



HAL
open science

Analysis and modelling of soil surface crusting and crop emergence. Contribution to the improvement of the SIMPLE model

Aude Gallardo-Carrera

► **To cite this version:**

Aude Gallardo-Carrera. Analysis and modelling of soil surface crusting and crop emergence. Contribution to the improvement of the SIMPLE model. Sciences of the Universe [physics]. INAPG (AgroParisTech), 2006. English. NNT : 2006INAP0029 . pastel-00002660

HAL Id: pastel-00002660

<https://pastel.hal.science/pastel-00002660>

Submitted on 4 Jul 2007

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

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



**Unité d'agronomie
Laon-Reims-Mons**



THESE

présentée à l'INA P-G pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'INA P-G

Discipline : agronomie

par

Aude Gallardo-Carrera

**Analyse et modélisation de la levée sous croûte.
Contribution à l'amélioration du modèle SIMPLE**

Soutenance publique le 14 décembre 2006, devant le jury :

Anne-Véronique Auzet

Jean-Noël Aubertot

Michel Cariolle

Thierry Doré

Carolyne Dürr

Gérard Govers

Professeur, Université de Strasbourg

Chargé de recherche, INRA Grignon

Ingénieur, ITB

Professeur, INA P-G

Ingénieur de recherche, INRA Angers

Professeur, Université K.U. Leuven

Rapporteur

Examineur

Examineur

Président

Directrice de thèse

Rapporteur



**Unité d'agronomie
Laon-Reims-Mons**



THESE

présentée à l'INA P-G pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'INA P-G

Discipline : agronomie

par

Aude Gallardo-Carrera

**Analyse et modélisation de la levée sous croûte.
Contribution à l'amélioration du modèle SIMPLE**

Soutenance publique le 14 décembre 2006, devant le jury :

Anne-Véronique Auzet

Jean-Noël Aubertot

Michel Cariolle

Thierry Doré

Carolyne Dürr

Gérard Govers

Professeur, Université de Strasbourg

Chargé de recherche, INRA Grignon

Ingénieur, ITB

Professeur, INA P-G

Ingénieur de recherche, INRA Angers

Professeur, Université K.U. Leuven

Rapporteur

Examineur

Examineur

Président

Directrice de thèse

Rapporteur

REMERCIEMENTS

Avant de présenter les résultats de la thèse, je voudrais ici remercier toutes les personnes qui ont permis que ce travail aboutisse.

Je tiens, en premier lieu, à remercier chaleureusement les encadrants de ce travail. Merci à Carolyne Dürr, directrice de thèse, pour toute une floraison de raisons, mais particulièrement pour son énergie, son enthousiasme contagieux et sa gestion parfaite des calendriers, même les plus critiques.

Merci à Joël Léonard pour l'intérêt qu'il a bien voulu porter à mon travail, merci pour tous les échanges que nous avons pu avoir, notamment à propos du modèle, pour ses talents en mathématiques, modélisation et programmation, ainsi que pour son calme imperturbable.

Je remercie les financeurs de ce projet, la région Picardie, et l'ITB (Institut Technique de la betterave) qui a participé à tous les projets sur lesquels j'ai travaillé ces dernières années.

Merci aux autres chercheurs qui ont apporté leur pierre à ce projet. Je remercie Yves Duval en particulier pour le suivi photographique des essais et les expérimentations sous simulateur de pluie. Je garderai longtemps l'image de l'homme au parapluie.

Je souhaite aussi remercier Michel Herbin, du laboratoire CRéSTIC-LERI (Université de Reims) qui a largement contribué à l'étude de la fissuration des lits de semences, et les stagiaires qui ont participé à cette étude : Jérôme Lingrand et Dimitri Kudelski.

J'adresse mes remerciements aux membres du jury pour le temps de lecture et de réflexion qu'ils ont consacré à ce travail : Anne-Véronique Auzet et Gérard Govers qui ont accepté le rôle de rapporteur, Thierry Doré, Jean-Noël Aubertot et Michel Cariolle.

Beaucoup de personnes ont permis la réalisation des expérimentations, je les en remercie. Un grand merci particulièrement à Charles Leforestier qui, par tous les temps, et dans la bonne humeur, a participé à l'ensemble des mesures au champ ; et notamment les mesures-sol particulièrement inconfortables (attention aux courbatures à chaque début de campagne) ; à Caroline, pour la partie laboratoire : le souvenir le plus mémorable que nous aurons en commun sera un fameux jour où nous avons failli mettre le feu au bâtiment technique uniquement armées de sèche-cheveux ; à Jérôme Duval, toujours présent pour me sortir des mauvais pas techniques (et surtout un grand merci pour Alix, le chat).

Merci également à Paul Régnier qui a fait en sorte de rendre possible la mise en place de mes expérimentations au sein de l'essai « Système de cultures », à Frédéric Bornet (j'écouterai Kamini en souvenir de la Picardie) ; à Daniel Boitez (également pour les discussions sur le féminisme), Frédéric Mahu et Bertrand Chauchard.

Je remercie l'INRA d'Orléans et particulièrement Frédéric Darboux et Hervé Gaillard qui nous ont initiés aux tests de stabilité. Merci également à Jean Boiffin qui a bien voulu relire l'article que nous avons rédigé sur le développement de la croûte.

Je voudrais aussi remercier toutes les personnes de l'unité d'agronomie Laon-Reims-Mons qui, à un moment ou à un autre, m'ont aidée dans mon travail.

Je remercie particulièrement Sylvie Recous qui dirige l'unité avec beaucoup d'humanité.

Merci à Brigitte Rocourt, Valérie Dazin et Agnès Guzzi, pour leur aide au secrétariat. Elles font tout leur possible pour nous rendre la vie facile malgré les tracas toujours plus grands de l'administration.

J'ai une pensée pour tous les non-permanents dont j'ai croisé la route et particulièrement Kai Cui et Victor Adamiade, mes compagnons de congrès. Je leur souhaite bonne route.

Enfin, j'adresse un grand merci à tous mes proches pour leur soutien. Je tiens à saluer Elsa qui m'a précédée sur la route du thésard et m'a fait profiter de son expérience. J'espère qu'elle ne s'éloignera pas trop du port d'attache bordelais.

J'ai une pensée particulière pour ma famille : mes parents disponibles à n'importe quelle heure (heureusement ils n'ont que deux filles), mes grands-parents que j'adore et que je remercie pour leur soutien. Merci à ma petite sœur chérie, Pauline, notamment pour les répétitions des communications orales en anglais. Le mot 'SURFACE' restera gravé en moi à jamais. Une petite pensée pour mes chats Réglisse et Alix (le ronron du chat est le meilleur des relaxants).

Et le meilleur pour la fin : je remercie mon mari, Vincent, pour des millions de motifs. Son calme légendaire, surtout, lui a permis de faire preuve d'une patience exemplaire tout au long de cette thèse.

On ne fait jamais attention à ce qui a été fait;
on ne voit que ce qui reste à faire.

Marie Curie

PLAN

INTRODUCTION.....	1
1. Déroulement de l'implantation d'une culture, impact de la formation d'une croûte à la surface du sol.....	2
2. Modélisation de la levée sous croûte: état des recherches.....	4
3. Proposition d'une démarche d'étude pour l'amélioration de la prévision de la levée sous croûte.....	8
CHAPITRE I Site expérimental, matériel et méthodes.....	11
1. Expérimentations au champ.....	12
2. Expérimentations au laboratoire.....	17
CHAPITRE II Caractérisation des modes de franchissement, mesures des forces d'émergence pour différentes espèces.....	18
1. Introduction.....	19
2. Description des modes de franchissement pour différentes espèces et types de croûte.....	20
3. Mesures des forces d'émergence.....	25
CHAPITRE III Dynamique de dégradation de la surface du sol.....	29
1. Introduction.....	30
2. Effects of seedbed structure and water content at sowing on the development of soil surface crusting under rainfall.....	31
3. Synthèse en vue de la modélisation.....	39
CHAPITRE IV Dynamique de fissuration de la surface des lits de semences.....	44
1. Caractérisation de la dynamique de fissuration de la surface du sol.....	45
2. Modélisation de la dynamique d'apparition des fissures.....	52
CHAPITRE V Modèle et simulation.....	57
1. Introduction.....	58
2. Description du modèle proposé de levée sous croûte de battance.....	59
3. Simulations.....	66
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	71
REFERENCES.....	76

LISTE DES FIGURES

INTRODUCTION

Figures

- Figure In.1. Schéma du déroulement de l'implantation d'une culture, exemple de la betterave.
- Figure In.2. Schéma du développement d'une croûte de battance à la surface d'un sol.
- Figure In.3. Schéma de fonctionnement du modèle SIMPLE.
- Figure In.4. Schéma du module actuel de levée sous croûte dans SIMPLE.
- Figure In.5. Simulations des taux de levée de semences de betterave sucrière. Cas d'un lit de semences fin et climat du nord de la France (1970-2002). (a) Moyenne et écart-type en fonction de la date de semis. (b) Fréquence d'obtention des taux de levée suivants : <50%, 50 à 80%, > 80% ; en fonction de la date de semis ; (c) Fréquence pour laquelle plus de 30% des plantules restent bloquées sous croûte (par rapport au nombre initial de semences).
- Figure In.6. Fréquence des taux de levée de betterave sucrière observés dans l'essai longue durée de Mons-en-Chaussée (80, France ; 23 parcelles semées entre le 1^{er} mars et le 15 mai, au cours d'une période de 12 ans : 1993-2004).
- Figure In.7. Schéma des différents types de franchissement décrits dans la littérature.
- Figure In.8. Schéma général d'acquisition des informations nécessaires pour la construction d'un nouveau module de levée sous croûte.

Tableaux

- Tableau In.1. Ordre de grandeur des forces d'émergence pour plusieurs espèces.

CHAPITRE I

Figures

- Figure I.1. Relation entre la pluie et l'énergie cinétique cumulées depuis le semis ; $r^2 = 0.86$ (Mons-en-Chaussée, Nord de la France ; 2004-2005).

Tableaux

- Tableau I.1. Caractéristiques des parcelles suivies.
- Tableau I.2. Étapes de développement de la croûte et notations associées

CHAPITRE II

Figures

- Figure II.1. Modes de franchissement selon Arndt (1965a).
- Figure II.2. Photographies des différents modes de passage observés au champ : (a) pénétration, (b) rupture, (c) passage par les fissures.
- Figure II.3. Relation entre l'humidité massique mesurée et les notations visuelles de couleur.
- Figure II.4. Deux exemples de cinétiques de levée (a) cas de la betterave d1 en 2004 (04P24) ; (b) cas du haricot en 2004 (04P27) ; et pluviométries.

- Figure II.5. Evolution des modes de franchissement et de l'humidité de la surface du sol au cours de la levée dans le cas de la betterave d1 en 2004 (04P24).
- Figure II.6. Evolution des modes de franchissement en fonction de la teneur en eau de la croûte dans le cas de la betterave d1 en 2004 (04P24). (a) passages par pénétration, (b) passages par les fissures, (c) passages par rupture. Chaque point représente une séquence de mesures.
- Figure II.7. Proportions (%) des différents modes de passage face à une croûte sèche (humidité $< 0.06 \text{ g g}^{-1}$) en fonction des variations locales du niveau de dégradation (au niveau des plantules), dans le cas de la betterave (04P24N).
- Figure II.8. Dispositif de mesure des forces d'émergence.
- Figure II.9. Distribution des forces d'émergence maximales pour les espèces betterave (Véga), lin (Niagara) et blé (Fidel).
- Figure II.10. Distribution des forces d'émergence maximales pour le blé en fonction de la variété (Fidel et Courtot) et de la masse des semences (pour la variété Fidel, 30-39.999 mg et 50-59.999 mg).
- Figure II.11. Distribution des forces d'émergence maximales pour la betterave (variété Véga) en fonction de la masse des semences 7-8.999 mg et 13-16 mg.
- Figure II.12. Variation moyenne de la force exercée par une plantule au cours du temps pour la betterave (Véga), le lin (Niagara) et le blé (Fidel).
- Figure II.13. Variation moyenne de la force exercée par une plantule au cours du temps dans le cas du blé en fonction de la variété et de la masse des semences (somme de températures à $t = 0$, environ 90°Cj).
- Figure II.14. Variation moyenne de la force exercée par une plantule au cours du temps dans le cas de la betterave en fonction de la masse des semences et de la longueur de l'hypocotyle (somme de températures à $t = 0$, environ 80°Cj).

Tableaux

- Tableau II.1. Répartition des modes de franchissement observés au laboratoire pour des plantules de betterave dans le cas d'une croûte structurale à différentes humidités (25-27% ou 5-6%).
- Tableau II.2. Caractéristiques des différentes parcelles suivies : type de croûte, état d'humidité ($S = 0.03 - 0.06 \text{ g.g}^{-1}$; $H = > 0.20 \text{ g.g}^{-1}$) principalement observés au moment de la levée, et caractéristiques de la levée.
- Tableau II.3. Proportions des différents modes de passage pour les différentes espèces ; pour des croûtes structurales à différents niveaux de dégradation, sèches ($0.03 - 0.06 \text{ g.g}^{-1}$) ou humides ($> 0.20 \text{ g.g}^{-1}$).
- Tableau II.4. Caractéristiques des traitements expérimentaux et forces d'émergence maximales mesurées

CHAPITRE III

Figures

- Figure III.1. Aggregate stability in relation with soil sample water content of the different plots (dataset1): (a) mean of the three tests; (b) fast wetting; (c) slow wetting; (d) stirring after ethanol pre-wetting. Two plots (P13 sugarbeet and P18 flax) were sampled several times with various moisture conditions from sowing.
- Figure III.2. Schema of crust development under rainfall: effects of seedbed structure and moisture for spring and autumn sown crops (1993-2005). Each box represents the crust state observed for a cumulated value of rainfall for a given plot placed according to its initial seedbed characteristics.
- Figure III.3. Cumulated rainfall needed to reach the different structural stages of soil crusting (F1- to F1+); as a function of seedbed structure (fine to coarse).
- Figure III.4. Effect of the initial soil moisture on the cumulated rainfall needed to reach stages (a) F1 (structural) and (b) F1/2 (sedimentary) as a function of seedbed structure (fine and medium).
- Figure III.5. Rate of sedimentary crust to the soil surface (stages F1/2- to F2+) as a function of cumulated rainfall from sowing, for fine and medium seedbeds.

- Figure III.6. Distributions of crust resistance measured by the penetrometer in field (a, b) and in a laboratory experiment (c, d): (a) as a function of the soil crusting stage (F1 and F1/2, dry crusts); (b) as a function of the cumulated rainfall for the same crust stage F1 (dry crusts: in the case of a fine seedbed and for different initial seedbed moistures); (c) for dry crusts F1/2+ and F2 (water content $< 0.04 \text{ g.g}^{-1}$); (d) for wet crusts F1 and F2 (water content $0.13\text{-}0.16 \text{ g.g}^{-1}$). The characteristics of each distribution are given in the captions.
- Figure III.7. Relationship between the mechanical resistance of the crust and its thickness determined from penetrometer measurements.
- Figure III.8. Evolution de la résistance de la surface du sol mesurée au pénétromètre pour plusieurs types de lits de semences (a) en fonction de la pluie cumulée depuis le semis; (b) en fonction de la teneur en eau pour une croûte de type structural.
- Figure III.9. Relation entre la résistance ascendante et la résistance descendante mesurée par un pénétromètre.
- Figure III.10. Dispositif des bacs de sol placés sous simulateur de pluie.
- Figure III.11. Effet de la taille des agrégats sur la vitesse de formation des croûtes.
- Figure III.12. Effet de l'humidité initiale sur la vitesse de formation des croûtes.

Tableaux

- Tableau III.1. Seedbed characteristics from the 2004-2005 experiments (dataset 1).
- Tableau III.2. Types of seedbed (1993-2005) according to mass percentage of aggregates over 20mm for spring (sugar beet, flax, pea) and winter (wheat) crops.
- Tableau III.3. Stages of crust development and associated notations.
- Tableau III.4. Rainfall for spring and autumn seasons (March to May and October to December) for 2004, 2005 and on average during 1993-2005.
- Tableau III.5. Risks of reaching crust stages F1 and F1/2- before seedling emergence for sowing dates from the 1st March to the 31st May (1970-2005), considering the cumulated rainfall values required for several initial seedbeds.
- Tableau III.6. Valeurs de pluie cumulée nécessaires pour atteindre les différents stades de développement de la croûte (jusqu'au stade sédimentaire) en fonction des caractéristiques du lit de semences.

CHAPITRE IV

Figures

- Figure IV.1. Récapitulatif de la chaîne de traitement sous Image J
- Figure IV.2. Exemple de distribution (a) des surfaces de plaques ; (b) des longueurs géodésiques des segments délimitant les plaques. Exemple de la parcelle 05P13_SB au maximum de fissuration.
- Figure IV.3. Longueur de fissuration en fonction de la pluie cumulée depuis le semis.
- Figure IV.4. Longueur de fissuration en fonction de la teneur en eau dans le cas d'une croûte structurale.
- Figure IV.5. Horgan and Young's model, steps of crack network development
- Figure IV.6. Crack network by Voronoï tessellation. Red spots are the start points of the network construction.
- Figure IV.7. Simulation of seedling emergence by cracks. (a) flax (b) sugar beet. Points are the seed positions; circles indicate the distance the seedling can cover to find a crack (1.5 cm for flax; 0.5 cm for sugar beet).

Tableaux

- Tableau IV.1. Characteristics of the different types of seedbed.

- Tableau IV.2. Characterisation of crack networks for several types of seedbed and crust stages. Numbers in brackets are standard deviations and letters are results of variance analysis ($P = 5\%$).
- Tableau IV.3. Parameters used in the Horgan and Young's model.
- Tableau IV.4. Characteristics of plots for which emergence by cracks was simulated.
- Tableau IV.5. Parameters used to modelling crack network (Horgan and Young's model) and seedling emergence for sugarbeet and flax.
- Tableau IV.6. Prediction of the emergence by cracks for several species for a dry structural crust (F1).

CHAPITRE V

Figures

- Figure V.1. Schéma général d'acquisition des informations nécessaires pour la construction d'un nouveau module de levée sous croûte.
- Figure V.2. Description du sous-module de prévision de l'état de la surface : fonctionnement général, liste des paramètres et significations. Les paramètres d'entrée sont indiqués en grisé.
- Figure V.3. Evolution de la proportion de croûte sédimentaire en fonction de la pluie cumulée depuis le semis (PC) moins la pluie nécessaire pour atteindre le premier stade sédimentaire F1/2- ($PC_{F1/2}$).
- Figure V.4. Evolution de la résistance de la surface du sol, (a) en fonction de la teneur en eau pour une croûte structurale F1; (b) en fonction de la pluie cumulée depuis le semis (PC) moins la pluie nécessaire pour atteindre le stade structural F1 (PC_{F1}).
- Figure V.5. Evolution de la longueur totale de fissuration (a) en fonction de la teneur en eau pour une croûte structurale F1 ; (b) en fonction de la pluie cumulée depuis le semis (PC) moins la pluie nécessaire pour atteindre le stade structural F1 (PC_{F1}).
- Figure V.6. Cinétiques de levée de plantules de betterave, observée et simulée, pour la parcelle 04P24, avec un facteur k calé à une valeur de 5.2.

Tableaux

- Tableau V.1. Valeurs des paramètres nécessaires à la prévision du stade de développement de la croûte (C).
- Tableau V.2. Effet des caractéristiques initiales du lit de semences (fin et sec, fin et humide, intermédiaire ou grossier) sur la levée de plantules de betterave issues de semences de petites (7-8.999 mg) ou de grosses tailles (13-16 mg, uniquement pour des lits de semences fin et humides); pour plusieurs dates de semis en fonction de la pluviométrie et de la teneur en eau de la surface ($H > 0.20 \text{ g g}^{-1}$ ou $S < 0.20 \text{ g g}^{-1}$).

INTRODUCTION

Figure In.1
Schéma du déroulement de l'implantation d'une culture, exemple de la betterave (d'après Aubertot, 1998).

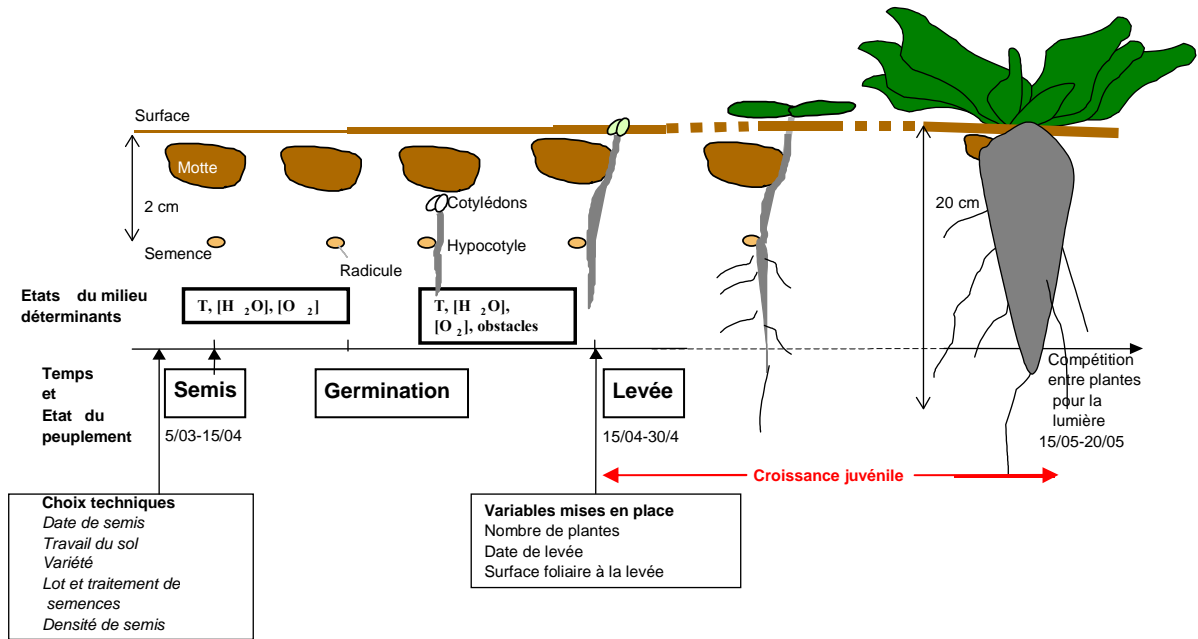
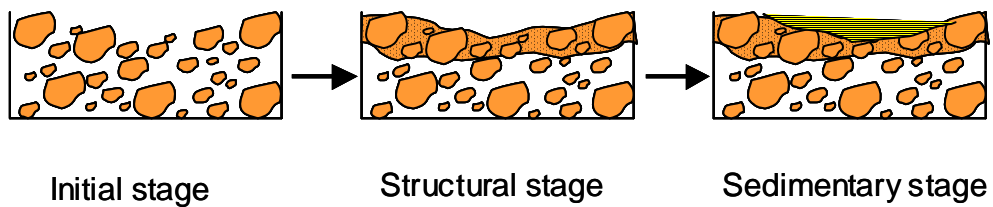


Figure In.2
Schéma du développement d'une croûte de battance à la surface d'un sol.



INTRODUCTION

1. Déroulement de l'implantation d'une culture, impact de la formation d'une croûte à la surface du sol

L'étape d'implantation d'une culture est cruciale pour la mise en place du peuplement, et son échec représente un risque important pour les agriculteurs. Cette étape influence la vitesse de développement foliaire, et donc la quantité d'énergie lumineuse interceptée dont dépend le niveau de biomasse produit (Jaggard, 1994). Par ailleurs, la taille des plantes obtenues est un critère de qualité de la production qui peut être très important. La taille d'une plantule reste fortement influencée tout au long du cycle par la façon dont s'est déroulée l'étape de la levée, en particulier sa durée et la rencontre d'obstacles (Tamet et al., 1995 ; Dürr et al., 1992) ; ainsi que par la densité et la position relative des plantes levées les unes par rapport aux autres. Dans les situations les plus critiques avec des densités de peuplement faibles, l'agriculteur est contraint de semer à nouveau.

La réussite de cette étape met en jeu un ensemble de décisions et d'interventions coûteuses en temps, argent et énergie, difficiles à maîtriser parce qu'elles interagissent entre eux (figure In.1). Le choix des différentes techniques d'implantation et le choix des conditions de semis ont un impact très important sur le déroulement de cette étape. La date de semis, les techniques de travail du sol, les réglages du semoir, le choix d'une variété et d'un lot de semences sont autant de décisions qui nécessitent pour en maîtriser le résultat de bien savoir analyser les parts respectives du matériel végétal, des conditions de milieu et de leurs interactions dans le déroulement de la phase d'implantation d'une culture.

De nombreux facteurs interviennent qui interagissent entre eux : température et humidité du lit de semences, pluviométrie, propriétés physiques du sol et caractéristiques des semences et des plantules. Face à ce grand nombre de facteurs et à leurs interactions, l'analyse et la maîtrise des résultats de l'implantation des cultures sont difficiles à réaliser. La maîtrise de cette étape est aussi rendue délicate par le caractère aléatoire et la très forte amplitude possible des conditions de milieu à l'interface sol-atmosphère.

Deux phases se succèdent à partir du semis jusqu'à la levée (figure In.1) : la germination proprement dite qui se traduit par la percée de la radicule ; puis l'allongement des organes qui conduit à la levée. Ces deux étapes dépendent de manière différente des facteurs environnementaux. Les observations sur des levées de grandes cultures montrent que l'étape de germination est souvent franchie. Au cours de la deuxième étape, correspondant à l'allongement des différents organes jusqu'à la sortie hors de terre, se manifestent par contre de nombreuses difficultés. En particulier, des obstacles mécaniques peuvent empêcher l'émergence des plantules : les mottes présentes dans le lit de semences, mais surtout l'apparition d'une croûte de battance à la surface du sol. L'apparition d'une croûte est un problème majeur : il se rencontre pour de nombreuses espèces et dans des conditions de milieu très variées (Arndt, 1965 ; Awadhwal et Thierstein, 1985).

Une croûte de battance se forme sous l'action des pluies. Elle est le résultat de la désagrégation de la surface du sol. A partir de l'état fragmentaire résultant des opérations de travail du sol et de semis, elle se forme progressivement en traversant plusieurs étapes caractéristiques (figure In.2 ; Boiffin, 1984; Boiffin et Bresson, 1987; Duval et Boiffin, 1994a). Dans la première phase, les agrégats initialement présents à la surface du sol et les particules de terre détachées et projetées à partir de ces agrégats initiaux, sont réorganisés de manière à combler les interstices laissés par la porosité de la surface. Ils forment progressivement une couche continue à la surface du lit de semence de porosité réduite. Cette croûte dite structurale conserve la même organisation texturale que les agrégats initiaux. Au fur et à mesure de la dégradation, les interstices se remplissent et la densité augmente sous l'impact des gouttes de pluie. L'infiltrabilité de la surface diminue (Casenave et Valentin, 1992; Fies et Castelaogegunde, 1996; Leonard et al., 2006) et dans une seconde étape des conditions d'excès d'eau finissent par apparaître à la surface du sol. Elles entraînent un déplacement et un tri granulométrique des particules qui se déposent ensuite à la surface du sol au moment du ressuyage de la surface pour former une croûte sédimentaire.

Ces croûtes peuvent être un obstacle à la levée dès les premiers stades de leur formation. Les situations propices à un blocage des plantules sous des croûtes sont de deux grands types :

- des températures assez froides qui ralentissent la croissance des plantules, associées à des périodes pluvieuses ; ce type de situation se rencontre en Europe lors de semis précoces au printemps, ou de semis tardifs à l'automne ;
- des alternances de pluies (ou l'utilisation de l'irrigation au semis) suivies de périodes favorisant le dessèchement (vent et températures élevées) ; ces situations se rencontrent lors de semis plus tardifs au printemps ou lors de semis irrigués en Europe ; ou bien encore en conditions semi-tropicales (Mullins et al., 1996 ; Taki et Godwin, 2006 ; Taki et al., 2006).

De nombreuses études décrivent la recherche de techniques permettant de limiter les effets de croûtes formées. Ces techniques consistent soit à tenter de limiter l'effet des croûtes une fois formées, en particulier dans les zones irriguées au moment du semis lorsque la formation des croûtes est pratiquement inévitable ; soit à tenter de limiter le risque ou la vitesse d'apparition de la croûte.

Différentes techniques mécaniques permettent de briser les croûtes et de favoriser le passage des plantules (exemple du coton; Abbas Hemmat et Khashoei, 2003). Cependant, l'emploi de ces techniques, utilisées aussi en région tempérée, a souvent pour conséquence d'abîmer les plantules en cours de levée. D'autres travaux portent sur la mise au point de techniques de travail du sol favorisant l'apparition de fissures le long de la ligne de semis et donc le passage des plantes. Des travaux récents ont montré que si avant la phase d'irrigation, par exemple au moment du semis, une bande compactée de quelques centimètres est créée le long de la ligne de semis, elle favorise l'apparition de fissures au niveau des plantules en provoquant un gradient de succion de l'eau du sol au cours de la phase de dessèchement (Taki et al., 2006). D'autres travaux analysent la possibilité d'éviter l'occurrence d'une croûte à la surface du lit de semences en agissant par les pratiques de travail du sol sur les propriétés et la géométrie de la surface du lit de semences (Baumhardt et al., 2004; Gicheru et al., 2004). Différentes substances apportées à la surface du sol (polymères, produits calcaïques et organiques) ont été essayées pour diminuer la sensibilité du sol à l'encroûtement (Le Souder et al., 1991 ; Lehrsch, 2005).

Ces différentes études illustrent la lourdeur des expérimentations à mener. Elles restent ponctuelles et difficiles à généraliser. Les expérimentations sur le terrain bien que nombreuses sont lourdes à mettre en place et donnent des résultats qui restent contingents des conditions de milieu rencontrées et des cultures sur lesquelles elles sont menées. De ce fait, les études restent focalisées sur l'observation des effets d'un certain nombre de facteurs, sur un nombre limité d'années ; les interactions sont difficiles à analyser. Les caractérisations du peuplement et du milieu restent souvent limitées, en particulier car elles nécessitent des équipements spécifiques et sont coûteuses en temps. L'expérimentation est nécessairement limitée dans le temps et dans l'espace, ce qui ne permet pas toujours d'explorer une gamme suffisante de variation des conditions de milieu. L'analyse et la généralisation des effets observés restent difficiles.

La modélisation peut contribuer à compléter les résultats fournis par l'expérimentation sur le terrain. Elle permet d'agréger les connaissances disponibles avec pour objectif de restituer le phénomène analysé. Elle permet ainsi de faire le point sur l'état des connaissances et de développer des recherches sur les points où les connaissances manquent, restent limitées ou peu opérationnelles par rapport à l'objectif de la modélisation recherché. Elle peut permettre de croiser différentes conditions de milieu et donc d'explorer des conditions non rencontrées lors d'expérimentations qui restent forcément limitées sur le terrain. Par ailleurs, les différents facteurs qui influencent la germination et la levée et l'évolution des états du milieu peuvent interagir : la modélisation peut aider à analyser ces interactions.

Dans le cas de l'étude de l'implantation des cultures, elle peut permettre pour différentes espèces et conditions de culture de séparer les différentes étapes conduisant à la levée, de prendre en compte les facteurs influençant chacune d'elles, de faire varier les conditions climatiques et d'analyser les effets de différents choix techniques. Ces expérimentations numériques peuvent être un moyen complémentaire de l'expérimentation de terrain pour aider à des prises de décisions de manière moins

Figure In.3
Schéma de fonctionnement du modèle SIMPLE (d'après Dürr et al., 2001).

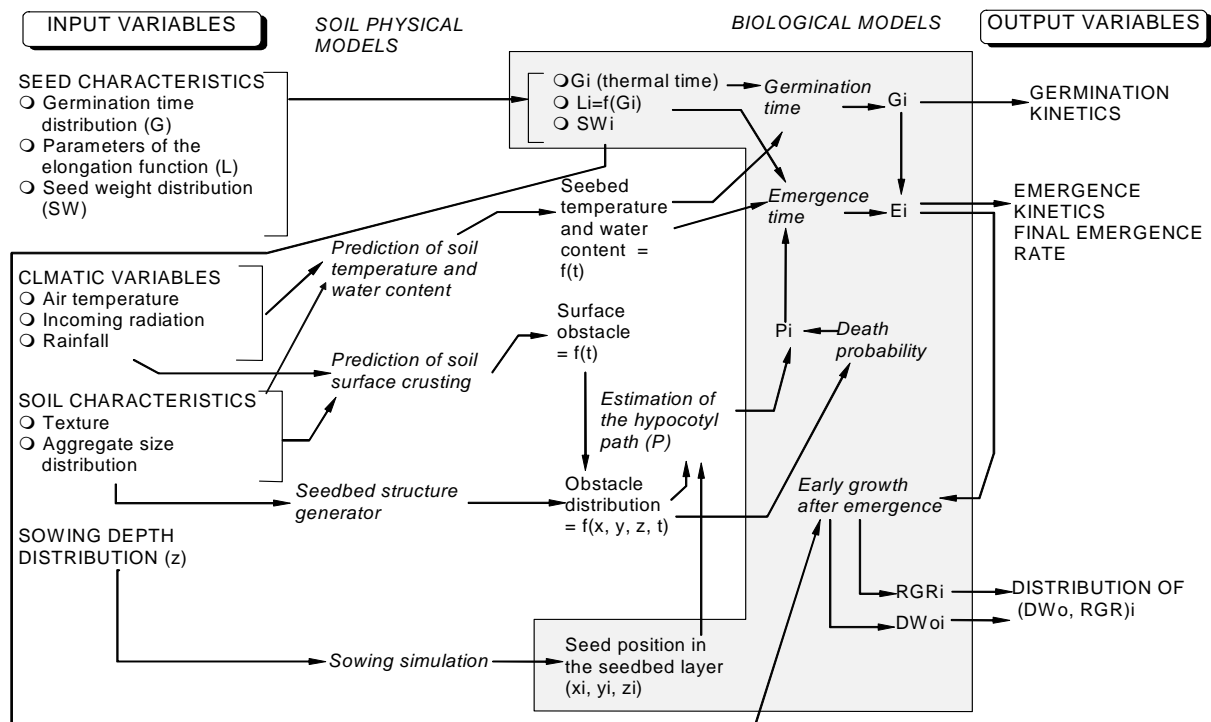
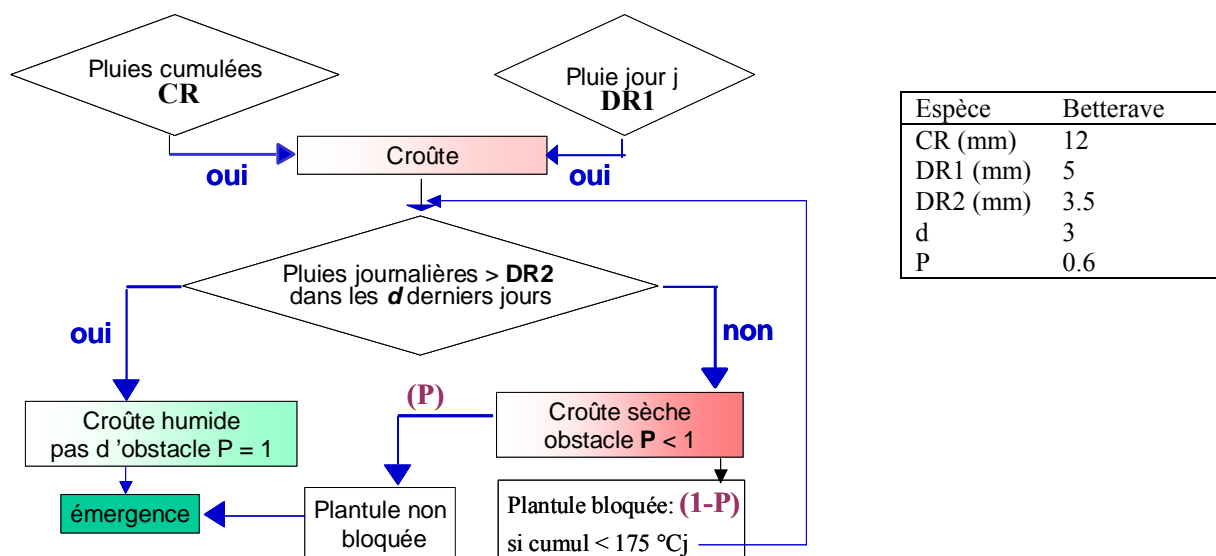


Figure In.4
Schéma du module actuel de levée sous croûte dans SIMPLE.



empirique : date de semis, choix des variétés, et des caractéristiques des semences, travail du sol, profondeur de semis.

2. Modélisation de la levée sous croûte: état des recherches

2.1. Le modèle SIMPLE : intérêt et limites

Différents modèles ont été développés concernant la levée des cultures annuelles (blé en conditions arides, Bouaziz et Bruckler 1989 ; cultures tropicales, Mullins et al 1996 ; cultures légumières, Finch-Savage et Phelps, 1993 ; betterave, blé, cultures intermédiaires, Dürr et al., 2001, 2003). Selon l'espèce et les conditions de culture, les effets des facteurs les plus importants, dans un milieu donné et pour une culture donnée, sont représentés. De façon générale, les effets de la température et de la teneur en eau sur la cinétique de germination et de levée sont représentés. Les variations de position des semences dans les horizons superficiels le sont également. Ces modèles permettent donc le plus souvent une prévision dynamique des levées, prenant en compte la position de la semence et les évolutions de la température et de la teneur en eau du sol. Par contre, la prise en compte de l'état structural est plus ou moins complète et explicite : effets de la porosité via l'importance des surfaces de contact entre sol et semence, effets de la taille des mottes via un coefficient de tortuosité attribué au parcours des plantes et une proportion de la surface recouverte par des mottes supérieures à un certain calibre, résistance à la pénétration des couches traversées selon leur humidité.

Parmi les modèles évoqués, le modèle SIMPLE (figure In.3, Dürr et al., 2001) présente l'intérêt d'avoir été conçu de façon à pouvoir intégrer et analyser les effets des opérations de travail du sol et de semis sur les levées. Un générateur de maquette de lits de semences permet une représentation de la structure 3D du lit de semences et de ses effets sur la croissance des plantules : distance à parcourir et mortalité sous mottes. La maquette 3D permet de représenter l'organisation spatiale des agrégats à la surface du sol après le semis.

Le modèle intègre un module de levée sous croûte. Il a été conçu sur la base d'observations réalisées sur un large réseau de parcelles, pour la betterave sucrière en sol limono argileux (Duval et Boiffin, 1994b). L'état de la surface est déterminé jour après jour (figure In.4). Il dépend de la pluviométrie via deux variables qui sont la quantité de pluie cumulée depuis le semis et les pluies journalières. Lorsque l'une de ces deux variables excède une valeur seuil, le modèle décrète la formation d'une croûte à la surface du lit de semences. Cette croûte est considérée comme un obstacle si elle est sèche, c'est à dire si la pluie journalière dans les trois jours précédents l'itération est inférieure à une valeur seuil. Dans ce cas une proportion des plantules ayant atteint la surface du sol reste bloquée, les autres parviennent à émerger. Le même processus est réitéré jour après jour, tant que le temps thermique cumulé depuis le semis n'excède pas la durée maximale de vie souterraine des plantules.

Ce module empirique a été paramétré pour des situations de semis données, à la fin des années 80 en Picardie : sols limono-argileux, climat du nord du bassin parisien, culture de betterave. Les semis analysés étaient pour la plupart réalisés en avril ; les conditions étaient majoritairement sèches favorisant la création de lits de semences riches en terre fine.

SIMPLE ainsi paramétré, a été utilisé pour simuler l'effet de plusieurs dates de semis sur un grand nombre d'années (30 années de simulations) sur le taux de levée de la betterave sucrière (Carrera et Dürr, 2003). Cette analyse fréquentielle avec le paramétrage actuel du modèle SIMPLE permet de chiffrer l'ampleur des problèmes de levée liés à la présence des croûtes.

A partir de début mars, date de début des semis de betterave actuellement, les taux de levée finaux sont élevés. Ils atteignent 80% en moyenne sur les 30 années de simulations (figure In.5a). Cependant, les écarts-types sont importants : selon les années les taux de levée sont très variables pour une même date de semis. La figure In.5b présente les fréquences d'occurrence des taux de levée suivants : moins de 50% (taux pour lequel habituellement un ressemis est décidé), entre 50 et 80%, plus de 80% (taux considéré comme réussi). En février, les taux de levée sont inférieurs à 50% dans un cas sur deux. Début mars, ce risque est considérablement réduit puisque les taux de levée sont inférieurs à 50% dans seulement 5% des cas. A partir de mi-mars, le taux de levée est toujours supérieur à 50%. Il dépasse

Figure In.5

Simulations des taux de levée de semences de betterave sucrière. Cas d'un lit de semences fin et climat du nord de la France (1970-2002). (a) Moyenne et écart-type en fonction de la date de semis. (b) Fréquence d'obtention des taux de levée suivants : <50%, 50 à 80%, > 80% ; en fonction de la date de semis ; (c) Fréquence pour laquelle plus de 30% des plantules restent bloquées sous croûte (par rapport au nombre initial de semences).

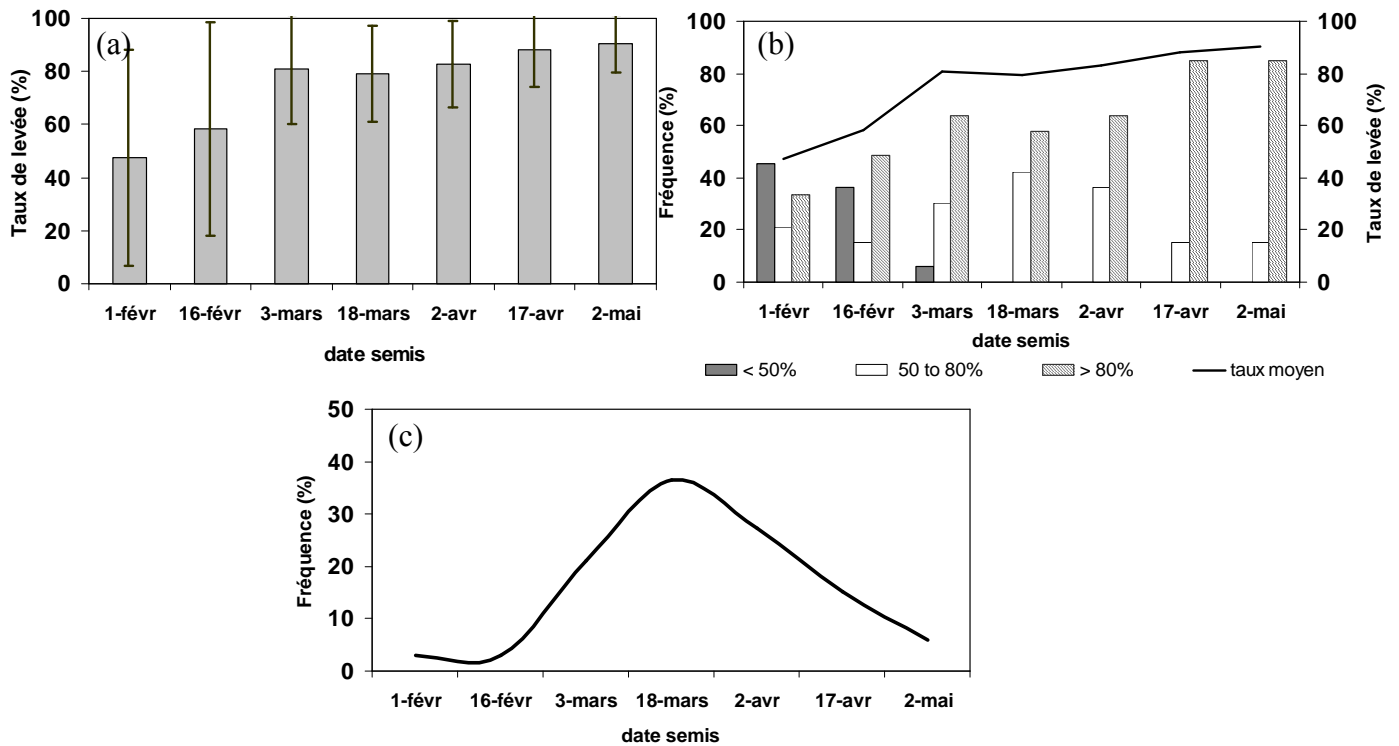
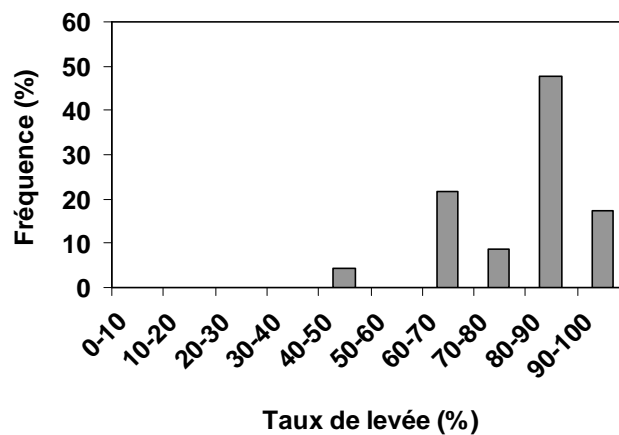


Figure In.6

Fréquence des taux de levée de betterave sucrière observés dans l'essai longue durée de Mons-en-Chaussée (80, France ; 23 parcelles semées entre le 1^{er} mars et le 15 mai, au cours d'une période de 12 ans : 1993-2004).



80% dans un cas sur deux. Le modèle permet aussi l'analyse des fréquences des causes de non levées, ce qui est plus rarement établi au champ car long, pénible et délicat à observer. Les faibles taux de levée observés en février s'expliquent par les taux importants de semences non germées en raison des basses températures (non présenté). Les taux de plantules bloquées sous croûte varient considérablement selon la date de semis. Le risque est maximum de mi-mars à mi-avril : dans environ un cas sur trois, plus de 30% des plantules semées meurent bloquées sous la croûte (figure In.5c). Ces fréquences obtenues par simulation sur 30 années de données sont cohérentes avec les observations réalisées dans l'essai longue durée de Mons-en-Chaussée (description détaillée dans Boizard et al., 2001) au cours des 12 années d'expérimentations. Une analyse des variations des taux de levée de la betterave sucrière sur cet essai montre que dans 65% des cas l'implantation présente des taux de levée élevés, supérieurs à 80% (figure In.6). Mais, dans un quart des situations, le taux de levée est inférieur à 70% ; et pour 5% des semis, le taux de levée atteint le niveau critique de 50%. Dans ce dernier cas, les causes de non levée observées montrent qu'une plante non levée sur deux est restée bloquée sous la croûte soit environ un quart des plantes semées.

Cependant le module actuel de SIMPLE est empirique et reste sommaire. L'analyse fréquentielle réalisée est cohérente avec les indications fournies par l'essai longue durée. Mais cette étude a été réalisée dans les conditions proches de celles pour lesquelles le modèle a été paramétré. Cela permet de généraliser les résultats obtenus sur cet essai. Mais ce modèle présente plusieurs limites.

Premièrement, le modèle n'intègre pas plusieurs facteurs qui peuvent influencer la dynamique de formation de la croûte et les taux de franchissement par les plantules.

La composition du sol et sa sensibilité à la battance sont pris en compte via les valeurs seuil de pluviométrie, paramètres du modèle. Mais d'autres facteurs qui influencent la vitesse de développement de la croûte, état hydrique et structure de la surface du sol, ne sont pas intégrés dans le modèle. Or, il est nécessaire d'évaluer l'impact réel de ces facteurs car ce sont sur ces facteurs que le choix des techniques de travail du sol et de la date de semis peut avoir une action.

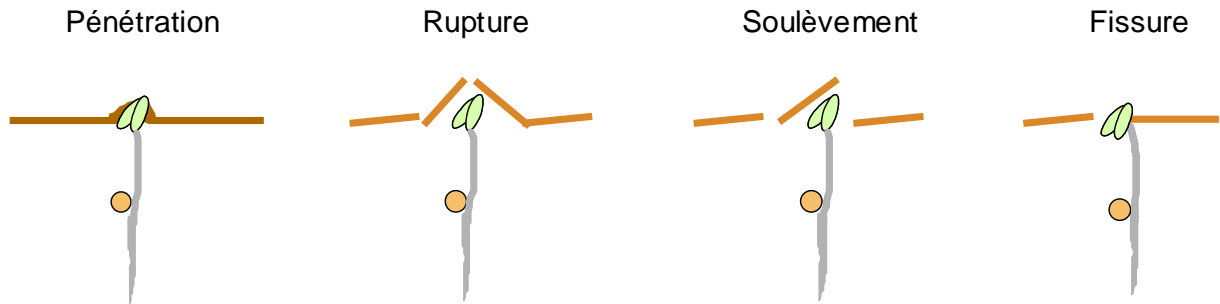
D'autre part, l'état de la surface est représenté de façon binaire : croûte ou absence de croûte. Les variations du stade de développement de la croûte ne sont pas prises en compte. Le stade fait cependant varier les taux de levée de 50 à 90% (Richard et Boiffin, 1990).

Enfin, les caractéristiques des plantules susceptibles de modifier les taux de franchissement ne sont que partiellement pris en compte via le paramètre qui indique la proportion des plantes pouvant franchir une croûte sèche. Ces caractéristiques que sont l'espèce, la variété, la masse des semences, l'âge des plantules, peuvent faire varier la force d'émergence des plantes et donc potentiellement la possibilité pour une plantule de franchir la croûte. Les variations liées à ces caractéristiques ne sont pas prises en compte.

Ensuite, le modèle pose le problème de la généralisation à d'autres situations. Les valeurs des paramètres du modèle dépendent du type de sol, des caractéristiques du climat et des caractéristiques des plantes. Les valeurs indiquées dans la figure In.4 correspondent au paramétrage établi pour la betterave en sol limono argileux avec un climat du type du nord de la France.

Les paramètres du module pourraient être seulement modifiés et estimés sur la base des connaissances acquises dans différents essais. Dans le cas du blé par exemple, la surface du sol ne forme un obstacle à la levée des plantules que pour des stades de dégradation très avancés. Un cumul de pluie élevé est nécessaire pour aboutir à la formation d'une croûte suffisamment épaisse pour empêcher le passage des plantes. Par contre les conditions automnales humides ne permettent pas à la croûte de se dessécher, aussi ce facteur n'est pas à prendre en compte. Mais la précision et la validité du paramétrage nécessiteraient de nombreuses expérimentations au champ pour chaque nouvelle situation.

Figure In.7
Schéma des différents types de franchissement décrits dans la littérature (Arndt, 1965 ; Souty et Rode, 1993, 1994 ; Aubertot, 2002).



Deux grandes catégories de questions se posent :

- comment prendre en compte les différents éléments qui ne sont pas intégrés dans le module de prévision des levées sous croûtes actuel ; a-t-on les connaissances nécessaires, comment les acquérir et les intégrer ?
- et faut-il les prendre en compte étant donné l'ampleur des variations de levée qu'ils peuvent engendrer ? La réponse à cette question peut être apportée par leur intégration dans le modèle et la réalisation de simulations pour tester l'ampleur de leur effet.

2.2. Autre approche de modélisation de la levée sous croûte

Une autre approche de modélisation des levées sous croûte a été tentée concernant ce module (Aubertot, 1998 ; Aubertot et al., 2002). Une approche plus mécaniste a été proposée, la prévision du passage des plantules reposant sur la confrontation de la force exercée par les plantules à la résistance des croûtes formées, via un modèle physique de franchissement. Selon l'état de la croûte (épaisseur et humidité) et le type de plante, différents modes de franchissement ont été décrits (Arndt, 1965) et on a cherché à les modéliser (Arndt, 1965 ; Goyal et al., 1982; Souty, 1992 ; Souty et Rode, 1993, 1994b; Aubertot et al., 2002 ; figure In.7). L'utilisation de ces modèles nécessite de mesurer la résistance de la croûte à l'aide d'un pénétromètre, ainsi que la force ou la pression exercée par la plantule.

Pénétration

Une plantule doit exercer une pression au minimum égale à celle exercée par le pénétromètre pour parvenir à franchir la croûte. Ce type de franchissement fait appel aux propriétés plastiques du matériau à franchir. Il implique un passage par déformation du matériau sans phénomène de rupture. Le modèle est formalisé de la façon suivante (Souty et Rode, 1993 ; Aubertot, 1998 ; Aubertot et al., 2002) ; une plantule peut traverser la croûte par pénétration si :

$$P_{\text{plantule}} \geq P_{\text{pénétromètre}}$$

$$F_{\text{plantule}} \geq (S_{\text{plantule}} / S_{\text{pénétromètre}}) \cdot F_{\text{pénétromètre}}$$

La possibilité de franchissement dépend donc de la force de la plantule (F_{plantule}), de la résistance de la croûte ($F_{\text{pénétromètre}}$) et de la surface d'application des forces pour la plantule et le pénétromètre (S_{plantule} et $S_{\text{pénétromètre}}$).

Flexion et rupture

Ce modèle utilisé par Goyal et al. (1982) et Souty et Rode (1993) est basé sur la théorie de la flexion des plaques minces de Timoshenko et Woinowsky-Krieger (1961). Pour franchir la croûte, une plantule doit créer une contrainte maximale en traction sur la face supérieure de la croûte au moins égale à celle exercée par le pénétromètre.

$$\sigma_{\text{max plantule}} \geq \sigma_{\text{max pénétromètre}}$$

Si la croûte au-dessus de la plantule est assimilée à une plaque circulaire,

$$\text{alors } \sigma_{\text{max pénétromètre}} = (F_{\text{pénétromètre}} / e^2) (1 + \nu) (3 / 2\pi) (1 / 4 (r / a)^2 - \ln(r / a))$$

$$\sigma_{\text{max plantule}} = (F_{\text{plantule}} / e^2) (1 + \nu) (3 / 2\pi) (1 / 4 (\sqrt{bh} / 2a)^2 - \ln(\sqrt{bh} / 2a))$$

où F est la force exercée par la plantule ou le pénétromètre, e l'épaisseur de la croûte, ν le coefficient de Poisson, a la demi-portée de la plaque, r le rayon de l'embout du pénétromètre, b et h les axes de la surface elliptique sur laquelle est répartie la force d'émergence de la plantule. La force d'émergence peut donc être confrontée à la résistance de la croûte via un coefficient k qui dépend de la géométrie du système :

$$F_{\text{plantule}} \geq k \cdot F_{\text{pénétromètre}}$$

Les conditions d'utilisation du modèle sont strictes. Le modèle est applicable pour une plaque circulaire, isotrope et maintenue à sa périphérie. Il ne prend pas en compte l'adhérence de la croûte avec la sous-couche. Pour ces raisons, il semble difficilement utilisable en conditions naturelles.

Soulèvement d'une plaque

Ce modèle peut être appliqué dans le cas de plaques délimitées par des fissures et non adhérentes à la sous-couche. Le moment de la force exercée par la plantule doit être supérieur au moment du poids de la plaque pour que la plantule parvienne à soulever la plaque (Souty et Rode, 1993). Le franchissement dépend de la force de la plantule ($F_{plantule}$), du poids de la plaque (P_{plaque}) et de la distance entre le point d'application de la force et l'axe de rotation de la plaque (d) :

$$M\vec{F}_{plantule} > M\vec{P}_{plaque}$$

$$\vec{P}_{plaque} = m\vec{g}$$

$$F_{plantule} = (d_{P_{plaque}} / d_{F_{plantule}}) \cdot mg$$

Où m est la masse de la plaque et g l'accélération de la pesanteur (9.81 m.s^{-2})

Différentes études ont été menées en laboratoire à l'aide de systèmes plus ou moins artificialisés afin de mettre au point et tester ces modèles pour prévoir la levée sous croûte.

Dans le cas de Souty (Souty et al., 1992; Souty et Rode, 1993), les croûtes étaient formées à partir de boues saturées en eau et donc étaient relativement homogènes et isotropes. Leur résistance était mesurée à l'aide d'un pénétromètre. Les plantules étaient ensuite positionnées sous des plaques de croûte circulaires, maintenues à leur périphérie. Les modèles de franchissement ont été utilisés pour prévoir les taux de levée en confrontant la distribution des forces d'émergence avec la résistance moyenne de la croûte. Le modèle de pénétration et le modèle de flexion et rupture ont été testés respectivement dans le cas du maïs et de la betterave sucrière. Les résultats ont montré une bonne adéquation entre les prévisions et les taux de levée observés. Cependant, le dispositif utilisé respectait les conditions d'application des modèles, conditions très éloignées des conditions au champ (plaque circulaire homogène isotrope non adhérente, maintenue à sa périphérie). De plus le système n'avait pas une taille suffisante pour permettre le développement de fissures et donc ne permet pas de mesurer l'importance des passages par les fissures sur les taux de levée sous croûte de battance.

Aubertot et al. (2002) a tenté d'utiliser les différents modèles de franchissement (pénétration, flexion et rupture, soulèvement) dans le cas de la betterave, pour des croûtes également formées en laboratoire mais dans des conditions plus proches des conditions naturelles. Des lits de semences reconstitués dans des bacs de dimensions $58 \times 58 \times 7 \text{ cm}^3$ ont été placés sous un simulateur de pluie. La surface était suffisamment importante pour permettre le développement d'un réseau de fissures. L'intensité des pluies était cependant relativement forte, 66 mm.h^{-1} , dans l'objectif d'accélérer la formation de la croûte et éviter l'apport de quantités d'eau trop importantes qui auraient pu provoquer des conditions d'anoxie pour les plantules. Pour la même raison, une couche de terre fine a été rajoutée à la surface pour augmenter la sensibilité à la battance. Les croûtes formées étaient de type structural, maintenues humides ($0.25\text{-}0.27 \text{ g g}^{-1}$) ou séchées rapidement avant le début de la levée ($0.05\text{-}0.06 \text{ g g}^{-1}$). Les résistances des croûtes ont été mesurées à l'aide d'un pénétromètre ascendant (embout cylindrique de 1 mm de diamètre) de manière à respecter la direction de poussée des plantules.

Les modes de franchissement des plantules variaient en fonction de l'humidité de la croûte. Les passages par pénétration étaient prédominants face à des croûtes humides et diminuaient au profit des passages par rupture ou par les fissures dans le cas des croûtes sèches. Les plantules placées à une faible distance des fissures ($< 5 \text{ mm}$) franchissaient la surface directement par les fissures sans mécanisme de soulèvement.

Les mesures pénétrométriques ont été utilisées pour calculer, dans le modèle correspondant au mode de franchissement considéré, la force minimale que doit exercer une plantule pour franchir la croûte selon le mécanisme testé. La valeur ainsi calculée est comparée à la distribution des forces d'émergence pour établir le taux de levée potentiel. Quel que soit le modèle de franchissement

(pénétration, flexion et rupture ou soulèvement), les taux de levés ainsi prévus sont très largement inférieurs aux taux de levée observés : 12 à 18 % contre 36 à 87 %, pour des résistances moyennes allant de 0.15 à 0.19 MPa. Plusieurs hypothèses ont été avancées pour expliquer ces écarts très importants :

- une sous-estimation des forces d'émergence des plantules. Cependant la masse des plaques soulevées par les plantules semblait en adéquation avec les ordres de grandeurs des forces d'émergence ;
- une surestimation de la résistance de la croûte qui pourrait s'expliquer par les frottements le long de l'aiguille du pénétromètre, limités dans le cas des plantules ; et par la vitesse d'avancement du pénétromètre très supérieure à celle d'une plantule : respectivement 20 mm.min⁻¹ contre 0.01-0.02 mm.min⁻¹ (estimé d'après Dürr et Boiffin, 1995). Un tel facteur d'écart conduirait à doubler la valeur de la résistance de la croûte (Waldron et Constantin, 1970) ;
- le choix des modèles de franchissement et particulièrement le modèle de flexion et rupture dont les conditions d'application ne sont pas respectées. Les croûtes formées sont hétérogènes comparées aux croûtes obtenues à partir de boues. La géométrie du système est également très différente du dispositif pris en compte par le modèle où la croûte est assimilée à une plaque circulaire maintenue à sa périphérie.

Un autre problème soulevé par cette étude réside dans le fait que le dispositif reste éloigné des conditions naturelles. L'utilisation du simulateur de pluie réglé avec une forte intensité, et les types de lits de semences constitués avaient abouti à des croûtes formées de type structural, très uniformes et non adhérentes à la sous-couche. Ce type de croûte apparaissait encore assez différent de qui est observé au champ. Les surfaces limitées et l'état du lit de semences en surface très homogène, l'organisation du semis (manuel avec un espacement très régulier de 5 cm entre plantes), peuvent influencer les caractéristiques des levées, en particulier l'importance relative des différents modes de passage des plantes et l'importance à donner au réseau de fissures.

3. Proposition d'une démarche d'étude pour l'amélioration de la prévision de la levée sous croûte

En résumé, les difficultés rencontrées pour la modélisation des levées sous croûte étaient de plusieurs ordres :

- les systèmes plus ou moins artificialisés utilisés au laboratoire aboutissaient à créer des types de croûte et à décrire des modes de franchissement ainsi que leurs fréquences, dont on ne savait pas si au final ils représentaient des situations réalistes par rapport au champ. En particulier, les franchissements par rupture observés au laboratoire semblaient surestimés par rapport aux quelques observations disponibles au champ ; l'impact réel du réseau de fissures sur les franchissements au champ n'était pas quantifié ; les types de croûte formés au champ pendant les levées n'étaient vraisemblablement pas du même type que celles du laboratoire sans que cela ne soit bien caractérisé ;
- la recherche de modèles physiques pour une approche mécaniste des franchissements se heurtait à de nombreuses difficultés et n'était peut-être pas adaptée aux types de conditions au champ et à la variabilité physique et géométrique des états de surface des lits de semences. Les types de modèles testés, en particulier ceux de rupture ne correspondaient pas aux conditions du milieu dans lequel se produisent les franchissements.

Face à ces difficultés, il est apparu nécessaire muni des informations et des questions fournies par les études précédentes, de revenir à l'observation et à l'analyse de situations de levées sous croûtes au champ pour différentes cultures.

L'objectif était d'observer et de quantifier les différents modes de franchissement pour différentes espèces face à différents stades de développement des croûtes bien caractérisés (faciès et caractéristiques physiques mesurables associées).

Tableau In.1
Ordre de grandeur des forces d'émergence pour plusieurs espèces.

Espèces	Ordre de grandeur des forces d'émergence (Newtons)	Masse semences (mg)	Diamètre épi-hypocotyle (mm)	Forme apex	Auteurs
Carotte (<i>Daucus carota</i>)	0.04 - 0.10	1.5 - 2	0.5 - 0.7	crosse	Tamet et al. (1995)
Betterave (<i>Beta Vulgaris</i>)	0.05 - 0.10	2.5 - 4 (sans péricarpe)	1	crosse	Souty et Rode (1993)
Trèfle (<i>Trifolium</i>)	0.09 - 0.12			crosse	Jensen et al. (1972)
Luzerne (<i>Medicago sativa</i>)	0.15 0.20	2.5		crosse	Jensen et al. (1972) Williams (1956)
Pois (<i>Pisum sativum</i>)	0.5 - 1	250		crosse	Souty et Rode (1994b)
Soja (<i>Glycine max</i>)	1.3 - 1.9			crosse	Souty et Rode (1994b)
Haricot Haricot blanc (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	3 - 4.3 3.9 - 8.1	200 - 350		crosse	Souty et Rode (1994b) Taylor et Ten Broeck (1988)
Coton (<i>Gossypium</i>)	2 3.0 - 6.0	85	1.5 3 - 4	crosse	Sinha et Ghildyal (1979) Gerard (1980)
Pois fourrager (<i>Vigna unguiculata</i>)	7	257	2.4	crosse	Sinha et Ghildyal (1979)
Riz (<i>Oryza sativa</i>)	0.5	24	0.9	cône	Sinha et Ghildyal (1979)
Blé (<i>Triticum aestivum</i>)	0.3 0.9	50 52	1.5 1.2	cône	Bouaziz et al. (1990) Sinha et Ghildyal (1979)
Maïs (<i>Zea mays</i>)	0.6 - 2.9 3	240 - 340 104	1.8	cône	Souty et al. (1992) Sinha et Ghildyal (1979)

Ces données devaient permettre d'une part d'orienter la modélisation vers des modes de franchissements réellement importants.

D'autre part, ces données pouvaient aussi fournir les éléments pour tester la possibilité d'une modélisation moins mécaniste, plus empirique, toujours fondée sur la confrontation des forces (ou des pressions) exercées par les plantes et de la résistance exercée par différents états des croûtes de surface, caractérisées par différents moyens (faciès, humidités, épaisseur, résistance); mais via l'utilisation de coefficients pouvant rester empiriques. Les forces d'émergence et/ou les pressions exercées par les plantules sont fréquemment mesurées dans la littérature pour différentes espèces (tableau In.1). Elles constituent une variable relativement facile à mesurer permettant de caractériser le comportement de la plante et ses variations en fonction de différents éléments (masse, âge, variété). Sans utiliser de modèle mécaniste, on peut chercher à utiliser cette variable pour confronter force exercée (ou pression) et résistance du matériau, en prévoyant le taux de passage par un coefficient empirique

Le module que l'on a cherché à élaborer devait aussi permettre d'analyser quantitativement la formation des croûtes et leurs effets sur la levée pour des situations plus variées de conditions de semis, d'états des lits de semences et de type de cultures.

Parmi les limites du module en place dans SIMPLE, certaines caractéristiques des lits de semences au moment du semis n'étaient pas prises en compte, en particulier son état structural et son humidité. Différentes études réalisées sous simulateur de pluie (Boiffin et al., 1990 ; Govers et al., 1990 ; Legout et al., 2005 ; Leonard et al., non publié) ont cherché à mettre en évidence les effets sur la vitesse de formation des croûtes des facteurs intrinsèques de constitution du matériau et les effets des facteurs d'état comme la taille des agrégats et leur humidité. Cependant ces études ne fournissent pas les éléments permettant de reconstituer la dynamique de formation *in situ* d'une croûte de battance.

Nous sommes donc aussi revenus à une observation de la dynamique de formation de la croûte en situations naturelles, en faisant varier les états initiaux des lits de semences. Nous nous sommes dans un premier temps limités à un seul type de sol en essayant d'envisager comment ces résultats seraient généralisables à d'autres types de sols, en particulier à l'aide de connaissances acquises sous simulateur de pluie.

Par ailleurs, différentes études ont été menées sur le développement de réseaux de fissures. Elles concernent la fissuration d'un volume en relation avec l'analyse de variations de porosité et souvent la circulation de l'eau (Samouëlian, 2004) ; mais aussi la fissuration de différents matériaux (peinture, épiderme), y compris de sols pour prévoir leur fragmentation (Velde, 1999, 2001 ; O'Callaghan et Loveday, 1973). Il n'existait pas à notre connaissance de travaux de prévision de la fissuration des lits de semences en relation avec la prévision des levées. Les éléments manquaient pour quantifier et prévoir l'extension d'un réseau de fissures à la surface d'un lit de semence en relation avec son état structural et les possibilités de levée des plantes. Là encore sur les différents lits de semences observés au champ nous avons retenu d'établir comment se forme et évolue le réseau de fissures après le semis jusqu'à la fin des levées.

L'acquisition de données *in situ* et l'intégration des différents facteurs de variations importants, y compris en développant un mode de prévision plus empirique ont donc été entrepris. La figure In.8 présente le schéma général d'acquisition des informations.

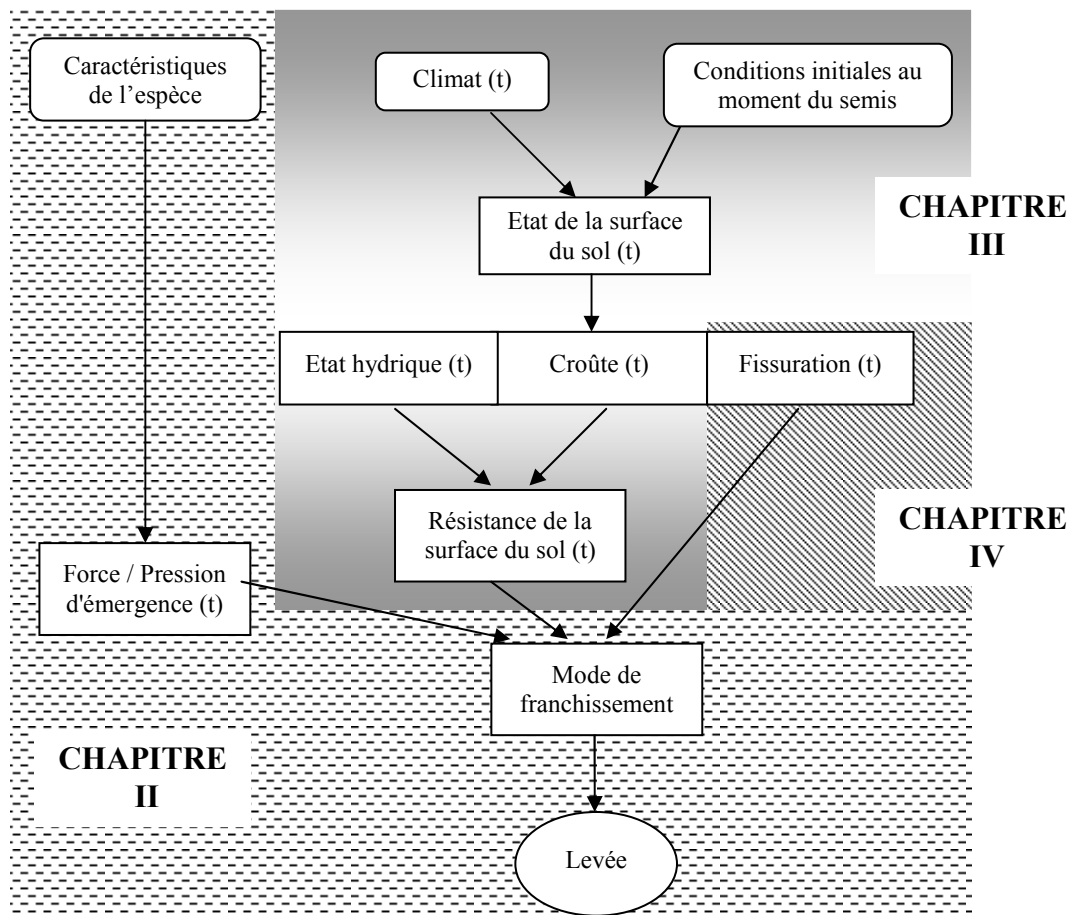
Le travail présenté a donc commencé par une analyse au champ des levées de différentes cultures pour identifier, hiérarchiser et quantifier les effets de différents facteurs propices au blocage des plantules sous croûte de battance.

Dans un premier temps, on a cherché à observer au champ les fréquences des modes de passage de différents types de plantules face à différents types de croûte, pour ensuite axer la modélisation sur les modes réellement existants.

Nous avons choisi des espèces différentes à la fois par rapport aux pressions qu'elles peuvent exercer sur la croûte et par le type et la période de semis :

- la betterave et le lin, deux espèces avec de faibles forces d'émergence semées au printemps ;

Figure In.8
Schéma général d'acquisition des informations nécessaires pour la construction d'un nouveau module de levée sous croûte



le haricot et le blé, deux espèces avec une force d'émergence plus élevée mais avec des conditions de semis très différentes. Le haricot est une espèce printanière alors que le blé a été semé à l'automne.

Parallèlement aux fréquences de franchissements, l'état de la surface a été précisément caractérisé : faciès et humidités locales, à proximité de la plante ; épaisseur et résistance mécanique associées aux faciès et humidités observés. L'objectif était de pouvoir établir, pour une espèce donnée, une relation entre la fréquence de passage d'un type donné et l'état de la surface décrit par ces différentes caractéristiques.

Muni de cette relation, il était nécessaire d'acquies aussi les informations suivantes :

- comment se forment les différents faciès de croûte obtenus à partir de l'état initial du semis et en fonction des conditions climatiques. L'objectif est de quantifier l'effet des facteurs qui peuvent influencer la vitesse d'apparition de la croûte : la stabilité des agrégats, l'humidité de la surface du sol, la structure du sol, sachant que l'agriculteur peut intervenir sur ces facteurs, les deux derniers en particulier. Il était indispensable aussi de caractériser l'évolution des propriétés physiques des croûtes : résistance mécanique ainsi que caractéristiques de la fissuration en raison de leur impact sur la levée.
- quelles forces exercent les plantules en fonction de leurs caractéristiques (espèce, variété, âge, masse des semences) et quelle est leur évolution au cours de la vie sous terre de la plantule. La force exercée par une plantule est une variable qui permettrait de caractériser la plante à un instant donné et sa capacité à franchir un état donné de la croûte. Les forces d'émergence exercées par ces différentes espèces ont donc été mesurées au laboratoire à l'aide d'un dispositif de mesure amélioré qui sera présenté. Il s'agit de rechercher une relation $FE > k \cdot R$ qui détermine la possibilité de franchissement.

La présentation du travail réalisé s'articule de la manière suivante :

- une présentation générale des différentes expérimentations et mesures réalisées, aussi bien au champ qu'au laboratoire (**chapitre I**)
- la description des modes de franchissement pour différentes espèces face à différents types de croûte caractérisés par leur faciès, leur humidité et leur épaisseur. Les différentes espèces seront aussi caractérisées par des mesures de la force qu'elles exercent (**chapitre II**).
- la présentation des résultats acquis sur la dynamique de dégradation de la surface du sol (**chapitre III**). Ces résultats doivent permettre d'identifier et hiérarchiser les facteurs qui influencent la vitesse de formation de la croûte et qui devront être pris en compte dans le module de levée sous croûte. Nous proposerons un modèle de formation de la croûte. Des mesures de résistance à différents stades des croûtes seront présentées associées à une analyse de leurs caractéristiques (humidité, épaisseur, faciès)
- dans le **chapitre IV**, la dynamique de fissuration de la surface du sol est caractérisée en raison de son rôle sur la levée des plantules en présence d'une croûte de battance mis en évidence dans le chapitre I. Nous proposerons un modèle géométrique de fissuration pour générer un réseau de fissures en fonction de l'état de la surface.
- enfin, dans le **chapitre V** nous montrerons comment l'ensemble des données acquises ont été assemblées dans un nouveau module pour prévoir le taux de levée sous croûte des plantules et être intégré au modèle d'émergence SIMPLE. Ce nouveau module sera utilisé pour évaluer par simulation l'effet de la variabilité des types de lits de semences et des caractéristiques des plantules sur la levée sous croûte.

CHAPITRE I

Site expérimental, matériel et méthodes

Les résultats présentés ont été obtenus au cours de deux années d'expérimentation au champ 2004-2005 et au laboratoire. Par ailleurs, les données acquises sur l'essai longue durée « Systèmes de cultures » de Mons-en-Chaussée ont été utilisées pour compléter la caractérisation de la dégradation de surface sur une plus large série de conditions de semis et de pluviométrie.

Dans ce chapitre sont présentés les grandes caractéristiques des expérimentations réalisées. Les quelques expérimentations complémentaires et les mesures spécifiques seront détaillées dans les chapitres concernés.

1. EXPERIMENTATIONS AU CHAMP

1.1. Site expérimental

Ce travail a été mené au nord du bassin parisien sur le site expérimental INRA de Mons-en-Chaussée (50°N latitude, 3°E longitude). Le sol est limono argileux avec une teneur en argile allant de 0.17 à 0.25 g g⁻¹, une teneur en matière organique de 0.015 à 0.021 g g⁻¹ et 2 à 24 g kg⁻¹ de CaCO₃. Il appartient aux Orthic Luvisols selon la classification FAO. L'ensemble des parcelles observées fait partie d'un essai de longue durée (décrit en détail par Boizard et al., 2001) qui a pour objectif d'évaluer et comparer l'évolution de la structure du sol et les modifications d'état physique selon différents systèmes de cultures induisant en particulier des risques différents de compactage du sol. Deux rotations culturales sont pratiquées: pois/ blé/ lin/ blé (système I) et maïs/ blé/ betterave/ blé, la seconde rotation étant pratiquée selon deux systèmes avec des règles de décisions différentes (systèmes II et III). Le système II est géré de manière à éviter au maximum des conditions humides favorisant le compactage pendant les opérations de semis et de récolte. Les cultures de printemps, comme la betterave, tendent à avoir un cycle plus court: semis plus tardif en conditions ressuyées et récolte généralement précoce, au début de l'automne, avant l'arrivée des périodes humides. Par opposition, le système III est mené en acceptant des risques quant au compactage du sol, ce qui permet d'allonger au maximum le cycle cultural des cultures semées au printemps. Ces cultures sont semées le plus tôt possible, compte-tenu des exigences notamment en température de l'espèce, et récoltées à la fin de l'automne. Les semis de blé qui interviennent après ces récoltes sont donc plus tardifs que dans les systèmes I et II. Chaque culture de chaque système est présente chaque année, soit 12 cultures par an, répétées sur deux blocs, ce qui aboutit à un ensemble de 24 parcelles de 0.4 ha en moyenne chacune. Cette surface importante permet que les opérations culturales soient réalisées avec les outils d'une exploitation agricole (tracteurs, travail du sol, semoirs, pulvérisateurs) et permet un suivi destructif (profils, prélèvements) sur une longue durée (l'essai est implanté depuis 1991).

Cet essai, en raison des différents types et périodes de semis, et de sa durée fournit donc une large gamme de types de lits de semences et de conditions climatiques pour notre étude.

Deux campagnes d'observations détaillées ont été menées en 2004 et 2005 permettant l'acquisition des données nécessaires à notre étude. De plus, des enregistrements systématiques ont lieu tous les ans dans l'essai longue durée qui ont été analysés, pour étayer les résultats acquis pendant les expérimentations 2004-2005, pour la partie concernant l'étude de la dégradation de la surface.

1.2. Traitements expérimentaux

Lors des deux années 2004 et 2005, nous avons suivi les levées de plusieurs cultures: betterave, lin, blé et haricot. Le haricot n'est pas une culture de l'essai longue durée ; il a été suivi dans le cadre d'un essai spécifique. Ces espèces diffèrent par leur force d'émergence, leur type et période de semis, ce qui présente plusieurs intérêts pour notre étude. En premier lieu, les forces d'émergence que ces espèces peuvent exercer sont très différentes, de 0.1 N pour la betterave à 3 N pour le haricot, ce qui peut avoir une incidence à la fois sur les taux de levée mais aussi sur les modes de franchissement observés pour un état donné de la croûte. Un autre aspect est le mode de semis. La densité de semis du blé et du lin est très largement supérieure à la densité de semis du haricot et surtout de la betterave (respectivement

Tableau I.1
Caractéristiques des parcelles suivies.

	Référence	Culture	Date semis	Argile (g g ⁻¹)	MO (g g ⁻¹)	Agrégats (g 100g ⁻¹)		
						> 20mm (Surface)	> 20mm (Lit entier)	< 2mm (Lit entier)
Printemps	04 P24N	Betterave d1	02 mars 04	0.18	0.018	7.2	4.7	39.1
	04 P24P	Betterave d1	02 mars 04	0.18	0.018	15.2	3.8	33.2
	04 P23	Betterave d2	25 mars 04	0.18	0.019	9.1	4.4	32.2
	05 P13	Betterave d1	16 mars 05	0.21	0.016	7.7	11.3	28.4
	05 P14	Betterave d2	21 mars 05	0.21	0.017	9.5	3.2	46.8
	04 P19	Lin	16 mars 04	0.17	0.019	11.6	4.2	45.2
	05 P18d1	Lin d1	16 mars 05	0.18	0.018	27.6	18.8	26.4
	05 P18d2	Lin d2	21 mars 05	0.18	0.018	14.4	7.5	43.7
	04 P27d1	Haricot d1	23 avr. 04	0.18	0.019	-	3.8	36.9
	04 P27d2	Haricot d2	04 mai 04	0.18	0.019	-	2.4	42.4
Automne	04 P19	Blé	12 oct. 04	0.17	0.019	29.2	19.2	28.3
	04 P20	Blé	12 oct. 04	0.19	0.018	17.9	13.5	30.8
	04 P23	Blé	12 oct. 04	0.18	0.018	35.1	23.0	26.9
	04 P24	Blé d2	09 nov. 04	0.18	0.021	31.9	19.1	22.0
	05 P13	Blé d2	08 nov. 05	0.21	0.016	51.8	28.4	17.3

150-400 plantes par mètre carré contre 7 à 10) ce qui peut conduire à une augmentation de la fissuration de la surface du sol (Arndt, 1965). D'autre part les périodes de semis sont variées : à l'automne pour le blé et au printemps pour les autres espèces. Pour les cultures de printemps, les semis s'étalent sur l'ensemble de la saison. La betterave et le lin sont habituellement semés en mars. Le haricot est semé plus tardivement (avril, mai). Ces conditions de semis variées augmentent la probabilité d'observer des croûtes à la surface des lits de semences, éventuellement de plusieurs types, structural à sédimentaire, pendant la phase d'émergence.

En fonction des espèces, les lits de semences résultent de différents types de travail du sol au moment du semis : (i) herse rotative et semoir à blé pour le blé et le lin ; (ii) outil combiné trainé (précillitor) et semoir à betterave pour la betterave. Dans le premier cas, la répartition des agrégats en surface est relativement homogène du fait de l'écartement faible entre rangs du semoir (10-15 cm) et des éléments de recouvrement du semoir, à l'exception des passages de roue. En ce qui concerne les semis de betterave, le semoir utilisé tend à repousser hors de la ligne de semis les plus gros agrégats et les rangs sont très écartés (45 cm). Nous avons suivi l'évolution de l'état de la surface du sol spécifiquement sur la zone de la ligne de semis.

Le tableau I.1 présente l'ensemble des parcelles suivies au cours de la thèse. Chaque référence correspond à l'année d'expérimentation (2004 ou 2005) suivie du numéro de la parcelle, P12 à 24 pour les parcelles de l'essai, P27 dans le cas du haricot. Dans la colonne indiquant la culture considérée, d1 ou d2 indique la précocité relative de la date de semis et donc l'appartenance à l'un ou l'autre des systèmes de culture, respectivement système III et II. Les variétés utilisées dans ces expérimentations sont Ariana pour la betterave, Niagara pour le lin, Booster dans le cas du haricot et enfin Ornicar pour le blé.

Dans le cas de la parcelle 04P24 (betterave d1, semée en 2004), une variante a été introduite portant sur la profondeur de semis. On distingue P24N, semée à une profondeur dite normale de 31 ± 6 mm, proche de la profondeur recherchée par l'agriculteur, et P24P semée plus profondément, en moyenne 42 ± 5 mm. L'objectif de la parcelle P24P est double. En premier lieu, le semis en profondeur retarde la levée en allongeant le chemin à parcourir jusqu'à la surface; et donc augmente la probabilité d'observer la formation d'une croûte à la surface du lit de semences avant le début de la levée. D'autre part, les plantules qui arrivent à la surface sont plus âgées et ont donc éventuellement des forces d'émergence plus faibles. De la même manière, le lin a exceptionnellement été semé en deux fois en 2005, à deux dates différentes, pour augmenter la variabilité des situations étudiées (05 P18d1 et P18d2).

En résumé, les dates des semis sont variées entre les cultures, mais aussi pour une même culture ce qui augmente la probabilité de parvenir à observer des levées sous croûte de battance.

Pour chaque parcelle suivie, l'ensemble des mesures a été répété dans deux blocs de dimensions 30 m x environ 5 m (une largeur de semoir). Dans chaque bloc, deux zones sont délimitées : l'une permet de suivre les levées des plantules, l'autre permet de suivre l'évolution du milieu et de réaliser des mesures destructrices.

1.3. Mesures

a. Caractérisation des lits de semences

Nous avons réalisé les différentes mesures présentées dans ce paragraphe lors de nos deux années d'expérimentation. Une partie d'entre elles, qui sera précisée, est aussi effectuée tous les ans sur l'essai longue durée, ce qui nous a permis d'étendre la gamme de lits de semences analysés pour ce qui est de la dynamique de formation des croûtes.

Caractérisation du matériau : analyse physico-chimique

Pour chaque parcelle suivie une analyse de la texture a été effectuée (tableau I.1) en raison des variations possibles de la teneur en argile qui peuvent influencer la formation de la croûte et les fréquences des modes de passages des plantules. Les parcelles suivies ont des textures de sol très similaires : la teneur en argile varie de 0.17 à 0.21 g g⁻¹.

Taille des agrégats

Des échantillons du lit de semences sont prélevés immédiatement après le semis afin d'établir la distribution pondérale des agrégats présents à la surface du sol et dans le lit de semences. Les classes de tailles suivantes sont mesurées : <2, 2-5, 5-10, 10-20, 20-40 et >40 mm. Pour chaque parcelle suivie, 32 échantillons sont prélevés soit 16 échantillons par bloc (2 par ligne de semis sur 8 lignes). La méthode de prélèvement est la suivante. Les échantillons prélevés sont délimités par des peignes enfoncés dans le sol. Leurs dimensions sont de 80 mm de largeur et 200 mm de longueur sur une profondeur d'environ 50 mm correspondant à la profondeur de la zone travaillée par l'élément semeur. La profondeur de semis est identifiée par le changement visuel de la structure entre la couche de sol travaillée par le semoir et la sous-couche. La surface du sol est peinte avec une bombe aérosol afin de pouvoir séparer les agrégats visibles à la surface des autres agrégats du lit de semences.

L'échantillon est prélevé en deux fois, d'abord la surface puis le reste du lit de semences. Les échantillons sont alors séchés à l'air libre durant un mois ; et ensuite délicatement tamisés avec une machine (30 s, 150 secousses/min, 3 mm d'amplitude). Dans le cas du suivi courant de l'essai longue durée, les échantillons sont prélevés en une fois sans distinction de la surface.

Les surfaces des lits de semences suivies présentaient des structures variées en relation avec les opérations de travail du sol et de semis, et la teneur en eau au moment de ces opérations. La proportion d'agrégats de plus de 20 mm présents à la surface du sol (agrégats peints) variait de 7 à 52 g.100g⁻¹ (tableau I.1). Les plus gros agrégats tendent à rester à la surface du sol sous l'action du semoir (Aubertot et al., 1999). Aussi si on considère l'ensemble du lit de semences (agrégats peints et agrégats non peints), la proportion d'agrégats supérieurs à 20 mm varie avec moins d'amplitude de 2 à 28 g. 100g⁻¹. Ces proportions correspondent à des lits de semences fins à intermédiaires si l'on considère les variations observées sur un plus grand nombre de situations culturales (Carrera et Dürr, 2003 ; Dorsainvil et al., 2005).

Sensibilité à la battance : tests de stabilité des agrégats et teneurs en eau

La sensibilité des agrégats à la dégradation dépend des propriétés intrinsèques du sol et de sa teneur en eau (Le Bissonnais, 1988; Truman et al., 1990). Elle peut être évaluée par des tests de stabilité des agrégats. Nous avons choisi d'utiliser la méthode Le Bissonnais (1996), qui a été adaptée des tests de Hénin et al. (1958). Ces tests n'ont été faits qu'en 2004 et 2005.

Nous avons choisi d'appliquer ces tests sur des agrégats conservés à leur humidité au moment du semis pour évaluer l'effet des deux principaux facteurs qui influencent la stabilité des agrégats : texture et teneur en eau. Les tests ont aussi été pratiqués sur des agrégats préalablement séchés (40 °C, 24h), comme préconisé dans la méthode.

Les agrégats entre 3 et 5 mm ont été directement tamisés au champ immédiatement après le semis (un prélèvement par bloc). Ils sont ensuite conservés à 5°C dans des boîtes hermétiques. Trois sous-échantillons de 5-10 grammes d'agrégats sont soumis à trois traitements : humectation rapide, humectation lente ou agitation mécanique après une étape de saturation à l'éthanol, dans l'objectif de distinguer les différents mécanismes de désagrégation des agrégats : éclatement, micro-fissuration, et diminution de la cohésion. Les fragments issus de ces tests sont ensuite tamisés afin d'établir la distribution pondérale des différentes taille de fragments. Les résultats sont exprimés par la moyenne pondérée du diamètre des agrégats à l'issue des traitements (MWD pour Mean Weight Diameter) et classés selon les classes proposées par Le Bissonnais (1996).

Parallèlement la teneur en eau de la surface du sol (horizon 0-1 cm) au moment de semis a été mesurée (3 répétitions à proximité de la zone de prélèvement des échantillons pour les mesures de stabilité). Elle est calculée à partir de la différence entre le poids humide et le poids sec des échantillons après un passage à l'étuve à 105 °C pendant 24 heures.

Figure I.1

Relation entre la pluie et l'énergie cinétique cumulée depuis le semis ; $r^2 = 0.86$ (Mons-en-Chaussée, Nord de la France ; 2004-2005).

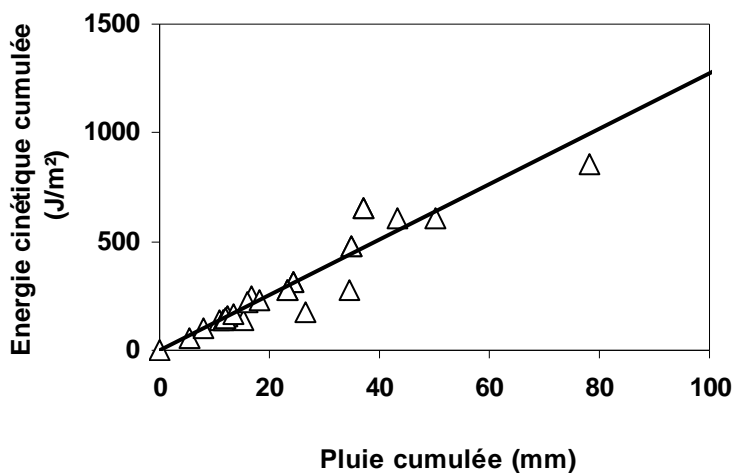


Tableau I.2

Etapas de développement de la croûte et notations associées (d'après Ludwig et al., 1995).

Reference	States of crust development
F0	Initial state after sowing operations
F0+	Initial erosion state with dew
F1-	Hardly identifiable structural crust
F1	Standard structural crust
F1+	Structural crust with clearer micro spots
F1/2-	Beginning of sedimentary crust (surface <10%)
F1/2	Sedimentary crust in micro depressions (surface <30%)
F1/2+	No coalescent sedimentary crust (surface <50%)
F2-	Coalescent sedimentary crust (surface from 50 to 75%)
F2	Coalescent sedimentary crust (surface from 75 to 90%)
F2+	Coalescent sedimentary crust (surface >90%)

b. Description des modes de franchissement

Nous avons suivi la levée de 1000 semences par parcelle (500 par bloc) jusqu'à la fin de la phase d'émergence. Afin de décrire précisément les cinétiques de levées et les modes de franchissement, les observations ont été réalisées plantule par plantule chaque demi-journée. Les modes de passage observés sont de trois types : pénétration, rupture, et passage par les fissures. Ils seront décrits plus précisément dans le chapitre II. Ces observations sont associées à des notations locales de l'état de la surface du sol : état de dégradation, humidité. A la fin de la levée, les causes de non levées ont été caractérisées. Le protocole de suivi des levées sera décrit plus précisément dans le chapitre suivant (II).

c. Suivi de l'évolution de l'état de la surface

L'évolution de la surface du sol, formation de la croûte et développement du réseau de fissures, est suivie à partir du semis et jusqu'à la fin de l'émergence des plantules. Elle est reliée à la pluviométrie enregistrée en parallèle. Les observations sont répétées à intervalles réguliers, tous les 5 mm de pluie environ. Ces suivis sont réalisés systématiquement sur l'essai pour ce qui concerne la dégradation de la surface. Nous avons accentué ce suivi les deux années d'expérimentation de la thèse, en réalisant des mesures complémentaires de caractérisation de la croûte, et par ailleurs nous avons suivi plus spécialement la fissuration lors du dessèchement de la surface.

Pluviométrie

La pluviométrie moyenne annuelle (1993-2005) sur le site est de 698 mm. L'intensité de la pluie est généralement inférieure à 10 mm h⁻¹ pour 80% des pluies (d'après Cerdan et al., 2002). La pluviométrie est mesurée par un pluviomètre enregistreur précis au dixième de millimètre et daté à la minute. Nous avons choisi d'utiliser la pluie cumulée depuis le semis comme indicateur de l'évolution de la surface du sol. Nous avons aussi déterminé l'énergie cinétique cumulée et comparé ces deux facteurs. L'énergie cinétique cumulée KE (J m²) a été évaluée par une relation empirique qui la relie à l'intensité de la pluviométrie (Wischmeier and Smith 1958; Dubrulle and Boiffin, 1989):

$KE = h (11.9 + 8.7 \log_{10} I)$, où h est la hauteur d'eau (mm), et I l'intensité de la pluviométrie (mm h⁻¹). L'énergie cinétique était en moyenne de 12.8 J m² par millimètre de pluie; et nous avons pu établir une bonne relation entre l'énergie cinétique cumulée et la quantité de pluie cumulée depuis le semis (figure I.1). Cette relation légitime notre choix d'utiliser les pluies cumulées comme indicateur de l'état de la surface, qui sont des données facilement accessibles par les utilisateurs du modèle, et qui ne nécessitent pas de matériel spécifique.

Suivi de la dynamique de formation de la croûte, caractérisation des faciès : résistance et épaisseur.

Les étapes de formation de la croûte sont visuellement évaluées à partir d'une grille de notation. Cette grille est basée sur l'extension des croûtes structurales et sédimentaires à la surface du sol (Boiffin, 1984; Ludwig et al., 1995; tableau I.2). Les placettes observées ont une taille de 30 x 48 cm². Les notations sont effectuées à partir de photographies de la surface du sol et contrôlées *in situ*. Nous avons vérifié que les notations d'un échantillon de photographies concordait entre trois observateurs.

Selon le type de semoir utilisé, le nombre de placettes et leur orientation varie. Dans le cas de la betterave, 8 placettes sont suivies par bloc, centrées sur les 8 rangs pour lesquels les distributions de la granulométrie des agrégats ont été établies. Les lignes de semis sont très écartées (45cm) et la distribution des agrégats à la surface n'est pas homogène. Aussi les placettes sont centrées sur la ligne de semis et orientées dans le sens de la longueur. Seule la zone centrale de la placette, correspondant à la ligne de semis est caractérisée. Dans le cas du lin et du blé, la distance entre les lignes de semis est faible (12.5cm) et la structure de la surface relativement homogène. Quatre placettes par bloc sont placées dans le sens de la largeur par rapport à la ligne de semis ; chaque placette incluant 2 ou 3 rangs de semis. L'ensemble de la surface est caractérisé. Cette caractérisation se fait soit sur le terrain directement (2004-2005), soit sur photo prise avec un appareil photo numérique en ombrant la zone photographiée.

Nous avons déterminé l'épaisseur de la croûte et sa résistance mécanique pour des états spécifiques de la surface du sol. La résistance mécanique est mesurée par un pénétromètre. Il est constitué d'une aiguille reliée à un capteur de force (précision 0.01 N pour une gamme de 0-10 N). L'aiguille a un embout plat et circulaire d'un diamètre de 1.96 mm. Un moteur est utilisé pour faire avancer l'aiguille à une vitesse régulière de 10.2 mm mn⁻¹ sur une distance de 20 mm. Un ordinateur est relié au pénétromètre qui permet un enregistrement tous les quarts de seconde de la force mesurée. Dix mesures sont réalisées par type de situation. La teneur en eau de la croûte est mesurée en parallèle. La pression nécessaire à l'aiguille pour traverser la croûte est calculée en divisant la force maximale enregistrée, par la surface de l'extrémité de l'aiguille. L'épaisseur de la croûte est estimée d'après la vitesse de l'aiguille et le temps nécessaire pour que la résistance mesurée atteigne un plateau, ce qui indique que l'extrémité de l'aiguille a franchi la croûte. La valeur du plateau correspond à la résistance du sol sous la croûte et aux forces de frottement le long de l'aiguille.

Suivi du développement des fissures à la surface des lits de semences

Le développement du réseau de fissures à la surface du sol est suivi dès son apparition et jusqu'à la fin de l'émergence. Les placettes observées sont les mêmes que celles mises en place pour permettre la description de la dynamique de formation des croûtes qui est suivie en parallèle. La teneur en eau de la surface du sol est mesurée à chaque observation.

Des photographies de la surface du sol sont prises à intervalle régulier avec un appareil numérique. Les photos sont ensuite analysées avec un outil développé spécifiquement pour le logiciel Image J, basé sur des analyses morphométriques des images. Il permet de caractériser le pourcentage et la longueur totale de fissuration, la taille des plaques formées par les fissures et la longueur des segments les délimitant.

Dans le cas des parcelles semées en 2005, nous avons également analysé la fissuration de surfaces non semées (passage du semoir à vide) sur des périodes plus longues pour (i) analyser la fissuration pour des stades de développement de la croûte avancés (sédimentaires) ; (ii) comparer les zones semées et non semées dans de même conditions (même lit de semences, même séquences climatiques) afin d'évaluer l'effet potentiel des plantules sur la fissuration au moment de l'émergence (par poussée sur la croûte). Excepté pour ce dernier point, les résultats des parcelles 2005 présentés correspondent aux zones non semées pour s'affranchir de ce possible effet des plantes et analyser uniquement l'effet de la structure du sol et des conditions climatiques sur la fissuration.

2. EXPERIMENTATIONS AU LABORATOIRE

2.1. Essais complémentaires sous simulateur de pluie

Les conditions climatiques rencontrées au cours de notre étude ne nous ont pas permis d'observer des levées face à des croûtes de type sédimentaire. Aussi avons-nous mis en place un essai complémentaire au laboratoire pour observer la levée de plantules de betterave face à ce type de croûte. Un échantillon de sol ($0.50 \times 0.50 \times 0.15 \text{ m}^3$) a été prélevé au champ, immédiatement après un semis, en conservant intacte la structure du lit de semences. Cette surface est suffisamment importante pour permettre le développement d'un réseau de fissures à la surface du bac. Des semences sont ensuite mises en place dans le lit de semences à une profondeur moyenne de $28.5 \pm 3.3 \text{ mm}$ (mesurée à la fin de l'essai). Elles sont disposées tous les 5 cm, distance qui assure qu'il n'y ait pas d'influence entre plantules au moment de la levée. Le bac est ensuite soumis à une pluie d'une intensité de 30 mm/h jusqu'à la formation d'une croûte sédimentaire, ce qui a nécessité 25 mm de pluie. La forte intensité permet de limiter les quantités de pluie apportées et ainsi d'éviter un problème d'anoxie au niveau des plantules. La croûte est ensuite rapidement séchée avant l'arrivée des plantules à la surface du sol.

Nous avons suivi la levée de 60 semences de la variété Véga (gamme de masses de 7 à 8.999 mg). Les taux de levée et les modes de passages sont notés. En fin de levée, les causes de non levées sont déterminées. Nous avons pour cela utilisé des graines nues colorées afin de pouvoir mieux les repérer. La croûte est caractérisée au moment de la levée : photographie et notation visuelle du faciès, mesures de la résistance mécanique, de l'épaisseur et mesures de la teneur en eau. Le faciès était de type F1/2+; soit entre 30 et 50 % de la surface couverte par une croûte sédimentaire. L'épaisseur de la croûte était en moyenne de $7 \pm 2 \text{ mm}$. Cependant en dessous de cette zone très dégradée on pouvait distinguer une zone très compacte d'environ 12 mm d'épaisseur. La résistance mesurée au pénétromètre était en moyenne de $1.8 \pm 0.5 \text{ MPa}$; pour une teneur en eau de 0.04 g g^{-1} .

Les conditions au champ permettent uniquement de réaliser des mesures dans le sens descendant ; c'est-à-dire de la surface du sol vers le lit de semences, soit le sens inverse de la poussée des plantules. Au cours des expérimentations menées en laboratoire sous simulateur de pluie, des mesures de la résistance des croûtes formées ont été effectuées dans les deux directions afin d'établir une relation entre les deux types de mesures.

Plusieurs bacs avec des lits de semences prélevés au champ ont été soumis à une pluie simulée d'intensité 30 mm. h^{-1} . Plusieurs stades de développement de la croûte ont été obtenus : structural à sédimentaire après respectivement 6.5 et 40 mm de pluie cumulée. La résistance du sol a été mesurée pour plusieurs teneurs en eau (0.2 à 0.33 g g^{-1}). Le même pénétromètre a été utilisé pour les mesures ascendantes et descendantes. Les mesures ascendantes et descendantes sont corrélées en sélectionnant des localisations visuellement similaires du point de vue de l'état de dégradation.

Dans le cas des mesures ascendantes, des trous ont été effectués dans le fond du bac pour permettre le passage de l'aiguille. La force maximale mesurée correspond à la résistance de la croûte mais elle inclut également l'effet des frottements le long de l'aiguille. Aussi avons-nous creusé des pré-trous sur une partie de l'épaisseur de l'échantillon de sol pour faciliter le passage de l'aiguille et minimiser ces frottements. La force due à la friction correspond au plateau atteint après l'émergence de l'aiguille. La résistance de la croûte correspond donc à la différence entre la force maximale mesurée et la valeur de la force enregistrée au niveau du plateau.

2.2. Mesures des forces d'émergence

Les forces d'émergence des plantules ont été mesurées pour les espèces suivies au champ, betterave, lin et blé, à l'aide de capteurs de force. Les plantules mises en culture sont placées sous ces capteurs et les forces sont mesurées et enregistrées toutes les heures, ce qui permet de suivre en continu l'évolution de la force que peuvent exercer les plantules. Le détail du dispositif sera présenté dans le chapitre suivant qui présente les résultats de ces mesures.

CHAPITRE II

Caractérisation des modes de franchissement, mesures des forces d'émergence pour différentes espèces

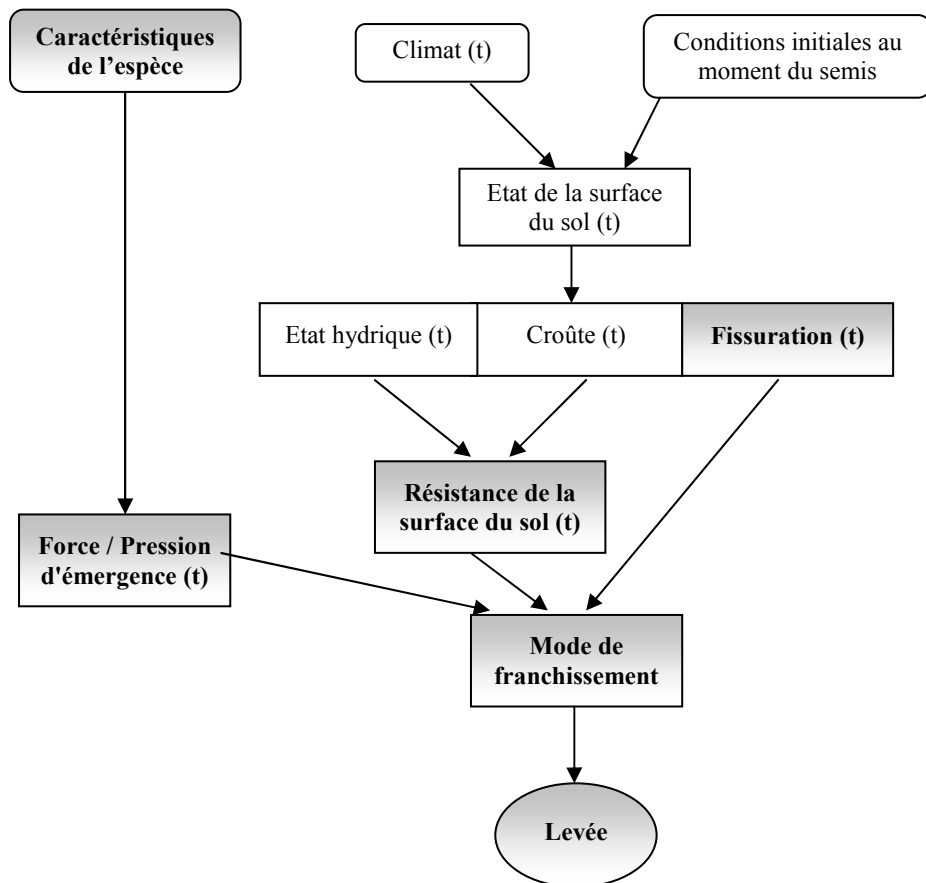


Figure II.1
Modes de franchissement selon Arndt (1965a).

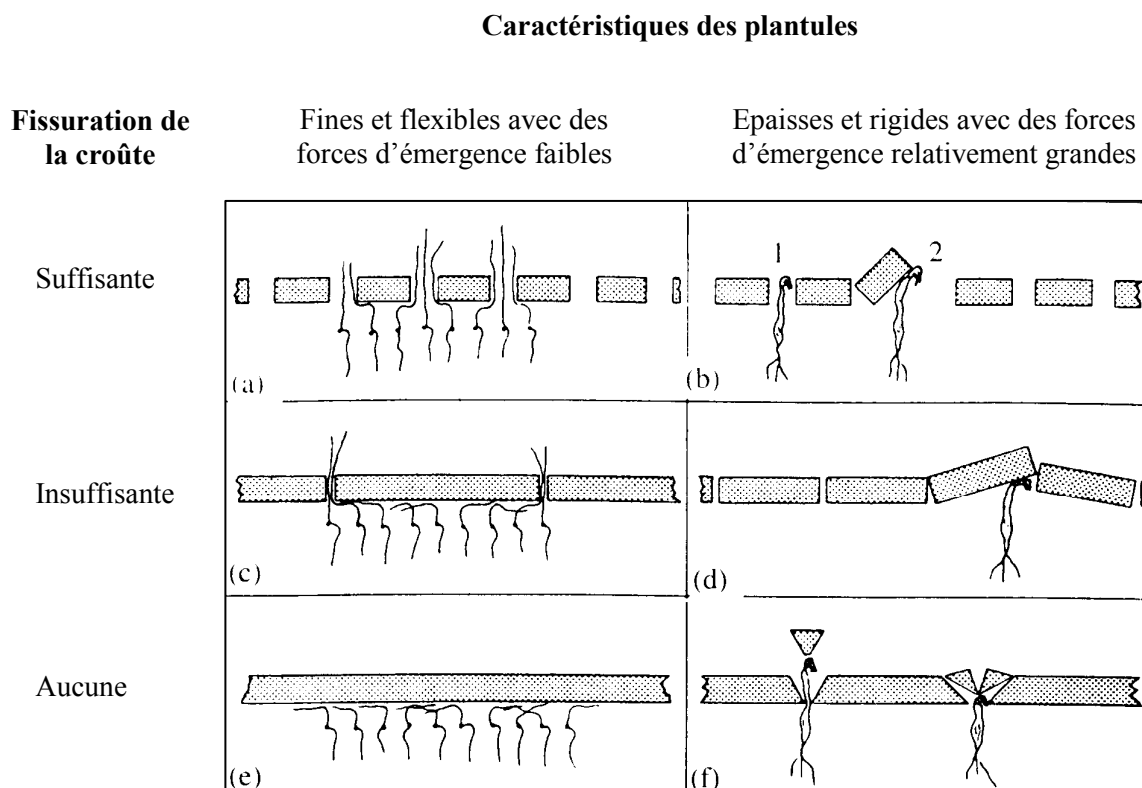


Tableau II.1
Répartition des modes de franchissement observés au laboratoire pour des plantules de betterave dans le cas d'une croûte structurale à différentes humidités (25-27% ou 5-6%).

Croûte structurale	Humidité (g.g ⁻¹)	Pénétration (%)	Rupture (%)	Rupture à l'aide d'une fissure (%)	Soulèvement d'une plaque (%)	Fissure (%)
Croûte humide	0.27	93	7	0	0	0
Croûte humide	0.25	79	21	0	0	0
Croûte sèche	0.04-0.06	0	17	40	6	37

Aubertot (1998)

1. INTRODUCTION

Les modes de franchissement utilisés par les plantules pour franchir la surface du sol dépendent de l'état de la surface du sol et des caractéristiques des plantules. En l'absence de croûte, les plantules franchissent la surface du sol en utilisant les espaces vides entre les agrégats et en déplaçant les particules solides qui gênent leur passage. Si une plantule est bloquée par une zone de forte résistance telle qu'une croûte ou un agrégat de dimension élevée, elle tente de le contourner en dirigeant son apex vers les zones latérales de moindre résistance (Arndt, 1965a). Si l'obstacle à contourner a des dimensions, et/ou une résistance, trop importantes comme dans le cas d'une croûte, la plantule reste bloquée.

Quand une croûte se forme à la surface du sol, les modes de passage dépendent de la teneur en eau de la croûte et des caractéristiques des plantules. Dans le cas d'une croûte humide, des études au champ et en laboratoire ont montré que la majorité des franchissements ont lieu par pénétration (Souty et al., 1992 ; Aubertot, 1998). Il s'agit d'une déformation du matériau sous la poussée de la plantule sans phénomène de rupture. Lorsque la croûte se dessèche, les modes de franchissement dépendent de la résistance du sol et des propriétés des plantules. Arndt (1965a) distingue deux types de plantules à partir d'observations au champ (figure II.1) :

- (i) des plantules avec des tiges flexibles de faible diamètre, qui exercent sur la croûte de faibles forces d'émergence. Elles doivent atteindre une fissure pour parvenir à émerger. La flexibilité des tiges permet aux plantules bloquées de modifier leur direction vers les zones latérales de moindre résistance et ainsi éventuellement parvenir jusqu'à une fissure. Le taux de levée dépend de l'intensité de la fissuration et de la localisation horizontale des plantules par rapport aux fissures. Cependant, Arndt a observé que dans certains cas, des plantules de faible force semées à de fortes densités peuvent conjuguer leurs efforts pour provoquer l'apparition de fissures à la surface du sol et soulever les plaques ainsi formées.
- (ii) des plantules avec des tiges d'un diamètre supérieur et donc moins de flexibilité mais une force d'émergence plus élevée. Si la surface du sol est fissurée, les plantules peuvent soulever les plaques formées par les fissures. Le soulèvement dépend du poids de la plaque, de la force exercée par la plantule et de la géométrie du système, notamment de la distance entre le point d'application de la force et l'axe de rotation de la plaque (Arndt, 1965a ; Souty et Rode, 1993; Aubertot et al., 2002). En l'absence de fissuration, si la force exercée par la plantule est suffisante, elle parvient à émerger en rompant par cisaillement un morceau de la croûte de la forme d'un cône inversé en un ou plusieurs morceaux.

En dehors de modes de franchissement utilisant le réseau de fissures (passage direct ou soulèvement d'une plaque), deux mécanismes permettent donc aux plantules de traverser la croûte : pénétration ou rupture. La méthode utilisée dépend de la plasticité de la croûte liée à sa composition et à sa teneur en eau, mais semble aussi dépendre du type de plantules. Une extrémité de la tige en forme de cône inversé comme pour le maïs ou le blé favorise les passages par pénétration. Alors que dans le cas des plantules avec une extrémité en forme de crosse, comme la betterave et la majorité des dicotylédones, le franchissement par pénétration est plus difficile (Souty et Rode, 1993).

Dans le cas de la betterave sucrière, espèce exerçant une force d'émergence relativement faible (0.05-0.10 N), les proportions des différents modes de passage ont été établies en laboratoire pour des croûtes de type structural à différentes humidités (Aubertot et al., 2002 ; tableau II.1). Dans le cas d'une croûte humide avec une humidité de 0.27 g g^{-1} , correspondant pour le sol utilisé à une teneur en eau supérieure à la limite de plasticité du matériau (0.25 g g^{-1}), 93 % des plantules franchissent la surface par pénétration. Cette proportion diminue rapidement avec la diminution de la teneur en eau de la croûte au profit d'une augmentation des passages par rupture. A 0.25 g g^{-1} d'humidité, soit une perte en eau de 0.2 g g^{-1} , 79 % de passages par pénétration sont encore observés, mais aussi 21 % par rupture. Lorsque la croûte est sèche (4-6 %), aucun passage par pénétration n'est observé. Par contre le réseau de fissures formé a permis le franchissement de 83 % des plantules levées soit directement

Figure II.2

Photographies des différents modes de passage observés au champ : (a) pénétration, (b) rupture, (c) passage par les fissures.

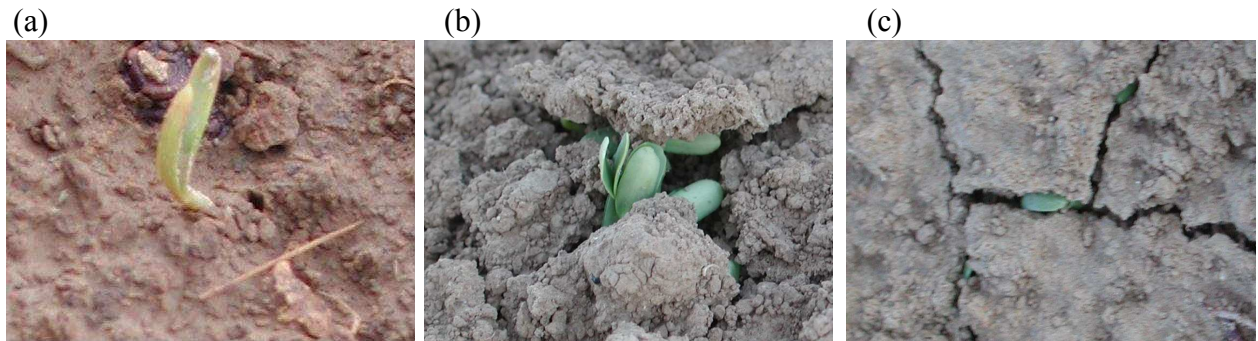
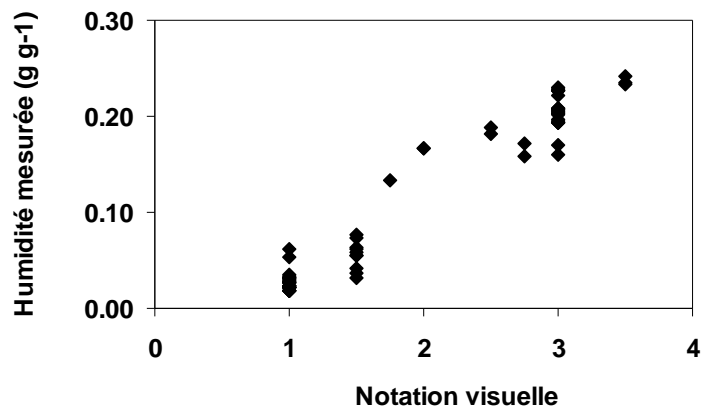


Figure II.3

Relation entre l'humidité massique mesurée et les notations visuelles de couleur.



(passage par une fissure ou soulèvement d'une plaque) dans un cas sur deux, soit par rupture et soulèvement de morceaux de croûte partiellement préformés par les fissures.

Ces expérimentations mettent en évidence un effet très important de la fissuration dans la levée. Cependant il est apparu nécessaire de quantifier cet effet au champ, pour différents lits de semences, en fonction de l'intensité de la fissuration, en lien avec les conditions hydriques mais aussi avec le type de sol et la structure et la géométrie de la surface d'un lit de semences. Les passages par rupture et/ou soulèvement semblent surestimés par rapport à des observations réalisées au champ, mais ces observations sont peu nombreuses et peu renseignées. Par ailleurs, l'ajout d'une couche de terre fine en surface a conduit à la formation d'une croûte non adhérente au reste du lit de semences contrairement à ce qui est généralement observé au champ. Il était donc nécessaire de décrire les modes de passage réels au champ en fonction des caractéristiques de la croûte (résistance, humidité) mais aussi du type de plantules et de la force qu'elles peuvent exercer sur la surface du sol; pour ensuite développer les éléments de modélisation et de prévision les plus appropriés.

Une première étape du travail a donc été d'établir les modes de franchissement des croûtes dans les conditions naturelles du champ pour différentes cultures et différentes conditions de semis. Nous avons suivi les levées de betterave, lin, blé et haricot.

Nous avons aussi mesuré les forces exercées par les plantules de ces espèces afin de disposer de ces mesures et de vérifier la validité des résultats obtenus dans les études précédentes. En effet, étant donné les difficultés rencontrées avec le matériel employé et les conclusions du travail d'Aubertot (1998, 2002), il paraissait nécessaire de reprendre ces mesures avec un dispositif amélioré.

2. DESCRIPTION DES MODES DE FRANCHISSEMENT POUR DIFFERENTES ESPECES ET TYPES DE CROÛTE.

2.1. Méthodes de caractérisation au champ

Nous avons suivi la levée de 1000 semences par parcelle (500 par bloc) jusqu'à la fin de la phase d'émergence. Afin de décrire précisément les cinétiques de levées et les modes de franchissement, les observations sont réalisées plantule par plantule chaque demi-journée. Les modes de passage observés sont de trois types : pénétration, rupture, et passage par les fissures (figure II.2)

Les températures du lit de semences sont enregistrées et permettent d'établir la cinétique de levée en fonction du temps thermique. L'état de la surface est caractérisé : faciès, résistance et longueur de fissures. En raison de la variabilité de l'état de la surface du sol, le faciès de dégradation et l'humidité doivent aussi être appréciés plus localement, au niveau de chaque plantule observée. Ces observations doivent être non destructrices pour ne pas perturber les levées. Le faciès de la croûte est estimé visuellement à l'aide de la grille présentée dans le tableau I.2. L'humidité est également estimée visuellement en notant les variations de la couleur de la surface du sol. Nous avons pu établir une bonne corrélation entre ces notations visuelles et la teneur en eau mesurée (figure II.3).

A la fin de la levée, les positions des plantules non levées sont repérées et les causes de non levées analysées. Cette étape est nécessaire pour établir quel est l'impact réel de la croûte sur le taux de levée et ainsi éliminer d'autres causes de mortalité telles qu'une maladie ou encore un problème de semoir aboutissant à l'absence de semences. Pour chaque parcelle, nous avons observé 80 plantules non levées au minimum, lorsque le taux de mortalité était suffisant pour atteindre ce nombre d'observations. Les causes de non levées sont multiples : semences non germées, plantules anormales, plantules bloquées sous mottes et enfin plantules bloquées sous croûte.

Tableau II.2

Caractéristiques des différentes parcelles suivies : type de croûte, état d'humidité (S = 0.03 - 0.06 g.g⁻¹ ; H = > 0.20 g.g⁻¹) principalement observés au moment de la levée, et caractéristiques de la levée. Les nombres entre parenthèses correspondent aux écarts-types et les lettres représentent les résultats de l'analyse de variance (P = 5%).

	Référence	Culture	Type croûte			Taux de levée (%)		Taux mortalité sous croûte (%)
			Faciès	Résistance (MPa)	Etat d'humidité			
Printemps	05 P13	Betterave d1	F1	0.12	H	89 (4)	ab	0
	05 P14	Betterave d2	F1	0.12	H	85 (5)	c	3
	04 P23	Betterave d2	F1-	-	S	92 (6)	ab	-
	04 P24N	Betterave d1	F1	0.31	S	60 (16)	ef	23
	04 P24P	Betterave d1	F1	0.31	S	60 (12)	ef	20
	05 P18d2	Lin d2	F1	0.56 (S)	S et H	95 (2)	a	1
	04 P19	Lin	F1	0.27	S	77 (7)	d	15
	04 P27d1	Haricot d1	F1- et F1	-	S et H	71 (7)	de	18
	04 P27d2	Haricot d2	F1	0.85	S	54 (7)	f	38
	Automne	04 P24	Blé d2	F1-	-	H	87 (4)	bc
04		Blé	F1/2+	-	H	98 (8)	a	-
Simulateur	05	Betterave	F1/2+	1.80	S	27 (7)	g	45

2.2. Variabilité des modes de franchissement au champ

Dans un premier temps, nous présenterons les caractéristiques globales des croûtes formées dans les différentes parcelles, les taux de levée finaux et les taux de mortalité sous croûte. Cela permet d'évaluer l'impact global de la formation des croûtes sur les levées des espèces observées. Puis nous décrirons les variations des modes de franchissements pour les différentes situations obtenues.

a. Analyse globale des conditions de levée

Le tableau II.2 présente les caractéristiques générales des parcelles suivies : caractéristiques des croûtes rencontrées par les plantules au moment de l'émergence (faciès, résistance mécanique, humidité), taux de levée final et taux de mortalité sous croûte (pourcentages établis par rapport aux 1000 semences suivies).

Au cours des deux années d'expérimentation, l'émergence des différentes cultures a eu lieu principalement face à des croûtes du même type structural. Cependant ces croûtes présentaient des résistances variées, de 0.12 MPa à 0.85 MPa, en lien avec des variations de l'intensité de la dégradation et de la teneur en eau. Un même faciès structural F1 a une résistance de la croûte doublée en passant de l'état humide à l'état sec, mais aussi augmente de 0.27 à 0.85 MPa avec l'intensité de la dégradation.

Face à ces croûtes de résistances variées, les taux de levée sont très différents pour une même espèce (écarts significatifs, $P = 5\%$). Ils sont élevés lorsque la résistance de la croûte est relativement faible; c'est à dire face à des croûtes peu dégradées (F1-, 04P23), ou en conditions humides pour des faciès plus avancés de type structural F1.

Par contre, les taux de levée diminuent fortement lorsque les plantules doivent franchir ce même type de croûte F1 mais sèche. On peut par exemple comparer les parcelles 05P13 et 04P24 dans le cas de la betterave. Dans le premier cas, la croûte de type structurale F1 est demeurée humide pendant l'ensemble de la phase de levée. La croûte rencontrée par les plantules a conservé sa plasticité et la résistance à la pénétration est relativement faible (0.12 MPa), un fort taux de levée est alors observé : 89 %. L'analyse des causes de non levée montre qu'effectivement aucune plantule n'est restée bloquée sous la croûte, ce qui confirme qu'une croûte structurale humide ne constitue pas un obstacle à l'émergence des plantules, même dans le cas d'espèces avec de faibles forces d'émergence comme la betterave.

Face à une croûte similaire mais avec une faible humidité, le taux de levée est considérablement diminué (60 % ; écart significatif, $P = 5\%$) en relation avec une augmentation de la résistance mécanique (0.31 MPa). Le taux de mortalité sous croûte observé est de 23 % des semences. Les mêmes observations peuvent être faites dans le cas du lin (05P18d2 en comparaison de 04P19).

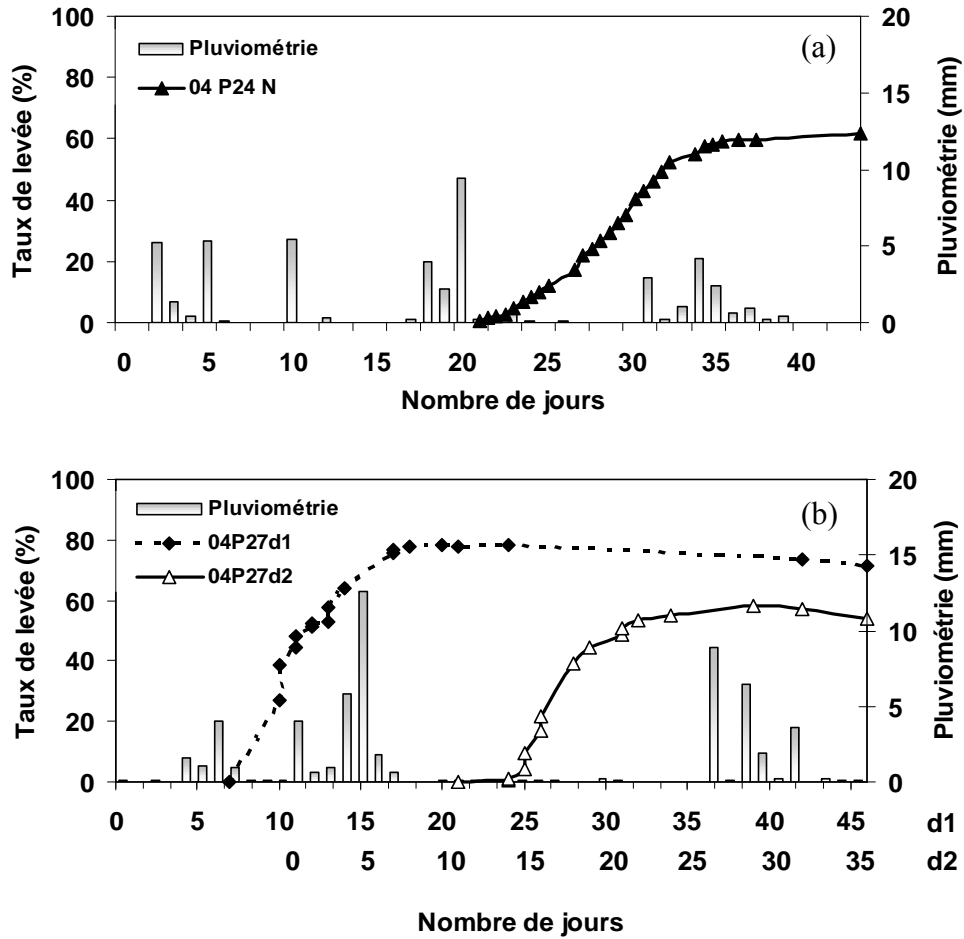
Nous n'avons pas observé d'effet de la profondeur de semis sur le taux d'émergence des plantules de betterave. Les parcelles 04P24N et 04P24P ont abouti à des taux de levée et des taux de mortalité sous croûte identiques face à une croûte similaire, pour des profondeurs respectivement de 31 ± 6 mm et 42 ± 5 mm.

Face à des croûtes de mêmes caractéristiques et de résistances comparables, les taux de levée varient selon les espèces. Nous avons observé un taux de levée de 60 % dans le cas de la betterave et de 77 % pour le lin face à une croûte structurale similaire de résistance d'environ 0.3 MPa (écart significatif, $P = 5\%$) ; soit un taux de mortalité sous croûte respectivement de 23 % et 15 %.

Enfin, on peut noter que dans des conditions humides, le taux de levée du blé, espèce avec une force d'émergence supérieure, est élevé même face à des croûtes très dégradées de type sédimentaire (F1/2+, 30 à 50% de croûte sédimentaire à la surface du lit de semences). Il semble que la croûte de battance ne soit qu'exceptionnellement un obstacle dans le cas du blé, pour lequel les conditions automnales ne permettent pas à la surface de se dessécher. Seules des quantités considérables de pluie pourraient aboutir à une accumulation suffisante d'épaisseur de croûte susceptible de bloquer la levée des plantules.

Figure II.4

Deux exemples de cinétiques de levée (a) cas de la betterave d1 en 2004 (04P24) ; (b) cas du haricot en 2004 (04P27) ; et pluviométries.



L'analyse des cinétiques de levée confirme ces observations. La figure II.4 présente les cinétiques de trois des parcelles suivies dont les situations sont caractéristiques. Le premier cas présenté est la cinétique de levée d'une parcelle de betterave (04P24N, figure II.4a). Entre le semis et le début de la levée, la pluviométrie est relativement importante : 35 mm de pluie cumulée, avec un maximum journalier de 9 mm. Ce cumul de pluie est suffisant pour aboutir à la formation d'une croûte de type structural F1 à la surface du lit de semences. Pendant les 10 premiers jours de la levée, la pluviométrie est nulle, ce qui permet à la croûte de sécher et ainsi de constituer un obstacle à l'émergence des plantules. Le taux de levée final est assez faible (60 %) et de nombreuses plantules sont restées bloquées sous la croûte: le taux de mortalité sous croûte représente 23 % des semences initiales. On note qu'en fin de levée une nouvelle séquence pluvieuse ne permet pas de relancer la levée, en dépit d'une surface ré-humectée. Or, une croûte structurale humide ne constitue normalement pas un obstacle à la levée des plantules. Il semblerait donc que les plantules bloquées tendent à voir leur capacité à émerger diminuer au cours du temps, ce qui n'est pas prévu dans SIMPLE.

Le deuxième graphique présenté montre encore une fois l'importance de l'effet de l'humidité de la croûte sur la levée (figure II.4b). Il présente les cinétiques de levée du haricot pour deux semis à deux dates différentes, semés dans la même parcelle. La première date semée a subi 35 mm de pluie entre le semis et la fin de la levée (0-17^{ème} jour), contre 26 mm pour la seconde date (0-28^{ème} jour). Cependant le taux de levée est supérieur pour la première date semée, 71 % contre seulement 54 % dans le cas de la deuxième date. Dans les deux cas, la pluviométrie a été suffisante pour aboutir à la formation d'une croûte structurale de caractéristiques physiques relativement proches : 8 mm d'épaisseur en moyenne pour la parcelle d1, 7 mm pour la parcelle d2. Mais dans le cas de la parcelle d1, la pluviométrie est étalée sur l'ensemble de la période de levée. La croûte est donc restée majoritairement humide ; ce qui a permis le franchissement de la majeure partie des plantules. Par contre pour la parcelle d2, une longue période sans pluie a permis à la croûte structurale formée de sécher; ce qui explique le faible taux de levée obtenu. Comme dans le cas de la betterave, le retour à une période pluvieuse en fin de levée, conduisant à une ré-humectation de la croûte, n'a pas permis une reprise de l'émergence.

En résumé, l'ensemble des parcelles suivies, en particulier en 2004, a permis d'observer des levées face à des croûtes essentiellement de type structural mais d'humidités et de résistances variées. Les conditions climatiques obtenues au cours des deux années d'expérimentation ne nous ont pas permis d'observer des croûtes sédimentaires en coïncidence avec la phase de levée. Pour compléter les observations des types de franchissement, un essai complémentaire a été conduit au laboratoire. Il s'agissait de reconstituer la levée de plantules de betterave sous une croûte sédimentaire dans des conditions proches des conditions naturelles : semis dans un bac contenant un sol prélevé au champ et simulation de pluie. Un taux de levée très faible a été obtenu, inférieur à 30% (tableau II.2).

Ces observations de taux de mortalité face à différents types de croûte sont cohérentes avec les ordres de grandeurs donnés pour la betterave dans Richard et Boiffin (1990).

b. Modes de franchissement des croûtes

Le tableau II.3 montre les proportions des différents types de franchissement observés au champ. Ces proportions ont été obtenues grâce aux observations faites par demi-journée. Ces proportions ont été mises en relation avec les notations visuelles de l'humidité effectuées localement pour chaque plantule observée. On a distingué deux types de situations : croûte sèche ($< 0.06 \text{ g g}^{-1}$) ou croûte humide ($> 0.20 \text{ g g}^{-1}$).

En conditions humides et face à des croûtes structurales, les passages ont lieu principalement par pénétration pour les trois espèces (tableau II.3). Face à des croûtes sédimentaires humides, observées uniquement dans le cas du blé, les passages se font aussi par pénétration.

Dans le cas des croûtes sèches, les modes de passage varient selon le niveau de dégradation et l'espèce considérée.

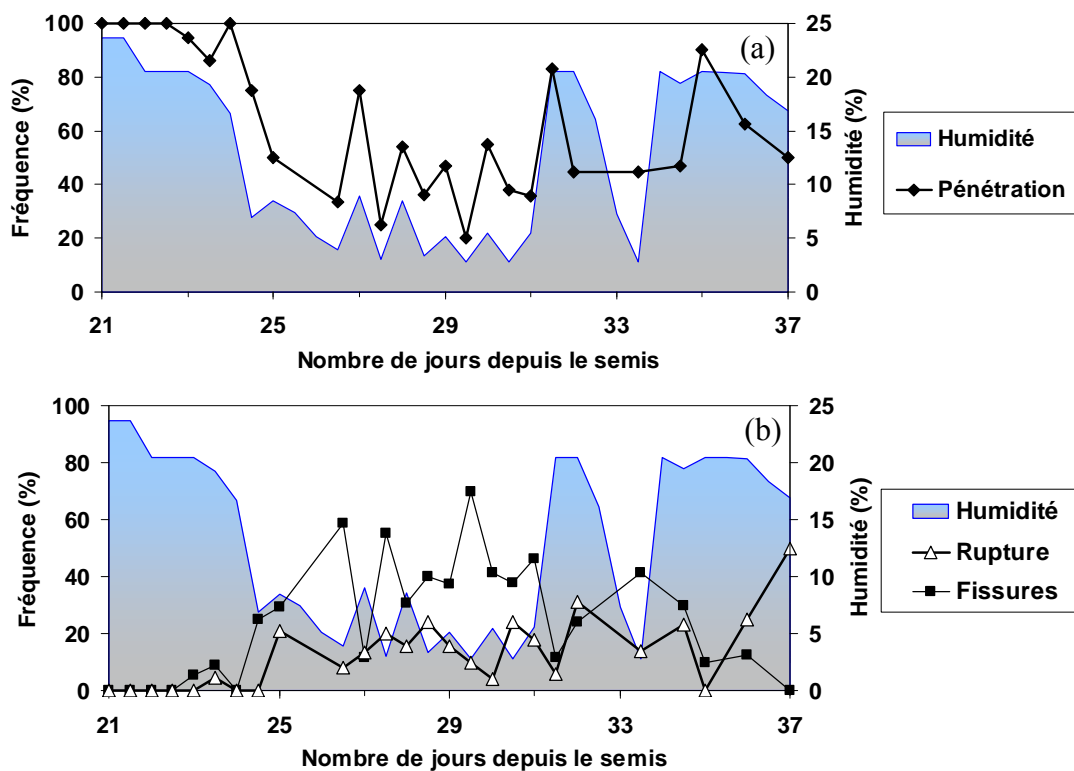
Tableau II.3

Proportions des différents modes de passage pour les différentes espèces ; pour des croûtes structurales à différents niveaux de dégradation, sèches ($0.03 - 0.06 \text{ g.g}^{-1}$) ou humides ($> 0.20 \text{ g.g}^{-1}$). Les nombres entre parenthèses représentent les écarts-types.

Etat d'humidité de la surface	Référence	Culture	Types de croûte		Modes de passage (%)				
			Faciès	Résistance	Pénétration	Utilisation du réseau de fissures		Rupture	
Humide	04 P24	Blé d2	F1-	-	100 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	
	04 P24	Betterave d1	F1	0.12	80 (19)	11 (10)	10 (10)		
	05 P182	Lin d2	F1	0.12	100 (0)	0 (0)	0 (0)		
Sec	04 P23	Betterave d2	F1-	-	98 (3)	0 (0)	2 (3)		
	04 P24	Betterave d1	F1	0.31	44 (22)	43 (20)	14 (12)		
	04 P19	Lin	F1	0.27	16 (18)	76 (20)	7 (12)		
	04 P27d1	Haricot d1	F1-	-	61 (17)	0 (0)	39 (17)		
	04 P27d2	Haricot d2	F1	0.85	45 (15)	19 (11)	36 (15)		
	Simulateur	Betterave	F1/2+	1.80	7 (10)	93 (10)	0 (0)		

Figure II.5

Evolution des modes de franchissement et de l'humidité de la surface du sol au cours de la levée dans le cas de la betterave d1 en 2004 (04P24).



Dans le cas de la betterave, espèce à faible force d'émergence, les plantules franchissent systématiquement la surface du sol par pénétration pour des surfaces peu dégradées (F1-, croûte structurale à peine identifiable, épaisseur < 1mm). Face à une croûte structurale type (F1, épaisseur d'environ 6 mm), les proportions de passages par pénétration sont fortement diminués (44% des passages ; écart significatif, $P = 5\%$). Par contre, on note l'impact considérable du réseau de fissures qui explique environ un franchissement sur deux. Les passages par rupture sont relativement peu fréquents : 14% des franchissements. Ces résultats peuvent être comparés à ceux obtenus sous simulateur de pluie au laboratoire par Aubertot et al. (tableau II.1, 2002). Dans le cas de croûtes humides au champ les passages par pénétration sont prédominants et de même ordre de grandeur que ceux obtenus au laboratoire. Par contre, les passages par rupture sont moins fréquents et les plantules utilisent les premières fissures formées. Même dans le cas des croûtes sèches, peu de franchissements par rupture sont observés (14%), les plantes utilisent le réseau de fissures (43%) mais réussissent aussi à passer par pénétration (44%). On n'observe pas de franchissements par rupture avec utilisation du réseau de fissures formé comme cela avait été observé pour des croûtes formées sous simulateur de pluie (40% des passages). Au final, des différences relativement importantes de modes de franchissement sont mises en évidence entre les deux types d'expérimentation. Comme nous l'avions envisagé, les passages par rupture sont peu fréquents (10 à 14% selon l'humidité), et les passages par pénétration et par les fissures majoritaires. Ces différences sont vraisemblablement dues au type de croûte particulier obtenu dans le cadre de l'expérimentation sous simulateur de pluie.

Face à une croûte sédimentaire formée sous simulateur de pluie en utilisant un mode de formation de la croûte plus proche du champ, la quasi-totalité des plantules levées ont franchi la surface en passant par les fissures, parfois très fines. Une plantule, sur les 14 plantules levées, a traversé la croûte directement par pénétration, dans une zone particulière, au pied d'un agrégat et donc sans doute partiellement protégée de l'impact de la pluie. La résistance mesurée était de 0.96 MPa dans cette zone, contre 1.8 ± 0.5 MPa sur l'ensemble du faciès. Cette valeur donne une indication sur la valeur limite au-delà de laquelle aucune plantule de betterave ne peut parvenir à traverser la croûte autrement qu'en utilisant le réseau de fissures.

Dans le cas du lin, autre espèce à faible force d'émergence, la fissuration de la surface du sol a un effet très marqué sur l'émergence des plantules, même dans le cas d'une croûte structurale: deux tiers des franchissements ont lieu par les fissures ; le taux de passage par rupture est très faible, 7%.

Pour le haricot, espèce avec une force d'émergence plus élevée (supérieure à celle de la betterave d'un facteur 30, tableau In.1), on observe un taux plus élevé de passages directs à travers la croûte. Dans le cas du haricot, les passages par rupture sont plus nombreux face à une croûte de type F1: 40 % contre 14 % dans le cas de la betterave (écart significatif, $P = 5\%$). Par contre on observe comparativement moins de passages par les fissures. Cependant l'impact du réseau de fissures sur les franchissements dépend du type de croûte formée à la surface du sol. Le pourcentage de passages par les fissures tend à augmenter avec le niveau de dégradation. Il est nul dans le cas d'une croûte F1- et passe à 19% dans le cas d'une croûte structurale F1 (écart non significatif, $P = 5\%$). Donc plus la surface est résistante comparativement à la force que peut exercer les plantules et plus elles doivent utiliser le réseau de fissures pour parvenir à franchir la surface du sol.

Dans le cas de la betterave, on a pu suivre en continu l'évolution des modes de franchissement du début jusqu'à la fin de la levée, en parallèle de l'évolution de la teneur en eau (04P24, figure II.5). On constate que l'évolution des modes de passages suit étroitement l'évolution de la teneur en eau de la croûte. Quand l'humidité augmente, les taux de passages par pénétration augmentent ; et inversement, les autres modes de passages diminuent (rupture et utilisation des fissures, figure II.5b). On peut aussi observer durant les périodes sèches (26-31^{ème} jours), un effet de l'alternance jour/ nuit sur l'humidité de la surface du sol ; ce qui a pour conséquence de faire varier légèrement les modes de franchissement observés entre le matin et l'après-midi.

On a pu ainsi établir des fonctions continues entre l'humidité et les différents modes de passage (figure II.6). Chaque point représente une séquence de mesures (une demi-journée). On observe cependant une certaine variabilité qui s'explique par les variations locales de l'état de la surface: variations de l'humidité et variations du niveau de dégradation. La figure II.7 confirme ce dernier point. Elle

Figure II.6

Evolution des modes de franchissement en fonction de la teneur en eau de la croûte dans le cas de la betterave d1 en 2004 (04P24). (a) passages par pénétration, (b) passages par les fissures, (c) passages par rupture. Chaque point représente une séquence de mesures

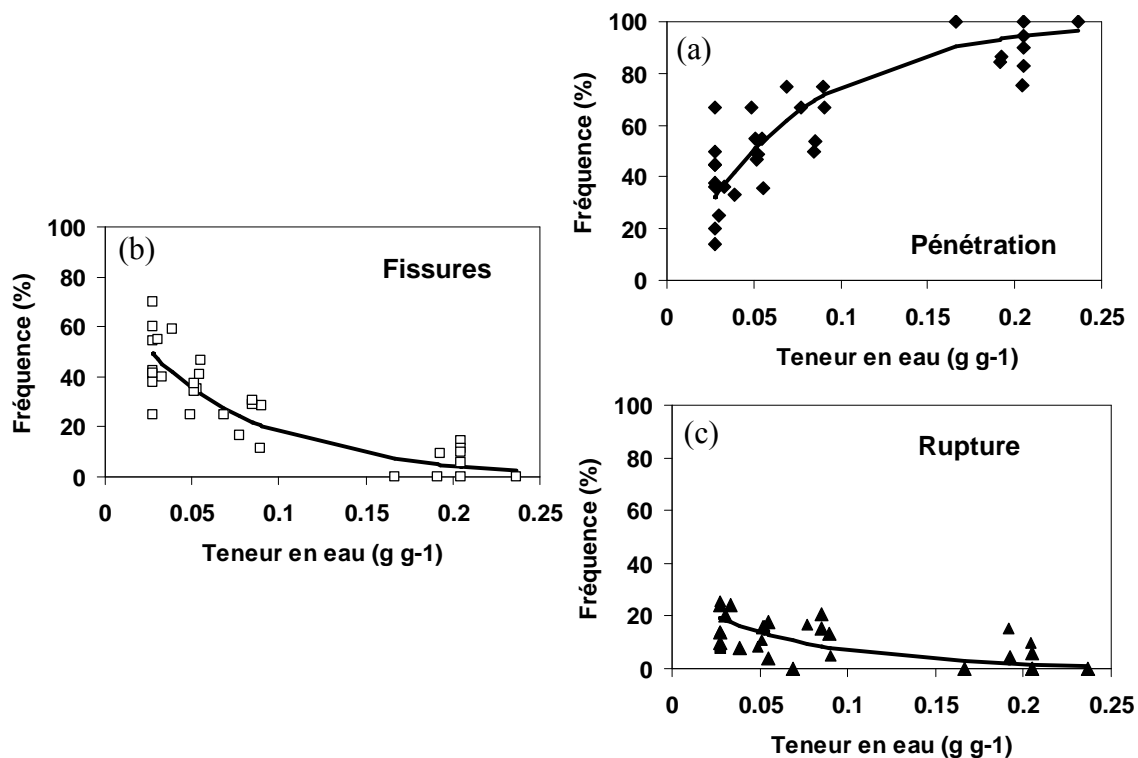
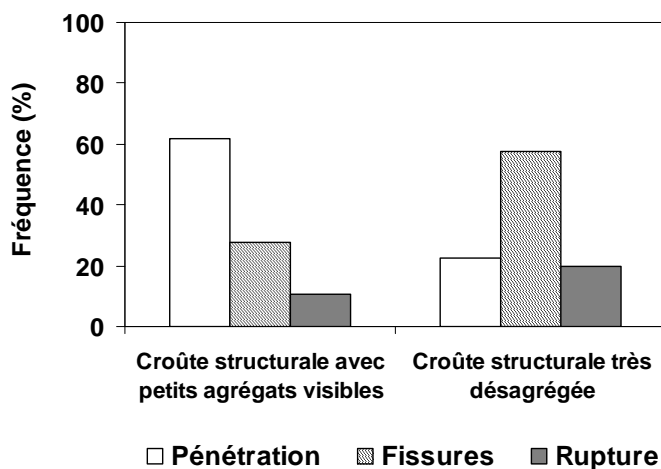


Figure II.7

Proportions (%) des différents modes de passage face à une croûte sèche (humidité < 0.06 g g⁻¹) en fonction des variations locales du niveau de dégradation (au niveau des plantules), dans le cas de la betterave (04P24N).



présente les proportions des différents modes de passage dans le cas d'une croûte sèche, en fonction des variations locales de l'état de dégradation (par rapport à l'état général noté F1): plus la dégradation augmente et plus les passages par pénétration diminuent.

2.3. Synthèse par rapport à la modélisation

Cette analyse au champ confirme l'hypothèse faite que les modes de franchissement au champ sont différents de ceux observés lors des expérimentations au laboratoire réalisées par Aubertot et al. (1998, 2002). Dans le cas des espèces à faible force d'émergence, les modes de passage par rupture sont finalement limités (de l'ordre de 10%) et l'essentiel des passages se font par pénétration ou par fissure. La majorité des croûtes obtenues était de type structural et les levées des espèces de printemps observées ont été perturbées dans tous les cas : on peut imaginer que face à des croûtes plus dégradées, ce phénomène s'accroît et que le réseau de fissures ait encore plus d'effet sur les levées. C'est ce qui a été observé dans le cas du semis que nous avons reconstitué et soumis au simulateur de pluie pour former une croûte sédimentaire. Finalement, seul le haricot, espèce à force d'émergence plus importante, présente des passages par rupture importants, 35-40%.

On a pu dans le cas de la betterave établir des fonctions continues décrivant les différents modes de passage selon l'humidité de la croûte. Cependant, ces résultats ne sont pas disponibles pour les deux autres cultures car ils sont très longs à obtenir.

Cette première étape du travail était donc nécessaire et a permis de focaliser la suite du travail sur les points qui sont apparus importants et qui devront être pris en compte pour parvenir à prévoir le taux de levée sous croûte. Ces différents points font l'objet des chapitres suivants. Il s'agit de prévoir :

- l'évolution de la dégradation de la surface du sol et de sa résistance au cours du temps ; en analysant tout particulièrement les premières étapes de la dégradation qui aboutissent à une croûte structurale. Ces étapes correspondent aux situations les plus fréquentes *in situ* et provoquent déjà à des problèmes de levée importants.
- l'évolution de la fissuration à la surface du lit de semences au cours du temps et la localisation des plantules par rapport aux fissures.

Avant de développer ces deux points, nous présenterons les mesures de force d'émergence effectuées sur trois des espèces étudiées : betterave, lin et blé. Les forces d'émergence des plantules et leurs variations au cours du temps sont une variable mesurable de façon reproductible, assez rapide et relativement facile à mettre en œuvre pour différencier les comportements des différentes espèces et prévoir les modifications de la capacité à franchir les obstacles au cours de la levée. Cette variable a déjà été utilisée dans les études antérieures et permettra dans le modèle proposé de caractériser les plantules au cours du temps quel que soit le formalisme adopté.

3. MESURES DES FORCES D'EMERGENCE

3.1. Eléments bibliographiques

La possibilité pour une plantule de franchir la surface du sol dépend des caractéristiques de la surface (plasticité, résistance) et de la force exercée par la plantule au moment de l'émergence. La force d'émergence varie selon les espèces. Le tableau In.1 indique les ordres de grandeur des forces mesurées pour plusieurs espèces. Les forces mesurées augmentent avec la masse des semences et le diamètre des tiges (Arndt, 1965 ; Sinha et Ghildyal, 1979 ; Gerard, 1980 ; Souty et Rode, 1993, 1994 ; Tamet et al., 1995), ces deux variables étant souvent corrélées. Une diminution du diamètre de la tige combinée à une augmentation de sa longueur expliquerait les variations de la force d'émergence avec l'âge de la plante (Arndt, 1965b).

Aubertot et al. (1998) distingue deux groupes d'espèces selon les pressions qu'elles peuvent exercer : faibles pour des espèces telles que la betterave, les espèces légumières (carotte oignon) et les espèces fourragères (luzerne, trèfle, ray-grass) ; et plus élevées pour le blé, le pois, le maïs, le coton, le soja, le sorgho, le haricot.

Pour une espèce donnée, les forces d'émergence peuvent varier considérablement entre les plantules. Les forces tendent à augmenter avec la masse des semences et diminuent avec le vieillissement des plantules. Par exemple, dans le cas de la betterave les forces maximales varient de 0 à 0.59 N entre les plantules (Souty, 1994). Elles sont en moyenne de 0.10 et 0.12 N pour des semences respectivement de 7-8.999 mg et 13-16 mg (Souty, 1993, 1994). Pour cette espèce, le maximum de force est atteint en fin de période de transfert des réserves. Si l'âge de la plante est exprimé en temps thermique, on n'observe pas d'effet de la température pour une gamme de température allant de 10 à 20 °C. L'analyse des effets de la température nécessiterait d'observer l'effet de températures extrêmes, très basses ou élevées. Dans le cas du coton pour des températures allant de 20 à 40 °C, les forces mesurées variaient selon la température avec un optimum à 27 °C (Gérard, 1980).

Les forces d'émergence ont été mesurées selon plusieurs méthodes. Un des dispositifs utilisés est basé sur la mesure de la déformation longitudinale d'une lamelle d'acier sous l'action de la force exercée par la tige (Bouaziz et al., 1990 ; Souty et al., 1992 ; Souty et Rode, 1993, 1994 ; Tamet et al., 1995). Cette déformation est mesurée à l'aide d'une jauge de contrainte collée à la lamelle dont la résistance électrique varie en fonction de son allongement. La plantule est canalisée par un tube en verre afin d'éviter que la plantule ne modifie la direction de sa poussée.

Ce dispositif de mesure présente quelques inconvénients. L'étalonnage est problématique en raison de la sensibilité des acquisitions aux variations de température, et des difficultés de positionnement de la poussée qui rendent l'étalonnage peu précis. Une autre difficulté est de positionner correctement les plantules sur la zone de mesure, ce qui peut entraîner des variations dans les valeurs des forces mesurées. Les mesures effectuées avec ce dispositif ont été utilisées au cours d'une étude au laboratoire qui avait pour objectif de prévoir les taux de levée sous croûte de plantules de betterave. Cette étude était basée sur l'utilisation de modèles de franchissement adaptés aux types de passages observés (Aubertot, 1998 ; Aubertot et al., 2002). Les taux de levée simulés qui ont été obtenus au cours de ce travail étaient très inférieurs aux taux de levée observés (voir partie précédente). Une des hypothèses formulée pour expliquer cette différence était une sous estimation des forces d'émergence. Cependant, l'importance des écarts observés impliquait une correction d'un facteur 10, ce qui semblait malgré tout peu probable (Aubertot, 1998).

Etant donné les difficultés avec ce dispositif de mesure, nous avons entrepris une nouvelle série de mesures des forces d'émergence sur les différentes espèces suivies dans notre étude en mettant au point un autre dispositif. Des capteurs de forces sont utilisés sur lesquels ont été fixés des tubes en plastique dont les diamètres sont adaptables à l'espèce considérée (figure II.8). L'ensemble constitue un dispositif plus robuste que les jauges collées sur lamelle précédemment utilisées. Nous avons mesuré les forces d'émergence de la betterave, du lin et du blé, espèces également suivies au champ

Figure II.8
Dispositif de mesure des forces d'émergence.

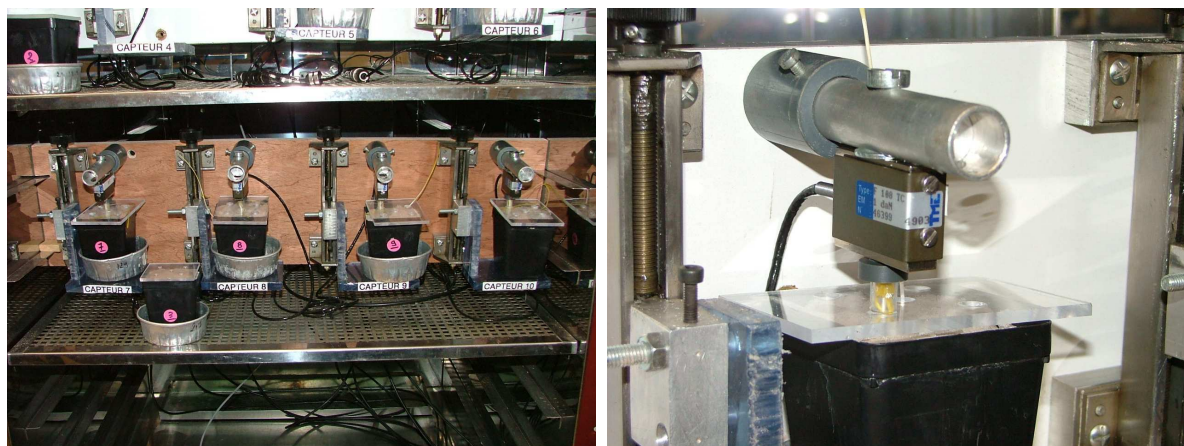


Tableau II.4
Caractéristiques des traitements expérimentaux et forces d'émergence maximales mesurées (les nombres entre parenthèses représentent les écarts-types)

Espèce	Variété	Poids semences (mg)	Profondeur de semis (mm)	Nombre plantules	Force d'émergence maximale (N)
Betterave	Véga	7 - 8.999	20	14	0.07 (0.03)
Betterave	Véga	7 - 8.999	28	10	0.07 (0.04)
Betterave	Véga	13 - 16	20	15	0.08 (0.03)
Lin	Niagara	8 - 8.999	20	17	0.14 (0.04)
Blé	Fidel	30 - 39.999	20	20	0.37 (0.09)
Blé	Fidel	50 - 59.999	20	18	0.44 (0.08)
Blé	Courtot	50 - 59.999	20	18	0.46 (0.12)

(suivi des levées sous croûte, modes de franchissement). Les ordres de grandeur obtenus pourront être comparés aux valeurs obtenues avec les précédents dispositifs de mesure.

Nous nous sommes attachés à déterminer les forces maximales exercées mais aussi à décrire leur variation continue au cours du temps. Dans l'objectif de confronter la résistance du sol avec les forces exercées par les plantules, il est effectivement nécessaire d'envisager la force d'émergence non seulement comme une variable ponctuelle nécessaire pour caractériser les plantules et comparer les situations ; mais aussi de décrire son évolution au cours du temps en parallèle des variations de la résistance de la surface du sol.

3.2. Matériel et méthodes

a. Dispositif général de mesure

Le dispositif utilisé est constitué de dix capteurs de force placés dans une enceinte climatisée. Les plantules sont mises en culture dans des pots de dimensions 6 x 6 x 7 cm³. Lorsque la taille des plantules souhaitée est atteinte, les pots sont directement placés sous les capteurs (figure II.8). L'apex vient appuyer contre le capteur de force. Le sommet de la plantule est inséré dans un tube en plastique qui est fixé à la base du capteur afin de canaliser la plantule lors de sa croissance et empêcher qu'elle ne se détourne de la zone d'appui. La déformation de la jauge du capteur, résultant de l'application de la force, est traduite électriquement. Le signal électrique est enregistré toutes les heures par une centrale de mesures, directement reliée à un ordinateur. Ce dispositif permet de suivre en continu les signaux délivrés par les capteurs.

b. Mise en culture

Le support de culture est du sable de Fontainebleau (environ 400 g par pot) d'une granulométrie de 150 à 210 µm. L'alimentation hydrique et minérale des plantules est assurée par l'apport d'une solution nutritive. L'humidité pondérale du sable est maintenue aux environs de 0.20 g g⁻¹. Elle a été définie de façon à éviter les risques de stress hydrique et d'anoxie pour les plantules (Tamet, 1995). Elle est apportée avant le semis pour humecter le sable. L'humidité du milieu de culture est ensuite contrôlée par pesée des pots.

Les semences sont placées à la profondeur voulue à l'aide d'une pince dans des trous préalablement formés. Les semences sont ensuite recouvertes de sable non tassé. Dans chaque pot cinq semences sont transplantées, dont les positions et les masses initiales sont préalablement notées. Au moment de la mise en place sous les capteurs, la plantule suivie est choisie en fonction de la longueur de sa tige, de manière à pouvoir être introduite dans le tube en plastique mais sans appuyer sur le capteur. La distance entre la surface du sable et le capteur est de 16 mm. Les autres plantules sont retirées de manière à éviter qu'elles ne perturbent la croissance de la plantule choisie. L'ensemble du processus, du semis jusqu'à la fin des mesures, se déroule en enceinte climatisée, et à l'obscurité. L'ensemble de notre étude a été mené à 20 °C.

c. Traitements expérimentaux

Les caractéristiques des différents traitements sont présentées dans le tableau II.4. Dans le cas de la betterave, nous avons caractérisé deux gammes de masses de semences de la variété Vége (7-8.999 mg et 13-16 mg) reproduisant ainsi avec ce nouveau dispositif les mesures utilisées par Aubertot (1998). Ainsi, nous pourrions évaluer les éventuelles divergences avec les mesures antérieures, et tester l'hypothèse selon laquelle les forces d'émergence sont sous-estimées avec ce type de dispositif.

Concernant le lin, la variété utilisée est la variété Niagara, variété suivie au champ au cours de notre étude. La gamme de masses des semences étudiée, 8-8.999 mg, correspond à la gamme la plus fréquente pour le lot utilisé.

Nous avons mesuré les forces exercées pour deux variétés de blé : Fidel et Courtot. Ces variétés ont été choisies en raison de leurs différences dans l'allongement du coléoptile. Courtot a un faible allongement, avec un coléoptile de 47 mm en moyenne, en comparaison des autres variétés (Fidel, 67

Figure II.9

Distribution des forces d'émergence maximales pour les espèces betterave (Véga), lin (Niagara) et blé (Fidel).

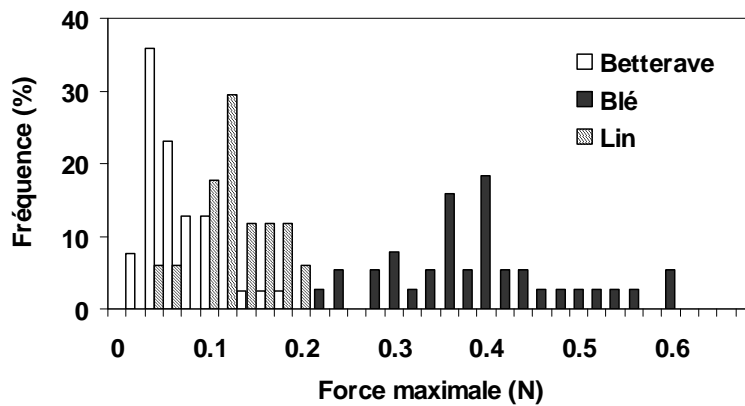


Figure II.10

Distribution des forces d'émergence maximales pour le blé en fonction de la variété (Fidel et Courtot) et de la masse des semences (pour la variété Fidel, 30-39.999 mg et 50-59.999 mg).

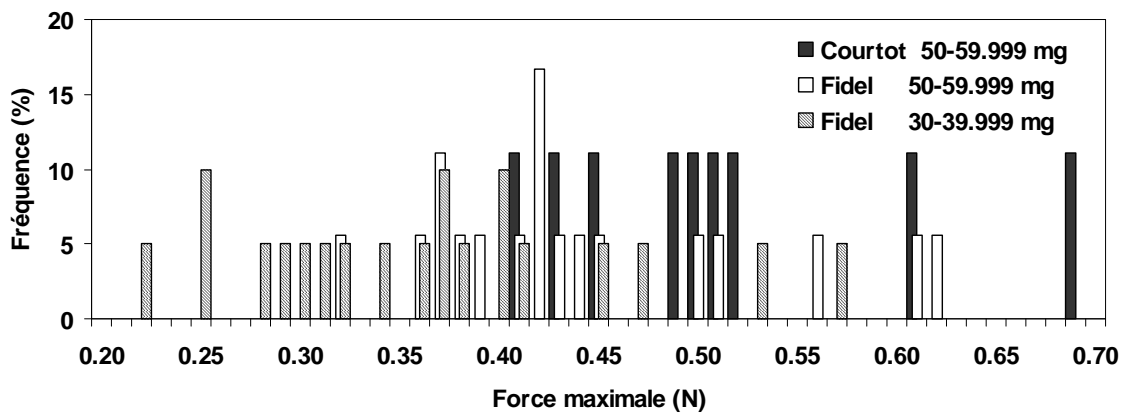
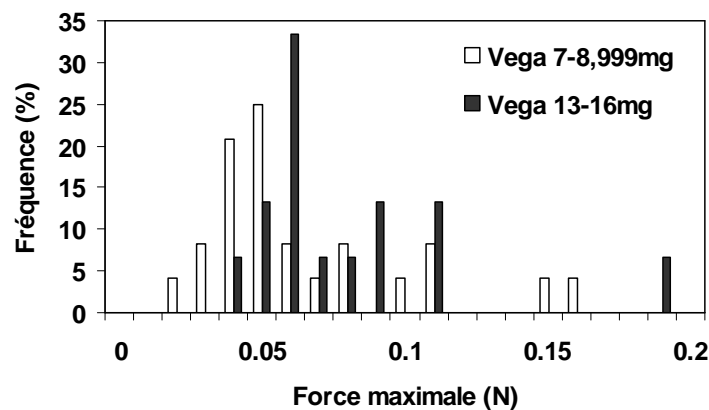


Figure II.11

Distribution des forces d'émergence maximales pour la betterave (variété Véga) en fonction de la masse des semences 7-8.999 mg et 13-16 mg.



mm). Afin de permettre la comparaison entre ces deux variétés, nous avons mesuré les forces d'émergence pour une même gamme de masse de semences de 50 à 59.999 mg. Pour la variété Fidel, des semences de plus faibles masses sont également caractérisées, 30- 39.999 mg, pour évaluer l'effet de cette variable pour cette espèce.

Les plantules ont été mises en place sous les capteurs pour des sommes de températures cumulées depuis le semis variant entre 70 et 90 °Cj selon les espèces : environ 70 °Cj pour le lin, 80 °Cj pour la betterave et 90 °Cj dans le cas du blé ; calculées avec la base 4.8 °C pour le lin, 3.5 °C pour la betterave et 0 °C pour le blé. Les mesures sont poursuivies jusqu'à ce que la force mesurée ait diminué jusqu'à atteindre un plateau, soit environ deux semaines après le semis (environ 100 °Cj).

3.3. Résultats

a. Forces d'émergence maximales

La figure II.9 montre les distributions des forces maximales d'émergence pour les trois espèces caractérisées. La distribution des forces maximales exercées par un type de plantule peut être ajustée à une distribution log normale. Dans le cas d'une distribution log normale, la moyenne est égale à : $exp(\mu_{ln} + \frac{1}{2} \sigma_{ln}^2)$ (Warrick et Nielsen, 1980). La moyenne et l'écart type caractérisant les distributions correspondant aux différents traitements sont indiqués dans le tableau II.4. Les forces exercées sont différentes entre espèces, en moyenne de 0.07 N pour la betterave, 0.14 N pour le lin et 0.40 N pour le blé Fidel (figure II.9).

Concernant l'effet de la masse des semences, dans le cas du blé (Fidel), on constate que les forces exercées par les petites semences (30- 39.999 mg) sont significativement plus faibles que les forces exercées par les grosses semences (50-59.999 mg) : 0.37 N contre 0.44 N (figure II.10). Pour la betterave, la force d'émergence maximale est de 0.07 N en moyenne pour les petites semences (7- 8.999 mg) contre 0.08 N pour les grosses semences (13-16 mg). Cette différence n'est pas significative mais cependant, si on considère les distributions (figure II.11), les plus faibles valeurs sont enregistrées pour les petites semences et les plus fortes valeurs sont atteintes dans le cas des grosses semences.

Pour l'effet variétal, les forces exercées par la variété Courtot sont significativement supérieures à celles exercées par la variété Fidel pour une même gamme de masses de semences (50-59.999 mg) : respectivement 0.51 et 0.44 N en moyenne.

Dans le cas de la betterave et du blé, les valeurs établies sont du même ordre de grandeur que dans le cas des mesures effectuées au cours d'études antérieures avec les jauges collées sur les lamelles métalliques (Bouaziz et al., 1990 ; Souty et Rode, 1993 ; tableau In.1). Dans le cas de la betterave, les forces maximales mesurées sont cependant légèrement inférieures à celles obtenues avec l'ancien dispositif. Elles sont en moyenne de 0.07 pour les petites semences et 0.08 N pour les grosses semences, contre respectivement 0.10 et 0.12 N dans les études antérieures pour le même type de plantules (même variété Véga, même gamme de poids de semences et même âge).

b. Variations des forces d'émergence au cours du temps

L'évolution des forces exercées par les plantules est suivie à partir du moment où la plantule commence à pousser sur le capteur ; soit 70 à 90 °Cj après le semis. La figure II.12 montre l'évolution moyenne des forces d'émergence pour les trois espèces étudiées. Dans le cas de la betterave et du lin, les forces exercées atteignent leur maximum après environ 15-20 °Cj. Dans le cas du blé, le temps nécessaire pour atteindre la force maximale d'émergence est plus long, environ 50 °Cj.

La force exercée par les plantules diminue ensuite progressivement dans le cas de la betterave et du lin. Par contre elle reste relativement stable dans le temps pour le blé. Pour la betterave et le lin, entre 50 et 100 °Cj après le début de la poussée, les forces exercées sont considérablement diminuées par rapport aux valeurs maximales enregistrées : environ 0.02 N pour la betterave, 0.08 N pour le lin.

Figure II.12

Variation moyenne de la force exercée par une plantule au cours du temps pour la betterave (Véga), le lin (Niagara) et le blé (Fidel).

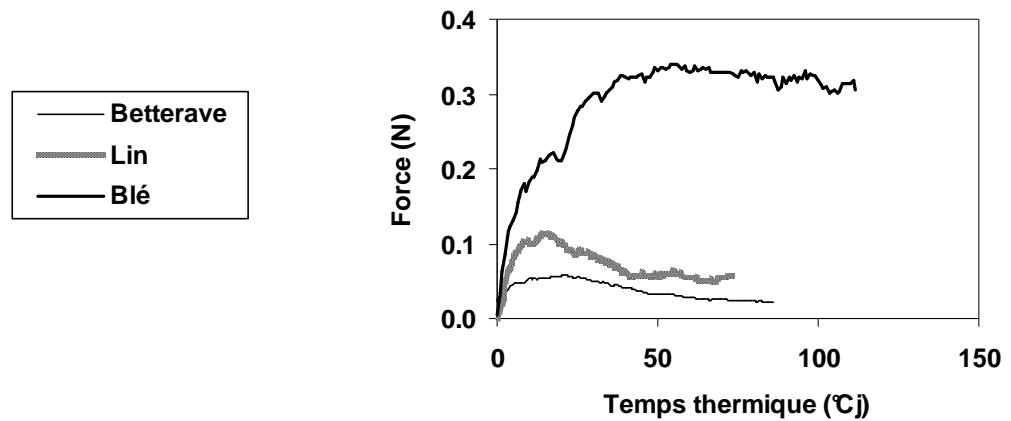


Figure II.13

Variation moyenne de la force exercée par une plantule au cours du temps dans le cas du blé en fonction de la variété et de la masse des semences (somme de températures à $t = 0$, environ 90°Cj).

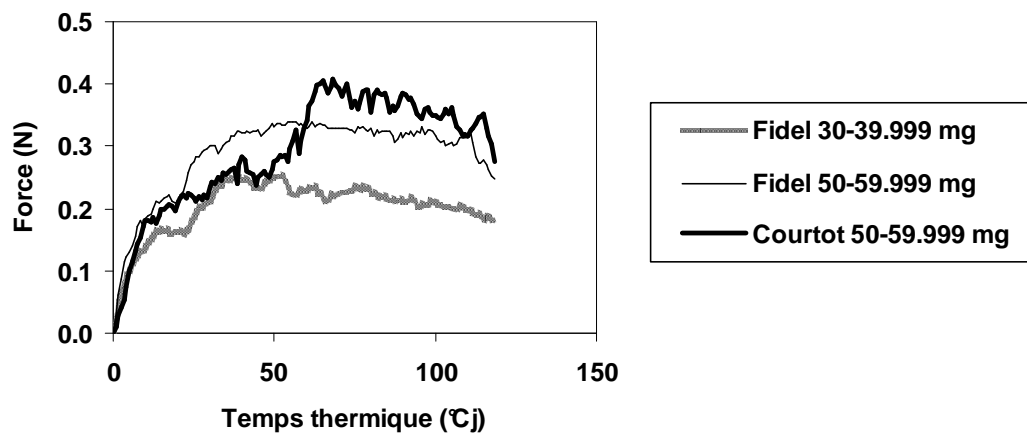
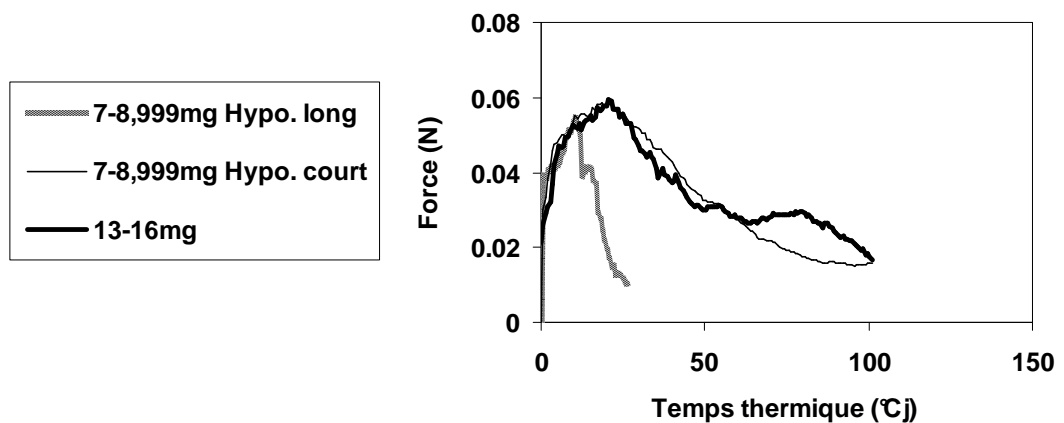


Figure II.14

Variation moyenne de la force exercée par une plantule au cours du temps dans le cas de la betterave en fonction de la masse des semences et de la longueur de l'hypocotyle (somme de températures à $t = 0$, environ 80°Cj).



L'évolution des forces exercées est similaire, quelle que soit la masse initiale des semences, comme montré dans la figure II.14 dans le cas de la betterave. Par contre dans le cas de plantules avec des hypocotyles plus longs (environ 44 mm contre 36 mm pour les autres plantules caractérisées), simulant un âge plus avancé de la plantule, la force exercée en début de poussée suit la même pente, mais n'atteint pas le même maximum et ensuite diminue beaucoup plus rapidement. La force est de 0.01 N après 25 °Cj contre 0.05 N au même moment pour les plantules avec des hypocotyles plus courts.

Dans le cas du blé, l'évolution de la force exercée par les plantules est similaire quelle que soit la variété ou le poids initial des semences (figure II.13). Mais contrairement aux deux autres espèces étudiées, la force exercée reste stable au cours du temps. Nous n'avons pas noté de diminution de la force des plantules au cours de leur vieillissement.

3.4. Synthèse par rapport à la modélisation

Ce dispositif nous a permis d'obtenir des variations du même ordre de grandeur qu'avec le dispositif de jauges collées sur les lamelles métalliques. Les mêmes sources de variation et les même sens de variation sont identifiés : espèce, masse et âge. Pour la betterave, nous avons choisi de mesurer les forces d'émergence de la variété Véga qui avait été caractérisée par Souty et Rode (1993). Nous avons pu ainsi comparer les résultats des deux dispositifs. Les forces mesurées dans le cas de la betterave sont légèrement inférieures, d'un ordre de 0.03 N, avec les nouvelles mesures par rapport à l'ancien dispositif. Cependant les ordres de grandeur restent les mêmes, une sous-estimation des forces d'émergence mesurées par l'ancien dispositif ne peut donc pas expliquer les problèmes rencontrés dans la modélisation du franchissement par Aubertot et al. (1998, 2002), comme il en avait d'ailleurs émis l'hypothèse (un facteur 10 aurait été nécessaire pour expliquer les mauvais résultats obtenus).

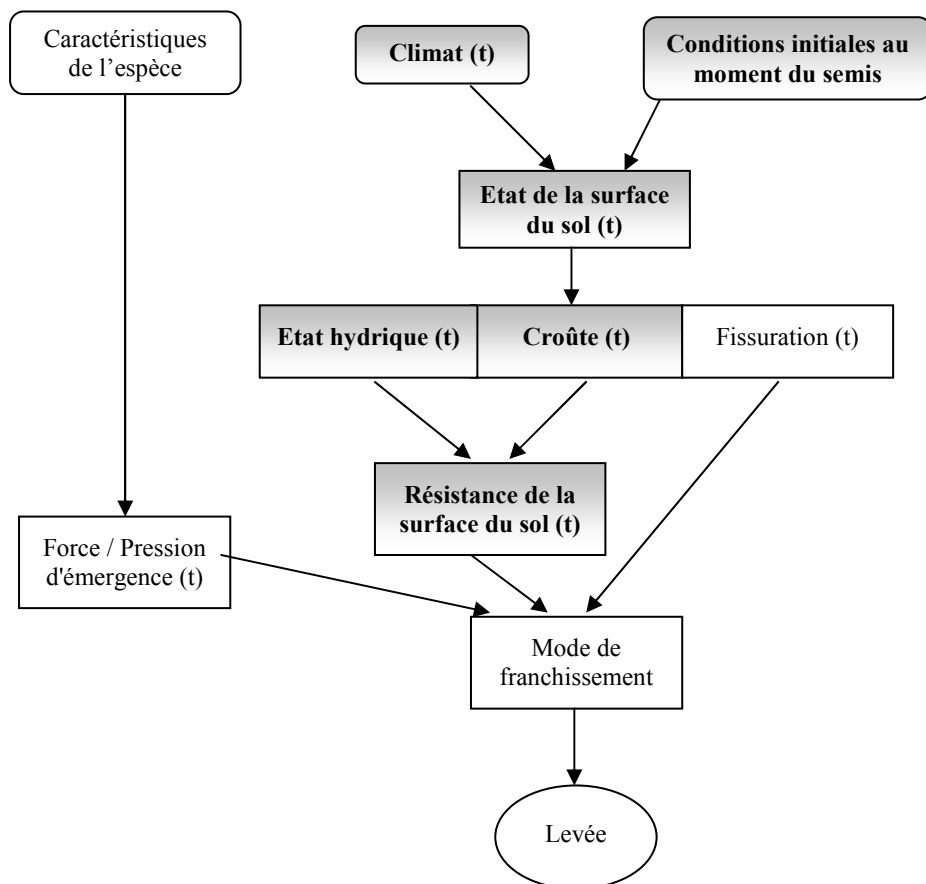
Dans le cas du blé, deux éléments nouveaux ont été mis en évidence. Tout d'abord les deux variétés étudiées présentent une différence dans la force maximale exercée : la variété au coléoptile le plus court exerce les forces les plus élevées. Par ailleurs, concernant l'évolution de la force exercée au cours du temps, des différences de comportement ont été mises en évidence : la force exercée par le blé reste relativement stable au cours du temps, contrairement aux deux autres espèces étudiées. Une différence importante entre ces espèces est que le blé continue d'utiliser ses réserves séminales tout au long de la croissance du coléoptile (Dürr et Mary, 1998). La betterave et le lin transfèrent leurs réserves initiales rapidement au début de la croissance de l'hypocotyle puis la croissance de celui-ci se fait sans nouvelles ressources.

Les variétés caractérisées ne sont pas celles suivies au champ, sauf pour le lin. Nous avons privilégié la comparaison des données avec l'ancien dispositif dans le cas de la betterave. Il apparaît que ce sont les différences entre espèces qui sont les plus importantes. Les différences de masses et âges conduisent à des écarts limités. Les comparaisons entre variétés de betterave qui ont été effectuées sur l'allongement de l'hypocotyle, n'ont pas mis en évidence d'effet variétal (Dürr et al., 1992 ; Guevaer, 1996). Dans le cas du blé, nous avons choisi une variété dont la croissance a des caractéristiques extrêmes : Courtot présente un double gène de nanisme. Les différences entre les variétés courantes doivent vraisemblablement rester limitées à gamme de masse de semences similaire.

Dans le modèle qui sera proposé, il est nécessaire de prévoir pour chaque plantule arrivant à la surface du sol, la force d'émergence qu'elle peut exercer pour parvenir à franchir une croûte de caractéristiques données, et son évolution face aux variations de la résistance de la croûte au cours du temps. Le modèle doit attribuer une force maximale à chaque plantule à partir de la distribution des forces caractérisant sa variabilité. A l'aide des résultats présentés, on pourra aussi tenir compte de sa variation au cours du temps.

CHAPITRE III

Dynamique de dégradation de la surface du sol



1. INTRODUCTION

L'impact de la croûte sur une cinétique de levée dépend de sa vitesse de développement à partir de l'état fragmentaire initial. Une formation rapide de la croûte augmente le risque de perturbation de la levée des plantules. Dans l'objectif d'évaluer ces risques et si possible de les réduire, il est nécessaire de prédire la dynamique de dégradation de la surface en tenant compte des différents facteurs qui l'influencent. La vitesse de développement de la croûte dépend de la quantité de pluie reçue et des caractéristiques de la pluviométrie, et également de la sensibilité du sol à l'encroûtement. La sensibilité du sol à la battance est liée à plusieurs aspects ; certains d'entre eux sont relatifs à la composition du sol et à ses propriétés intrinsèques, les autres aspects sont la structure initiale et l'humidité qui sont des facteurs très variables à la fois dans l'espace et dans le temps.

Nous avons étudié au champ l'effet des caractéristiques initiales du lit de semences sur la vitesse de dégradation pour un type de sol. Notre objectif est d'identifier les éléments qui agissent sur le développement de la croûte et de quantifier leurs effets, ceci afin de déterminer les facteurs de variation qui devront être intégrés au modèle. L'objectif est également de relier les caractéristiques physiques des croûtes formées à leur résistance mécanique, résistance qui doit être confrontée à la force d'émergence des plantes dans le modèle de levée sous croûte proposé.

Nous avons procédé à un ensemble de caractérisations détaillées lors de deux campagnes de mesures en 2004 et 2005. Ces observations ont été réalisées sur le site de l'expérimentation de longue durée « Système de cultures » à Mons-en-Chaussée. Les données que nous avons acquises viennent en complément d'un ensemble d'observations obtenu sur cet essai sur un plus grand nombre d'années (12 ans) mais avec un nombre plus limité de caractéristiques enregistrées. L'ensemble des données sera utilisé pour proposer des éléments de modélisation de la formation d'une croûte pour ce type de sol. Ce chapitre a été soumis sous forme d'article. Un certain nombre d'informations concernant le site expérimental et le matériel et méthodes sont de ce fait répétées par rapport au chapitre I.

Notre étude s'est limitée à un sol limono argileux. Nous indiquerons les résultats d'une étude menée en laboratoire sur le même sol sous simulateur de pluie. Cette étude a cherché à distinguer les effets respectifs de la taille des agrégats et de leur humidité. Nous verrons quelles informations complémentaires cette approche pourrait apporter pour adapter le modèle à d'autres types de sols.

2. EFFECTS OF SEEDBED STRUCTURE AND WATER CONTENT AT SOWING ON THE DEVELOPMENT OF SOIL SURFACE CRUSTING UNDER RAINFALL.¹

Abstract

This study was carried out to observe the dynamics of crust formation on the soil surface under field conditions and analyse the effects of seedbed structure and water content on soil surface crusting. Seedbed sensitivity to crusting was also estimated in the laboratory by stability tests on aggregates. We observed 57 plots during the sowings of spring and autumn crops in fields in Northern France (Estrees-Mons, 50°N latitude, 3°E longitude). The soil is an Orthic Luvisol according to the FAO classification (0.17-0.25 g g⁻¹ clay and 0.02 g g⁻¹ organic matter on average). Visual assessments *in situ* were performed and photographs taken of crust stages on delimited areas, each 5 mm of cumulated rainfall since sowing. In 2004-2005, the seedbeds were characterised by their distribution of aggregate sizes and tests of aggregate stabilities of surface samples kept with their water content at sowing. A penetrometer was used to measure crust resistance and estimate its thickness. These data were analysed to detect the cumulative rainfall values needed for the initiation and development of the successive stages of crusts. A fully developed structural crust (stage F1) required 13, 22, 27 mm cumulated rainfall respectively for seedbeds with proportions of clods over 2 cm ranging from 0-0.15 (fine seedbed), 0.15-0.30 (medium seedbed), > 0.30 g g⁻¹ (coarse seedbed). Aggregate stability measured on samples kept at sowing water content was low for soil with low water content (< 0.17 g g⁻¹) but increased sharply for water contents over 0.17 g g⁻¹. Stage F1 was reached more rapidly (only 11 vs 19mm cumulated rainfall) only for fine seedbeds with less than 0.15 g g⁻¹ of clods over 2 cm and with a low water content at sowing. The stage of 50 % of soil surface covered with sedimentary crusts was reached for 85 mm for fine seedbed versus 120 mm for medium seedbed. The mean penetrometer resistance of dry crusts was 0.55 ± 0.43 MPa for stage F1 and 3.54 ± 0.83 MPa for a sedimentary stage; mean penetrometer resistance increased continuously with cumulated rainfall and was much lower for wet crusts. These quantitative data gathered under field conditions constitute the first step towards the prediction of soil surface crusting. The cumulative rainfalls were used in order to estimate the risk of occurrence of structural and sedimentary crusts forming during crop emergence with several types of seedbeds.

2.1. Introduction

Soil crusting can greatly impair crop emergence (Arndt, 1965a, b; Rapp et al., 2000; Baumhardt et al., 2004; Lehrsch et al., 2005). The formation of soil crust depends on surface aggregate sizes (Farres, 1978; Freebairn et al., 1991; Bradford and Huang, 1992) and soil sensitivity to breakdown, which is linked to soil texture and soil water content (Govers et al., 1990; Duval and Boiffin, 1994a). Crust development follows several stages under the effects of cumulated rainfall. First, a structural crust is formed from micro-particles produced by the breakdown of soil surface aggregates. These particles are reorganised into a denser and more continuous structure by filling and compaction. Soil surface infiltrability progressively decreases, resulting in the possible occurrence of excess water. When excess water infiltrates, fine sediments resulting from the disintegration of small aggregates accumulate to constitute a depositional sedimentary crust (Boiffin, 1984; Boiffin and Bresson, 1987; Boiffin et al., 1990; Le Bissonnais and Bruand, 1993; Duval and Boiffin, 1994a). Seedling emergence can be stopped by a crust from the first stages of development and the extent of crust impact depends on the speed and the stage of soil crusting (Richard and Boiffin, 1990; Duval and Boiffin, 1994b). The impact of the speed at which soil crusting occurs depends on the time taken by seedlings to reach the soil surface and on the pressure that seedlings can exert to penetrate the crust. This relies on crop

¹ Cette partie est constituée d'un article accepté pour publication dans Soil and Tillage Research Journal - Aude Gallardo-Carrera, Joël Léonard, Yves Duval, Carolyne Dürr.

species, sowing depth, soil structure, temperature and water content. When the temperature is low, for example in early spring or in late autumn in northern Europe (0-10 °C), seedlings take a relatively long time to reach the surface (> 15 days), leading to greater risk of cumulating enough rainfall to obtain surface crusting. The prediction of crust development after sowing combined with the other seedbed conditions is thus necessary to predict its impact on crop emergence, which is the final aim of our study.

Many crust studies have been carried out, either under field or laboratory conditions. Studies on erosion have described crust development and its relationship with the decrease of infiltration rate and runoff generation (Casenave and Valentin, 1992; Le Bissonnais and Bruand, 1993; Ludwig et al, 1995; Léonard et al, in press). However, the first stages of crust formation have not often been described in detail as they are not greatly involved in runoff processes. The high rainfall intensities provided by rainfall simulators under controlled conditions also often impair observation of crust formation. Finally, few works have described crust formation through time under natural rainfalls, in relation with soil surface characteristics in field grown crop areas. It thus still remains very difficult to predict how crusting develops from an initial soil structure resulting from sowing operations, through the several stages that have been described.

In view to improving the management of crop establishment, in the present study we monitor the process of crust formation on a cultivated soil surface under natural rainfall, focusing in particular on the first stages of soil crusting as they have a crucial impact on emergence rates. Additional characterization of the state of the soil surface was performed by measuring the thickness and mechanical resistance of the crust, as these measurements may help to predict emergence less empirically and generalize predictions to other crops. We aimed specifically at analysing the effect of the structure and water content of the seedbed on the development of soil crusts, as they can be affected by decisions taken by farmers. We studied how these two characteristics impact the relationship between cumulative rainfall and the degree of soil crusting. The final aim is to incorporate in an emergence model, a sub-model that describes soil crusting, taking possibly into account soil texture, seedbed condition (structure, water content, and aggregate stability) and, lastly, crust development stages.

2.2. Material and methods

a. Site and experimental design

Field experiments were carried out in Northern France (Estrees-Mons, 50°N latitude, 3°E longitude). The soil is an Orthic Luvisol according to the FAO classification, with clay content ranging from 0.17 to 0.25 g g⁻¹, organic matter ranging from 0.015 to 0.021 g g⁻¹ and 2 to 24 g kg⁻¹ of CaCO₃. Data were obtained since 1993 on the same place in a long-term experiment (details in Boizard et al., 2001) with a total 57 observed plots. In this long-term experiment, different cropping systems were established on 24 fields (0.40 ha mean area), sown every year in spring (sugar beet, *Beta vulgaris*; flax, *Linum usitatissimum*; corn, *Zea mays* and pea, *Pisum sativum*) and autumn crops (wheat, *Triticum aestivum*). Two crop rotations were monitored: pea/ wheat/ flax/ wheat and corn/ wheat/ sugar beet/ wheat; the main objective of this long-term experiment being to compare the evolution of the soil structure and quantify the risks of compaction for these cropping systems. This experiment provided a wide range of initial seedbed states as well as rainfall conditions due to the different sowing conditions (tools used, dates) and the long period during which the experiments were performed.

b. Rainfall

The average annual rainfall (1993-2005) on the site is 698 mm. Rainfall intensity is generally less than 10 mm h⁻¹ for 80% of rainfall (cited by Cerdan et al., 2002, for Normandy and also estimated from Picardy meteorological data). Rainfall was measured with a recording pluviograph during the two last years (2004 and 2005, precision of 0.1mm, dated to the minute). We determined the cumulated kinetic energy and compared it with cumulated rainfall. The cumulated kinetic energy KE (J. m⁻²) was evaluated by an empirical relation with rain intensity (Wischmeier and Smith 1958; Dubrulle and

Table III.1
Seedbed characteristics from the 2004-2005 experiments (dataset 1)

Year	Plots and crops	Soil texture			Aggregates (g.100g ⁻¹)		Water content	Aggregate stability	
		Clay (g.g ⁻¹)	Silt (g.g ⁻¹)	Organic Matter (g.g ⁻¹)	< 2mm	> 20mm	0-1 (g.g ⁻¹)	MWD (mm) wet samples	MWD (mm) dried samples
2005	P13 sugarbeet	0.21	0.72	0.016	28	11	0.12	0.70 (0.10)	0.80 (0.11)
2005	P14 sugarbeet	0.21	0.72	0.017	47	3	0.16	0.64 (0.01)	0.80 (0.08)
2005	P18d1 flax	0.18	0.74	0.018	26	19	0.23	0.90 (0.05)	0.61 (0.00)
2005	P18d2 flax	0.18	0.74	0.018	44	7	0.12	0.58 (0.01)	0.66 (0.01)
2005	P13 wheat	0.21	0.72	0.016	17	28	0.22	0.83 (0.05)	0.95 (0.06)
2004	P19 flax	0.17	0.74	0.019	45	4	0.17	0.66 (0.08)	0.94 (0.01)
2004	P21 maize	0.18	0.72	0.020	39	4	0.16	0.67 (0.17)	0.82 (0.02)
2004	P23 sugarbeet	0.18	0.76	0.019	32	4	0.22	1.15 (0.27)	0.84 (0.06)
2004	P24 sugarbeet	0.18	0.76	0.018	39	5	0.18	1.39 (0.16)	0.81 (0.11)
2004	P19 wheat	0.17	0.74	0.019	28	19	0.19	0.97 (0.05)	0.69 (0.09)
2004	P20 wheat	0.19	0.73	0.018	31	13	0.20	0.77 (0.04)	0.70 (0.02)
2004	P23 wheat	0.18	0.74	0.018	27	23	0.16	0.54 (0.03)	0.77 (0.03)
2004	P24 wheat	0.18	0.73	0.021	22	19	0.19	0.92 (0.14)	0.73 (0.07)
2004	P27d2 bean	0.18	0.73	0.019	42	2	0.11	0.57 (0.05)	0.91 (0.00)

Table III.2
Types of seedbed (1993-2005) according to mass percentage of aggregates over 20mm for spring (sugar beet, flax, pea) and winter (wheat) crops.

Type of seedbed	Aggregates > 20mm (g. 100g ⁻¹)	Soil water content (g.g ⁻¹)	Number of plots	
			spring crops	winter crops
fine	0 - 15	< 0.17	14	1
		> 0.17	8	4
medium	15 - 30	< 0.17	0	4
		> 0.17	4	9
coarse	> 30	< 0.17	0	3
		> 0.17	1	9

Table III.3
Stages of crust development and associated notations (from Ludwig et al., 1995)

Reference	States of crust development
F0	Initial state after sowing operations
F0+	Initial erosion state with dew
F1-	Hardly identifiable structural crust
F1	Standard structural crust
F1+	Structural crust with clearer micro spots
F1/2-	Beginning of sedimentary crust (surface <10%)
F1/2	Sedimentary crust in micro depressions (surface <30%)
F1/2+	No coalescent sedimentary crust (surface <50%)
F2-	Coalescent sedimentary crust (surface from 50 to 75%)
F2	Coalescent sedimentary crust (surface from 75 to 90%)
F2+	Coalescent sedimentary crust (surface >90%)

Boiffin, 1989): $KE = h (11.9 + 8.7 \log_{10} I)$, where h is the water height (mm) and I is the rainfall intensity ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$). The kinetic energy was on average $12.8 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ per millimetre of rainfall during the sowing periods (March-April, September-November) and there was a good linear relationship between the cumulated kinetic energy and the cumulated rainfall from the sowing. Therefore taking into account the kinetic energy of rainfalls did not modify our results. No evaluation was made of the cumulated kinetic energy for the other years as the recording pluviograph gave only daily rainfall. Cumulated rainfall data are more easily accessible than cumulated kinetic energy data for users and do not need specific materials. Therefore, we chose to use cumulated rainfall from the sowing as an indicator of soil crusting.

c. Measurements

Seedbeds were characterised by soil texture, distribution of aggregate sizes and water content at sowing. Their sensitivity to degradation was measured using tests of aggregate stability only during the two last years (2004-2005) of the study. The evolution of soil crusting was recorded by taking photographs. The penetration resistance of crusts was monitored during the two last years (2004-2005).

Aggregate size distribution

Each year, seedbed samples were taken just after sowing in each treatment. Samples were delimited by combs (80 mm width x 200 mm). Sample thickness was the seedbed depth. This was identified by the visual change in structure between the soil layer tilled by the seeder and the sublayer. Two samples were taken per row, for 8 rows out of the 12 or 24 rows of the seeder, in two blocks; i.e. 32 samples per plot. The soil samples were air dried for one month and, when dry, they were gently sieved by machine (30 s, 150 shakes/min, 3 mm amplitude). The grades measured were <2, 2-5, 5-10, 10-20, 20-40, and >40 mm. The mass distribution between the grades was established. Larger aggregates (> 20 mm) tended to remain at the soil surface after action by the seeder (Aubertot et al., 1999). The mass of aggregates over 20 mm ranged from 0.2 to 0.58 g g^{-1} i.e. fine to coarse (Table 1), considering the variation between seedbeds observed in the same agricultural area (Carrera and Dürr, 2003; Dorsainvil et al., 2005).

Tests of aggregate stability and soil water content

Aggregate stability was measured using Le Bissonnais' method (1996) adapted from that of Hénin et al. (1958). Aggregate sensitivity to degradation depends on soil texture and water content (Le Bissonnais, 1988; Truman et al., 1990). We chose to apply the tests to aggregates keeping their initial water content to reflect these two factors (wet tests). In addition, the stability of dried aggregates (40 °C, 24h) was also measured as indicated in the method described by Le Bissonnais (dry tests). Aggregates 3-5mm were sieved directly in the field at the time of sowing and kept with their water content at 5°C in hermetically sealed boxes. Samples were also taken at several intervals after sowing before surface crusting on two plots (P13-sugarbeet and P18-flax) to measure stability for the same initial aggregates with different water contents. Three sub-samples of known weight (5-10 grams) of aggregates were subjected to 3 different wetting methods. The first was fast wetting done by dipping the aggregates directly in a small beaker filled with deionised water (50 ml); the second was slow wetting done by spreading the aggregates on a sheet of filter paper laid on a wet sponge for 60 minutes; the third wetting was done by stirring pre-wetted aggregates in ethanol and then placing them in a beaker filled with water. The purpose of using these three was to distinguish desegregation mechanisms: slaking, micro-cracking and reduction of cohesion. The resulting fragments were sieved to obtain their mass size distribution. The results are expressed by the mean weight diameter of the aggregates remaining after treatment (MWD) and classified according to the classes proposed by Le Bissonnais (1996).

The water content of the soil surface was measured just after sowing for the seedbed (3 replicates by block) and calculated from the difference between the weights of the samples before and after drying at 105 °C for 24h. The water content of the soil surface was also measured thereafter each time soil crusting was characterised.

Assessment of soil crusting

For each plot, soil surface degradation by rainfall was recorded on two blocks (5m x 30m) from sowing to the end of emergence. The soil surface was observed after about every 5 mm of rainfall. Stages of soil crusting were recorded by visual assessment on a notation grid. This grid is based on the estimation of the extent of structural and sedimentary crusts and on the continuity of sedimentary crusts (Boiffin, 1984; Ludwig et al., 1995; Table 2). The areas observed were 30 x 48 cm (4 to 8 zones per block centred on the same rows as for the seedbed structure measurements carried out on two blocks). Notations were made from photographs of the soil surface and controlled by observations *in situ* during the two last years of the study. We checked that the notations of crust stages from a set of photographs by three different observers were the same.

Penetrometer measurements: mechanical resistance and crust thickness

We determined thickness and mechanical resistance for specific states of soil crusting by using a penetrometer (0.01 N precision over the range 0-10 N). The needle had a flat and circular tip with a diameter of 1.96 mm. A small motor was used to move the system downward at a constant speed of 10.2 mm.mn⁻¹ over a distance of 20 mm. A computer was connected to the system to record resistance every 0.25 s as the needle moved downwards into the soil. Crust water content was measured at the same time. The pressure needed by the needle to penetrate through the crust was calculated by dividing the maximum force by the area of the needle tip. The thickness of the crust was calculated from the needle speed and the time recorded to reach a plateau, indicating that the needle tip had finished crossing the crust.

An additional laboratory experiment allowed enlarging the crust states characterized in the field. At sowing, seedbeds were extracted by using tanks (0.50 x 0.50 x 0.15 m³), keeping the soil structure intact. Then, the tanks were subjected to simulated rainfall with an intensity of 30mm h⁻¹ until several states of soil crusting were obtained and characterized for several water contents (structural to sedimentary after 6.5 to 40 mm of rainfall; 0.2 to 0.16 g g⁻¹ water content).

d. Climatic data analysis

Calculation of cumulated rainfall values needed to reach the different crust stages

We evaluated the cumulated rainfalls that allowed the best predictions of the transitions between the crust stages compared with the observations. For each crust stage, we used the following method:

- (i) for all the observations on all the plots, we compared the cumulated rainfall from sowing with a given cumulated value. The predicted values of crust stage (S_{sim}) was 1 if the cumulated rainfall was higher than the chosen tested value; 0 if it was not;
- (ii) these predictions were then compared with the crust state observed. To achieve this, observations of crust stages (S_{obs}) were coded 1 if the stage was reached, 0 if it was not. The sum of squares of differences (SSE) between the observed (S_{obs}) and the predicted values (S_{sim}) was calculated: $SSE = \sum (S_{obs} - S_{sim})^2$;
- (iii) we tested a series of cumulated rainfall values and analysed the variations in the sum of squares of differences (SSE). The range of values that gave the lowest SSE was recorded as it indicated the best coincidence between the predictions and the observations of crust stages. This range was represented by its mean value and its extent (vertical bars; Figure 3, Figure 4).

This method was repeated for each crust stage, each time using the whole set of observations.

Frequency analysis on meteorological data

1970-2005 rainfall data were used to calculate the frequencies of occurrence of crust stages before seedling emergence. Data were recorded at the national meteorological station (Météo-France data, St Quentin Roupy), located in the same area about 20 km from the experimental site. Frequencies were calculated for several sowing dates and several initial seedbeds considering the values of cumulated rainfall required to reach the different crust stages determined in our study. The seedlings were assumed to take about 80 cumulated degree-days over a base temperature of 3.5°C to simulate the case of a sugar beet crop (Dürr et al., 2001).

Figure III.1

Aggregate stability in relation with soil sample water content of the different plots (dataset1): (a) mean of the three tests; (b) fast wetting; (c) slow wetting; (d) stirring after ethanol pre-wetting. Two plots (P13 sugarbeet and P18 flax) were sampled several times with various moisture conditions from sowing.

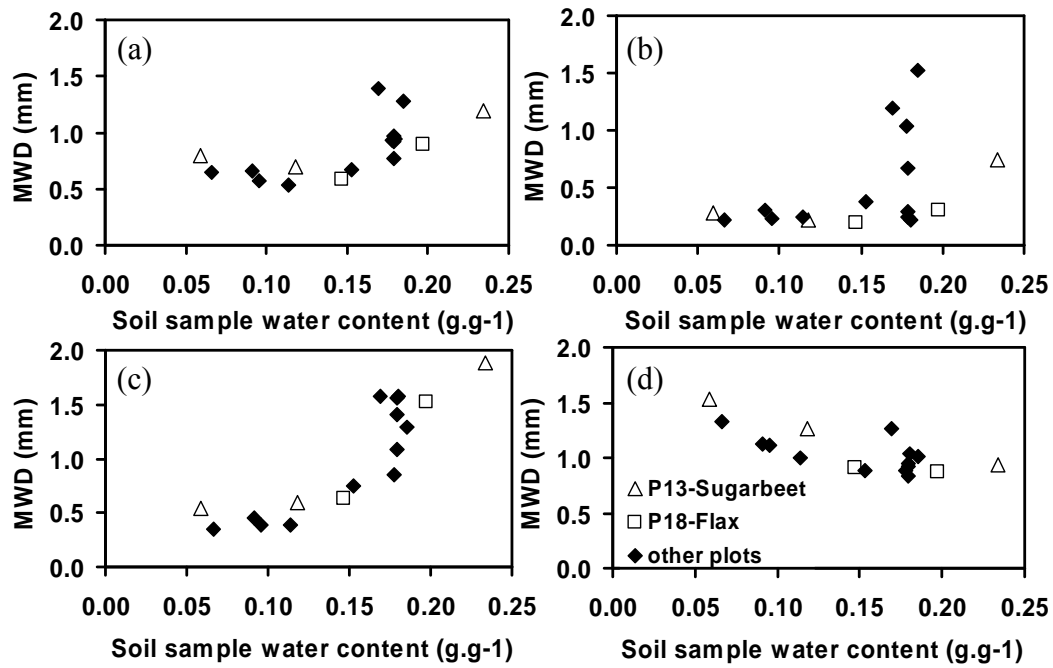


Table III.4

Rainfall for spring and autumn seasons (March to May and October to December) for 2004, 2005 and on average during 1993-2005.

Rainfall (mm)	01 March to 31 May	01 October to 31 December
2004	75	108
2005	119	85
Average 1993-2005	128	167

Figure III.3

Cumulated rainfall needed to reach the different structural stages of soil crusting (F1- to F1+); as a function of seedbed structure (fine to coarse). Vertical bars are the range of rainfalls that gave the lowest sum of squares of differences between the observed and predicted cumulated rainfalls needed to reach a given crust stage on the observed plots.

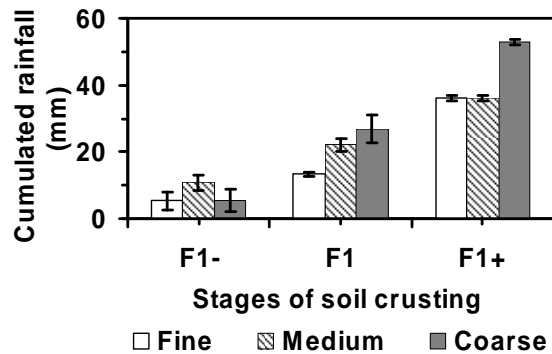


Figure III.4

Effect of the initial soil moisture on the cumulated rainfall needed to reach stages (a) F1 (structural) and (b) F1/2 (sedimentary) as a function of seedbed structure (fine and medium). Vertical bars are the range of rainfalls that gave the lowest sum of squares of differences between the observed and predicted cumulated rainfalls needed to reach a given crust stage on the observed plots.

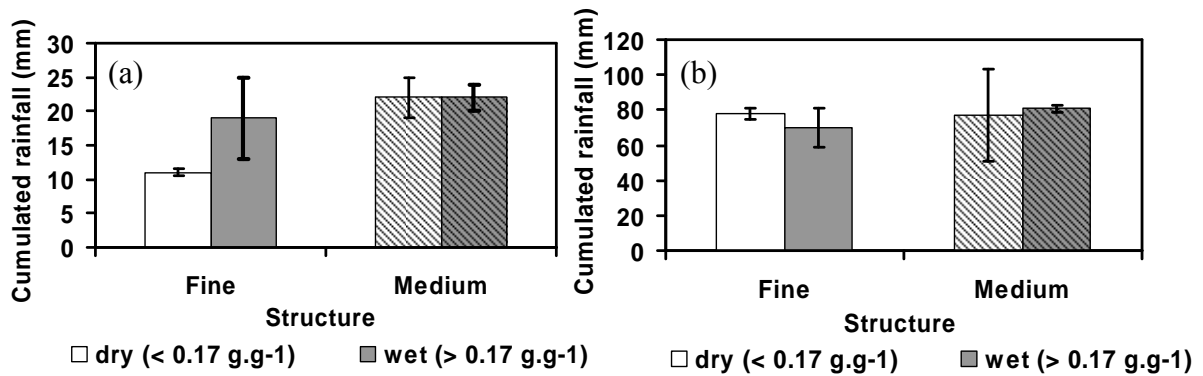
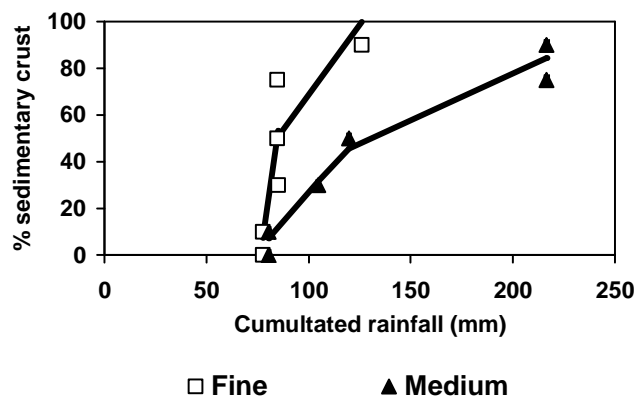


Figure III.5

Rate of sedimentary crust to the soil surface (stages F1/2- to F2+) as a function of cumulated rainfall from sowing, for fine and medium seedbeds. Horizontal bars are the range of rainfalls that gave the lowest sum of squares of differences between the observed and predicted cumulated rainfalls needed to reach a given crust stage on the observed plots.



2.3. Results

a. Variations of aggregate stability at sowing

The mean diameter after disintegration varied for the wet test of aggregate stability from 0.54 to 1.39 mm (mean of the three tests) between plots, i.e. unstable to stable according to the classification proposed by Le Bissonnais (1996). Figure 1 presents MWD for the three modalities of the stability test and their mean in relation with the sample water content. Whatever the treatment, MWD depended on water content. For the treatments with fast or slow wetting (Figures 1b and c), MWD was low (< 0.8) and tended to remain stable when the samples were initially in the dry range. Over a sample water content of 0.17 g g^{-1} , aggregate stability increased strongly with water content. Thus a threshold effect occurred for this water content value of about 0.17 g g^{-1} , which was also visible but less marked for the stirring treatment (Figure 1d). In the latter treatment, contrary to the two others, the MWD decreased fairly continuously with water content. These three relationships were valid for samples taken from different plots with similar soil textures, and also for the same plot with samples taken at several times after sowing with various water contents (P13 and P18). In contrast, little variation was observed between plots when stabilities were measured on dried samples. The mean diameter after disintegration was 0.61 to 0.95mm (mean of the three tests) i.e. unstable to medium. This is consistent with the low range of soil textures in the data set.

b. Pattern of crust development according to cumulated rainfall

Figure 2 shows the evolution of the state of crust development for the whole dataset of seedbeds. Observations were sorted according to seedbed structure, water content and cumulated rainfall. Each box represents the crust state observed for a cumulated value of rainfall for a given plot placed according to its initial seedbed characteristics. Changes of stages for the greatest differences (transition to a well defined structural crust, appearance of sedimentary deposits) are underlined (changes in grey level). The seedbeds were classified according to their water contents at sowing, ranging from 0.05 to 0.26 g g^{-1} . Two groups were distinguished, dry or wet plots, using the threshold water content of 0.17 g g^{-1} identified by the results from the aggregate stability variations, i.e. aggregates with low water content and sensitivity to slaking compared with aggregates with higher water content and less sensitivity to breakdown. Data recorded from the long-term experiment allowed obtaining a wide range of initial seedbed states.

Surface crusting developed quickly for fine seedbeds (Table 1) and low water content at sowing. As little as 2 mm rainfall was sufficient to observe the initiation of soil crusting (F1⁻); 11 mm rainfall was sufficient with fine unstable seedbeds to obtain a fully developed structural crust.

The cumulated rainfalls needed to reach the identified stages F1⁻ to F1⁺ (Table 2) were estimated first without and then with distinction of the different seedbed states. Without distinguishing the states, 9 mm, 22 mm and 36 mm were respectively necessary on average to reach stages F1⁻, F1 and F1⁺. No difference occurred between seedbeds with different initial structures for stage F1⁻ (Figure 3). A fully developed structural crust (stage F1) required 13, 22, 27 mm cumulated rainfall for respectively fine, medium and coarse seedbeds. The cumulated rainfalls necessary to reach F1⁺ were higher for the coarse seedbeds, 53 versus 36 mm for the others. The values also changed depending on the water content in the case of fine seedbeds. The F1 stages were reached more rapidly for lower cumulated rainfalls in the case of dry seedbeds compared with the wet ones (Figure 4a): respectively 11 vs 19 mm (F1). This effect was not visible for medium seedbeds and more advanced stages (F1/2, Figure 4b). There were insufficient cases of dry and wet sowings in the case of coarse seedbeds to study the effect of water content on crust development.

Considering more advanced stages of degradation, the first appearance of sedimentary crust (F1/2⁻) occurred for 23 mm of cumulated rainfall, but in most cases required as much as 50 mm (Figure 2). A monotonous relationship was obtained between the percentage of soil surface covered with sedimentary crust and cumulated rainfall. This relationship was adjusted to a Hill function. When separating fine and medium structures, the slope of this relationship was lower for medium seedbeds

Figure III.6

Distributions of crust resistance measured by the penetrometer in field (a, b) and in a laboratory experiment (c, d): (a) as a function of the soil crusting stage (F1 and F1/2, dry crusts); (b) as a function of the cumulated rainfall for the same crust stage F1 (dry crusts: in the case of a fine seedbed and for different initial seedbed moistures); (c) for dry crusts F1/2+ and F2 (water content <math> < 0.04 \text{ g.g}^{-1}</math>); (d) for wet crusts F1 and F2 (water content 0.13-0.16 $\text{g.g}^{-1}</math>). The characteristics of each distribution are given in the captions.$

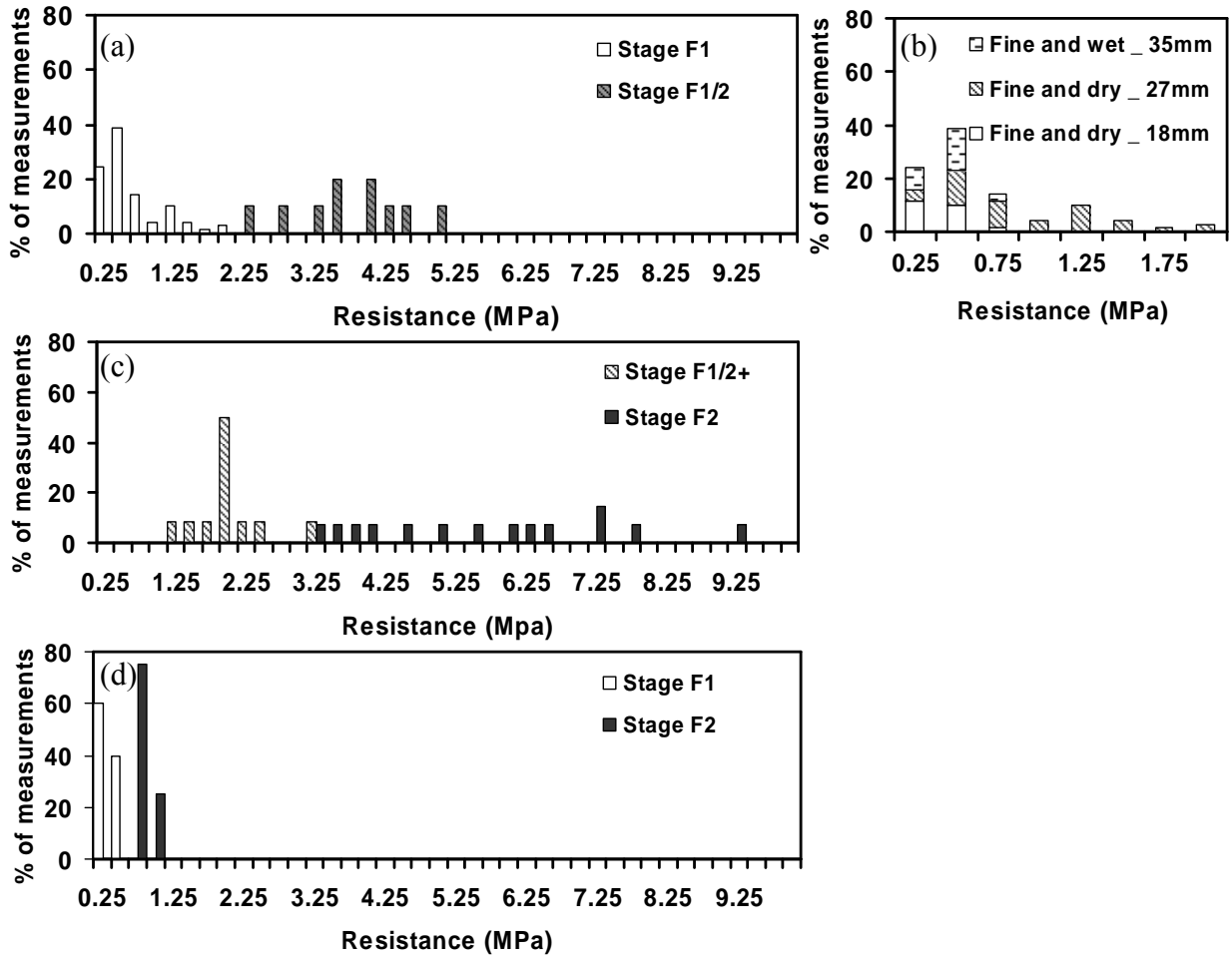
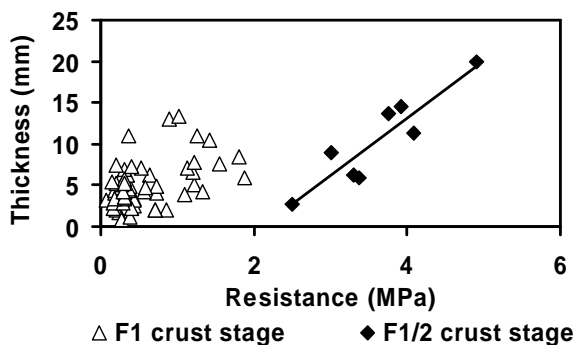


Figure III.7

Relationship between the mechanical resistance of the crust and its thickness determined from penetrometer measurements.



with more clods (Figure 5). The stage with 50% of soil surface covered with sedimentary crusts was reached for 85 and 120 mm for fine versus medium seedbed structure. Not enough plots with coarse seedbeds reached these stages to establish such a relationship.

c. Penetration resistance

Visual assessment of soil crusting was completed by penetrometer measurements for structural and sedimentary states of soil crusting. For dry crusts ($< 0.06 \text{ g g}^{-1}$ water content), resistance increased as a function of soil crusting stage: $0.55 \pm 0.43 \text{ MPa}$ on average for structural stage F1, $3.54 \pm 0.83 \text{ MPa}$ for sedimentary stage F1/2 (Figure 6a). For the same structural stage F1, the resistance measured varied according to the cumulated rainfall: for a dry and fine initial seedbed, resistance was 0.30 MPa on average after 18mm rainfall versus 0.80 MPa after 27mm. This increase in crust strength was not linked to an increase in crust thickness (Figure 7); suggesting that the increase of crust strength with cumulated rainfall was due to an increase of crust density under raindrop impacts. By contrast, there was a linear relationship between crust resistance and its thickness for the sedimentary stage related to the accumulation of sedimentary deposits. Crust resistance also greatly depended on water content: for stage F1, penetrometer resistance of the crust decreased to 0.10 MPa (± 0.05) for water contents over 0.20 g g^{-1} (not shown).

Figures 6b and c show the distributions of crust resistance in the laboratory experiment. Measurements for the same crust stages remained within the same range of magnitude. As under field conditions, crust resistance increased as a function of soil crusting stage and depended on water content. It reached 9 MPa for dry F2 stages which were not characterized by penetrometer resistance measurements in the fields as these stages were not observed during the two field experiment years. Even for wet crusts, sedimentary crusts were systematically more resistant than structural ones.

d. Climatic analysis of the risk of soil crusting during crop emergence

We used the cumulated rainfall thresholds obtained for different initial seedbed states to obtain an estimate of the risk to reach the different stages of soil crusting at the time seedlings emerged at the soil surface for several sowing dates under the climatic conditions of northern France (Table 3). It indicated that this risk differed greatly between the different types of seedbed. To reach structural stage F1, which can be sufficient to block emergence as the crust dries, the risk was very high for a fine, initially dry seedbed: 75 %. It remained high for a fine but initially wet seedbed, 60 %; and it decreased significantly in the case of a coarse seedbed: 44 %. However the risk of seedlings being blocked remained high whatever the structure of the seedbed. This also depends strongly on the fact that the crust dries as indicated by the penetrometric measurements.

2.4. Discussion and conclusion

This study was carried out to analyse the rate of seedbed surface crusting under rainfall, as influenced by the seedbed structure and water content at sowing. Our results give new elements for predicting the evolution of the successive states of seedbed surfaces from the beginning of soil crusting (hardly identifiable structural crust) to a sedimentary crust. Our study focused on the initial stages of crust occurrence as they can be sufficient to block emergence and have been given little attention in previous studies. A quantitative viewpoint was adopted for the final objective for predicting soil crusting. We evaluated the value of cumulated rainfall needed to reach the successive crust stages, taking into account the initial seedbed characteristics, mainly structure and water content. We observed that the seedbed structure had a significant effect on the rate of crust formation for the first stages as well as for more advanced ones, with lower cumulated rainfalls needed for fine seedbeds to reach each stage. The order of magnitudes of those differences is 5 to 15 mm rainfall which makes observation difficult under classical simulated rainfalls. However the differences are observable under field conditions and can greatly impair emergence kinetics and final percentages, as shown by our climatic analysis. In the case of fine seedbeds an additional effect of water content was observed: fine and dry seedbeds at sowing were the most sensitive to soil crusting, as often suggested in crusting

Table III.5

Risks of reaching crust stages F1 and F1/2- before seedling emergence for sowing dates from the 1st March to the 31st May (1970-2005), considering the cumulated rainfall values required for several initial seedbeds.

Crust stage	Type of seedbed		Rainfall Values (mm)	Risk (%)
	structure	moisture		
F1	fine	dry	11	75
		wet	19	60
	coarse	all	27	44
F1/2 -	all	all	66	9

studies (Duval and Boiffin, 1994a) and also by growers, but not quantified. The increased sensitivity of fine dry seedbeds to degradation can be explained by the slaking mechanism which is predominant under these conditions and less involved in the breakdown of large or wet aggregates (Le Bissonnais, 1988; Truman et al, 1990; Legout et al., 2005). Our results will help to quantify and better evaluate the effects of soil tillage and sowing dates on emergence.

Soil sensitivity to degradation is often evaluated by tests of aggregate stability. This mainly depends on soil texture and soil water content. In our study, we performed aggregate stability tests not only on dried aggregates but also on aggregates whose water contents at the moment of sowing were conserved. This type of test is not usually performed, although it has been suggested that aggregate stability measured on dry aggregates may not be a good indicator of soil behaviour under field conditions as stability greatly depends on aggregate water content (Duval and Boiffin, 1994a; Le Bissonnais, 1996). Each modality of the test allowed focusing on the different mechanisms involved in aggregate breakdown: slaking, micro-cracking and mechanical breakdown in relation with aggregate cohesion. For plots with similar textures, there was a significant relationship between aggregate stability and water content, with a threshold effect for about 0.17 g g^{-1} of water content. The seedbed water content at the moment of sowing was a useful factor for sorting seedbed state data. This result was unexpected as aggregate stability varied through time for a same plot in relation with variations of water content of soil after sowing. Considering soil water content before each rainfall sequence may be a better way of determining its effect on soil crusting. However, we showed that the initial water content of soil influenced the speed of soil crusting. Aggregate disintegration mainly occurs during the first 3-5 millimetres of rainfall (Legout et al., 2005).

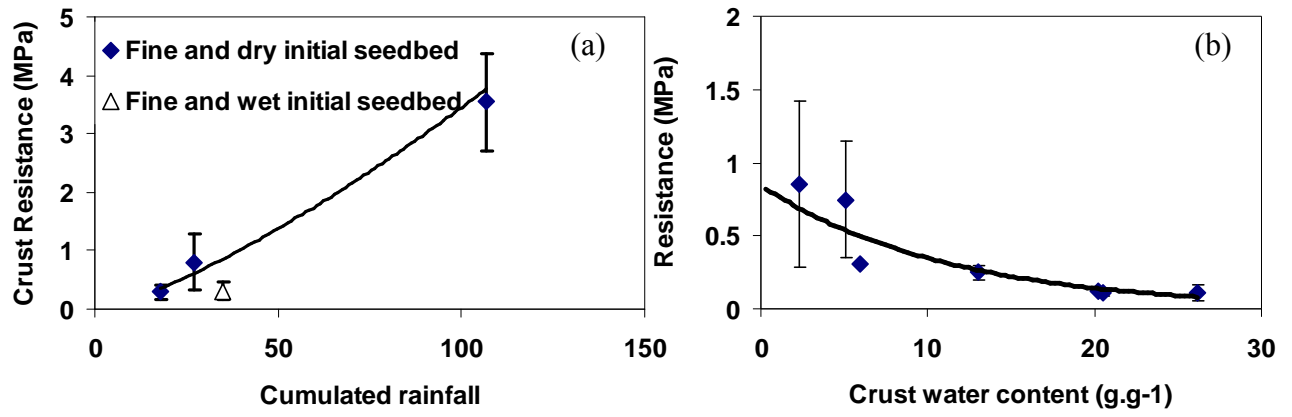
For the same structural stage, mechanical resistance increased with cumulated rainfall due to an increase of density under drop impacts. As this directly influences emergence (Souty and Rode, 1993), in addition to considering the crust stage account had to be taken of crust resistance to predict seedling emergence.

Since we quantified cumulated rainfall values for soil crusting according to seedbed states, it was possible to estimate the risk of crust occurrence for this soil under given climatic conditions. The new cumulated rainfall greatly modified the risk of occurrence of different crust stages as shown by our climatic analysis. Taking into account all the seedbed conditions together can only be achieved by modelling.

The last point is that our study remained limited to clay-loamy soils. Laboratory experiments under rainfall simulators delivering low rainfall intensities and tests of aggregate stability on wet samples could help to classify surface sensitivity and adapt our model parameters. For plots with similar textures, we found a clear relationship between aggregate stability and water content, with a threshold effect for about 0.17 g g^{-1} water content. This value corresponds to the inflexion point of the retention curve established for the soil studied (Sillon et al., 2003). The slope to the inflexion point is used as an index for predicting soil physical properties and behaviours (Dexter, 2004a, b and c). The same threshold value was observed in laboratory experiments that monitored the process of soil crusting under simulated rainfall (Leonard et al., unpublished data). This type of critical point for soil behaviour could help to adapt our model to different soils.

Figure III.8

Evolution de la résistance de la surface du sol mesurée au pénétromètre pour plusieurs types de lits de semences (a) en fonction de la pluie cumulée depuis le semis; (b) en fonction de la teneur en eau pour une croûte de type structural.



3. SYNTHÈSE EN VUE DE LA MODELISATION

Les éléments présentés fournissent un certain nombre d'éléments chiffrés qui vont permettre d'introduire dans le module de prévision des levées sous croûte :

- les effets des états initiaux du lit de semences, en terme de taille des agrégats et d'humidité, sur la vitesse de formation de la croûte ;
- des variations de stades des croûtes formés, en prenant en compte les premiers stades de formation, qui nous l'avons vu altèrent déjà sensiblement les taux de levée, et les stades sédimentaires ;

Dans le modèle de levée sous croûte envisagé, la décision de franchissement dépend de la confrontation entre la force d'émergence des plantules et la résistance de la croûte. Il est donc aussi nécessaire de pouvoir prévoir l'évolution de la résistance de la surface du sol au cours de la dégradation, en fonction des stades de développement de la croûte.

Par ailleurs, les données acquises concernent un sol limono argileux. Nous devons envisager les moyens qui permettraient d'étendre les prévisions à d'autres types de sol. Nous allons résumer les indications apportées par des expérimentations complémentaires réalisées sous simulateur de pluie.

3.1. Eléments complémentaires sur l'évolution de la résistance du sol

a. Prévision de la résistance du sol au cours de la dégradation

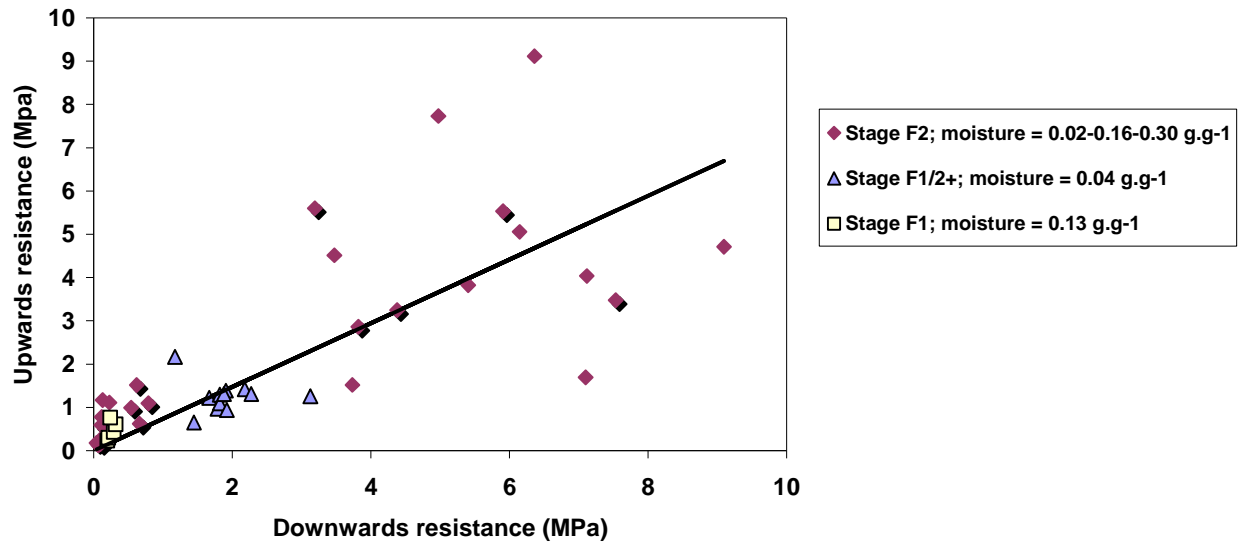
Dans la partie précédente, nous avons présenté des éléments permettant de prévoir les différents faciès caractéristiques du développement d'une croûte, structural et sédimentaire. Nous avons associé à ces différents états de la surface, des valeurs de leur résistance à la pénétration. La gamme des résistances mesurées pour des croûtes sèches (teneur en eau inférieure à 0.06 g g^{-1}), était de $0.55 \pm 0.43 \text{ MPa}$ dans le cas d'une croûte structurale F1, à $3.53 \pm 0.83 \text{ MPa}$ pour une croûte sédimentaire F1/2. La gamme de valeurs mesurées dépend du type de surface, c'est-à-dire de son niveau de dégradation et de sa teneur en eau. Le coefficient de variation reste par contre assez similaire entre les situations, en moyenne 0.4 ± 0.1 . Il tend à être légèrement inférieur dans le cas de croûtes humides (teneur en eau supérieure à 0.16 g.g^{-1}). Pour chaque situation, les distributions des valeurs de résistance peuvent être ajustées à une loi gamma, qui permet de décrire cette variable de manière continue et asymétrique. Les paramètres de cette distribution sont a et s , qui représentent la forme et l'échelle de la distribution. Le produit de ces deux paramètres est égal à la moyenne de la distribution.

Cependant ces distributions, qui caractérisent un état donné de la surface du sol, ne permettent pas de décrire une évolution continue de la résistance au cours de la dégradation et des cycles de dessèchement - réhumectation. Aussi, dans l'objectif de la modélisation, avons-nous cherché à relier la résistance du sol à des variables continues et quantitatives représentant l'état du sol à un instant t .

Nous avons essayé d'établir des relations continues entre la résistance de la croûte et deux indicateurs de l'état de la surface : la pluie cumulée depuis le semis et la teneur en eau de la surface du sol (figure III.8).

La pluie cumulée est utilisée comme un indicateur de l'intensité de dégradation de la surface (figure III.8a). La forme retenue pour l'ajustement est une loi puissance. Les paramètres de cette relation dépendent de l'état initial de la surface. Pour un cumul de pluie similaire, la résistance d'un sol initialement fin et sec est supérieure à la résistance d'un lit de semences moins sensible à la dégradation. Nous avons peu de points pour valider la forme de la relation adoptée. Mais on peut effectivement envisager qu'avant d'atteindre le stade sédimentaire, la résistance de la croûte augmente régulièrement au fur et à mesure de son évolution jusqu'à atteindre une valeur maximale équivalente à la densité maximale du matériau (Fies et Castelaogegunde, 1996). Ensuite, au cours du stade sédimentaire, la résistance continue à augmenter avec l'épaisseur du matériau au fur et à mesure de l'accumulation des dépôts sédimentaires (figure III.7).

Figure III.9
Relation entre la résistance ascendante et la résistance descendante mesurée par un pénétromètre



La figure III.8b montre que pour un même stade de développement de la croûte (ici stade structural F1), la résistance de la croûte varie en fonction de sa teneur en eau selon une relation exponentielle. Ces données sur l'évolution en continu de la résistance des croûtes seront utilisées dans le nouveau module proposé pour prévoir l'évolution de la résistance au cours du temps.

b. Relation entre les mesures pénétrométriques ascendantes et descendantes

Toutes les mesures présentées ci-dessus ont été réalisées au champ. Les conditions au champ permettent uniquement de réaliser des mesures dans le sens descendant ; c'est-à-dire de la surface du sol vers le lit de semences, soit le sens inverse de la poussée des plantules. Afin d'évaluer la différence de valeur de résistance selon le mode de traversée ascendant ou descendant et d'évaluer si cette différence est de même ordre selon l'état de la croûte, nous avons réalisé une expérience complémentaire en laboratoire en réalisant des mesures par voies ascendantes et descendantes sur les mêmes croûtes (voir chapitre I).

La relation entre les deux types de mesures, ascendantes et descendantes, est linéaire (figure III.9). La résistance de la croûte mesurée dans la direction ascendante est inférieure à la résistance descendante d'un facteur 0.25. Le coefficient r^2 est cependant relativement faible, bien que les mesures ascendantes et descendantes aient été réalisées à des endroits visuellement identiques du point de vue de l'état de dégradation. La variabilité de la relation est due aux variations de la résistance de la croûte, malgré un faciès localement identique, ce qui avait été suggéré lors de l'étude des modes de franchissement.

3.2. Résultats complémentaires sous simulateur de pluie

Dans le cadre de la thèse, nous avons choisi d'étudier le développement de la croûte en conditions naturelles. Cette approche nous a permis d'obtenir des éléments quantitatifs utilisables pour décrire la formation de la croûte pour différents types de lits de semences dans le nouveau modèle de levée sous croûte envisagé. Cependant la lourdeur de ce type d'expérimentations limite le nombre de situations observables. Il est difficile d'étendre l'étude à d'autres sols ou à d'autres climats.

Aussi dans un objectif de modélisation, et afin de parvenir à prévoir le développement de la croûte dans une plus large gamme de situations (plusieurs sols, plusieurs climats), une approche au laboratoire devrait être utilisée de manière complémentaire pour pallier aux limites des approches *in situ*.

De nombreuses études concernant l'effet de différents facteurs sur la sensibilité à la dégradation s'appuient sur des tests de stabilité des agrégats au laboratoire (Le Bissonnais, 1988; Truman et al., 1990 ; Legout et al., 2005). Ces tests soumettent des agrégats de petite taille à des humectations plus ou moins brutales et peuvent permettre de distinguer les différents processus spécifiques de la dégradation du sol et l'origine de leurs variations. Ces tests ont l'avantage d'être standardisés et bien contrôlés. Ils permettent de caractériser différents effets mais ne considèrent pas le processus dans sa complexité au champ. Les agrégats d'un lit de semences sont de différentes tailles, agencés de manière plus ou moins organisée dans l'espace. Ils subissent des alternances humectation/ dessiccation. Une autre façon d'aborder expérimentalement le processus en conditions contrôlées, est l'observation de l'extension des croûtes pour des surfaces de sol soumises à des pluies simulées.

L'approche en conditions contrôlées sous simulateur de pluie présentée ici est issue d'un travail mené dans l'équipe où s'est déroulé le travail de thèse (Leonard et al., à soumettre ; Gallardo-Carrera et al., 2006). Elle est basée sur le suivi de l'extension de la croûte à la surface d'échantillons de sols tamisés par classes de tailles et soumis à un simulateur de pluie. Ce suivi permet d'analyser l'effet de la taille des agrégats et de leur humidité pour différents matériaux. Ces expérimentations permettent d'observer la vitesse d'extension de la croûte et pas seulement le mécanisme de désagrégation (comme pour les tests de stabilité). Cependant le mode d'organisation des agrégats ne vise pas à restituer celui d'un lit de semences et les caractéristiques des pluies diffèrent des pluies rencontrées au champ.

Figure III.10
Dispositif des bacs de sol places sous simulateur de pluie.

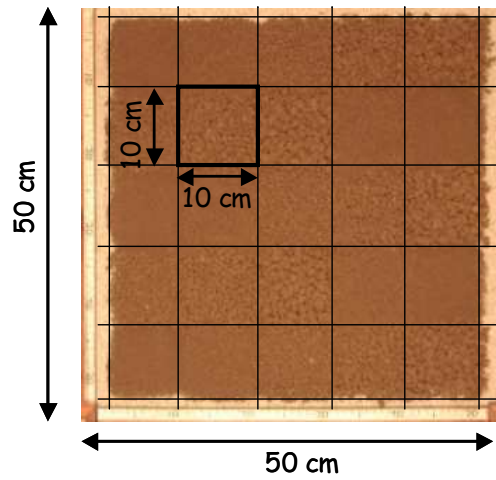


Figure III.11
Effet de la taille des agrégats sur la vitesse de formation des croûtes (issu de Léonard et al., à soumettre).

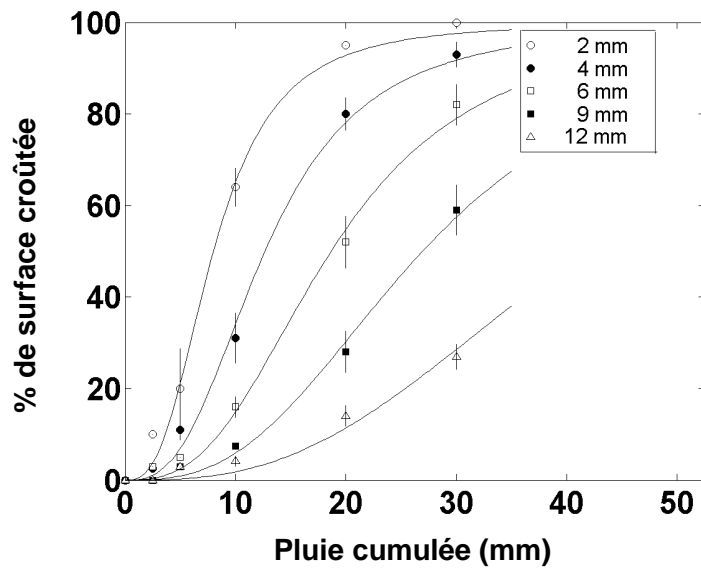
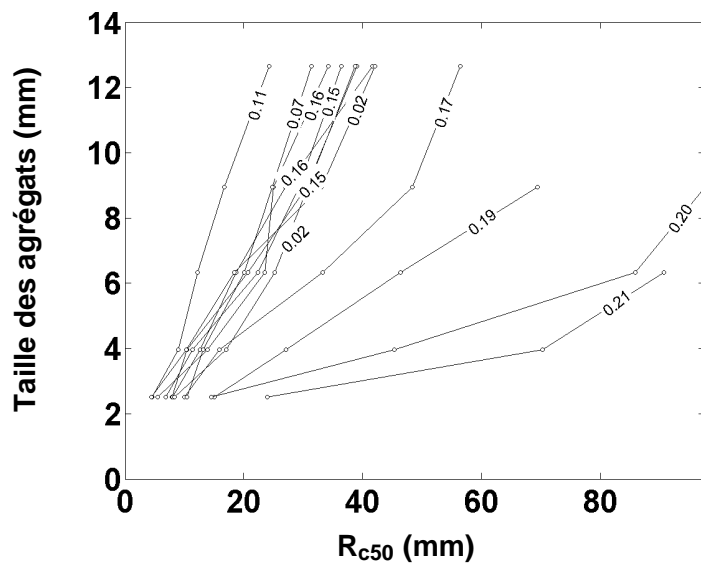


Figure III.12
Effet de l'humidité initiale sur la vitesse de formation des croûtes (issu de Léonard et al., à soumettre).



L'étude a été réalisée avec le sol de Mons-en-Chaussée (argile 0.14 g.g^{-1} , matière organique de 0.016 g.g^{-1}). Cinq classes de tailles d'agrégats (2-3.15 mm, 3.15-5 mm, 5-8 mm, 8-10 mm, 10-16 mm), ont été soumises à un simulateur de pluie avec une intensité de 30 mm/h, avec des humidités initiales successivement étudiées allant de 0.02 à 0.21 g.g^{-1} (figure III.10). La quantité de pluie apportée allait de 20 à 50 mm selon la sensibilité des traitements à la battance. La variable observée est la proportion de surface couverte par une croûte. Elle est identifiée en estimant le pourcentage de la surface où les contours des agrégats ne sont plus visibles. Des relations continues ont été établies entre le pourcentage de surface couvert par une croûte et la quantité de pluie subie.

Les résultats ont montré un effet important de la taille des agrégats sur la vitesse de formation de la croûte, quelle que soit la teneur en eau initiale de la surface. Plus les agrégats sont fins et plus la croûte est rapidement formée à la surface de l'échantillon. La figure III.11 montre les relations obtenues pour les différentes tailles d'agrégats (représentées par la moyenne géométrique de la classe) dans le cas d'une humidité initiale de 0.16 g.g^{-1} .

L'effet de la teneur en eau initiale sur la sensibilité du sol à la dégradation est illustré dans la figure III.12. Ce graphique représente la pluie cumulée nécessaire pour atteindre 50% de la surface croûtée (R_{c50}) en fonction de la taille des agrégats, variable utilisée comme indicateur de la sensibilité à la battance. Chaque courbe correspond à une teneur en eau initiale. Il apparaît qu'en dessous d'une valeur de $0.16-0.17 \text{ g.g}^{-1}$, la résistance du sol à la dégradation est faible et ne semble pas dépendante de la teneur en eau. Quand la teneur en eau initiale dépasse cette valeur, la résistance du sol augmente avec la teneur en eau.

Cette approche complémentaire au laboratoire présente l'intérêt de pouvoir contrôler et combiner indépendamment les facteurs étudiés contrairement aux expérimentations au champ où les facteurs granulométrie des agrégats et teneur en eau ne sont pas indépendants ; un des intérêts du champ étant de le montrer. L'effet du facteur humidité est plus difficile à observer en conditions réelles où il fluctue rapidement et fortement.

Les effets du facteur granulométrie sont également plus difficiles à analyser au champ où la structure de la surface du lit de semences est hétérogène, contrairement aux échantillons de sols utilisés au laboratoire: même les lits de semences les plus grossiers observés au champ contiennent de la terre fine plus sensible à l'encroûtement.

Cette étude confirme les résultats mis en évidence au champ. On observe un effet important des deux facteurs étudiés, granulométrie et humidité, sur la dynamique de formation de la croûte. En ce qui concerne le facteur humidité, il a été montré que la sensibilité du sol à la battance diminue au fur et à mesure que l'humidité augmente avec une valeur seuil de la teneur en eau d'environ 0.17 g.g^{-1} ; et ceci quelle que soit la taille des agrégats considérés. Ce seuil de 0.17 g.g^{-1} a également été mis en évidence au cours de l'étude réalisée au champ. Il correspond au point d'inflexion de la courbe de rétention établie pour le sol étudié.

Cependant les effets de l'humidité et de la granulométrie, sur les quantités de pluies nécessaires à la formation de la croûte, sont plus marqués au laboratoire. En ce qui concerne le facteur humidité, l'explication principale réside dans le fait que l'intensité de la pluie délivrée par le simulateur (30 mm/h) est très largement supérieure à l'intensité généralement observée pour les pluies naturelles (inférieure à 10 mm/h dans 80% des cas; Cerdan et al., 2002). Cette forte intensité de pluie favorise le mécanisme d'éclatement des agrégats en raison de leur immersion rapide. La formation de la croûte est donc probablement accélérée, particulièrement dans les situations où ce mécanisme de désagrégation prédomine (faibles teneurs en eau). De plus, les alternances de séquences pluvieuses et de périodes de dessèchement en conditions naturelles, et les brutales variations de la teneur en eau de la surface du sol qui en découlent, amoindrissent sans doute en partie les effets de ce facteur.

Les conditions en laboratoire ne permettent pas d'alimenter directement un module de prévision du développement de la croûte que ce soit du point de vue de la structure du sol qui est homogène ou des caractéristiques de la pluie simulée dont l'intensité est élevée. Ce type d'approche permet de hiérarchiser les facteurs influençant le développement de la croûte et de comprendre de quelle manière

ils peuvent interagir entre eux. Elle pourrait également être utilisée pour étendre la gamme de situations et de facteurs étudiés et intégrés dans le modèle. Si les paramètres des courbes de la dynamique de développement de la croûte ne sont pas directement utilisables dans le modèle proposé, les expériences menées pourraient être utilisées pour apporter des facteurs d'adaptation des seuils intégrés dans le modèle.

La valeur de la teneur en eau au point d'inflexion de la courbe, correspondant au S point (Dexter, 2004), permettrait de distinguer un seuil de sensibilité à la dégradation. En dessous de cette valeur, les tests de stabilité des agrégats renseigneraient sur la sensibilité des sols à la battance. Au dessus de cette valeur, l'exploration par simulation de pluie sur des agrégats tamisés donnerait les valeurs de R_{C50} en fonction de la teneur en eau, nécessaires pour les différents types de sols. A partir de cela, des coefficients d'ajustement pourraient être déduits et appliqués aux seuils de pluie cumulée établis pour un sol limono argileux.

En conclusion, les deux approches présentées apportent chacune des éléments pour prévoir la dynamique de développement de la croûte. Concernant l'approche au laboratoire :

- les expérimentations sont de courtes durées : il est donc possible de tester l'effet d'une large gamme de facteurs sur la vitesse de formation des croûtes. Par exemple, il peut être envisagé d'étudier l'effet de la composition du sol;
- les facteurs étudiés sont complètement contrôlés. Ils peuvent être étudiés de manière isolés ou combinés à d'autres facteurs;
- cependant le dispositif utilisé et les fortes intensités des pluies simulées ne permettent pas de restituer une dynamique de formation de la croûte, telle qu'elle se passe au champ.

En ce qui concerne les essais au champ:

- l'assemblage des éléments structuraux permet d'observer l'ensemble des stades de formation de la croûte, le passage des croûtes structurales à sédimentaires, au cours du temps et dans l'espace.
- les cumuls de pluie observés fournissent des éléments quantitatifs sur la formation de la croûte permettant de renseigner un modèle dynamique de développement de la croûte;
- mais ces essais doivent être menés et suivis sur un ensemble de parcelles et d'années important. Il est donc difficile d'étendre l'étude à l'analyse d'autres facteurs de variation comme par exemple d'autres types de sol et de climats.

Les deux types d'approche permettent d'améliorer les connaissances sur le développement de la croûte. On doit chercher à combiner les informations fournies par ces deux types d'expérimentation pour prédire la formation de la croûte dans une plus large gamme de situations.

3.3. Proposition pour la modélisation

Au cours de ce chapitre, nous avons vu que les caractéristiques initiales du lit de semences influencent la dynamique de dégradation de la surface du sol. Ces caractéristiques sont la granulométrie des agrégats présents à la surface du lit de semences, et la sensibilité à la battance. Nous avons également montré que pour un même type de sol limono argileux, la stabilité des agrégats dépend principalement de la teneur en eau. Un seuil de teneur en eau initiale, pour lequel la sensibilité à la dégradation est modifiée, est mis en évidence dans l'ensemble des méthodes utilisées (tests de stabilité, sol sous simulateur de pluie, champ).

Par conséquent le risque d'obtenir une croûte pendant la phase d'émergence varie notablement en fonction de ces conditions initiales : granulométrie, stabilité et/ou humidité (tableau III.5). Ces facteurs de variation n'étaient pas pris en compte dans l'ancien modèle. Ils seront intégrés comme variables d'entrée de la nouvelle version proposée afin de tester l'ampleur de leurs effets en interactions avec les autres facteurs de variation de la levée sous croûte.

La pluie cumulée depuis le semis est utilisée comme un indicateur de l'état de la surface. Elle permet de prévoir l'évolution temporelle à la fois du stade de développement de la croûte et de sa résistance

Tableau III.6

Valeurs de pluie cumulée nécessaires pour atteindre les différents stades de développement de la croûte (jusqu'au stade sédimentaire) en fonction des caractéristiques du lit de semences

Données d'entrée du modèle	Texture				
	Argile 0.17-0.25 g g ⁻¹ Matière organique 0.015-0.021 g g ⁻¹				
	Granulométrie des agregats (agregats supérieurs à 20mm)	Fin (0-15 g 100g ⁻¹)	Intermédiaire (15-30 g 100g ⁻¹)	Grossier (30-45 g 100g ⁻¹)	
	Stabilité (MWD)	Instable (0.5-0.8 mm)	Stable (0.8-2 mm)		
Teneur en eau	< 0.17 g g ⁻¹	> 0.17 g g ⁻¹			
Stades de développement de la croûte	F1-	5	5	10	10
	F1	11	19	22	27
	F1/2-	66	66	66	66

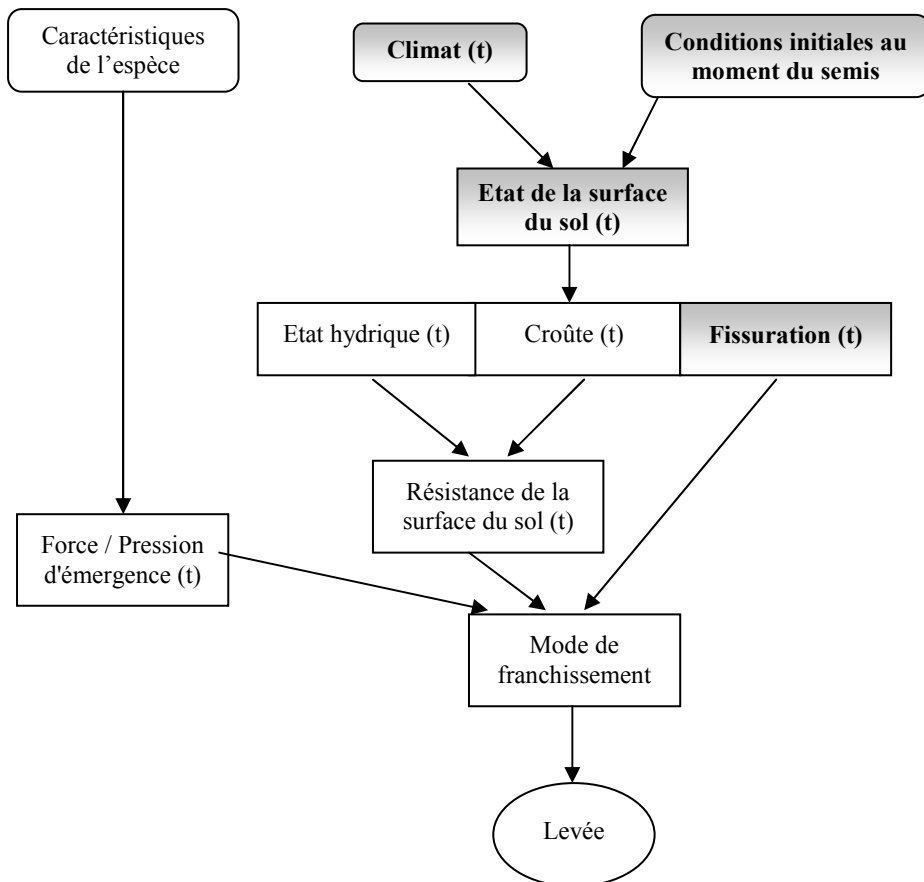
F1-, croûte structurale à peine indentifiable; F1, croûte structurale standard; F1/2-, début de croûte sédimentaire (surface <10%)

mécanique. Le tableau III.6 présente les valeurs de pluie nécessaires pour atteindre les différents stades critiques du développement de la croûte qui seront intégrées dans le modèle (F1-, F1, F1/2-). Elles tiennent compte de l'effet des caractéristiques initiales du lit de semences que nous avons pu observer et quantifier *in situ*. Au-delà de la valeur de pluie cumulée correspondant au premier stade sédimentaire (66 mm ; F1/2-), la proportion de croûte sédimentaire est décrite selon une fonction de Hill dont la pente dépend de la structure initiale du lit de semences.

Nous n'avons établi les valeurs de pluie cumulée, paramètres du modèle, que dans le cas spécifique d'un sol limono argileux. Il faut aussi rappeler qu'elles sont spécifiques des intensités de pluie telles que celles d'un climat du nord de la France. Elles pourraient être adaptées à d'autres situations par le biais d'hypothèses, en les estimant d'après les résultats des tests de stabilité ou d'après des résultats de simulation de pluie tels que ceux présentés.

CHAPITRE IV

Dynamique de fissuration de la surface des lits de semences



1. CARACTERISATION DE LA DYNAMIQUE DE FISSURATION DE LA SURFACE DU SOL.²

1.1. Introduction

Des fissures se développent à la surface du sol au moment de son retrait pendant la phase de dessèchement. Dans la littérature, la fissuration du sol est surtout étudiée à cause de ses effets sur les processus de transport de l'eau et de l'oxygène dans le sol (Rieu and Sposito, 1991) et sur la fragmentation du sol (Samouëlian et al, 2003). Nous avons étudié l'évolution de la fissuration à la surface du sol en raison de son impact sur l'émergence des plantes en cas d'encroûtement de la surface du lit de semences. Quand une croûte se forme et sèche à la surface du sol au moment où les plantes émergent, elle oppose une résistance au passage des plantules. Dans le chapitre II, nous avons vu qu'une proportion importante de plantules parvient à franchir cet obstacle en utilisant les fissures formées à la surface du lit de semences, particulièrement pour les espèces exerçant de faibles forces d'émergence, telles que la betterave sucrière et le lin pour lesquelles la surface constitue un obstacle dès les premiers stades de dégradation alors que la résistance à la pénétration est encore relativement faible. La proportion de plantules levées ayant utilisé le réseau de fissures pour franchir la croûte peut être considérable selon l'espèce considérée et le stade de développement de la croûte : 43 % pour la betterave et 76 % pour le lin face à une croûte structurale F1, 93 % pour la betterave face à une croûte sédimentaire F1/2+.

Différentes méthodes ont été utilisées pour observer ces réseaux de fissures. Après les avoir présentées, nous indiquerons la méthode que nous avons mise au point (collaboration Michel Herbin, laboratoire CRESTIC-LERI, Université de Reims), pour caractériser des réseaux de fissures développés à la surface de lits de semences.

a. Méthodes de caractérisation

Les approches expérimentales adoptées dans les études décrivant la fissuration du sol permettent une caractérisation en 2D ou en 3D de la fissuration. Ces méthodes ont déjà fait l'objet d'un recensement (Samouëlian, 2004).

Les méthodes destructives

L'utilisation d'une solution colorante comme le bleu de méthylène permet de mieux visualiser la macroporosité qui est ensuite analysée par des observations directes sur le terrain (Trojan et Linden, 1998). Plusieurs auteurs ont choisi de prélever des échantillons du sol puis de les imprégner avec de la résine (Scott et al., 1986; Hallaire, 1994; Velde et al., 1996; Oleschko et al., 1997; Velde, 2001). Généralement, la résine contient un composé fluorescent qui permet ensuite de visualiser et photographier les fissures sous lampe à ultraviolets. Cette technique permet un contraste important entre le sol (couleur sombre) et la porosité (couleur claire). Les images en 2D produites peuvent ensuite être facilement caractérisées par analyse d'images.

En reproduisant cette analyse bi-dimensionnelle en série, il est possible de déduire une caractérisation en 3D de la structure, et du réseau de fissures en particulier (Cousin et al., 1996 ; Aubertot et al. 1999). Il s'agit de la méthode des coupes sériées. L'échantillon de sol est érodé successivement à l'aide d'une meule. A chaque coupe, une analyse en 2D est effectuée. L'ensemble des informations 2D permet de reconstruire une image en 3D.

La tomographie aux rayons X peut aussi être utilisée pour une caractérisation en 3D d'un échantillon de sol. La densité de la matière est déduite de la quantité de rayonnement qui la traverse. L'image 3D est reconstituée à partir des données obtenues sous différents angles. Cette méthode a par exemple été utilisée dans l'observation des galeries de vers de terre (Pierret et al., 2002). Anderson et al. (1990) ont

² Ces résultats sont publiés dans un article présenté au 17^{ème} congrès de l'ISTRO, Kiel, Août 2006. Aude Gallardo-Carrera, Carolyne Dürr, Michel Herbin, Yves Duval, Jérôme Lingrand. Analysis of the crack pattern of seedbeds in a silt loam soil. Soil Management for Sustainability. Advances in GeoEcology 38: p 79-85.

montré son efficacité pour des pores entre 1 et 5 mm de diamètres. Cette technique est cependant coûteuse et généralement accessible uniquement en milieu hospitalier.

Ces techniques de visualisation en 3D ne sont pas adaptées à notre étude puisque c'est uniquement la fissuration à la surface du sol qui nous intéresse. D'autre part les méthodes présentées ci-dessus sont des méthodes destructives et donc ponctuelles; elles ne permettent pas une analyse dynamique de la fissuration.

Les méthodes non destructives

Des méthodes de caractérisation de la fissuration par des mesures de la résistivité électrique sont en cours de développement (Samouëlian et al., 2003, 2004, 2005). Elles mesurent la capacité du sol à laisser passer le courant électrique; les fissures constituant des zones anisotropes. Selon la configuration dans laquelle sont placées les électrodes qui injectent le courant dans le sol, on obtient une caractérisation en 2D ou 3D du sol. Cette méthode qualitative est sensible aux caractéristiques géométriques des fissures : orientation, épaisseur, profondeur et pendage.

Des observations directes de la fissuration à la surface du sol permettent un suivi facile et rapide de son évolution au cours du temps. Ringrose-Voase et Sanidad (1996) estiment la longueur de fissuration par unité de surface en dénombrant les intersections des fissures avec un transect constitué de 6 demi-cercles. La géométrie en demi-cercle du système minimise le possible biais dû à une orientation préférentielle des fissures (par exemple parallèle à la ligne de semis). Les profondeurs et largeurs des fissures sont également mesurées.

La fissuration de la surface du sol peut aussi être décrite à partir de photographies. La détection des fissures était ensuite effectuée visuellement (Hallaire, 1984) avant le développement des techniques d'analyse d'images. Les méthodes d'analyse d'images permettent une étude quantitative de la fissuration. Elles sont notamment utilisées au laboratoire pour des sols remaniés en fines couches de boue puis séchés pour créer de la fissuration (Preston et al., 1997; Vogel et al., 2005a). Il existe moins de travaux sur des analyses de réseau de fissures concernant des surfaces de sols cultivés (Stengel, 1988; Velde, 1999 et 2001). Les sols étudiés ont généralement des taux d'argile élevés et donc un retrait important au moment du dessèchement: les fissures sont relativement contrastées, ce qui facilite leur détection automatique. Par ailleurs, ce ne sont pas des surfaces de lits de semences d'espèces cultivées qui ont été caractérisées.

Ces méthodes non destructives permettent de suivre l'évolution au cours du temps de la fissuration en conservant la même localisation à chaque mesure.

b. Caractérisation de la fissuration à la surface du sol : éléments bibliographiques

Le processus de formation du réseau de fissures par retrait du sol au moment du dessèchement suit deux étapes. Dans une première étape, la longueur de fissuration par unité de surface augmente régulièrement au cours du dessèchement. Les fissures formées sont fines, inférieures à 1mm. Dans une seconde étape, des fissures préexistantes s'élargissent jusqu'à atteindre une taille de quelques millimètres alors que certaines des fissures voisines se referment. La longueur totale de fissuration se stabilise alors que la porosité (aire de fissuration / unité de surface) continue à augmenter (Hallaire, 1988; Velde, 2001).

L'intensité de la fissuration dépend des propriétés du sol. Elle augmente avec la teneur en argile dont dépend l'amplitude du phénomène de gonflement et retrait impliqué dans la formation des fissures (Stengel, 1988; Boiffin et al., 1990; Preston et al., 1997). Dans le cas de sols remaniés en fines couches de boues par mélange avec de l'eau, l'intensité de la fissuration variait de 60 à 400 cm /100 cm² pour des teneurs en argile allant de 11 à 53% (Stengel, 1987). L'intensité de la fissuration dépend également de la teneur en eau et de la structure du sol. Plus la surface du sol est compactée et le travail du sol superficiel, plus la maille de fissuration est fine (Stengel, 1988; Boiffin et al., 1990).

Le réseau de fissures peut être décrit par des variables simples telles que longueur de fissuration par unité de surface, largeur des fissures. Cependant elles ne donnent pas de renseignement sur la géométrie du système et l'agencement des fissures. Velde (1999) a analysé la forme des plaques qui sont individualisées par les fissures pour plusieurs types de sols. Dans la plupart des cas, la géométrie du réseau tendait à être carrée à hexagonale sans relation avec le type de sol (boues ou sols cultivés, 17

Table IV.1
 Characteristics of the different types of seedbed.

Plot code	Types of seedbed	Sowing date	Clay g g ⁻¹	Structure: aggregate grades		Soil tillage and seeder
				> 2 cm g.100g ⁻¹	< 0.2cm g.100g ⁻¹	
04P24_SB	Sugarbeet	02/03/04	0.18	7	32	Combination harrow and sugar beet seeder
05P13_SB	Sugarbeet	16/03/05	0.21	8	29	Combination harrow and sugar beet seeder
04P19_Fl	Flax	16/03/04	0.17	12	40	Rotary harrow and wheat seeder
05P181_Fl	Flax	16/03/05	0.18	28	21	Rotary harrow and wheat seeder
05P182_Fl	Flax	21/03/05	0.18	14	33	Rotary harrow and wheat seeder
05P19_W	Wheat	12/10/04	0.17	29	23	Rotary harrow and wheat seeder
05P20_W	Wheat	12/10/04	0.19	18	28	Rotary harrow and wheat seeder
05P23_W	Wheat	12/10/04	0.18	35	19	Rotary harrow and wheat seeder

à 100% d'argile). Une autre manière de caractériser l'organisation des fissures est de déterminer la dimension fractale du système. Elle donne une indication sur la régularité de la distribution de la porosité. La dimension fractale est déterminée en établissant une loi puissance entre la masse, c'est à dire le pourcentage de surface occupé par les fissures (pixels) et l'échelle d'observation : $M(R) \propto R^D$; où M représente la masse contenue dans le cercle de rayon R. L'exposant D de la relation est défini comme la dimension fractale du système (Rieu et Sposito, 1991; Perrier et al., 1999; Preston et al., 1997; Velde, 1999 et 2001). Dans le cas d'une image en 2D, la dimension fractale peut varier entre 1 et 2. Plus D augmente et plus la distribution de la porosité est homogène. Velde (1999) a montré que plus la fissuration augmente et plus elle est distribuée régulièrement (D augmente). D est également positivement corrélé aux taux d'argile (Preston et al., 1997). Cependant la fissuration du sol n'est pas un phénomène parfaitement fractal, aussi la relation ainsi définie n'est valable que pour une gamme d'échelles bien précise.

Dans notre étude, nous avons analysé l'évolution de réseau de fissures pour plusieurs types de lit de semences (plusieurs structures, états de dégradation de la surface et humidités) pour un même sol limono argileux. Nous avons caractérisé la géométrie des réseaux formés, et son évolution au cours du temps. Notre objectif est une description dynamique de la fissuration de la surface du sol. Ces résultats ont été acquis dans la perspective d'intégrer au module de levée sous croûte des modèles de fissuration en ayant les paramètres nécessaires.

1.2. Méthodes de suivi de la fissuration

a- Sol et lits de semences

Nous avons suivi le développement du réseau de fissures à la surface de plusieurs types de semences. Les parcelles suivies se situaient dans l'expérimentation longue durée de Mons-en-Chausée.

Le sol est limono argileux, avec une teneur en argile allant de 0.17 à 0.21 g g⁻¹ pour les parcelles où les réseaux ont été observés (tableau IV.1).

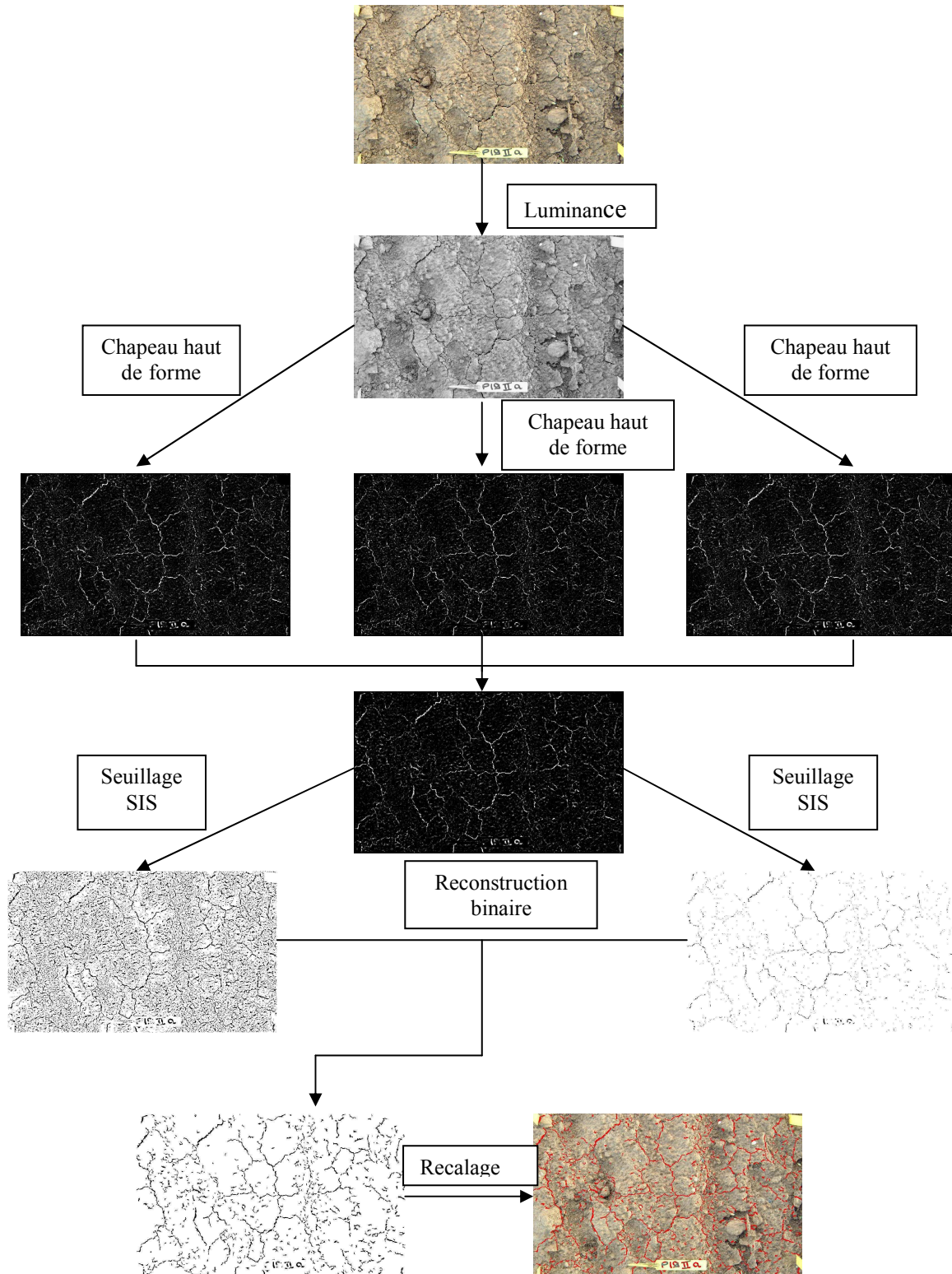
Les surfaces des lits de semences suivies présentaient des structures variées en relation avec les opérations de travail du sol et de semis, et la teneur en eau au moment de ces opérations. La proportion d'agrégats de plus de 20 mm présents à la surface du sol variait de 7 à 35 g 100g⁻¹ (tableau IV.1). Ces proportions correspondent à des lits de semences fins à intermédiaires si l'on considère les variations observées dans ce type de région culturale (Carrera et Dürr, 2003 ; Dorsainvil et al., 2005). Trois parcelles, l'une au printemps et les deux autres à l'automne, avaient une structure plus grossière comparée aux autres parcelles observées : 05P181_lin, 04P19_blé et 04P23_blé (tableau IV.1). Le taux d'agrégats de plus de 20 mm présents à la surface du sol était supérieur à 25 g 100g⁻¹ contre moins de 20 g 100g⁻¹ pour les autres parcelles.

b- Suivi de la fissuration et mesures associées

Mesures au champ

Nous avons suivi la dynamique de fissuration à partir du semis. Des photographies de la surface du sol sont prises à intervalle régulier avec un appareil numérique. Les placettes photographiées font 30 cm de large sur 48 cm de long. Pour chaque parcelle nous avons suivi 8 placettes soit 4 par bloc. Selon le type de semoir utilisé (semoir betterave ou semoir blé), l'orientation des placettes par rapport à la ligne de semis varie. Dans le cas de la betterave, les lignes de semis sont très écartées (45 cm) et la distribution des agrégats à la surface n'est pas homogène. Aussi les placettes sont centrées sur la ligne de semis et orientées dans le sens de la longueur. La fissuration est caractérisée seulement pour la part centrale de la placette correspondant à la ligne de semis. Dans le cas du lin et du blé, la distance entre les lignes de semis est faible (12.5 cm) et la structure de la surface relativement homogène. Nous avons choisi de placer les placettes dans le sens de la largeur. Chaque placette inclut 2 ou 3 rangs de semis. L'ensemble de la surface est caractérisé.

Figure IV.1
Récapitulatif de la chaîne de traitement sous Image J (d'après Lingrand, 2004).



La dynamique de fissuration est suivie jusqu'à la fin de l'émergence. En 2005, nous avons également analysé la fissuration de surfaces non semées en betterave et en lin (passage du semoir à vide) sur des périodes plus longues pour (i) analyser la fissuration pour des stades de développement de la croûte avancés (sédimentaires) ; (ii) comparer les zones semées et non semées dans de mêmes conditions (même lit de semences, mêmes séquences climatiques) afin d'évaluer l'effet potentiel des plantules sur la fissuration au moment de l'émergence (par poussée sur la croûte). Excepté pour ce dernier point, les résultats des parcelles 2005 présentés correspondent aux zones non semées pour s'affranchir de ce possible effet des plantes et analyser uniquement l'effet de la structure du sol et des conditions climatiques sur la fissuration.

Analyse d'images

Les méthodes utilisées dans la littérature sont adaptées à des cas où les fissures sont nettement visibles, boues ou sols très argileux fortement fissurés. La détection des fissures est réalisée par une simple technique de seuillage. Dans notre cas, les fissures sont moins larges et moins contrastées notamment dans le cas de surfaces peu dégradées ou humides où les fissures formées sont très fines. Un programme basé sur Image J, logiciel d'analyse d'images a donc été développé (Lingrand, 2004). Ce programme détecte automatiquement les fissures visibles sur les photographies en utilisant une chaîne de traitement basée sur des méthodes morpho mathématiques. Le choix de ces méthodes s'est inspiré de travaux dans des domaines variés: détection des fissures à la surface de tableaux anciens (Abas, 2002 ; Nikolaidis et Pitas, 2002 ; Kammerer et al., 2003) et détection de défauts dans le bois ou le fer (Nieniewski et al, 1999 ; Gunatilake et al., 1997). Les cinq étapes successives de traitement sont résumées ci-dessous (figure IV.1):

- (1) passage d'une image couleur à une image en niveaux de gris en utilisant la luminance: les fissures apparaissent foncées;
- (2) transformation "chapeau haut de forme" de l'image (top hat); méthode de seuillage par un élément structurant qui permet la détection des zones foncées (Nieniewski et al., 1999). Trois tailles d'éléments structurants sont utilisées: 1, 2 et 3 pixels qui permettent de détecter les fissures des plus fines aux plus épaisses. On obtient ainsi 3 images dont on calcule le maximum en niveau de gris. A partir de ces images, on récupère pour chaque pixel la meilleure détection pour reconstruire une quatrième image qui servira dans la suite du traitement;
- (3) transformation en mode binaire (noir et blanc) en utilisant un seuillage adaptatif; la valeur de seuil est calculée en utilisant la formule SIS (Simple Image Statistic; Kittler et al., 1985). Cet algorithme suppose que l'image traitée est une représentation imparfaite d'un objet et de son fond. Il permet de calculer le seuil le mieux adapté pour les distinguer. Un seuillage adaptatif signifie que la valeur seuil est recalculée pour chaque pixel de l'image afin d'éviter des problèmes liés aux variations de luminosité sur l'image. Deux seuillages sont réalisés, l'un en se plaçant au-dessus du seuil calculé, l'autre en se plaçant en dessous. Dans un cas, les fissures sont très bien détectées mais l'image contient beaucoup de parasites (notamment la porosité entre les agrégats). Dans l'autre cas, la détection des fissures est faible, mais il existe peu de parasites.
- (4) reconstruction binaire (Nieniewski et al., 1999); c'est une opération de morphologie mathématique qui permet de reconstruire la première image par la seconde. L'image qui en résulte garde les avantages des deux images d'origine sans en conserver les inconvénients: les fissures sont correctement détectées et une grande partie des parasites est éliminée;
- (5) superposition de l'image finale sur l'image initiale. Cette étape permet à l'utilisateur de comparer la détection à l'image initiale.

Ensuite, l'utilisateur a la possibilité de corriger la détection automatique. Des corrections sont nécessaires surtout dans le cas de photos où la surface du sol est peu dégradée. Les agrégats sont encore nettement visibles, et la porosité inter-agrégats qui constitue des zones sombres dans l'image est détectée par la chaîne de traitement. A l'inverse, les fissures les plus fines ne sont pas toujours décelées. L'utilisateur a la possibilité de relancer une étape de détection en entourant les fissures en question. La détection est automatiquement amplifiée dans cette zone en modifiant les seuils utilisés.

Table IV.2

Characterisation of crack networks for several types of seedbed and crust stages. Numbers in brackets are standard deviations and letters are results of variance analysis (P = 5%)

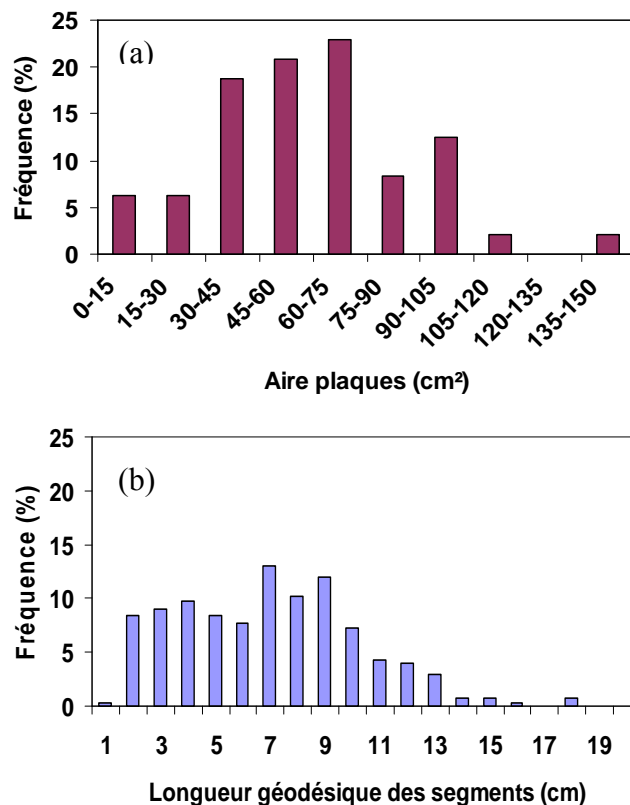
Plot code	Total length (cm /100cm ²)	Plate area (cm ²)		Number of intersections	Segment size (cm)	Cumulative rainfall (mm)	Crust stage*
05P13_SB	27 (3)	60 (29)	a	6 (1)	6.5 (1.6)	107	F1/2
05P182_FI	26 (2)	67 (24)	ab	6 (1)	6.9 (1.4)	107	F1/2
04P19_FI**	24 (3)	68 (33)	ab	6 (1)	7.2 (3.0)	17	F1
05P181_FI	23 (4)	69 (37)	ab	6 (1)	6.5 (1.5)	107	F1/2
04P24_SB	11 (4)	82 (33)	bc	6 (1)	7.9 (3.0)	35	F1
05P19_W	21 (2)	95 (44)	c	6 (1)	8.5 (3.8)	38	F1/2+
05P23_W	20 (2)	137 (46)	d	6 (1)	9.6 (4.8)	38	F1/2+
05P20_W	21 (2)	142 (75)	d	6 (1)	10.1 (4.6)	38	F1/2+

* Meaning of crust stage notations: F1 structural crust (well formed); F1+ structural crust (with clearer micro spots); F1/2 sedimentary crust (only in micro depressions, < 30% of the total area); F1/2+ sedimentary crust (isolated patches, < 50% of the total area).

** In 2004, cracks were followed, in the case of flax, in areas with seedlings that influenced cracking intensity

Figure IV.2

Exemple de distribution (a) des surfaces de plaques ; (b) des longueurs géodésiques des segments délimitant les plaques. Exemple de la parcelle 05P13_SB au maximum de fissuration.



Le réseau de fissures est ensuite décrit par plusieurs variables : la longueur totale de fissures, le pourcentage de fissuration par unité de surface et les caractéristiques des plaques délimitées par les fissures. Pour chaque situation 20 à 50 plaques sont caractérisées. Les variables analysées sont l'aire, le nombre d'intersections (nombre de segments constituant les plaques) et la longueur des segments (géodésique et euclidienne).

1.3. Résultats : caractéristiques des réseaux de fissures et dynamique d'évolution

a. Réseaux de fissures au maximum de retrait : intensité fissuration et géométrie

Le tableau IV.2 présente pour chaque parcelle les caractéristiques des réseaux de fissures au maximum de leur développement (croûtes sèches) pour un état de dégradation de la surface donné. Les parcelles d'automne ont été considérées séparément en raison de l'absence de conditions sèches. Le maximum de rétrécissement du sol a été observé pour des teneurs en eau de la croûte d'environ 0.15 g.g^{-1} (contre moins de 0.06 g.g^{-1} pour les surfaces observées au printemps).

La longueur totale de fissures varie de 11 à 27 cm /100cm² selon les situations. Elle augmente avec le degré de développement de la croûte dans le cas de croûtes sèches (humidité inférieure à 0.06 g.g^{-1} , cultures de printemps).

L'aire moyenne des plaques formées varie également. Dans le cas des croûtes observées au printemps (sèches), elle est inférieure pour les surfaces les plus dégradées. Les plaques observées à l'automne sont de taille plus importantes en relation avec la teneur en eau plus élevée qui diminue l'intensité du rétrécissement. Pour une même parcelle à un instant donné la distribution des tailles de plaques peut être ajustée par une fonction log normale (exemple, figure IV.2a). La longueur géodésique des segments entre les intersections augmente en relation avec la taille des plaques. Elle est de l'ordre décimétrique, variant de 6.5 cm à 10 cm selon l'intensité de la fissuration. Une fonction log normale peut également être utilisée pour décrire la distribution des longueurs de segments (exemple, figure IV.2b).

La géométrie du système est par contre identique pour toutes les parcelles observées ; quel que soit le stade d'encroûtement ou le degré d'humidité (parcelles automnales comparées aux parcelles de printemps). Les plaques délimitées par les fissures sont en tendance de forme hexagonale. On note en moyenne 6 intersections par plaque entre les fissures formant la plaque et les fissures transversales. L'angle d'intersection n'a pas été systématiquement mesuré, mais tend généralement vers 90° .

Les deux années d'expérimentation n'ont pas permis de mettre en évidence un effet de la structure de la surface du sol sur l'intensité de la fissuration. Pour les parcelles de printemps, la parcelle 05P181_lin de structure plus grossière a une taille moyenne de plaques statistiquement similaire aux autres parcelles observées dans les mêmes conditions : croûte sèche et même faciès de dégradation pour une même quantité de pluie reçue (tableau IV.2). De la même façon, les variations des tailles moyennes de plaques ne semblent pas reliées à la structure de la surface dans le cas des parcelles automnales observées dans des conditions identiques. Cependant nous n'avons observé que des structures fines ou moyennes. Nous n'avons pas pu observé la fissuration à la surface de sols de structure grossière au regard de la gamme de variation possible dans cette région culturale.

b. Dynamique de fissuration

En complément de ces observations pour des états au maximum de développement du réseau de fissures, nous avons analysé l'évolution dynamique de la fissuration. La figure IV.3 montre les variations de la longueur de fissuration en fonction de la pluie cumulée depuis le semis dans le cas de croûtes sèches. Cette variable est en fait un indicateur du stade de dégradation de la surface. On observe une augmentation de la longueur de fissuration avec la quantité de pluie reçue. Une relation linéaire peut être établie entre les deux variables avec un coefficient de détermination r^2 de 0.9, ceci quelles que soient les parcelles considérées : structures des lits de semences (fins et intermédiaires) et séquences pluvieuses variées (parcelles 2004 et 2005).

Figure IV.3
Longueur de fissuration en fonction de la pluie cumulée depuis le semis

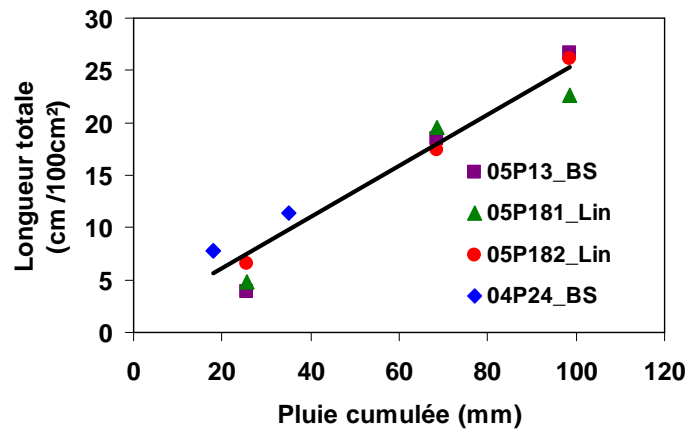
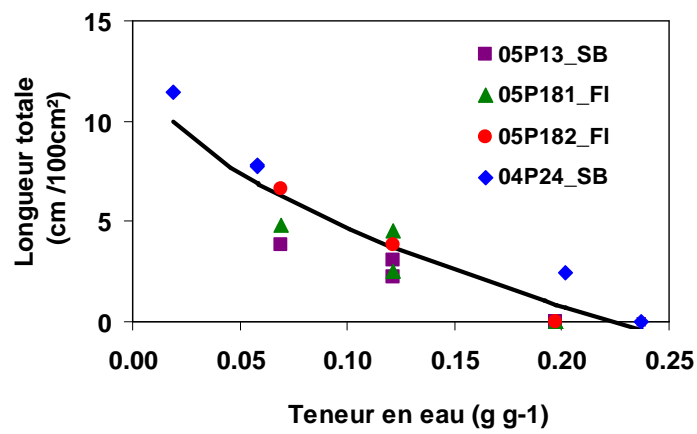


Figure IV.4
Longueur de fissuration en fonction de la teneur en eau dans le cas d'une croûte structurale



Nous avons également établi une relation continue et significative entre la longueur de fissuration et la teneur en eau de la croûte pour un même stade d'encroûtement (structural F1, pluie cumulée inférieure à 45 mm ; figure IV.4). Cette relation est similaire pour toutes les parcelles considérées en dépit des séquences climatiques variées.

Ce résultat semble indiquer qu'aussi longtemps que la surface reste à un même stade de dégradation, les fissures s'ouvrent et se referment en fonction des variations de teneur en eau de la surface, sans modification dans la relation qui lie ces deux variables. La relation entre l'intensité de la fissuration et la teneur en eau ne semble pas liée à l'amplitude de variation de la teneur en eau. Elle reste similaire quelle que soit l'alternance des phases sèches et humides dues aux séquences pluvieuses. Par ailleurs, nous avons analysé des images prises après réhumectation la nuit et après dessèchement dans la journée : nous n'avons pas observé de modification de la relation. De plus, nous avons observé que les fissures se développent puis régressent successivement en conservant les mêmes localisations

Nous n'avons pas pu établir une telle relation pour des croûtes sédimentaires par manque de données. Cependant, si la surface est à nouveau dégradée et que le stade d'encroûtement augmente suite à des quantités de pluie significatives, la géométrie de la surface est modifiée ainsi que les localisations de la fissuration.

c. Effet de la levée des plantes sur la fissuration

En 2004 nous avons observé des taux de fissuration très différents pour deux parcelles de printemps à un même stade d'encroûtement, semées avec du lin (04P19_Lin) ou de la betterave (04P24_BS) : 11 cm /100 cm² dans le cas de la betterave contre 24 cm /100 cm² pour le lin (tableau IV.2).

Les deux parcelles avaient des caractéristiques semblables, lits de semences fins et croûtes structurales F1. Elles divergeaient cependant par le type de travail du sol (tableau IV.1) et le type de semis. Dans le cas du lin, les photographies montraient que des fissures s'étaient développées le long de la ligne de semis et que la majorité des plantules avaient utilisé ces fissures pour émerger. Nous avons voulu savoir si les plantules ont provoqué ce type de fissures en poussant sur la croûte au moment de l'émergence ou si ce phénomène est dû à la géométrie particulière du sol due aux opérations de semis. En effet si la betterave et le lin exercent des forces d'émergence du même ordre de grandeur, le lin est semé de manière groupée : les plantules sont espacées d'environ 1.5 cm comparativement à la betterave où l'espace entre plantes est supérieur à 15 cm.

En 2005, nous avons comparé, pour chaque parcelle, l'intensité de la fissuration pour des zones normalement semées et des zones sans plantules (passage du semoir à vide). Dans le cas de la betterave, la longueur moyenne de fissuration est similaire 57 et 54 cm /100cm² pour respectivement les zones avec et sans plantules. Dans le cas du lin, les longueurs moyennes de fissuration sont très différentes : 31 cm /100cm² pour les zones sans plantules contre 56 cm /100cm² dans les zones avec plantules. Les plantules en poussant sur la croûte au moment de la levée ont augmenté le taux de fissuration avec un ordre de magnitude de deux.

1.4. Discussion et conclusion

L'outil d'analyse d'images qui a été produit permet de décrire des images de la fissuration à la surface du sol. Il permet de caractériser la géométrie des réseaux de fissures formés : les fissures sont toujours organisées dans la même forme hexagonale sans effet du type de surface. Nous ne l'avons observé que dans un type de sol mais ces observations vont dans le sens de l'étude de Velde (1999) qui montre que les plaques sont de forme carrées à hexagonales sans effet de la nature du sol. Il permet également d'analyser l'évolution de la fissuration au cours du temps dans les conditions au champ. La fissuration est décrite en fonction de la teneur en eau de la surface, et de la pluie cumulée depuis le semis utilisée comme un indicateur du stade de dégradation de la surface. On a pu établir une relation continue entre la longueur de fissuration et ces deux variables. On observe que la longueur de fissures diminue quand la teneur en eau augmente et augmente avec le stade de développement de la croûte.

Cette étude apporte des éléments quantitatifs qui vont permettre de paramétrer un modèle géométrique de fissuration en fonction du stade de développement de la croûte et de la teneur en eau. Ce modèle

pourra ensuite être intégré dans le module de prévision de la levée des plantules sous une croûte de battance.

Dans la partie suivante, nous verrons quels sont les types de modèles qui décrivent la fissuration du sol. Nous présenterons ensuite les modèles choisis. Ils doivent permettre de prévoir la fissuration du sol dans un plan en deux dimensions et doivent être facilement paramétrables à partir des éléments obtenus lors de nos observations au champ. Nous verrons ensuite comment ces modèles sont utilisés pour prédire les taux de passage des plantules par les fissures.

2. MODELISATION DE LA DYNAMIQUE D'APPARITION DES FISSURES ET DU FRANCHISSEMENT

2.1. Modèles existants de prévision de la fissuration

Les modèles de fissuration présentés dans la littérature (Samouëlian, 2004) peuvent être divisés en deux classes: les modèles qui reproduisent la géométrie du réseau de fissures et les modèles physiques intégrant des connaissances sur les propriétés des matériaux. Nous allons présenter successivement ces deux types de représentations.

Les modèles géométriques ont pour objectif de générer mathématiquement des réseaux de fissures reproduisant ceux proches des réseaux obtenus en conditions naturelles. Ces modèles ne tiennent pas compte des propriétés physiques des matériaux.

Le modèle de Horgan et Young (2000) est un modèle géométrique stochastique en 2D. Il génère un réseau de fissures à partir des paramètres suivants : nombre de points de départ de fissures, taille des plaques délimitées par les fissures, distance d'élongation par intervalle de temps, taux d'attraction des fissures, angle maximum de changement de direction à chaque intervalle de temps. Ce modèle a été utilisé pour simuler la fragmentation de boues séchées et aboutit à une représentation réaliste.

Le digramme de Voronoï est un algorithme de fragmentation qui peut également être utilisé pour générer un réseau de fissure en deux dimensions (Perrier et al., 1995).

Un modèle morphologique tridimensionnel a été proposé par Hallaire (1988). Il est basé sur la relation inversement proportionnelle entre le retrait du sol et sa teneur en eau. Il est construit à partir d'observations de surface en 2D soumises à une expérimentation de dessiccation. L'évolution de deux types de réseaux est modélisée (micro et macro fissures). Ils se différencient non seulement par rapport à leur caractère morphologique (taille des pores) mais aussi par leur évolution différenciée. Dans une première phase dite de "fragmentation", le réseau micro-fissural ou intra-mottes délimite des éléments structuraux élémentaires appelés peds. Il se développe au fur et à mesure du dessèchement. Dans une seconde phase dite de "reprise en masse" (en dessous de 23% pour un sol à 50% d'argile), Les fissures externes aux mottes (ou macro-fissures) se développent aux dépens des micro-fissures qui tendent à se refermer au fur et à mesure du retrait. Le système est représenté par une géométrie simplifiée orthogonale. Les résultats de la modélisation sont les largeurs des fissures et les valeurs des écartements entre les fissures. Ces hypothèses simplificatrices ne permettent pas une représentation géométrique proche des réseaux formés dans les conditions naturelles.

Les modèles physiques de fissuration tiennent compte pour prévoir l'évolution de la fissuration des propriétés du sol. Le modèle de Chertkov et Ravina (1998), modèle physique probabiliste, prévoit la fissuration en fonction du profil de teneur en eau et de la courbe de retrait caractéristique du sol. La fissuration est décrite en terme de distributions variant selon la profondeur du sol : nombre de fissures et volume de fissuration par unité de volume, distributions des dimensions des fissures (longueur, largeur et profondeur), et pourcentage de fissuration à la surface du sol. Ce modèle a pour objectif d'évaluer les caractéristiques hydrodynamiques d'un sol. Il ne tient pas compte de la géométrie réelle des fissures et de leur localisation spatiale.

Une autre approche est de décrire la fissuration du sol via des processus mécaniques. Vogel et al. (2005) ont proposé un modèle dynamique de la fissuration du sol en 2D. Le sol est représenté par un maillage de ressorts qui se contractent au fur et à mesure de l'évaporation. Chaque noeud du système est relié à 6 noeuds voisins par l'intermédiaire de ces ressorts. Si la contrainte entre 2 noeuds excède une valeur seuil, le ressort se casse et une fissure se crée. Cette rupture modifie la distribution de l'énergie dans le système: il y a relaxation des ressorts liés aux noeuds voisins. Un processus itératif permet de reproduire l'évolution temporelle du réseau de fissures. Les paramètres du modèle peuvent être associés à des propriétés physiques du sol : élasticité du matériel et hétérogénéité, épaisseur de la couche de sol, vitesse de dessiccation.

Figure IV.5
Horgan and Young's model, steps of crack network development

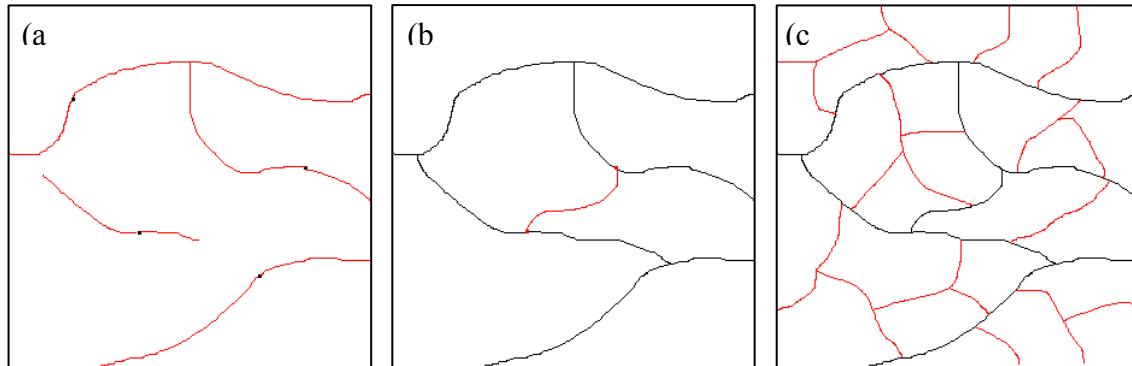


Table IV.3
Parameters used in the Horgan and Young's model

Name	Role	Default values
N0	Number of cracks starting in the square	2
A1	Maximum area of the plates in the second step (pixels ²)	75000
A2	Maximum area of the final plates (pixels ²)	6000
δl	Crack growth length in time (pixels.dt ⁻¹)	0.5
α	Maximum change in direction (radians)	0.1
b	Distance at which attraction starts (pixels)	0.1
a	Rate of crack attraction	50

Nous avons testé les modèles géométriques pour décrire la fissuration à la surface du sol : le modèle de Horgan et Young (2000) et la tessellation de Voronoï. Ces modèles permettent une représentation réaliste en 2D du réseau de fissures. Ils sont paramétrables à partir des observations au champ présentées dans la partie précédente. Par ailleurs nous n'avons ni les caractéristiques physiques du matériau, ni les moyens de traduire ces caractéristiques en paramètres, nous permettant de mettre en œuvre les autres modèles physiques. Nous allons dans la partie suivante préciser et le fonctionnement des deux modèles testés, et la manière dont nous les avons paramétrés. Nous verrons ensuite comment nous avons utilisé réseaux de fissures simulés pour établir des taux de franchissement.

2.2. Méthodes : modélisation de la fissuration et du franchissement

a. Modèle de Horgan et Young (2000)

Ce modèle est un modèle géométrique et stochastique de fragmentation en deux dimensions. Il a été décrit en détails par Horgan et Young (2000). Le réseau de fissures est généré en trois étapes (figure IV.5) :

- (i) Les points de départ des fissures ($N0$) sont positionnés aléatoirement à l'intérieur d'un plan (dimension 512 sur 512 pixels). Les fissures s'allongent ensuite une à une à partir de ces points. A intervalle de temps régulier δt , une fissure progresse d'une distance δl avec un changement aléatoire de direction d'un angle maximal α . Les fissures stoppent leur croissance lorsqu'elles atteignent le bord de l'image simulée ou si elles rejoignent une autre fissure. Le modèle intègre un mécanisme d'attraction entre les fissures pour des distances inférieures à b . Au cours de l'attraction, la fissure en progression modifie à chaque intervalle de temps sa direction de manière à diminuer d'une proportion a l'écart entre sa direction et la direction perpendiculaire à la fissure qu'elle rejoint (figure IV.5a).
- (ii) Ensuite, de nouvelles fissures sont générées de manière similaire. Les points de départ sont positionnés au hasard sur les fissures préexistantes. Cette étape s'achève quand la plaque la plus grande est inférieure à l'aire $A1$ (figure IV.5b).
- (iii) Dans la dernière étape, les fissures tendent à diviser les plaques existantes en 2 jusqu'à ce que toutes les plaques aient une surface inférieure à la valeur $A2$ (figure IV.5c).

Tous les paramètres inclus dans le modèle sont résumés dans le tableau IV.3. Le modèle comprend sept paramètres ce qui rend difficile la matérialisation de leurs effets et de leurs interactions. A partir des valeurs de paramètres indiqués par Horgan et Young, l'impact des principaux paramètres du modèle ($N0$, $A1$, $A2$) sur les caractéristiques des réseaux simulés a été testé en les faisant varier dans une large gamme autour de la valeur par défaut donnée dans le tableau IV.3 (Kudelski, 2005). Les caractéristiques des réseaux ainsi générés sont ensuite mesurées par la même méthode d'analyse d'images utilisée sur les images de réseaux réels décrite précédemment. Les variables mesurées sont la longueur totale et pourcentage de fissuration, l'aire moyenne des plaques et le nombre moyen de coins d'une plaque (nombre d'intersections entre les fissures formant une plaque). Cette analyse indique que ce sont les valeurs données par défaut (tableau IV.3) qui permettent de générer un réseau de fissures avec une géométrie réaliste par rapport aux réseaux observés à la surface du sol. L'organisation du réseau est uniforme répartie (exemple figure IV.5c). Le nombre moyen d'intersections de fissures par plaque est de 6 comme pour la valeur mesurée au champ.

Nous avons vu que quel que soit le type de lit de semences (structure, niveau de dégradation) la géométrie du réseau de fissures formé reste similaire mais que la taille des plaques varie selon les situations. Un moyen simple pour adapter le réseau simulé par Horgan et Young aux différents types de situations caractérisées au champ, est de modifier l'échelle à laquelle on considère le réseau généré en faisant varier la valeur en centimètres des pixels du plan simulé.

Figure IV.6
Crack network by Voronoï tessellation. Red spots are the start points of the network construction.

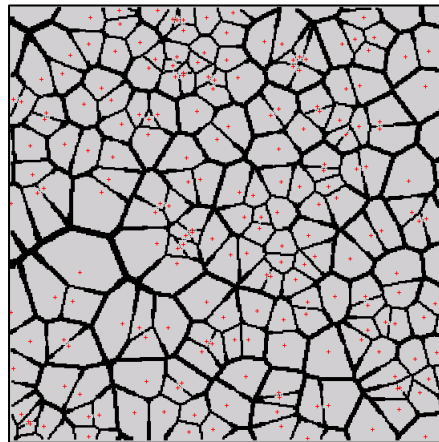
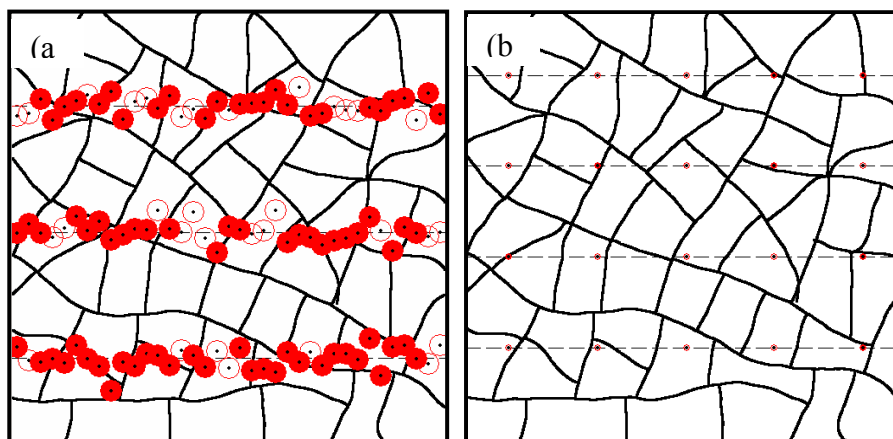


Table IV.4
Characteristics of plots for which emergence by cracks was simulated

		Sugarbeet (04P24)	Flax (04P19)
Crust characterisation	Stage	F1	F1
	Resistance (MPa)	0.31	0.27
Characterisation of the crack network	Plate mean area (cm ²)	82	68
	Mean total length (cm /100cm ²)	11	24
Rate of emergence by cracks (%)		23	64
Emergence rate (%)		60	77

Figure IV.7
Simulation of seedling emergence by cracks. (a) flax (b) sugar beet. Points are the seed positions; circles indicate the distance the seedling can cover to find a crack (1.5 cm for flax; 0.5 cm for sugar beet).



b. Partition de Voronoï

Ce modèle est basé sur un algorithme, le diagramme de Voronoï, qui permet de fragmenter un plan en polygones ou zones d'influence (Perrier et al., 1995). Les limites des polygones formés sont considérées comme des fissures. Les polygones sont générés à partir de points du plan appelés sites P. Chaque polygone est constitué de l'ensemble des points d'une région qui sont plus proches du site $P(i)$ que de tout autre site (figure IV.6). Un polygone de Voronoï est formulé comme suit: soit une collection de sites $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ alors,

$$V(pi) = \{x : d(p_i, x) \leq d(p_j, x), \forall j \neq i\}.$$

Les frontières des polygones constituant les fissures contiennent tous les points situés à équidistance de deux sites. La longueur totale (L_T) de fissuration générée est corrélée au nombre de sites initiaux. Une répartition aléatoire de ces sites dans le plan simulé conduit à une représentation plus uniforme de la structure du réseau de fissures.

Le réseau de fissures simulé est paramétré en fonction des observations au champ de réseaux naturels par le biais des variations de la longueur de fissuration par unité de surface. En effet nous avons établi une relation quantitative et continue entre la longueur de fissures $L(i)$ et deux variables : la quantité de pluie subie par la surface du sol (en lien avec le stade d'encroûtement) et la teneur en eau de la croûte. A partir de la longueur totale initialement générée (L_T), une proportion du réseau de fissures (10%) est éliminée étape par étape jusqu'à atteindre la longueur de fissuration voulue $L(i)$. Les fissures les plus proches d'un site P, qui correspondraient aux zones de tension les plus faibles, sont retirées en premier. Les distances entre les fissures et les sites P sont représentées par des largeurs de fissures variables: plus une fissure est proche d'un site P, plus elle est fine (Mould, 2005). A chaque étape le modèle enlève les fissures les plus fines.

c. Utilisation pour l'estimation du taux franchissement des plantes par les fissures

Dans le cadre d'un travail en collaboration avec Michel Herbin (CRéSTIC-LERI ; Kudelski, 2005), un outil a été développé pour positionner les plantules en simulant des lignes de semis dans la surface de simulation (figure IV.7). Les dimensions de la surface de simulation doivent au préalable être calibrées (valeur en centimètres d'un pixel). Les paramètres d'une ligne de semis sont spécifiques à chaque espèce:

- nombre de plantules (distribué à intervalle régulier le long de la ligne de semis) ;
- position des plantules : selon une distribution Gaussienne autour de la ligne de semis (la variable d'entrée est l'écart type en centimètres) ; et décalée ou non par rapport à la ligne de semis (distance en cm) ;
- cercle d'action des plantules (cm), son rayon représente la distance maximale qu'une plantule peut parcourir sous la croûte pour atteindre une fissure.

La possibilité pour une plantule de franchir la croûte par une fissure est déduite de la comparaison entre la position de la plantule et la localisation des fissures. Une plantule peut émerger par la fissure la plus proche si la distance à parcourir est inférieure au rayon de son cercle d'action. La variable de sortie est le taux de passage des plantules par les fissures.

2.3. Simulations du franchissement des plantules par les fissures

Nous avons examiné la concordance entre les taux simulés de franchissement des plantes par les fissures et les observations au champ dans deux situations. Les caractéristiques des parcelles simulées sont résumées dans le tableau IV.4. Il s'agit de deux parcelles observées au printemps 2004, l'une semée avec de la betterave et la seconde avec du lin (04P24 et 04P19). Dans les deux cas présentés les levées ont été observées pour des croûtes sèches de type structural F1 avec des résistances d'environ 0.3 MPa. Un taux élevé des plantules arrivées à la surface ont utilisé le réseau de fissures pour émerger : 23 % dans le cas de la betterave, 64 % pour le lin.

Table IV.5

Parameters used to modelling crack network (Horgan and Young's model) and seedling emergence for sugarbeet and flax.

Simulation parameters		Sugarbeet	Flax
Voronoi's model	Crack length	11	24
Horgan and Young's model	Calibration (side size; cm)	60 X 60	55 X 55
	A1 (cm ²)	1030	865
	A2 (cm ²)	82	69
Seedling characteristics	Number of seedlings by sowing line	4	37
	Distance between seedlings (cm)	15	1.5
	Dispersion around the sowing line (SD en cm)	0	5
	Rayon circle of action (cm)	0.5	1.5

Table IV.6

Prediction of the emergence by cracks for several species for a dry structural crust (F1).

		Sugarbeet	Flax
Crack characteristics	Total length (cm /100cm ²)	11 (4)	24 (3)
	Plate area (cm ²)	82 (33)	68 (33)
Rate of emergence by cracks (%)	Observed	23	64
	Predicted (H and Y)	35	70
	Predicted (Voronoi)	11	61

Ces taux de franchissement par les fissures sont très différents entre les deux situations. Ils s'expliquent principalement par le mode de semis du lin dont la densité de semis est très supérieure à celle de la betterave : environ 67 plantes par mètre linéaire pour le lin contre 7 dans le cas de la betterave. Ce mode de semis groupé augmente le taux de franchissement par les fissures pour deux raisons :

- (i) le taux de fissuration est augmenté, en raison d'une poussée groupée des plantes sur la croûte au moment de la levée, comme nous l'avons vu dans la partie précédente. (tableau IV.4) ;
- (ii) une densité de semis élevée augmente la probabilité de passage par une fissure.

De plus nous avons observé les plantules de lin pouvaient parcourir une distance plus élevée pour atteindre les fissures : 1.5 cm contre 0.5 cm pour la betterave, face aux croûtes observées.

a. Paramétrage des modèles de fissuration et du franchissement

Nous avons testé les deux modèles de fissuration : le modèle de Horgan et Young et un modèle basé sur l'algorithme de Voronoï paramétrés à l'aide des caractéristiques des deux parcelles retenues.

Paramétrage du modèle Horgan et Young

Les paramètres des simulations sont indiqués dans le tableau IV.5. Nous avons fait varier la taille des plaques du réseau simulé en modifiant la calibration du plan de simulation. Nous avons attribué une valeur de 60 cm pour la betterave et 55 cm dans le cas du lin aux côtés de la surface simulée (représentés par 512 pixels). Ces échelles équivalent à des aires de plaques A2 de 82 cm² et 69 cm² respectivement pour la betterave et le lin, qui sont les valeurs moyennes des surfaces de plaques observées au champ.

Les caractéristiques des lignes de semis sont énumérées dans le tableau IV.5. La totalité des paramètres utilisés dans la procédure diffèrent entre les deux espèces : nombre de plantes par ligne, dispersion des plantules autour de la ligne de semis, et rayon du cercle d'action. Le taux de franchissement est estimé pour 100 plantules par situation.

Paramétrage du modèle Voronoï

Le modèle de Voronoï est paramétré avec les longueurs de fissuration mesurées des parcelles observées. Le positionnement des lignes de semis et des plantules, développé sous un autre langage de programmation, n'a pas pu être utilisée. Nous avons utilisé une procédure simplifiée. La position des plantules est choisie aléatoirement et une distance d'action leur est affectée. Le processus est réitéré n fois, par exemple 100 fois.

b. Résultats des simulations

Les taux de franchissement simulés sont proches des taux observés (tableau IV.6). Les différences entre le lin et la betterave sont bien simulées par le paramétrage du modèle. Dans la mesure où les fissures simulées n'ont pas une orientation préférentielle par rapport à la ligne de semis, les taux de passage par les fissures dépendent uniquement des facteurs densité de fissuration et rayon du cercle d'action des plantules. Le rayon d'action plus élevé dans le cas du lin augmente la probabilité pour une plante d'atteindre une fissure.

Dans le cas du lin, nous avons observé au champ la formation d'une fissure parallèle à la ligne de semis qui permet le passage d'une majorité des plantes. De telles orientations spécifiques de la fissuration ont aussi été décrites dans la littérature (Aubertot, 1998 ; Taki et Godwin, 2006 ; Taki et al., 2006). Cette orientation spécifique n'est pas prise en compte dans la modélisation, ce qui apparemment n'a pas engendré un écart important. Cependant elle devra être prise en compte dans le cadre d'une amélioration future de la modélisation.

2.4. Discussion

Les deux modèles géométriques de fissuration que nous avons choisi d'utiliser permettent d'obtenir des résultats satisfaisants en terme de prévision des taux de passage des plantes par les fissures. Cependant les deux types de modèles présentent des limites.

a. Limites du modèle basé sur le diagramme de Voronoï

Dans le cas du modèle de fissuration basé sur l'algorithme de Voronoï, l'évolution dynamique est facilement simulée du point de vue quantitatif via le paramètre d'entrée longueur de fissuration qui est directement relié aux variables stade de dégradation et teneur en eau grâce à nos observations. Cependant la représentation dynamique du réseau n'est pas réaliste puisque pour atteindre la longueur de fissures voulue, les fissures ne sont pas gérées dans leur ensemble mais éliminées par petits segments en fonction de leur distance des sites générateurs. Ce problème est limité tant qu'on la localisation des plantules est aléatoire par rapport à celle des fissures: la géométrie du réseau n'a dans ce cas pas d'effet sur les simulations. Seule la densité de fissuration influence alors les taux de passage.

b. Limites du modèle de Horgan et Young

En ce qui concerne le modèle de Horgan et Young, le problème principal réside dans le fait que ce modèle simule un réseau constitué de plaques fermées. De plus les fissures se forment une après l'autre une et non simultanément comme on peut l'observer dans la réalité, car l'objectif n'était pas de représenter le réseau en cours de développement mais de représenter le réseau complet et fini. Des adaptations ont été envisagées pour permettre la simulation d'un réseau en formation. A partir de ce modèle a été envisagé une nouvelle version qui s'attache à la représentation dynamique de la fissuration (Kudelski, 2005).

La différence entre les deux procédures est le mode de progression des fissures. La nouvelle version devrait permettre d'arrêter la simulation en cours de réalisation avec une représentation réaliste d'un réseau de fissures en développement. On pourra par exemple obtenir des fissures non abouties orientées vers le milieu des plaques, ce qui n'est pas le cas actuellement où toutes les fissures se finissent au bord du plan ou en rencontrant une autre fissure.

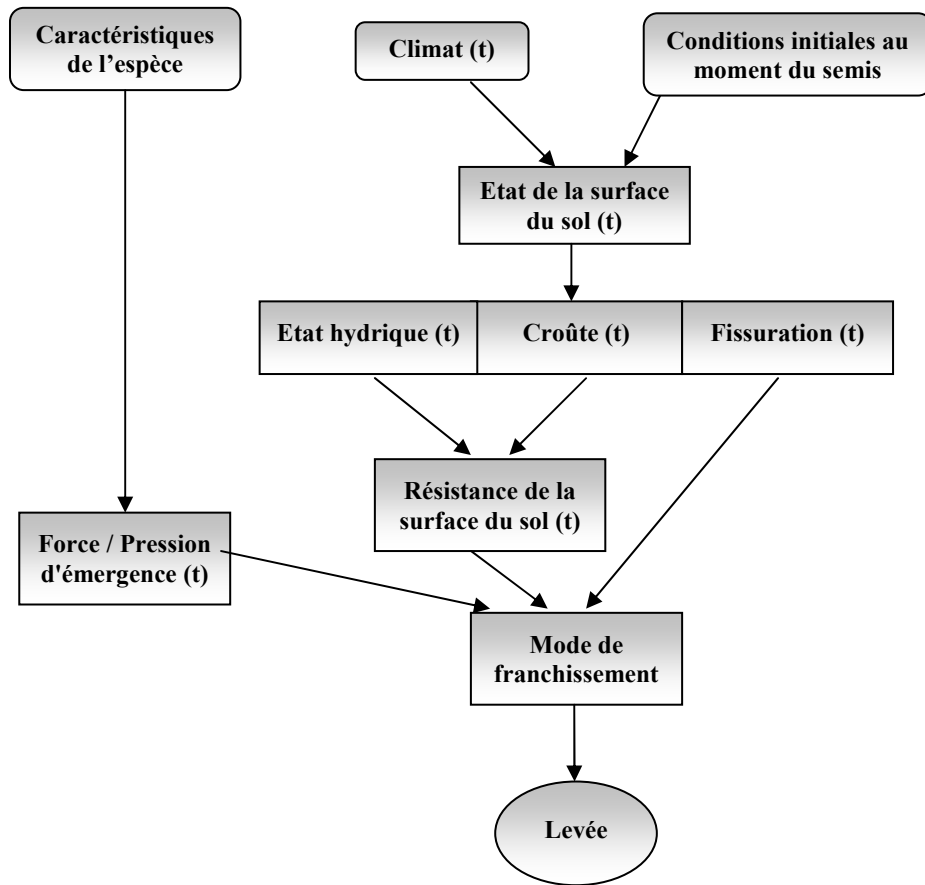
On envisage également d'orienter la localisation des fissures par le biais d'un positionnement non aléatoire des points initiaux N_0 .

En résumé, les deux modèles testés présentent des limites importantes. Cependant ils donnent une représentation assez proche de la réalité. Les données acquises au champ permettent de les paramétrer et cela donne la possibilité d'intégrer la fissuration de la surface dans la prévision du taux de levée. De nombreuses améliorations sont encore à apporter, mais on testera les effets de cette modélisation sur la prévision des taux de franchissement de la croûte dans le modèle final proposé.

CHAPITRE V

Modèle et simulations

Figure V.1
Schéma général d'acquisition des informations nécessaires pour la construction d'un nouveau module de levée sous croûte



1. INTRODUCTION

L'objectif de notre étude est de prévoir le taux de levée des plantules face à une croûte de battance. A partir des observations et des données quantitatives recueillies et présentées dans les précédents chapitres, nous avons développé un nouveau module de levée sous croûte pour le modèle de levée SIMPLE. Il a pour objectif :

- de permettre l'analyse des effets, sur la dynamique d'encroûtement et la levée, de variations de l'état structural et de l'humidité initiale des lits de semences, qui résultent des opérations de travail du sol et de semis, et sur lesquels l'agriculteur a la possibilité d'agir;
- de tenir compte de la dynamique d'évolution de l'état de surface du sol : évolution de l'encroûtement et de la teneur en eau au cours du temps, et des conséquences sur l'évolution de la résistance de la croûte et de la fissuration ;
- d'être utilisable pour différentes espèces via la prise en compte de la force d'émergence et de la géométrie des plantules ;

Le module proposé a été développé selon les grandes lignes du schéma proposé en introduction (figure V.1). Les expérimentations menées au cours de ce travail de thèse ont permis de formuler les équations et relations utilisées dans le modèle et de les paramétrer. Le module fonctionne avec un pas de temps journalier, comme le modèle SIMPLE.

On peut distinguer trois sous-modules principaux dans ce modèle:

- un premier module permet de prévoir l'évolution de la structure de la surface du sol, ainsi que l'évolution de sa résistance en fonction de l'état de la croûte et de la teneur en eau. Cette évolution dépend de la pluviométrie et des conditions initiales au moment du semis (structure, stabilité et/ou humidité) ;
- un second module permet de gérer l'évolution de la fissuration à la surface du sol, qui dépend de l'état hydrique du sol et de l'état d'encroûtement;
- enfin, le module principal permet chaque jour et pour chaque plantule de comparer la force d'émergence de la plantule à la résistance du sol et de tester également la possibilité d'un passage par une fissure.

Dans ce chapitre, nous allons revenir plus en détails sur chacun des modules qui constituent le modèle de levée sous croûte. Cela impliquera de revenir sur les résultats importants qui ont été obtenus au cours de la thèse et de présenter et discuter la manière dont ils sont intégrés dans le modèle.

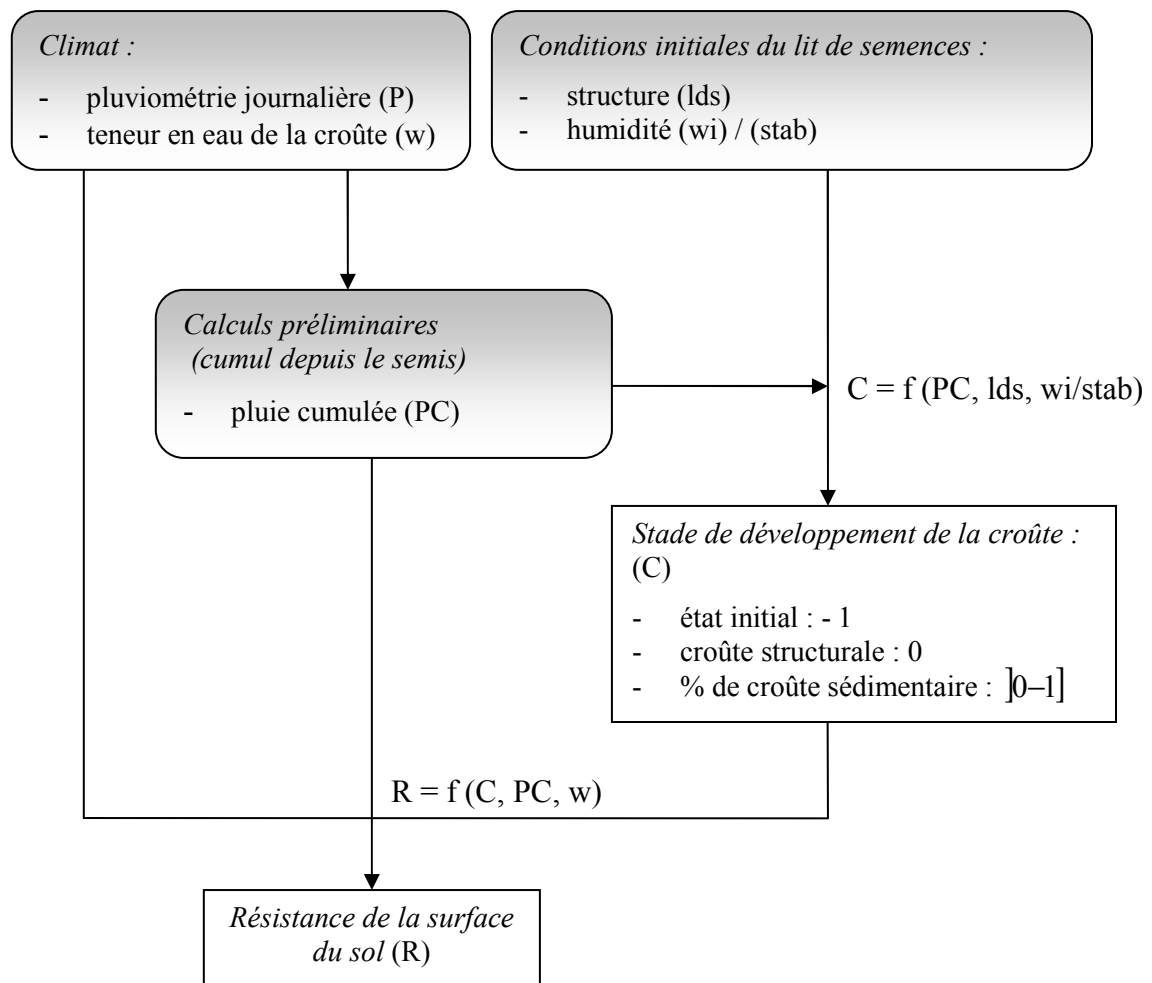
Ensuite, nous présenterons quelques résultats de simulations. Ils ont pour objectif de montrer :

- comment le modèle permet d'évaluer l'effet de différents types de lits de semences (différentes structures et/ou humidités initiales) soumis à différentes séquences pluvieuses correspondant à plusieurs dates de semis, dans le cas de la betterave sucrière ;
- comment généraliser son utilisation à d'autres espèces.

Ces travaux de simulation sont un début de test du modèle construit. Il devra par la suite être évalué en confrontant les simulations à des cinétiques de levée réelles, observées dans différentes situations propices aux problèmes de blocage sous croûte (différents états de dégradation et teneurs en eau, plusieurs espèces).

Figure V.2

Description du sous-module de prévision de l'état de la surface : fonctionnement général, liste des paramètres et significations. Les paramètres d'entrée sont indiqués en grisé.



Paramètres	Signification
lds	Structure du lit de semences (1=fin, 2=intermédiaire, 3=grossier)
C	Stade de développement de la croûte = [0,1]
stab	Stabilité des agrégats de la surface du sol = (0,1)
w _i	Teneur en eau de la surface du sol au moment du semis (g g ⁻¹)
w	Teneur en eau de la surface du sol, moyenne journalière (g g ⁻¹)
P	Pluie journalière (mm)
PC	Pluie cumulée depuis le semis (mm)
PC _{F1}	Pluie cumulée nécessaire pour atteindre le stade structural F1* (mm)
PC _{F1/2-}	Pluie cumulée nécessaire pour atteindre le premier stade sédimentaire F1/2-* (mm)
H	Pluie cumulée nécessaire pour atteindre 50% de la surface couverte par une croûte sédimentaire, à partir du stade F1/2- (mm)
k	Paramètre de la fonction reliant le pourcentage de croûte sédimentaire à la pluie cumulée, à partir du stade F1/2- (mm)

*F1, croûte structurale standard; F1/2-, début de croûte sédimentaire (surface <10%)

2. DESCRIPTION DU MODELE DE LEVEE SOUS CROÛTE DE BATTANCE

Dans cette partie, nous allons présenter successivement les trois modules principaux du modèle :

1. évolution au cours du temps de l'état de la surface du sol et de sa résistance ;
2. évolution de la fissuration du sol ;
3. test de la possibilité d'émergence, par comparaison de la force d'émergence de la plantule et de la résistance du sol, et considération de la localisation des fissures.

2.1. Prévision de l'évolution de la croûte et de sa résistance

a. Stade de développement

Les observations au champ effectuées au cours de la thèse ont montré un impact significatif des caractéristiques initiales du lit de semences sur la vitesse de formation d'une croûte de battance. Ces caractéristiques sont la structure du lit de semences et sa teneur en eau au moment du semis. Ces facteurs de variation doivent donc être pris en compte dans le modèle.

La structure du lit de semences est caractérisée par la distribution des tailles d'agrégats. Nous avons retenu la proportion des agrégats supérieurs à 20 mm comme indicateur de la structure du lit de semences. Trois états ont été définis qui recouvrent l'ensemble de la gamme d'états structuraux observables dans ce type de sol: fin (0-15 g 100g⁻¹), intermédiaire (15-30 g 100g⁻¹) et grossier (> 30 g 100g⁻¹). Plus le lit de semences est fin et plus la dégradation de la surface des lits de semences est rapide.

Un autre facteur qui influence la vitesse de dégradation de la surface du sol est sa sensibilité à la battance. Elle peut être évaluée par des tests de stabilité des agrégats. Nous avons utilisé la méthode développée par Le Bissonnais (1996) d'après la méthode de Hénin et al. (1958). Les résultats de ces tests montrent que la stabilité intrinsèque du sol, mesurée sur des échantillons préalablement séchés, est relativement homogène pour différents échantillons issus d'un sol de même texture et travaillé de manière conventionnelle (labour). Ces tests ont également été effectués sur des échantillons conservés à leur teneur en eau initiale (au moment du semis). Ils ont montré que pour un même type de sol, la variation de la stabilité du sol est principalement due aux variations de la teneur en eau. Un seuil de teneur en eau a été identifié pour lequel la sensibilité du sol à la battance est modifiée: en dessous de ce seuil la stabilité du sol est faible et indépendante de la teneur en eau; au-dessus, la stabilité du sol augmente avec la teneur en eau. Nous avons ainsi distingué deux types de lits de semences en fonction du seuil de teneur en eau : < 0.17 g g⁻¹ ou > 0.17 g g⁻¹. Cet effet de la teneur en eau sur la vitesse de dégradation était seulement visible pour les lits de semences les plus fins, il n'intervient donc pas dans le modèle pour les lits de semences de structure intermédiaire ou grossière.

Nous avons évalué (chapitre III) les valeurs de pluie cumulée depuis le semis nécessaires pour atteindre les différents stades de développement de la croûte, en fonction des caractéristiques initiales du lit de semences (structure et stabilité/teneur en eau initiale, tableau III.6). Dans le modèle, ces seuils servent à évaluer le moment où apparaît une croûte structurale type, et le moment où des plages de croûte sédimentaire commencent à apparaître. A partir du premier stade sédimentaire (F1/2-), une relation continue peut être établie entre la proportion de croûte sédimentaire recouvrant la surface et la pluie cumulée. La pente de cette relation dépend de la structure du lit de semences. Ces valeurs sont spécifiques d'un sol limono argileux et d'un climat du type du nord de la France.

Dans le modèle, l'état de dégradation de la surface est ainsi défini jour après jour à partir des caractéristiques initiales du lit de semences et de la pluviométrie (figure V.2). Le stade de développement de la croûte (C) est représenté par une valeur de -1 pour un état initial (pas de croûte), 0 dans le cas d'une croûte structurale, et une valeur entre 0 et 1 qui indique la proportion de la surface couverte par une croûte sédimentaire. L'équation suivante est utilisée :

Figure V.3

Evolution de la proportion de croûte sédimentaire en fonction de la pluie cumulée depuis le semis (PC) moins la pluie nécessaire pour atteindre le premier stade sédimentaire F1/2- ($PC_{F1/2}$).

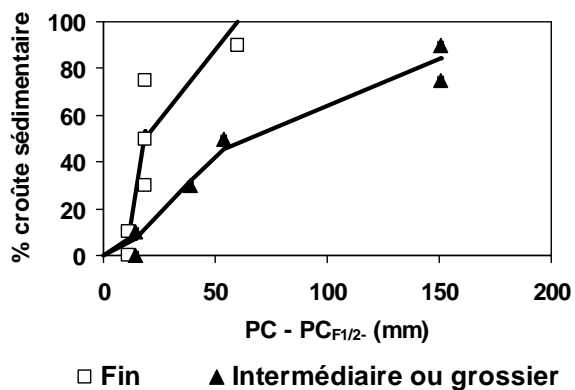


Tableau V.1

Valeurs des paramètres nécessaires à la prévision du stade de développement de la croûte (C).

Structure du lit de semences	1 fin		2 intermédiaire	
	Sec	Humide	Sec ou Humide	Sec ou Humide
PC_{F1} (mm)	11	19	22	27
$PC_{F1/2}$ (mm)	66	66	66	66
H (mm)	18.57	18.57	59.42	59.42
k	5.25	5.25	1.81	1.81

Si $PC < PC_{F1}$, alors $C = -1$

Si $PC_{F1} \leq PC < PC_{F1/2}$, alors $C = 0$

$$\text{Si } PC \geq PC_{F1/2}, \text{ alors } C = \frac{(PC - PC_{F1})^k}{H^k + (PC - PC_{F1})^k}$$

où k et H (mm) sont les paramètres de l'équation de Hill. Cette fonction présente l'avantage d'être bornée à un maximum de 100 %. H représente la quantité de pluie nécessaire, à partir de $PC_{F1/2}$, pour que 50% de la surface soit couverte par une croûte sédimentaire (figure V.3). Le tableau V.1 indique les valeurs de PC_{F1} et $PC_{F1/2}$, H et k selon la structure du lit de semences, et sa stabilité.

b. Résistance de la croûte

La résistance de la surface du sol évolue au cours du temps et dépend de son niveau de dégradation et de l'état hydrique. Au cours de la formation de la croûte et durant l'ensemble du stade structural, la résistance du sol augmente en continu au fur et à mesure de la dégradation, en relation avec l'énergie cinétique cumulée de la pluie (figure III.8a). Au cours du développement du stade structural la résistance augmente en relation avec une augmentation de densité de la croûte jusqu'à atteindre un maximum correspondant à la densité texturale du matériaux (Fiès et Castelaogegunde, 1996). Ensuite, au cours du stade sédimentaire, la résistance du sol augmente encore, mais cette augmentation est liée à l'épaississement de la croûte (figure III.7). De plus, pour un état de dégradation donné, la résistance du sol diminue exponentiellement avec l'augmentation de la teneur en eau (figure III.8b).

Pour une teneur en eau et un état de dégradation donnés, nous avons observé une importante variabilité de la résistance, avec une distribution asymétrique (beaucoup de faibles valeurs et quelques valeurs fortes). Cette distribution peut être représentée par une loi gamma. Cette loi asymétrique est caractérisée par deux paramètres a et s , qui représentent la forme et l'échelle de la distribution, le produit de a et s correspondant à la valeur moyenne de la distribution. Le coefficient de variation de la résistance ($1/\sqrt{a}$) variant peu (40% en moyenne), le paramètre a sera considéré comme constant quel que soit la situation.

Informatiquement, en début de simulation, une valeur de résistance de référence R_i est tirée au sort pour chaque plantule dans une distribution correspondant à une teneur en eau nulle ($a \times s =$ ordonnée à l'origine de la relation entre résistance et teneur en eau) et une croûte structurale type (avec une pluie cumulée de 30 mm en moyenne, et 15 mm depuis le stade F1). Ensuite cette valeur est ajustée chaque jour en fonction de la teneur en eau de la croûte, de la pluie cumulée et du stade de développement de la croûte (structural ou sédimentaire).

L'effet teneur en eau étant important et les mesures n'ayant pu être effectuées à teneur en eau ou pluie cumulée constante, les paramètres des fonctions de correction pour la teneur en eau et la pluie cumulée ont été ajusté simultanément afin d'éviter des interactions indésirables. On a ainsi la fonction suivante liant résistance et teneur en eau (figure V.4a) :

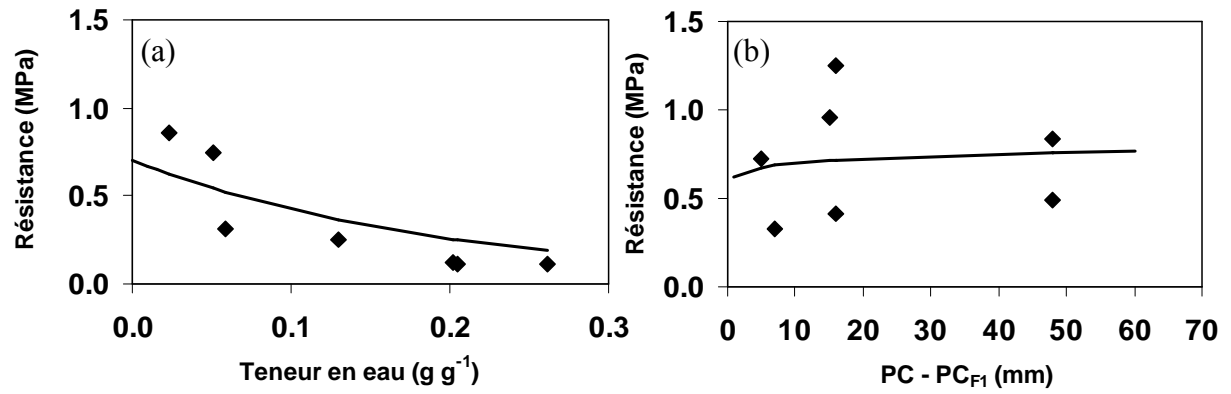
$$(1) \quad R(w) = 0.71 \times \exp(-5.08 w)$$

Où w est la teneur en eau au jour considéré ; 0.71 (MPa) est la valeur moyenne de la résistance d'une croûte sèche (teneur en eau de 0.0 g g⁻¹), qui est également la valeur moyenne de la distribution gamma utilisée ci-dessus.

La résistance d'une croûte sèche varie ensuite selon la quantité de pluie subie. Cette variation est représentée par une loi de puissance entre la résistance moyenne de la croûte et la quantité de pluie reçue depuis la formation de la croûte, soit la pluie cumulée depuis le semis moins la pluie nécessaire pour atteindre le stade structural F1 (figure V.4b) :

Figure V.4

Evolution de la résistance de la surface du sol, (a) en fonction de la teneur en eau pour une croûte structurale F1; (b) en fonction de la pluie cumulée depuis le semis (PC) moins la pluie nécessaire pour atteindre le stade structural F1 (PC_{F1}).



$$(2) \quad R(PC-PC_{F1}) = 0.62 \times (PC-PC_{F1})^{-0.051}$$

Ainsi, chaque valeur de résistance de référence R_i tirée en début de simulation dans la distribution de loi gamma est corrigée chaque jour de simulation en fonction des deux relations ci-dessus, selon l'équation suivante :

$$(3) \quad R(w, PC-PC_{F1}) = R_i \times \exp(-5.08w) \times \frac{0.62(PC-PC_{F1})^{0.051}}{0.71}$$

La première partie de l'équation est la correction liée à l'effet de la teneur en eau. La seconde partie de l'équation, correspond à la correction due à l'effet de la pluie cumulée. Cette seconde correction est égale à 1 lorsque la pluie cumulée depuis la formation de la croûte structurale est de 15 mm (PC-PCF1), ce qui correspond aux conditions pour lesquelles l'équation (1) a été établie.

En croûte sédimentaire, nous ne disposons pas de données permettant de relier l'évolution de la résistance à la pluie cumulée, ou à l'épaisseur de croûte. Nous avons donc décidé que la résistance d'une croûte sédimentaire ne dépendrait que de la teneur en eau et que sa valeur serait égale à la valeur moyenne mesurée au champ pour une croûte sédimentaire. Pour cela, le second membre de l'équation (3) est fixé à une valeur constante de 6.73, ce qui implique que la résistance d'une croûte sédimentaire sèche est égale à 4.78 MPa.

c. Teneur en eau de la croûte

Deux possibilités sont proposées à l'utilisateur. La première est de directement fournir au modèle un fichier contenant les teneurs en eau journalières de la surface du sol. Ces données peuvent être des données mesurées ou simulées par un modèle, comme par exemple le modèle TEC (Transfert Eau Chaleur; Witono et Bruckler, 1989) ou le modèle STICS (Brisson et al., 1998).

Le modèle donne également la possibilité à l'utilisateur de prévoir la teneur en eau de la surface du sol à partir d'une relation ajustée à une fonction de Hill, décrivant le dessèchement de la croûte au cours du temps (Hussain et al., 1985).

Lorsque la pluie journalière excède un seuil de 3.5 mm, le modèle fait l'hypothèse que la croûte passe à une teneur en eau de 0.30 g g⁻¹ correspondant à un état de saturation. Cette valeur de 3.5 mm découle d'observations qui avaient permis d'aboutir au module de levée sous croûte actuellement intégré à SIMPLE. La croûte se dessèche ensuite à partir de cette valeur de 0.30 g g⁻¹ en fonction du nombre de jours sans pluie selon une courbe en forme de S définie par une fonction de Hill dont les paramètres ont été optimisés d'après des données mesurées au champ :

$$w(i) = w(i-1) \cdot k(i)$$

$$\text{avec } k(i) = (1 - x^n / (H^n + x^n)) / (1 - ((x-1)^n / (H^n + (x-1)^n))$$

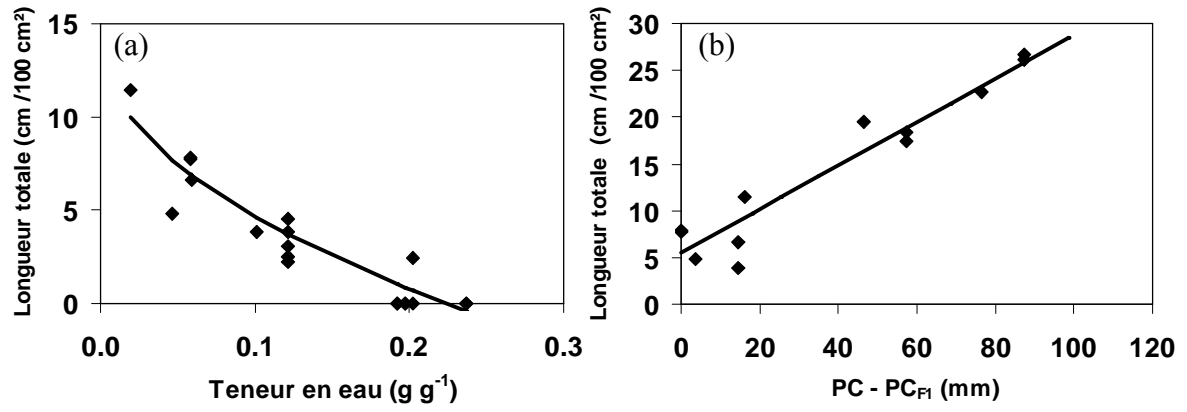
où w est la teneur en eau de la croûte (g g⁻¹), x est le nombre de jours sans pluie, n et H sont les paramètres de la fonction ; avec $n = 3$ et $H = 4$ dans les conditions d'ajustement (conditions climatiques printanières du nord de la France, sol limono argileux).

2.2. Prévision de l'évolution de la fissuration

Les réseaux de fissures ont été observés à la surface des lits de semences de plusieurs cultures. Nous avons montré que dans le cas de croûtes sèches au maximum de retrait, l'intensité de la fissuration (longueur de fissures par unité de surface) augmente avec le stade de dégradation de la surface. Une relation a été établie entre la longueur de fissuration et la quantité de pluie subie, considérée comme un

Figure V.5

Evolution de la longueur totale de fissuration (a) en fonction de la teneur en eau pour une croûte structurale F1 ; (b) en fonction de la pluie cumulée depuis le semis (PC) moins la pluie nécessaire pour atteindre le stade structural F1 (PC_{F1}).



indicateur du développement de la croûte. De plus, pour un stade de dégradation donné, il existe une corrélation significative entre la longueur de fissuration et la teneur en eau de la croûte.

Nous n'avons pas observé d'effet de la structure initiale du lit de semences (granulométrie des agrégats) sur la longueur de fissures. Cependant, l'impact de ce facteur n'a pu être étudié que dans peu de situations. Par contre, nous avons observé dans le cas du lin, qui est semé de manière groupée, que l'effet conjugué de la poussée des plantules au cours de la croissance peut considérablement augmenter l'intensité de la fissuration : la longueur de fissures par unité de surface peut être doublée par rapport à une surface présentant des caractéristiques identiques mais sans plantules.

Enfin, quel que soit le type de situation (stade de dégradation, teneur en eau, type de semis), les fissures sont toujours organisées de la même manière. Elles forment à la surface du sol un réseau de plaques de forme hexagonale.

Le modèle génère le réseau de fissures à partir d'un algorithme de Voronoï qui divise le plan de simulation en polygones, les limites de ces polygones constituant les fissures (chapitre V).

A chaque itération, la longueur de fissuration générée par le modèle est déterminée en fonction de la quantité de pluie subie et de la teneur en eau.

Une relation linéaire a été établie entre la longueur de fissuration (LF) et la racine carrée de la teneur en eau (figure V.5a). Les paramètres de la relation utilisée dans le modèle (équation 1) ont été ajustés d'après les observations des fissures formées à la surface de croûtes structurales de teneurs en eau variées. La pluie cumulée depuis le semis allait de 15 à 35 mm.

$$(1) \quad LF(w) = (-29.8475 \times \sqrt{w}) + 14.098$$

La longueur de fissures (LF) dépend également de la quantité de pluie reçue depuis la formation de la croûte (figure V.5b), soit la pluie cumulée (PC) depuis le semis moins la quantité de pluie nécessaire au développement d'une croûte structurale (PC_{F1}). Une relation linéaire a été établie entre ces deux variables :

$$(2) \quad LF(PC - PC_{F1}) = 0.2327(PC - PC_{F1}) + 5.5191$$

Le modèle génère donc à chaque itération une longueur de fissures qui dépend de la teneur en eau et de la pluie cumulée depuis la formation de la croûte :

$$(3) \quad LF(w, PC - PC_{F1}) = \left[(-29.8475 \times \sqrt{w}) + 14.098 \right] \times \frac{0.2327(PC - PC_{F1}) + 5.5191}{5.5191}$$

La première partie de l'équation est la correction liée à l'effet de la teneur en eau.

La seconde partie de l'équation correspond à la correction due à l'effet de la pluie cumulée : son rapport est égal à un quand la croûte se forme, soit $PC - PC_{F1} = 0$.

Les coordonnées des fissures sont enregistrées et pourront ensuite être comparées avec les coordonnées des plantules pour déterminer quelles plantules peuvent atteindre des fissures pour parvenir à franchir la surface du sol

2.3. Simulation du franchissement

a. Caractéristiques générales de la modélisation

Les variables d'entrée nécessaires au fonctionnement du modèle sont de trois types : les données climatiques (température et pluviométrie journalière), les caractéristiques du lit de semences (structure, stabilité et/ ou humidité) et le nombre de plantes arrivant à la surface (variable de sortie de

SIMPLE). Le modèle fonctionne avec un pas de temps journalier. A partir des paramètres d'entrée, des calculs préliminaires sont effectués par le modèle du jour 0 (jour du semis) à la fin de la simulation. Il s'agit de la somme de température cumulée depuis le semis (à partir de la température de base de l'espèce considérée) qui indique l'âge des plantules ; et de la pluie cumulée qui permet de déterminer l'état de la surface. L'évolution de la teneur en eau est également calculée en début de simulation, à moins que l'utilisateur ne choisisse de fournir directement ces données au modèle.

Pour chaque plantule arrivant à la surface du sol (variable de sortie du modèle SIMPLE), le modèle regroupe dans un tableau les caractéristiques nécessaires à la simulation, chaque ligne du tableau représentant une plantule :

- l'espèce,
- le jour où la plante a atteint la surface du sol,
- la somme de températures correspondante,
- les coordonnées de la plantule,
- sa force d'émergence maximale,
- la résistance de la croûte qu'elle doit franchir,
- la distance qu'elle peut parcourir pour atteindre une fissure.

b. Prévion de la force d'émergence

Au cours de notre travail, nous nous sommes attachés non seulement à déterminer la force maximale que peut exercer une plantule pour franchir un obstacle, mais aussi à analyser la manière dont cette force évolue au cours du temps.

Les mesures des forces d'émergence des plantules que ce soit dans la littérature ou au cours de notre étude ont montré que la force maximale varie considérablement en fonction de l'espèce considérée. D'après nos mesures, elle est de 0.08 N en moyenne dans le cas de la betterave, 0.14N pour le lin et 0.40 N pour le blé. La force d'émergence des plantules dépend également de la taille des semences et de l'âge des plantules.

Dans le modèle, la force d'émergence maximale de chaque plantule est choisie aléatoirement dans une distribution de type log normale. Elle exprime la variabilité des forces observées pour un type de plantules donné. Ses paramètres sont la moyenne et l'écart type des valeurs log de la distribution. Chaque jour de la simulation, la force de la plantule est calculée à partir de la force maximale de la plantule, en la multipliant par un coefficient f qui représente l'évolution moyenne de la force d'une plantule au cours du temps. Ce coefficient a une valeur entre 0 et 1 où 1 représente la moyenne des forces maximales exercées pour ce type de plantules.

c. Simulation du franchissement

Chaque jour de simulation, le modèle teste la possibilité pour l'ensemble des plantules actives de franchir la surface. Ces plantules nommées "actives" regroupent les plantules nouvellement arrivées à la surface (variable de sortie de SIMPLE), et éventuellement les plantes anciennes non émergées (arrivées à la surface au cours des précédentes itérations) à condition que la somme de températures n'excède pas la durée maximale de vie souterraine (175 °Cj).

En l'absence de croûte (code -1), l'ensemble des plantules présentes à la surface du sol émerge. En présence d'une croûte (code ≥ 0), le modèle détermine pour chaque plantule active si elle peut franchir la croûte en comparant la force d'émergence qu'elle exerce au jour considéré avec la résistance de la croûte.

Comme nous l'avons vu précédemment, l'estimation de la résistance du sol est ajustée chaque jour. Elle dépend du type de croûte (structural ou sédimentaire), de la quantité de pluie subie et de la teneur en eau au jour considéré. Le nombre de plantules devant franchir une croûte de type sédimentaire est proportionnel au pourcentage de croûte sédimentaire qui recouvre la surface. Chaque jour ce nombre est ré-estimé en tenant compte de la proportion supplémentaire de croûte sédimentaire.

Si $FE > k \times R$;

avec $k = 5.2$

alors la plantule peut franchir la croûte sinon elle reste bloquée sous la croûte.

La valeur du coefficient k a été déterminée par optimisation d'après les résultats obtenus en conditions au champ pour la betterave face à une croûte structurale d'humidité et donc de résistance variable. Le suivi détaillé de la levée et de l'évolution des conditions du milieu de la parcelle 04P24 a été utilisé pour ajuster le facteur k intégré dans le modèle, qui permet de déterminer la possibilité de franchissement en confrontant la force d'émergence des plantules à la résistance du sol. Ce facteur k permet de calculer les taux de passages directement à travers la croûte.

Le taux de levée final observé pour cette parcelle était de 60 % avec un taux de mortalité sous croûte de 23%. La croûte était de type structural pendant toute la phase de levée. Elle s'est formée suite à une pluie cumulée de 35 mm entre le semis et le début de la levée. L'humidité variait au cours de la levée de 0.04 à 0.24 g g⁻¹ (figure II.5).

Pour établir la valeur du facteur k , nous avons utilisé les variables journalières suivantes :

- (i) le nombre de plantules arrivant à la surface chaque jour ;
- (ii) le nombre de plantules effectivement levées chaque jour et le nombre de plantules ayant traversé directement la croûte sans utiliser les fissures pour émerger ;
- (iii) la force d'émergence des plantules et la résistance de la croûte.

Pour établir les valeurs journalières de ces variables, nous avons procédé de la manière suivante :

(i) Le nombre total de plantules arrivées à la surface sur l'ensemble de la phase de levée pour la parcelle 04P24, est calculé d'après nos observations. Les causes de non levées qui ont été établies au cours de nos observations pour cette parcelle, sont utilisées pour éliminer du nombre total de semences suivies, toutes les causes de mortalité autres que bloquées sous croûte (plantules anormales, bloquées sous mottes et non germées). En se référant au nombre de graines semées, on obtient ainsi le nombre total sur l'ensemble de la phase de levée des plantules ayant atteint la surface du sol. Il comprend l'ensemble des plantules levées et les plantules restées bloquées sous croûte.

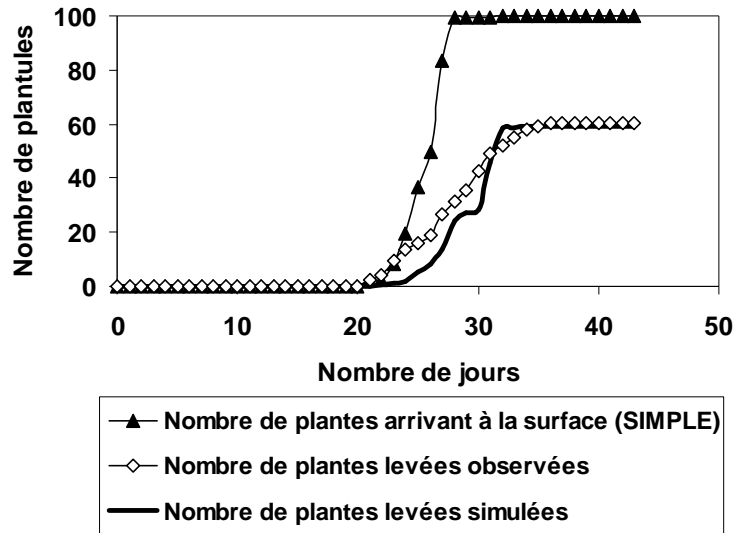
La cinétique de levée de ces plantules, c'est-à-dire le nombre de plantules arrivant chaque jour à la surface est calculée à l'aide du modèle SIMPLE. Le modèle est utilisé pour déterminer jour après jour, en dehors de tout problème de levée, le nombre de plantes susceptible d'arriver à la surface. Pour cela nous avons simulé un lit de semences fin, sans mottes, en déconnectant le module de prévision des levées sous croûte, et en utilisant les conditions climatiques depuis le semis (température et teneur en eau) ainsi que les caractéristiques de germination et d'allongement de l'espèce. On a donc ainsi l'estimation journalière du nombre potentiel de plantules qui aurait dû franchir la surface pour la parcelle 04P24, si il n'y avait pas eu formation d'une croûte.

(ii) Les observations de la levée effectuées jour par jour pour la parcelle 04P24, permettent de connaître le nombre de plantes levé chaque jour. Les observations journalières au champ des modes de passage, sont utilisées pour calculer le nombre réel de passages directement à travers la croûte, en soustrayant le nombre de passages par les fissures du nombre de levées journalier. En comparant ce nombre de levées directes à travers la croûte au nombre de plantes potentiellement arrivées à la surface, on peut déduire le taux journalier de franchissement directement à travers la croûte.

(iii) Le coefficient k est ensuite ajusté de manière à simuler un taux de franchissement direct des plantules à travers la croûte au plus près du taux total de franchissement direct qui a été observé pour la parcelle 04P24 (figure V.6). Pour cela, l'ensemble des fonctions intégrées dans le nouveau module est utilisé pour estimer au mieux d'une part la force d'émergence des plantules jour après jour, et d'autre part la résistance de la croûte et son évolution journalière sur l'ensemble de la phase de levée.

Figure V.6

Cinétiques de levée de plantules de betterave, observée et simulée, pour la parcelle 04P24, avec un facteur k calé à une valeur de 5.2.



La valeur du coefficient k obtenue est de 5.2, d'après les observations des cinétiques et taux de passages pour la parcelle 04P24.

Cette valeur permet d'obtenir un taux de franchissement final, directement à travers la croûte, identique entre les observations et la simulation, 60 %. Cependant les cinétiques de levée sont légèrement différentes entre les observations et la simulation (figure V.6) : la cinétique de levée simulée a une pente plus faible et non constante, par rapport à la cinétique de levée observée dont la pente est plus forte et relativement constante. La résistance moyenne simulée allait de 0.2 à 0.6 MPa. Les modifications des rapports force d'émergence sur résistance, simulés par le modèle, entraînent des variations marquées de la cinétique de levée qui ne sont pas observées *in situ*.

Pour les plantules restées bloquées sous la croûte, le modèle évalue si elles peuvent atteindre une fissure. Pour cela, les positions des fissures sont comparées avec les coordonnées des plantules. Si la distance pour atteindre une fissure est inférieure à une distance critique (caractéristique de l'espèce), la plantule parvient à franchir la croûte en utilisant le réseau de fissures. Si ce n'est pas le cas, le processus est réitéré le jour suivant (comparaison entre FE et R, positionnement par rapport aux fissures), jusqu'à ce que la plantule émerge ou meurt (somme de température > 175 °Cj).

Dans le cas de la parcelle 04P24 lorsque l'ensemble des modes de passage sont considérés, directement à travers la croûte et en utilisant le réseau de fissures, le taux de franchissement simulé est alors de 65 % contre 75 % dans les observations. Les taux de passage par les fissures sont sous-estimés par rapport à la réalité. Le placement aléatoire des plantules et des fissures dans le plan de simulation implique que le taux de passage dépend uniquement de l'intensité de la fissuration. Le modèle ne considère pas une orientation préférentielle des fissures par rapport à la ligne de semis, qui pourrait expliquer le taux de passages par les fissures plus élevé au champ. Cette orientation préférentielle a été mise en évidence *in situ* mais uniquement dans le cas du lin.

c. Sorties du modèle

Chaque jour, le nombre de plantules émergées est égal au nombre de plantules qui ont émergé à travers une croûte de type structural ou sédimentaire plus les plantules qui sont passées par les fissures. Les variables de sortie du modèle sont le taux de levée final, le nombre de plantes levées par les fissures et le nombre de plantes ayant franchi la croûte (données journalières).

Tableau V.2.

Effet des caractéristiques initiales du lit de semences (fin et sec, fin et humide, intermédiaire ou grossier) sur la levée de plantules de betterave issues de semences de petites (7-8.999 mg) ou de grosses tailles (13-16 mg, uniquement pour des lits de semences fin et humides); pour plusieurs dates de semis en fonction de la pluviométrie et de la teneur en eau de la surface ($H > 0.20 \text{ g g}^{-1}$ ou $S < 0.20 \text{ g g}^{-1}$).

Date semis	Pluie cumulée du semis au début de la levée (mm)	Humidité de la surface (S ou H)	Taux de levée (%) ancien module	Taux de levée (%) nouveau module				
				Fin et sec	Fin et humide		Int.	Grossier
					Grosses sem.	Petites sem.		
11 avril 94	33	H	100	83	89	84	84	94
15 avril 98	39	H et S	72	57	78	62	62	65
02 mars 04	35	S et H	100	64	77	69	64	67
03 mars 98	32	S et H	100	55	77	64	62	64
27 févr. 03	15	S	61	43	100	100	100	100

3. SIMULATIONS

L'objectif des simulations présentées est :

- d'évaluer le modèle proposé ;
- d'évaluer l'effet sur les levées de la prise en compte des caractéristiques initiales du lit de semences en fonction des conditions climatiques. Pour cela, les levées de plantules de betteraves sont simulées pour plusieurs dates de semis en faisant varier les caractéristiques initiales du lit de semences.
- de tester la possibilité de généraliser la prévision des taux de levée sous croûte à d'autres espèces qui diffèrent de la betterave par la force d'émergence qu'elles peuvent exercer et la géométrie de la plantule : lin, haricot et blé.

3.1. Simulations des levées de betterave

a. Effet de la variabilité des état initiaux du lit de semences sur les levées simulées, comparaison avec l'ancien module de SIMPLE

L'effet des caractéristiques initiales du lit de semences sur la levée des plantules a été évalué pour plusieurs dates de semis :

- dans le cas du semis de la parcelle 04P24 (02 mars 2004), où les conditions du milieu nécessaires au fonctionnement du modèle ont été suivies et notamment l'humidité de la surface du sol, qui a été mesurée chaque jour pendant l'ensemble de la phase de levée ;
- pour d'autres dates de semis choisies dans des jeux de données disponibles pour lesquelles nous avons des teneurs en eau de la surface du sol (0-1 cm) simulées à l'aide du modèle TEC (Witono et Bruckler, 1989). Ces dates ont été retenues en raison de leurs conditions climatiques variées qui aboutissent à des conditions de levées différenciées (formation d'une croûte ou non, croûte sèche ou humide).

Les taux de franchissement de la croûte à la fois direct et par les fissures, sont indiqués dans le tableau V.2 pour différents lits de semences avec des structures et des stabilités initiales variées. Lorsque les simulations sont réitérées plusieurs fois, on observe (non présenté) une variabilité des taux de levée entre simulations de l'ordre de 5% au maximum en raison de la nature stochastique du modèle (la résistance du sol et la force de la plantule sont représentées par une distribution statistique).

Les taux de levée simulés avec le nouveau module sont comparés aux résultats des simulations effectuées avec l'ancien module. Pour rappel, l'ancien module a été paramétré pour la betterave dans des conditions particulières : sol de type limono argileux, climat du nord de la France. Les semis ont pour la plupart eu lieu au mois d'avril avec des conditions majoritairement sèches favorisant la création de lits de semences fins. Le paramétrage de l'ancien modèle est proche des paramètres établis pour des lits de semences fin et sec dans le nouveau module : 12 mm de pluie cumulée depuis le semis aboutissent à la formation d'une croûte.

Pluviométrie marquée, surface humide pendant la phase de levée

La simulation d'un semis le 11 avril 1994 aboutit à la formation d'une croûte structurale quel que soit le type de lit de semences. La pluviométrie entre le semis et le début de la levée est de 33 mm. Cette quantité de pluie est suffisante pour atteindre le stade structural même dans les situations les moins sensibles à la battance, c'est-à-dire pour un lit de semences grossier.

La surface est restée humide pendant toute la phase de levée ($> 0.20 \text{ g g}^{-1}$). Ce type de conditions n'entraîne pas de problèmes de levée au champ, les plantules parvenant à franchir des croûtes structurales humides. Ce type de situations est bien simulé par l'ancien module de SIMPLE : 100 % des plantules arrivées à la surface du sol parviennent à franchir la croûte. Dans le cas du nouveau module, les taux de levée sont également très élevés mais modulés selon le type de lit de semences simulé : 83 à 94 %. Le nouveau module indique un écart de 10 % de levée entre le cas le plus sensible à la dégradation (lit initialement fin et sec) et un lit de semences grossier, moins sensible à la battance.

Pluviométrie marquée, surface avec des variations d'humidité pendant la phase de levée

Les conséquences des variations de l'humidité d'une surface dégradée sur les taux de levée peuvent différer selon le moment de la levée où ils surviennent. Les observations au champ ont montré que de manière générale une croûte humide ne bloque pas le passage des plantules. Par contre les observations indiquent qu'une réhumectation de la croûte à la fin de la phase de levée ne permettait pas aux plantules auparavant bloquées de franchir la croûte redevenue humide; sans doute en raison d'une diminution de la force d'émergence des plantules au cours du temps.

En ce qui concerne les simulations, une date de semis au 15 avril 1998 entraîne la formation d'une croûte pour tous les types de lits de semences simulés. La pluie cumulée depuis le semis est de 39 mm au début de la phase de levée. La croûte reste humide pendant la majeure partie de la levée ($> 0.20 \text{ g g}^{-1}$) puis se dessèche. Le taux de levée simulé est de 72 % avec l'ancien module ; il est plus faible et varie de 57 à 65 % avec le nouveau module.

Ces deux premières simulations, 11 avril 1994 et 15 avril 1998, donnent des taux de levée en conditions humides plus faibles que l'ancien module. On peut penser que le nouveau module sous-estime légèrement la capacité de franchissement dans ces conditions. Si on compare la simulation pour la parcelle 04P24 et les observations (figure V.6), on note que la pente de la cinétique de levée simulée est plus faible que celle observée au début de la phase de levée alors que la teneur en eau est encore relativement élevée. Puis elle augmente brusquement au moment où la croûte se dessèche, alors que la pente reste constante pour les observations. Ce qui amène à penser que le modèle sous-estime légèrement le taux de passage en conditions humides mais au contraire surestime le taux de passage en conditions sèches. Par contre le nouveau module permet d'évaluer l'impact de l'état initial du lit de semences face à ce type de pluies. Les pluies étant supérieures à 30 mm, cet impact apparaît modéré : de l'ordre de 10%.

Dans le cas de simulations de la levée pour la parcelle 04P24, semée le 02 mars 2004, et également pour un semis simulé le 03 mars 1998, on obtient la formation d'une croûte de battance avant le début de la levée indépendamment du type de lit de semences.

Dans les deux cas plus de 30 mm sont cumulés depuis le semis avant le début de la levée. L'humidité varie fortement. Dans le cas de la parcelle 04P24, la teneur en eau de la surface a été mesurée quotidiennement pendant toute la phase de la levée. Elle variait entre 0.04 et 0.24 g g^{-1} . La croûte est sèche pendant presque toute la phase de levée et se réhumecte en fin de levée.

Avec l'ancien module de SIMPLE, on observe une reprise de la levée au moment de la réhumectation (pluviométrie journalière supérieure à 3.5 mm), qui aboutit à un taux de franchissement de la croûte de 100 %. Cette reprise de la levée n'est pas observée au champ. Le nouveau module construit reproduit correctement ce type de situations. Ceci est permis par la diminution au cours du temps de la force d'émergence que peuvent exercer les plantules dans le nouveau module. Elle n'était pas prise en compte dans l'ancienne version.

Pour le semis 2004, les taux de levée simulés pour différents types de lits de semences avec le nouveau module vont de 64 à 67 %. On n'observe pas d'effet du type de lit de semences. Pour le semis 1998, le taux de levée varie entre 55 et 64%, selon le type de lit de semences simulé, un écart de 10% séparant les conditions les plus sensibles à la battance (lit fin et sec) des conditions les moins sensibles (lit grossier).

Pluviométrie modérée, surface sèche pendant l'ensemble de la phase de levée

Un semis a été simulé le 27 février 2003. La quantité de pluie entre le semis et le début de la levée était de 15 mm. La pluviométrie était nulle pendant toute la phase de levée et la teneur en eau de la surface était relativement faible : environ 11-12 %.

Les taux de levée sont très différents selon les types de lits de semences simulés : 43 à 100%. La pluie est suffisante pour aboutir à la formation de la croûte pour un lit initialement fin et sec : 15 mm de pluie sont cumulés alors que 11 mm de pluie sont nécessaires pour aboutir à la formation d'une croûte.

Ce type de lit de semences, fin et sec, correspond aux situations prises en compte qui avaient permis de paramétrer l'ancien module de SIMPLE, qui lui simule un taux de levée unique de 61 %.

Cette quantité de pluie est insuffisante pour former une croûte à la surface des autres types de lits de semences : fin et humide, intermédiaire ou grossier. Le nouveau module permet de chiffrer l'effet de la prise en compte de l'état initial du lit de semences : il apparaît très important dans ce type de situation.

Pluviométrie forte, surface sèche pendant l'ensemble de la phase de levée

Nous avons simulé l'apparition de croûtes sédimentaire sèches à la surface du sol avant le début des levées. Pour une pluviométrie de 70 mm, le taux de levée est de 40 à 45 % selon le type de lit de semences. Cette pluviométrie correspond à l'apparition des premiers dépôts sédimentaires. Pour une pluie de 100 mm, le taux de levée est de 26 % pour un lit fin et sec contre 40 % pour un lit intermédiaire ou grossier.

b. Effet de la masse initiale des semences sur le taux de levée

Nous avons testé l'effet de la masse initiale des semences sur le taux de franchissement de la surface pour les différentes dates de semis simulées (tableau V.2). Cette analyse est limitée au cas d'un lit de semences fin et humide. Les taux de levée des semences avec des masses initiales plus élevées (13-16 mg) sont systématiquement supérieurs aux taux de levée simulés dans le cas des petites semences (7-8.999 mg), en relation avec leur différence de force (moyennes de 0.08 N contre 0.07 N, voir figure II.11). Cet écart s'avère relativement faible, environ 10% en moyenne. Mais il varie de 5 à 16 % selon les dates de semis.

c. Discussion

Ce premier ensemble de simulations montre l'importance de la prise en compte des caractéristiques du lit de semences. L'impact de ces facteurs est très variable selon les conditions de pluviométrie rencontrées. Il est maximum lorsque la pluie cumulée reste relativement faible (comme dans le cas du semis du 27 février 2003). Dans ce cas, une croûte se forme uniquement dans le cas des lits de semences fins et secs, les plus sensibles à la battance, et a de fortes conséquences sur le taux de levée. Par contre l'effet de la variabilité des conditions initiales est relativement faible (inférieur à 10%) lorsque la pluviométrie est suffisante pour former une croûte de type structural quel que soit les caractéristiques initiales du lit de semences (pluie supérieure à 27 mm), y compris dans les cas les moins sensibles à la battance (lit de semences grossier). A partir du stade sédimentaire, les écarts entre les taux de franchissement sont à nouveau importants selon les types de lits de semences simulés étant donné qu'une influence de l'état initial du lit de semence a été mise en évidence et prise en compte sur la vitesse d'extension de la croûte sédimentaire et donc l'augmentation de la résistance.

Ces premiers résultats montrent des effets potentiellement importants. Il faudrait reprendre l'analyse fréquentielle qui a été présentée en début de travail (figure In.5) en tenant compte des différents seuils qui ont été établis. Toutefois ce programme d'études par simulation serait plus délicat à construire puisque l'utilisation du nouveau module implique d'avoir l'humidité de l'horizon de surface (0-1 cm) et que les simulations sont multipliées par le nombre de type de lits de semences. Ces simulations seraient d'autant plus intéressantes si elles tenaient compte des conditions climatiques avant la date de semis pour prévoir l'état structural et l'humidité du lit de semences.

3.2. Simulations des levées pour d'autres espèces : lin, haricot, blé

Nous avons tenté d'utiliser le nouveau module construit pour l'adapter à d'autres espèces dont les forces d'émergence étaient très différentes de celle que peut exercer la betterave. Les résultats présentés constituent une première tentative qu'il faudrait développer.

Dans l'objectif de pouvoir généraliser l'utilisation du modèle à d'autres espèces sans devoir à nouveau mettre en place des expérimentations au champ, nous voulions tester l'hypothèse que le coefficient k , dont la valeur a été établie à partir de résultats expérimentaux précis et détaillés sur la betterave, conservait la même valeur entre les espèces. Il s'agit de rapprocher la force d'émergence propre à l'espèce et la résistance du matériau via ce coefficient k et établir que la plantule lève si :

$$FE > k \times R$$

Nous avons donc tenté une évaluation des taux de levées sous croûte pour chaque espèce en gardant la même valeur pour le coefficient k , et comparé les taux obtenus pour des situations très simples avec des ordres de grandeur de taux observés au champ.

Dans le cas des cultures de printemps, nous avons choisi de simuler les taux de levée par espèce face à une résistance de croûte constante au cours de toute la phase de levée (correspondant à celle d'une croûte structurale sèche) pour vérifier si les ordres de grandeurs de taux de levée obtenus étaient vraisemblables.

Pour le blé, nous avons simulé la formation d'une croûte qui reste humide pendant l'ensemble de la phase de levée (0.20 g g^{-1}). Cette croûte est formée suite à des quantités de pluie variables (de 50 à 200 mm de pluie). L'objectif était d'estimer quelle était la quantité de pluie nécessaire pour que la croûte atteigne une résistance suffisante pour bloquer une proportion significative de plantules.

La même valeur est attribuée au coefficient k pour l'ensemble de ces simulations.

a. Simulations des levées pour les espèces semées au printemps

Nous avons simulé les taux de levée de deux cultures de printemps, lin et haricot, pour une résistance moyenne constante durant toute la phase de levée égale à 0.7 MPa. Cette résistance correspond à la résistance moyenne pour une croûte structurale sèche (figure III.6). Les forces d'émergence sont en moyenne de 0.14 N pour le lin et 3.3 N pour le haricot (pour cette culture, nous n'avons pu réaliser que très peu de mesures, mais les ordres de grandeur obtenus étaient semblables à ceux trouvés dans la littérature, tableau In.1). Les mêmes simulations ont aussi été réalisées pour la betterave dont la force d'émergence moyenne est de 0.07 N.

Dans le cas de la betterave, le taux de franchissement simulé dans ce cas est de 45 %, contre 80 % pour le lin et 100 % dans le cas du haricot.

La capacité du lin et du haricot à franchir une croûte paraît surestimée par rapport à la réalité. Ces espèces ont été suivies au champ, le taux de levée était de 77 % pour le lin et 54 % pour le haricot face à des croûtes structurales de respectivement 0.3 et 0.85 MPa.

Dans le cas du lin, les franchissements avaient en majorité lieu par les fissures (76 % des levées, tableau II.3). Les taux de passage directement à travers la croûte étaient relativement faibles (16 %) face à une croûte de résistance plus faible, 0.3 MPa, contrairement à ce qui est simulé : 20 % pour une croûte de 0.7 MPa.

Dans le cas du haricot, la résistance réelle était de 0.85 MPa. Cette résistance plus élevée que celle simulée suffit peut-être à expliquer le taux de levée réel nettement plus faible que celui simulé. Par ailleurs, la force d'émergence du haricot est élevée, mais la surface d'application également.

Nous avons donc réitéré ces simulations mais en confrontant les pressions exercées par les plantules à la résistance des croûtes. Les valeurs retenues pour l'aire de la surface d'application des forces sont : 0.96 mm^2 pour la betterave, 1 mm^2 pour le lin, 2.5 mm^2 pour le haricot et 1.5 mm^2 pour le blé (tableau In.1). Le facteur k a été à nouveau calé en fonction des données observées pour la parcelle 04P24, sa valeur a été fixée à 4.9 (au lieu de 5.2). Les taux de franchissement obtenus sont du même ordre de grandeur que ceux obtenus en considérant uniquement les forces exercées. La prise en compte des pressions n'a pas permis d'améliorer les résultats des simulations.

b. Simulations des levées pour le blé

Dans le cas du blé, les conditions de semis à l'automne ne permettent pas à la croûte formée de sécher. Des problèmes de blocage des plantules sous les croûtes peuvent survenir uniquement suite à des quantités de pluie très élevées, conduisant à une forte dégradation et accumulation des dépôts sédimentaires, qui aboutit à une résistance de la croûte humide suffisante pour bloquer les plantules.

Une équation est intégrée qui permet d'augmenter la résistance en fonction de la pluie cumulée jusqu'à atteindre un maximum correspondant à la résistance d'une croûte sédimentaire.

Nous avons simulé avec le nouveau module, des quantités de pluie croissantes pour un lit de semences initialement grossier pour une teneur en eau de la surface constante de 0.20 g g^{-1} . Il est nécessaire d'atteindre une quantité de pluie de 200 mm pour observer une perturbation de la levée. Le taux de franchissement de la croûte est de 94 % pour 100 mm de pluie cumulée depuis le semis. Ce taux diminue à 72 % pour 200 mm de pluie cumulée. Ces résultats de simulation sont cohérents avec les données observées sur l'essai longue durée de Mons-en-Chaussée pour des semis d'octobre 2002. Le taux de levée final était de 94 % pour des pluies cumulées de 135 mm.

c. Discussion

Ce travail de simulation qui avait pour objectif de tester le modèle pour plusieurs espèces n'est que très préliminaire. Les résultats des premières simulations réalisées qui avaient pour objectif d'acquérir des ordres de grandeur sont encourageants. Ce travail serait à reprendre en utilisant les données acquises au cours des deux années d'expérimentation sur ces cultures pour comparer les taux de levée simulés et observés en tenant compte des conditions de milieu réelles (variation de la résistance de la croûte en lien avec la pluviométrie et la teneur en eau).

On pourrait d'autre part chercher à établir la valeur du coefficient k sur ces autres cultures pour pouvoir les comparer à la valeur évaluée dans le cas de la betterave. Nous ne disposons pas d'autant d'observations pour chacune de ces cultures que sur la betterave pour ajuster au mieux le coefficient k , cependant sa valeur pourrait être établie. Lorsque les cultures considérées ont des modes de passages voisins face à un même type de croûte, on peut penser que le coefficient k reste similaire entre les espèces. Par contre, quand les fréquences des modes de passage diffèrent (haricot par rapport à la betterave), il est moins évident que ce coefficient conserve la même valeur.

De la même manière, il est possible que la valeur de ce coefficient dépende de la teneur en eau. Si on analyse la cinétique de levée simulée pour la parcelle 04P24 (figure V.6), on observe deux étapes dans la cinétique de levée avec des pentes différentes qui correspondent à deux situations différentes du point de vue de la teneur en eau : croûte sèche ou humide. On peut donc envisager d'attribuer deux valeurs à k selon le type de conditions sèches ou humides. Cela correspond à des modes de passage différents (pénétration vs. rupture) et donc on peut penser que cela correspond au passage d'une situation où la pression d'émergence est pertinente à une situation où c'est la force qui est pertinente, ce qui reviendrait donc à avoir une valeur seuil de teneur en eau au-delà de laquelle le coefficient k est modifié.

CONCLUSION GENERALE
ET PERPECTIVES

L'objectif de ce travail de thèse était d'améliorer la prévision de la levée sous croûte de battance en proposant un nouveau module de levée sous croûte pour le modèle de levée SIMPLE. Le nouveau module de levée sous croûte devait pouvoir intégrer un ensemble des facteurs de variation qui peuvent influencer la levée sous croûte, et qui n'avaient pas été pris en compte dans l'ancienne version.

Ces facteurs de variation sont de plusieurs types :

- les caractéristiques du lit de semences qui peuvent influencer la dynamique d'évolution de l'état de la surface sous l'action des pluies. Ces caractéristiques sont la structure et sensibilité à la battance de la surface du sol ; la sensibilité à la battance dépendant principalement de la texture et de la teneur en eau du sol ;
- les caractéristiques physiques des croûtes formées, stade de développement et épaisseur qui ont des conséquences sur la résistance de la croûte que rencontrent les plantules au moment de franchir la surface ;
- les caractéristiques des plantules, espèce, variété, masse des semences, âge des plantules ; dont dépend la capacité des plantules à franchir la croûte.

Une première étape était d'évaluer l'impact réel de ces facteurs sur les levées, de chiffrer l'ampleur de leurs effets afin de déterminer quels éléments doivent être réellement pris en compte pour prévoir la levée des plantules sous croûte de battance.

Par rapport à l'ancien module actuellement dans SIMPLE, ce travail devait permettre de prendre en compte la variabilité des conditions de semis. Un autre aspect concernait la généralisation du modèle à d'autres types de sols et à d'autres cultures. L'ancien module est paramétré dans le cas de la betterave dans des sols de limons argileux et n'est pas facilement paramétrable pour d'autres cultures et types de sols.

Nécessité de revenir à une observation *in situ*

Etant donné les difficultés rencontrées lors des précédents travaux menés au laboratoire sur la modélisation des franchissements de la croûte (Aubertot, 1998 ; Aubertot et al., 2002), il a été décidé de revenir à des observations *in situ*. Il était nécessaire d'établir les modes de franchissement pour différentes espèces, en particulier l'importance relative des modes de passage par pénétration, rupture et fissure, face à différents stades de dégradation de la surface. Il était aussi nécessaire de revenir à la description de la dynamique de formation des croûtes et de la fissuration au champ. En effet les études au laboratoire, si elles permettent de sérier les facteurs influençant la formation d'une croûte, ne fournissent pas les informations nécessaires pour reconstituer la dynamique de dégradation d'un lit de semences. Il n'existait pas à notre connaissance de résultats d'observations *in situ* sur des gammes de lits de semences variés, en particulier pour les premiers stades de formation de la croûte.

Nous avons réalisé nos expérimentations sur l'essai longue durée INRA « Système de cultures » de Mons-en-Chaussée, ce qui présentait l'avantage de disposer d'un large nombre de situations, plusieurs cultures semées chaque année, pendant les deux années d'expérimentations menées au cours de la thèse. De plus, dans le cadre de l'essai longue durée, des suivis sont effectués chaque année sur chaque parcelle qui ont permis d'élargir la gamme de conditions rencontrées pour l'étude de la formation de la croûte. Les mesures plus détaillées et spécifiques effectuées au cours de la thèse ont permis de mettre au point une méthode pour analyser ces données acquises sur une plus longue durée.

Les expérimentations menées au cours de la thèse ont permis d'établir les taux de levée et les modes de passage utilisés pour franchir différents types de croûte, plus ou moins développées, avec des teneurs en eau variées. Plusieurs espèces ont été suivies : betterave, lin, blé et haricot.

Ces observations ont permis de chiffrer l'impact du réseau de fissures sur la levée des plantules, impact considérable pour les plantules avec les plus faibles forces d'émergence : la betterave et le lin. Les passages par rupture, relativement importants dans les études de laboratoire et qui posaient le problème de leur modélisation, sont apparus à l'opposé peu nombreux : nuls pour des croûtes humides, ils atteignent un maximum de 14 % pour des croûtes sèches pour la betterave, espèce à faible force d'émergence.

Un autre intérêt des expérimentations menées au champ, a été de pouvoir étudier la dynamique de formation des croûtes en conditions réelles pour une large gamme de situations : caractéristiques du lit de semences et séquences pluvieuses variées. Les caractéristiques des lits de semences sont établies et chiffrées en conditions réelles de semis. Cela permet d'observer leur gamme de variation. On peut constater que leurs différentes caractéristiques (quantité de terre fine et humidité) ne varient pas indépendamment.

Nous avons établi les valeurs de pluie cumulées nécessaires pour atteindre les différents stades de développement de la croûte, pour les différents types de lits de semences, du plus sensible à la battance, correspondant à un lit de semences fin et sec, au moins sensible c'est-à-dire un lit de semences grossier.

Les différents faciès observés ont été physiquement caractérisés, notamment par des mesures pénétrométriques de leur résistance qui dans le modèle construit, sont confrontées à la force d'émergence des plantules. Une relation a également été établie entre la teneur en eau de la croûte et sa résistance.

Etant donné l'impact de la fissuration sur les levées qui a été observé, il était nécessaire de prévoir le développement du réseau de fissures à la surface du lit de semences en fonction des conditions du milieu. Des méthodes d'analyse d'images ont été développées grâce à la collaboration avec M. Herbin (CReSTIC-LERI, université de Reims). L'utilisation de ces outils nous a permis de caractériser le réseau de fissures se formant *in situ* et de montrer que la quantité de fissures présente à la surface du lit de semences à un instant donné dépend de la teneur en eau et du niveau de dégradation de la croûte. Ces données chiffrées ont permis de paramétrer un modèle de fissuration qui dans le module de levée sous croûte permet de prendre en compte l'effet de la fissuration sur les levées.

Nécessité de marier les approches réalisées au champ avec les approches de laboratoire

Cependant, les expérimentations menées pendant ces deux années ne permettent pas d'explorer une gamme de situations suffisante pour pouvoir généraliser l'utilisation du modèle à d'autres types de sols ou encore d'autres types de cultures. Il n'est pas envisageable de réitérer ce type d'expérimentations au champ, qui exige beaucoup de temps et l'acquisition de nombreuses données, pour adapter les paramètres du modèle à d'autres types de sol. Les études menées au champ sont obligatoirement limitées dans le temps et dans l'espace.

Aussi, il est nécessaire de mettre au point d'autres méthodes expérimentales pour acquérir les informations qui manqueraient pour paramétrer le modèle pour d'autres cultures ou d'autres sols, afin de compléter les expérimentations de terrain.

Concernant la prévision de la dynamique de formation des croûtes, les tests de stabilité des agrégats paraissent être un moyen permettant de classer les situations. Les tests pratiqués sur des échantillons séchés sont une méthode permettant d'estimer la sensibilité de différents types de sols à la dégradation. Dans notre étude, ces tests ont aussi été effectués sur des échantillons de sol conservés à leur humidité au moment du semis. Les résultats ont montré que pour un même sol, la stabilité des agrégats dépendait principalement de la teneur en eau. Une valeur seuil de teneur en eau a été identifiée au-delà de laquelle la stabilité augmente fortement avec la teneur en eau.

Ces tests pourraient être reproduits pour d'autres types de sols, sur des échantillons avec des teneurs en eau variées. Ils pourraient permettre d'établir, pour plusieurs types de sol, la relation entre teneur en eau et stabilité, et de vérifier si un tel seuil peut être obtenu. Nous avons observé que dans le cas d'un sol limono argileux, ce seuil de teneur en eau, également mis en évidence sous simulateur de pluie, correspondait au point d'inflexion décrivant la relation entre potentiel hydrique et humidité. Il serait intéressant de vérifier si cela est également le cas pour d'autres types de sols. Par ailleurs, on pourrait établir la valeur de la pente avec laquelle la stabilité augmente avec l'humidité pour classer les sols à l'aide de cet indicateur.

Les études sous simulateur de pluie présentées ont également cherché à établir les relations entre la teneur en eau et la sensibilité à la battance pour un sol donné, sensibilité représentée par la quantité de pluie nécessaire pour atteindre 50 % de la surface croûtée pour différentes tailles d'agrégats. Ces études présentent l'intérêt de pouvoir différencier les facteurs qui influencent la formation de la croûte. Dans cette étude la granulométrie des agrégats varie indépendamment de leur humidité, alors que ces facteurs sont difficilement analysables indépendamment au champ. Les valeurs de pluie cumulée mises en évidence dans ces études sous simulateur de pluie pourraient être utilisées pour donner un indice de sensibilité et ainsi permettre d'adapter les valeurs de pluie cumulées utilisées dans le modèle et issues de nos travaux au champ.

Actuellement l'étude sous simulateur de pluie pour plusieurs teneurs en eau initiales a été menée pour un seul type de sol. Des mesures ont également été effectuées pour des sols de texture variée mais seulement pour deux types de teneur en eau initiale : un sol sec et un sol avec une teneur en eau proche de la saturation. Les travaux menés au champ et au laboratoire montrent qu'il serait intéressant de faire ces mesures pour des sols à des teneurs en eau moins élevées, sur sol ressuyé. Les données issues ces travaux pourraient être utilisées pour essayer d'adapter les valeurs des paramètres à intégrer dans le modèle pour d'autres types de sols.

Dans le cadre de ce travail, la simulation de pluie a également été utilisée pour reproduire des situations de levées sous croûte qui n'avaient pas pu être observées au champ. Nous avons cherché à reproduire au mieux les conditions naturelles en prélevant des lits de semences au champ, en conservant intacte la structure. Après la mise en place des semences, la surface du sol est directement soumise à la dégradation sous pluie simulée. Ce type d'expérimentation pourrait être utilisée pour établir les modes de passage pour d'autres cultures face à des croûtes plus proches de celles formées au champ que les croûtes qui avaient été reconstituées dans les études antérieures (Aubertot, 1998 ; Aubertot et al., 2002). Elles pourraient permettre d'établir les proportions entre les passages par pénétration et les passages par rupture pour des teneurs en eau variées et différentes cultures. Par contre les passages par fissures ne peuvent pas être quantifiés étant donné l'impact de la structure de la surface (Taki et Godwin, 2006 ; Taki et al., 2006), sur la quantité de fissures et leur localisation. En parallèle la mesure des forces d'émergence pour les différentes espèces paraît être un bon moyen de caractériser leur capacité à émerger.

Qu'apporte le nouveau modèle, quelles sont ses limites ?

Le premier apport de la mise en forme d'un nouveau modèle de levée sous croûte est d'avoir valorisé, mis en forme les ensembles de données acquis depuis plusieurs années et qui restaient disparates. Le traitement des suivis photographiques réalisés sur l'essai de longue durée, et des données acquises sous simulateur de pluie a largement progressé. De nombreuses méthodes ont été développées : mesures des forces d'émergence, tests de stabilité structurale à l'état humide, procédures d'analyse d'images pour caractériser la surface du sol. C'est la modélisation qui a rendu nécessaire l'agrégation des données acquises dans différents domaines et sur de longues séries.

Les observations effectuées au cours de ce travail et les difficultés à appliquer les modèles physiques de franchissement dans les conditions naturelles nous ont amené à prévoir le franchissement des plantules via un coefficient empirique permettant confronter les forces que peuvent exercer les plantules et la résistance des croûtes. Les taux de passages par les fissures sont estimés à partir de la localisation des fissures et de la distance que peut parcourir les plantules pour atteindre une fissure, distance qui est caractéristique des espèces considérées.

L'effet des caractéristiques initiales du lit de semences (structure, teneur en eau) sur la vitesse d'apparition des différents stades de la croûte a été intégré. Un premier travail de simulation a permis de montrer que ce facteur module le résultat des simulations et que dans certaines conditions de pluviométrie il peut avoir un impact très fort sur les levées.

La prise en compte de ce facteur et des différents stades de développement de la croûte (structural à sédimentaire) contribue à l'objectif de généralisation via la prise en compte des conditions de milieu propres à chaque type de culture. Par exemple, les lits de semences grossiers sont majoritairement observés pour des semis à l'automne ou encore pour des semis précoces au printemps (conditions humides pendant les opérations de travail du sol).

Nous avons montré que la quantité de fissures présente à la surface du lit de semences à un instant donné dépend de la teneur en eau et du niveau de dégradation de la croûte. Une équation a été intégrée dans le modèle permet de prévoir chaque jour de la simulation la quantité de fissures en fonction de la teneur en eau de la surface et en fonction de la pluie cumulée, utilisée comme un indicateur du niveau de dégradation. Cependant nous n'avons pas établi de prévision du réseau de fissures dans le modèle en relation avec l'état structural initial du lit de semences (son modelé). La prévision actuelle ne donne pas d'orientation particulière au réseau de fissures qui se forme. Les travaux développés dans le cadre du LERI (Thèse Gille Valette) pourraient permettre à terme d'améliorer ce point de la modélisation.

En parallèle, le modèle intègre la force d'émergence exercée par la plante. Pour chaque plantule, le modèle tire au sort dans une distribution sa force d'émergence, et la résistance de la croûte. Ce principe de prendre en compte la variabilité est utilisé systématiquement dans le modèle SIMPLE, à chaque fois qu'elle a pu être mise en évidence et quantifiée. Dans les travaux menés au laboratoire par Aubertot (1998, 2002), la valeur de résistance de la croûte utilisée dans les modèles de franchissements correspondait à la valeur moyenne de la résistance pour la situation considérée. Il utilisait une distribution seulement dans le cas de la force d'émergence des plantules.

Cependant nous n'avons pas évalué l'importance de l'effet de l'utilisation de distributions de la résistance et des forces d'émergence sur les résultats des simulations.

Les forces d'émergence des plantules et la résistance de la croûte sont confrontées via un coefficient empirique. Les résultats obtenus sont prometteurs et de meilleure qualité que les résultats obtenus en utilisant des modèles physiques de franchissement (Aubertot, 1998 ; Aubertot et al., 2002). Cependant il reste différents points à tester pouvant améliorer la manière dont ce coefficient est établi. Il s'agit d'apprécier s'il est nécessaire ou non de le faire varier en tenant compte de la teneur en eau de la croûte, et en considérant la surface d'application des forces exercées par les plantules pour améliorer la généralisation de l'utilisation du modèle à d'autres cultures.

Un premier travail de simulation a été conduit pour tenter d'évaluer les effets des différents facteurs intégrés dans le nouveau modèle. Dans le cas de la betterave, nous avons évalué l'effet de la prise en compte des caractéristiques initiales du lit de semences et de la masse des semences sur les taux de levée simulée pour plusieurs séquences pluvieuses et conditions du milieu. Cette étude préliminaire montre que l'effet du type du lit de semences peut être considérable selon les conditions. L'effet de la masse des semences est moins marqué. Cependant, il peut aller jusqu'à 15 % dans certaines situations. Ceci montre l'intérêt de la modélisation qui permet de tester des facteurs dont les effets sur la levée sont très variables et donc très difficiles à mettre en évidence au cours des études au champ.

REFERENCES

- Abas, F.S.** 2002 A content-based analysis of craquelure patterns in painting. PhD University of Southampton.
- Abbas Hemmat, Khashoei, A.A.** 2003. Emergence of irrigated cotton in flatland planting in relation to furrow opener type and crust-breaking treatments for Cambisols in central Iran. *Soil and Tillage research* 70 (2): 153-162.
- Anderson, S.H., Peyton, R.L., Gantzer, C.J.** 1990. Evaluation of constructed and natural soil macropores using X-ray computed tomography. *Geoderma* 46: 13-29.
- 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.
- Aubertot, J-N.** 1998. Contribution à la mise au point d'un modèle de prévision des levées: modélisation de l'état structural du lit de semences et de ses effets sur la levée. Application à la betterave sucrière. Mémoire de thèse, INA P-G, Paris, 98 pages.
- Aubertot, J-N., Dürr, C., Kiêu, K., Richard, G.** 1999. Characterization of Sugar Beet Seedbed Structure. *Soil Science Society of America Journal* 63: 1377-1384.
- Aubertot, J-N., Dürr, C., Richard, G., Souty, N., Duval, Y.** 2002. Are penetrometer measurements useful in predicting emergence of sugar beet (*Beta Vulgaris* L.) seedlings through a crust? *Plant and Soil* 241 (2): 177-186.
- Auzet, A.V., Boiffin, J., Ludwig, B.** 1995. Concentrated flow erosion in cultivated catchments: influence of soil surface state. *Earth Surface Processes and Landforms* 20 (8): 759-767.
- Awadhwal, N.K., Thierstein, G.E.** 1985. Soil crust and its impact on crop establishment: a review. *Soil and Tillage Research* 5: 289-302.
- Baumhardt, R.L., Unger, P.W., Dao, T.H.** 2004. Seedbed Surface Geometry Effects on Soil Crusting and Seedling Emergence. *Agronomy Journal* 96 (4): 1112-1117.
- Boiffin, J.** 1984. La dégradation structurale des couches superficielles sous l'action des pluies. Thèse de docteur ingénieur, INAPG, Paris, 320 p.
- Boiffin, J., Bresson, L.M.** 1987. Dynamique de formation des croûtes superficielles: apport de l'analyse microscopique. In: *Micromorphologie des sols/ Soil micromorphology*, N. Feodoroff, L.M. Bresson, M.A. Courty (eds), A.F.E.S, Plaisir: 393-399.

- Boiffin, J., Guérif, J., Stengel, P.** 1990. Les processus d'évolution de l'état structural du sol: quelques exemples d'études expérimentales récentes. In: La structure du sol et son évolution : conséquences agronomiques, maîtrise par l'agriculteur, J. Boiffin et A. Marin-Lafleche (eds), INRA, Paris: 37-69.
- Boizard, H., Richard, G., Roger-Estrade, J., Dürr, C., Boiffin, J.** 2001. Cumulative effects of cropping systems on the structure of the tilled layer in Northern France. *Soil and Tillage Research* 64: 149-164.
- Bouaziz, A., Bruckler, L.** 1989a. Modeling of wheat imbibition and germination as influenced by soil physical properties. *Soil Science Society of America Journal* 53: 219-227.
- Bouaziz, A., Bruckler, L.** 1989b. Modeling wheat seedling growth and emergence: I. Seedling growth affected by soil water potential. *Soil Science Society of America Journal* 53: 1831-1838.
- Bouaziz, A., Bruckler, L.** 1989c. Modeling wheat seedling growth and emergence: II. Comparison with field experiments. *Soil Science Society of America Journal* 53: 1838-1846.
- Bouaziz, A., Souty, N., Hicks, D.** 1990. Emergence Force exerted by wheat seedling. *Soil and Tillage research* 17: 211-219.
- Bradford, J.M., Huang, C.** 1992. Mechanisms of crust formation: physical components. In: *Soil crusting: chemical and physical processes*, M.E. Summer and B.A. Stewart (eds): 55-72.
- Brisson, N., Mary, B., Ripoche, D., Jeuffroy, M-H., Ruguey, F., Nicoullaud, B., Gate, P., Devienne-Barret, F., Antonioletti, R, Dürr, C, Richard, G, Beaudoin, N., Recous, S., Tayot, X., Plenet, D., Cellier, P., Machet, J-M., Meynard, J-M., Delécolle, R.** 1998. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. Theory and parametrization applied to wheat and corn. *Agronomie* 18: 311-346.
- 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. *Advances in sugar beet research* 5: 95-106.
- Casenave, A., Valentin, C.** 1992. A runoff capability classification system based on surface features criteria in semi-arid areas of West Africa. *Journal of Hydrology* 130: 231-249.
- Cerdan O., Le Bissonnais Y., Couturier A., Bourennane H. and Souchère V.** 2002. Rill erosion on cultivated hillslopes during two extreme rainfall events in Normandy, France. *Soil and Tillage Research* 67: 99-108.
- Chertkov, V.Y. Ravina, I.** 1998. Modeling the crack network of swelling clay soils. *Soil Science Society of America Journal* 62: 1162-1171.

- Cousin, I., Levitz, P., Bruand, A.** 1996. Three-dimensional analysis of a loamy-clay soil using pore and solid chord distribution. *European Journal of Soil Science* 47 (4): 439-452.
- Dexter, A.R.** 2004a. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma* 120: 201-214.
- Dexter, A.R.** 2004b. Soil physical quality: Part II. Friability, tillage, tilth and hard-setting. *Geoderma* 120: 215-225.
- Dexter, A.R.** 2004c. Soil physical quality: Part III. Unsaturated hydraulic conductivity and general conclusions about S-theory. *Geoderma* 120: 227-239.
- Dorsainvil, F., Dürr, 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.
- Dubrulle, P., Boiffin, J.** 1989. Un exemple d'enregistrement informatisé des enregistrements pluviométriques pour les études relatives à la dégradation physique des sols. *La météorologie série VII*, 29: 22-27.
- Dürr, C., Boiffin, J., Fleury, A., Coulomb, I.** 1992. Analysis of the variability of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) growth during the early stages. II - Factors influencing seedling size in field conditions. *Agronomie* 12: 527-235.
- Dürr, C., Boiffin, J.** 1995. Sugarbeet seedling growth from germination to first leaf stage. *Journal of Agricultural Science, Cambridge*, 124: 427-435.
- Dürr, C., Mary, B.** 1998. Effects of nutrient supply on pre-emergence growth and nutrient absorption of wheat (*Triticum aestivum*) and sugarbeet (*Beta vulgaris* L.). *Annals of Botany* 81: 665-672.
- Dürr, C., Aubertot, J-N.** 2000. Emergence of seedlings of sugarbeet (*Beta Vulgaris* L.) as affected by the size, roughness and position of aggregates in the seedbed. *Plant and Soil* 219 (1/2): 211-220.
- Dürr, C., Aubertot, J.N., Richard, G., Dubrulle, P., Duval, Y., Boiffin, J.** 2001. SIMPLE: a model for SIMulation of PLant Emergence predicting the effects of soil tillage and sowing operations. *Soil Science Society of America Journal* 65(2): 414-423.
- Dürr, C, Aubertot, J.N., Dubrulle, P., Richard, G., Dorsainvil, F., Justes, E., Job, D., Boiffin, J.** 2003 SIMPLE (SIMulation of PLant Emergence): a model for predicting crop emergence. In : *The biology of seeds. Recent research advances* (eds G Nicolas, KJ Bradford, D Côme and HW Pritchard), CABI Publishing, UK: 225-232.
- Duval, Y., Boiffin, J.** 1994a. La dynamique de formation des croûtes de battance. In: *Implantation de la betterave industrielle*, INRA (eds), Paris: 67-86.

- Duval, Y., Boiffin, J.** 1994b. A daily emergence disturbance index for sugarbeet based on soil crusting. In: Soil Tillage for crop production and protection of the environment, Proc. of 13th ISTRO Conference, H.E. Jensen (ed), Aalborg (DK): 633-638.
- Farres, P.** 1978. The role of time and aggregate size in the crusting process. *Earth Surface Processes* 3 (3): 243-254.
- Fies, J. C., Castelaogegunde, A. M.** 1996. Variation of crust pore space under rain and consequences on infiltrability. *Agronomie* 16: 367-379.
- Finch-Savage, W.E., Phelps, K.** 1993. Onion (*Allium cepa* L.) seedling emergence patterns can be explained by the influence of soil temperature and water potential on seed germination. *J. Exp. Botany* 44, 259: 407-414.
- Freebairn, D.M., Gupta, S.C., Rawls, W.J.** 1991. Influence of Aggregate Size and Microrelief on Development of Surface soil Crusts. *Soil Science Society of America Journal* 55: 188-195.
- Gallardo-Carrera, A., Dürr, C., Herbin, M., Duval, Y., Lingrand, J.** 2006. Analysis of the surface crack pattern of seedbeds in a silt loam soil. In: *Soil Management for Sustainability*; R. Horn, H. Fleige, S. Peth and X. Peng (eds), *Advances in GeoEcology* 38: 79-85.
- Gallardo-Carrera, A., Dürr, C., Léonard, J., Duval, Y., Boiffin, J.** 2006. Effect of seedbed structure and soil moisture on crusting development. An experimental study. Proc. of 17th ISTRO Conference, Kiel (D).
- Gerard, C.J.** 1980. Emergence Force by Cotton Seedlings. *Agronomy Journal* 72, 473-476.
- Gicheru, P., Gachene, C., Mbuvi, J., Mare, E.** 2004. Effects of soil management practices and tillage systems on surface soil water conservation and crust formation on a sandy loam in semi-arid Kenya. *Soil and Tillage Research* 75 (2): 173-184.
- Goyal, M., Drew, L., Carpenter, T.** 1982. Analytical Prediction of Seedling Emergence Force. *Trans. ASAE* 25: 38-41.
- Govers, G., Everaert, W., Poesen, J., Rauws, G., De Ploey, J., Lautridou, J.P.** 1990. A long flume study of the dynamic factors affecting the resistance of a loamy soil to concentrated flow erosion. *Earth Surface Processes and Landforms* 15: 313-328.
- Guevaer, F.** 1996. Etude de la germination et de la phase hétérotrophe de 9 géotypes apparentés de betterave sucrière (*Beta Vulgaris* L.). Mémoire de DAA INAPG : 41 pages.
- Gunatilake, P., Siegel, M. W., Jordan, A. G., Podnar, G. W.** 1997. Image understanding algorithms for remote visual inspection of aircraft surfaces, Proceedings of the SPIE Conference on Machine Vision Applications in Industrial Inspection V, San Jose, February 1997, SPIE 3029: 2-13.

- Hallaire, V.** 1984. Evolution of crack network during shrinkage of a clay soil under grass and winter wheat crops. In: J. Bouma and P.A.C. Raats (Eds), ISSS symposium on water and solute movement in heavy clay soils, ILRI publication 37, Wageningen: 49-54.
- Hallaire, V.** 1988. La fissuration d'un sol argileux au cours du dessèchement. I. Description *in situ*. Agronomie 8 (2): 139-145.
- Hallaire, V.** 1994. Description of microcrack orientation in a clayey soil using image analysis. In: Ringrose-Voase, A.J., Humphreys, G.S. (Eds), Soil Micromorphology: Developments in Soil Science, 22: 549-557.
- Hénin, S., Monnier, G., Combeau, A.** 1958. Méthode pour l'étude de la stabilité structurale des sols. Annales agronomiques 9: 73-92.
- Horgan, G.W., Young, I.M.** 2000. An empirical stochastic model for the geometry of two-dimensional crack growth in soil (with Discussion). Geoderma 96: 263-270.
- 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.
- Jensen, E.H., Frelich, J.R., Gifford, R.O.** 1972. Emergence force of forage seedlings. Agronomy Journal 64: 635-639.
- Kammerer, P., Zolda, E., Sablatnig, R.** 2003. Computer aided analysis of underdrawings in infrared reflectogramme. 4th international symposium on virtual reality, archeology and intelligent cultural heritage: 1-9.
- Kittler, J., Illingworth, J., Foglein, J.** 1985. Threshold selection based on a simple statistics. Computer vision, graphics and image processing 30.
- Kudelski, D.** 2005. Test et adaptation d'un modèle 2D d'extension de fissures à la surface d'un sol croûté. Mémoire de stage, INRA, Unité d'agronomie de Laon-Reims-Mons : 40 pages.
- Le Bissonnais, Y.** 1988. Comportement d'agrégats terreux soumis à l'action de l'eau: analyse des mécanismes de désagrégation. Agronomie 8 (10): 915-924.
- Le Bissonnais, Y., Bruand, A.** 1993. Crust micromorphology and runoff generation on silty soil materials during different seasons. Catena Supplement 24: 1-16.
- Le Bissonnais, Y.** 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. European Journal of Soil Science 47: 425-437.

- Le Bissonnais, Y.** 1997. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: II. Application to humic loamy soils with various organic carbon contents. *European Journal of Soil Science* 48: 39-48.
- Legout, C., Leguédou, S., Le Bissonnais, Y.** 2005. Aggregate breakdown dynamics under rainfall compared with aggregate stability measurements. *European Journal of Soil Science* 56(2): 225-237.
- Le Souder, C., Le Bissonnais, Y., Robert, M.** 1991. Influence of a mineral conditioner on the mechanisms of disaggregation and sealing of a soil surface. *Soil Science* 152 (5): 395-402.
- Lehrsch, G.A., Lentz, R.D., Kincaid, D.C.** 2005. Polymer and sprinkler droplet energy effects on sugar beet emergence, soil penetration resistance, and aggregate stability. *Plant and Soil* 273 (1/2): 1-13.
- Léonard, J., Ancelin, O., Ludwig, B., Richard, G.** 2006. Analysis of the dynamics of soil infiltrability of agricultural soils from continuous rainfall-runoff measurements on small plots. *Journal of Hydrology* 326: 122-134.
- Léonard, J., Duval, Y., Dürr, C., Gallardo-Carrera, A., Richard, G., Boiffin, J.** Effect of initial soil moisture on crust development rate under simulated rainfall. A soumettre.
- Lingrand, J.** 2004. Mise au point de procédures d'analyse d'images de lits de semences se dégradant sous la pluie. Mémoire de stage, INRA, Unité d'agronomie de Laon-Reims-Mons : 35 pages.
- Ludwig, B., Boiffin, J., Chadoeuf, J., Auzet, A.V.** 1995. Hydrological structure and erosion damage caused by concentrated flow in cultivated catchments. *Catena* 25: 227-252.
- Mould, D.** 2005. Image-Guided Fracture. In: Proc. of Graphics Interface 2005, Victoria (Canada). K. Inkpen and M. Van de Panne (eds); ACM International Conference Proceedings Series 112: 219-226.
- Mullins, C.E., Townend, J., Mtakwa, P.W., Payne, C.A., Cowan, G., Simmonds, L.P., Daamen, C.C., Dunbabin, T., Naylor, R.E.L.** 1996. Emerge user guide: a model to predict crop emergence in the semi-arid tropics. University of Aberdeen, Department of Plant and Soil Science. 96 pages.
- Nieniewski, M., Chmielewski, L., Jozwik, A., Sklodowski, M.** 1999. Morphological detection and feature-based classification of cracked regions in ferrites. *Machine GRAPHICS & VISION* 8 (4): 699-712.
- Nikolaidis, N., Pitas, I.** 2002. Digital image processing in painting restoration and archiving. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2000 (eds Quan).

- O'Callaghan, J.F., Loveday, J.** 1973. Quantitative measurement of soil cracking patterns. *Pattern Recognition* 5 (2): 83-84.
- Oleshko, K., Fuentes, C., Brambila, F., Alvarez, R.** 1997. Linear fractal analysis of three Mexican soils in different management systems. *Soil Technology* 10: 207-223.
- Perrier, E., Mullon, C., Rieu, M., de Marsily, G.** 1995. Computer construction of fractal soil structures. Simulation of their hydraulic and shrinkage properties. *Water Resources Research* 31 (12): 2927-2943.
- Perrier, E., Bird, N., Rieu, M.** 1999. Generalizing the fractal model of soil structure: the pore-solid fractal approach. *Geoderma* 88: 137-164.
- Pierret, A., Capowiez, Y., Belzunces, L., Moran, C.J.** 2002. 3D reconstruction and quantification of macropores using X-ray computed tomography and image analysis. *Geoderma* 106: 247-271.
- Preston, S., Griffiths, B.S., Young, I.M.** 1997. An investigation into sources of soil crack heterogeneity using fractal geometry. *European Journal of Soil Science* 48:31-37.
- Rapp, I., Shainberg, I., Banin, A.** 2000. Evaporation and crust impedance role in seedling emergence. *Soil Science*, 165 (4): 354-364.
- Richard, G., Boiffin, J.** 1990. Effet de l'état structural du lit de semences sur la germination et la levée des cultures. In: *La structure du sol et son évolution : conséquences agronomiques, maîtrise par l'agriculteur*, J. Boiffin et A. Marin-Lafleche (eds), INRA, Paris: 111-136.
- Rieu, M., Sposito, G.** 1991. Fractal fragmentation, soil porosity, and soil water properties: I Theory. *Soil Science Society of America Journal* 55:1231-1238.
- Ringrose-Voase, A.J., Sanidad, W.B.** 1996. A method for measuring the development of surface cracks in soils: application to crack development after lowland rice. *Geoderma* 71: 245-261.
- Samouëlian, A., Cousin, I., Richard, G., Tabbagh, A., Bruand, A.** 2003. Electrical resistivity imaging for detecting soil cracking at the centimetric scale. *Soil Science Society of America Journal* 67: 1319-1326.
- Samouëlian, A.** 2004. Analyse tridimensionnelle non destructive de la fissuration d'un sol cultivé à partir des mesures de résistivité électrique. Mémoire de thèse, Université d'Orléans : 199 pages.
- Samouëlian, A., Richard, G., Cousin, I., Guérin, R., Bruand, A., Tabbagh, A.** 2004. Three-dimensional monitoring by electrical resistivity measurement. *European Journal of Soil Science* 55 (4): 751-762.

- Samouëlian, A., Cousin, I., Tabbagh, A., Bruand, A., Richard, G.** 2005. Electrical resistivity survey in soil science: a review. *Soil and Tillage Research* 83 (2): 173-193.
- Scott, G.J.T., Webster, R., Northcliff, S.** 1986. An analysis of crack pattern in clay soil: its density and orientation. *Journal of Soil Science* 37: 653-668.
- Sillon, J.F., Richard, G., Cousin, I.** 2003. Tillage and traffic effects on soil hydraulic properties and evaporation. *Geoderma* 116 (1-2): 29-46.
- Sinha, A.K., Guildyal, B.P.** 1979. Emergence force of crop seedlings. *Plant and Soil* 51: 153-156.
- Souty, N., Stengel, P., Rode, C., Tuttobene, R.** 1992. A mechanistic study of maize emergence through superficial crusts. *Soil and Tillage Research* 23: 125-140.
- Souty, N., Rode, C.** 1993. Emergence of sugar beet seedlings from under different obstacles. *European Journal of Agronomy* 2 (3): 213-221.
- Souty, N., Rode, C.** 1994a. La levée des plantules au champ : un problème mécanique ? *Sécheresse* 5: 13-22.
- Souty, N., Rode, C.** 1994b. Caractérisation des plantules de betterave sucrière et modélisation de l'émergence. In : *Implantation de la betterave industrielle*, INRA (ed), Paris: 39-54.
- Stengel, P.** 1987. Etude expérimentale de la fissuration au cours du dessèchement et de l'humectation. In: *Les phénomènes de transfert dans les milieux poreux déformables*, INRA: 161-183.
- Stengel, P.** 1988. Etude expérimentale de la fissuration au cours du dessèchement et de l'humectation. In *Séminaire du département de Science du sol* (ed INRA.): 161-183
- Taki, O., Godwin, R.J., Leeds-Harrison, P.B.** 2006. The creation of longitudinal cracks in shrinking soils to enhance seedling emergence. Part I. The effect of soil structure. *Soil Use and Management* 22: 1-10.
- Taki, O., Godwin, R.J.** 2006. The creation of longitudinal cracks in shrinking soils to enhance seedling emergence. Part II. The effect of surface micro-relief. *Soil Use and Management* 22: 305-314.
- Tamet, V., Souty, N., Rode, C.** 1995. Emergence des plantules de carotte (*Daucus carotta* L) sous des obstacles mécaniques superficiels. *Agronomie* 15: 109-121.
- Taylor, A.G., Ten Broeck, C.W.** 1988. Seedling emergence forces of vegetable crops. *Hort. Sci.* 23: 367-369.
- Timoshenko, S., Woinowsky-Krieger, S.** 1961. Flexion symétrique des plaques circulaires. In : *Théorie des plaques et des coques*, Paris, Librairie Polytechnique Ch. Béranger : 1-25.

- Trojan, M.D., Linden, D.R.** 1998. Macroporosity and Hydraulic Properties of Earthworm-Affected Soils as Influenced by Tillage and Residue Management. *Soil Science Society of America Journal* 62 (6): 1687-1692.
- Truman, C.C., Bradford, J.M., Ferris, J.E.** 1990. Antecedent water content and rainfall energy influence on soil aggregate breakdown. *Soil Science Society of America Journal* 54: 1385-1392.
- Valette, G., Herbin, M., Lucas, L., Léonard, J.** 2005. A preliminary approach of 3D simulation of soil surface degradation by rainfall. Eurographics workshop on natural phenomena, E. Galin, P. Poulin eds. Dublin, Ireland, 30 August. The Eurographics Association: 41-50.
- Velde, B., Moreau, E., Terribile, F.** 1996. Pore networks in an Italian Vertisol: quantitative characterisation by two dimensional image analysis. *Geoderma* 72: 271-285.
- Velde, B.** 1999. Structure of surface cracks in soil and muds. *Geoderma* 93: 101-124.
- Velde, B.** 2001. Surface cracking and aggregate formation observed in a Rendzina soil, La Touche (Vienne) France. *Geoderma* 99: 261-276.
- Vogel, H-J., Hoffmann, H., Roth, K.** 2005a. Studies of crack dynamics in clay soil. I. Experimental methods, results, and morphological quantification. *Geoderma* 125: 203-211.
- Waldron, L.J., Constantin, G.K.** 1970. Soil resistance to a slowly moving penetrometer. *Soil Science* 109: 221-226.
- Warrick, A. W., Nielsen, D. R.** 1980. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: *Applications of Soil Physics*, D. Hillel (ed.), Academic Press, New York: 319-344.
- Williams, W.A.** 1956. Evaluation of the emergence force exerted by seedlings of small seeded legumes using probit analysis. *Agronomy Journal* 48: 273-274.
- Wischmeier, W.H., Smith, D.D.** 1958. Rainfall energy and its relation to soil loss. *Trans. American Geophysical Union* 39: 285.
- Witono, H., Bruckler, L.** 1989. Use of remotely sensed soil moisture content as boundary conditions in soil-atmosphere water transport modeling. Field validation of a water flow model, *Water resources research* 25 (12): 2423-2435.

Analyse et modélisation de la levée sous croûte. Contribution à l'amélioration du modèle SIMPLE

Le modèle SIMPLE prévoit les levées de différentes cultures. Il comporte un module de prévision des levées sous croûte empirique, basé sur l'observation de levées de betterave sucrière dans un réseau de parcelles pour un type de sol de limons argileux. Ce module est donc assez sommaire bien qu'efficace et l'objectif de ce travail était de pouvoir étendre les prévisions à d'autres conditions de semis et pour d'autres cultures (types de lits de semences, types de sols, différentes caractéristiques des semences) étant donné l'importance des problèmes de levée liés au développement de croûtes à la surface des lits de semences de différentes cultures.

Nous avons entrepris de caractériser les types de franchissement des plantules (pénétration, rupture et passage par fissure) au champ face à différents types de croûtes pour des cultures de printemps (betterave, lin et haricot) et d'automne (blé).

Nous avons caractérisé sur ces mêmes parcelles la dynamique de formation des croûtes pour les différents états initiaux des lits de semences (granulométrie, humidité au semis) en fonction des pluies cumulées depuis le semis, en complétant les observations de nos deux campagnes d'expérimentation par celles acquises sur un essai de longue durée. Les croûtes ont été caractérisées par leur faciès, leur épaisseur et leur résistance à la pénétration. Des quantités de pluies cumulées, allant de 11 mm pour des lits de semences fins et secs à 27 mm pour des états de surface grossiers ont été mises en évidence pour obtenir la formation de croûtes structurales, qui suffisent déjà à pénaliser les levées si elles se dessèchent. Des expérimentations complémentaires ont été menées au laboratoire pour obtenir sous simulateur de pluie et caractériser des stades plus avancés de croûtes non observés au cours des deux années d'expérimentation au champ.

Nous avons quantifié l'évolution du réseau de fissures se formant en fonction du degré de dégradation et des alternances humectation-dessication. Ces données ont permis de paramétrer et tester des modèles géométriques d'apparition de fissures.

Les forces exercées par les plantules et leurs variations au cours du temps en fonction de la masse, des variétés et des espèces étudiées ont été mesurées avec des capteurs de force au laboratoire.

Les différents éléments acquis par ces expérimentations ont permis d'élaborer un module intégrant des facteurs de variations non pris en compte jusqu'alors pour prévoir la formation d'une croûte et les levées. Ce module intègre des états initiaux de lits de semences variés (structure et teneur en eau), des cumuls de pluie différenciés aboutissant à des stades successifs de formation de la croûte. A chaque type de croûte est associé une distribution de résistances caractéristique. Pour chaque plantule arrivant à la surface, sa force maximum est tirée au sort dans une distribution puis diminue avec l'âge de la plantule. Cette valeur est confrontée jour après jour à la résistance du matériau via un coefficient qui permet d'établir si la plante passe ou reste bloquée. Ce coefficient résulte d'un ajustement aux données observées. Il a été établi sur la betterave, culture pour laquelle les données les plus nombreuses et précises étaient enregistrées. Les premières simulations réalisées à l'aide de ce nouveau module indiquent l'importance des effets des états du lit de semences initiaux sur les taux de levées. L'effet de différences de forces dues aux masses des semences est plus limité mais non négligeable dans certaines situations.

On a ensuite testé la possibilité de l'utiliser pour prévoir la levée d'autres cultures, dont la force avait été mesurée. L'extension à d'autres espèces donne des résultats encourageants mais nécessite un travail supplémentaire. La possibilité d'utiliser différents paramètres mesurés au laboratoire sur le sol pour pouvoir adapter le modèle proposé à d'autres types de sol est discutée.

Mots-clés : *levée, croûte, battance, modèle, lit de semences, stabilité structurale, plantules, betterave, blé, lin, haricot*

Analysis and modelling of soil surface crusting and crop emergence. Contribution to the improvement of the SIMPLE model.

The SIMPLE model can predict the emergence of various types of crop. It includes an empirical module predicting seedling emergence from under a crust. That module is based on the observation of the emergence of sugar beet crops in a field network with silt loam soils. This module is basic, but effective, and the purpose of this work is to allow the extension of forecasts to other sowing conditions and other crops (seedbed types, soil types, different characteristics of the seeds), given the huge problems in crop emergence resulting from the formation of crusts on the surface of seedbeds for various crops.

Field experiments were carried out to characterize the different tactics used by the seedlings to break through (penetration, rupture and passage through cracks), according to the different types of crust, in the case of spring (sugar beet, flax and bean) and autumn crops (wheat).

On the same plots, we characterized the dynamics of crust formation for the various initial states of seedbeds (aggregate size, soil water content) according to the rains cumulated since sowing. We also analysed soil crusting data acquired on a long term experiment, thus complementing our two experimentation campaigns. The crusts were characterized by their stage, their thickness and their resistance to penetration. Various quantities of cumulated rains, from 11mm for seedbeds mainly made of thin dry earth to 27mm for coarse soil surfaces, were determined in order to obtain the formation of structural crusts, which are already enough to penalize emergence if they dry out. Complementary experiments were led in the laboratory in order to obtain under simulated rainfalls more advanced stages of crust unobserved during the two years of experimentation in the field, and characterize them.

We quantified the evolution of the forming network of cracks according to the degree of degradation and the moistening/desiccation alternation. Those data made it possible to parameterise and test geometrical models for the appearance of cracks.

The forces exerted by the seedlings and their changes in time, according to the variations in the seed mass, the varieties and the species studied, were measured with force sensors in the laboratory.

All those elements made it possible to build a new module integrating factors which had not been taken into account before when predicting emergence through crusts. This module integrates initial states for various seedbeds (structure and water content) and different cumulated rain values which lead to successive stages in the formation of the crust. With each type of crust, a characteristic distribution of resistances is associated. The maximum force of every seedling that comes to the surface is drawn at random in a distribution, then decreases with the age of the seedling. That value is compared day after day with the resistance of the material via a coefficient that makes it possible to determine whether the seedling will emerge or not. That coefficient results from an adjustment to the data observed. It was based on sugar beet, a crop for which numerous and precise data were recorded. The first simulations carried out with this new module show the importance of the effects of the initial states of the seedbeds on emergence rates. The effect of force differences due to the mass of the seeds is more limited (about 10% on average) but it reaches about 20% in certain sowing conditions.

We also tested the possibility of using this coefficient for other crops, the force of which had been measured. The extension to other species gives encouraging results but requires additional work. We finally discuss the possibility of using various parameters measured on soils in the laboratory in order to be able to adapt the proposed model to other soil types.

Key words: *emergence, soil crusting, model, seedbeds, structural stability, seedlings, sugar beet, wheat, flax, bean*