



HAL
open science

Rôle des propriétés physiques du lit de semences sur l'imbibition et la germination. III. Valeur prévisionnelle d'un modèle d'imbibition au champ et caractérisation des lits de semences

Jean Boiffin, Laurent Bruckler, Christine Aubry

► To cite this version:

Jean Boiffin, Laurent Bruckler, Christine Aubry. Rôle des propriétés physiques du lit de semences sur l'imbibition et la germination. III. Valeur prévisionnelle d'un modèle d'imbibition au champ et caractérisation des lits de semences. *Agronomie*, 1983, 3 (4), pp.291-302. <hal-00884512>

HAL Id: hal-00884512

<https://hal.science/hal-00884512v1>

Submitted on 11 May 2020

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.



HAL Authorization

Rôle des propriétés physiques du lit de semences sur l'imbibition et la germination. III. Valeur prévisionnelle d'un modèle d'imbibition au champ et caractérisation des lits de semences

Jean BOIFFIN, Laurent BRUCKLER(*) & Christine AUBRY

I.N.R.A., Laboratoire de Recherches de la Chaire d'Agronomie de l'I.N.A.P.G., 16, rue Claude-Bernard, F 75231 Paris Cedex 05.

() I.N.R.A., Station de Science du Sol, Centre de Recherches d'Avignon, B.P. 91, F 84140 Montfavet.*

RÉSUMÉ

On propose de tester au champ la valeur prévisionnelle d'un modèle d'imbibition des semences de maïs. Pour cela, on réalise une série de traitements permettant d'analyser le rôle du potentiel de l'eau et de l'état structural au contact de la semence sur l'imbibition et la germination.

L'accord entre les prévisions et les observations portant sur des critères essentiels du point de vue agronomique (possibilité de germination, durée moyenne d'imbibition) est très satisfaisant. Le modèle prévisionnel testé est adapté à des conditions non isothermes : dans ce cas, le faisceau prévisionnel des cinétiques d'imbibition correspondant à la gamme d'états structuraux au contact des semences est compatible avec la variabilité des réponses des semences observées *in situ*. Une amélioration de la prévision amène d'une part, à tester le modèle sur une gamme plus large d'états structuraux, d'autre part, à mieux prendre en compte le rôle des variations de température sur les propriétés physiques de la semence.

Mots-clés additionnels : *Maïs, Modélisation, Humidité du sol, Potentiel matriciel, Structure.*

SUMMARY

Role of physical properties of seed-bed on imbibition and germination. III. Field prediction using and imbibition model and characterization of seed-bed.

A comparison between estimated values for imbibition of maize seeds and field experimental data is proposed. Experiments are introduced in view of analyse the roles of the soil-water potential and seed-soil contact area on the imbibition and germination.

Comparison between estimated values and field experimental data is satisfactory, according to the most important field tests (possibility of germination, mean duration of imbibition). The model is adapted to non-isothermal conditions : In this case, an agreement has been reached between the range of estimated values and the variability of experimental data, according to various seed-soil contact area. The improvement of the model requires to test this one for a larger range of seeds-beds structure, to take better into account the role of temperature on physical properties of seeds.

Additional key-words : *Maize, Modelisation, Soil moisture, Matrix potential, Structure.*

I. INTRODUCTION

Un modèle d'imbibition des semences de maïs permettant de prévoir, dans diverses conditions d'état structural et d'humidité du sol, l'imbibition des semences et leur possibilité de germination a été présenté précédemment (BRUCKLER, 1983 I, II).

Dans le présent travail, on se propose d'étudier les possibilités d'extrapolation au champ des conclusions acquises lors de la phase d'élaboration théorique et de contrôle

expérimental du modèle au laboratoire. Par extrapolation au champ, il faut entendre que l'on essaiera de tester la robustesse du modèle en contrôlant sa valeur prévisionnelle, dans des situations où toutes les conditions réalisées lors de son établissement ne sont plus simultanément vérifiées. Le contexte expérimental se rapproche ainsi de celui du champ cultivé et les principales différences par rapport aux conditions de laboratoire se ramènent à :

- l'absence d'une condition stricte d'isothermie à 20°C,

- une variabilité de l'état structural des lits de semences qui ne porte plus seulement sur la porosité structurale mais aussi sur la distribution dimensionnelle des agrégats,
- une modification du lot de semences utilisées et du substrat terreux.

La variété et le type de tri des semences restent identiques à ceux utilisés en laboratoire et la classe texturale choisie reste proche de la précédente.

Un prolongement attendu de ce travail est une amélioration des méthodes d'observation et de diagnostic concernant les semis.

II. RAPPEL DU MODÈLE ET CONSÉQUENCES

Le modèle proposé s'écrit de la façon suivante :

$$\left(\frac{\Delta H_s}{\Delta t}\right)_t = -\alpha_l K'(H_s) S_l (|\psi_s| - |\psi_e|) - \alpha_v D'(H_s) S_v (p_s - p_e) \quad (\text{Relation 1})$$

$\left(\frac{\Delta H_s}{\Delta t}\right)_t$: variation d'humidité massique de la semence pendant Δt .

α_l : constante relative aux transferts en phase liquide.

α_v : constante relative aux transferts en phase gazeuse.

$K'(H_s)$: fonction d'ajustement relative aux transferts en phase liquide, caractéristique de la semence.

$D'(H_s)$: fonction d'ajustement relative aux transferts en phase gazeuse, caractéristique de la semence.

S_l : surface d'imbibition en phase liquide.

S_v : surface d'imbibition en phase gazeuse.

$S_l + S_v = S_t$: surface totale de la semence.

$(|\psi_s| - |\psi_e|), (p_s - p_e)$: différence de potentiel hydrique (phase liquide) ou de pression partielle de vapeur d'eau (phase gazeuse) entre la semence (indice « s ») et le milieu extérieur (indice « e »).

La connaissance de 2 types de variables impliquées dans le modèle est nécessaire pour simuler l'humectation des semences à partir de la relation (1) :

— d'une part, les variables relatives aux surfaces de la semence fonctionnelles en phase liquide (S_l) ou en phase vapeur (S_v),

— d'autre part, les variables relatives à la différence de potentiel ($|\psi_s| - |\psi_e|$) ou de pression partielle de vapeur d'eau ($p_s - p_e$) entre la semence et le milieu extérieur.

A. Détermination des variables mises en jeu dans le modèle

Les variables ($|\psi_s| - |\psi_e|$) et ($p_s - p_e$) peuvent être regroupées en variables relatives à la semence ($|\psi_s|, p_s$) ou au sol ($|\psi_e|, p_e$). La relation $|\psi_s| = f(H_s)$ relative au maïs et son analogue $p_s = f(H_s)$ ont été déterminées expérimentalement

au cours d'un travail préliminaire (BRUCKLER, 1983 I) et nous admettons que le changement de lot n'entraîne pas de modification notable de ces fonctions. La connaissance des variables ($|\psi_e|, p_e$) se ramènera à la mesure d'une teneur en eau H_e et à la détermination expérimentale de la relation $|\psi_e| = f(H_e)$, ou de son analogue $p_e = f(H_e)$.

Le cas des variables (S_l, S_v) est plus complexe puisqu'on ne connaît pas les valeurs individuelles (S_l, S_v) d'une semence placée dans un sol. Cependant, dans le cas où les semences sont placées dans un milieu constitué d'agrégats homogènes et de petite taille (2-3 mm), à texture limoneuse, et lorsque l'alimentation en eau est non limitante, on obtient la relation linéaire suivante (BRUCKLER, 1983 II) :

$$S_l/S_t = 0,94 (1 - n_s) - 0,16 \quad n = 94 \quad r^2 = 0,80 \quad (2)$$

n_s : porosité structurale à proximité de la semence

$$n_s \in [0 ; 45]$$

Il semble ainsi possible d'estimer tout couple (S_l, S_v) à partir de la description du système de porosité du lit de semences, lorsqu'on est assuré que l'imbibition correspond à un cas d'alimentation hydrique non limitante. L'utilisation de (2) pose cependant 2 problèmes :

a) la mesure de n_s à proximité de la semence suppose au préalable l'acquisition d'une technique de mesure à haute résolution spatiale.

b) la relation (2) est *a priori* contingente de la taille, du degré d'homogénéité, de la morphologie des agrégats entourant la semence.

L'utilisation de la relation (2) au cours de ce travail permettra précisément de tester la validité de l'estimation choisie pour une assez large gamme d'états structuraux.

B. Cas types d'imbibition des semences

La confrontation des données expérimentales aux données du modèle, telle qu'elle a été réalisée en sol limoneux, permet de proposer 3 cas typiques d'imbibition résumés dans le tableau 1.

La détermination de la valeur x du tableau 1 est fondamentale puisque le cas 1 correspond au strict domaine d'utilisation de la relation (2). Elle peut se faire selon 2 approches indépendantes :

1^{re} approche : calcul préliminaire d'ordre de grandeur :

On situe le domaine de teneurs en eau du sol pour lesquelles des gradients de potentiel hydrique relativement faibles autour de la semence, < 1 bar/cm (DASBERG, 1971), assurent vers celle-ci un débit maximal, égal à celui observé lors de l'immersion d'une semence dans l'eau. Les modalités de calcul et les résultats sont donnés par le tableau 2 : ainsi estimée, la borne inférieure du domaine non limitant se situe approximativement vers la valeur $H_e = 0,14 (|\psi_e| \sim 2,7 \text{ bar})$.

2^e approche : recherche expérimentale

Par définition, dans le domaine non limitant, les cinétiques d'imbibition des semences sont identiques lorsque l'état structural est invariant. Les cinétiques d'imbibition réalisées dans un milieu agrégé homogène pour différentes

TABLEAU 1

Cas types d'imbibition :
 (1) la valeur x limite les domaines limitant et non limitant et est fonction du type de sol.
 (2) la valeur 16 bars est approchée ; en fait, il s'agit d'une valeur de 12 à 16 bars selon les semences, qui sépare les domaines de germination possible ou impossible.
 (3) si le sol est très sec, $S_1/S_t = 0$.

Typical cases of imbibition :
 (1) the (x) value is a boundary between the ranges of limiting and not limiting soil-water contents.
 This value depends of physical properties of soils.
 (2) the 16 bars value is approached ; the real value is between 12 and 16 bars and this value is a boundary between soil-water contents where germination is possible or impossible.
 (3) if the soil is very dry, $S_1/S_t = 0$.

Cas expérimental	Cas 1	Cas 2	Cas 3
$ \psi_e $	0 à x bars(1)	x à 16 bars(2)	> 16 bars(2)
Variables conditionnant l'imbibition	S_1/S_t	$ \psi_e , p_e, S_1/S_t$	$ \psi_e , p_e, S_1/S_t$ (3)
Dénomination du domaine de teneur en eau du sol	non limitant	limitant	limitant
Germination	possible	possible	impossible

valeurs de l'humidité H_e (fig. 1) sont groupées lorsque $H_e \geq 0,143$ ($|\psi_e| \leq 2,4$ bars). Elles se distinguent nettement

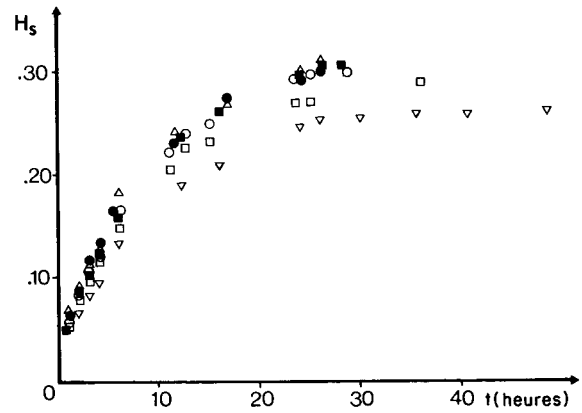


Figure 1

Imbibition des semences dans les massifs d'agrégats (2-3 mm) à différentes humidités initiales ($T = 20^\circ C$) :

Imbibition of seeds in aggregates (2-3 mm) for different initial soil water-contents ($T = 20^\circ C$) :

	H_e	ψ_e
(Δ) :	0,196	0,8 bar
(\bullet) :	0,173	1,3 bar
(\circ) :	0,156	1,8 bar
(\blacksquare) :	0,143	2,4 bars
(\square) :	0,110	6 bars
(∇) :	0,083	16 bars

TABLEAU 2

Estimation des gradients hydriques autour de la semence nécessaires pour assurer un transfert maximal vers celle-ci :

(1) déterminée selon la méthode proposée par CAMPBELL (1974)

(2) différence de potentiel nécessaire pour assurer vers la semence un débit maximal q (20 mg/h, donnée expérimentale) sur une distance de 1 cm.

On calcule $\Delta|\psi_e|$ d'après la relation

$$q = K \frac{\Delta|\psi_e|}{L} \quad (L = 1 \text{ cm})$$

Estimation of soil water potential gradients near the seed required for maximum seed-soil water transfers :

(1) after CAMPBELL (1974)

(2) soil water potential difference required for maximum seed-soil water transfers (distance = 1 cm). $\Delta|\psi_e|$ is calculated from the relation

$$q = K \frac{\Delta|\psi_e|}{L} \quad (L = 1 \text{ cm})$$

Humidité initiale du sol (H_e)	0.06	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20	0.22
Potentiel hydrique initial du sol ($ \psi_e $, en bars)	52	19.6	8.4	4.5	2.7	1.7	1.13	0.78	0.56
Conductivité hydrique du sol (K , en m/s)	(1) $1,1 \cdot 10^{-13}$	$1,4 \cdot 10^{-12}$	$9,7 \cdot 10^{-12}$	$4,8 \cdot 10^{-11}$	$1,9 \cdot 10^{-10}$	$6,2 \cdot 10^{-10}$	$1,7 \cdot 10^{-9}$	$4,4 \cdot 10^{-9}$	$1,0 \cdot 10^{-8}$
Δ ou $ \psi_e $ (en bars)	(2) 2360	187	26.1	5.2	1.3	0.42	0.15	0.06	ϵ
Humidité finale du sol après une heure d'imbibition	0.019	0.040	0.080	0.096	0.124	0.149	0.174	0.196	0.220

de celles obtenues lorsque $H_e = 0,11$ ($|\psi_e| \sim 6,1$ bars) ou lorsque $H_e = 0,083$ (palier hydrique sans germination).

La 2^e approche amène à situer à environ 3 bars la borne supérieure du domaine des potentiels $[0; |\psi_e|]$ non limitant

vis-à-vis de l'imbibition dans le cas du sol utilisé. En outre, la comparaison des 2 approches permet de valider *a posteriori* les critères arbitraires retenus lors du calcul d'ordre de grandeur.

III. CONDITIONS EXPÉRIMENTALES

A. Traitements expérimentaux et dispositifs

Les traitements expérimentaux choisis visent à analyser le rôle des 2 groupes de variables de la relation (1) :

— d'une part, on cherche à placer les semences dans des conditions de potentiel hydrique variables. Pour cela, on réalise 3 profondeurs de semis ($Z_1 = 2,5$ cm ; $Z_2 = 4,5$ cm ; $Z_3 = 6,5$ cm) dans un sol soumis au dessèchement ou préalablement irrigué : le traitement correspondant à la profondeur Z_2 est ainsi réalisé selon 2 variantes, l'une sèche (Z_2), l'autre irriguée (Z_{2i}).

On essaie de réaliser un état structural fin et homogène (état S_0) et les lits de semences sont protégés des précipitations naturelles grâce à des tunnels en plastique.

— d'autre part, on cherche à placer les semences dans des conditions où l'état structural à leur contact est variable, tant par la porosité structurale que par la granulométrie des fragments terreux (« contact terre-graine » *a priori* variable). On réalise ainsi 3 états structuraux contrastés (S_1, S_2, S_3 , du plus fin au plus grossier) en localisant les semences à une profondeur où les conditions d'alimentation hydrique sont *a priori* non limitantes (profondeur Z_2 , cas 1 du tableau 1).

Enfin, chaque traitement réalisé est subdivisé en 2 zones, l'une étant tassée, l'autre non. Les traitements S_0 d'une part, S_1, S_2, S_3 d'autre part, ayant été réalisés à 2 dates différentes, ont subi des conditions climatiques différentes. La nomenclature des traitements est donnée par le tableau 3.

B. Principaux contrôles réalisés

L'unité expérimentale de base est une placette d'environ 20 cm de long, 4 à 5 cm de large et contenant au moins 3 semences. Chaque traitement est réalisé sur 2 séquences réparties au hasard dans 2 blocs et chaque séquence contient 20 placettes dont les dates d'observation et de prélèvement ont été randomisées.

1. Caractérisation de l'état structural (STENGEL, 1979).

La détermination de la porosité structurale (n_s) est obtenue à partir des mesures de densité *in situ* par gammamétrie (SOANE *et al.*, 1971) et des mesures de densité texturale sur agrégats (MONNIER *et al.*, 1973).

Chaque traitement est caractérisé par une valeur moyenne, obtenue à partir de plusieurs répétitions, compte tenu de l'impossibilité de mesurer la porosité structurale à proximité de chaque semence (contraintes liées au temps et à la géométrie de la mesure par gammamétrie).

On constate (tabl. 4) que la gamme des porosités structurales réalisée dans tous les traitements est de faible amplitude ($\bar{n}_s = 0,31$, $\sigma = 0,03$, $n = 12$), probablement à cause de l'ordre de grandeur limité des pressions appliquées lors du roulage (300 à 600 g/cm²). Les observations visuelles montrent que l'état structural S_0 est généralement fin et homogène, conformément à l'objectif visé ; cependant, il existe une concentration des fragments grossiers en surface, triés lors de la préparation des lits de semences : dans le cas du traitement Z_1S_0 , les semences se trouvent alors placées dans cette couche.

TABLEAU 3

Nomenclature des traitements expérimentaux
Design of experiments
(1) i = irrigation

Profondeur de semis	2,5 cm	4,5 cm			6,5 cm	
Etat structural	S_0	S_0	S_1	S_2	S_3	S_0
Nom du traitement	Z_1S_0	Z_2S_0 $Z_{2i}S_0$ (1)	Z_2S_1	Z_2S_2	Z_2S_3	Z_3S_0
Tassement	Tassé + non tassé (pour chaque traitement)					

TABLEAU 4

Etats structuraux des lits de semences (entre parenthèses, nombre de mesures).
Seeds-beds structure (within brackets, number of measurements).

TRAITEMENTS	Z_1S_0	Z_2S_0	$Z_{2i}S_0$	Z_2S_1	Z_2S_2	Z_2S_3	Z_3S_0 ^(a)
Porosité structurale moyenne n_s (traitements tassés)	0,31 (7)	0,31 (7)	0,29 (1)	0,29 (5)	0,29 (5)	0,28 (5)	0,17 (7)
Porosité structurale moyenne n_s (traitements non tassés)	0,38 (7)	0,32 (7)	0,35 (2)	0,30 (5)	0,29 (5)	0,35 (5)	0,23 (7)
Proportion de terre fine (volume %)	5-10	65-70	65-70	80	40-50	20-30	65-70
Taille modale des mottes (mm)	8-10	4-8	4-8	2-4	3-6	5-10	4-8
Répartition de la taille des mottes	hétérogène homogène		homogène	homogène	très hétérogène	homogène	homogène
					(grosses mottes en surface)		

(a) valeur de porosité structurale non utilisée par la suite en raison de la proximité d'une couche compacte influençant la mesure.

(a) non-used value of porosity (the proximity of a compacted layer disturbs the measurement).

Dans le cas des états structuraux S_1, S_2, S_3 , le passage du semoir aboutit à placer les semences en contact avec une certaine quantité de terre fine, atténuant ainsi le contraste entre traitements.

L'utilisation de (2) qui ne prend en compte que l'estimateur n_s entraînera des estimations de S_1/S_t proches pour des distributions dimensionnelles d'agrégats variables. Cette utilisation amènera ainsi à remettre éventuellement en cause cette relation $S_1/S_t = f(1-n_s)$ pour certaines tailles modales d'éléments structuraux.

2. Potentiels hydriques

Pour les semences, on détermine la teneur en eau massive de chacune d'elles après prélèvement et on utilise la relation $|\psi_s| = f(H_s)$ précédemment établie (BRUCKLER, 1983 I).

$$|\psi_s| = 1098e^{-18,5 H_s} \quad (r^2 = 0,994)$$

En ce qui concerne le sol, on mesure la teneur en eau massive d'une couche d'environ 1 cm d'épaisseur centrée sur la profondeur moyenne des semences d'une placette et de 2 à 3 cm de large; on se réfère ensuite à une relation $|\psi_e| = f(H_e)$ déterminée expérimentalement (presse à membrane et mise en équilibre avec une phase gazeuse, en dessiccation):

Pour $|\psi_e| \leq 16$ bars, $|\psi_e| = 0,0032 H_e - 3,420$ ($r^2 = 0,981$)

Pour $|\psi_e| > 16$ bars, $|\psi_e| = 0,0035 H_e - 3,412$ ($r^2 = 0,977$)

Les valeurs moyennes des teneurs en eau et du potentiel de l'eau du sol pour les différents traitements figurent au tableau 5 (on n'a représenté que les traitements tassés, les traitements non tassés étant très proches de ces derniers): les semis superficiels sont très desséchés ($|\psi_e| > 100$ bars) tandis que les semis plus profonds correspondant à l'état S_0 (4,5 cm; 6,5 cm) sont situés sans ambiguïté dans le domaine non limitant ($|\psi_e| \ll 3$ bars). Les traitements S_1, S_2, S_3 présentent des potentiels un peu plus élevés en

valeur absolue que ces derniers, parfois situés à proximité de la limite séparant les domaines limitant et non limitant. Dans tous les cas, l'hétérogénéité des teneurs en eau à l'intérieur d'un traitement peut masquer l'évolution chronologique des profils hydriques d'un jour à l'autre.

3. Contrôle de la température.

La température est mesurée à l'aide de thermocouples cuivre-constantan placés à la profondeur moyenne de semis. Les figures 2 et 3 indiquent de fortes amplitudes thermiques, notamment pendant les premières 24 heures (les minima nocturnes résultent de mesures effectuées à 0 et -10 cm de la surface dans une station située à quelques kilomètres du lieu expérimental). On sera donc amené à adapter le modèle prévisionnel d'imbibition (relation (1) en envisageant l'influence de la température sur les différents termes de la relation (1).

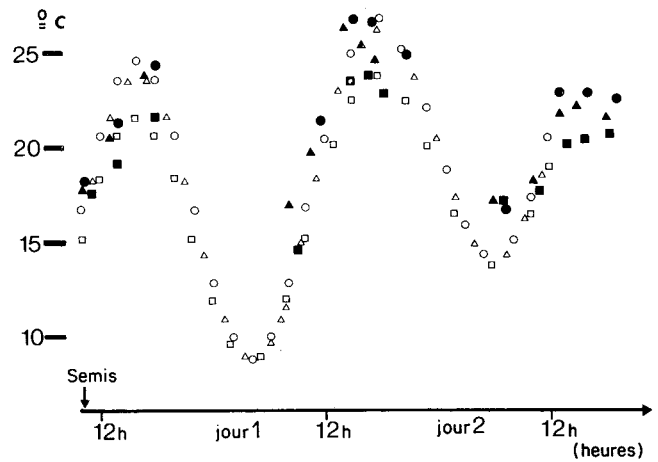


Figure 2 Variations de température dans les lits de semences (état structural S_0): Variations of the temperature in the seeds-beds (structure S_0):

z	Mesures	Valeurs ajustées
2,5 cm	(●)	(○)
4,5 cm	(▲)	(△)
6,5 cm	(■)	(□)

TABLEAU 5

Teneurs en eau (H_e) et potentiels hydriques $|\psi_e|$ à la profondeur moyenne des semences. Soil-water contents (H_e) and soil-water potentials ($|\psi_e|$) in the vicinity of the seeds.

Traitement	1 ^{er} jour (1)			2 ^e jour (2)		
	Teneur en eau (H_e)		Potentiel en bars ($ \psi_e $)	Teneur en eau (H_e)		Potentiel en bars ($ \psi_e $)
	μ	σ	μ	μ	σ	μ
Z_1S_0	0,039	0,010	211	0,041	0,011	177
Z_2S_0	0,226	0,010	0,5	0,219	0,009	0,6
$Z_{2t}S_0$	0,218	0,006	0,6	0,212	0,008	0,6
Z_2S_1	0,179	0,015	1,1	0,181	0,019	1,0
Z_2S_2	0,164	0,021	1,4	0,155	0,017	1,8
Z_2S_3	0,164	0,017	1,4	0,159	0,019	1,7
Z_3S_0	0,241	0,006	0,4	0,232	0,011	0,5

(1) moyennes obtenues avec 3 à 6 prélèvements
(2) moyennes obtenues avec 6 à 8 prélèvements

(1) 3 to 6 measurements used for mean's estimation.
(2) 6 to 8 measurements used for mean's estimation.

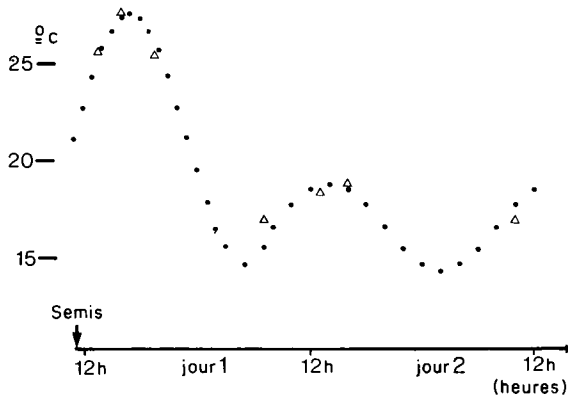


Figure 3
Variations de température dans les lits de semences (états structuraux S_1, S_2, S_3).

Variations of temperature in the seeds-beds (structures S_1, S_2, S_3).

(Δ mesures, measurements)

(\bullet) valeurs ajustées, fitted values

De plus, pour disposer d'une fonction continue $T = f(t)$ pendant toute la durée de l'imbibition, les mesures ont été ajustées à des fonctions du type $T = a + b \sin\left(2\pi \frac{t}{p}\right)$,

quels que soient l'expérience, la profondeur de semis ou le jour considérés ($p =$ période de 24 h, t en heures). Ces fonctions seront utilisées lors de la modélisation de l'imbibition des semences et sont représentées sur les figures 2 et 3.

IV. RÉSULTATS ET DISCUSSION

A. Rôle du potentiel hydrique sur l'imbibition et la germination

1. Recherche d'un estimateur de l'environnement hydrique de la semence.

La localisation des semences en profondeur présente une certaine hétérogénéité, alors qu'elles sont précisément placées dans une zone présentant de très forts gradients hydriques (fig. 4 et 5). Il en résulte qu'une petite variation de position peut induire de très grandes variations du potentiel de l'eau au contact des semences et que la prévision de l'imbibition et de la germination, conformément au tableau 1, ne peut se faire à partir de valeurs moyennes de potentiel hydrique $|\psi_e|$ (tabl. 5).

On est ainsi amené à estimer, pour chaque semence, la valeur du potentiel de la zone où elle est localisée. Pour cela, on repère la position de chaque semence par rapport à des gradients de coloration induits par des gradients de teneur en eau du sol.

On a pu distinguer, dans un profil hydrique en voie de dessèchement, 3 zones superposées (de haut en bas) :

- une zone de couleur claire (valeur 6 du code MUNSELL)
- une zone de couleur intermédiaire, bien délimitée dans sa partie supérieure et plus diffuse vers le bas. L'épaisseur de cette couche est relativement constante (10 mm).
- une zone de couleur sombre (valeur 3 du code MUNSELL).

Il s'avère (fig. 6) que ces différentes zones correspondent à des domaines bien distincts de teneur en eau :

la couche claire correspond ainsi à des humidités H_e comprises entre 0,02 et 0,07 ($2000 > |\psi_e| > 50$ bars), la couche intermédiaire à des humidités variant de 0,07 à 0,14 ($50 > |\psi_e| >$

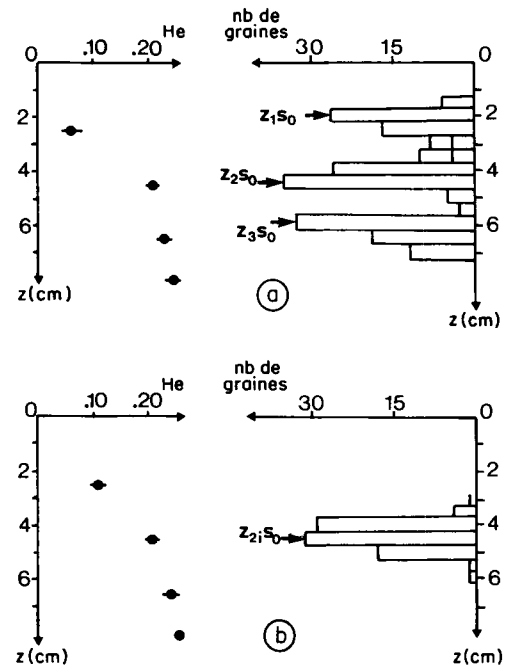


Figure 4

Profils hydriques moyens (1^{er} jour) et histogrammes des profondeurs de semis : Etat structural S_0 ; a sans et b avec irrigation (les flèches indiquent les classes modales de profondeurs de semis pour chaque traitement, tassés et non tassés réunis)

Mean soil-water contents (first day) and histogram of seed's depths : Structure S_0 a without and b with irrigation (arrows show where is the most important percentage of seeds for each treatment, compacted or not).

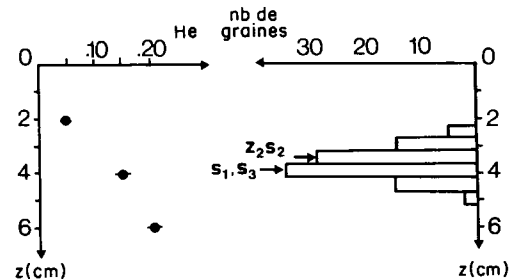


Figure 5

Profils hydriques moyens (1^{er} jour) et histogrammes des profondeurs de semis : Etats structuraux S_1, S_2, S_3 . (Les flèches indiquent les classes modales de profondeurs de semis pour chaque traitement).

Mean soil-water contents (first day) and histogram of seed's depths : Structures S_1, S_2, S_3 .

(Arrows show where is the most important percentage of seeds for each treatment, compacted or not).

3 bars), la couche sombre correspondant à des valeurs $|\psi_e|$ toujours inférieures à 3 bars (domaine non limitant).

En situant chaque semence dans l'une des 3 zones, on peut alors connaître la gamme des potentiels $|\psi_e|$ existant à son contact, pour les états structuraux S_1, S_2, S_3 , on a précisé la notation et noté systématiquement la distance c de la semence au front de dessèchement qui est la limite nette entre les 2 premières couches.

2. Prévisions et résultats expérimentaux.

a) Imbibition.

— le cas 1 (domaine non limitant, tabl. 1) doit être réalisé pour les semences situées en zone sombre ($|\psi_e| < 3$ bars) : les semences sont celles des semis les plus profonds

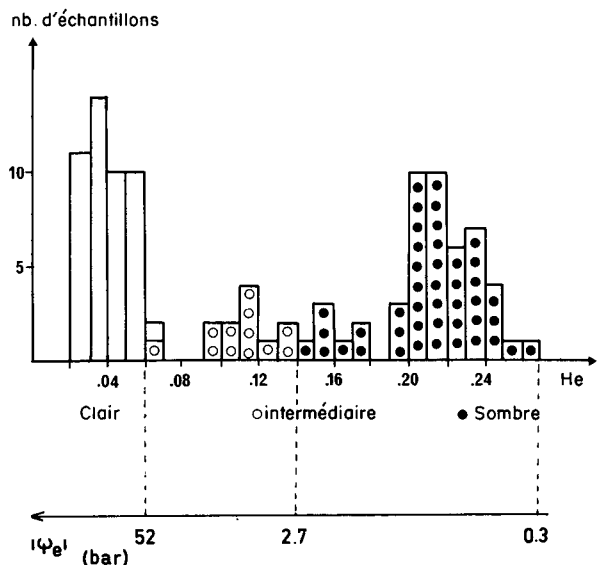


Figure 6
 Coloration du lit de semences et humidité pondérale.
 Colour of seed's bed and soil water-content.

ou préalablement irrigués ($Z_{2i}S_0, Z_3S_0$), en partie celles du traitement Z_2S_0 ; on peut adjoindre au cas 1 les semences du traitement Z_2S_1 , si la cote à laquelle elles sont placées est située à plus de 15 mm en dessous du front de dessèchement.

On constate (tabl. 6) que les semences des traitements cités ont, au moment des observations, déjà atteint ou dépassé l'humidité critique de la semence en dessous de laquelle la germination est impossible ($H_c = 0,25$ à $0,26$): l'hypothèse d'appartenance de ces semences au cas 1 est donc parfaitement plausible, d'ailleurs corroborée par l'homogénéité de leur teneur en eau et par les cinétiques expérimentales obtenues pour une température moyenne de 20°C en domaine non limitant (fig. 1).

— le cas 2 ($3 < |\psi_e| < 16$ bars, tabl. 1), doit nécessairement se rencontrer dans la couche intermédiaire, pour des semences suffisamment éloignées du front de dessèchement, mais à moins de 15 mm en dessous de celui-ci. On peut prévoir qu'appartiennent à ce cas certaines semences du traitement Z_2S_0 (zone intermédiaire) et du traitement Z_2S_1 si

$C \leq 15$ mm. La situation observée ne contredit pas la prévision, puisqu'on observe simultanément des cas 1 et 2 pour le traitement Z_2S_0 (couche sombre ou intermédiaire), des cas 2 et 3 pour Z_2S_1 (couche intermédiaire).

— le cas 3 ($16 \text{ bars} < |\psi_e|$, tabl. 1) doit être réalisé pour toutes les semences placées en zone claire et pour une partie de celles situées en zone intermédiaire, à proximité du front de dessèchement. L'observation montre sans ambiguïté que toutes les semences des traitements correspondant aux semis superficiels (Z_1S_0 , tassé et non tassé) sont situés en zone claire. Pour ces semences, les humidités atteintes au moment de l'observation sont très inférieures à H_c et très hétérogènes (tabl. 6). Des prélèvements postérieurs à ceux mentionnés dans le tableau 6 amènent aux mêmes conclusions : à $t = 220\text{h}$, $H_s = 0,148$, $\sigma H_s = 0,035$. La prévision n'est donc pas contredite et la dispersion des valeurs $|\psi_s|$ s'accorde bien avec la gamme de potentiels hydriques $|\psi_e|$ dans la zone où sont placées les semences : ainsi, pour un domaine $|\psi_s|$ de [27 bars ; 640 bars], on trouve un domaine de potentiels $|\psi_e|$ correspondant de [60 bars ; 610 bars]. On peut donc considérer qu'il y a recouvrement entre ces 2 gammes de variation et l'hypothèse selon laquelle les semences de ces traitements atteignent un palier hydrique sans germination peut être conservée.

b) Germination.

En fin d'expérience, le prélèvement des semences restantes permet d'estimer les taux de germination et les stades atteints (tabl. 7 et 8). Les prévisions issues du tableau 1 sont nettement confirmées pour les traitements situés en zone claire et en zone sombre ; même au bout de 220 h, les semences situées en zone claire ne germent pas. La variabilité observée dans le traitement Z_2S_0 (couche sombre ou intermédiaire, tabl. 7) et pour les semences de la couche intermédiaire des états S_1 à S_3 (tabl. 8), n'est pas surprenante compte tenu de l'importance que revêt dans ces cas la position exacte de la semence dans le profil : c'est ainsi que l'on peut observer des taux variables de semences non germées dans la couche intermédiaire correspondant à de légères variations de positionnement entre les échantillons prélevés (tabl. 8).

Au total, la confrontation entre prévision et observations, portant sur des critères essentiels du point de vue agronomique (possibilité ou non de germination, durée moyenne

TABLEAU 6

Teneurs en eau des semences avant apparition des premières germinations.
 (1) c : distance de la semence au front de dessèchement.
 (2) N^* : nombre de semences n'ayant pas atteint l'humidité critique ($H_c = 0,26$) à t .
 n : nombre de semences observées.
 Seeds water-contents before the first germination.
 (1) c : distance between seeds and drying front.
 (2) N^* : number of seeds with water-contents below the critical level ($H_c = 0,26$) at t .
 n : number of observed seeds.

Traitements	Z_1S_0		Z_2S_0		$Z_{2i}S_0$		Z_2S_1		Z_3S_0		
	tassé	non tassé	tassé	non tassé	tassé	non tassé	tassé + non tassé <small>$c \leq 15$ mm</small>	non tassé <small>$c > 15$ mm⁽¹⁾</small>	tassé	non tassé	
Durée d'imbibition (t)	29 h \leq t \leq 31 h				21 h \leq t \leq 26 h				29 h \leq t \leq 31 h		
Teneur en eau des semences à t	μ	0,058	0,073	0,271	0,248	0,273	0,276	0,237	0,278	0,285	0,263
	σ	0,075	0,058	0,024	0,027	0,012	0,020	0,023	0,015	0,017	0,010
N^*/n	(2)	11/11	11/11	3/14	6/9	2/13	2/14	17/20	1/17	0/11	3/13

TABLEAU 7

Stades des semences après 80 h de séjour en terre : état structural S_0 .
 Stages of the seeds after 80 h in seeds-beds : seeds-bed structure S_0 .

Traitements expérimentaux	Nombre de semences observées	Stades observés (en % de l'effectif total)		
		Non germées	Radicule seule apparente	Radicule et tigelle apparentes
Z_1S_0 (couche claire)	39	98	2	0
Z_2S_0	59	14	30	56
Z_2S_0, Z_3S_0 (couche sombre)	58	0	5	95

TABLEAU 8

Stades des semences après 55 et 80 h de séjour en terre : états structuraux S_1, S_2, S_3 .
 Stages of the seeds after 55 h and 80 h in seeds-beds : seeds-beds structures S_1, S_2, S_3

Délai de séjour (h)	Placement des semences	Nombre de semences observées	Stades observés (en % de l'effectif total)					
			Non germées	Germination sans croissance	Croissance de la radicule seule			Radicule et tigelle apparentes
					0-2 mm	2-10 mm	> 10 mm	
55	couche claire	3	(100)					
	couche intermédiaire	41	63	15	22			
	couche sombre	117	9	7	20	63		
80	couche claire	11	100					
	couche intermédiaire	25	88	12				
	couche sombre	335	1	1	1	11	9	77

d'humectation jusqu'à H_s) est présentée par le tableau 9 (la prévision est effectuée à partir de la relation (1) adaptée à des conditions non isothermes - cf. plus loin). Du point de vue d'éventuelles applications, le degré d'accord obtenu est très satisfaisant.

B. Rôle de l'état structural sur la cinétique d'imbibition. Prévisions et observations

La construction de cinétiques prévisionnelles d'imbibition pour différents états structuraux et leur confrontation aux résultats expérimentaux suppose la réalisation de 3 conditions :

1. Ne considérer que des semences situées dans le domaine non limitant (tabl. 1), afin que seule la surface humectée en phase liquide ou vapeur détermine la cinétique observée.

2. Adapter au préalable le modèle (relation (1)) à la prise en compte de variations de températures.

3. Estimer pour les cas expérimentaux choisis, une valeur moyenne (S_1, S_v), et un intervalle de confiance pour un risque donné.

1. Prise en compte des variations de température dans la modélisation

En se référant à la relation (1), on constate que les termes sensibles aux variations de température sont les suivants :

$$K'(H_s), D'(H_s), (|\psi_s| - |\psi_e|), (p_s - p_e)$$

a) Cas des termes $K'(H_s)$ et $D'(H_s)$

Ces 2 fonctions dépendent de l'humidité de la semence et de la température : si on considère 2 températures T_1 et

TABLEAU 9

Prévisions et observations des comportements des semences.
 (a) S_0 ; (b) S_1, S_2, S_3 .
 (1) d'après la relation (1) en conditions non isothermes.
 (2) d'après ajustement statistique sur les points expérimentaux.
 Predicted and observed responses of seeds.
 (a) S_0 ; (b) S_1, S_2, S_3
 (1) from the relation (1) for non-isothermal conditions.
 (2) from statistical fitting of experimental data.

Domaine de teneur en eau	Non limitant				Limitant		
Domaine des potentiels $ \psi_e $ correspondants	$ \psi_e < 3$ bars (cas 1)		$3 < \psi_e < 16$ bars (cas 2)		$ \psi_e > 16$ bars (cas 3)		
Cas expérimentaux correspondants	(a) $Z_{21}S_0, Z_3S_0$: toutes semences Z_2S_0 : quelques semences	(b) zone sombre : toutes semences	(a) Z_2S_0 : quelques semences	(b) zone intermédiaire : certaines semences	(a) Z_1S_0 : toutes semences	(b) zone claire : toutes semences zone intermédiaire : certaines semences	
Potentiels expérimentaux $ \psi_e $ moyens	$ \psi_e < 0.7$ bar	$1 \leq \psi_e < 2.2$ bars	$3 < \psi_e < 16$ bars	$3 < \psi_e < 16$ bars	$ \psi_e > 100$ bars	$ \psi_e > 100$ bars	
GERMINATION	prévue : Possible	Possible	Possible	Possible	Impossible	Impossible	
observée : (taux de germination à 80 h)	$Z_{21}S_0, Z_3S_0$ 100 %	couche sombre 99 %	Z_2S_0 : germination hétérogène	zone intermédiaire : germination hétérogène	Z_1S_0 : 2 %	zone claire : 0 % zone intermédiaire : existence de semences non germées	
IMBIBITION	prévue : (heure où $H_s = H_c^{(1)}$)	30 h	25 h	-	-	Palier $H_s < H_c$	Palier $H_s < H_c$
	observée : (heure où $H_s = H_c^{(2)}$)	28 h	22 h	-	-	$H_s < H_c$ (à 220 h)	$H_s < H_c$ (à 80 h)

T_2 , on obtient les relations suivantes (BRUCKLER, 1979) :

$$K' (H_s, T_2) = \frac{\mu_1}{\mu_2} \cdot K' (H_s, T_1) \quad (3)$$

μ = viscosité de l'eau

$$\text{et } D' (H_s, T_2) = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{1,75} \cdot D' (H_s, T_1) \quad (4)$$

b) Cas des termes relatifs au sol ($|\psi_e|, p_e$)

En milieu non limitant, on peut toujours faire l'approximation $|\psi_e| \sim 0$ compte tenu de l'ordre de grandeur du terme $|\psi_s|$. Par contre, dans les mêmes conditions, p_e est toujours très voisin de p_0 , pression de vapeur saturante de l'eau à la température T. On écrira donc :

$$p_e = p_e (T) \sim p_0 (T) = 2,26 \cdot 10^{-5} e^{-0,0063 T} \quad (5)$$

($r^2 = 0,999$), $280 K < T < 300 K$ (d'après les données du « Handbook of Physics and Chemistry »).

c) Cas des termes relatifs à la semence (ψ_s, p_s)

Nous admettrons, au vu des rares références expérimentales disponibles (COLLIS-GEORGE & MELVILLE, 1978), l'hypothèse d'indépendance des termes ψ_s, p_s vis-à-vis de la température.

Enfin, c'est à partir des relations $T = f(t)$ (fig. 2, 3) et des relations (3), (4), (5) qu'on pourra prendre en compte *a priori*, pas à pas, l'effet de la température sur la cinétique d'imbibition $H_s = f(t)$.

2. Estimation des surfaces d'imbibition (S_1, S_v)

Le principe d'estimation de S_1 revient à utiliser la relation (2), en se plaçant nécessairement dans un domaine non limitant et ceci bien que les états structuraux considérés ne soient pas identiques à ceux ayant présidé à l'établissement de (2).

Si, en 1^{re} approche, on néglige l'effet des traitements, les valeurs moyennes de la porosité structurale n_s et les intervalles de confiance des valeurs individuelles sont les suivants :

- état structural S_0 : $n_{s1} = 31$ p. 100, [23 p. 100 ; 40 p. 100] (à 95 p. 100)
- états structuraux S_1, S_2, S_3 : $n_{s2} = 30$ p. 100, [22 p. 100 ; 38 p. 100] (à 95 p. 100).

Par ailleurs, la relation (2), $S_1/S_1 = f(n_s)$, comporte elle-même un certain degré d'incertitude : à la borne supérieure

de l'intervalle de confiance des valeurs expérimentales n_s (borne inférieure pour $(1 - n_s)$) correspond un intervalle de confiance des valeurs individuelles S_1/S_t (fig. 7) ; soit $S_1/S_{t\ INF}$ sa borne inférieure. De même, considérant la borne inférieure de l'intervalle de confiance de n_s borne supérieure pour $(1 - n_s)$, on définira $S_1/S_{t\ SUP}$. On obtient ainsi un intervalle $[S_1/S_{t\ INF} ; S_1/S_{t\ SUP}]$ à l'extérieur duquel une valeur S_1/S_t a une très faible probabilité d'existence : même pour des valeurs de porosité peu probables (cas des abscisses a et b de la figure 7), il existe des valeurs S_1/S_t dont la probabilité d'appartenance au domaine défini est encore élevé. Ces domaines sont les suivants :

— état structural S_0 :

$$S_1/S_{t\ INF} = 24,6 \text{ p. } 100 \quad \overline{S_1/S_t} = 48,4 \text{ p. } 100$$

$$S_1/S_{t\ SUP} = 72,4 \text{ p. } 100$$

— états structuraux S_1, S_2, S_3 :

$$S_1/S_{t\ INF} = 25,8 \text{ p. } 100 \quad \overline{S_1/S_t} = 49,5 \text{ p. } 100$$

$$S_1/S_{t\ SUP} = 73,4 \text{ p. } 100$$

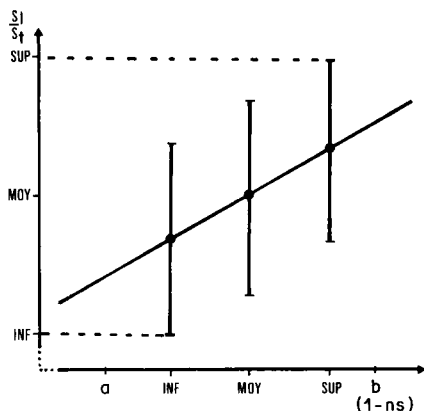


Figure 7

Estimation d'un intervalle $[S_1/S_{t\ INF} ; S_1/S_{t\ SUP}]$ à partir de la relation $S_1/S_t = f(1 - n_s)$.

Estimation of an interval $[S_1/S_{t\ INF} ; S_1/S_{t\ SUP}]$ from the relation $S_1/S_t = f(1 - n_s)$.

3. Confrontation de la localisation des points expérimentaux avec les cinétiques prévisionnelles

Par un calcul pas à pas ($\Delta t = 0,25h$) qui permet de prendre en compte l'effet des variations de T sur l'imbibition (cf. IV - B.1.), on construit 3 cinétiques pour chaque expérience correspondant respectivement aux valeurs $S_1/S_{t\ INF}$, $S_1/S_{t\ MOY}$, $S_1/S_{t\ SUP}$ (fig. 8 et 9).

Globalement, la répartition des points expérimentaux (semences toujours situées en zone sombre) est compatible avec l'allure des cinétiques prévues : on entend par là que la teneur en eau moyenne des semences, à un moment donné, est proche de celle correspondant à la cinétique prévisionnelle moyenne, et que les amplitudes des variations des teneurs en eau des semences sont de même ordre de grandeur que l'amplitude correspondant au faisceau prévisionnel. Cependant, respectivement 14 et 31 p. 100 des points expérimentaux pour les traitements S_0 ou S_1, S_2, S_3 se situent à l'extérieur de ces faisceaux, en majorité en dessus de ceux-ci.

Il y a donc divergence entre prévisions et observations, dont on peut chercher les différentes origines :

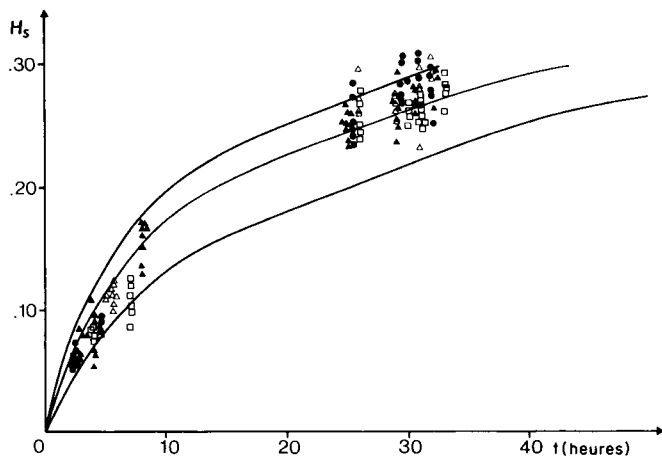


Figure 8

Cinétiques d'imbibition prévisionnelles et points expérimentaux :

(□) Z_2S_0 , tassé (Δ) Z_3S_0 , tassé
(●) Z_2S_0 , non tassé (▲) Z_3S_0 , non tassé

Predicted values of imbibition and experimental data :

(□) Z_2S_0 , compacted (Δ) Z_3S_0 , compacted
(●) Z_2S_0 , no compacted (▲) Z_3S_0 , no compacted

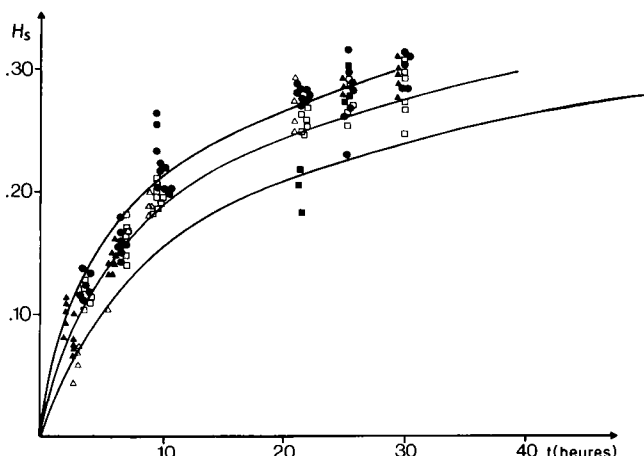


Figure 9 :

Cinétiques d'imbibition prévisionnelles et points expérimentaux :

(□) Z_2S_1 , tassé (●) Z_2S_1 , non tassé
(■) Z_2S_2 , tassé (▲) Z_2S_3 , non tassé
(Δ) Z_2S_3 , tassé

Predicted values of imbibition and experimental data :

(□) Z_2S_1 , compacted (●) Z_2S_1 , no compacted
(■) Z_2S_2 , compacted (▲) Z_2S_3 , no compacted
(Δ) Z_2S_3 , compacted

a) Erreurs dues à une mauvaise estimation S_1/S_t

L'estimation S_1/S_t est l'objet d'une double incertitude : d'une part, elle se fonde sur un modèle physique du « contact terre-graine » établi pour des volumes homogènes d'agrégats de petite taille (2 à 3 mm), ce qui a priori, doit conditionner la validité de la relation (2). D'autre part, l'estimation de n_s peut être entachée d'erreur (erreur liée à la discordance entre le volume de mesure et le volume déterminant S_1 au contact de la semence par exemple). L'examen des figures 8 et 9 suggère que ces 2 sources d'erreurs ne jouent pas un rôle majeur : en effet, les modifications de cinétiques dues à une variation des termes S_1/S_t (toutes choses égales par ailleurs) sont d'une allure différente des divergences constatées et excluent notamment un recouplement des cinétiques.

b) Erreurs dues à une mauvaise estimation du potentiel des semences ($|\psi_s| = f(H_s)$)

Ces erreurs seraient alors liées à l'influence de la modification du lot de semences par rapport à celui ayant permis d'établir la relation $|\psi_s| = f(H_s)$ et/ou à l'hétérogénéité possible des potentiels initiaux des semences.

c) Erreurs dues à une mauvaise prise en compte des variations de température

Pendant les 10 premières heures de l'imbibition, on constate que l'écart entre les 2 cinétiques prévisionnelles moyennes est nettement plus faible qu'entre les 2 cinétiques réelles moyennes. Or, ce sont les conditions de température du lit de semences qui distinguent principalement les 2 expériences pendant cette période : environ 3 à 5°C de plus pour la deuxième.

Cette constatation suggère qu'une partie importante de la divergence entre prévisions et observations provient d'une prise en compte incomplète des fluctuations de température sur les cinétiques prévisionnelles.

Les erreurs liées à l'ajustement $T = f(t)$ sont peu probables ou, du moins, de faible amplitude, puisque les conséquences d'une variation de température de 2 à 3°C (ordre de grandeur des erreurs d'ajustements) sur une cinétique prévisionnelle sont d'un ordre de grandeur nettement inférieur aux divergences observées.

C'est plutôt sur le plan théorique que l'influence des variations de température sur les termes du modèle est probablement mal cernée : en effet, seules les modifications liées à l'état physique de l'eau (viscosité, pression de vapeur saturante par exemple) ont été intégrées. On est amené à remettre en cause l'hypothèse selon laquelle les fluctuations de température n'entraînent pas de modifications physiologiques sensibles des semences vis-à-vis de leur comportement d'absorbants par l'intermédiaire de fonctions $|\psi_s| (H_s, T)$, $\rho_s (H_s, T)$, $K' (H_s, T)$, $D' (H_s, T)$.

V. CONCLUSION

Le principal objet du travail entrepris était le contrôle au champ de la valeur prédictive d'un modèle d'imbibition des semences de maïs (BRUCKLER, 1983, II). A cet égard, 3 points essentiels se dégagent :

1. Les réponses des semences aux variations de potentiels hydriques du sol, qui se traduisent par des cas-types d'imbibition et de germination, ont été correctement prévues.

2. La relation (2) n'a pu être testée sur une large gamme de porosités structurales, mais pour des lits de semences où la répartition des calibres d'éléments structuraux était variable. Pour cette faible gamme de porosités structurales, la relation (2) semble rendre compte de façon satisfaisante de l'influence de l'état structural du lit de semences sur l'imbibition.

3. Les variations de température semblent introduire une distorsion sensible entre les prévisions et les résultats expérimentaux, qui pourrait être due à la non prise en compte des effets physiologiques de ces variations. Une amélioration de la valeur prévisionnelle du modèle nécessiterait alors une meilleure connaissance de l'influence de la température sur les propriétés d'absorption des semences.

Vis-à-vis de l'imbibition, le placement des semences est de loin le facteur de variation le plus discriminant ; au champ, le repérage des gradients de coloration s'est révélé, en texture limoneuse, un bon indicateur des gradients hydriques et des valeurs de potentiels correspondantes.

L'état structural intervient avant tout sur la profondeur et la régularité du semis et, probablement, sur le régime de dessiccation obtenu en conditions climatiques déterminées. On rejoint ici les observations de FENNECH & PAPY (1977), COZIC & SEBILLOTTE (1976). Par contre, les variations de « contact terre-graine », souvent privilégiées, ne sont pas nettement apparues : d'une part, les tassements ont été réalisés sur terre sèche avec des pressions modérées (situation fréquente dans la pratique), d'autre part, l'élément semeur homogénéise la répartition des calibres d'éléments structuraux au contact immédiat de la semence.

Une dernière application de l'ensemble des travaux présentés consisterait à prévoir, à partir des données climatiques, les risques de mauvaise germination. Dans cette perspective, une prévision fine des profils hydriques dans différents lits de semence et sous des conditions climatiques connues serait nécessaire.

Reçu le 29 décembre 1981.

Accepté le 22 novembre 1982.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Bruckler L., 1979. *L'imbibition et la germination des semences en conditions sèches : Influence des caractères physiques du lit de semences*. Thèse de docteur-ingénieur I.N.A.-P.G., 119 p.

Bruckler L., 1983. Rôle des propriétés physiques du lit de semences sur l'imbibition et la germination : (I) Elaboration d'un modèle du « système terre-graine ». *Agronomie*, 3, 3.

Bruckler L., 1983. Rôle des propriétés physiques du lit de semences sur l'imbibition et la germination : (II) Contrôle expérimental d'un modèle d'imbibition des semences et possibilités d'applications. *Agronomie*, 3, 3.

Campbell Gaylon S., 1974. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. *Soil Sci.*, 117, 6.

Collis-George N., Melville M.D., 1978. Water absorption by swelling seeds. Surface condensation boundary conditions. *Aust. J. Soil Res.*, 16, 291-310.

Cozic P., Sebillotte M., 1976. Etude au champ de la germination-levée du maïs en conditions sèches. *Ronéo, Chaire d'Agronomie I.N.A.-P.G.*, 18 p.

Dasberg S., 1971. Soil-water movement to germinating seeds. *J. exp. Bot.*, 22, 73, 999-1008.

Fennech J., Papy F., 1977. Conditions de réussite de la levée en climat méditerranéen. Cas des cultures de céréales en sec au Nord du Maroc. *Ann. agron.*, 28 (6), 599-635.

Monnier G., Stengel P., Fies J.-C., 1973. Une méthode de mesure de la densité apparente de petits agglomérats terreux. Application à l'analyse des systèmes de porosité du sol. *Ann. agron.*, 24 (5), 533-545.

Soane B.D., Campbell D.J., Herkes S.M., 1971. Handheld gamma-ray transmission equipment for the measurement of bulk density of field soils. *J. agric. Eng. Res.*, 16, 146-156.

Stengel P., 1979. Utilisation de l'analyse des systèmes de porosité pour la caractérisation de l'état physique du sol *in situ*. *Ann. agron.*, 30 (1), 27-51.