 2001) utilise un modèle simple de cinétique (Baret, 1986) pour interpoler les LAI avec une courbe à cinq paramètres (Figure 50) :

$$LAI(I) = K_{LAI} \left(\frac{1}{1 + \exp(-B_{LAI}(ST_{LAI}(I) - TI_{LAI}))} - \exp(A_{LAI}(ST_{LAI}(I) - TF_{LAI})) \right)$$

où ST_{LAI} est la somme de température depuis la levée, K_{LAI} correspond au LAI maximal produit (qui est plus élevé que le LAI maximal mesuré, en raison de l'impact de la sénescence), TI_{LAI} et TF_{LAI} sont les sommes de température du point d'inflexion de la courbe et de la sénescence complète, respectivement, A_{LAI} et B_{LAI} décrivent la forme des courbes de croissance et de sénescence. La première composante de l'équation pilote la croissance des feuilles, la seconde leur sénescence.

Pour les jeux de données qui comportent au moins cinq observations de LAI, le modèle ajuste automatiquement les cinq paramètres par une procédure de minimisation, sinon il faut procéder par étapes.

Les dates de levée observées sont renseignées, et une température de base de 4°C est utilisée pour calculer les sommes de température. La figure 51 présente les courbes obtenues de LAI sur nos neuf jeux de données.

4.2.2. Optimisation des paramètres jouant sur la biomasse

Le premier paramètre à estimer est *CROIRAC*, car le module de croissance racinaire conditionne l'alimentation hydrique (et azotée, non prise en compte à ce stade) de la culture et donc la croissance

Figure 51. Forçage des LAI (suite)

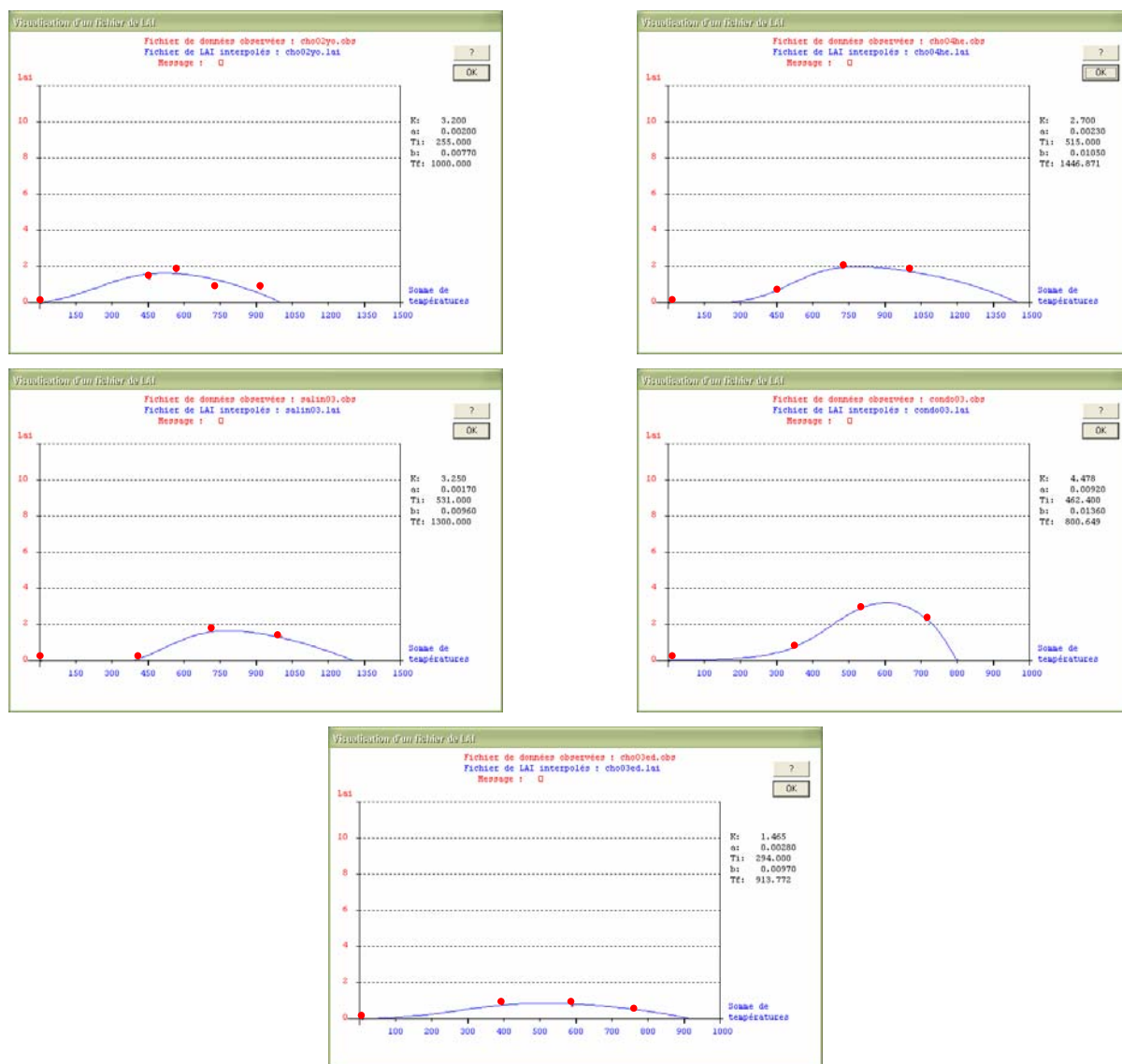
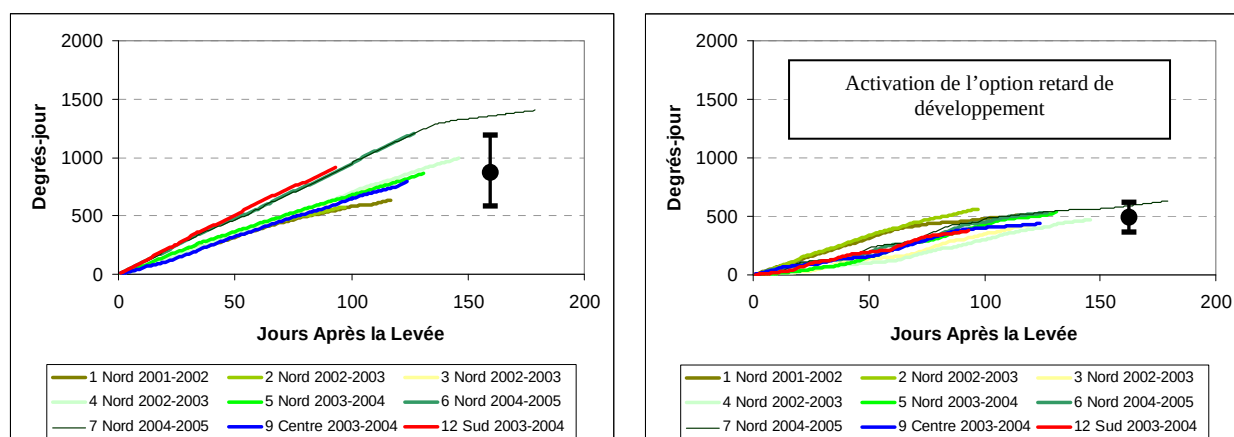


Figure 52. Détermination du coefficient de stress qui minimise les écarts de développement



aérienne. Comme nous ne disposons pas d'observations sur les racines, *CROIRAC* a été optimisé par rapport à la biomasse sèche totale ; une valeur de $0,04 \text{ cm.}^{\circ}\text{C.j}^{-1}$ a été obtenue ; elle correspond aux valeurs les plus faibles dans la gamme de cultures modélisées par STICS (graminées fourragères par exemple).

Conjointement, les efficacités de croissance maximale *EFCROIJUV*, *EFCROIVEG* et *EFCROIREPRO* ont été optimisées elles aussi par rapport à la biomasse sèche totale. Nous rappelons qu'à ce niveau, il est considéré que les efficacités de conversion intègrent les effets du stress azoté. Ces efficacités sont respectivement de 3 g.MJ^{-1} , $2,9 \text{ g.MJ}^{-1}$ et $3,5 \text{ g.MJ}^{-1}$.

Les paramètres impliqués dans la formation du rendement seront ajustés à la fin du processus lorsque le développement ne sera plus forcé.

4.2.3. Détermination du coefficient de stress et des paramètres de développement par utilisation des courbes de LAI

Tout d'abord, nous avons pu nous rendre compte que le comportement du quinoa après la levée est très variable, puisque soit la croissance foliaire démarre presque immédiatement, soit la plantule stagne pendant plusieurs jours, voire semaines, sans réelle augmentation de LAI. Nous avons donc choisi de fixer pour LEV une levée "effective", définie comme la date où le LAI commence réellement à augmenter.

De chaque simulation en version "feuille" de STICS, nous avons extrait les sommes de température de l'air cumulées sur toute cette période de LAI, à savoir entre la levée effective et la sénescence complète des feuilles. Nous avons posé l'hypothèse que cette durée de développement, en conditions optimales, devrait être similaire d'une parcelle à l'autre, et que les différences observées de sommes de température étaient donc dues à l'effet de ralentissement d'un stress hydrique plus ou moins important selon les situations. La valeur de *STRESSDEV* qui minimise ces écarts et qui représente donc au mieux les stress subis dans chaque cas a été estimée à 0,87 (Figure 52). Elle réduit la variabilité du parcours de développement ainsi exprimé tout en en réduisant la valeur absolue, permettant une diminution du coefficient de variation d'une valeur de 33% (somme de température d'environ $900^{\circ}\text{C.j}^{-1}$ avec un écart-type proche de $300^{\circ}\text{C.j}^{-1}$) à une valeur de 15% (somme de $500^{\circ}\text{C.j}^{-1}$ avec un écart-type d'environ $75^{\circ}\text{C.j}^{-1}$).

Enfin, les courbes de LAI ont été normalisées par leur valeur maximale respective et nous en avons déduit les stades LAX, SEN et LAN de STICS, correspondant respectivement au début et à la fin du plateau d'indice foliaire maximal, et à $\text{LAI} = 0$. Le plateau a été considéré atteint à partir de la valeur de 0,95 (Figure 53). Cela a permis de déterminer les sommes de températures correspondantes, avant et après correction par le coefficient de stress. *STLAXSEN* et *STENLAN* ont ainsi été estimés respectivement à 200 et $300^{\circ}\text{C.j}^{-1}$, passant tous deux à $130^{\circ}\text{C.j}^{-1}$ après ajustement pour le stress hydrique. La durée entre les stades LEV-effective et LAX est passée d'environ $500^{\circ}\text{C.j}^{-1}$ (compatible avec nos valeurs bibliographiques de 200 et $300^{\circ}\text{C.j}^{-1}$ pour *STLEVAMF* et *STAMFLAX*), à $230^{\circ}\text{C.j}^{-1}$ après application du coefficient *STRESSDEV*.

4.3. Optimisation des paramètres avec forçage du développement sans forçage du LAI

4.3.1. Détermination des courbes de taux de couverture

L'utilisation de STICS en LAI forcé avec la version "feuille" nous a permis d'obtenir en sortie la variable de pourcentage d'interception du rayonnement (*FAPAR*), de laquelle on déduit directement le taux de couverture (*TAUXCOUV*) par la relation :

$$FAPAR = 0,95 \text{ TAUXCOUV}$$

Figure 53. Détermination des sommes de température de la courbe de LAI

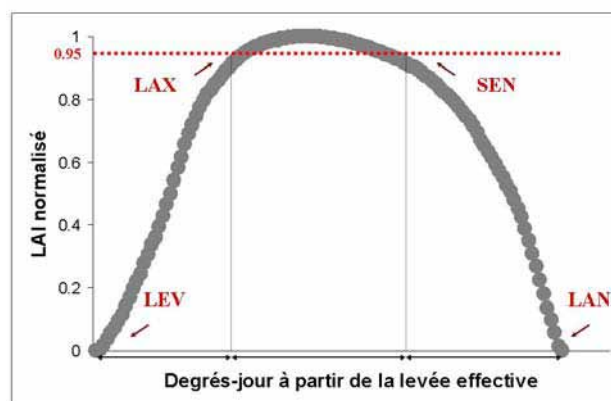


Figure 54. Courbes de taux de couverture d'une plante isolée

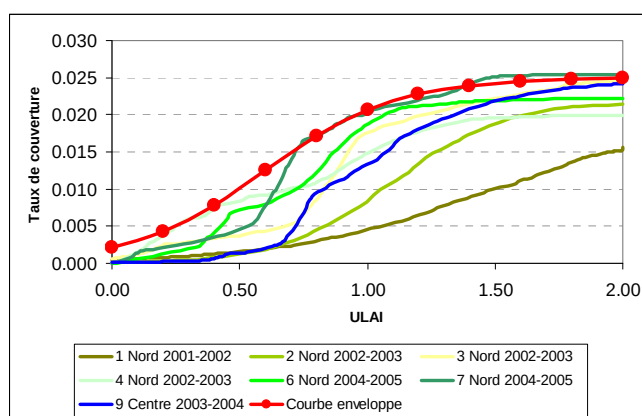


Tableau 23. Valeurs des sommes de température avant et après correction par le coefficient de stress

	Hors effet du stress	Effet du stress
STLEVAMF	200 °C.j ⁻¹	90 °C.j ⁻¹
STAMFLAX	300 °C.j ⁻¹	140 °C.j ⁻¹
STLAXSEN	200 °C.j ⁻¹	130 °C.j ⁻¹
STSENLAN	300 °C.j ⁻¹	130 °C.j ⁻¹
STLEVDRP	600 °C.j ⁻¹	220 °C.j ⁻¹
STDRPMAT	500 °C.j ⁻¹	180 °C.j ⁻¹

Tableau 24. Profondeurs de semis optimisant la levée simulée

NORD	Profondeur de semis	CENTRE	Profondeur de semis
1 Nord 2001-2002	1 cm	9 Centre 2003-2004	4 cm
2 Nord 2002-2003	4 cm	10 Centre 2004-2005	5 cm
3 Nord 2002-2003	1 cm	11 Centre 2005-2006	1 cm
4 Nord 2002-2003	1 cm		
5 Nord 2003-2004	3 cm	SUD	Profondeur de poquet
6 Nord 2004-2005	1 cm	12 Sud 2003-2004	25 cm
7 Nord 2004-2005	2 cm	13 Sud 2004-2005	10 cm
8 Nord 2005-2006	3 cm	14 Sud 2005-2006	15 cm

Nous rappelons que $TAUXCOUV$ est calculé comme le produit du taux de couverture d'une plante isolée multiplié par l'effet de la densité, et est fonction de l'unité de développement $ULAI$, qui varie de 0 à 2 entre les stades LEV-effective et LAX. Après détermination de l'effet densité et transformation des sommes de température en $ULAI$, nous avons donc pu tracer les courbes de taux de couverture d'une plante isolée. Elles sont représentées en Figure 54.

Les valeurs de LAI mesurées à différentes dates sont alors remplacées par leur équivalent en taux de couverture dans les fichiers *.OBS de STICS.

4.3.2. Optimisation des paramètres de taux de couverture

La courbe enveloppe des courbes précédentes est considérée comme le taux de couverture maximal dans nos conditions expérimentales, les écarts avec les autres courbes étant dus aux différences de densité ($DELTA_{dens}$) et de stress ($ULAI$) subis par la culture selon les parcelles. Les valeurs qui permettent de tracer cette courbe enveloppe ont été déterminées graphiquement, soit une valeur maximale ($TRECOUVMAX$) de 0,025, une pente ($PENTRECOUV$) de 3,9 et un point d'inflexion ($INFRECOUV$) de 0,6.

A partir de la valeur de $INFRECOUV = ULAI$ au stade AMF, nous avons déterminé les $UPVT$ correspondant et donc la valeur de $STLEVAMF = 90^{\circ}C.j^{-1}$. Celle de $STAMFLAX = 140^{\circ}C.j^{-1}$ a été déduite d'après la durée entre LEV et LAX obtenue au § 4.2.3 de ce chapitre.

Plusieurs tentatives d'optimisation de ces paramètres par rapport à la biomasse et/ou aux taux de couverture n'ont pas conduit à de meilleurs résultats que ceux obtenus avec notre courbe enveloppe ; nous les avons donc conservés.

Le paramètre $LAICOMP$ a également été déterminé par optimisation par rapport aux variables biomasse sèche totale et taux de couverture, une valeur de 0,04 a été obtenue.

4.4. Optimisation des paramètres avec forçage de la date de levée

Les sommes de température observées atteintes à la floraison et à la maturité ont pu être déterminées à l'étape précédente en dates forcées. Elles ont ensuite été ajustées "manuellement", en développement non forcé, afin de faire correspondre au mieux les dates simulées aux dates observées. Les valeurs obtenues sont de $220^{\circ}C.j^{-1}$ pour $STLEVDRP$ et $180^{\circ}C.j^{-1}$ pour $STDRPMAT$. Le Tableau 23 donne les valeurs de toutes les sommes de température avant et après correction par le coefficient de stress.

Les derniers paramètres à ajuster sont ceux de l'élaboration du rendement. Les paramètres $NBJGRAIN$ et $NBGRMAX$ ont été optimisés par rapport au nombre de grains, les valeurs obtenues sont de 30 jours et 300 000 grains par m^2 . Les paramètres $TGELFLO10$, $TGELFLO90$, $TMINREMP$, $TMAXREMP$ et $VITIRCARB$ et $PGRainMAXI$ l'ont eux été par rapport au rendement. Les températures optimisées sont respectivement de $-6^{\circ}C$, $-13^{\circ}C$, $-2,6^{\circ}C$ et $+34,7^{\circ}C$; la vitesse d'augmentation de l'indice de récolte est de 0,0076 grammes de grain par gramme de plante et par jour ; $PGRainMAXI$ est de 0.005 grammes.

4.5. Cas de la levée

Le problème posé par la levée est qu'il faudrait simuler non plus la date de levée en termes de sortie de terre, mais la date de levée effective en termes d'augmentation du LAI. Or, STICS n'est pas capable de prendre en compte cette distinction. Nous avons donc essayé de la reproduire artificiellement par le biais du paramètre technique qu'est la profondeur de semis, en tentant de déterminer quelle profondeur de semis permettait de simuler la levée la plus proche de la levée observée, en termes de date et de densité. Nous avons ainsi fait varier les profondeurs de semis en ligne entre 1 et 5 cm, les profondeurs de poquet entre 10 et 30 cm, pour voir les effets sur la date de levée simulée. Les profondeurs "optimales" obtenues figurent dans le Tableau 24.

5. Cas particulier de l'azote

Ce travail a pour but de chercher des pistes d'explications au comportement azoté du quinoa ; il ne remet pas en cause l'ensemble du paramétrage précédent car il est basé sur des considérations plus qualitatives que quantitatives. Il ne s'agit pas là d'une utilisation applicative du modèle, mais d'une utilisation heuristique.

5.1. Etat des lieux des connaissances sur le comportement azoté du quinoa

Le nombre d'études menées sur le comportement azoté du quinoa est faible. Comme évoqué précédemment, le quinoa n'est généralement pas fertilisé sur l'Altiplano, à part pour des raisons expérimentales. Ce sont ces résultats que nous présentons ici.

5.1.1. Effets sur la croissance et sur le rendement

Les travaux de Dizès (1992 ; 1993) sur l'Altiplano montrent bien un effet de l'azote minéral sur la hauteur des plants (augmentation significative de 10% pour un apport d'environ 50 kg N.ha⁻¹) et sur le rendement, ainsi que de l'azote organique sur la capacité de rétention d'eau du sol. Les résultats en termes de rendement sont toutefois difficiles à quantifier car les aléas climatiques et phytosanitaires n'ont pas permis de mener l'expérimentation jusqu'à la maturité des plantes.

Une expérimentation menée au Chili a montré un effet clair de la fertilisation azotée sur la croissance du quinoa : la hauteur des plantes augmente de l'ordre de 67% avec un apport de 225 kg N.ha⁻¹ par rapport à un essai sans fertilisation ; la croissance végétative est allongée, avec un retard de la floraison pouvant atteindre 14 jours pour la dose de fertilisation la plus élevée (Berti *et al.*, 1997).

Enfin, une équipe allemande (Schulte auf'm Erley *et al.*, 2004) a cherché à caractériser les besoins azotés et l'assimilation de l'azote d'une culture de quinoa en appliquant une fertilisation différenciée (0, 80 et 120 kg N.ha⁻¹). Il apparaît qu'un apport d'azote a un effet très significatif sur le rendement en grain puisque celui-ci augmente par rapport au témoin de 72% avec 80 kg N.ha⁻¹ et de 94% avec 120 kg N.ha⁻¹ (atteignant ainsi un rendement de 3,5 t.ha⁻¹), ce qui correspond aux résultats obtenus par Jacobsen *et al.* (1994). Cette tendance se retrouve dans l'étude chilienne et pour des doses d'azote encore plus importantes : augmentation du rendement en grain de 130% et 172% pour des apports de 150 et 225 kg N.ha⁻¹ respectivement (Berti *et al.*, 1997). L'indice de récolte n'est pas influencé par l'apport d'azote dans l'étude allemande (environ 0,30) qui teste un apport maximal de 120 kg N.ha⁻¹. Par contre à partir de 150 ou 225 kg N.ha⁻¹ selon les géotypes, l'indice de récolte diminue significativement dans l'étude chilienne.

Aucun effet de la fertilisation azotée n'a pu être mis en évidence sur le poids de 1 000 grains (Berti *et al.*, 1997).

D'après les résultats de l'équipe allemande, ces apports permettent également d'augmenter la teneur en azote du grain (2,06% à 0 kg N.ha⁻¹ et 2,34% à 120 kg N.ha⁻¹) sans augmenter les risques de verse (Schulte auf'm Erley *et al.*, 2004). Cette tendance est moins nette dans l'étude chilienne où l'on détecte une augmentation significative seulement à partir d'un apport de 225 kg N.ha⁻¹ (teneur de 2,4%) (Berti *et al.*, 1997).

5.1.2. Prélèvements et efficience d'utilisation de l'azote

D'après l'étude allemande, l'augmentation de rendement coïncide avec les prélèvements d'azote qui doublent entre le témoin et la fertilisation de 120 kg N.ha⁻¹, passant de 83 kg.ha⁻¹ à 162 kg.ha⁻¹. Bien que l'efficience d'utilisation de l'azote soit assez faible par rapport à d'autres céréales comme le blé et

l'orge, celle-ci avoisine 22 kg de grain par kg d'azote dans les parties aériennes de la plante et ne diminue pas pour des apports d'azote minéral de l'ordre de 120 kg N.ha⁻¹, alors que c'est le cas pour les autres cultures testées (Schulte auf'm Erley *et al.*, 2004). Par contre, l'équipe chilienne ayant testé des apports plus importants, on s'aperçoit que si l'efficacité d'utilisation de l'azote ne diminue pas jusqu'à 150 kg N.ha⁻¹ (se situant autour de 36 kg.kg⁻¹), elle chute pour l'apport de 225 kg N.ha⁻¹ (environ 20 kg.kg⁻¹) (Berti *et al.*, 1997). L'apport d'azote serait donc efficacement utilisé pour la production de grain jusqu'à un apport situé entre ces deux doses.

5.2. Formalismes de STICS

5.2.1. L'offre du sol

L'offre du sol est calculée par couche élémentaire de 1 cm jusqu'à la profondeur maximale atteinte par le système racinaire. Elle est déterminée par deux processus de nature différente, d'une part le transfert de nitrates d'un point du sol vers la racine la plus proche, par convection et diffusion, d'autre part l'absorption active par la racine. Cette dernière dépend de la capacité intrinsèque d'absorption, de la densité racinaire et de la concentration en nitrate dans le milieu extérieur. L'absorption spécifique par unité de longueur racinaire augmente avec la concentration en nitrate selon une double cinétique de Michaëlis-Menten, qui correspond à deux systèmes de transport, à forte (VMAX1 et KM1 faibles) et à faible (VMAX2 et KM2 élevés) affinité.

5.2.2. La demande de la plante

La demande de la plante est estimée en phase végétative par le concept de courbe de dilution (Lemaire *et al.*, 1997), présenté en Figure 16 ; la courbe maximale définit les besoins de la plante, la courbe critique le seuil de stress.

La courbe critique est du type :

$$N = ADIL \cdot MS^{-BDIL}$$

où N est la teneur en azote, MS la matière sèche aérienne en t/ha, $ADIL$ et $BDIL$ les paramètres à ajuster.

Elle est construite en deux parties (une courbe pour les faibles biomasses correspondant à un comportement de type "plante isolée" et une courbe pour les biomasses élevées pour le peuplement dense) à partir de plusieurs hypothèses (Lemaire et Brisson, 2005). Ainsi, au-dessus d'un seuil de matière sèche $MASECNMAX$, séparant la phase "plante isolée" de la phase "peuplement", ces paramètres peuvent être ajustés expérimentalement. En dessous, ils le sont au moyen de la biomasse de la plantule ($MASECMETA$), estimée à 0,04 t/ha pour toutes les espèces, et de son azote métabolique ($NMETA$), qui est fonction du métabolisme de la culture.

La courbe maximale est construite sur le même principe :

$$N_{max} = ADILMAX \cdot MS^{-BDILMAX}$$

- pour la partie "peuplement", les paramètres $BDIL$ et $BDILMAX$ sont égaux (absorption d'azote rétro-régulée par la croissance foliaire) ;
- au point d'intersection $MASECNMAX$, l'écart entre la courbe critique et la courbe maximale est dû à une quantité d'azote de réserve "de luxe" $NRES$;
- pour la partie "plante isolée", l'azote de la plantule n'est constitué que d'azote métabolique et il n'y a pas de réserves initiales.

Tableau 25. Paramétrage initial du fonctionnement azoté

	Paramètre	Signification	Unité	Valeur initiale
Absorption	<i>VMAX1</i>	Vitesse maximale d'absorption du nitrate par le système d'absorption 1 (à forte affinité) des racines	µmole cm ⁻¹ h ⁻¹	0.0018
	<i>VMAX2</i>	Vitesse maximale d'absorption du nitrate par le système d'absorption 2 (à faible affinité) des racines	µmole cm ⁻¹ h ⁻¹	0.05
	<i>KMAXBS1</i>	Constante d'affinité du nitrate par le système d'absorption 1 (à forte affinité) des racines	µmole.cm racine ⁻¹	50
	<i>KMAXBS2</i>	Constante d'affinité du nitrate par le système d'absorption 2 (à faible affinité) des racines	µmole.cm racine ⁻¹	25000
Courbes de dilution et stress azoté	<i>ADIL</i>	Paramètre de la courbe de dilution critique [Nplante]=ADIL MS ⁻¹ (-BDIL)	% MS	5.21
	<i>BDIL</i>	Paramètre de la courbe de dilution critique [Nplante]=ADIL MS ⁻¹ (-BDIL)	/	0.56
	<i>MASECNMAX</i>	Biomasse aérienne à partir de laquelle il y a dilution de l'azote (courbes critique et maximale)	t ha ⁻¹	1.5
	<i>NMETA</i>	Quantité d'azote métabolique dans la plantule (pourcentage de la biomasse aérienne)	%	6.47
	<i>MASECMETA</i>	Biomasse de la plantule ne disposant que de son azote métabolique	t ha ⁻¹	0.04
	<i>NRES</i>	Quantité d'azote maximale de réserve de la plante (écart entre la courbe de dilution maximale et la courbe de dilution critique) (en pourcentage de la biomasse aérienne)	%	1.5
	<i>INNMIN</i>	Valeur minimale de inni (INN instantané) possible pour la culture	/	0.3
	<i>INNGRAIN1</i>	INN minimal pour absorption nette d'azote maximale	/	2
	<i>INNGRAIN2</i>	INN maximal pour absorption nette d'azote nulle	/	2

Tableau 26. Quantités d'azote exportées

	N exporté simulé (kg/ha)	Quantités d'azote plante mesurées (kg/ha)	Quantités hypothétiques d'azote plante attendues * (kg/ha)
1 Nord 2001-2002	9		45
2 Nord 2002-2003	11		20
3 Nord 2002-2003	6		65
4 Nord 2002-2003	7		85
5 Nord 2003-2004	7	60	
6 Nord 2004-2005	5		100
7 Nord 2004-2005	5		
8 Nord 2005-2006	3		85
9 Centre 2003-2004	6	50	
10 Centre 2004-2005	11		
11 Centre 2005-2006	9		30
12 Sud 2003-2004	13	70	
13 Sud 2004-2005	7		45
14 Sud 2005-2006	3		

(* Les quantités hypothétiques attendues sont calculées à partir des biomasses et rendement mesurés, sous l'hypothèse d'une moyenne de 1% d'azote dans les parties végétatives et 2% dans les grains)

Pendant la phase reproductive, la demande liée à la partie végétative de la plante continue d'obéir à la courbe de dilution maximale, tandis que la demande liée aux organes de stockage dépend de l'état azoté de la culture.

5.2.3. Les stress azotés

La variable de stress est un indice de nutrition azotée instantané (Mary et Guérif, 2005). Il est calculé comme le rapport entre la vitesse d'absorption effective et les besoins métaboliques en azote (issus de la courbe critique), c'est-à-dire la vitesse d'absorption minimale permettant d'avoir la croissance maximale. Il permet de mieux décrire les variations rapides de nutrition azotée qu'avec des quantités cumulées.

5.2.4. Paramétrage initial

Le quinoa est considéré comme appartenant à la catégorie de plante non légumineuse.

Les valeurs des paramètres de cinétique d'absorption de Michaëlis-Menten sont laissées aux valeurs par défaut du modèle, par analogie avec la plupart des autres plantes paramétrées dans STICS.

La demande de la plante et les stress sont paramétrés par analogie avec la betterave, en raison de son appartenance à la famille des Chenopodiacees (Tableau 25).

5.3. Hypothèses de travail et méthodologie

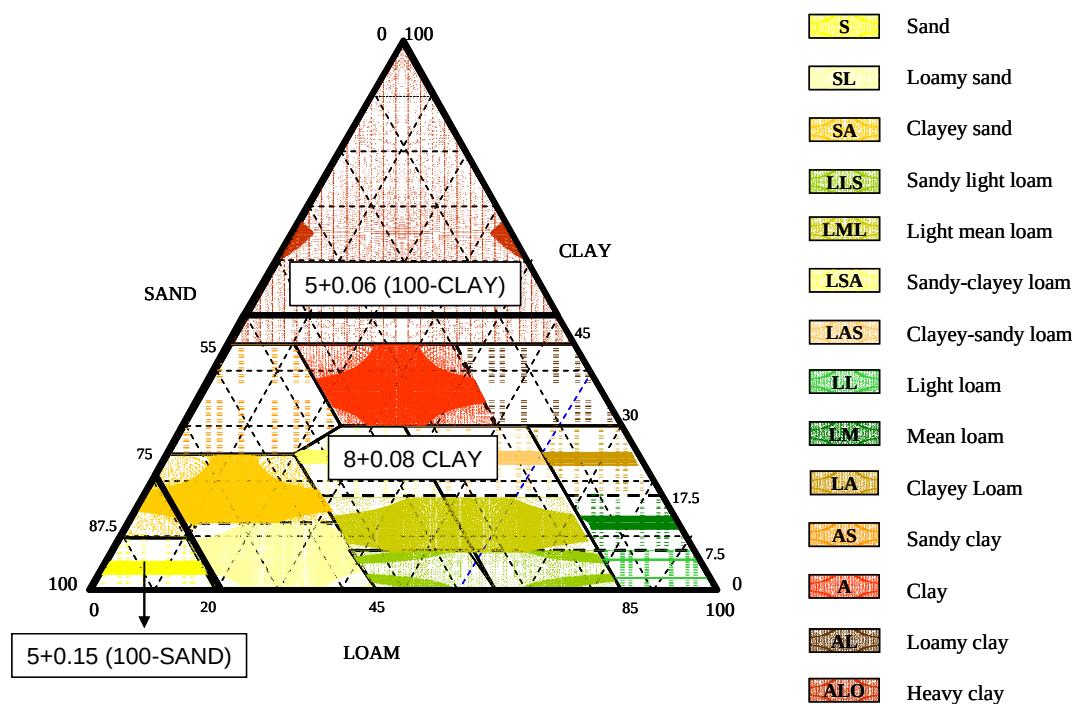
Nos quantités d'azote plante et d'azote grain simulées sont bien inférieures aux quelques quantités mesurées ou attendues (Tableau 26). On estime en effet d'après nos observations et pour nos gammes de rendement que les quantités maximales d'azote exportées par le quinoa au cours d'un cycle seraient de l'ordre de 50 à 100 kg.ha⁻¹, ce qui correspond bien aux données bibliographiques citées précédemment (Schulte auf'm Erley *et al.*, 2004). Or, ces quantités sont présentes dans les sols et nos teneurs simulées en azote du sol en fin de cycle sont toutes supérieures à 100 kg.ha⁻¹. Pour améliorer nos simulations, nous pouvons intervenir à différents niveaux.

- Le sol : l'emploi d'autres fonctions de pédotransfert peut jouer sur le bilan hydrique donc sur le bilan azoté.
- La demande de la culture et le stress : la plage de confort du quinoa vis-à-vis de l'azote est peut-être plus large, les paramètres des courbes de dilution doivent être ajustés.
- L'offre du sol : l'absorption d'azote par les racines simulée n'est peut-être pas assez importante, il est possible de l'augmenter soit par les paramètres d'absorption, soit par la croissance racinaire.
- La croissance de la culture : nous avons vu précédemment que les efficacités de conversion actuelles intégraient l'effet du stress azoté, mais les efficacités réelles sont vraisemblablement plus élevées que ce que nous avons obtenu.

Chacune de ces hypothèses a été étudiée successivement, afin de l'infirmier ou de la confirmer. Pour le sol et la plage de confort vis-à-vis de l'azote (courbe critique), un deuxième jeu de paramètres a été testé, issu de la bibliographie pour le sol et de nos mesures pour la courbe critique. La demande de la plante a été évaluée en testant l'effet de différentes valeurs du paramètre *NRES*. Enfin, l'absorption et la croissance ont été estimées par optimisation. Seul *VMAX2* a été pris en compte pour l'absorption active de la plante (Ruget *et al.*, 2002).

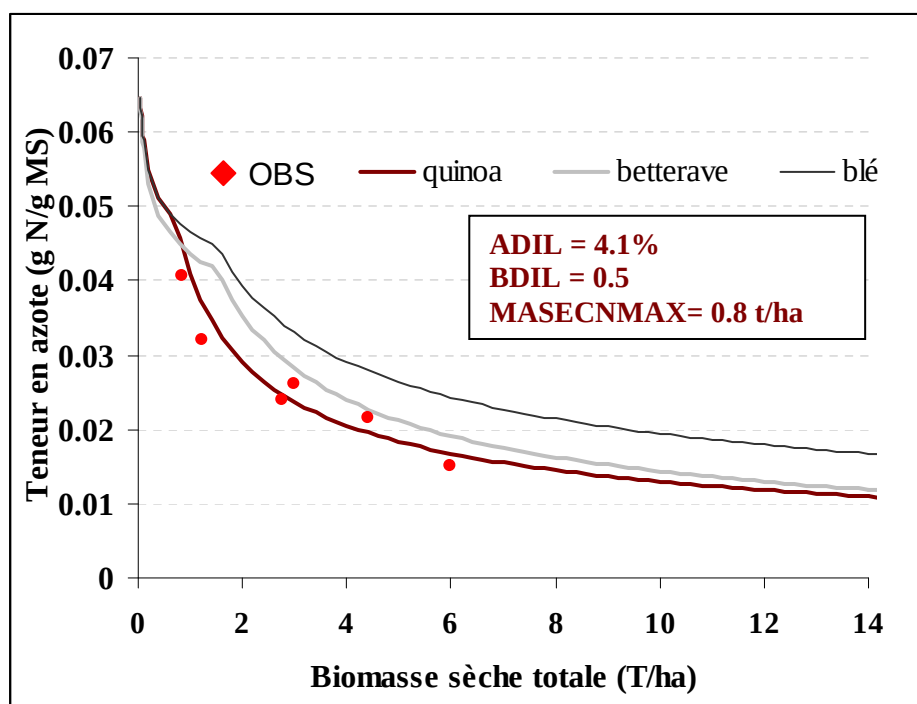
Concernant la plage de confort de la plante, nous avons fait l'hypothèse que nos mesures avaient été réalisées dans des conditions d'alimentation azotée "optimales", à savoir ni stress ni consommation de

Figure 55. Triangle textural de Jamagne et formules pour le calcul du paramètre $Q0$



(Tiré de Brisson et al., 2008)

Figure 56. Courbe de dilution de l'azote pour le quinoa comparée à celles de la betterave et du blé



luxé, afin de pouvoir les situer sur la courbe critique de dilution. Cette hypothèse est a priori discutable, mais un des mécanismes expliquant une telle croissance du quinoa dans des conditions aussi pauvres pourrait être une tolérance plus élevée au stress azoté ; la plante serait ainsi "bien" alimentée en azote même à des teneurs plus basses que pour d'autres cultures.

Le faible nombre de mesures de teneur en azote nous empêche d'optimiser les paramètres d'absorption et de croissance pour la totalité des USM. Nous avons donc fait l'hypothèse qu'une teneur "acceptable" en azote à la récolte serait comprise entre 1 et 2% pour la plante entière, et entre 2 et 3,5% pour les grains, soit 11 à 20% de protéines dans le grain. Cette hypothèse se base sur nos données expérimentales ainsi que sur les valeurs relevées dans la bibliographie (Schulte auf'm Erley *et al.*, 2004 ; Berti *et al.*, 1997 ; Koziol, 1992 ; Cardazo et Tapia, 1979 ; Wright *et al.*, 2002 ; Ayala *et al.*, 2001, Schlick et Budenheim, 1996). Les optimisations seront donc réalisées par rapport à trois variables, la biomasse mesurée *MASEC* et les ordres de grandeur des teneurs en azote de la plante entière *CNPLANTE* et du grain *CNGRAIN*.

5.4. Paramétrage

5.4.1. Les paramètres "sol"

Lorsque toutes les caractéristiques permanentes du sol n'ont pas été mesurées, certaines peuvent être déterminées à partir des données texturales (et éventuellement de teneur en matière organique) par des fonctions de pédotransfert, telles que celles de Rawls et Brakensieks (1989) utilisées ici. Cependant, dans le cas par exemple de l'humidité à la capacité au champ ou de la densité apparente, paramètres qui dépendent fortement de la structure du sol, en particulier pour les horizons de sub-surface, leur estimation uniquement à partir de la texture du sol peut s'avérer délicate (Bruand *et al.*, 1997). Pour s'affranchir de cette incertitude, nous avons testé d'autres fonctions de pédotransfert, fournies par Brisson *et al.* (2008) dans la notice STICS à partir de la bibliographie existante.

Le paramètre d'évaporation du sol *Q0* est ainsi déterminé à partir de la teneur en sable ou en argile, selon les classes texturales définies par Jamagne *et al.* (1977) (Figure 55). Les humidités au point de flétrissement et à la capacité au champ, ainsi que la densité apparente, sont également fixées pour chacune de ces classes. Les classes texturales sont arbitrairement associées aux classes de perméabilité proposées par Ritchie (1985), auxquelles correspondent les quantités d'eau stockées dans la macroporosité s'infiltrant chaque jour. Les règles de pédotransfert utilisées permettent ainsi de calculer le paramètre d'infiltrabilité *INFIL* en fonction de l'épaisseur de la couche. La dépendance de la valeur obtenue à cette épaisseur tend à disparaître lorsque la perméabilité du sol diminue (Brisson *et al.*, 2008).

Un récapitulatif des valeurs obtenues pour nos sols est présenté en Annexe II.

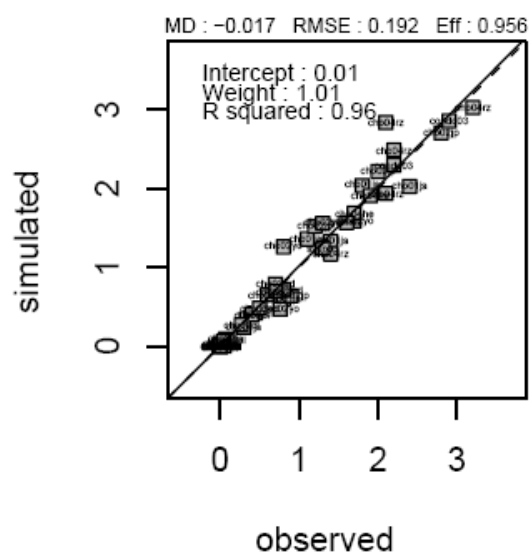
5.4.2. Les paramètres "plante"

A partir de nos mesures expérimentales, nous avons reconstitué une courbe de dilution de l'azote et déterminé un nouveau jeu de valeurs pour les paramètres *ADIL*, *BDIL* et *MASECNMAX* (Figure 56). La valeur de 0,04 pour *MASECMETA* est un seuil indépendant de la plante ; *NMETA* est laissé à 6,47 par analogie avec les autres plantes paramétrées dans STICS ; différentes valeurs de *NRES* seront testées par optimisation. Figurent aussi sur la figure les courbes de dilution critiques de la betterave et du blé. Les valeurs obtenues pour le quinoa semblent assez cohérentes :

- une courbe plus basse, soit, à même teneur en azote, un stress plus tardif ;
- une biomasse séparant les comportements azotés en plante isolée ou en peuplement également plus basse, en lien avec les faibles densités de peuplement.

Figure 57. Qualité de simulation en LAI forcé

a- LAI



b- MASEC

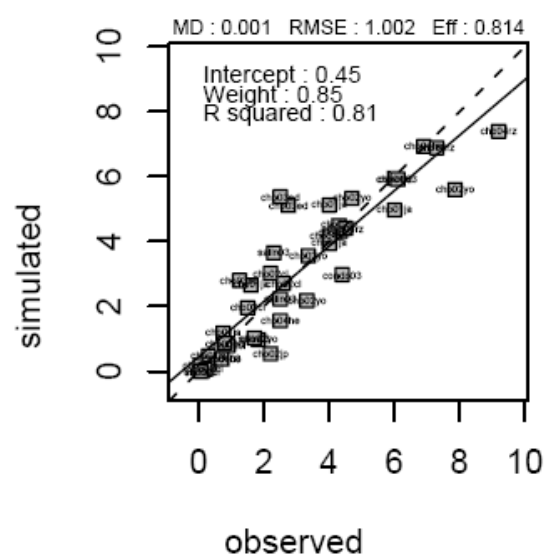


Tableau 27. Critères statistiques en LAI forcé

	LAI	MASEC
Nombre d'observations	46	40
Moyenne	1.01	3.05
Efficiency du modèle	0.96	0.81
RMSE	0.19	1.00
RRMSE	0.19	0.33
RMSEs	0.02	0.34
RMSEu	0.19	0.94
MD	-0.017	0.001

Cela ne remet pas non plus en cause l'utilisation initiale des paramètres de la betterave, les deux courbes étant assez proches.

Les paramètres d'offre du sol (*CROIRAC* et *VMAX2*) et les efficacités de croissance (*EFCROIJUV*, *EFCROIVEG* et *EFCROIREPRO*), sont optimisés conjointement, par rapport aux variables citées précédemment (biomasse, teneur en azote de la plante entière et teneur en azote du grain). Les valeurs obtenues sont respectivement de 3 g.MJ⁻¹, 2,8 g.MJ⁻¹ et 4,2 g.MJ⁻¹ pour les efficacités de croissance, de 0,12 cm.°C.j⁻¹ pour la croissance racinaire et de 0,2 µmole.cm⁻¹.h⁻¹ pour le paramètre d'absorption.

6. Analyse des résultats obtenus

6.1. Qualité de simulation

Cette partie n'a pas pour objet de valider le modèle, mais uniquement de l'évaluer et d'estimer la qualité du paramétrage et de l'ajustement réalisés. A ces fins, les variables de sortie du modèle sont comparées aux mesures expérimentales. Ces variables, pour la plupart utilisées dans les procédures d'optimisation, sont la surface foliaire (*LAI* ou *TAUXCOUV*), la matière sèche totale (*MASEC*) et des fruits (*MAFRUIT*), le nombre de fruits (*NBFRUIT*), ainsi que différents stades phénologiques (levée *LEV*, floraison *FLO* et maturité physiologique *MAT*).

6.1.1. En *LAI* et stades forcés

La Figure 57a montre le résultat du forçage du *LAI* par rapport aux données observées, et la Figure 57b la comparaison entre les valeurs simulées et observées de la matière sèche totale. Les critères statistiques pour chaque variable sont présentés dans le Tableau 27.

Le forçage du *LAI* est concluant, avec une efficacité et un R² supérieurs à 95%. Les valeurs des différents critères statistiques montrent une bonne simulation de la matière sèche totale en *LAI* forcé, avec un biais et une dispersion faibles.

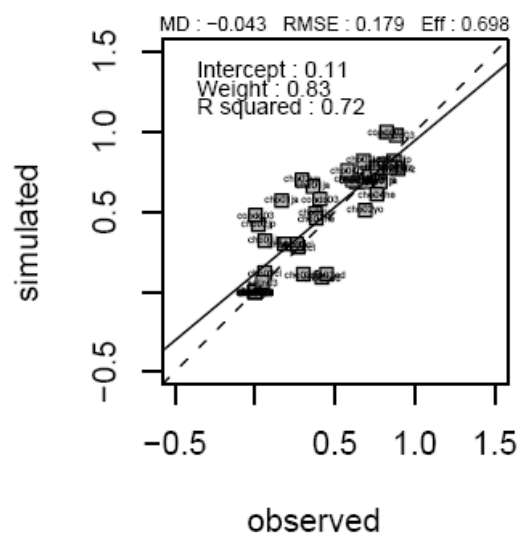
6.1.2. En taux de couverture non forcé et date de levée forcée

Les Figures 58 a, b, c, et d présentent les graphiques comparant les données simulées et observées des variables *TAUXCOUV*, *MASEC*, *MAFRUIT*, *NBFRUIT*, ainsi que des stades phénologiques floraison et maturité physiologique (Figure 59). Le Tableau 28 donne les valeurs des critères statistiques associés.

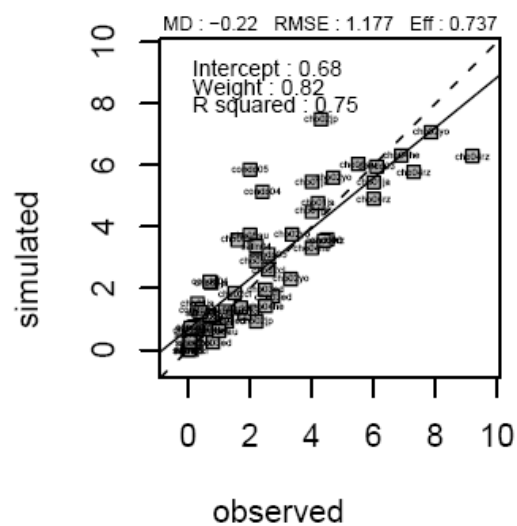
- Taux de couverture (a) : la simulation du taux de couverture s'avère assez satisfaisante, avec une efficacité du modèle relativement bonne, pour des mesures couvrant l'ensemble de cycle. Le biais et la dispersion sont faibles, malgré une légère surestimation en milieu de cycle, et une légère sous-estimation en fin de cycle.
- Matière sèche totale (b) : les valeurs de matière sèche demeurent bien simulées sans forçage du taux de couverture, même si une très légère dégradation par rapport à la Figure 57b peut être observée. L'efficacité du modèle est plus élevée que pour le taux de couverture, mais c'est également le cas du biais et de la dispersion. Pour les valeurs élevées de matière sèche, le modèle entraîne une sous-estimation, qui peut être liée à la sous-estimation du taux de couverture citée précédemment, mais aussi au faible nombre de points observés dans des gammes de valeurs aussi élevées.
- Nombre de fruits (c) et rendement (d) : le nombre de fruits est la variable qui présente l'erreur et la dispersion les plus importantes. Des explications de cette mauvaise simulation peuvent

Figure 58. Qualité de simulation en taux de couverture non forcé

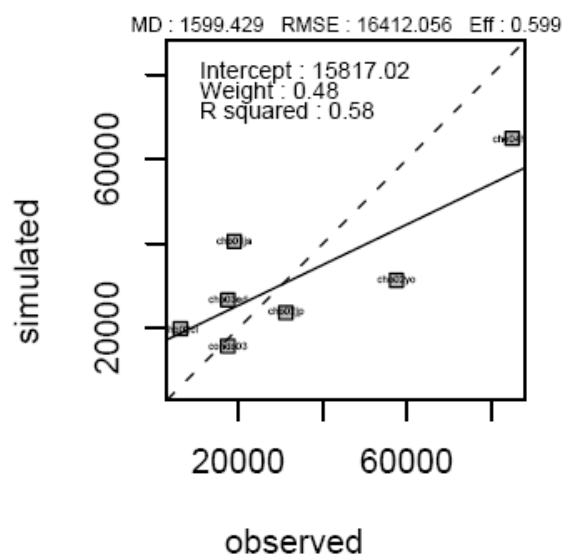
a- TAUXCOUV



b- MASEC



c- NBFruits



d- MAFRUIT

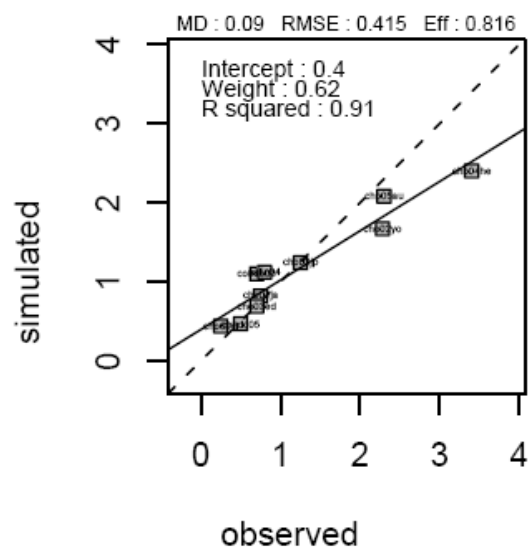
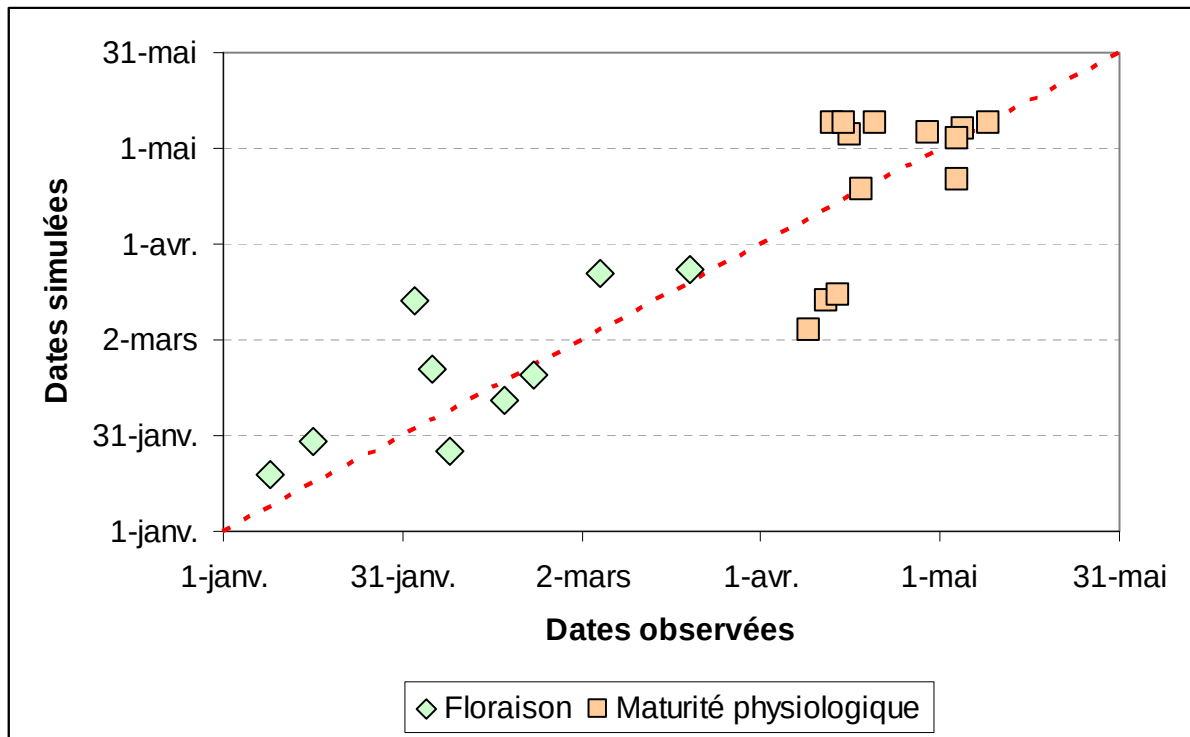
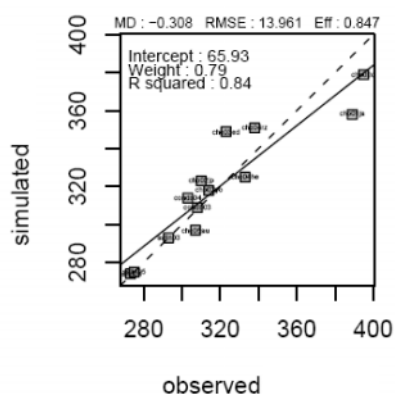


Figure 59. Simulation de la phénologie (date de floraison et de maturité physiologique)**Tableau 28.** Critères statistiques en taux de couverture non forcé

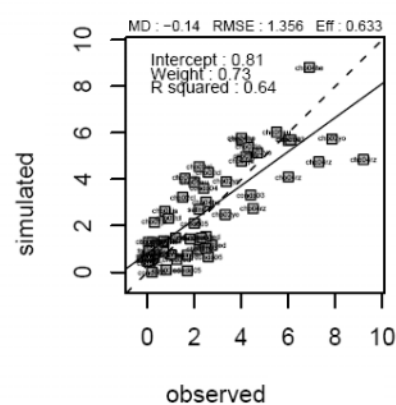
	TAUXCOUV	MASEC	MAFRUIT	NBFRUIT	Date Floraison	Date Maturité
Nombre d'observations	44	55	10	7	9	13
Moyenne	0.42	2.51	1.29	33421	12 février	23 avril
Efficiencie du modèle	0.70	0.74	0.82	0.60	0.66	-1.75
RMSE	0.18	1.18	0.42	16412	11.90	16.30
RRMSE	0.43	0.47	0.32	0.49	0.03	0.03
RMSEs	0.07	0.47	0.38	13599	6.78	1.44
RMSEu	0.17	1.08	0.18	9189	9.79	16.22
MD	-0.043	-0.220	0.090	1599	-6.556	-1.308

Figure 60. Qualité de simulation en date de levée non forcée

a- Date de levée



b- MASEC



c- MAFRUIT

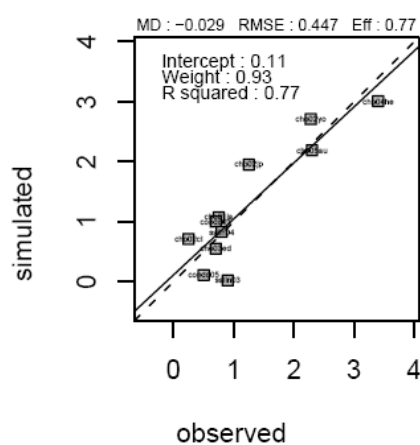


Tableau 29. Critères statistiques en levée non forcée

	Date levée	MASEC	MAFRUIT	Date Floraison	Date Maturité
Nombre d'observations	13	58	11	9	13
Moyenne	16 novembre	2.49	1.26	12 février	23 avril
Effcience du modèle	0.85	0.63	0.77	0.31	-3.50
RMSE	13.96	1.36	0.45	17.00	20.14
RRMSE	0.04	0.54	0.36	0.04	0.04
RMSEs	7.33	0.62	0.07	10.86	7.13
RMSEu	11.88	1.21	0.44	13.08	18.84
MD	-0.308	-0.140	-0.029	-4.444	5.143

être trouvées dans la détermination du nombre de fruits observés, calculé dans certains cas à partir du poids de 100 grains, dans d'autres à partir du poids de 1 000 grains, avec des écart-types pouvant s'avérer importants (données non représentées). L'impact sur le rendement se révèle toutefois assez faible, avec une compensation sur le poids des grains, faisant ainsi du rendement la variable la mieux représentée avec une très bonne efficacité du modèle. Le biais et la dispersion sont faibles, malgré toujours une légère sous-estimation des valeurs les plus élevées. La majorité des rendements de quinoa se situant plutôt dans la gamme de valeurs "bien simulées" par le modèle, ce résultat est considéré comme très satisfaisant.

- **Phénologie (Figure 59) :** la date de floraison est assez bien simulée, malgré une tendance à la surestimation. La récolte en revanche, non reconnue comme un stade phénologique en lui-même mais déclenchée dans le modèle au stade maturité physiologique, est représentée avec une erreur et une dispersion fortes. Cela peut être dû à des erreurs expérimentales, la maturité physiologique étant un stade difficile à observer. Cela peut également venir du fait que la récolte est parfois motivée par des critères techniques ou environnementaux (récoltes le même jour de parcelles géographiquement proches, pluies ou gel qui accélèreraient la récolte, ou au contraire conditions favorables permettant de laisser sécher sur pied après la maturité,...) qui ne sont pas pris en compte par le modèle. De fait, ce que nous avons considéré comme une maturité physiologique est ici davantage une maturité de récolte qui intègre le dessèchement du grain, et pourrait donc survenir plus tardivement que la véritable maturité physiologique ; Berti *et al.* (1997) estiment par exemple que la période optimale de récolte se situe 15 à 20 jours après la maturité physiologique.

6.1.3. *En levée non forcée*

Pour ajuster la date de levée, il a fallu jouer sur le paramètre technique qu'est la profondeur de semis (Tableau 24).

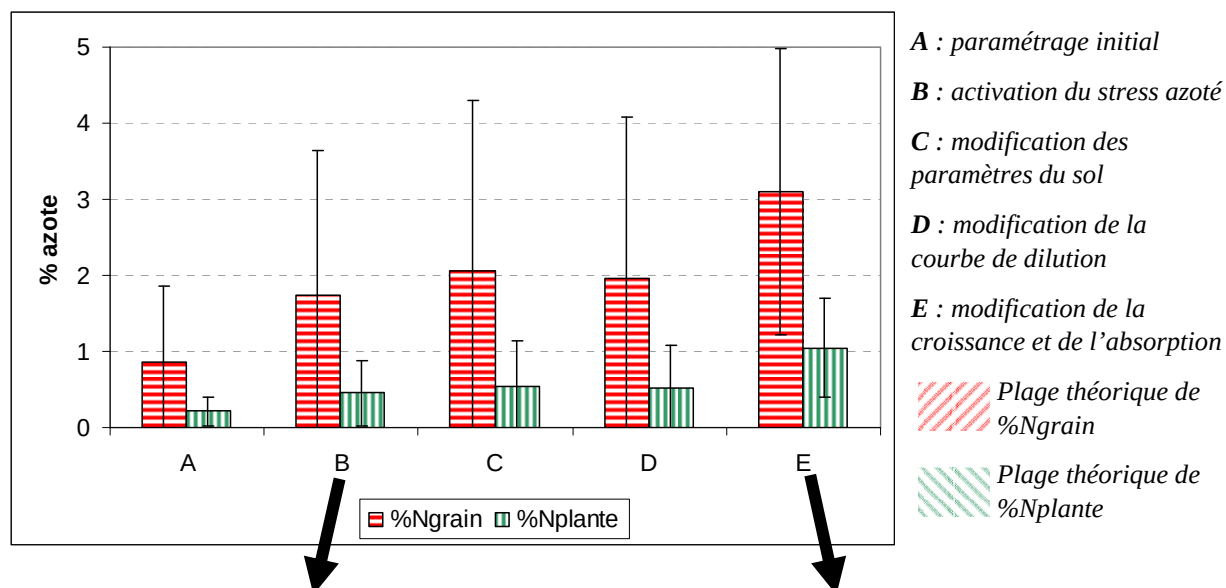
Concernant le semis en ligne dans le Nord et le Centre, les valeurs obtenues sont assez différentes d'un site à l'autre et d'une année sur l'autre, avec des profondeurs globalement plus importantes dans le Centre que dans le Nord. Cela rejoint ce qui avait été vu au Chapitre III, les pluies plus faibles dans le Centre peuvent être suffisantes pour humecter rapidement la graine, mais non pour garantir sa levée, c'est pourquoi un enfouissement plus profond permet d'attendre l'arrivée de pluies conséquentes.

Pour le semis en poquet dans le Sud, les profondeurs de poquet à atteindre diffèrent également selon les années. Les résultats sont en accord avec l'évolution de l'humidité du sol déterminée au § 4.3.1 du Chapitre III (Figure 34). Le semis le plus profond, supérieur à 25 cm, est obtenu sur le cycle 2003-2004, le plus sec au moment du semis. En revanche, en 2004-2005, les pluies survenues au moment exact du semis ont humidifié le sol et permettent un poquet peu profond. Enfin, en 2005-2006, le poquet doit être situé au moins à 15 cm de profondeur pour être au contact de l'humidité.

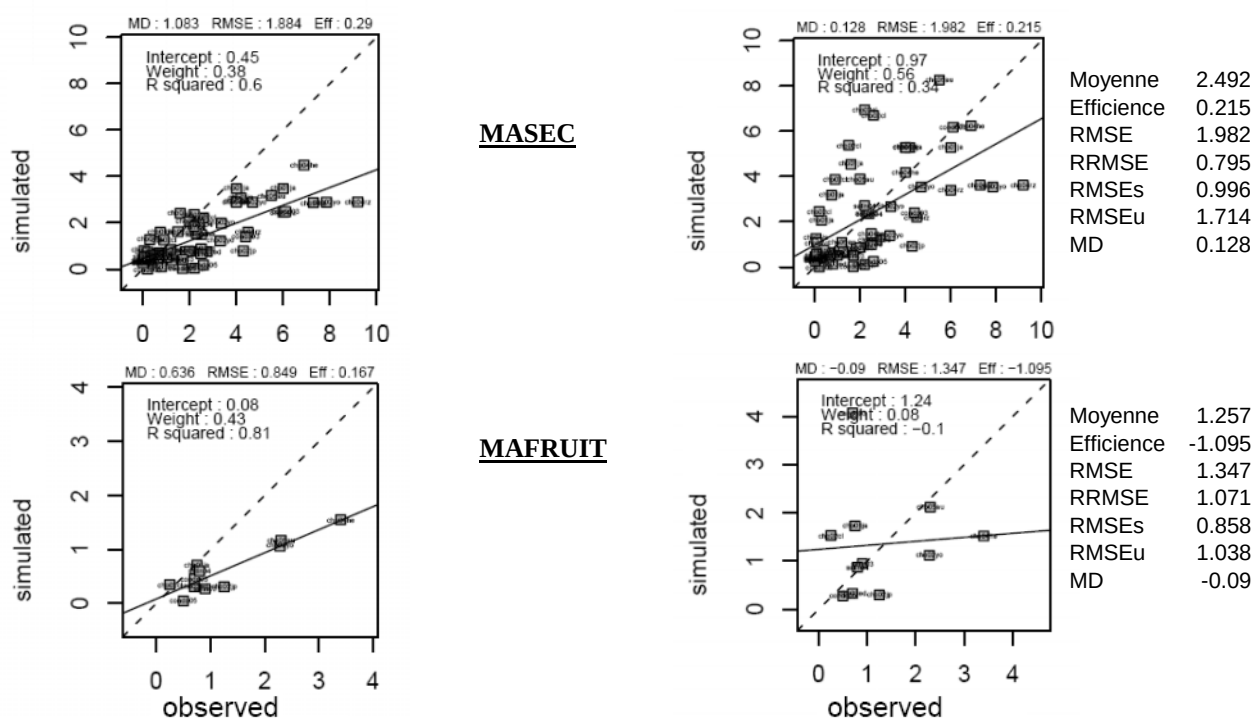
La simulation résultante de la date de levée est assez satisfaisante (Figure 60a), en particulier dans le cas du semis en poquet. L'efficacité du modèle est élevée, le biais et la dispersion modérés. Toutefois, malgré cette bonne qualité de simulation, le passage d'une date de levée forcée à une date de levée non forcée a des conséquences sur la biomasse (Figure 60b) et le rendement (Figure 60c) qui s'en trouvent un peu dégradés. C'est également le cas pour la phénologie, avec une plus grande dispersion des dates de floraison et de maturité physiologique (données non représentées). Malgré un biais légèrement réduit, la dispersion de la biomasse et du rendement est plus importante et l'efficacité du modèle moins bonne, bien que demeurant satisfaisante (Tableau 29).

Figure 61. Evolution de la teneur en azote de la plante entière (%Nplante) et des grains (%Ngrain), de la biomasse et du rendement, de l'absorption et de la demande, avec les modifications de paramétrage

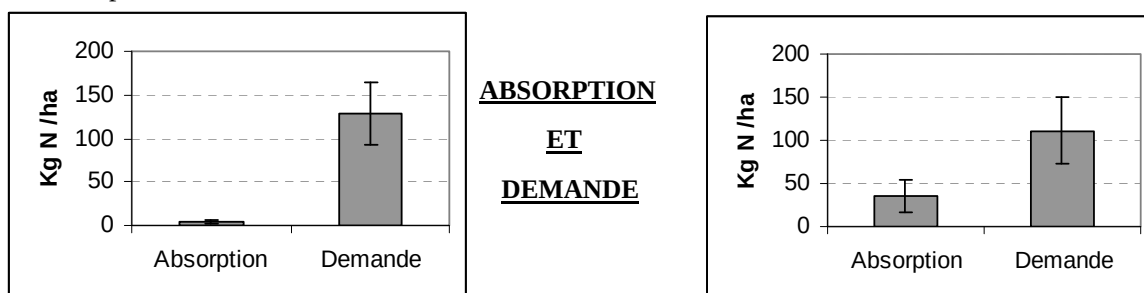
a- Teneurs en azote



b- Biomasses et rendements



c- Absorption et demande



6.2. Cas de l'azote

L'évolution des différentes variables considérées (a- teneurs en azote, b- biomasses et rendements, c- absorption et demande) en fonction des modifications successives de paramétrage est résumée en Figure 61.

L'activation du stress azoté (B) entraîne une sous-estimation importante de *MASEC* et de *MAFRUIT*.

Le changement de paramétrage du sol par d'autres fonctions de pédotransfert (C) n'entraîne pas de modification notable sur *MASEC* et *MAFRUIT* (données non représentées), montrant une faible sensibilité du modèle. Les effets sur les teneurs en azote plante et grain sont également peu importants et non significatifs, sauf sur les sols sableux de l'Altiplano Sud où les profondeurs du front racinaire ainsi que les quantités d'azote absorbées sont bien supérieures (données non représentées). La suite des simulations s'effectue donc avec ce nouveau paramétrage sol.

La modification des paramètres de la courbe de dilution (D), donc de la plage de confort de la plante, n'a pas non plus d'effet, ni sur la biomasse (données non représentées) ni sur la teneur en azote de la plante et du grain. C'est également le cas de la demande de la plante (paramètre *NRES*). Les sorties du modèle montrent en effet une demande de la plante de l'ordre de 110 kg/ha sur le cycle de culture, donc suffisante si l'on se réfère aux valeurs bibliographiques. Il a de plus été vu précédemment que l'azote était présent en quantités suffisantes dans le sol.

Le facteur limitant est donc l'absorption d'azote, les sorties montrant une absorption journalière qui ne satisfait que 1 à 10% de la demande. Une désactivation du stress hydrique dans le modèle n'améliore pas ces valeurs d'absorption, qui de ce fait ne semble pas limitée par une humidité trop faible du sol (données non représentées). L'augmentation par optimisation des paramètres de croissance aérienne, de croissance racinaire et d'absorption (E) permet d'améliorer la satisfaction de la demande et d'obtenir des teneurs en azote plus proches de la plage théorique. La biomasse et le rendement obtenus avec ce paramétrage ne présentent pas de biais, mais une dispersion très importante, et ne sont pas donc pas réellement satisfaisants.

Même si elle détériore la qualité globale du modèle, seule l'explication par une augmentation de l'absorption racinaire offre des ordres de grandeur "acceptables" en termes de quantités d'azote exportées par la culture. La valeur de *VMAX2*, multipliée par 4 par rapport à la plupart des autres plantes paramétrées dans *STICS*, n'est pas forcément réaliste. Des expérimentations en milieu contrôlé seraient nécessaires afin de vérifier le niveau réel d'absorption chez le quinoa.

6.3. Capacités et limites du modèle, processus encore insuffisamment pris en compte

D'une manière globale, le modèle simule de façon assez satisfaisante le fonctionnement du quinoa sur l'Altiplano bolivien, avec des estimations correctes de la surface foliaire, de la matière sèche, du rendement et de la phénologie. La méthode de paramétrage est également satisfaisante car elle permet à la fois l'estimation des différents paramètres et une meilleure compréhension du modèle.

Néanmoins, les paramètres de croissance aérienne (*EFCROIJUV*, *EFCROIVEG* et *EFCROIREPRO*) et racinaire (*CROIRAC*) intègrent actuellement les effets du stress azoté et leurs valeurs sont certainement inférieures aux valeurs réelles. Cet effet de l'azote sur la croissance racinaire pourrait d'ailleurs expliquer les faibles profondeurs d'enracinement obtenues, comprises en moyenne entre 15 et 20 cm (données non présentées), par une simulation non d'un enracinement réel mais d'une profondeur efficace d'absorption.

La simulation d'une levée "effective", à savoir marquée par le début réel de la croissance de la surface foliaire, au lieu d'une levée "sortie de terre", pose toujours problème. D'une part, nous n'avons pas réussi à simuler cette capacité du quinoa à rester parfois en "croissance ralentie" après la levée ; d'autre part, la simulation de la date de levée effective a été réalisée en jouant sur un critère technique

et non sur un paramétrage de la plante. Une explication à ce décalage pourrait être le mode de semis des agriculteurs, par lequel le lit de semences se trouve en fait réparti sur plusieurs centimètres de profondeur, permettant ainsi de s'affranchir en partie des problèmes de sécheresse du sol. Ce cas sera traité dans le chapitre suivant. Une solution palliative serait l'utilisation conjointe de données de télédétection, la levée effective étant alors repérable sur les images satellites.

Le cas de l'azote n'est pas non plus résolu. Les solutions proposées améliorent certes les valeurs d'azote simulées, les rapprochant des teneurs bibliographiques, mais n'arrivent pas à maintenir la qualité de simulation de la biomasse ni du rendement ; de plus leur validation n'est pas possible en l'absence de mesures. Il faudrait également s'interroger sur la restitution d'azote au sol due à la sénescence des feuilles très tôt dans le cycle, comme cela peut être observé chez le colza par exemple (Morot-Gaudry *et al.*, 2006 ; Dejoux *et al.*, 2000 ; Colnenne *et al.*, 1998 ; Aufhammer *et al.*, 1994 ; Triboï-Blondel, 1988). De même, le bilan hydrique et la croissance racinaire nécessiteraient des mesures expérimentales car ils n'ont pas pu ici être étudiés en détail. Le renseignement des paramètres qui caractérisent le sol demeure également un problème, car les informations nécessaires ne sont pas toujours mesurées en routine, en particulier les teneurs en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement. La validité sur les sols boliviens des fonctions de pédotransfert utilisées pour leur détermination n'a pas pu être vérifiée.

Une des difficultés principales du paramétrage du modèle est l'importance des jeux de données nécessaires et de la quantité de mesures à réaliser. Dans notre cas, en particulier, la qualité de l'échantillonnage (plusieurs échantillonneurs par parcelle, différents d'un site et d'une année sur l'autre) et l'hétérogénéité des parcelles (en termes de densité, de développement et de croissance des plantes) peuvent mettre en péril la représentativité des données mesurées. De plus, certaines conditions inhérentes à l'Altiplano bolivien (éloignement des parcelles, climat, mouvements sociaux,...) rendent parfois les déplacements, et donc les mesures, impossibles. Il faut également souligner que l'obtention de données climatiques journalières sur chaque site est difficile.

Enfin, se pose la question du domaine de validité du paramétrage réalisé ici. En l'absence de toute validation possible, par manque de données, cette version de STICS-quinoa ne reste applicable qu'à nos conditions pédoclimatiques et techniques sur l'Altiplano bolivien. L'extrapolation à d'autres variétés n'est pas non plus possible avant de pouvoir vérifier la nature variétale ou non des différents paramètres du modèle.

En l'état actuel des choses, on peut considérer le modèle STICS dans sa version adaptée au quinoa comme un outil suffisamment abouti pour être utilisé à des fins d'expérimentation numérique sur le quinoa, ou pour des études d'impact ou prospectives sur l'Altiplano bolivien ou dans des conditions similaires ; il ne se prête pas encore à la simulation de situations concrètes précises ni à la prévision de rendement, pour lesquelles son paramétrage devra d'abord être rendu plus robuste par de nouvelles mesures expérimentales. La suite de ce travail porte sur l'utilisation du modèle en expérimentation numérique selon différents scénarios techniques.

CHAPITRE V

Chapitre V : Application - Etude de cas

1. CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE	169
2. INTERET D'UN SEMIS HETEROGENE	171
2.1. DISPOSITIF EXPERIMENTAL	171
2.2. EFFETS SUR UN SEMIS EN LIGNE	171
2.3. EFFETS SUR UN SEMIS EN POQUET	171
3. EFFET DES TECHNIQUES D'IMPLANTATION SUR LE RENDEMENT	175
3.1. DISPOSITIF EXPERIMENTAL	175
3.2. COMPARAISON ENTRE LES SITES	175
3.3. COMPARAISON DES TECHNIQUES DANS L'ALTIPLANO SUD	181
4. IMPACT DE L'ACCELERATION DES ROTATIONS.....	183
4.1. DISPOSITIF EXPERIMENTAL.....	183
4.1.1. <i>Enchaînement des rotations</i>	183
4.1.2. <i>Itinéraires techniques</i>	183
4.1.3. <i>Etat initial</i>	184
4.1.4. <i>Options de simulation</i>	185
4.2. EFFET SUR LA TENEUR EN EAU DU SOL	185
4.3. EFFET SUR LA FERTILITE DU SOL.....	185
4.3.1. <i>Azote minéral</i>	186
4.3.2. <i>Matière organique</i>	189
4.4. EFFET SUR LES RENDEMENTS ET LES TENEURS EN AZOTE	191

1. Contexte et problématique

Malgré les difficultés et l'isolement du milieu, les producteurs de l'Altiplano bolivien, de la région du Salar en particulier, sont devenus en 15 ans les premiers exportateurs mondiaux de quinoa. Grâce aux innovations et à leur organisation, ils ont réussi à diffuser leur production labellisée en agriculture biologique dans les réseaux de commerce solidaire et même aujourd'hui dans ceux de la grande distribution. Cette réussite évite à de nombreuses familles de petits producteurs l'exode vers les villes ou les pays étrangers ; néanmoins, elle provoque aussi le retour de nombreux migrants et crée de nouvelles difficultés (Laguna, 2002).

En effet, si les surfaces cultivées ont été augmentées par l'expansion des cultures vers les plaines traditionnellement laissées à l'élevage, et si le travail agricole a été allégé par la mécanisation, ces transformations récentes ont entraîné aussi toute une série de problèmes nouveaux : conflits d'usage avec l'élevage et conflits territoriaux entre communautés ; érosion des sols ; uniformisation de la production ; creusement des inégalités sociales et marginalisation des systèmes traditionnels de gestion collective des terres et des risques climatiques ; émergence de logiques individualistes et non plus communautaires ; enfin, dépendance accrue vis-à-vis du commerce international (Winkel, 2006). À ces mutations locales, se joint celle à plus grande échelle due au changement climatique, qui vient s'ajouter à l'imprévisibilité d'un climat déjà lié aux oscillations d'El Niño. Conjugués aux changements socio-économiques, ces changements globaux transforment aussi les modes d'usage des terres.

Ainsi, cette accentuation de la pression sur les ressources naturelles et les changements de mode de vie remettent en cause les bases écologiques, sociales et économiques de la durabilité du système ; elle se traduit déjà depuis quelques années par une diminution progressive mais notable des rendements des cultures.

D'un point de vue agricole, la mécanisation et la modernisation des systèmes de culture tendent vers une homogénéisation des pratiques et une disparition des techniques traditionnelles. Dans l'Altiplano Centre, par exemple (même si cette situation n'a pas été considérée ici), le labour précédant la pomme de terre, visant à assurer le stock d'eau du sol, n'est parfois plus réalisé en fin de saison des pluies mais peu de temps avant le semis. Dans l'Altiplano Sud, les semis des parcelles de plaine sont parfois effectués en ligne et non plus en poquet comme sur les versants. Les périodes de jachère sont raccourcies et la diminution de l'élevage ne suffit plus à garantir le transfert de fertilité vers les parcelles cultivées ; le faible recours à la fertilisation (le plus souvent organique mais parfois minérale) ne semble pas non plus compenser cette perte de fertilité (Felix, 2004).

L'intérêt de la jachère longue et du labour précoce en saison des pluies pour la restauration de la fertilité et le stockage de l'eau dans le sol a été étudié à plusieurs reprises (Hervé *et al.*, 1994 ; Vacher *et al.*, 1994 ; Hervé et Rivière, 1998 ; Pestalozzi, 2000 ; Sarmiento et Bottner, 2002 ; Hervé *et al.*, 2003 ; Bottner *et al.*, 2006). Les fonctions potentielles de la jachère longue sont diverses, enrichissement de l'horizon labouré et amélioration de ses propriétés physiques, réduction de la pression des pathogènes, production de fourrage, ... (Hervé et Rivière, 1998). Les mécanismes de la régénération de la fertilité ont été analysés par Pestalozzi (2000) qui montre que les teneurs en éléments nutritifs du sol n'évoluent pas avec l'âge de la jachère. Le facteur le plus important est la production de biomasse qui s'avère être essentiellement souterraine, ce qui est caractéristique en particulier des espèces fourragères andines souvent hémicryptophytes (Weberbauer, 1945) ; elle est constituée de racines fines dont la décomposition rapide est favorisée par le labour. Le stockage de l'eau dans le sol est lui assuré par le labour précoce pendant la saison des pluies ; ce stock d'eau est conservé jusqu'au semis suivant en raison d'une évaporation et d'une évapotranspiration très faibles (inférieures à 1 mm par jour) pendant la période hivernale, même lorsque la jachère est couverte de végétation (Vacher *et al.*, 1994).

Figure 62. Variation du rendement avec la profondeur de semis pour chaque parcelle

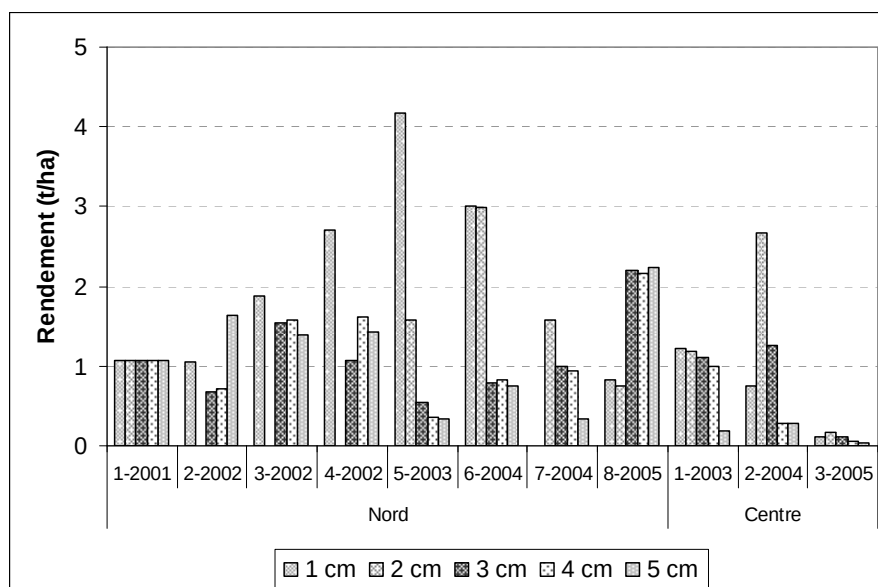
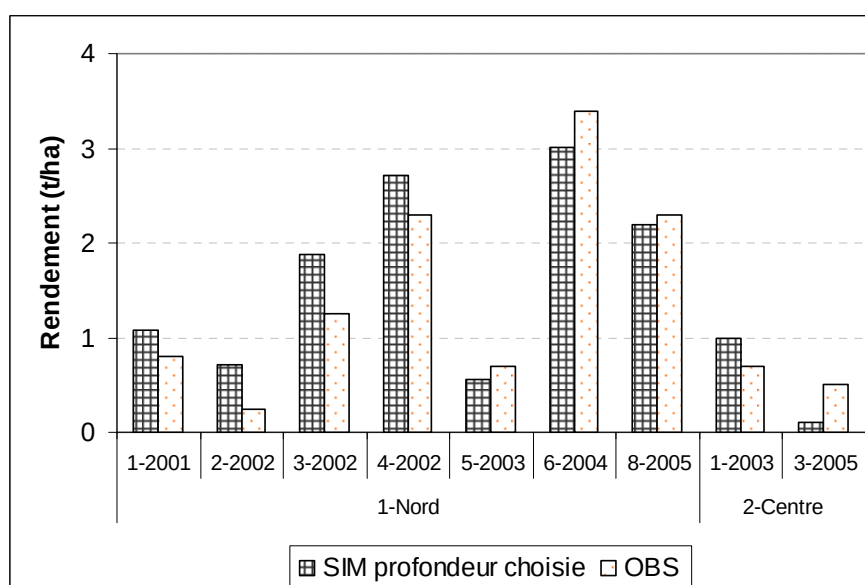


Tableau 30. Coefficient de variation du rendement entre profondeurs de semis pour chaque parcelle

	Parcelle	Gammes de rendement (t/ha)	Coefficient de variation par rapport à la profondeur de semis
Nord	1-2001	1.1	0%
	2-2002	0 - 1.6	74%
	3-2002	0 - 1.9	58%
	4-2002	0 - 2.7	72%
	5-2003	0.3 - 4.2	117%
	6-2004	0.8 - 3.0	72%
	7-2004	0 - 1.6	80%
	8-2005	0.8 - 2.2	47%
Centre	1-2003	0.2 - 1.2	46%
	2-2004	0.3 - 2.7	94%
	3-2005	0 - 0.2	54%

Figure 63. Comparaison entre rendement observé et rendement simulé à la profondeur choisie



Nous nous sommes donc intéressés ici, par expérimentation numérique, à quelques unes de ces techniques traditionnelles ou à l'effet de leur modification. Tout d'abord, à partir de nos données observées réelles, nous testerons l'intérêt d'un semis hétérogène sur le rendement. Ensuite, nous analyserons les effets possibles des différentes pratiques d'implantation sur la fin du cycle du quinoa. Enfin, nous étudierons l'impact de la diminution des durées de jachère et donc de la modification des itinéraires techniques sur les bilans hydriques et azotés du sol ainsi que sur les rendements.

2. Intérêt d'un semis hétérogène

2.1. Dispositif expérimental

Pour tester l'effet de la profondeur de semis sur le rendement, nous avons repris les 14 jeux de données décrits précédemment au § 4 du Chapitre II (Tableau 11). Les valeurs testées de profondeur de semis sont celles utilisées dans l'expérimentation numérique du Chapitre III, c'est-à-dire entre 1 et 5 cm en ligne, entre 10 et 30 cm en poquet. Dans le cas du semis en poquet, nous avons aussi fait varier entre 1 et 5 cm la profondeur de la graine dans le poquet, comme au § 4.3.4 du Chapitre III (alors qu'elle avait sinon une valeur fixe de 2 cm dans les simulations réalisées).

2.2. Effets sur un semis en ligne

La Figure 62 présente les variations de rendement avec la profondeur de semis sur les parcelles de l'Altiplano Nord et de l'Altiplano Centre. Les rendements obtenus sont très variables, pouvant être divisés par 10 entre les profondeurs 1 et 5 cm (parcelle Nord 2003), pour un coefficient de variation moyen par rapport à la profondeur de semis de 65% sur l'ensemble des deux sites (Tableau 30) ; le coefficient de variation sur chacun des sites seuls est également de 65%. Pour la parcelle Nord 2001 qui présente un coefficient de variation nul, l'hypothèse peut être faite que le semis très tardif (mi-décembre, donc lorsque la saison des pluies avait déjà commencé), a permis une levée homogène et uniforme quelle que soit la profondeur, d'où des cycles de développement et des rendements identiques.

Sur la Figure 63 sont comparés les rendements simulés obtenus à la profondeur de semis choisie sur chaque parcelle (Tableau 24 du Chapitre IV) et les rendements observés ; le rendement n'avait pas été mesuré en 2004 sur les parcelles Nord-7 et Centre. La moyenne des rendements simulés est de $1,37 \text{ t.ha}^{-1}$, celle des rendements observés de $1,36 \text{ t.ha}^{-1}$ et leur différence n'est pas significative au seuil des 5% (Test de Student). La qualité de simulation du rendement est donc satisfaisante ; ces résultats mettent également l'accent une nouvelle fois sur l'aspect déterminant de la levée chez le quinoa, une simulation correcte de la levée aboutissant à une simulation correcte du rendement.

La Figure 64 illustre l'intérêt d'un semis hétérogène. Elle donne les rendements simulés moyens sur l'ensemble des profondeurs (représentées en écart-type), c'est-à-dire correspondant à un lit de semences hétérogène étalé sur 5 cm de profondeur. Cette hétérogénéité du semis permet ainsi au contraire une plus grande homogénéité des rendements entre les parcelles autour d'une valeur moyenne de $1,1 \text{ t.ha}^{-1}$. L'effet sur le coefficient de variation du rendement entre parcelles (Tableau 31) est très net, la valeur obtenue pour un semis sur l'ensemble des profondeurs (39%) étant bien inférieure à celles pour chacune des profondeurs, mais aussi à celle pour le jeu de profondeurs choisies et à celle des rendements observés (73% en moyenne sur l'ensemble de ces situations).

2.3. Effets sur un semis en poquet

Dans le cas d'un semis en poquet, deux variables interviennent qui sont la profondeur du poquet d'une part et la profondeur de la graine dans le poquet d'autre part.

Figure 64. Intérêt d'un semis hétérogène (ensemble des profondeurs) sur la variabilité du rendement

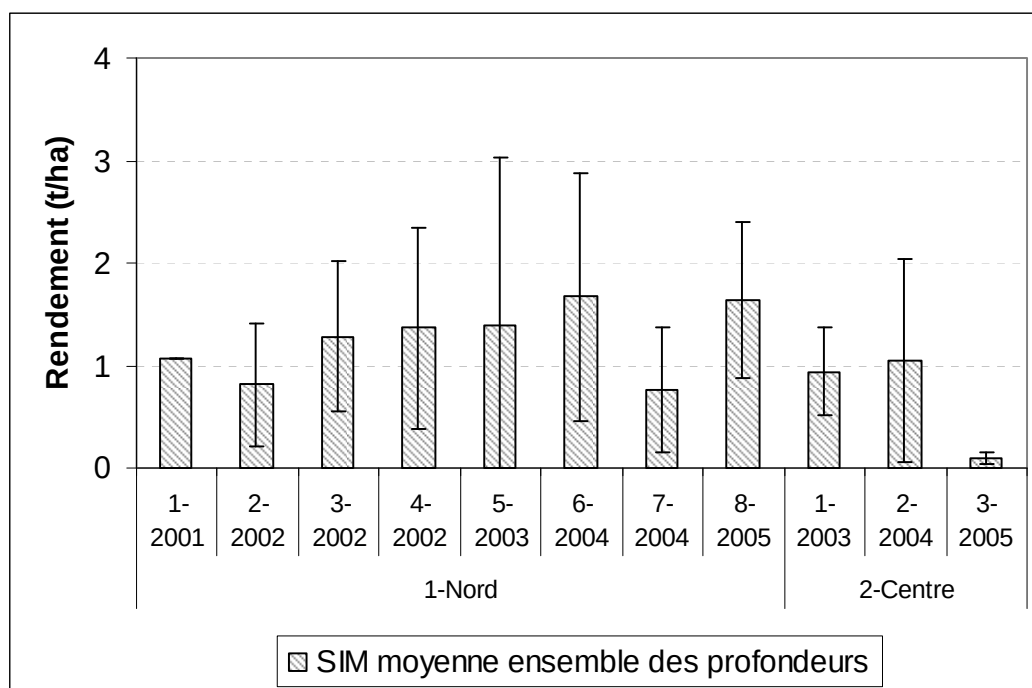


Tableau 31. Coefficient de variation du rendement entre parcelles pour chaque profondeur de semis

Profondeur	Coefficient de variation par rapport à la parcelle
1 cm	80%
2 cm	92%
3 cm	50%
4 cm	63%
5 cm	78%
Observés	79%
Moyenne simulée à la profondeur choisie	68%
Moyenne simulée sur l'ensemble des profondeurs	39%

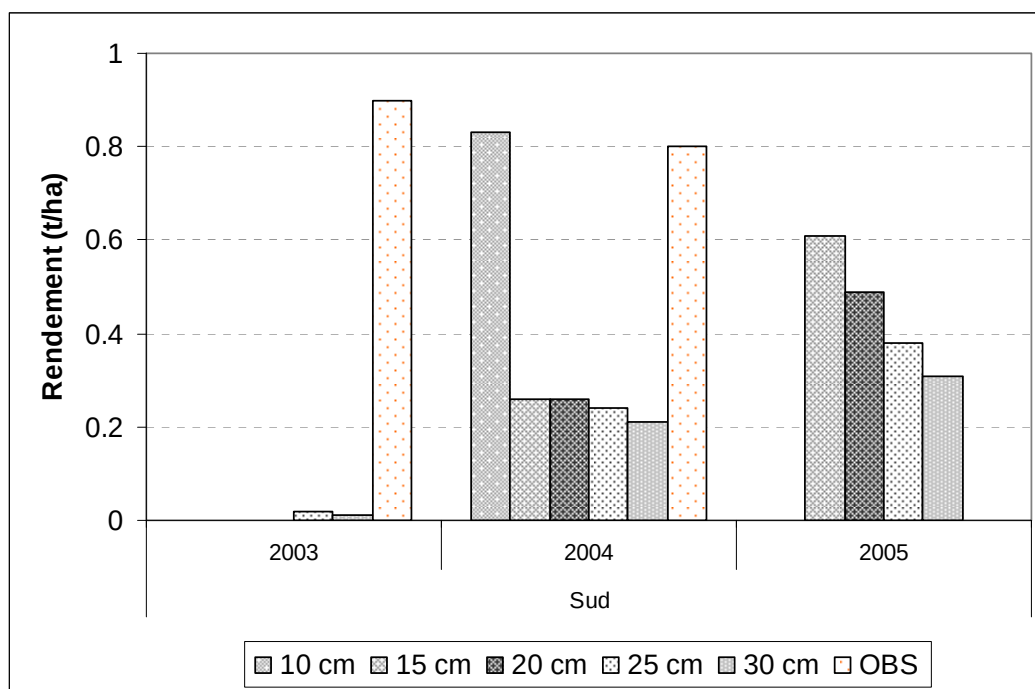
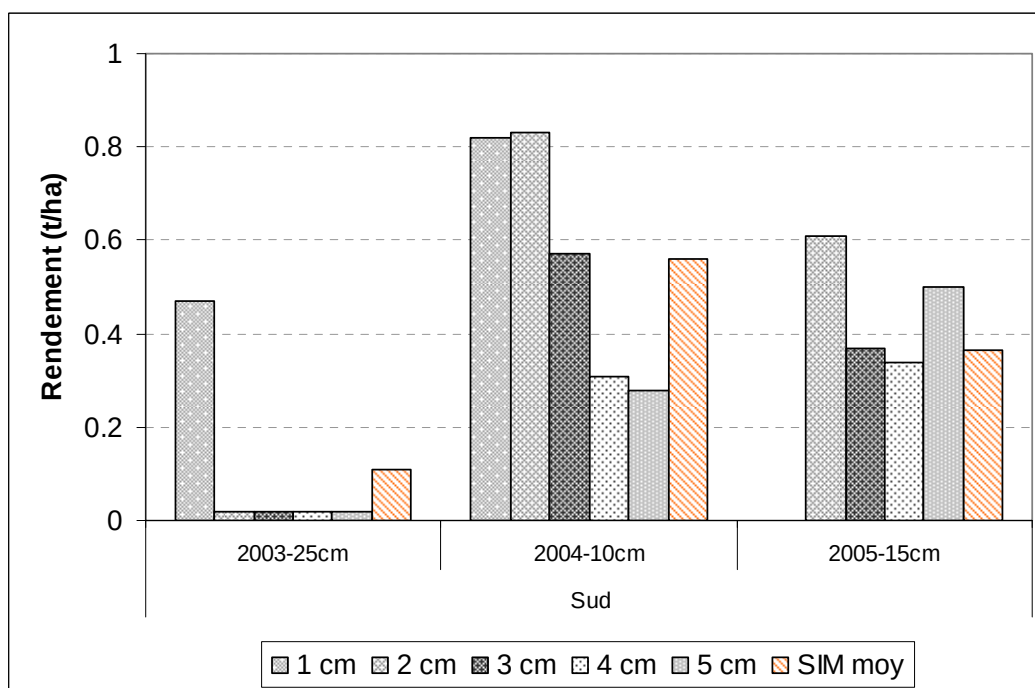
Figure 65. Effet de la profondeur du poquet sur le rendement**Figure 66.** Effet de la profondeur de la graine dans le poquet sur le rendement

Tableau 32. Dispositif de l'expérimentation numérique sur les trois sites

SITE		Nord	Centre	Sud				
		Semis : ligne Labour : mai Battance	Semis : ligne Labour : mai Battance	Semis : poquet Labour : février Ø				
CYCLE		2003-2004	2004-2005	2005-2006				
SOL <i>(d'après les sols définis à la Figure 25)</i>	Nord	Sol n°5	Sol n°6	Sol n°8				
	Centre	Sol n°9	Sol n°10	Sol n°11				
	Sud	Sol n°12	Sol n°13	Sol n°14				
DATE DE SEMIS		15 août	1 ^{er} sept.	15 sept.	1 ^{er} oct.	15 oct.	1 ^{er} nov.	15 nov.
PROFONDEUR DE SEMIS	Ligne	1 cm	2 cm	3 cm	4 cm	5 cm		
	Poquet	10 cm	15 cm	20 cm	25 cm	30 cm		

Tableau 33. Dispositif de l'expérimentation numérique sur l'Altiplano Sud

SITE		Sud							
CYCLE		2003-2004	2004-2005	2005-2006					
SOL		Sol n°12	Sol n°13	Sol n°14					
LABOUR		1 ^{er} février	15 mai						
DATE DE SEMIS		15 août	1 ^{er} sept.	15 sept.	1 ^{er} oct.	15 oct.	1 ^{er} nov.	15 nov.	
TYPE DE SEMIS		Ligne	Poquet						
PROFONDEUR DE SEMIS	Ligne	1 cm	2 cm	3 cm	4 cm	5 cm			
	Poquet	10 cm	15 cm	20 cm	25 cm	30 cm			

Tableau 34. Dates butoir de récolte déterminées par l'occurrence des premières gelées à -6°C

	2003-2004	2004-2005	2005-2006
Nord	06-mai	28-avril	29-avril
Centre	06-mai	19-avril	19-avril
Sud	21-avril	14-mai	05-mai

La Figure 65 présente les rendements obtenus selon la profondeur du poquet, pour une profondeur de la graine dans le poquet de 2 cm utilisée dans les simulations du Chapitre IV. Les données absentes correspondent soit à une levée nulle, soit à une levée trop tardive qui conduit à un rendement considéré comme non viable car les plantes n'auraient pas eu le temps d'arriver à maturité avant les premiers gels. Le rendement simulé moyen est de $0,24 \text{ t.ha}^{-1}$ pour un coefficient de variation entre les parcelles de 96%. Il est difficile d'estimer la qualité de simulation du rendement en raison du faible nombre de situations et de l'absence de valeur observée en 2005 ; il est extrêmement sous-estimé en 2003 et bien simulé en 2004. Les profondeurs minimales de poquet correspondent à celles déterminées au Tableau 24 et sont donc cohérentes avec la Figure 34.

A ces profondeurs minimales de poquet (25 cm en 2003, 10 cm en 2004 et 15 cm en 2005), nous avons analysé l'effet de la profondeur de la graine dans le poquet (Figure 66). Un semis hétérogène sur l'ensemble des cinq profondeurs permet à nouveau de réduire les écarts entre les parcelles, avec un coefficient de variation de 66% pour une valeur simulée moyenne de $0,35 \text{ t.ha}^{-1}$. Néanmoins, au cas par cas, en 2003, une profondeur de la graine dans le poquet de 1 cm aurait donné le rendement simulé le plus proche de la valeur observée (même si encore sous-estimé) ; en 2004, c'est la profondeur de 2 cm que nous avons choisie qui permet la meilleure estimation du rendement, meilleure que la valeur simulée en moyenne sur l'ensemble des profondeurs. Les données sont trop peu nombreuses pour pouvoir en tirer des conclusions comme dans le cas d'un semis en ligne.

3. Effet des techniques d'implantation sur le rendement

3.1. Dispositif expérimental

Cette expérimentation numérique est menée en deux étapes. Dans un premier temps, le dispositif expérimental décrit au § 4.2 du Chapitre III est utilisé, à l'exception du labour et du type de semis qui restent ceux pratiqués dans la région d'étude ; sont donc appliqués un labour en mai avec un semis en ligne dans l'Altiplano Nord et l'Altiplano Centre et un labour en février avec un semis en poquet dans l'Altiplano Sud (Tableau 32). Dans un second temps, nous ne travaillerons plus que sur l'Altiplano Sud, où l'ensemble des techniques citées précédemment est testé. Seule la profondeur de poquet varie, la profondeur de la graine dans le poquet est fixée à 2 cm (Tableau 33). L'effet de la croûte de battance n'est pris en compte que sur l'Altiplano Nord et l'Altiplano Centre.

Une date butoir de récolte est déterminée pour chaque année et chaque site en fonction de l'occurrence des premières gelées. La température minimale seuil choisie est *TGELFLO10*, à partir de laquelle les dégâts du gel sur les fruits dépassent 10%, soit -6°C . Les dates obtenues dans chaque cas sont répertoriées au Tableau 34. Nous ne prendrons en compte que les rendements des plantes arrivées à maturité à cette date.

3.2. Comparaison entre les sites

Les techniques d'implantation optimales sont celles qui permettent que les plantes atteignent la maturité physiologique avant la date de récolte butoir liée au gel.

La Figure 67 donne pour chaque site et pour chaque année, le pourcentage de parcelles arrivées à maturité toutes techniques confondues et en moyenne sur les trois types de sol. La valeur annuelle de parcelles arrivant à maturité, tous sites confondus, est d'environ 35%. Ces 35% se répartissent en moyenne en 46% pour l'Altiplano Nord, 29% pour l'Altiplano Centre et 36% pour l'Altiplano Sud, avec toutefois un effet très fort de l'année 2005 sur le Nord (année la plus froide) et le Sud (année la plus chaude et la moins sèche).

Figure 67. Pourcentage de parcelles arrivant à maturité

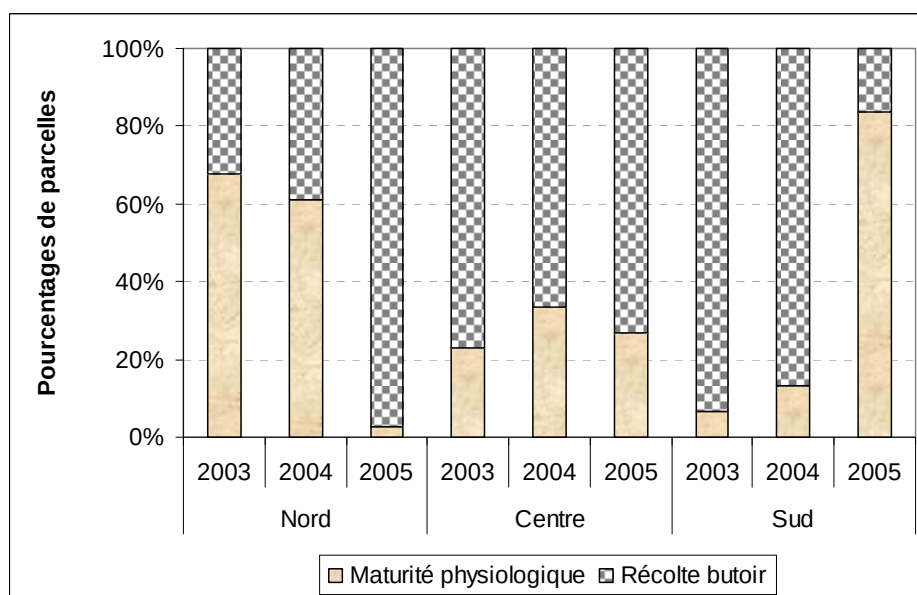
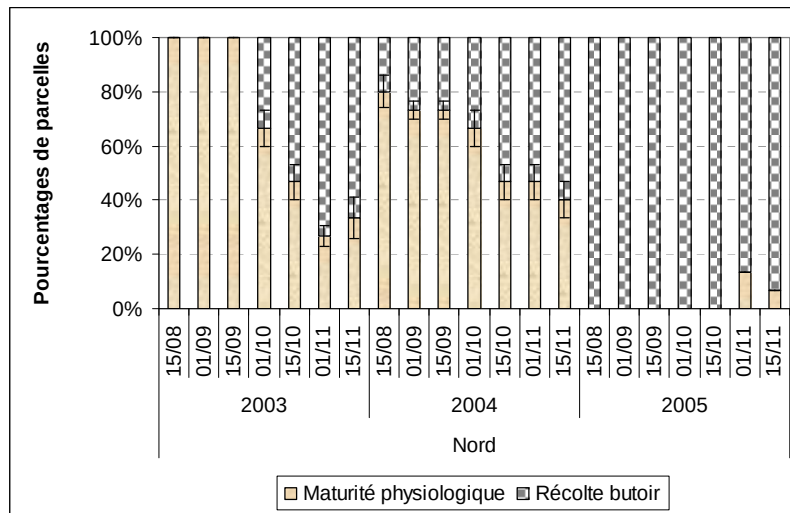
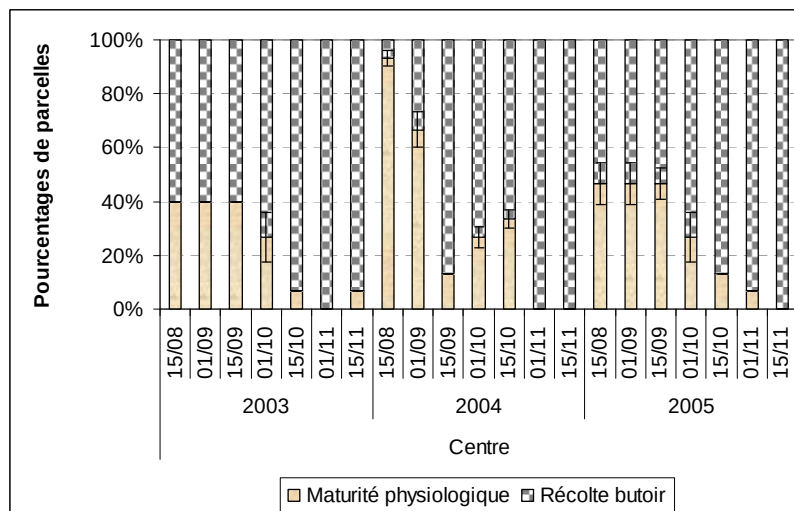


Figure 68. Pourcentages de parcelles arrivant à maturité selon les sites, en fonction de la date de semis (profondeur de semis en écart-types)

a-Nord



b- Centre



c- Sud

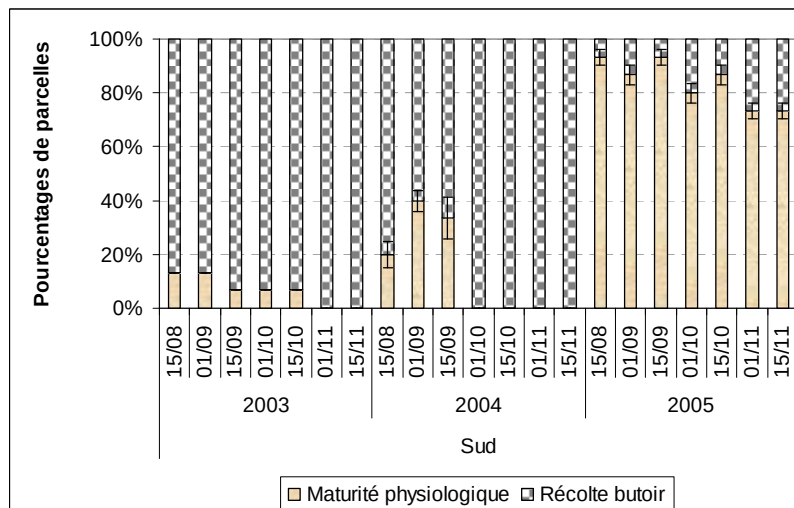
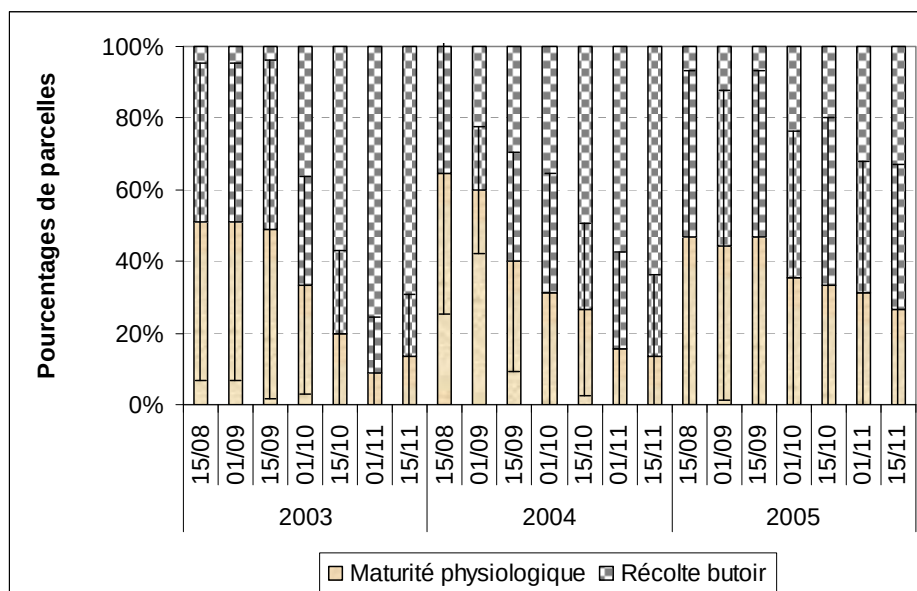


Figure 69. Pourcentages de parcelles arrivant à maturité selon la date ou la profondeur de semis (site en écart-type)

a- Date de semis



b- Profondeur de semis

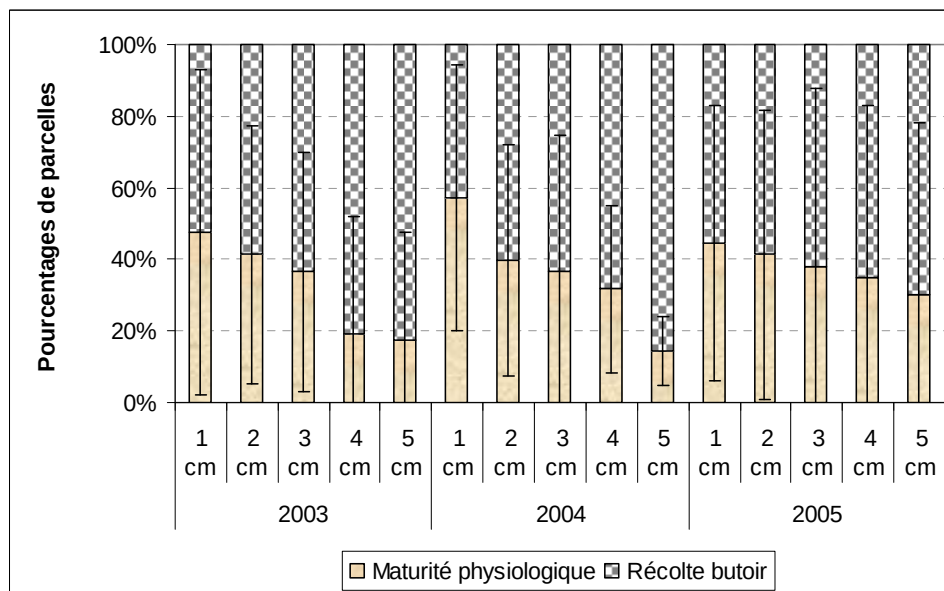
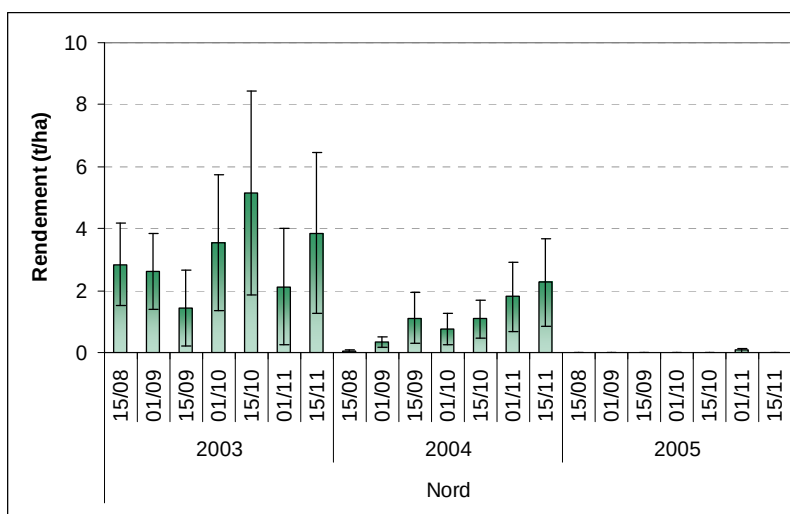
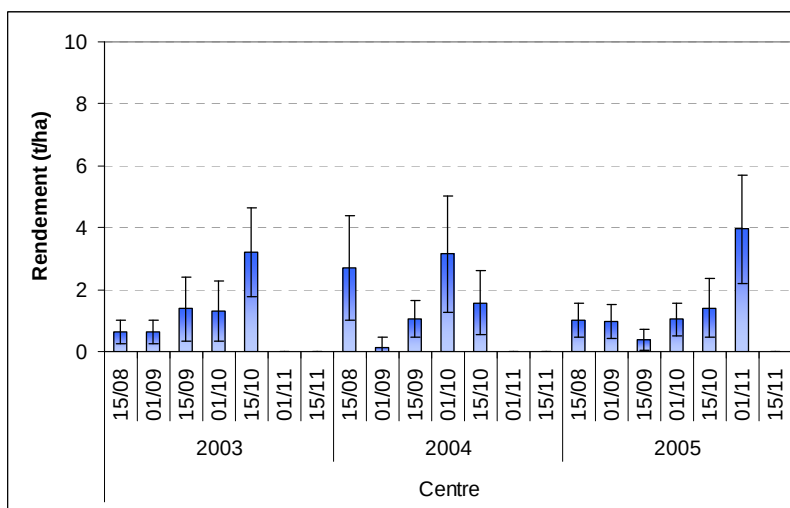


Figure 70. Rendement des plantes arrivées à maturité en fonction de la date de semis (profondeur de semis en écart-type)

a-Nord



b- Centre



c- Sud

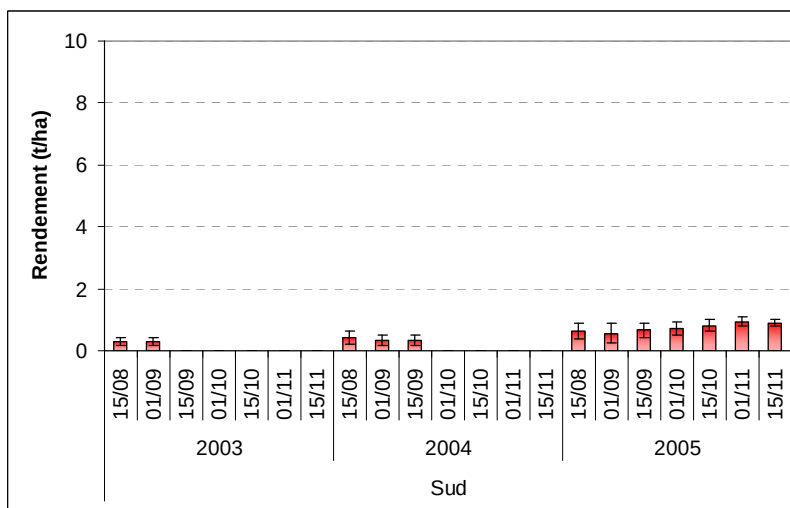


Figure 71. Pourcentages de parcelles arrivant à maturité dans l'Altiplano Sud en fonction de la date et du type (ligne ou poquet) de semis

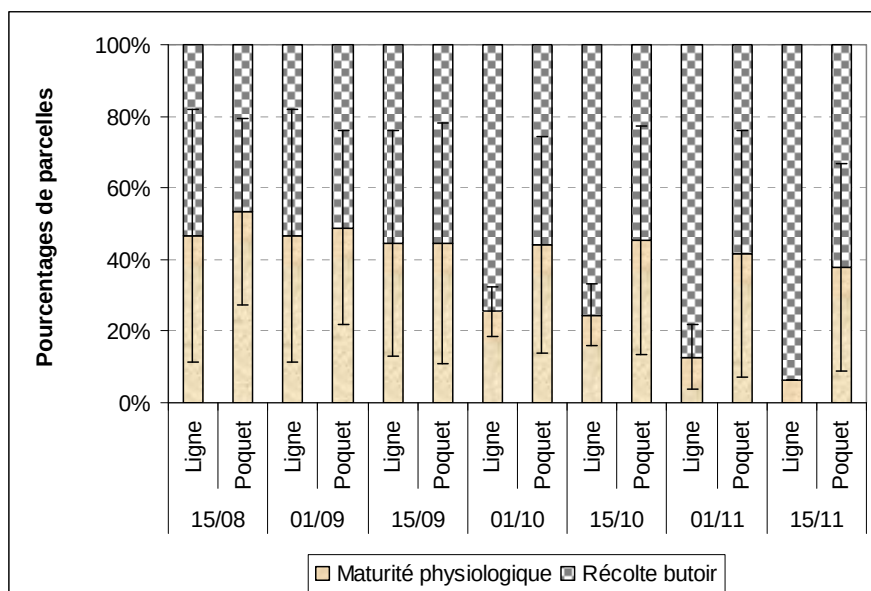
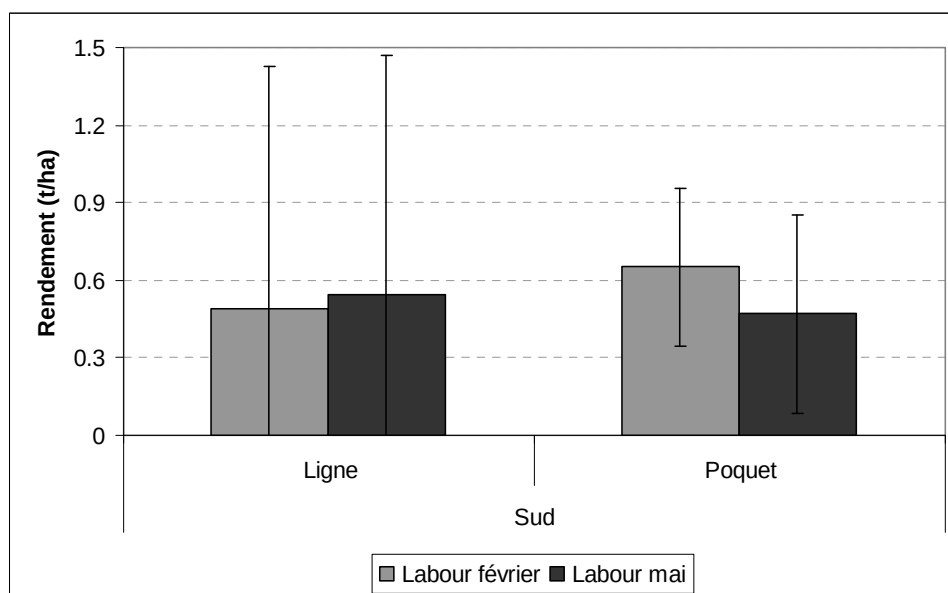


Figure 72. Comparaison des rendements dans l'Altiplano Sud selon le type de semis et la date de labour



Les Figures 68 a (Nord), b (Centre) et c (Sud) reprennent les données précédentes mais cette fois en fonction de la date de semis ; la profondeur de semis figure en écart-type. Les mêmes données sont illustrées Figure 69, non plus par site mais par date (a) ou par profondeur de semis (b) ; les sites figurent en écart-type. En moyenne, les dates de semis les plus précoces permettent logiquement au plus grand nombre de parcelles d'arriver à maturité, et ce sur tous les sites. Concernant les profondeurs de semis, ce sont les plus proches de la surface dans l'Altiplano Nord et Centre qui favorisent la maturité, mais les plus profondes dans l'Altiplano Sud.

Les rendements résultants sont présentés aux Figures 70a (Nord), b (Centre), c (Sud). Le rendement moyen simulé est de 1,4 t.ha⁻¹ pour l'Altiplano Nord, 1,2 t.ha⁻¹ pour l'Altiplano Sud et 0,3 t.ha⁻¹ pour l'Altiplano Centre, avec des coefficients de variation entre les parcelles de l'ordre de 100 à 110%. Ces valeurs sont cohérentes avec les rendements moyens obtenus dans chaque région, même si un peu faibles. Néanmoins, si les techniques n'ayant pas permis de mener la plante à maturité sont considérées comme non pratiquées dans la région, et que le rendement moyen n'est calculé qu'à partir des valeurs non nulles, alors les valeurs précédentes deviennent 1,9 t.ha⁻¹ dans le Nord, 1,5 t.ha⁻¹ dans le Centre et 0,6 t.ha⁻¹ dans le Sud.

De plus, au contraire du pourcentage de maturité qui est maximal pour les dates de semis les plus précoces, les rendements les plus élevés sont eux généralement atteints pour les dates de semis les plus tardives. Ces dates les plus tardives varient entre les sites et les années, car un semis "trop" tardif ne permettra pas forcément d'atteindre la maturité et peut donc déboucher sur un rendement nul. Les dates les plus tardives permettant d'obtenir un rendement peuvent ainsi atteindre le 15 novembre dans le Nord en 2003 et en 2004 mais seulement le 1^{er} novembre en 2005 ; dans le Centre, elles atteignent le 1^{er} novembre en 2005 mais seulement le 15 octobre en 2003 et en 2004 ; enfin, dans le Sud, toutes les dates jusqu'au 15 novembre sont possibles en 2005, mais seulement jusqu'au 15 septembre en 2004 et au 1^{er} septembre en 2003. Cela traduit bien toute la problématique de la gestion des risques climatiques et du compromis à réaliser entre un rendement moyen sur lequel pèsent moins de risques et un rendement plus élevé mais aussi plus incertain.

3.3. Comparaison des techniques dans l'Altiplano Sud

Les effets d'un semis en ligne ou en poquet ainsi que d'un labour en saison humide ou en saison sèche sur la fin du cycle et sur le rendement sont comparés. Les résultats sont présentés toutes autres techniques non mentionnées confondues et en moyenne sur les trois années.

La Figure 71 donne le pourcentage de parcelles arrivant à maturité en ligne et en poquet selon la date de semis. A toutes les dates de semis, les chances d'atteindre la maturité sont plus élevées en poquet qu'en ligne. Les risques sont toutefois importants, puisque les parcelles arrivant à maturité ne représentent que 40% des cas en poquet, contre 28% en ligne.

Les rendements résultants sont présentés sur la Figure 72. La combinaison permettant d'obtenir le rendement le plus élevé (0,65 t.ha⁻¹) est celle du semis en poquet avec un labour en février. Le poquet agit en fait davantage sur la phénologie, permettant d'atteindre plus souvent la maturité, tandis que le labour de février joue davantage sur la croissance de la plante, l'augmentation des teneurs en eau du sol favorisant une biomasse plus importante (données non représentées). Ces résultats varient selon les années, les conditions climatiques les plus clémentes étant les moins défavorables au semis en ligne (données non représentées), mais la variabilité est globalement plus faible en poquet qu'en ligne.

4. Impact de l'accélération des rotations

4.1. Dispositif expérimental

Trois rotations différentes sont simulées sur chacun des sites, un quinoa précédé de deux années de sol nu (SSQ), un quinoa précédé d'une année de sol nu (SQ) et un quinoa en monoculture continue (Q).

4.1.1. Enchaînement des rotations

Ce travail aurait idéalement dû être réalisé sur 20 années de données de climat réel, mais seules les données journalières des années 2003 à 2006 étaient disponibles sur tous les sites. Les cycles 2003-2004, 2004-2005 et 2005-2006 ont donc été répétés huit fois afin de constituer un enchaînement de 24 années. Le premier tour de trois années est considéré comme un "tour de chauffe" et correspond à l'initialisation du système (bilans hydrique et azoté) ; les résultats ne sont affichés qu'à partir de la quatrième^e année. Afin de ne pas induire d'effet dû au climat, toutes les têtes de rotation sont testées ; elle est toujours identique dans la rotation Q, mais deux séries différentes existent pour la rotation SQ ('sol nu-quinoa' ou 'quinoa-sol nu') et trois pour la rotation SSQ ('sol nu-sol nu-quinoa', 'sol nu-quinoa-sol nu' ou 'quinoa-sol nu-sol nu'). Enfin, les trois rotations sont effectuées sur les trois sols propres à chaque région. Chaque USM de quinoa ou de sol nu s'étale du 1^{er} mai de l'année n au 30 avril de l'année $n+1$.

4.1.2. Itinéraires techniques

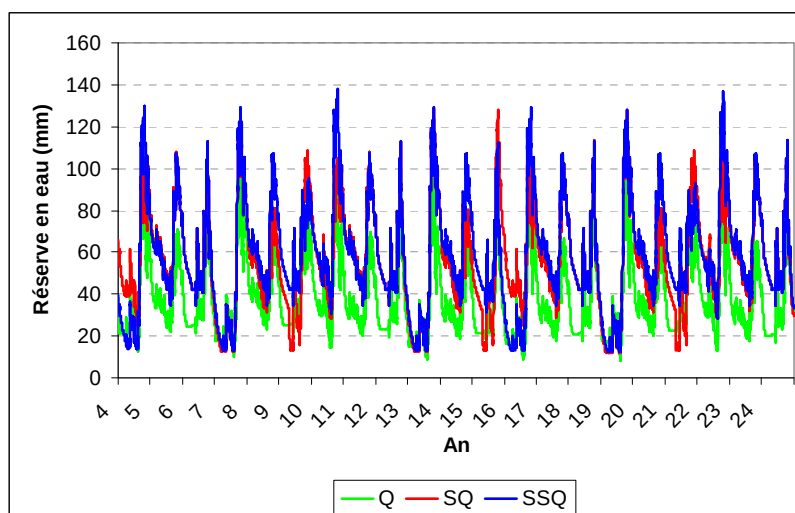
Pour la rotation Q, le labour est systématiquement effectué le 15 mai sur 30 cm. Une reprise de labour sur 5 cm a lieu la veille du semis, à l'exception de l'Altiplano Sud. Le semis est en ligne dans l'Altiplano Nord et l'Altiplano Centre, avec une densité de 220 plantes.m⁻² pour une profondeur de 3 cm ; il est en poquet dans l'Altiplano Sud, avec une densité de 110 plantes.m⁻² pour une profondeur du poquet de 25 cm et une profondeur de la graine dans le poquet de 2 cm. Le semis est réalisé sur chacun des sites respectivement le 1^{er} octobre, le 15 octobre et le 1^{er} septembre. La date de récolte butoir est fixée au 30 avril, pour l'homogénéité des fichiers techniques de STICS, en tant que valeur moyenne de celles déterminées au § 3.1 de ce chapitre. Au moment de la récolte, la biomasse aérienne est considérée comme exportée totalement et seules les racines du quinoa sont enfouies.

Pour la rotation SQ, les dates des actes techniques sont identiques à celles de la rotation Q dans le Nord et dans le Centre. Dans le Sud, le labour a lieu non plus en mai, mais au 1^{er} février pendant l'USM de sol nu précédant l'USM de quinoa. La principale différence, commune aux trois sites, tient dans la prise en compte de la végétation naturelle qui s'est développée sur la parcelle pendant l'année de sol nu, ce qui va se traduire par un enfouissement de résidus au moment du labour. Après une jachère courte, cette végétation n'est constituée que de graminées et est éparse. A partir de nos observations, des travaux de Martineau (2004) et de Pestalozzi (2000), nous avons opté pour une option basse (1 t.ha⁻¹) et une option haute (2 t.ha⁻¹) d'enfouissement après une année de sol nu. Le rapport C/N de ces résidus est fixé à 15 g.g⁻¹.

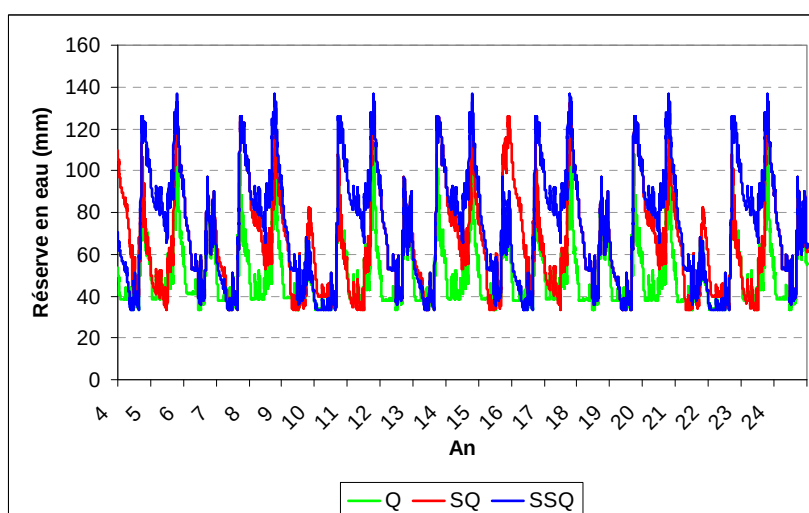
La même logique est adoptée pour la rotation SSQ. La quantité de résidus enfouis au moment du labour est de 2 t.ha⁻¹ pour l'option basse et 4 t.ha⁻¹ pour l'option haute. Dans l'Altiplano Sud, le labour est à nouveau effectué au 1^{er} février dans l'USM de sol nu précédant directement l'USM de quinoa. Aucune opération technique n'est effectuée pendant l'autre année de sol nu.

Figure 73. Evolution de la réserve en eau des trois premiers horizons du sol selon les rotations

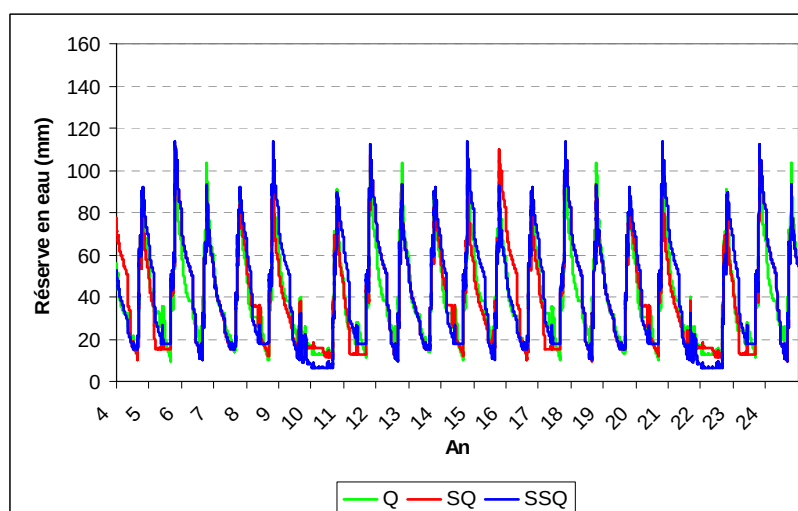
a-Nord



b- Centre



c- Sud



4.1.3. Etat initial

La première USM de chaque enchaînement de 24 années débute toujours au 1^{er} février et non au 1^{er} mai, afin d'initialiser le bilan hydrique du sol à la teneur en eau à la capacité au champ pendant la saison des pluies. Le bilan azoté est initialisé par les teneurs en azote minéral moyennes résultant des analyses de sol effectuées (Tableau 12, § 4.5 du Chapitre II). Ensuite, avec l'enchaînement, les conditions initiales de l'USM $i+1$ sont les conditions finales de l'USM i et dépendent donc de l'évolution du bilan hydrique et de la minéralisation chaque année.

4.1.4. Options de simulation

Afin de prendre en compte au mieux l'effet des quantités d'azote exportées par le quinoa sur le bilan azoté du sol, nous avons utilisé le paramétrage azoté déterminé au § 5 du Chapitre IV. Nous avons également activé l'effet du stress azoté. La qualité du paramétrage employé n'est pas forcément optimale, mais en termes d'étude du renouvellement de la fertilité des sols, les quantités d'azote exportées simulées par ce paramétrage sont plus réalistes que celles simulées par le paramétrage initial ; les éléments considérés ici sont de toute façon davantage les différences relatives entre les rendements que leurs valeurs absolues.

4.2. Effet sur la teneur en eau du sol

Les Figures 73a (Nord), b (Centre) et c (Sud) présentent l'évolution de la quantité d'eau contenue dans les trois premiers horizons du sol (40 cm, où la plante va réaliser la majorité de ses prélèvements en raison de son enracinement simulé peu profond) sur les 21 années considérées, en fonction des rotations. Pour plus de lisibilité, les résultats exposés ne correspondent qu'à un seul type de sol sur chaque site et qu'à une seule série de tête de rotation (dans l'ordre 'sol nu-quinoa' pour la rotation SQ et 'sol nu-sol nu-quinoa' pour la rotation SSQ).

Les différences entre les rotations en termes de rechargement en eau du sol sont marquées, en particulier dans le Nord et le Centre. Pour la rotation SSQ, la réserve en eau moyenne de ces trois horizons sur l'ensemble du cycle est d'environ 70 mm dans le Centre (en relation avec un sol à plus grande capacité), 60 mm dans le Nord et 40 mm dans le Sud. L'effet le plus important concerne la réserve en eau du sol moyenne au moment du semis (Figure 74). Elle est d'environ 40 mm sur tous les sites en rotation SSQ ; la suppression de la jachère diminue cette réserve d'environ 40% dans le Nord, de plus de 60% dans le Centre et de 30% dans le Sud.

Il faut noter que les quantités d'eau simulées en rotation SQ et SQQ sont a priori légèrement surestimées. Nous n'avons en effet simulé entre deux quinoas qu'un sol nu sans végétation, alors que normalement une végétation naturelle se met en place et contribue à l'évapotranspiration ; nous avons toutefois vu précédemment que celle-ci était très faible, en particulier en période hivernale, et inférieure à celle d'une culture de quinoa (Vacher *et al.*, 1994).

4.3. Effet sur la fertilité du sol

Les Figures 75 et 76 présentent respectivement l'évolution de la teneur en azote minéral sur les trois premiers horizons du sol (où, de même que pour l'eau, la plante va réaliser la majeure partie de ses prélèvements) et l'évolution de la teneur en azote organique du sol, sur l'Altiplano Nord (a), l'Altiplano Centre (b) et l'Altiplano Sud (c). Les résultats exposés sont les mêmes que ceux décrits au paragraphe précédent.

Figure 74. Réserve en eau dans les trois premiers horizons du sol au moment du semis (années en écart-type)

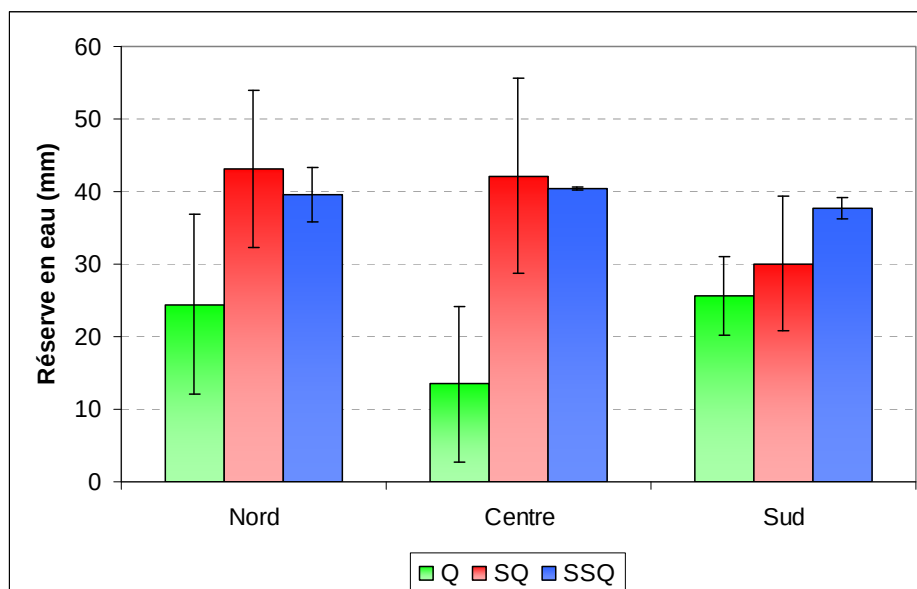


Figure 76. Réserve en azote minéral dans les trois premiers horizons du sol au moment du semis, en option haute et en option basse (années en écart-type)

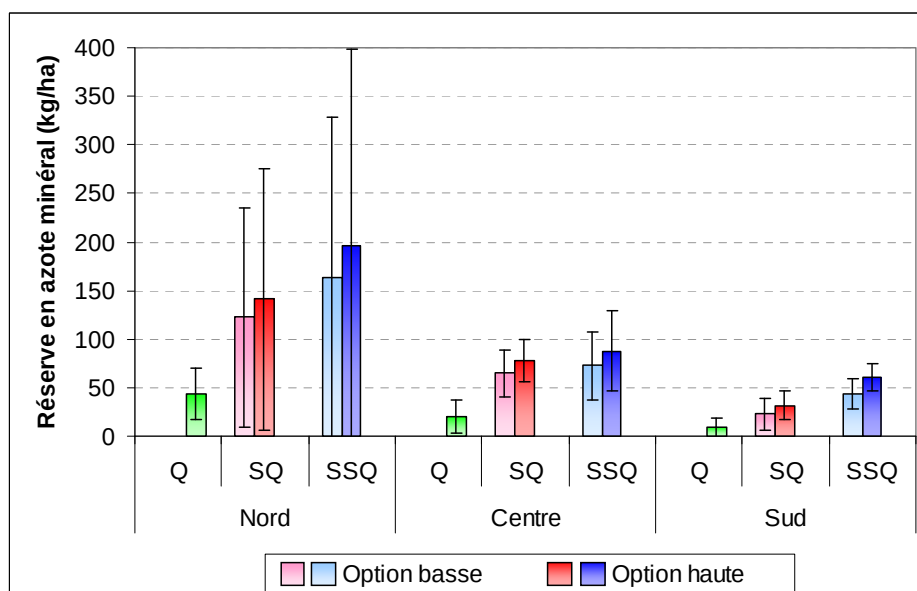
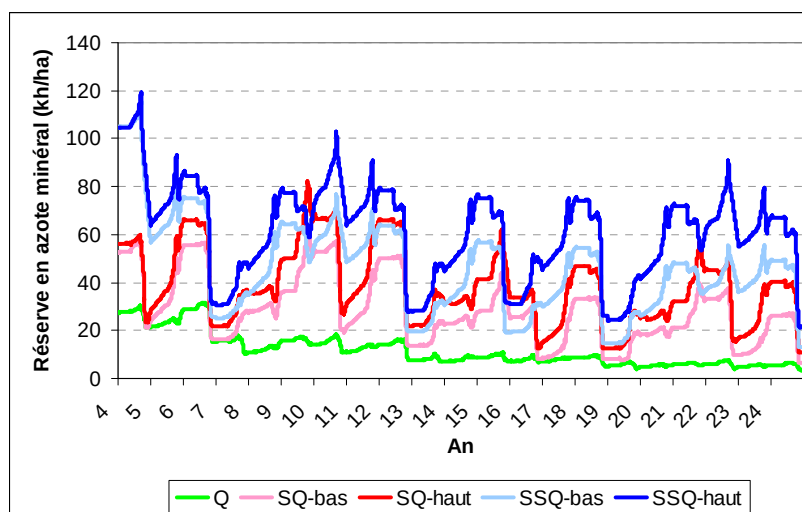
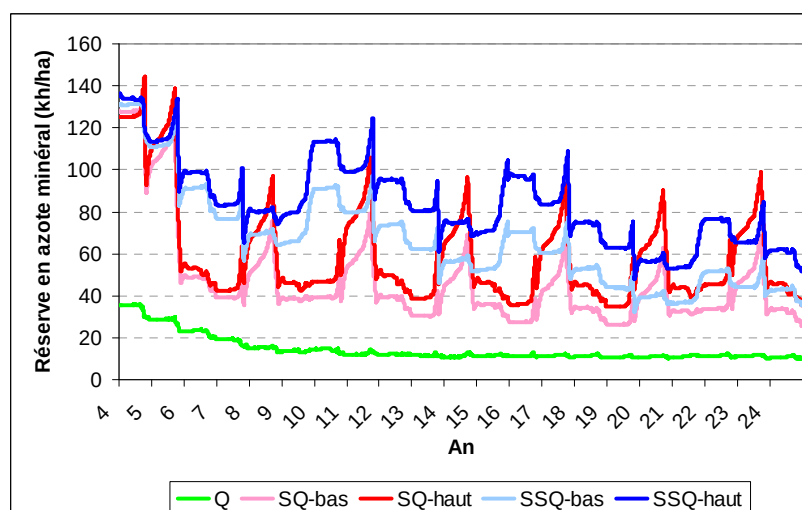


Figure 75. Evolution de la réserve en azote minéral des trois premiers horizons du sol selon les rotations, en option haute et en option basse

a-Nord



b- Centre



c- Sud

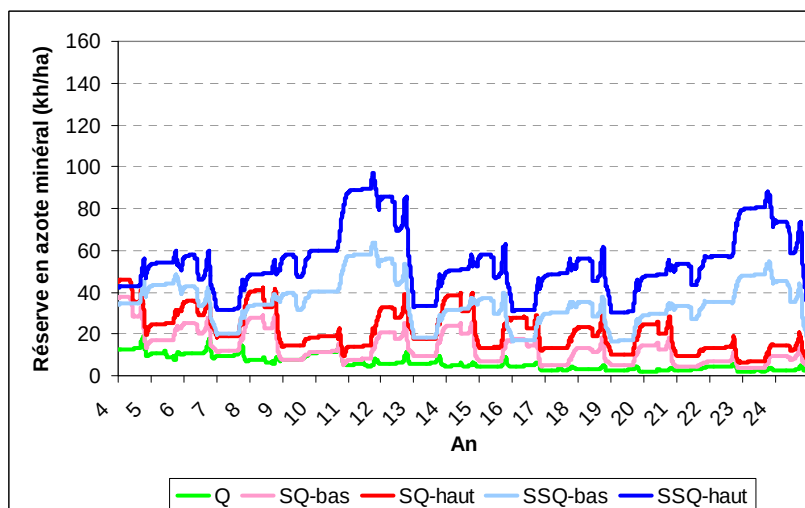
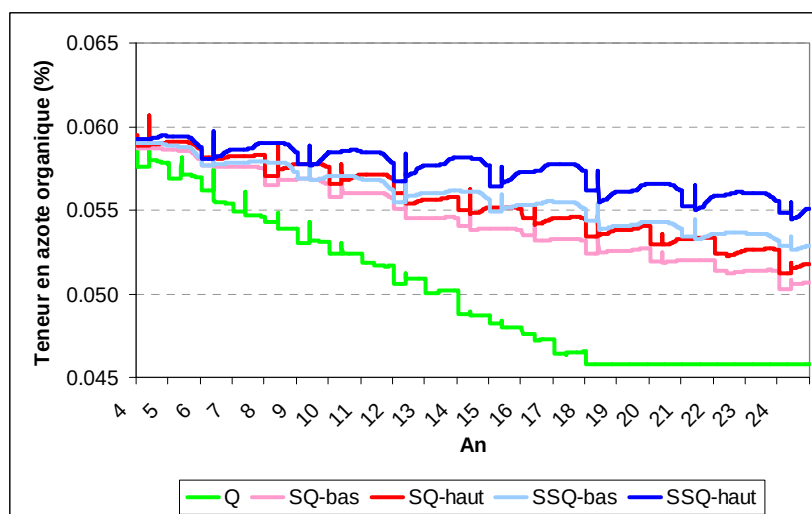
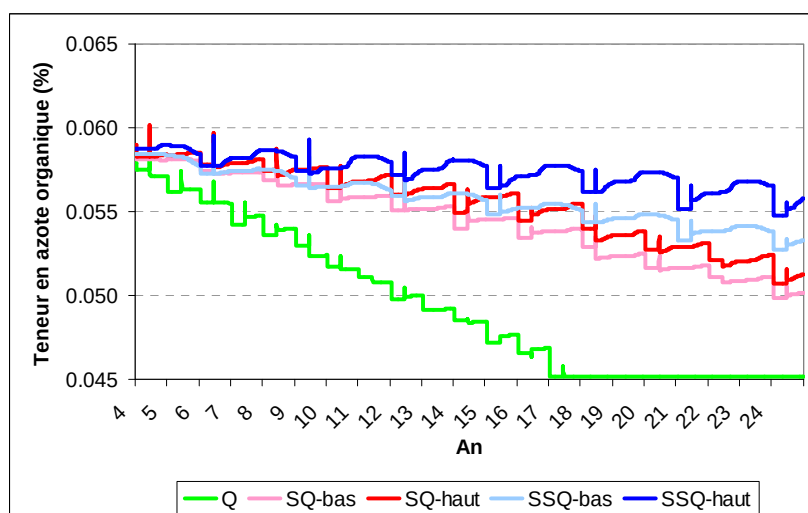


Figure 77. Evolution de la teneur en azote organique du sol selon les rotations, en option haute et en option basse

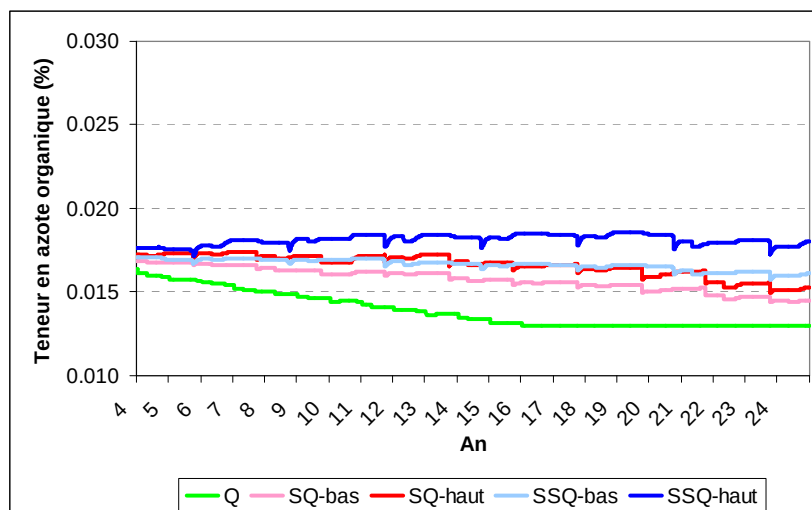
a-Nord



b- Centre



c- Sud



4.3.1. Azote minéral

L'effet des rotations et de l'enfouissement des résidus sur la teneur en azote minéral du sol est très net. Sur tous les sites, les quantités d'azote minéral sont supérieures pour les rotations avec jachère et enfouissement de résidus que pour la rotation Q. Les augmentations les plus importantes sont obtenues pour la rotation SSQ option haute. La teneur en azote pour la rotation Q reste elle constante avec une légère tendance à la diminution.

Ces valeurs d'azote pour les rotations SQ et SQQ sont bien sûr surestimées, pour la même raison que le stock d'eau du sol précédemment ; de l'azote est apporté par l'enfouissement de cultures qui n'ont pas été simulées, alors qu'elles auraient également exporté de l'azote. Ainsi, si l'enfouissement des résidus n'est pas pris en compte, les teneurs en azote des rotations SQ et SSQ restent constantes ou augmentent légèrement sur les 24 années par rapport à la teneur initiale (données non représentées) ; elles sont toujours supérieures à celles de la rotation Q en liaison avec l'azote qui n'est plus exporté tous les ans par le quinoa mais seulement une année sur deux ou une année sur trois. Sous l'hypothèse que les quantités d'azote exportées par la végétation naturelle sont plus faibles que celles exportées par le quinoa, les teneurs en azote du sol des rotations SQ et SSQ seraient alors semblables et à peine plus élevées que celle de la rotation Q tout au long de la période considérée. Ces résultats sont cohérents avec ceux de Pestalozzi énoncés précédemment, à savoir que la régénération de la fertilité est assurée essentiellement par la biomasse produite pendant la jachère et enfouie au moment du labour.

La Figure 71 présente les réserves en azote minéral du sol au moment du semis du quinoa. En rotation SQ et SSQ, le sol est rechargé cycliquement par la minéralisation des résidus enfouis au moment du labour et les valeurs sont plus élevées, d'autant plus en option haute d'enfouissement. Ces réserves sont d'environ 150 kg.ha⁻¹ dans le Nord, 75 kg.ha⁻¹ dans le Centre et 50 kg.ha⁻¹ dans le Sud en rotation SSQ. Dans le Nord et le Centre, les quantités en SQ et SSQ sont relativement semblables, la différence principale se situant dans le passage à la rotation Q ; la suppression totale de la jachère divise en effet les quantités par 3 à 4. Dans le Sud, les réserves en azote du sol sont divisées par 2 si une année de jachère est supprimée et par 6 lorsque les deux années le sont.

De ces quantités d'azote présentes dans le sol vont dépendre celles exportées par la plante, qui sont différentes selon les sites et les rotations ; les quantités maximales sont ainsi d'environ 40 kg.ha⁻¹ dans le Nord, 30 kg.ha⁻¹ dans le Centre et 25 kg.ha⁻¹ dans le Sud (données non représentées), en rotation SQ ou SSQ. Ces valeurs sont divisées par 3 environ sur tous les sites lors du passage à la rotation Q et de la suppression de la jachère.

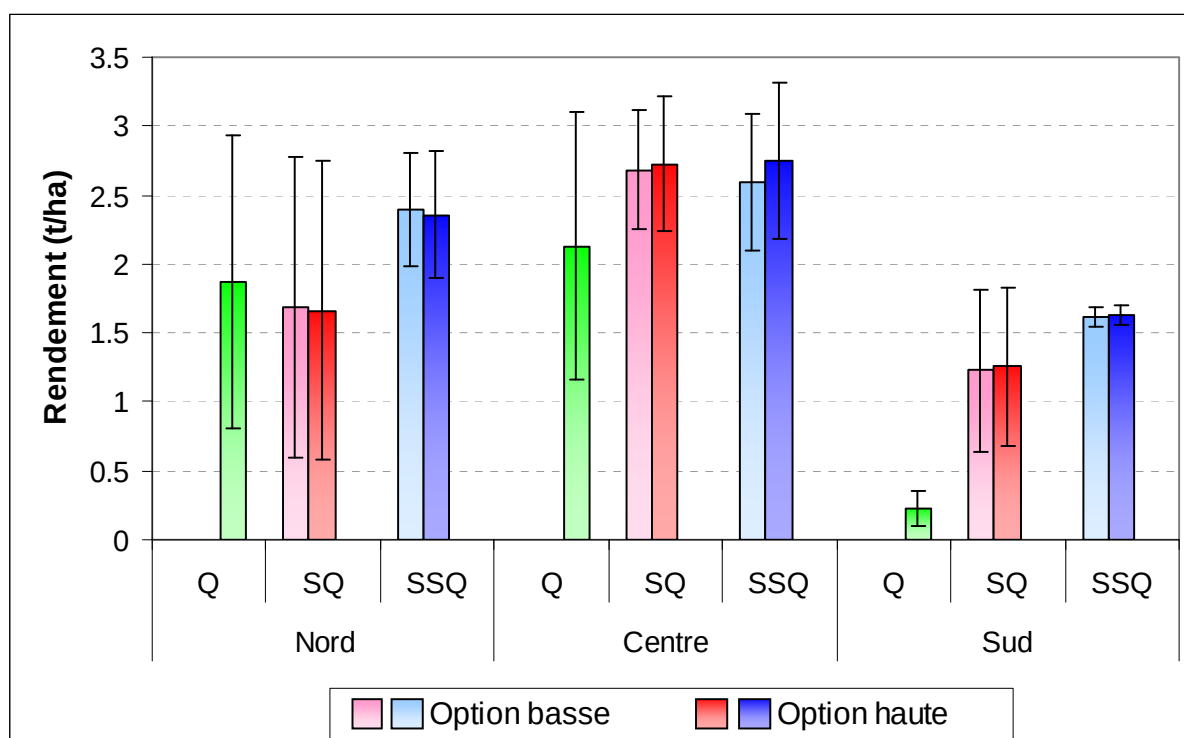
4.3.2. Matière organique

Les valeurs initiales de teneur en azote organique en année 1 sont très différentes entre le Nord ou le Centre (0,07%) et le Sud où cette teneur est 3 fois plus faible (0,02%).

Sur la période considérée (à partir de l'année 4), en rotation Q le stock de matière organique du sol diminue en continu pour tous les sites, d'environ 25%. La perte la plus faible correspond à la rotation SSQ en option haute sur tous les sites. Dans le Nord et le Centre, la diminution n'est comprise qu'entre 8 et 17% pour les rotations SQ et SSQ. Dans le Sud, la rotation SSQ option haute permet presque un maintien de la teneur en azote organique, contre une diminution de 10 à 15% dans les autres cas.

Les biomasses produites de quinoa seul, donc de racines enfouies en fin de cycle, ne sont ainsi jamais suffisantes pour assurer le renouvellement de la fertilité du sol. De plus, en pratique, lorsque les sols sont suffisamment meubles pour le permettre, les plants de quinoa sont arrachés intégralement, racines incluses ; c'est souvent le cas dans l'Altiplano Sud, où l'enfouissement post-culture peut donc être nul.

Figure 78. Rendements selon les rotations, en option haute et en option basse



Une minéralisation plus importante de la matière organique, donc une diminution de ses stocks, peut en effet être supposée dans le Nord et le Centre, favorisée par des conditions climatiques moins difficiles que dans l'Altiplano Sud. Toutefois, elle n'est pas non plus certaine, Bottner *et al.* (2006) ayant montré un rôle prépondérant des propriétés physiques du sol sur le climat dans la teneur en matière organique des sols dans les Andes. Par ailleurs, les quantités de matière organique dans le Nord et dans le Centre doivent être reliées aux systèmes de culture pratiqués en réalité dans ces régions, et non simulés ici. En effet, la gestion de la fertilité est normalement assurée par des rotations impliquant la pomme de terre, l'orge ou éventuellement une légumineuse telle que la fève, et non uniquement de la végétation naturelle. Les biomasses produites donc les biomasses enfouies sont plus importantes, une fertilisation organique ou minérale est parfois appliquée à la pomme de terre et la fève permet une restitution supplémentaire d'azote au sol avec un prélèvement moindre. C'est également ce qui peut expliquer en partie les différences de teneur initiale entre les sites.

Dans le Sud, ces résultats montrent bien que les jachères de 1 à 2 ans, qui remplacent fréquemment les jachères longues de 10 ans pratiquées traditionnellement, sont insuffisantes pour renouveler la fertilité du sol ; la situation est encore détériorée en cas de suppression complète de la jachère.

4.4. Effet sur les rendements et les teneurs en azote

La Figure 73 présente les rendements obtenus selon les rotations et les options d'enfouissement. Les rendements en rotations SQ ou SSQ sont de l'ordre de 2 t.ha⁻¹ dans le Nord, 2,5 t.ha⁻¹ dans le Centre et 1,3 t.ha⁻¹ dans le Sud, avec des indices de récolte compris entre 0,3 et 0,5 (données non représentées). La suppression d'une année de jachère, donc le passage de SSQ à SQ, provoque une diminution de rendement d'environ 30% dans le Nord et 25% dans le Sud ; le rendement n'est pas affecté dans le Centre. La même valeur est gardée dans le Nord pour la suppression des deux années de jachère, donc le passage de SSQ à Q ; un effet est cette fois observé dans le Centre avec une baisse d'environ 20% ; enfin, cette baisse est très importante dans le Sud, atteignant 85%.

Dans le Nord et le Centre, cette diminution des quantités va de paire avec une diminution de la qualité, les teneurs en azote du grain et de la plante entière étant divisées par 2 à 3 (données non représentées). Dans le Sud, le phénomène inverse est observé, lié à une diminution plus importante des rendements que des quantités d'azote absorbées, donc une moindre dilution de l'azote. Ces teneurs en azote sont comprises entre 0,3 et 0,8% pour la plante entière et entre 0,5 et 2% pour les grains, donc des valeurs un peu faibles par rapport aux moyennes attendues (cf. § 5 du Chapitre IV).

Sur le long terme, une très légère tendance à la diminution des rendements en rotation Q est observée dans le Centre et le Sud, contre un maintien ou une très légère augmentation en rotations SQ et SSQ (données non représentées). Cependant, aucune évolution significative n'est notée, alors qu'une baisse progressive des rendements aurait été attendue. Cet effet peut être expliqué par la nature de nos données climatiques, qui consistent en une répétition des trois mêmes années donc ne représentent pas suffisamment la variabilité du climat.

En conclusion, ces résultats permettent de mieux comprendre les effets et les importances des différentes techniques. Ils montrent également en quoi une suppression totale de la jachère ne serait pas souhaitable. Bien évidemment, compte-tenu de la demande actuelle sur le marché international et de la diminution de la main d'œuvre, la solution ne peut pas non plus être un retour à une agriculture exclusivement manuelle sur des parcelles de pente ; le problème de la durabilité du système de culture reste complexe dans ces régions de l'Altiplano. Enfin, ces expérimentations numériques auront été une occasion de tester notre paramétrage azoté, qui donne des résultats relativement cohérents, mais qui doit encore être amélioré.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Conclusions et perspectives

Les questions soulevées par les systèmes de culture pratiqués sur l'Altiplano bolivien sont multiples, en termes de techniques d'implantation, d'adaptation au climat difficile, de gestion de la fertilité,.... Ces différentes thématiques ont été abordé par modélisation, en travaillant à la fois sur des données réelles et par expérimentation numérique.

L'utilisation du modèle, orientée par ces questions, a permis de comprendre le fonctionnement du système, les enjeux de l'implantation et l'adaptation des techniques employées aux conditions particulièrement limitantes.

Ce travail a également permis d'aboutir à la proposition d'un modèle générique de culture adapté au quinoa sur l'Altiplano bolivien.

Pour cela, nous avons utilisé une méthodologie en étapes successives, déjà utilisée à plusieurs reprises pour adapter STICS à de nouvelles cultures. Dans un premier temps, le degré d'adaptation de STICS à la culture du quinoa a été défini par une analyse de ses différents formalismes. Cette étape a permis de déterminer le besoin d'intégrer ou de modifier des formalismes déjà existants dans le modèle pour améliorer la simulation du fonctionnement du quinoa dans les conditions spécifiques de l'Altiplano bolivien.

Nous avons ainsi introduit la pression atmosphérique en donnée d'entrée du modèle, afin de prendre en compte l'effet de l'altitude dans le calcul du rayonnement net et de l'évapotranspiration ; le calcul de la température du point de rosée à partir de la température minimale a également été modifié.

Les formalismes de germination et de levée ont été modifiés pour mieux représenter les conditions limitantes sur l'Altiplano et les manques à la germination ou à la levée qu'elles peuvent entraîner. Ces modifications, par la prise en compte de l'humidité et de la température du sol à toutes les étapes de l'émergence, présentent l'avantage de pouvoir décrire des cultures et des situations climatiques variées. Un formalisme intégrant l'effet de la croûte de battance sur les manques à la levée a été ajouté.

La structure du sol était jusqu'ici considérée comme fixe dans STICS, son formalisme a été révisé afin d'y ajouter les effets d'un travail du sol sur ses propriétés physiques et son bilan hydrique. C'est notamment d'une grande importance sur l'Altiplano où le stockage de l'eau dans le sol est assuré en partie grâce au labour.

Enfin, le semis particulier en poquet pratiqué dans l'Altiplano Sud a été l'objet d'un formalisme à part entière, qui permet de prendre en compte l'effet de ce semis, à la fois en profondeur et en surface, sur l'humidité du lit de semences, décisive dans le déroulement de la levée et donc du reste du cycle.

Le choix des options parmi les formalismes déjà existants a été dicté essentiellement par l'absence de travaux préalables de modélisation sur cette culture, et donc une nécessité de simplicité.

Dans un second temps, les paramètres du modèle, qui caractérisent le fonctionnement de la plante, ont été confrontés aux connaissances acquises sur le quinoa. La valeur de chaque paramètre a été renseignée à partir de l'information présente dans la bibliographie existante, de nos mesures expérimentales ou d'une méthode d'optimisation pour les paramètres qui n'avaient pas été mesurés ou qui n'ont pas de signification physique mesurable.

Cette adaptation a été réalisée à l'échelle de l'Altiplano bolivien, grâce aux expérimentations mises en place par l'IRD en collaboration avec les facultés d'agronomie boliviennes. Des essais ont ainsi été conduits sur trois sites du nord au sud de l'Altiplano, pendant trois à cinq cycles culturels et avec dix variétés, le paramétrage ayant porté sur la variété Surumi pour laquelle nous disposons du plus grand nombre de données. Ils nous ont permis de recueillir 14 jeux de données, constitués des informations pédoclimatiques et biologiques de chaque parcelle.

L'étude de cas par expérimentation numérique portant sur l'impact des techniques d'implantation sur le rendement a permis de montrer l'intérêt des pratiques traditionnelles. Elle souligne également les problèmes de durabilité liés à l'évolution des systèmes de culture en réponse à l'ouverture du marché du quinoa. Les limites de cette évolution apparaissent, notamment en termes de renouvellement de la fertilité des sols.

Enfin, cette étude met en évidence l'adaptabilité de STICS à des situations climatiques et culturelles très variées, sachant qu'il était jusqu'ici principalement utilisé en conditions européennes. Elle revient également sur la fonction heuristique que possède le modèle.

Ce travail comporte certaines limites dont nous n'avons pas pu nous affranchir.

Tout d'abord, le domaine de validité du paramétrage reste restreint. L'Altiplano représente certes une superficie importante mais nous n'avons pas pu couvrir l'ensemble des caractéristiques climatiques des régions qui le composent. De plus, l'extrême spécificité de ses conditions à la fois climatiques et techniques ne rend a priori pas facilement extrapolables les valeurs obtenues à d'autres gammes de situations.

Ensuite, le fonctionnement azoté n'a pas été réellement pris en compte, ce qui masque l'information concernant la qualité des graines. La teneur en protéines du quinoa est pourtant un élément important de son succès commercial. Cela fait de plus peser une incertitude sur notre étude de l'évolution de la fertilité des sols, ne sachant pas avec précision les quantités exportées ou restituées par le quinoa.

La simulation de la levée n'est pas encore totalement satisfaisante dans le sens où elle est trop dépendante d'un paramètre technique, la profondeur de semis, qui n'est pas toujours connu avec la précision requise ici. C'est toutefois le seul élément qui permette de représenter le démarrage effectif plus ou moins rapide de la croissance foliaire post-levée. Cette variable pourrait donc relever d'une utilisation stochastique du modèle par rapport à la profondeur de semis.

Plusieurs processus ont été formalisés et simulés de la manière la plus simpliste en raison de l'absence de données, et mériteraient une amélioration. C'est le cas par exemple de la surface foliaire, où la dynamique de croissance et de sénescence très rapide des feuilles pourrait être mieux appréhendée par les formalismes de LAI que ceux de taux de couverture. C'est également le cas du fonctionnement racinaire, qui n'est ici représenté qu'en termes d'absorption efficace et non de croissance et d'extension réelles.

Le modèle présente également des limites d'utilisation. Il ne tient ainsi pas compte des stress biotiques. Or les traitements phytosanitaires ne sont pas appliqués de manière systématique chez le quinoa, qui peut donc avoir à subir des attaques de mildiou, de chenilles,.... Le modèle ne permet pas non plus de simuler les effets destructifs d'une grêle, évènement relativement fréquent sur l'Altiplano ; toutefois, les dégâts causés sur la plante ainsi que sa capacité éventuelle de récupération seraient difficiles à quantifier. De même, l'enfouissement des plantules par le sable à cause du vent ne peut pas être intégré. Enfin, la pente de la parcelle n'est pas considérée, ce qui ne différencie pas les parcelles de versant des parcelles de plaine.

Des perspectives se dessinent à différents niveaux.

En premier lieu, cette version de STICS-quinoa va être utilisée dans le cadre d'études de durabilité et d'impacts réalisées par le projet ADD Equeco sur l'Altiplano Sud. Le modèle devrait ainsi être couplé à des données de télédétection ; l'extrapolation sera à la fois spatiale et temporelle, afin de reconstituer l'évolution des surfaces agricoles puis de voir l'impact à grande échelle des modifications des pratiques et des changements climatiques sur la production. Ses sorties seront également utilisées comme données d'entrée d'un modèle socio-économique par lequel se fera de l'aide à la décision, selon différents scénarios à élaborer.

Le modèle pourrait être amélioré de diverses manières, en renforçant sa robustesse dans les conditions étudiées ici, en l'étendant à de nouvelles parties de l'Altiplano (la région du Lac par exemple, pour compléter le gradient d'humidité), ou encore en l'adaptant à d'autres variétés. La difficulté principale à ces améliorations reste la disponibilité de données météorologiques, point qu'il faudra s'attacher à résoudre avant tout chose.

Enfin, STICS pourrait être utilisé comme outil d'aide à l'expérimentation, sur l'Altiplano où les distances et les conditions peuvent parfois constituer un frein à la mise en place ou au suivi d'essais.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- Acutis M., Donatelli M., 2003. SOILPAR 2.00: software to estimate soil hydrological parameters and functions. *European Journal of Agronomy*. 18:373-377.
- Allen R., Pereira L., Raes D., Smith M., 1998. Crop evapotranspiration - Guidelines for Computing Crop Water Requirements. *FAO Irrigation and Drainage Series No. 56*. 300p.
- Apaza V., Mujica A., Jacobsen S.-E., 2001. Resistencia a la Sequia en Fases Fenologicas de Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Proyecto Quinoa CIP-DANIDA, Peru, Lima*. p. 245-249.
- Arndt W., 1965a. The nature of the mechanical impedance to seedlings by soil surface seals. *Australian Journal of Soil Research*. 3:45-54.
- Arndt W., 1965b. The impedance of soil seals and the forces of emerging seedlings. *Australian Journal of Soil Research*. 3:55-68.
- Aufhammer W., Kübler E., Bury M., 1994. Nitrogen uptake and nitrogen residuals of winter oilseed rape and fallout rape. *J Agron Crop Sci*. 172:255-264
- Aufhammer W., Czuczorova D., Kaul H.-P., Kruse M., 1998. Germination of grain amaranth (*Amaranthus hypochondriacus* x *A. hybridus*): Effects of seed quality, temperature, light, and pesticides. *European Journal of Agronomy*. 8:127-135.
- Ayala G., Ortega L., Moron C., 2001. Valor nutritivo y usos de la quinoa. *Quinoa (Chenopodium quinoa Willd.) : ancestral cultivo andino, alimento del presente y futuro*. Mujica, A., Jacobsen, S. E., Izquierdo, J., Marathe, J. P. et FAO (eds). CIP, UNAP. FAO, CD Cultivos Andinos, version 1.0. Santiago, Chile.
- Baret F., 1986. Contribution au suivi radiométrique de cultures de céréales. *Thèse pour obtenir le titre de docteur de l'Université Paris-Sud-Orsay*. 182p.
- Beaujouan V., Durand P., Ruiz L., 2001. Modelling the effect of the spatial distribution of agricultural practices on nitrogen fluxes in rural catchments. *Ecological Modelling*. 137:93-105.
- Bertero H.D., Medan D., Hall A.J., 1996. Changes in Apical Morphology during Floral Initiation and Reproductive Development in Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Annals of Botany*. 78:317-324.
- Bertero H.D., King R.W., Hall, A.J., 1999a. Photoperiod-sensitive development phases in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Field Crops Research*. 60:231-243.
- Bertero H.D., King R.W., Hall A.J., 1999b. Modelling photoperiod and temperature responses of flowering in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Field Crops Research*. 63:19-34.
- Bertero H.D., King R.W., Hall A.J., 2000. Photoperiod and temperature effects on the rate of leaf appearance in quinoa (*Chenopodium quinoa*). *Aust. J. Plant Physiol*. 27:349-356.
- Bertero H.D., 2001. Effects of photoperiod, temperature and radiation on the rate of leaf appearance in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) under field conditions. *Annals of Botany*. 87:495-502.
- Bertero H.D., 2003. Response of Developmental Process to Temperature and Photoperiod in Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Food Reviews International*. 19:87-97.
- Bertero H.D., de la Vega A.J., Correa G., Jacobsen S.E., Mujica A., 2004. Genotype and genotype-by-environment interaction effects for grain yield and grain size of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) as revealed by pattern analysis of international multi-environment trials. *Field Crops Research*. 89:299-318.

-
- Bertero H.D., Ruiz R.A., 2008. Determination of seed number in sea level quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) cultivars. *European Journal of Agronomy*. 28:186-194.
- Berti M., Wilckens R., Hevia F., Serri H., Vidal I., Méndez C., 1997. Fertilización nitrogenada en quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Cien. Investig. Agr.* 27(2):81-90.
- Bhargava A., Shukla S., Ohri D., 2007. Genetic variability and interrelationship among various morphological and quality traits in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Field Crops Research*. 101:104-116.
- Boiffin J. 1984. La degradation structurale des couches superficielles sous l'action des pluies. *These de docteur ingenieur, INAPG, Paris*. 320p.
- Boiffin J., Dürr C., Fleury A., Marin-Laflèche A., Maillet I., 1992. Analysis of the variability of sugar beet (*Beta vulgaris* L) growth during the early stages. I. Influence of various conditions of crop establishment. *Agronomie*. 12:515-525.
- Bois J.F., Germain N., 2004. Generacion del area foliar en variedades de quinua del altiplano boliviano, consecuencias en termino de acumulacion de biomasa. In "*Congreso Febrero 2004 sobre los Cultivos Andinos*", Bolivia, Cochabamba.
- Bois J.F., Winkel T., Lhomme J.P., Raffaillac J.P., Rocheteau A., 2006. Response of some Andean cultivars of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) to temperature: Effects on germination, phenology, growth and freezing. *European Journal of Agronomy*. 25:299-308.
- Bonhomme R., 1997. Modélisation du fonctionnement d'une culture: caractérisation de la contrainte hydrique et prise en compte de ses effets. *L'eau dans l'espace rural*. INRA, ed. Riou, C., Bonhomme, R., Chassin, P., Neveu, A., Papy, F., Paris.
- Bonhomme R., 2000. Bases and limits to using "degree-day" units. *European Journal of Agronomy*. 13:1-10.
- Bonifacio A., Saravia Z., 1988. Siembra de quinua a nivel experimental. VI *Congreso Internacional sobre cultivos andinos*, Quito, Equateur. p. 83-85.
- Bonifacio A., 2002. Variedades de quinua recomendadas para el Altiplano Norte y Central. IBTA, La Paz, Bolivia. 8p.
- Bosque H., Lemeur R., Van Damme P., Jacobsen S.E., 2001. Analisis Ecofisiologico del Cultivo de la Quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) en Condiciones de Estres por Sequia y Salinidad. *Proyecto Quinua CIP-DANIDA*, Peru, Lima. p. 231-236.
- Bosque H., Lemeur R., Van Damme P., Jacobsen S.E., 2003. Ecophysiological Analysis of Drought and Salinity Stress of Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Food Reviews International*. 19:111-119.
- Bottner P., Pansu M., Sarmiento L., Herve D., Callisaya-Bautista R., Metselaar K., 2006. Factors controlling decomposition of soil organic matter in fallow systems of the high tropical Andes: A field simulation approach using ¹⁴C- and ¹⁵N-labelled plant material. *Soil Biology and Biochemistry*. 38:2162-2177.
- Bradford K.J., 1990. A water relations analysis of seed germination rates. *Plant Physiology*. 94:840-849.
- Bradford K.J., 1995. Water relations in seed germination. In *Seed Development and Germination* (eds J. Kigel & G. Galili), Marcel Dekker, New York, USA. p. 351-396.
- Bradford K.J., 2002. Applications of hydrothermal time to quantifying and modeling seed germination and dormancy. *Weed Science*. 50:248-260.

- Brisson N., Perrier A., 1991. A semi-empirical model of bare soil evaporation for crop simulation models. *Water Resources Research*. 27:719-727
- Brisson N., Seguin B., Bertuzzi P., 1992. Agrometeorological soil water balance for crop simulation models. *Agricultural and Forest Meteorology*. 59:267-287
- Brisson N., 1998. An analytical solution for the estimation of the critical soil water fraction for the water balance under growing crops. *Hydrology and Earth System Science*. 2:221-231.
- Brisson N., Mary B., Ripoche D., Jeuffroy M.H., Ruget F., Nicoullaud B., Gate P., Devienne-Baret F., Antonioletti R., Dürr C., Richard G., Beaudoin N., Recous S., Tayot X., Plenet D., Cellier P., Machet J.M., Meynard J.M., Delecolle R., 1998. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balance. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie*. 18:311-346.
- Brisson N., 2002a. Notices concepts et formalismes STICS version 5.0. *INRA-Bioclimatologie Avignon ed.* 119p.
- Brisson N., 2002b. Notices entrées-sorties STICS version 5.0. *INRA-Bioclimatologie Avignon ed.* 42p.
- Brisson N., Ruget F., Gate P., Lorgeou J., Nicoullaud B., Tayot X., Plenet D., Jeuffroy M.H., Bouthier A., Ripoche D., Mary B., Justes E., 2002. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. II. Model validation for wheat and corn. *Agronomie*. 22:69-93.
- Brisson N., Gary C., Justes E., Roche R., Mary B., Ripoche D., Zimmer D., Sierra J., Bertuzzi P., Burger P., Bussi re F., Cabidoche Y.M., Cellier P., Debaeke P., Gaudill re J.P., Mara ux F., Seguin B., Sinoquet H., 2003. An overview of the crop model STICS. *European Journal of Agronomy*. 18:309-332.
- Brisson N., Juin S., Desfonds V., García de Cort azar Atauri I., Lebonvallet S., Ripoche D., Sappe G., Bes B., Bruchou C., Guerif M., Durr C., Launay M., 2005. Quelles composantes environnementales et génétiques pour l'élaboration de la qualité du blé dur en région PACA ? Approche couplée expérimentation – modélisation. *Bilan d'un programme de recherche 2001-2005*. 2 Vol. 45p. + 45p.
- Brisson N., Launay M., Mary B., Beaudoin N., 2008. Conceptual basis, formalisations and parametrization of the STICS crop model . Editions Quae. En préparation.
- Bruand A., Duval O., W sten J.H.M., Lilly A., 1997 The use of pedotransfer in soil hydrology research in Europe. *Proceedings of the second workshop of the project "Using existing soil data to deriv hydraulic parameters for simulation modelling in environmental studies and in land use planning", 10-12/10/1996, Orléans, France*. 211p.
- Bruckler L., Bouaziz A., 1991. La germination des semences en conditions sèches. *Sécheresse* n 4, 2:239-249.
- Bruckler L., Lafolie F., Ruy S., Granier J., Beaudequin D. 2000. Modelling the agricultural and environmental consequences of non-uniform irrigation on a maize crop. 1. Water balance and yield. *Agronomie*. 20:609-624.
- Bruno M.C., Whitehead W.T., 2003. Chenopodium cultivation and formative period agriculture at Chiripa, Bolivia, *Latin American Antiquity*. 14(3):339-355.
- Canahua A., 1977. Observaciones del comportamiento de la quinua e la sequia. *I Congreso Internacional de Cultivos Andinos, Ayacucho, Peru*. p. 390-392.
- Canahua A., Rea J., 1979. Quinuas resistentes a heladas. *II Congreso Internacional de Cultivos Andinos, 4-8 juin 1979, ESPOCH, IICA. Riobamba, Equateur*. p.143-150.

-
- Canahua A., 1994. Influencia de la calidad de semilla a la productividad de cultivos andinos; papa, quinua, kañiwa y tuberculos monores. *VIII Congreso Internacional de Sistemas Agropecuarios Andinos, Valdivia, Chili. Agro-Sur*. 22:22.
- Cardozo A., Tapia M.E., 1979. Valor nutritivo. In *"Quinua y Kaniwa. Cultivos Andinos"*, Tapia, M.E. (Ed.), *Serie libros y Materiales educativos*, vol. 49. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas, Bogota, Colombia. p. 149-192.
- Carrera A., Dürr C., 2003. Analysis of the effects of sowing dates and sowing conditions on sugar beet emergence using the SIMPLE (SIMulation of PLant Emergence) model, *Adv. Sugar Beet Res.* 5:95-106.
- Catacora P., Canahua A., 1992. Selección de genotipos de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) resistentes a heladas y perspectivas de producción en camellones. *Actas del VII Congreso Internacional sobre Cultivos Andinos. 4-8 Fév. 1992, Morales et Vacher, eds., Bolivia, La Paz*. p. 53-56.
- Cieza de León P. 1560. La crónica del Perú. *I edición Vedia. Historiadores primitivos De las indias. Madrid Tomo II*.1879.
- Colnenne C., Meynard J.M., Reau R., Justes E., Merrien A., 1998. Determination of a Critical Nitrogen Dilution Curve for Winter Oilseed Rape. *Annals of Botany*. 81:311-317.
- Couture S.J., DiTommaso A., Asbil W.L., Watson A.K., 2004. Influence of Seeding Depth and Seedbed Preparation on Establishment, Growth and Yield of Fibre Flax (*Linum usitatissimum* L.) in Eastern Canada. *J. Agronomy & Crop Science*. 190(3):184-190.
- Cuzack D., 1984. Quinoa : Grain of the Incas. *Ecologist*. 14:21-31.
- de Bouet du Portal D., 1993. Etude des gelées sur l'altiplano bolivien. *DAA Génie agronomique, ENSAM-ORSTOM, Montpellier, France (Appendix)*.
- de Bruin A., 1964. Investigation of the food value of quinoa and canihua seed. *J. Food Sci.* 29:872-876.
- de Louvigny N., Durr C., Fies J. C., Bruckler L., 2002. Emergence of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) from seedbeds after glass waste deposition on soil. *Soil and Tillage Research*. 66:35-46.
- de Wit C.T., 1978. Simulation of assimilation respiration and transpiration of crops. *Simulation Monographs Pudoc Wageningen*.
- Dejoux J.F., Recous S., Meynard J.M., Trinsoutrot I., Leterme P., 2000. The fate of nitrogen from winter-frozen rapeseed leaves: mineralization, fluxes to the environment and uptake by rapeseed crop in spring. *Plant and Soil*. 218:257-272.
- Di Bella C., Faivre R., Ruget F., Seguin B., 2005. Using VEGETATION satellite data and the crop model STICS-Prairie to estimate pasture production at the national level in France. *Physics and Chemistry of the Earth. Parts A/B/C* 30:3-9.
- Dizes J., Bonifacio A., 1992. Comportement hydrique de quatre variétés de quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) en conditions de culture irriguée et de culture sèche. In *"ORSTOM"*, La Paz, Bolivie. 18p.
- Dizes J., 1992. Fertilisation minérale et fertilisation organique en conditions d'irrigation minimum. In *"ORSTOM"*, La Paz, Bolivie. 23p.
- Dizes J., 1993. Fertilisation minérale et fertilisation organique en conditions d'irrigation minimum (II). In *"ORSTOM"*, La Paz, Bolivie. 11p.
- Dorsainvil F., 2002. Evaluation de l'impact environnemental des cultures intermédiaires sur les bilans d'eau et d'azote. *PhD Thesis, INA Paris-Grignon*. 124p.

- Dorsainvil F., Durr C., Justes E., Carrera A., 2005. Characterisation and modelling of white mustard (*Sinapis alba* L.) emergence under several sowing conditions. *European Journal of Agronomy* 23:146-158.
- Dürr C., Aubertot J.N., Richard G., Dubrulle P., Duval Y., Boiffin J., 2001. SIMPLE: a model for SIMulation of PLant Emergence prediction the effects of soil tillage and sowing operations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65:414-442.
- Echeverria I., 2007. Rapport sur l'impact du changement climatique sur le tassement des sols. *Rapport interne*.40p.
- FAO, 1970. Teneur des aliments en acides aminés et données biologiques sur les protéines, Rome. <http://www.fao.org/docrep/005/ac854t/AC854T00.HTM>
- FAO/WHO/UNU, Food and Agriculture Organization of the United States/World Health Organization/United Nations University 1985. Energy and protein requirements. Report of a joint FAO/WHO/UNU meeting. WHO. Geneva: FAO/WHO/UNU. <http://www.fao.org/DOCREP/003/AA040E/AA040E00.HTM>
- FAOSTAT, 2007. Base de données statistiques de la FAO, <http://www.faostat.fao.org>
- Feillet P., 2000. Le grain de blé, composition et utilisation. *Editions INRA*.
- Felix D., 2004. Diagnostic Agraire de la province Daniel Campos, Bolivia: Le développement de la filière quinoa et ses conséquences sur l'équilibre du système agraire Aymara. *Mémoire ESAT1 Cnearc, Cicda, Ensam. Montpellier*. 113p.
- Fereres E., Steduto P., Hsiao T.C., Raes D., 2006. Modeling Approaches in the Simulation of Water-Limited Crop Production used in the FAO Aquacrop Model. <http://symp2006.cu.edu.tr/Osman%20Tekinel/pdf/FereresetalAdana2006.pdf>
- Flenet F., Villon P., Ruget, F.O., 2004. Methodology of adaptation of the STICS model to a new crop: spring linseed (*Linum usitatissimum*, L.). *Agronomie*. 24:367-381.
- Folliard A., Traore P.C.S., Vaksman M., Kouressy M., 2004. Modeling of sorghum response to photoperiod: a threshold-hyperbolic approach. *Field Crops Research*. 89:59-70.
- Frere M., Rea J., Rijks J.Q., 1975. Estudio Agroclimatológico de la Zona Andina (Informe Técnico).Proyecto Interinstitucional ,FAO/UNESCO/OMM. Roma, Italia. p. 29-51.
- Gabrielle B., Mary B., Roche R., Smith P., Gosse G., 2002. Simulation of carbon and nitrogen dynamics in arable soils: a comparison of approaches. *European Journal of Agronomy*. 18:107-120.
- Gandarillas H. 1967. Observaciones sobre la biología reproductiva de la quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Saya. Sociedad de Ingenieros Agrónomos de Bolivia. Abril-Noviembre. La Paz, Bolivia*. 4p.
- Gandarillas H. 1979. La Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): Botánica. In: *La Quinoa y la Kañiwa, cultivos andinos. Tapia, M. E., Gandarillas, H., Alandia, S., Cardozo, A. et Mujica, A. (eds). CIID-IICA. Bogota, Colombia*. p. 20-44.
- Garcia M., Vacher J.J., Hidalgo J., 1992. Estudio comparativo del comportamiento hídrico de dos variedades de quinua en el Altiplano central. In: *Morales, D. and Vacher, J-J. (eds). Actas del VII Congreso Internacional sobre Cultivos Andinos. La Paz. Bolivia. IBTA-ORSTOM-CIDD*. p. 57-61.

-
- Garcia M., 2003. Agroclimatic study and drought resistance analysis of Quinoa for an irrigation strategy in the Bolivian Altiplano. *Ph.D. dissertation. Dissertationes de Agricultura N° 556. Fac. of Agr. and Applied Biol. Sciences, K.U.Leuven, Belgium.* 184p.
- Garcia M., Raes D., Jacobsen S.E., 2003. Evapotranspiration analysis and irrigation requirements of quinoa (*Chenopodium quinoa*) in the Bolivian highlands. *Agricultural Water Management.* 60:119-134.
- Garcia M., Raes D., Allen R., Herbas C., 2004a. Dynamics of reference evapotranspiration in the Bolivian highlands (Altiplano). *Agricultural and Forest Meteorology.* 125:67-82.
- Garcia M., Raes D., Michel T., Mamani F., 2004b. Limitaciones agroclimaticas para la agricultura a secano en el Altiplano boliviano. *XI Congreso Internacional sobre los Cultivos Andinos*, 3-6 fév. 2004, Cochabamba, Bolivia. 6p.
- García de Cortázar Aauri I., 2006. Adaptation du modèle STICS à la vigne (*Vitis vinifera* L.). Utilisation dans le cadre d'une étude du changement climatique à l'échelle de la France. *Thèse pour l'obtention du grade de docteur de l'Ecole Supérieure Nationale d'Agronomie de Montpellier.* 347p.
- Gate P., 1995. Ecophysiologie du blé, de la plante à la culture. *ITCF / TEC&DOC Lavoisier, Paris.* 429p.
- Geerts S., Mamani R., Garcia M., Raes D., 2006a. Response of quinoa (*Chenopodium Quinoa* Willd) to differential drought stress in the bolivian Altiplano: towards a deficit irrigation strategy within a water scarce region. *International Symposium on Water and Land Management for Sustainable Irrigated Agriculture, Adana, Turquie, 4-8 Avril 2006.*
- Geerts S., Raes D., Garcia M., Del Castillo C., Buytaert W., 2006b. Agro-climatic suitability mapping for crop production in the Bolivian Altiplano: A case study for quinoa. *Agricultural and Forest Meteorology.* 139:399-412.
- Geerts S., 2007. Calibration of the FAO-AquaCrop Model for the Under-Utilized Crop Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.).
<http://a-c-s.confex.com/a-c-s/2007am/techprogram/P31059.HTM>
- Geerts S., Raes D., Garcia M., Vacher J.J., Mamani R., Mendoza J., Huanca R., Morales B., Miranda R., Cusicanqui J., Taboada C., 2008. Introducing deficit irrigation to stabilize yields of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *European Journal of Agronomy.* 28:427-436.
- Germain N., 2004. Producción potencial de biomasa de quinua en el altiplano boliviano : simulaciones exploratorias. In *"Congreso Febrero 2004 sobre los Cultivos Andinos"*. Bolivia, Cochabamba.
- Ghiloufi M., 1999. Méthodologie d'adaptation de STICS à de nouvelles cultures : application au tournesol et à la betterave à sucre. *Mémoire de DAA INA-PG.* 43p.
- Girma S.F., Krieg D.R., 1992a. Osmotic adjustment in sorghum.I. Mechanisms of diurnal osmotic potential changes. *Plant Physiol.* 99:577-582.
- Girma S.F., Krieg D.R., 1992b. Osmotic adjustment in sorghum. II. Relationship to gas exchange rates. *Plant Physiol.* 99:583-588.
- Giusti K. 1970. El género *Chenopodium* en la Argentina. I. Numero de cromosomás. *Darwiniana* 16:98-105.
- Godard C., Roger-Estrade J., Jayet P.A., Brisson N., Le Bas C., 2008. Use of available information at a European level to construct crop nitrogen response curves for the regions of the EU. *Agricultural Systems.* In Press, Corrected Proof.

- Gosse G., Varlet-Grancher C., Bonhomme R., Chartier M., Allirand, J., Lemaire, G., 1986. Production maximale de matière sèche et rayonnement intercepté par un couvert végétal. *Agronomie* 6:47-56.
- Greenwood D.J., Neeteson J.J., Draycott A., 1985. Response of potatoes to N fertilizer: dynamic model. *Plant and Soil*. 85:85-203.
- Guerif J., Richard G., Durr C., Machet J. M., Recous S., Roger-Estrade J., 2001. A review of tillage effects on crop residue management, seedbed conditions and seedling establishment. *Soil and Tillage Research*. 61:13-32.
- Heiser C.B., Nelson D.C., 1974. On the origin of the cultivated Chenopods (*Chenopodium*). *Genetics*. 78:503-505.
- Henson I.E., Jensen C.R., Turner N.C., 1989. Leaf gas exchange and water relations of lupins and wheat. I. Shoot responses to soil water stress. *Aust. J. Plant Physiol*. 16:401-413.
- Hervé D., Génin D., Rivière G. (eds), 1994. Dinamicas del descanso de la tierra en los Andes, IBTA-ORSTOM, La Paz. 356p.
- Herve D., Riviere G., 1998. Les jachères longues pâturées dans les Andes. *Acquis interdisciplinaires. Nature Sciences Societes*. 6:5-19.
- Herve D., Paz Betancourt B., Migueis J., Treuil J.P., 2003. Introduction de la modélisation dans une recherche interdisciplinaire : état et gestion des jachères dans les Andes. *Nature Sciences Societes*. 11:243-254.
- Houlès V., 2004. Mise au point d'un outil de modulation intra-parcellaire de la fertilisation azotée du blé d'hiver basé sur la télédétection et un modèle de culture. *Thèse pour obtenir le titre de Docteur de l'Institut National Agronomique de Paris-Grignon*. 320p.
- Hunziker A.T., 1952. Los pseudocereales de la agricultura indígena de América. *Acme Agency, Buenos Aires*. p. 1-104.
- Jacobsen S.E., Stølen O. 1993. Quinoa - Morphology, phenology and prospects for its production as a new crop in Europe. *European Journal of Agronomy*. 2:19-29.
- Jacobsen S.E., Jørgensen I., Stølen O. 1994. Cultivation of quinoa (*Chenopodium quinoa*) under temperate climatic conditions in Denmark. *Journal of Agricultural Science*. 122:47-52.
- Jacobsen S.E., 1997. Temperature and light requirement for the germination of quinoa (*Chenopodium quinoa*). In "European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research" (E. Commission, ed.), Luxembourg. p. 87-102.
- Jacobsen S.E., 1998. The influence of temperature on seed germination rate in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Seed Sci. & Technol*. 26:515-523.
- Jacobsen S.E., 1999. Effect of harvest time, drying technique, temperature and light on the germination of quinoa (*Chenopodium quinoa*). *Seed Sci. & Technol*. 27:937-944.
- Jacobsen S.E., Monteros C., Christiansen J.L., Mujica A., 2000a. Agronomic and physiological response of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) to frost at three phenological stages. *European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research (E. Commission, ed.)*, Bruxelles. p. 541-546.
- Jacobsen S.E., Quispe H., Christiansen J.L., Mujica A., 2000b. What are the mechanisms responsible for salt tolerance in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.)? *European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research (E. Commission, ed.)*, Bruxelles. p. 511-516.
- Jacobsen S.E., Quispe H., Mujica A., 2000c. Quinoa: an alternative crop for saline soils in the Andes. *CIP Report Program 1999-2000 (CIP, ed.)*, Peru, Lima. p. 403-408.

-
- Jacobsen S.E., Mujica A., 2001. Quinoa : Cultivo con resistencia a la sequia y otros factores adversos. In "Proyecto Quinoa CIP-DANIDA", Lima. p. 175-179.
- Jacobsen S.E., Mujica A., Jensen C.R., 2003. The resistance of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) to adverse abiotic factors. *Food Rev. Int.* 19:99-109.
- Jacobsen S.E., Monteros C., Christiansen J.L., Bravo L.A., Corcuera L.J., Mujica A., 2005. Plant responses of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) to frost at various phenological stages. *European Journal of Agronomy*. 22:131-139.
- Jacobsen S.E., Monteros C., Corcuera L.J., Bravo L.A., Christiansen J.L., Mujica A., 2007. Frost resistance mechanisms in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *European Journal of Agronomy*. 26:471-475.
- Jaggard K.W., 1994. Effets de l'implantation de la culture sur l'interception du rayonnement et sur le rendement. In : *L'implantation de la betterave industrielle, Chauny (France)*. Ed. INRA, Paris, *Les Colloques de l'INRA*. 67:67-85.
- Jamagne M., Bétrémieux R., Bégon J.C., Mori A., 1977. Quelques données sur la variabilité dans le milieu naturel de la réserve en eau des sols. *Bull Tech Inf.* 324-325 119-157
- Jensen C.R., Mogensen V.O., Mortensen G., Anderson M.N., Schjoerring J.K., Thage J.H., Koribidis J., 1996. Leaf photosynthesis, and drought adaptation in field grown oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Aust. J. Plant Physiol.* 23:631-644.
- Jensen C.R., Mogensen V.O., Poulsen H.H., Henson I.E., Aagot S., Hansen E., Ali M., Wollenweber B., 1998. Soil water matric potential rather than water content determines drought responses in field-grown lupin (*Lupinus angustifolius* L.). *Aust. J. Plant Physiol.* 25:353-363.
- Jensen C.R., Jacobsen S.E., Andersen M.N., Núñez N., Andersen S.D., Rasmussen L., Mogensen V.O., 2000. Leaf gas exchange and water relation characteristics of field quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) during soil drying. *European Journal of Agronomy*. 13:11-25.
- Kaul H.P., Kubler E., Aufhammer W., 2002. Sowing date and crop density effects on grain amaranth and quinoa in south-west germany. In "*VII Congress of the European Society for Agronomy*", Espagne, Cordoba. p. 195-196.
- Koziol M.J., 1992. Chemical composition and nutritional evaluation of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *J. Food Comp. Anal.* 5:35-68.
- Laguna P. 2002. Competitividad, externalidades e internalidades: un reto para les organizaciones economicas campesinas. *Debate Agrario, Analysis y Alternativas*. Lima, Pérou. 34:95-169.
- Launay M., Flenet F., Ruget F., Garcia de Cortazar Atauri I., 2005. Génécité et méthodologie d'adaptation de STICS à de nouvelles cultures. *Séminaire STICS, Carry-le-Rouet (mars 2005)*. p. 55-57.
- Launay M., Abdessemed A., Dürr C., Peltier E., 2008a. Répercussion des résultats d'implantation du lin sur sa production, simulée grâce au couplage des modèles STICS et SIMPLE. En préparation.
- Launay M., Brisson N., Satger S., Hauggaard-Nielsen H., Dibet A., Corre-Hellou G., Kasyanova E., Monti M., Dahlmann C., 2008b. Investigating intercrop management options in european organic cropping systems thanks to crop modelisation. En préparation.
- Le Tacon P., Vacher J.J., Eldin M., Imaña E., 1992. Los riesgos de heladas en el Altiplano Boliviano. In: *Morales, D. and Vacher, J-J. (eds). Actas del VII Congreso Internacional sobre Cultivos Andinos*. La Paz. Bolivia. IBTA-ORSTOM-CIID. p. 4-11.

- Ledoux E., Gomez E., Monget J.M., Viavattene C., Viennot P., Ducharne A., Benoit M., Mignolet C., Schott C., Mary B., 2007. Agriculture and groundwater nitrate contamination in the Seine basin. The STICS-MODCOU modelling chain. *Science of The Total Environment*. 375:33-47.
- Lemaire G., Gastal F., Plénet D., 1997. Dynamics of N uptake and N distribution in plant canopies. Use of crop N status index in crop modelling. In: *Diagnostic Procedures for Crop N Management*. Eds G Lemaire and I G Burns. INRA, Paris. p. 15-29.
- Lemaire G., Brisson N., 2005. Courbes de dilution de l'azote: formalisation du passage de la plante isolée au peuplement dense. *Séminaire STICS, Carry-le-Rouet (mars 2005)*. p. 15-30.
- Lhomme J.P., Vacher J.J., 2002. Modelling nocturnal heat dynamics and frost mitigation in Andean raised field system. *Agricultural and Forest Meteorology*. 112:179-193.
- Lhomme J.P., Vacher J.J., 2003. La mitigacion de heladas en los camellones del Altiplano andino. *Bull. Inst. fr. études andines*. 32:377-399.
- Makowski D., Hillier J., Wallach D., Andrieu B., Jeuffroy M.H., 2006. Parameter estimation for crop models. In *Working with Dynamic Crop Models. Evaluation, Analysis, Parameterization, and Applications*. Wallach D., Makowski D., Jones, J., Eds. 462p.
- Martineau Y., 2004. Modélisation des successions post-culturelles. Application à la gestion durable des agro-écosystèmes des hautes Andes tropicales. *Thèse pour obtenir le titre de Docteur en sciences de l'Université Paris 11, Orsay*. 221p.
- Mary B., Guerif M., 2005. Effet du stress azoté sur la plante: définition d'un indice de nutrition instantané. *Séminaire STICS, Carry-le-Rouet (mars 2005)*. p. 23-27.
- Monteros C., Jacobsen S.E., 2001. Respuesta agronomica y fisiologica de la quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) a temperaturas congelantes en 3 estados fenologicos. *Proyecto Quinoa CIP-DANIDA*, Lima. p. 197-207.
- Morlon P., 1992. Réduction des risques climatiques par les aménagements : l'exemple des gelées sur l'Altiplano. *Comprendre l'agriculture paysanne dans les Andes Centrales* (INRA, ed.). p. 265-277.
- Morot-Gaudry J.F., Orsel M., Diaz C., Daniel-Vedele F., Masclaux-Daubresse C., 2006. Absorption et assimilation du nitrate et recyclage de l'azote organique chez les plantes : intérêt pour le colza. *Oléagineux, Corps Gras, Lipides*. 13(6):393-402.
- Moulin C., 2006. Impact du changement climatique sur la conduite de systèmes agricoles rencontrés en Picardie à l'aide du modèle STICS. *Mémoire Master FENEC Montpellier*. 50p.
- Mujica A., Canahua A., 1989. Fases fenológicas del cultivo de la quinua (*Chenopodium quinoa* Willdenow). In: *Curso Taller, Fenología de cultivos andinos y uso de la información agrometeorológica*. Salcedo, 7-10 agosto, INIAA, EEZA-ILLPA, PICA, PISA. Puno, Perú. p. 23-27.
- Mujica A., Apaza V., Jacobsen S.E., 2000. Respuesta de la quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) al deficit hidrico. *Congreso Internacional de Agricultura en Zonas Aridas, Chile, Arica*. 21p.
- Mujica A., Izquierdo J., Marathee J.P., 2001. Origen y descripción de la quinua. *Quinoa (Chenopodium quinoa Willd.) : ancestral cultivo andino, alimento del presente y futuro*. Mujica, A., Jacobsen, S. E., Izquierdo, J., Marathee, J. P. et FAO (eds). CIP, UNAP. FAO, CD Cultivos Andinos, version 1.0. Santiago, Chile.
- Mumen M., 2006. Caractérisation du fonctionnement hydrique des sols à l'aide d'un modèle mécaniste de transferts d'eau et de chaleur mis en œuvre en fonction d'informations disponibles sur le sol. *Thèse Université d'Avignon*. 181p.

-
- Nelder J.A., Mead R., 1965. A simplex method for function minimization. *Computer Journal*. 7:308-313.
- Nina Laura P., 2003. Estudio agrofisiológico de dos variedades de quinua bajo stress térmico en la estación experimental de Choquenaira. *Mémoire de tesis de licenciatura, Faculté d'Agronomie, Universidad Mayor de San Andres, La Paz, Bolivie*.
- Nina Laura J.P., Del Castillo C., Winkel T., 2004. Comportamiento de quinuas tradicional y mejorada frente al estrés térmico. *XI Congreso Internacional de Cultivos Andinos, Cochabamba, Bolivia, Fundación PROINPA. CD-Rom: PDF file no. P-6*.
- Nykiforuk C.L., 1999. Storage reserve mobilization during low temperature germination and early seedling growth in *Brassica Napus*. *Plant. Physiol. Biochem.* 37(12):939-947.
- Pacheco A., Morlon P., Rossel J., 1978. Los sistemas radicales de las plantas de interés económico en el Altiplano de Puno: un estudio preliminar. *Puno, Perú*. 20 p.
- Pestalozzi H. 2000. Sectoral fallow systems and the management of soil fertility: The rationality of indigenous knowledge in the High Andes of Bolivia. *Mountain Research and Development*. 20(1):64-71
- Planella M.T., Tagle B., 2004. Inicios de presencia de cultivos en la zona central de Chile, periodos arcaico y alfarero temprano. *Chungara*. 25:387-399.
- Proinpa, 2008. <http://www.proinpa.org/>
- Raffaillac J.P., Barrientos E., Mamani F., Rodríguez J.P., 2007. Una red agronómica quinua en el altiplano boliviano. *Congreso Internacional de la Quinoa, CIHDE & Univ. A Prat ed., 23-26 octubre de 2007, Iquique, Chili. Ponencia n° 25*.
- Rawls W.J., Brakensiek D.L., 1989. Estimation of soil water retention and hydraulic properties. In: Morel, S. (Ed.), *Unsaturated Flow in Hydrologic Modeling. Theory and Practice*. Kluwer academic publishers. p. 275-300.
- Rea J., 1969. Biología floral de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Turrialba*. 19:91-96.
- Rodriguez R., 1978. Determinación del porcentaje de autopolinización y cruzamientos naturales en tres variedades comerciales de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Tesis de Ing. Agro. Facultad de Agronomía. Universidad Nacional del Altiplano. Puno, Perú*. 86 p.
- Rea J., Tapia M.E., Mujica A. 1979. Prácticas agronómicas. *La Quinoa y la Kañiwa, cultivos andinos. Tapia, M. E., Gandarillas, H., Alandia, S., Cardozo, A. et Mujica, A. (eds). CIID-IICA. Bogota, Colombia*. p. 83-120.
- Richard G., Brisson N., 2005. Proposition de formalismes simples pour STICS simulant les retards ou manques à la levée quand il y a présence d'une croûte de battance. *Document interne*. 3 p.
- Richard G., Brisson N., Lebonvallet S., Ripoche D., Boizard H., Défossez P., Chanzy A., Roger-Estrade J., 2007. Eléments de description de la structure du sol introduits dans STICS. *Séminaire STICS, Session 6, Reims 20-22 mars*.
- Riffard M., Augeard B., Kao C., Andreassian V., Ansart P., Chaumont C., 2003. Synthèse des recherches effectuées sur le bassin versant de l'Orgeval, affluent du Grand Morin, sur la thématique ruissellement/érosion 1962 – 2002. *Document CEMAGREF*. 42p. + Annexes.
- <http://www.antony.cemagref.fr/qhan/site%20orgeval/etudes/Synthese%20Orgeval.pdf>
- Ripoche D., Weiss M., Prevot L., 2001. Driving the STICS application to remote sensing. *Proceedings of 2nd International Symposium on Modelling Cropping System, Italy*. p. 169-170.

- Risi J., Galwey N.W. 1984. The Chenopodium grains of the Andes: Inca crops for modern agriculture. *Advances in Applied Biology*. 10:145-216.
- Ritchie J.T., 1972. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resource Research*. 8:1204-1213.
- Ritchie J.T., 1985. A user-oriented model for the soil water balance in wheat. In : *Wheat Growth and Modeling E FRY and TK ATKIN (eds) Plenum publishing corporation NATO-ASI Series*. p. 293-305
- Roberts E.H., Ellis R.H., 1989. Water and seed survival. *Ann. Bot.*63:39-52.
- Rodriguez J.P., 2005. El papel del tamaño de semilla de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) en el crecimiento y desarrollo de las plantas frente a diferentes profundidades de siembra. *Tesis de grado. UMSA, La Paz, Bolivie*. 110p.
- Rodriguez J.P., 2006. Analyse de la levée du Quinoa par simulation dans les conditions climatiques de l'Altiplano central. *Document interne*. 2p.
- Rosa M., Hilal M., Gonzalez J.A., Prado F.E., 2004. Changes in soluble carbohydrates and related enzymes induced by low temperature during early developmental stages of quinoa (*Chenopodium quinoa*) seedlings. *Journal of Plant Physiology*.161:683-689.
- Ruget F., Brisson N., Delécolle R., Faivre R., 2002. Sensitivity analysis of a crop simulation model, STICS, in order to choose the main parameters to be estimated. *Agronomie*. 22:133-158.
- Sarmiento L., Bottner P., 2002. Carbon and nitrogen dynamics in two soils with different fallow times in the high tropical Andes: indications for fertility restoration. *Applied Soil Ecology*. 19:79-89.
- Schlick G., Budenheim D.L., 1996. Quinoa: candidate crop for NASA's controlled ecological life support systems. *Progress in new crops (J. Janick, ed.) USA, Arlington (VA)*. p. 632-640.
- Schulte auf'm Erley G., Kaul H.-P., Kruse M., Aufhammer W., 2005. Yield and nitrogen utilization efficiency of the pseudocereals amaranth, quinoa, and buckwheat under differing nitrogen fertilization. *European Journal of Agronomy*. 22:95-100.
- Sellers W.D., 1965. Physical climatology. *University of Chicago*. 272p.
- Shimshi D., Mayoral M.L., Atsmon D., 1982. Responses to water stress in wheat and related wild species. *Crop Sci*. 22:123-128.
- Sigstad E.E., Prado F.E., 1999. A microcalorimetric study of *Chenopodium quinoa* Willd. seed germination. *Thermochimica Acta*. 326:159-164.
- Soltani A., Robertson M.J., Torabi B., Yousefi-Daz M., Sarparast R., 2006. Modelling seedling emergence in chickpea as influenced by temperature and sowing depth. *Agricultural and Forest Meteorology*. 138:156-167.
- Sooroshian S., Gupta V.K., 1993. Model calibration. In: Singh V.P. (ed.), *Computer Models of Watershed Hydrology. Water Ressources Publication*, 1130.
- Tamet V., Boiffin J., Dürr C., Souty N., 1996. Emergence and early growth of an epigeal seedling (*Daucus carota* L.): influence of soil temperature, sowing depth, soil crusting and seed weight. *Soil and Tillage Research*. 40:25-38.
- Tapia M.E., Gandarillas H., Alandia S., Cardozo A., Mujica A., Ortiz R., Otazu V., Rea J., Salas B., Zanabria E., eds., 1979. La Quinoa y la Kañiwa, cultivos andinos. Colombia, Bogota. 228p.

-
- Tapia M.E., 2000. Cultivos andinos subexplotados y su aporte a la alimentación. *Quinoa (Chenopodium quinoa Willd.): ancestral cultivo andino, alimento del presente y futuro*. Mujica, A., Jacobsen, S. E., Izquierdo, J., Marathee, J. P. et FAO (eds). CIP, UNAP. FAO, CD *Cultivos Andinos, version 1.0. Santiago, Chile*.
- Triboï-Blondel AM., 1988. Mise en place et fonctionnement des feuilles de colza d'hiver: relation azote carbone et senescence. *Agronomie*. 9:37-44.
- Vacher J.J., Imaña E., 1987. Los riesgos climaticos en el Altiplano boliviano. *OMM-SENAMHI-Orstom, Bolivia*.
- Vacher J.J., Atteia O., Imaña E., Choquevilca J., Maldonado R., 1989. Net radiation and evapotranspiration on the bolivian altiplano. *American Meteorological Society*. 4:169-172.
- Vacher J.J., Atteia O., Imaña E., 1988. La radiación neta y la evapotranspiración potencial (ETP) en el altiplano boliviano. *Actas del 2o simposio de la investigación francesa en Bolivia*, 19-22 abril 1988, La Paz, Bolivie. p. 143-153.
- Vacher J.J., Erugioni I., Fellman T., 1994. Evolucion del balance hidrico invernal en diferentes parcelas de descanso en el altiplano boliviano. *In : Herve et al. (ed.)*. p. 127-139.
- Vacher J.J., Imaña E., Canqui E., 1994. Las características radiativas y la evapotranspiración potencial en el altiplano boliviano. *Revista de Agricultura ORSTOM-UMSS*. 12:4-11.
- Vacher J. J., 1998. Responses of two main Andean crops, quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) and papa amarga (*Solanum juzepczukii* Buk.) to drought on the Bolivian Altiplano: Significance of local adaptation. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 68:99-108.
- Viloingt T., 2005. Identification et quantification des risques liés à l'implantation des cultures de printemps en semi direct derrière une culture intermédiaire : importance de l'humidité du sol. *Mémoire de fin d'études ESA Angers (stage IFA)*. 122p. + Annexes.
- Wallach D., Goffinet B., Bergez J.E., Debaeke P., Leenhardt D., Aubertot J.N., 2001. Parameter estimation for crop models: a new approach and application to a corn model. *Agron. J.*. 93:757-766.
- Weberbauer A., 1945. El Mundo Vegetal de los Andes Peruanos. *Ministerio de Agricultura, Pérou*.
- Wilson H.D., 1990. Quinoa and Relatives (*Chenopodium* sect. *Chenopodium* subsect. *Cellulata*). *Economic botany*. 44:92-110.
- Winkel T., 2006. Projet Equeco, programme fédérateur Agriculture et Développement Durable, appel d'offre 2006. 48p.
- Winkel T., Lhomme J.P., Nina Laura J.P., Mamani Alcón C., del Castillo C., Rocheteau A.. Assessing the protective effect of heterogeneous canopies against radiative frost: the case of the quinoa crop on the Andean Altiplano. En préparation.
- Wright K.H., Pike O.A., Fairbanks D.J., Huber C.S., 2002. Composition of *Atriplex hortensis*, sweet and bitter *Chenopodium quinoa* seeds. *J. Food Sci.* 67(4):1383-1385.
- Zvietcovich G., 1976. Identificación del comportamiento fisiológico de la quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) y cañihua (*Chenopodium pallidicaule*) como plantas eficientes C4 o ineficientes C3. *Segunda Convencion Internacional de Quenopodiaceas, Potosi, Bolivie*. p. 70-77.

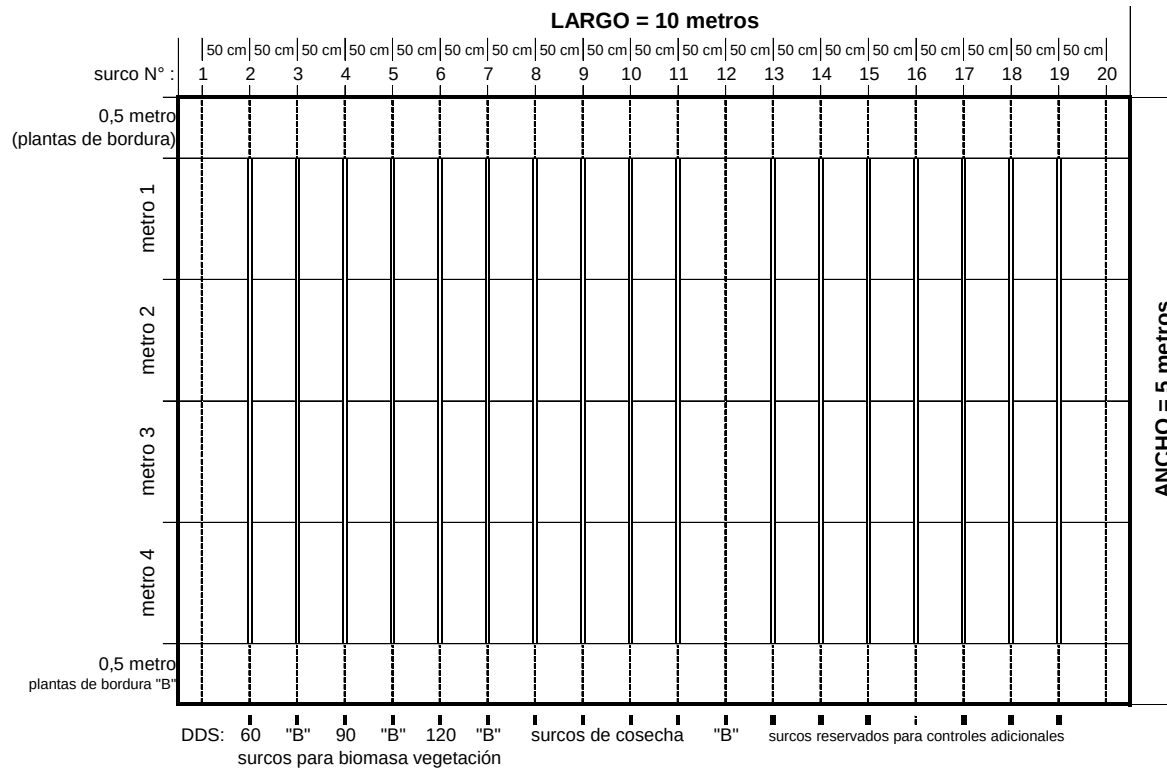
ANNEXE I

-

DISPOSITIF EXPERIMENTAL DES ESSAIS

Figure 1. Plan des essais

a- En ligne

UNIDAD EXPERIMENTAL para CONDORIRI, CHOQUENAIRA y BELEN

b- En poquet

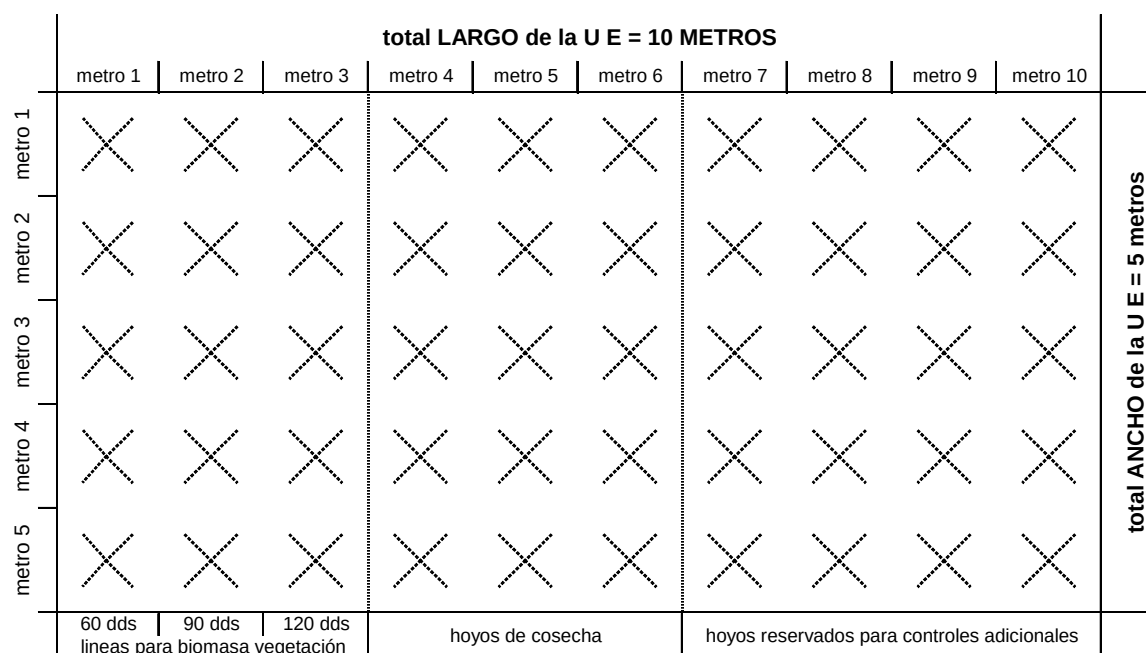
UNIDAD EXPERIMENTAL para Salinas de Garci Mendoza (opción 2)
(entre Hoyos : distancia de 1,0 metro)

Tableau 1. Variétés utilisées

origine des variétés	2003-2004		2004-2005		2005-2006	
CENTRE	V01	CHUCAPACA	V01	CHUCAPACA	V01	CHUCAPACA
	V02	SURUMI	V02	SURUMI	V02	SURUMI
	V03	KAMIRI	V03	KAMIRI	V03	KAMIRI
NORD	V04	HUGANDA	V04	HUGANDA	V04	HUGANDA
	V05	JIWAKI	V05	JIWAKI	V05	JIWAKI
	V06	AGRO 2000	V06	BELEN 2000	V06	KURMI
SUD	V07	TOLEDO NARANJA	V07	PISANKALLA	V07	K'ELLU
	V08	REAL BLANCA	V08	REAL BLANCA	V08	REAL BLANCA
	V09	TOLEDO ROJO	V09	TOLEDO ROJO	V09	TOLEDO ROJO
	V10	K'ELLO	V10	PANDELA	V10	PANDELA

Figure 2. Répartition des variétés dans les quatre blocs

	BLOC 1 10 m 1 m		BLOC 2 10 m 1 m		BLOC 3 10 m 1 m		BLOC 4 10 m
5 m	V04		V10		V02		V05
10 m							
15 m	V07		V02		V03		V06
20 m							
25 m	V03		V07		V09		V08
30 m							
35 m	V01		V04		V05		V01
40 m							
45 m	V08		V09		V08		V04
50 m							
55 m	V10		V05		V06		V02
60 m							
65 m	V06		V01		V10		V09
70 m							
75 m	V09		V03		V01		V07
80 m							
85 m	V02		V06		V04		V03
90 m							
95 m	V05		V08		V07		V10

Tableau 2. Résumé des caractéristiques

☒ Caractéristiques pour les sites Nord, Centre et Lac

Essais en 4 blocs

1 bloc : Longueur : 50 m, largeur : 10 m, 10 parcelles (Unités expérimentales) par bloc, 40 parcelles (61 m X 45 m = 2745 m²)

Unité Expérimentale : Longueur = 10 m, largeur = 5 m, 20 sillons espacés de 50 cm, semis en ligne à la main (2,5 grammes par sillon de 5 mètre linéaire)

☒ Caractéristiques des sites Sud de la zone intersalar

	Plaines « Planicie » (Sivingani & Irpani)	En pente « ladera » (PITCA)
Nombre de blocs	4	4
Parcelles par bloc	10	10
Longueur UE	10 m	6 m
largeur UE	5 m	3 m
Surface UE	50 m ²	18 m ²
Semis en poquets à la main	10 lignes	10 lignes
Distance entre poquets	1 m	0,6 m
allées	1 m	1 m
Superficie totale	61 m X 45 m = 2745 m ²	41 m x 29 m = 1190 m ²

ANNEXE II

-

CARACTERISTIQUES DES SOLS DES ESSAIS

Tableau 1. Valeur des paramètres sol

Sol	Argile (%)	N organique (%)	CaCO ₃	pH	Albédo	Q0	Obstacle racinaire	Horizon	Epaisseur (cm)	Capacité au champ (%)	Point de flétrissement (%)	Densité apparente (g/cm ³)	INFIL (mm/jour)
1-Nord 2001-2002	20	0.09	0.03	7.20	0.25	2.67	200	1	5	19.1	12.0	1.45	2.42
								2	25	19.1	12.0	1.45	2.42
								3	10	19.1	12.0	1.45	2.42
								4	80	19.1	12.0	1.45	2.42
2-Nord 2002-2003	15	0.13	0.03	7.05	0.25	3.76	200	1	5	22.2	12.4	1.31	3.78
								2	25	22.2	12.4	1.31	3.78
								3	10	22.3	11.0	1.32	3.78
								4	80	22.3	11.0	1.51	2.37
3-Nord 2002-2003	19	0.21	0.03	6.00	0.25	2.70	200	1	5	26.9	11.6	1.50	2.05
								2	25	26.9	11.6	1.40	2.78
								3	10	26.9	11.6	1.40	2.78
								4	80	26.9	11.6	1.40	2.78
4-Nord 2002-2003	15	0.13	0.03	7.05	0.25	3.76	200	1	5	22.2	12.4	1.31	3.78
								2	25	22.2	12.4	1.31	3.78
								3	10	22.3	11.0	1.32	3.78
								4	80	22.3	11.0	1.51	2.37
5-Nord 2003-2004	8	0.07	0.10	6.90	0.25	1.40	200	1	5	15.9	7.3	1.61	1.25
								2	25	15.5	7.0	1.62	1.17
								3	10	15.2	6.8	1.63	1.10
								4	80	16.5	7.6	1.60	1.32
6-Nord 2004-2005	11	0.09	0.10	7.40	0.25	1.95	200	1	5	20.1	9.0	1.53	1.83
								2	25	19.6	8.7	1.54	1.76
								3	10	19.1	8.5	1.55	1.69
								4	80	16.2	7.4	1.61	1.25
7-Nord 2004-2005	27	0.20	0.03	8.31	0.25	3.50	200	1	5	31.0	16.5	1.34	3.22
								2	25	30.9	16.5	1.35	3.15
								3	10	30.8	16.5	1.35	3.15
								4	80	31.4	15.9	1.35	3.15
8-Nord 2005-2006	21	0.09	0.10	6.90	0.25	2.75	200	1	5	23.9	13.9	1.44	2.49
								2	25	24.0	13.9	1.44	2.49
								3	10	24.1	13.9	1.44	2.49
								4	80	24.1	14.4	1.44	2.49
9-Centre 2003-2004	10	0.07	0.20	7.90	0.25	1.95	200	1	5	20.4	8.5	1.54	1.76
								2	25	19.8	8.5	1.55	1.72
								3	10	19.5	8.5	1.55	1.69
								4	80	19.5	8.5	1.55	1.69
10-Centre 2004-2005	22	0.08	0.60	8.40	0.25	2.90	200	1	5	25.9	14.2	1.41	2.71
								2	25	24.9	13.6	1.43	2.59
								3	10	23.4	12.9	1.45	2.42
								4	80	22.7	12.3	1.47	2.27
11-Centre 2005-2006	31	0.11	0.10	7.25	0.25	3.40	200	1	5	31.4	18.6	1.34	3.22
								2	25	29.8	17.6	1.36	3.07
								3	10	27.9	16.7	1.39	2.85
								4	80	26.8	16.3	1.40	2.78
12-Sud 2003-2004	5	0.02	0.01	7.00	0.25	0.80	200	1	5	12.3	5.4	1.70	0.59
								2	25	12.9	5.8	1.68	0.70
								3	10	13.4	6.1	1.67	0.81
								4	80	13.6	6.1	1.66	0.88
13-Sud 2004-2005	4	0.02	0.10	7.10	0.25	0.70	200	1	5	10.9	4.8	1.71	0.52
								2	25	11.7	5.2	1.70	0.55
								3	10	12.5	5.5	1.70	0.59
								4	80	14.0	6.2	1.66	0.88
14-Sud 2005-2006	15	0.02	0.10	7.00	0.25	2.10	200	1	5	18.5	10.9	1.53	1.83
								2	25	18.7	11.2	1.52	1.87
								3	10	18.8	11.5	1.52	1.90
								4	80	18.5	11.5	1.52	1.90

Tableau 2. Valeur des paramètres physiques après changement de fonctions de pédotransfert

Sol	Q0	Horizon	Epaisseur (cm)	Capacité au champ (%)	Point de flétrissement (%)	Densité apparente (g/cm3)	INFIL (mm/jour)
1-Nord 2001-2002	9.60	1	5	19.0	10.0	1.50	3.46
		2	25	19.0	10.0	1.50	4.51
		3	10	19.0	10.0	1.50	4.28
		4	80	19.0	10.0	1.50	4.53
2-Nord 2002-2003	9.40	1	5	22.0	11.0	1.50	1.47
		2	25	22.0	11.0	1.50	1.59
		3	10	22.0	11.0	1.50	1.58
		4	80	22.0	11.0	1.50	1.59
3-Nord 2002-2003	9.50	1	5	38.0	25.0	1.50	0.07
		2	25	38.0	25.0	1.50	0.07
		3	10	38.0	25.0	1.50	0.07
		4	80	38.0	25.0	1.50	0.07
4-Nord 2002-2003	9.40	1	5	22.0	11.0	1.50	1.47
		2	25	22.0	11.0	1.50	1.59
		3	10	22.0	11.0	1.50	1.58
		4	80	22.0	11.0	1.50	1.59
5-Nord 2003-2004	8.64	1	5	12.0	5.0	1.40	9.64
		2	25	12.0	5.0	1.40	17.00
		3	10	12.0	5.0	1.40	13.91
		4	80	12.0	5.0	1.40	17.19
6-Nord 2004-2005	8.88	1	5	12.0	5.0	1.40	9.64
		2	25	12.0	5.0	1.40	17.00
		3	10	12.0	5.0	1.40	13.91
		4	80	12.0	5.0	1.40	17.19
7-Nord 2004-2005	10.20	1	5	24.0	12.0	1.45	1.04
		2	25	24.0	12.0	1.45	1.07
		3	10	24.0	12.0	1.45	1.07
		4	80	24.0	12.0	1.45	1.07
8-Nord 2005-2006	9.68	1	5	19.0	10.0	1.50	3.46
		2	25	19.0	10.0	1.50	4.51
		3	10	19.0	10.0	1.50	4.28
		4	80	19.0	10.0	1.50	4.53
9-Centre 2003-2004	8.80	1	5	12.0	5.0	1.40	9.64
		2	25	12.0	5.0	1.40	17.00
		3	10	12.0	5.0	1.40	13.91
		4	80	12.0	5.0	1.40	17.19
10-Centre 2004-2005	9.76	1	5	22.0	11.0	1.50	1.47
		2	25	22.0	11.0	1.50	1.59
		3	10	22.0	11.0	1.50	1.58
		4	80	19.0	10.0	1.50	4.53
11-Centre 2005-2006	10.48	1	5	31.0	19.0	1.45	0.07
		2	25	22.0	11.0	1.50	1.59
		3	10	22.0	11.0	1.50	1.58
		4	80	26.0	15.0	1.55	0.05
12-Sud 2003-2004	7.10	1	5	8.0	3.0	1.35	12.12
		2	25	8.0	3.0	1.35	21.00
		3	10	8.0	3.0	1.35	17.50
		4	80	8.0	3.0	1.35	21.62
13-Sud 2004-2005	6.80	1	5	8.0	3.0	1.35	12.12
		2	25	8.0	3.0	1.35	21.00
		3	10	8.0	3.0	1.35	17.50
		4	80	12.0	5.0	1.40	17.19
14-Sud 2005-2006	7.70	1	5	19.0	10.0	1.50	3.46
		2	25	19.0	10.0	1.50	4.51
		3	10	19.0	10.0	1.50	4.28
		4	80	19.0	10.0	1.50	4.53

Tableau 3. Analyses des sols des parcelles du réseau 2003-2004

Echantillon		NORD 5-15 cm	NORD 15-40 cm	MOYENNE NORD	CENTRE 0-15 cm	CENTRE 15-30 cm	MOYENNE CENTRE	SUD 0-20 cm	SUD 20-40 cm	SUD 40-60 cm	MOYENNE SUD
<i>Granulométrie sans décarbonatation</i>											
Argile (<2 microns)	g/kg	77	74	76	103	101	102	47	56	64	55
Limon fin (2/20 microns)	g/kg	59	59	59	141	121	131	46	53	58	52
Limon grossier (20/50 microns)	g/kg	115	106	111	185	154	170	46	59	63	56
Sable fin (50/200 microns)	g/kg	496	520	508	316	340	328	315	307	310	311
Sable grossier (200/2000 microns)	g/kg	253	240	247	255	284	270	546	525	506	526
Argile	%	8%	7%	8%	10%	10%	10%	5%	6%	6%	6%
Limon	%	17%	17%	17%	33%	27%	30%	9%	11%	12%	11%
Sable	%	75%	76%	75%	57%	62%	60%	86%	83%	82%	84%
pH eau	g/kg	6.5	7.2	6.9	7.9	8.0	7.9	7.0	7.1	7.5	7.2
Calcaire total	g/kg	1	1	1	2	1	1.67	<1	<1	<1	<1
Phosphore P2O5 M.Olsen	g/kg	0.070	0.043	0.057	0.013	0.009	0.011	0.017	0.008	0.006	0.010
Capacité d'échange cationique M.Metson	cmol+/kg	5.2	4.7	5.0	7.8	7.6	7.7	4.1	4.8	5.0	4.6
Sodium Na2O (échangeable acétate d'ammonium)	g/kg	0.021	0.035	0.028	0.028	0.021	0.024	0.033	0.041	0.045	0.039
Magnésium MgO (échangeable acétate d'ammonium)	g/kg	0.161	0.189	0.175	0.245	0.267	0.256	0.167	0.196	0.200	0.188
Potassium K2O (échangeable acétate d'ammonium)	g/kg	0.285	0.290	0.288	0.232	0.208	0.220	0.240	0.222	0.259	0.240
<i>Carbone et azote selon ISO 10694 et 13878</i>											
- carbone organique	g/kg	5.793	2.393	4.093	5.527	3.910	4.718	1.867	1.483	1.187	1.512
- matières organiques	g/kg	9.967	4.133	7.050	9.250	6.733	7.740	3.233	2.567	2.055	2.689
- azote organique	g/kg	0.670	0.367	0.518	0.703	0.587	0.645	0.188	0.163	0.139	0.164
Rapport C/N (carbone organique sur azote total)		8.620	6.370	7.495	7.843	6.607	7.225	9.813	9.077	8.530	9.140
Conductivité totale sur extrait 1/5(m/v) à 25°C	mS/cm	0.060	0.047	0.053	0.057	0.043	0.050	0.021	0.015	0.011	0.015
<i>Azote minéral sur sol frais</i>											
- azote nitrique (N de NO3)	mg/kg	0.26	0.44	0.35	0.27	0.94	0.60	3.12	1.32	1.46	1.97
- azote ammoniacal (N de NH4)	mg/kg	10.70	5.08	7.89	8.24	8.18	8.21	0.62	0.42	0.29	0.44

Tableau 4. Analyses des sols des parcelles du réseau 2004-2005

Echantillon		NORD 0-20 cm	NORD 20-40 cm	NORD 40-60 cm	MOYENNE NORD	CENTRE 0-20 cm	CENTRE 20-40 cm	CENTRE 40-60 cm	MOYENNE CENTRE	SUD 0-20 cm	SUD 20-40 cm	SUD 40-60 cm	MOYENNE SUD
<i>Granulométrie sans décarbonatation</i>													
Argile (<2 microns)	g/kg	105	103	79	96	218	207	185	203	41	53	73	56
Limon fin (2/20 microns)	g/kg	100	95	65	86	154	145	116	138	35	63	90	63
Limon grossier (20/50 microns)	g/kg	197	170	126	164	122	124	106	117	45	66	103	71
Sable fin (50/200 microns)	g/kg	466	471	462	466	234	245	278	252	346	366	266	326
Sable grossier (200/2000 microns)	g/kg	133	163	270	188	273	280	316	290	534	452	468	485
Argile	%	11%	10%	8%	10%	22%	21%	19%	20%	4%	5%	7%	6%
Limon	%	30%	26%	19%	25%	28%	27%	22%	26%	8%	13%	19%	13%
Sable	%	60%	63%	73%	65%	51%	52%	59%	54%	88%	82%	73%	81%
pH eau	g/kg	7.4	7.8	8.4	7.8	8.3	8.3	8.5	8.4	7.5	7.4	7.7	7.5
Calcaire total	g/kg	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Phosphore P2O5 M.Olsen	g/kg	0.093	0.071	0.050	0.071	0.029	0.018	0.009	0.019	0.028	0.027	0.027	0.027
Capacité d'échange cationique M.Metson	cmol+/kg	6.2	5.4	4.8	5.5	10.7	11.1	9.2	10.3	3.2	3.8	4.7	3.9
Sodium Na2O (échangeable acétate d'ammonium)	g/kg	0.017	0.028	0.036	0.027	0.046	0.062	0.055	0.055	0.037	0.043	0.034	0.038
Magnesium MgO (échangeable acétate d'ammonium)	g/kg	0.243	0.248	0.263	0.251	0.689	0.763	0.683	0.711	0.104	0.118	0.163	0.128
Potassium K2O (échangeable acétate d'ammonium)	g/kg	0.638	0.560	0.522	0.573	0.450	0.327	0.297	0.358	0.215	0.204	0.253	0.224
<i>Carbone et azote selon ISO 10694 et 13878</i>													
- carbone organique	g/kg	7.580	4.965	2.405	4.983	7.160	5.420	2.090	4.890	1.830	1.980	2.223	2.011
- matières organiques	g/kg	13.150	8.590	4.165	8.635	12.350	9.390	3.620	8.453	3.167	3.427	3.847	3.480
- azote organique	g/kg	0.864	0.603	0.364	0.610	0.876	0.730	0.446	0.684	0.157	0.172	0.184	0.171
Rapport C/N (carbone organique sur azote total)		8.775	8.235	6.620	7.877	7.620	6.565	4.680	6.288	11.667	11.500	12.067	11.744
Conductivité totale sur extrait 1/5(m/v) a 25°C	mS/cm	0.119	0.111	0.095	0.108	0.120	0.116	0.074	0.103	0.038	0.034	0.028	0.033
<i>Azote minéral sur sol frais</i>													
- azote nitrique (N de NO3)	mg/kg	1.27	0.27	0.75	0.76	0.30	0.27	0.26	0.28	0.57	0.63	1.23	0.81
- azote ammoniacal (N de NH4)	mg/kg	16.40	12.21	6.19	11.60	5.83	4.47	1.52	3.94	5.42	3.60	2.32	3.78

Tableau 5. Analyses des sols des parcelles du réseau 2005-2006

Echantillon		NORD 0-20 cm	NORD 20-40 cm	NORD 40-60 cm	MOYENNE NORD	CENTRE 0-10 cm	CENTRE 10-20 cm	CENTRE 20-30 cm	CENTRE 30-40 cm	CENTRE 40-50 cm	MOYENNE CENTRE	SUD 0-20 cm	SUD 20-40 cm	SUD 40-60 cm	MOYENNE SUD
<i>Granulométrie sans décarbonatation</i>															
Argile (<2 microns)	g/kg														
Limon fin (2/20 microns)	g/kg														
Limon grossier (20/50 microns)	g/kg														
Sable fin (50/200 microns)	g/kg														
Sable grossier (200/2000 microns)	g/kg														
Argile	%	61	62	62	62	40	43	51	52	56	48	74	74	80	76
Limon	%	21	22	22	22	31	29	27	27	26	28	16	17	17	17
Sable	%	18	17	16	17	30	28	23	19	19	24	10	9	3	7
pH eau	g/kg	6.94	7.34	7.50	7.26	7.3	7.2	7.4	7.6	7.6	7.4	7.99	8.09	8.19	8.09
Calcaire total	g/kg														
Phosphore P2O5 M.Olsen	g/kg														
Capacité d'échange cationique M.Metson	cmol+/kg	7.9	7.5	9.4	8.3	7.8	12.1	12.6	12.2	11.3	11.2	16.35	16.31	13.64	15.44
Sodium Na2O (échangeable acétate d'amonium)	g/kg														
Magnesium MgO (échangeable acétate d'amonium)	g/kg														
Potassium K2O (échangeable acétate d'amonium)	g/kg														
<i>Carbone et azote selon ISO 10694 et 13878</i>															
- carbone organique	g/kg														
- matières organiques	g/kg	15.400	4.633	4.833	8.289	18.100	17.800	11.950	7.750	4.500	12.020	4.200	5.100	2.167	3.822
- azote organique	g/kg	0.880	0.390	0.383	0.551	1.115	1.045	0.865	0.570	0.500	0.819	0.217	0.213	0.123	0.184
Rapport C/N (carbone organique sur azote total)															
Conductivité totale sur extrait 1/5(m/v) a 25°C	mS/cm	0.125	0.129	0.098	0.117	0.087	0.101	0.105	0.101	0.091	0.097	0.074	0.078	0.084	0.079
<i>Azote minéral sur sol frais</i>															
- azote nitrique (N de NO3)	mg/kg														
- azote ammoniacal (N de NH4)	mg/kg														

ANNEXE III

-

ANALYSES DE STABILITE DES SOLS

PROTOCOLE EXPERIMENTAL

Mesure de la stabilité d'agrégats de sols pour l'évaluation de la sensibilité à la battance et à l'érosion

L'objectif de la méthode proposée est de donner une description réaliste du comportement physique des matériaux-sols soumis à l'action de la pluie, et de permettre un classement relatif des matériaux vis-à-vis de ce comportement.

Description de la méthode

La méthodologie est largement inspirée du test classique de Hénin *et al.* (1958), mais elle intègre également certains aspects d'autres méthodes (Yoder, 1936 ; Grieve, 1980 ; Kemper et Rosenau, 1986) ainsi que les résultats des dernières recherches réalisées dans ce domaine à l'INRA.

Les 3 tests proposés ont pour objectif de rendre compte de ce comportement dans les différentes conditions climatiques, hydriques et structurales que l'on peut rencontrer à la surface du sol.

Les traitements ont été choisis dans l'esprit suivant :

- séparer les différents mécanismes les uns des autres,
- bien séparer la phase de désagrégation de la mesure du résultat de cette désagrégation,
- exprimer les résultats sous une forme explicite et facilement interprétable par rapport au comportement physique *in situ*.

Dans la continuité de la méthode de Hénin *et al.* (1958), la méthode proposée fait une place importante à l'utilisation de l'éthanol qui permet, d'une part, de bien contrôler la désagrégation et, d'autre part, limite la ré-agrégation des particules durant le séchage.

Domaines d'application

La méthode peut être appliquée à une large gamme de matériaux, issus essentiellement des horizons travaillés des sols cultivés.

Cependant, la présence d'éléments grossiers dans la fraction 2-5 mm peut interférer avec les résultats. Si le taux d'éléments grossiers est compris entre 10 et 40 %, il sera nécessaire de prendre en compte les éléments grossiers par lavage du > 2mm résultant des tests et de calculer un diamètre moyen pondéral (MWD, voir définition ci-après) en tenant compte des graviers et un MWD sans graviers.

Si le taux est > 40 %, les tests de stabilité structurale n'ont pas de signification.

Procédures

Prélèvement au champ

Prélever environ 1 kg de terre entre 0 et 10 cm, dans des conditions d'humidité modérées, par exemple les conditions permettant la préparation des lits de semence (l'idéal étant de prélever le lit de semence lui-même), ou des conditions permettant d'avoir un rendement maximal d'agrégats (rendement = rapport entre masse d'agrégats 3-5 mm et prise initiale de terre). Dans le cas de présence d'une croûte à la surface du sol ou en sol non cultivé, prélever sous la croûte, la litière ou le mat racinaire, entre 2 et 10 cm.

Préparation de l'échantillon de sol

Après prélèvement au champ, l'échantillon doit être ramené au laboratoire dans une boîte rigide et rapidement mis à sécher à l'air dans une atmosphère tempérée et ventilée. Durant cette période les plus grosses mottes peuvent être périodiquement brisées à la main pour produire, dans les conditions d'humidité optimales, le maximum d'agrégats de taille millimétrique. L'échantillon est ensuite passé au tamis et les agrégats de 3 à 5 mm sont sélectionnés pour les tests. Avant le test, les agrégats sont mis à l'étuve à 40°C pendant 24 h pour supprimer d'éventuelles variations d'humidité et uniformiser les conditions de traitement.

Traitements

Traitement 1: humectation rapide par immersion dans l'eau

Ce traitement permet de tester le comportement de matériaux secs soumis à des humectations brutales, du type irrigation par submersion, ou des pluies intenses (orages de printemps et été), bien que dans ce dernier cas le choc des gouttes joue également un rôle.

- Peser 5 à 10 g d'agrégats de 3-5 mm (poids initial), (la prise d'essai sera d'autant plus grande que le taux d'éléments grossiers est important)
- verser 50 ml d'eau permutée dans un bécier,
- verser les agrégats dans le bécier,

Fiche de protocole



INRA Orléans, Unité de Science du Sol

- laisser reposer 10 min (observation visuelle de l'éclatement),
- évacuer l'excès d'eau (par pipetage),
- transférer les agrégats sur un tamis de 50 µm immergé dans de l'éthanol (en s'aidant d'une pissette d'éthanol).

Traitement 2 : désagrégation mécanique par agitation après réhumectation dans l'éthanol

Ce traitement permet de tester le comportement de matériaux humides (périodes hivernales humides). La réhumectation préalable a pour objectif de tester la cohésion des matériaux à l'état humide indépendamment de l'éclatement. Cette réhumectation sans éclatement peut être réalisée soit par réhumectation sous vide soit par l'utilisation d'un liquide non polaire et miscible à l'eau. L'éthanol convient très bien dans ce cas (Hénin *et al.*, 1958).

- Peser 5 g à 10 g d'agrégats de 3-5 mm (poids initial),
- verser 50 ml d'éthanol dans un bécher,
- immerger les agrégats dans l'éthanol pendant 30 mn,
- évacuer l'excès d'éthanol,
- verser 50 ml d'eau permutée dans un erlenmeyer,
- transférer les agrégats dans l'erlenmeyer (en s'aidant d'une pissette d'eau permutée),
- ajuster le niveau d'eau permutée à 200 ml (en versant avec la pissette sur le bord de l'erlenmeyer),
- agiter manuellement l'erlenmeyer en effectuant 10 retournements (on peut envisager de réaliser cette opération mécaniquement avec un agitateur adapté),
- laisser reposer 30 min (observation visuelle de la décantation),
- évacuer l'excès d'eau (par pipetage),
- transférer les agrégats sur le tamis de 50 µm immergé dans l'éthanol (en s'aidant de la pissette d'éthanol).

Traitement 3 : humectation lente par capillarité

Ce traitement permet de tester le comportement de matériaux secs ou peu humides soumis à des pluies modérées. Il est moins destructif que l'humectation rapide et permet donc de discriminer des sols très peu stables.

- Peser 5 g à 10 g d'agrégats de 3-5 mm (poids initial)
- disposer les agrégats sur un papier "filtre" (type « Durieux », seuil de rétention 2 µm) posé sur une table à succion avec une dépression de 3 cm,
- attendre la réhumectation des agrégats par capillarité (au moins 60 min),
- transférer les agrégats sur le tamis de 50 µm immergé dans l'éthanol, en s'aidant d'une pissette d'éthanol.

Mesure de la distribution de taille des particules résultantes

L'objectif de cette partie du test est de décrire le résultat de la désagrégation en évitant au maximum toute désagrégation supplémentaire.

La procédure est identique pour les trois traitements et elle se fait en deux temps.

- La première étape consiste à appliquer cinq fois un mouvement hélicoïdal (avec l'appareil de Hénin (cf. annexe) ou de Yoder) au tamis de 50 µm immergé dans l'éthanol sur lequel on a disposé l'échantillon désagrégé, afin d'effectuer une première séparation granulométrique. On récupère ensuite la fraction > 50 µm dans une coupelle en verre (en s'aidant de la pissette d'éthanol) et on fait sécher à 40°C pendant 48h. On peut également réaliser cette opération de tamisage dans l'eau si on ne dispose pas d'éthanol en quantité suffisante, mais dans le cas de l'eau, une désagrégation supplémentaire risque d'intervenir.

- Cette fraction > 50 µm est ensuite passée sur une colonne de 6 tamis de 2000, 1000, 500, 200, 100 et 50 µm.

La fraction < 50 µm est obtenue par déduction par rapport au poids initial et on peut ensuite calculer le % de chaque fraction par rapport au poids initial.

On calcule ensuite le diamètre moyen pondéral après désagrégation (MWD) (valeur comprise entre 0,025 mm et 3,5 mm).

Calcul du MWD :

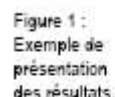
$\Sigma (X \text{ moyens entre 2 tamis} \times [\% \text{ pondéral des particules retenues sur le tamis}]) / 100$

$(3,5 \times [\% > 2\text{mm}]) + (1,5 \times [\% 1-2\text{mm}]) + (0,75 \times [\% 0,5-1\text{mm}]) + (0,35 \times [\% 0,2-0,5\text{mm}]) + (0,15 \times [\% 0,1-0,2\text{mm}]) + (0,075 \times [\% 0,05-0,1\text{mm}]) + (0,025 \times [\% < 0,05\text{mm}]) / 100$

Le résultat s'exprime donc soit sous la forme d'histogrammes représentant la distribution de la taille des particules pour chacun des tests (figure 1) ou bien sous forme de diamètres moyens pondéraux (MWD). On peut également faire la moyenne des 3 MWD, pour avoir une valeur synthétique, ou bien calculer des rapports entre les MWD des différents tests, pour déterminer la part respective de chacun des mécanismes.



INRA Orléans, Unité de Science du Sol



Les sols affectés par la dispersion physico-chimique présentent en général la même distribution de taille des particules pour les trois traitements avec une fraction $< 50 \mu\text{m}$ prédominante.

Interprétation des résultats

Comme chaque traitement correspond à des conditions spécifiques en terme de condition hydrique, de vitesse d'humectation et d'énergie appliquée, il est possible d'utiliser soit le résultat de l'un des traitements, soit une combinaison des trois traitements, selon le contexte de l'étude.

De plus, à cause des effets de seuil, il est possible que seul l'un des traitements permette une bonne ségrégation des échantillons au sein d'une série de sols donnée. La figure 2 montre que pour les sols les plus stables, la discrimination est meilleure avec le traitement par immersion, alors que dans la gamme de stabilité plus faible, les 2 autres tests donnent une meilleure discrimination.

(Tableau 1), il est parfois intéressant de comparer certaines fractions pour des interprétations spécifiques. Par exemple, la limite de 250 µm est souvent considérée comme la limite entre des

micro- et macro-agrégats ayant des propriétés différentes (Tisdall & Oades, 1982).

Tableau 1 : Classes de stabilité, battance et érosion en fonction de valeurs du diamètre moyen pondéral après désagrégation (MWD)

MWD	Stabilité	Battance	Ruissellement et érosion diffuse
<0,4 mm	Très instable	Systématique	Risque important et permanent en toutes conditions topographiques
0,4-0,8 mm	Instable	Très fréquente	Risque fréquent en toute situation
0,8-1,3 mm	Moyennement stable	Fréquente	Risque variable en fonction des paramètres climatiques et topographiques
1,3-2,0 mm	Stable	Occasionnelle	Risque limité
>2,0 mm	Très stable	Très rare	Risque très faible

Bibliographie

Bibliographie citée :

- Grieve I. C., 1980 - the magnitude and significance of soil structural stability declines under cereal cropping. *Catena*, 7, 79-85.
- Haynes R. J., 1993 - Effect of sample pretreatment on aggregate stability measured by wet sieving or turbidimetry on soils of different cropping history. *Journal of Soil Science*, 44, 261-270.
- Hénin S, Monnier G. et Combeau A., 1958 - Méthode pour l'étude de la stabilité structurale des sols. *Annales Agronomiques*, 9, 73-92.
- Kemper W. D. & Rosenau R. C., 1986 - Aggregate stability and size distribution. In: Klute (Ed.) *Methods of soil analysis*, part 1. Agronomy monographs n°9, A.S.A. Madison.
- Pojazok T. & Kay B. D., 1990 - Assessment of a combination of wet sieving and turbidimetry to characterize soil structural stability. *Canadian Journal of Soil Science*, 70, 33-42.
- Tisdall J. M. et Oades J. M., 1982 - Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*, 33, 141-163.
- Yoder R. E., 1936 - A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. *Journal of American Society of Agronomy*, 28, 337-351.

Bibliographie complémentaire :

- Le Bissonnais Y., 1988 - Analyse des mécanismes de désagrégation et de la mobilisation des particules de terre sous l'action des pluies. Thèse de Doctorat, Univ. d'Orléans, 225p.
- Le Bissonnais Y., Bruand A. et Jamagne M., 1989 - Laboratory experimental study of soil crusting: relation between aggregates breakdown and crust structure. *Catena*, 16, 377-392.
- Le Bissonnais Y., Le Souder C., 1995 - Mesurer la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion. *Etude et Gestion des Sols*, 2, 1, 43-56.
- Le Bissonnais Y., 1996 - Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science*, 47, 425-37.

Y. Le Bissonnais, O. Duval, H. Gaillard
12/2002



INRA Orléans, Unité de Science du Sol

RESULTATS

Quatre échantillons ont été déposés à l'INRA d'Orléans fin 2006.

Les sites du Sud : Irpani et Jirira, composés de 85 % de sable, n'ont pas pu être traités par la méthode de stabilité structurale, car ne présentaient que très peu d'agréats de 3 à 5 mm.

Les tests de stabilité structurale (méthode AFNOR, 2005) ont été effectués sur le site de Choquenaira et sur celui de Condoriri.

Les résultats pour les 3 tests sont donnés ci-dessous.

	MWD test à l'eau	EcType	MWD test à l'éthanol	EcType	MWD test en réhumectation	EcType
Choquenaira	1,15	0,04	1,94	0,07	2,13	0,09
Condoriri	0,34	0,02	0,67	0,08	0,60	0,04

Les deux sols ont un comportement à la désagrégation très différent : Choquenaira est plus stable que Condoriri.

Selon le tableau présenté dans la norme AFNOR X31-515, on peut considérer que Choquenaira est stable et présente une battance occasionnelle.

A l'inverse, Condoriri est instable et peut présenter des phénomènes de battance très fréquents.

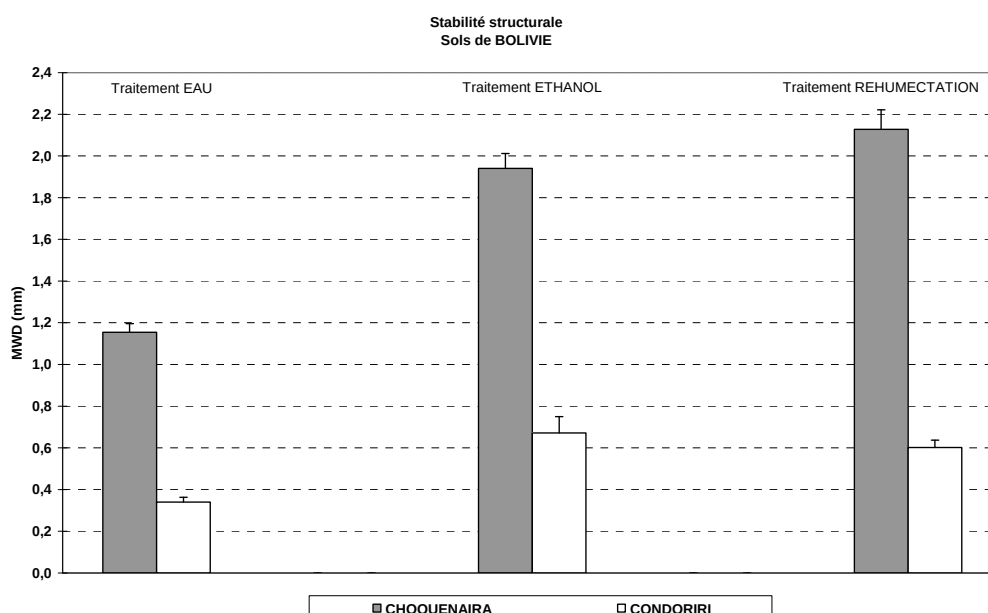


Figure illustrant les diamètres moyens pondéraux (MWD en mm) des traitements pour les 2 sols.

ANNEXE IV

-

**VALEURS DES PARAMETRES PLANTE DE STICS POUR
LE QUINOA**

Tableau 1. Description des paramètres qui définissent les températures cardinales

Module ou sous-module	Paramètres	Origine du paramètre	Signification du paramètre	Unités	Valeur
Développement	<i>TGMIN</i>	Bibliographie	Température seuil minimale de la germination (et de la croissance racinaire)	°C	0
	<i>TDMIN</i>	Bibliographie	Température seuil minimale pour le développement	°C	4
	<i>TDMAX</i>	Bibliographie	Température seuil maximale pour le développement	°C	23
Feuillage	<i>TCMIN</i>	Bibliographie	Température minimale de croissance	°C	4
	<i>TCMAX</i>	Bibliographie	Température maximale de croissance	°C	23
Croissance	<i>TEMIN</i>	Bibliographie	Température seuil minimale pour la croissance en biomasse	°C	4
	<i>TEMAX</i>	Bibliographie	Température seuil maximale pour la croissance en biomasse	°C	23
	<i>TEOPT</i>	Bibliographie	Température optimale pour la croissance en biomasse	°C	18
Rendement	<i>TMINREMP</i>	Optimisation	Température minimale pour le remplissage des grains	°C	-2.6
	<i>TMAXREMP</i>	Optimisation	Température maximale pour le remplissage des grains	°C	34.7

Tableau 2. Description des paramètres qui définissent le développement

Module ou sous-module	Paramètres	Origine du paramètre	Signification du paramètre	Unités	Valeur
DÉVELOPPEMENT	<i>STPLTGER</i>	Bibliographie & mesures	Cumul d'unités de développement permettant la germination	°C.jour	30
	<i>STLEVAMF</i>	Optimisation	Cumul d'unités de développement entre les stades LEV et AMF	°C.jour	90
	<i>STAMFLAX</i>	Optimisation	Cumul d'unités de développement entre les stades AMF et LAX	°C.jour	140
	<i>STLAXSEN</i>	Optimisation	Cumul d'unités de développement entre les stades LAX et SEN	°C.jour	130
	<i>STSENLAN</i>	Optimisation	Cumul d'unités de développement entre les stades SEN et LAN	°C.jour	130
	<i>STLEVDRP</i>	Mesures	Cumul d'unités de développement entre les stades LEV et DRP	°C.jour	220
	<i>STDRPMAT</i>	Mesures	Cumul d'unités de développement entre les stades DRP et MAT	°C.jour	180
	<i>STRESSDEV</i>	Optimisation	Maximum de retard autorisé lié aux stress	SD	0.87

Tableau 3. Description des paramètres qui définissent la germination et la levée

Module ou sous-module	Paramètres	Origine du paramètre	Signification du paramètre	Unités	Valeur
DÉVELOPPEMENT	<i>HUMECGRAINE</i>	Bibliographie	Potentiel d'eau dans le sol à partir duquel la graine est imbibée	MPa	-2.4
	<i>NBJGERLIM</i>	Bibliographie	Nombre de jours d'"autotrophie" de la graine entre imbibition et germination	Jours	10
	<i>PROPGERMIN</i>	Bibliographie	Proportion de <i>NBJGERLIM</i> au-delà de la température <i>TDMAX</i>	SD	0.2
	<i>ELMAX</i>	Analogie	Elongation maximale de l'hypocotyle à l'obscurité	cm	15.5
	<i>BELONG</i>	Analogie	Paramètre de la courbe d'élongation du coléoptile	°C.jour	0.014
	<i>CELONG</i>	Analogie	Paramètre de la courbe d'élongation du coléoptile	SD	1.9636
	<i>NLEVLIM1</i>	Expertise	Délai entre germination et levée à partir duquel commencent les manques à la levée	Jours	10
	<i>NLEVLIM2</i>	Expertise	Délai entre germination et levée à partir duquel la densité de levée est nulle	Jours	60
	<i>VIGUEURBAT</i>	Expertise	Capacité de la plantule à franchir la croûte de battance (1=pas d'effet de la croûte)	SD	0.35
RACINES	<i>SENSRSEC</i>	Optimisation	Sensibilité de la graine (et des racines) à la sécheresse du sol (1=insensible)	SD	0

Tableau 4. Description des paramètres qui définissent le feuillage

Module ou sous-module	Paramètres	Origine du paramètre	Signification du paramètre	Unités	Valeur
FEUILLAGE	<i>PLASTOCHRONE</i>	Mesures	Durée séparant l'émission de deux feuilles sur la tige principale	°C.jour	17
	<i>ADENS</i>	Expertise	Paramètre de compensation de la densité de plantes	SD	-0.5
	<i>BDENS</i>	Bibliographie	Densité minimale à partir de laquelle il y a compétition entre plantes pour la croissance foliaire	plantes m ⁻²	7
	<i>HAUTBASE</i>	Bibliographie	Hauteur de base du végétal	m	0
	<i>HAUTMAX</i>	Bibliographie	Hauteur maximale du végétal	m	1.50
	<i>TAUXRECOUVMAX</i>	Optimisation	Taux de recouvrement maximal	m ² plante /m ² sol	0.025
	<i>PENTRECOUV</i>	Optimisation	Pente de la logistique du taux de recouvrement	SD	3.9
	<i>INFRECOUV</i>	Optimisation	ULAI au stade AMF (point d'inflexion de la croissance du taux de recouvrement)	SD	0.6
	<i>LAICOMP</i>	Optimisation	Taux de couverture à partir duquel commence la compétition inter-plantes	m ² m ⁻²	0.04

Tableau 5. Description des paramètres qui définissent l'interception du rayonnement, la croissance en biomasse et la répartition entre organes

Module ou sous-module	Paramètres	Origine du paramètre	Signification du paramètre	Unités	Valeur
CROISSANCE EN BIOMASSE	<i>EXTIN</i>	Bibliographie	Coefficient d'extinction	LAI ⁻¹	0.75
	<i>EFCROIJUV</i>	Optimisation	Efficienc de croissance maximale pendant la phase juvénile (LEV-AMF)	g MJ ⁻¹	3
	<i>EFCROIVEG</i>	Optimisation	Efficienc de croissance maximale pendant la phase végétative (AMF-DRP)	g MJ ⁻¹	2.9
	<i>EFCROIREPRO</i>	Optimisation	Efficienc de croissance maximale pendant la phase de remplissage des grains (DRP-MAT)	g MJ ⁻¹	3.5
	<i>SLAMIN</i>	Mesures	SLA minimal des feuilles vertes	cm ² g ⁻¹	50
	<i>SLAMAX</i>	Mesures	SLA maximal des feuilles vertes	cm ² g ⁻¹	250
	<i>TIGEFUILL</i>	Mesures	Proportion tige (structurale)/feuille	SD	0.5
	<i>ENVFRUIT</i>	Expertise	Proportion enveloppe/pgrainmaxi en masse	SD	0
	<i>SEA</i>	Expertise	Surface spécifique des enveloppes des fruits	cm ² g ⁻¹	0

Tableau 6. Description des paramètres qui définissent le rendement

Module ou sous-module	Paramètres	Origine du paramètre	Signification du paramètre	Unités	Valeur
RENDEMENT	<i>NBJGRAIN</i>	Optimisation	Période de latence avant DRP pour la mise en place du nombre de grains	Jours	30
	<i>CGRAIN</i>	Analogie	Nombre de grains produits (par g MS/j) pendant la période NBJGRAIN qui précède le stade DRP	grains gMS ⁻¹ jour ⁻¹	0.05
	<i>NBGRMIN</i>	Mesures	Nombre minimal de grains	grains m ⁻²	2500
	<i>NBGRMAX</i>	Optimisation	Nombre maximal de grains	grains m ⁻²	300000
	<i>VITIRCARB</i>	Optimisation	Vitesse d'augmentation de l'indice de récolte carbone	g grain g plante ⁻¹ jour ⁻¹	0.0076
	<i>VITIRAZO</i>	Analogie	Vitesse d'augmentation de l'indice de récolte azote	g grain g plante ⁻¹ jour ⁻¹	0.02
	<i>IRMAX</i>	Bibliographie & mesures	Indice de récolte maximal	SD	0.6
	<i>PGRainMAXI</i>	Optimisation	Poids maximal d'un grain (à 0% d'eau)	g	0.005

Tableau 7. Description des paramètres qui définissent la croissance racinaire

Module ou sous-module	Paramètres	Origine du paramètre	Signification du paramètre	Unités	Valeur
RACINES	<i>STOPRAC</i>	Expertise	Stade d'arrêt de croissance racinaire (LAX ou SEN)	SD	SEN
	<i>CROIRAC</i>	Optimisation	Vitesse de croissance du front racinaire	cm degré. jour ⁻¹	0.04
	<i>ZLABOUR</i>	Expertise	Profondeur de labour	cm	30
	<i>ZPENTE</i>	Expertise	Profondeur du niveau où la densité racinaire est réduite de moitié par rapport à la surface pour le profil de référence	cm	40
	<i>ZPRLIM</i>	Expertise	Profondeur maximale du profil racinaire pour le profil de référence	cm	50
	<i>SENSANOX</i>	Expertise	Sensibilité à l'anoxie (1=insensible)	SD	0
	<i>CONTRDMAX</i>	Expertise	Contrainte maximale à la pénétration	SD	0.3

Tableau 8. Description des paramètres qui définissent les indices de dégâts du gel

Module ou sous-module	Paramètres	Origine du paramètre	Signification du paramètre	Unités	Valeur
GEL	<i>TLETALE</i>	Bibliographie	Température létale pour la plante	°C	-16
	<i>TDEBGEL</i>	Bibliographie	Température de début de gel	°C	-1
	<i>TGELLEV10</i>	Bibliographie	Température correspondant à 10 % de dégâts de gel sur la plantule	°C	-8
	<i>TGELLEV90</i>	Bibliographie	Température correspondant à 90 % de dégâts de gel sur la plantule	°C	-14
	<i>TGELJUV10</i>	Bibliographie	Température correspondant à 10 % de dégâts de gel sur les feuilles entre LEV et AMF (juvénile)	°C	-8
	<i>TGELJUV90</i>	Bibliographie	Température correspondant à 90 % de dégâts de gel sur les feuilles entre LEV et AMF (juvénile)	°C	-14
	<i>TGELVEG10</i>	Bibliographie	Température correspondant à 10 % de dégâts de gel sur les feuilles à partir de AMF (adulte)	°C	-4
	<i>TGELVEG90</i>	Bibliographie	Température correspondant à 90 % de dégâts de gel sur les feuilles à partir de AMF (adulte)	°C	-10
	<i>TGELFLO10</i>	Bibliographie	Température correspondant à 10 % de dégâts de gel sur les fleurs ou les fruits	°C	-6
	<i>TGELFLO90</i>	Bibliographie	Température correspondant à 90 % de dégâts de gel sur les fleurs ou les fruits	°C	-13

Tableau 9. Description des paramètres qui définissent l'eau dans la plante

Module ou sous-module	Paramètres	Origine du paramètre	Signification du paramètre	Unités	Valeur
EAU	<i>PSISTO</i>	Bibliographie	Valeur absolue du potentiel de fermeture stomatique	bars	14
	<i>PSITURG</i>	Bibliographie	Valeur absolue du potentiel de début de diminution de l'expansion cellulaire	bars	4
	<i>KMAX</i>	Analogie	Coefficient cultural maximal de la culture (= ETM/ETP)	SD	1

Tableau 10. Description des paramètres qui définissent l'azote dans la plante

Module ou sous-module	Paramètres	Origine du paramètre	Signification du paramètre	Unités	Valeur
AZOTE	<i>VMAX1</i>	Analogie	Vitesse maximale d'absorption du nitrate par le système d'absorption 1 (à forte affinité) des racines	$\mu\text{mole cm}^{-1} \text{ h}^{-1}$	0.0018
	<i>VMAX2</i>	Optimisation	Vitesse maximale d'absorption du nitrate par le système d'absorption 2 (à faible affinité) des racines	$\mu\text{mole cm}^{-1} \text{ h}^{-1}$	0.05
	<i>KMAXBS1</i>	Analogie	Constante d'affinité du nitrate par le système d'absorption 1 (à forte affinité) des racines	$\mu\text{mole. cm racine}^{-1}$	50
	<i>KMAXBS2</i>	Analogie	Constante d'affinité du nitrate par le système d'absorption 2 (à faible affinité) des racines	$\mu\text{mole. cm racine}^{-1}$	25000
	<i>ADIL</i>	Mesures	Paramètre de la courbe de dilution critique $[\text{Nplante}] = \text{ADIL MS}^{(-\text{BDIL})}$	% MS	4.1
	<i>BDIL</i>	Mesures	Paramètre de la courbe de dilution critique $[\text{Nplante}] = \text{ADIL MS}^{(-\text{BDIL})}$	*	0.5
	<i>MASECNMAX</i>	Mesures	Biomasse aérienne à partir de laquelle il y a dilution de l'azote (courbes critique et maximale)	t ha^{-1}	0.8
	<i>NMETA</i>	Analogie	Quantité d'azote métabolique dans la plantule (pourcentage de la biomasse aérienne)	%	6.47
	<i>MASECMETA</i>	Analogie	Biomasse de la plantule ne disposant que de son azote métabolique	t ha^{-1}	0.04
	<i>NRES</i>	Optimisation	Quantité d'azote maximale de réserve de la plante (écart entre la courbe de dilution maximale et la courbe de dilution critique) (en pourcentage de la biomasse aérienne)	%	1.5
	<i>INNMIN</i>	Analogie	Valeur minimale de inni (INN instantané) possible pour la culture	SD	0.3
	<i>INNGRAIN1</i>	Analogie	INN minimal pour absorption nette d'azote maximale	SD	1
	<i>INNGRAIN2</i>	Analogie	INN maximal pour absorption nette d'azote nulle	SD	1

Tableau 11. Récapitulatif des différences entre ligne et poquet

Paramètres	Valeur ligne	Valeur poquet (15 cm)
<i>ELMAX</i>	15.5	30.5
<i>BELONG</i>	0.014	0.025
<i>CELONG</i>	1.9636	0.941
<i>VIGUEURBAT</i>	0.35	1
<i>ADENS</i>	-0.5	-0.8

Implantación de la quinua y simulación de su cultivo en el Altiplano boliviano

RESUMEN

La quinua es un pseudocereal de América del Sur, que se cultiva principalmente en la región andina de los Altiplanos de Bolivia y Perú. Actualmente, alrededor de 25000 toneladas se producen anualmente en Bolivia, que se convirtió en el primer exportador en el mundo. Sin embargo, el Altiplano boliviano, con un altitud promedio de 3800m, es un ambiente difícil, donde los riesgos de sequía y las heladas durante el ciclo de cultivo producen rendimientos bajos y muy variables de un año al otro. Estas condiciones climáticas limitantes hacen de la germinación y la emergencia las principales fases críticas del cultivo de la quinua. Este tema fue analizado por modelización, adaptando un modelo genérico de cultivos, STICS, a las condiciones climáticas y de cultivo de la quinua en el Altiplano boliviano. Se creó una base de datos a partir de experimentaciones en tres sitios del norte al sur del Altiplano. La implantación de la quinua fue primero estudiada sola, simulando diferentes practicas culturales, para ver cuales permiten optimizar el corto periodo disponible para la siembra y emergencia. Luego, el ciclo de cultivo fue examinado en su conjunto. La metodología de adaptación del modelo consistió en un análisis de los distintos formalismos existentes y en una determinación de las necesidades de modificar o proponer nuevos formalismos para mejorar la descripción del funcionamiento de la quinua en el Altiplano boliviano. La parametrización del modelo fue realizada a partir de las mediciones experimentales, la bibliografía o por optimización. Los resultados obtenidos resultan satisfactorios. Finalmente, el impacto de las prácticas de implantación en el rendimiento fue estudiado. La quinua fue también considerada en un sistema de rotación. Diferentes rotaciones fueron simuladas (barbecho-quinua, barbecho-barbecho-quinua o quinua-quinua) para ver su influencia en el balance de agua y de nitrógeno del suelo, la implantación y el rendimiento del cultivo. Este trabajo será utilizado en un proyecto de estudio de la sostenibilidad en la zona Intersalar, con una extensión espacial del modelo por datos de teledetección.

Palabras claves: quinua, modelo, STICS, implantación, rendimiento, sistema de cultivo, Altiplano, Bolivia, clima

Quinoa establishment and its culture simulation on the Bolivian Altiplano

ABSTRACT

Quinoa is a pseudocereal of South America, grown mainly in the Andean region on the Bolivian and Peruvian Altiplanos. Today, about 25000 tons are produced annually in Bolivia, which became the first exporter in the world. However, the Bolivian Altiplano, which has an average altitude of 3800m, is a difficult environment, where the risks of drought and frost during the crop cycle are very important and provoke low crop yields, highly variable from one year to the other. Because of these limiting climatic conditions, germination and emergence are the main critical phases of the culture of quinoa. The objective of this work was to study those phenomenons by modeling, through the adaptation of a generic crop model, STICS, to quinoa and climatic and cropping conditions of the Bolivian Altiplano. Data sets were formed through experiments in three sites from north to south of the Altiplano. At first, crop establishment was studied alone, by a numerical experimentation testing various cultural practices. This experiment aimed at seeing the adaptation of the culture system that could optimize the short period available for sowing and emergence. In a second stage, the crop cycle has been considered as a whole. The methodology used consisted in analyzing the existing formalisms and determining of the need for new formalisms or modifications, in order to improve the description of quinoa on the Altiplano. Then, the parameters were set, based on experimental measurements, bibliography or optimization. The results prove to be quite satisfying. Finally, in the third stage, the impact of implantation techniques on the yield was tested. Quinoa has also been considered in rotation systems. Different rotations were simulated (fallow-quinoa, fallow-fallow-quinoa, or quinoa-quinoa) to see their influence on the water and nitrogen soil balance, crop establishment and crop yield. This work will be used in a study of sustainability in the Intersalar area with a spatialisation of the model by remote sensing data.

Keywords: quinoa, model, STICS, establishment, yield, culture system, Altiplano, Bolivia, climate

Implantation du quinoa et simulation de sa culture sur l'Altiplano bolivien

RESUME

Le quinoa est une pseudocéréale d'Amérique du Sud, cultivé essentiellement en région andine sur les Altiplanos boliviens et péruviens. Aujourd'hui, environ 25 000 tonnes sont produites annuellement en Bolivie, qui est devenu le premier exportateur mondial. Toutefois, l'Altiplano bolivien, d'altitude moyenne 3800m, est un milieu difficile, où les risques élevés de sécheresse et de gel pendant le cycle de culture sont à l'origine de rendements agricoles faibles et très variables d'une année sur l'autre. Ces conditions climatiques limitantes font de la germination et de la levée la principale phase critique cruciale de la culture du quinoa. Ce travail a eu comme objectif l'analyse de ces questions par modélisation, par le biais de l'adaptation d'un modèle générique de fonctionnement des cultures, STICS, au quinoa dans les conditions climatiques et culturelles de l'Altiplano bolivien. Pour cela, des jeux de données ont été constitués grâce à des expérimentations en trois sites répartis du Nord au Sud de l'Altiplano. Dans un premier temps, l'implantation de la culture a été étudiée seule, par expérimentation numérique en testant différents itinéraires techniques afin de voir l'adaptation du système de culture qui permet d'optimiser la courte fenêtre climatique disponible pour le semis et la levée. Dans un deuxième temps, le cycle de culture a été abordé dans son ensemble. La méthodologie de paramétrage a consisté tout d'abord en une analyse des formalismes existants et une détermination du besoin d'ajouts ou de modifications de formalismes, afin de représenter au mieux le fonctionnement du quinoa sur l'Altiplano. Ensuite, le modèle a été paramétré à partir des mesures expérimentales, de la bibliographie ou par optimisation. Les résultats obtenus s'avèrent assez satisfaisants. Enfin, dans un troisième temps, l'impact des techniques d'implantation sur le rendement a été testé. Le quinoa a également été inscrit dans des systèmes de rotation, en simulant différentes successions culturales (quinoa précédé de une ou deux années de jachère, ou quinoa en monoculture continue) afin de voir leur influence sur l'état hydrique et azoté du sol et sur l'implantation et le rendement de la culture. Les débouchés de ce travail seront utilisés dans un projet d'étude de la durabilité dans la zone Intersalar qui aura pour but une spatialisation du modèle par des données de télédétection.

Mots-clés : quinoa, modélisation, STICS, implantation, rendement, système de culture, Altiplano, Bolivie, climat