



HAL
open science

Role des propriétés physiques du lit de semences sur l'imbibition et la germination: I. Elaboration d'un modèle du système "terre-graine"

Laurent Bruckler

► **To cite this version:**

Laurent Bruckler. Role des propriétés physiques du lit de semences sur l'imbibition et la germination: I. Elaboration d'un modèle du système "terre-graine". *Agronomie*, 1983, 3 (3), pp.213-222. hal-02728211

HAL Id: hal-02728211

<https://hal.inrae.fr/hal-02728211>

Submitted on 2 Jun 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.

Rôle des propriétés physiques du lit de semences sur l'imbibition et la germination. I. Elaboration d'un modèle du système « terre-graine »

Laurent BRUCKLER

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

RÉSUMÉ

La germination de la semence de maïs est possible lorsque celle-ci a atteint une humidité critique, en deçà de laquelle on n'observe jamais le déclenchement de la germination. La semence atteint cette humidité au cours d'une phase d'imbibition qui est sous la dépendance de la différence de potentiel existant entre la semence et le milieu extérieur. Il importe donc d'établir, au préalable, la relation potentiel/teneur en eau propre à la semence. On propose ensuite un modèle d'imbibition des semences qui prend en compte les deux modalités possibles de l'imbibition, en phase liquide et en phase vapeur. Ce modèle met en évidence le rôle de la différence de potentiel « sol-semence » et de la surface séminale fonctionnelle, quelle que soit la phase, liquide ou gazeuse. Enfin, on donne une estimation des paramètres propres à la semence qui sont impliqués par le modèle.

Mots clés additionnels : *Maïs, modélisation, humidité du sol, potentiel matriciel, structure, porosité.*

SUMMARY

Role of the physical properties of the seed bed in imbibition and germination. I. A model of the « seed-soil system »

Germination of maize is only possible when seed moisture increases to a critical level. This preliminary phase of imbibition depends on the difference between seed and soil water potential. A water potential/water content relationship appropriate to the seed was established and a « compartment model » of imbibition was proposed. Two terms related to movements of water in both liquid and vapor phase were required. According to the model, the difference between seed and soil water potential, and seed-soil contact area, were the most important parameters to be taken into account. Estimates of the seed parameters for both vapor and liquid phases are given in the proposed model.

Additional key words : *Maize, modelisation, soil moisture, matrix potential, structure, porosity.*

I. INTRODUCTION

D'une façon très générale, les agronomes invoquent deux conditions physiques pour rendre compte d'un taux ou d'une vitesse de germination (FENNECH & PAPY, 1977) :

— la qualité du « contact terre-graine », estimée par une notation de l'état structural,

— l'humidité au contact de la semence. Plus fréquemment d'ailleurs, on ne note qu'une profondeur de semis et les conditions climatiques générales récentes qui déterminent l'humidité du sol à proximité de la semence.

Si le choix de ces variables semble dans la plupart des cas efficace (la température étant non limitante), il amène cependant à effectuer directement l'analyse de résultats de germination (percée des téguments par la radicule) à l'aide de variables ne pouvant en fait qu'intervenir sur des transferts d'eau, donc sur un processus d'imbibition. Or, ce dernier n'est généralement pas explicité dans des schémas du type de celui présenté figure 1.

La nécessité de rendre compte du déterminisme du passage de l'eau du sol vers la semence oriente alors la recherche vers une analyse physique du système terre-graine menée en conditions bien contrôlées. Ce problème du transfert d'eau entre 2 absorbants amène aussi à se placer dans le cadre général des lois qui régissent les transferts hydriques et dont la forme élémentaire monodimensionnelle est donnée par la relation (cf. tabl. 1 pour la signification des principaux symboles) :

$$q_x = \frac{dV_x}{Sdt} = - K_x \frac{d\psi}{dx}.$$

L'utilisation de cette forme générale appliquée au cas du « système terre-graine » impose la connaissance des variables mises en jeu, c'est-à-dire la caractérisation du sol et de la semence par des propriétés relatives aux transferts hydriques (relation $K(H)$, $\psi(H)$). Cette caractérisation de chacun des absorbants constituera une étape préliminaire à la construction d'un modèle du « système terre-graine ».

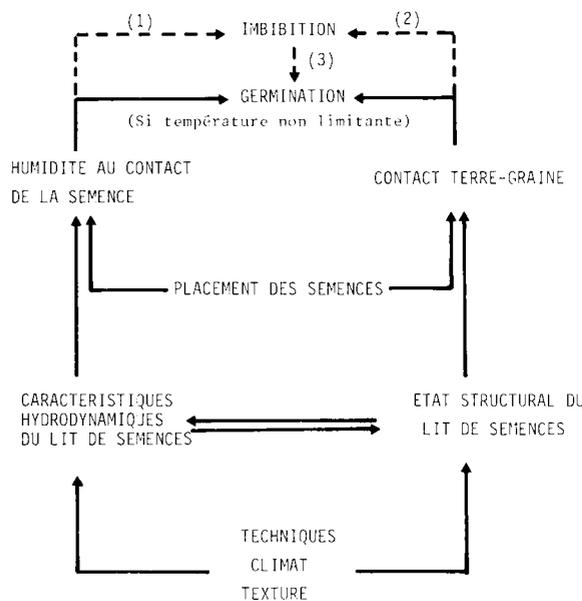


Figure 1

Rôle du milieu sur l'imbibition et la germination des semences (lire le schéma de bas en haut). N.B. On n'a pas pris en compte les propriétés spécifiques des semences.

Effect of environment on imbibition and germination of seeds (read from bottom to top), without taking account of the specific properties of the seeds.

TABLEAU 1

Principaux symboles utilisés.
Main symbols used.

c	indice relatif au milieu extérieur à la semence
s	indice relatif à la semence
q_x	densité de flux selon la direction Ox [LT^{-1}]
dV_x	volume d'eau passant à travers une surface S, perpendiculaire à la direction Ox pendant le temps dt [L^3]
K_x	conductivité hydrique selon l'axe Ox [LT^{-1}]
D	coefficient de diffusion de la vapeur d'eau dans un milieu donné [$L^2 T^{-1}$]
$\frac{\partial \psi}{\partial x}$	gradient de potentiel selon Ox
$\frac{\partial p}{\partial x}$	gradient de pression partielle de vapeur d'eau selon Ox [$ML^{-2} T^{-2}$]
H_c	humidité massique du milieu extérieur à la semence
H_s	humidité massique de la semence rapportée à la masse de la semence à l'humidité de conservation
H_c	humidité critique de la semence
$\psi_s(H_c)$	potentiel de l'eau du milieu extérieur à la semence [$ML^{-1} T^{-2}$]
$\psi_s(H_s)$	potentiel de l'eau de la semence [$ML^{-1} T^{-2}$]
$K_c(H_c)$	conductivité hydrique dans le milieu extérieur à la semence [LT^{-1}]
$K_s(H_s)$	conductivité hydrique de la semence [LT^{-1}]
$S_l(H_s)$	surface de la semence relative aux transferts en phase liquide [L^2]
$S_g(H_s)$	surface de la semence relative aux transferts en phase gazeuse [L^2]
$S_t(H_s)$	surface totale de la semence [L^2]

II. CARACTÉRISATION PHYSIQUE DES ABSORBANTS

A. Cas de la semence (maïs, var. « LG 11 »)

Nous examinerons, dans un premier temps, les différentes contraintes dues au caractère biologique de cet absorbant, avant même de déterminer expérimentalement la relation $\psi_s = f(H_s)$.

1. Remarques préliminaires sur les propriétés de la semence

La détermination de la relation $\psi_s = f(H_s)$ doit se faire pour une variation monotone et croissante de H_s (humectation), si l'on veut éviter les phénomènes probables d'hystéresse de cette relation (HEGARTY, 1978). De plus, la température devra être constante afin que ψ_s soit fonction uniquement de H_s . En ce qui concerne l'oxygénation, des conditions limitantes peuvent apparaître lorsque la semence est totalement entourée d'une couche d'eau continue (COME, 1971), le flux d'oxygène étant alors d'autant plus grand que la lame d'eau est de plus faible épaisseur. Dans la plupart des cas, nous serons éloignés de ces conditions ; dans les autres, nous chercherons à rendre minimale l'épaisseur de la lame d'eau entourant la semence.

Le volume de la semence étant hétérogène (3 unités distinctes : tégument externe, embryon, réserves), on ne pourra définir qu'une valeur moyenne ψ_s pour une valeur H_s caractéristique de l'ensemble du volume séminal. Nous chercherons cependant à préciser le rôle des différentes unités sur la détermination d'une fonction $\psi_s = f(H_s)$.

Enfin, la variabilité d'origine physiologique des semences (maturation, conditions de récolte) est généralement inconnue et non décelable à l'aide de critères d'observations simples et non destructifs.

Cette constatation oblige à prendre en compte cette variabilité selon les modalités suivantes :

- la réduire au minimum et *a priori* (même récolte, même conservation, tri des semences sur une gamme de poids donnée : 290 à 340 mg),
- connaître la variabilité de la fonction $\psi_s = f(H_s)$.

2. Relation $\psi_s = f(H_s)$

a) Principe de mesure

On affecte une valeur de potentiel à une teneur en eau des semences en les plaçant en équilibre avec une phase gazeuse à humidité relative (p/p_0) connue, la phase gazeuse étant elle-même en équilibre avec une solution H_2SO_4 (pour la relation « concentration en H_2SO_4 /valeur de $\frac{p}{p_0}$ » cf. « Handbook of Chemistry and Physics, 1978 »).

D'après la relation

$$\psi = \frac{RT}{Mg} \ln \left(\frac{p}{p_0} \right),$$

la connaissance de (p/p_0) permet de calculer la valeur ψ .

$Hr = \frac{p}{p_0}$: humidité relative de la phase gazeuse

R = constante des gaz parfaits

T = température absolue

M = masse molaire de l'eau [$M \text{ mole}^{-1}$]

g = accélération de la pesanteur [LT^{-2}].

Cette méthode de mesure ne permet pas de construire la relation $\psi_s = f(H_s)$ aux plus faibles valeurs absolues de ψ_s (domaine où $p/p_0 \sim 1$, forte sensibilité aux variations de T). Pour couvrir un large domaine de potentiel de l'eau de la semence, nous avons donc mesuré 2 couples (ψ_s, H_s) supplémentaires en plaçant les semences en équilibre avec des agrégats respectivement à -16 bars et $-7,6$ bars à l'intérieur d'une presse Richard. Ce double dispositif permet ainsi d'effectuer des mesures relatives à l'ensemble des couples (ψ_s, H_s) de la mise en imbibition jusqu'à la germination. Chaque couple expérimental (ψ_s, H_s) est construit avec 10 répétitions (10 semences) et H_s exprime l'humidité de la semence rapportée à la masse de la semence à l'humidité de conservation.

TABLEAU 2

Relation $\psi_s = f(H_s)$ pour $|\psi_s| > 34$ bars. Cas du maïs.
 Relation $\psi_s = f(H_s)$ for $|\psi_s| > 34$ bar : maize seed.

Humidité relative de la phase gazeuse (p/p_0)	0,975	0,939	0,888	0,805	0,583	0,372	0,188	0,032
ψ_s (bars)	- 34,3	- 85,2	- 160,8	- 293,6	- 730,3	- 1 342,0	- 2 262	- 4 658
μ (moyenne)	0,168	0,125	0,090	0,063	0,025	- 0,001	- 0,024	- 0,041
σ (écart-type)	0,005	0,005	0,004	0,003	0,002	0,004	0,003	0,003

TABLEAU 3

Relation $\psi_s = f(H_s)$ pour $|\psi_s| \leq 16$ bars. Cas du maïs.
 Relation $\psi_s = f(H_s)$ for $|\psi_s| \leq 16$ bar : maize seed.

Potentiel de l'eau du sol (ψ_c) (bars)	Humidité du sol (H_c)	Moyenne μ	H_s Ecart-type σ	Nb. de semences germées à l'équilibre	Croissance radicule (5 j)
- 16	0,055	0,248	0,010	2 sur 10	0,5 à 1 mm
- 7,6	0,070	Pas d'équilibre		10 sur 10	> 10 mm

b) Résultats expérimentaux

Les tableaux 2 et 3 récapitulent les résultats expérimentaux obtenus :

La relation $\psi_s = f(H_s)$ met en jeu des valeurs absolues $|\psi_s|$ extrêmement élevées ($> 1\ 000$ bars). La gamme des teneurs en eau correspondantes définies pour un sol (fortes valeurs absolues de ψ_c) concernera donc des teneurs en eau très faibles, très généralement inférieures au point de flétrissement permanent (5,5 p. 100 dans le cas du sol choisi).

L'analyse des tableaux 2 et 3 permet aussi d'approcher la liaison « teneur en eau (H_s)-germination » :

— Pour chaque valeur $|\psi| \geq 34,3$ bars (tabl. 2), les semences sont en équilibre avec le potentiel extérieur : des mesures répétées de teneur en eau des semences montrent en effet que celle-ci ne varie plus au-delà d'une certaine durée d'imbibition (palier hydrique). Pour un potentiel donné, la teneur en eau des semences est donc mesurée à l'équilibre et on n'observe aucune germination même après un mois d'équilibre.

— Pour la valeur $|\psi_s| = 7,6$ bars (tabl. 3), il n'y a pas de palier hydrique : toutes les semences germent et présentent des phénomènes de croissance radiculaire. On obtient exactement le même résultat (germination totale et croissance radiculaire) en plaçant les semences sur un papier filtre saturé (potentiel nul).

— Pour $|\psi_s| = 16$ bars (tabl. 3, $\bar{H}_s = 0,248$), il semble que l'on atteigne pratiquement un seuil H_s séparant un domaine de germination possible et un domaine de germination impossible : 2 semences sur 10 germent. D'autre part, toutes les manipulations effectuées n'ont jamais mis en évidence de germination en dessous de la valeur $H_s = 0,25$ à

0,26. Nous sommes donc amené à définir une humidité critique (H_c), en deçà de laquelle l'humidité de la semence rend impossible la germination. Associé à un intervalle de teneur en eau $[0,25 ; 0,26]$ contenant la valeur H_c , nous pouvons faire correspondre un intervalle $[\psi(H_c)]$. Par simplification, nous noterons $H_c = 0,25$ et $|\psi_c| = 16$ bars (tabl. 4) en rappelant que de tels seuils ont pu être définis pour d'autres semences et coïncident avec les données fournies par les physiologistes (OWEN, 1952).

Dans la suite du travail, c'est par l'intermédiaire de cette valeur H_c que nous établirons une jonction entre l'imbibition et une possibilité de germination. Notre travail se place donc précisément sur cet intervalle (O, H_s) au-delà duquel l'eau ne sera plus une variable explicative de l'absence de germination, dans les conditions de l'expérience.

TABLEAU 4

Domaines de germination possible ou impossible.
 Conditions of maize seed germination.

ψ_c	< - 16 bars	> - 16 bars
ψ_s	< - 16 bars	> - 16 bars
H_c	< 0,055	0,055 < < 0,246 (saturation)
H_s	< 0,25	> 0,25
Germination	impossible	possible

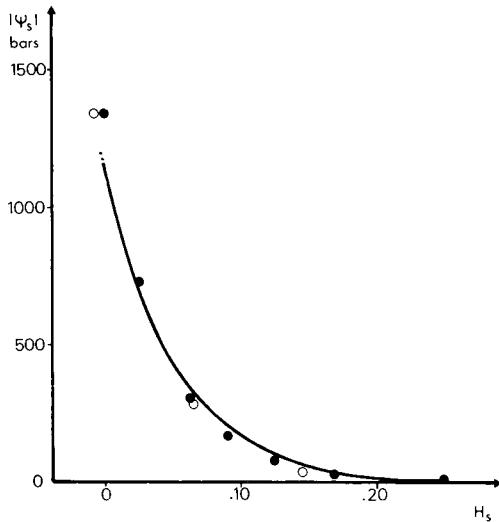


Figure 2

Potentiel ψ_s de la semence de maïs en fonction de sa teneur en eau : semence avec (●) et sans (○) embryon ($\sigma H_s \leq 0,005$).

$|\psi_s| = 1\,098 \cdot \exp(-18,5 H_s)$, avec embryon.

Seed potential ψ_s related to water content : seeds with (●) or without (○) embryo ($\sigma H_s \leq 0,005$).

$|\psi_s| = 1\,098 \cdot \exp(-18,5 H_s)$, with embryo.

La figure 2 présente des résultats $\psi_s = f(H_s)$ dans le cas de semences avec et sans embryon. L'observation indique que la relation $\psi_s = f(H_s)$ est une caractéristique peu modifiée par la présence de l'embryon. Ce rôle déterminant des réserves séminales et des téguments sur la relation $\psi_s = f(H_s)$ semble compatible avec la faible variabilité inter-semences de celle-ci ; c'est bien l'embryon qui germe mais c'est l'ensemble de la semence qui contribue à la création d'une « fonction puits » vis-à-vis du sol.

Au total, on pourra définir la semence comme un absorbant aux caractéristiques hydriques homogènes et bien définies, l'étalement des germinations dans le temps étant surtout lié au *déclenchement physiologique de la germination* et non à l'imbibition *sensu stricto*. Cette proposition est appuyée par le fait que la gamme des durées nécessaires pour humecter des semences jusqu'à H_c est toujours beaucoup plus réduite que la gamme des durées nécessaires à la germination proprement dite.

B. Cas d'un matériau terreux. Relation $\psi_c = f(H_c)$

1. Choix d'un matériau terreux

Le choix du matériau est effectué *a contrario* : en effet, notons dès à présent qu'un système « sable-semence » correspond *a priori* à un « contact terre-graine » très particulier. COLLIS-GEORGE & HECTOR (1966) ont modélisé ce système par la mise en contact de billes non poreuses, différenciées seulement par leur diamètre (les petites billes simulent les grains de sable et les grosses billes, les semences). Dans un tel modèle, le ménisque liquide existant au contact d'une petite sphère (sable) et d'une grosse sphère (semence) définit à proprement parler le « contact terre-graine ». Si un tel système semble bien adapté aux sables, il est intransposable au cas de sols agrégés dont les éléments structuraux, non sphériques, possèdent aussi leur propre système de porosité. D'autre part, *les sols argileux* présentent des phénomènes de retrait et de gonflement qui peuvent considérablement accroître la difficulté de l'analyse du « contact terre-graine ». Pour ces raisons, nous avons choisi un matériau limoneux (70 p. 100 de limons fins et grossiers). Dans le texte, ce sol sera intitulé « sol de Montluel ».

2. Caractérisation expérimentale

Le tableau 5 est relatif à des mesures effectuées par mise en équilibre avec une phase gazeuse (dessiccation), sauf pour les valeurs $|\psi_c| \leq 16$ bars (presse à membrane). Ces couples expérimentaux ($H_c, |\psi_c|$) sont représentés sur la figure 3.

Les résultats des mesures sur membrane, en dessiccation, et le lissage des points correspondants sont donnés par la figure 4, sur structure continue et sur agrégats. La similitude de ces 2 dernières courbes représentatives permettra ultérieurement d'utiliser la même relation $\psi_c = f(H_c)$, quel que soit l'état structural lorsque $|\psi_c| > 2$ bars.

TABLEAU 5

Relation $\psi_c = f(H_c)$ obtenue en phase gazeuse sur agrégats de 2 à 3 mm. (Les mesures entre parenthèses correspondent à des mesures effectuées à la presse à membrane).

Relation $\psi_c = f(H_c)$ in water vapor phase with aggregates 2-3 mm (in brackets : pressure plate measurements).

$ \psi_c $ (bars)	H_c	
	Moyenne μ (3 répétitions)	Ecart-type σ (3 répétitions)
924	0,013 9	0,000 4
658	0,015 5	0,000 5
424	0,017 7	0,000 1
264	0,019 4	0,000 5
148	0,024 2	0,000 7
80	0,034 5	0,000 6
(16)	(0,055 0)	(0,000 2)
(2)	(0,100 0)	(0,000 2)

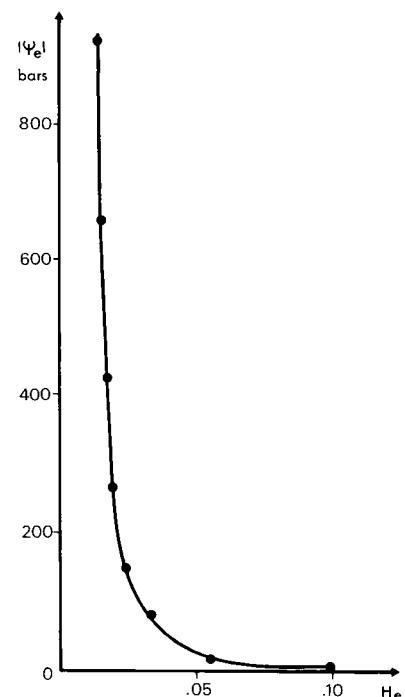


Figure 3

Potentiel du sol en fonction de sa teneur en eau : sol de Montluel — Equilibre en phase gazeuse ($\sigma H_c \leq 0,007$). $|\psi_c| = 0,0027 H_c^{-2,97}$.

Potentiel ψ_c related to soil moisture : Montluel soil — water vapor phase equilibrium ($\sigma H_c \leq 0,007$). $|\psi_c| = 0,0027 H_c^{-2,97}$.

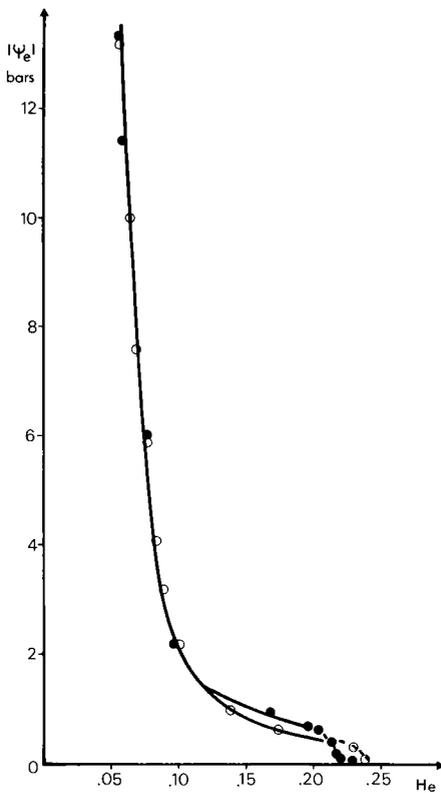


Figure 4
 Potentiel du sol en fonction de sa teneur en eau : sol de Montluel — Mesures sur presse à membrane.
 ○ : structure continue
 ● : agrégats de 2 à 3 mm.
 Potential ψ_e , related to soil moisture : Montluel soil — Pressure plate measurements.
 ○ : continuous structure
 ● : soil aggregates, 2 to 3 mm.

C. Conclusion

Dans des conditions expérimentales identiques et pour des ordres de grandeur semblables, nous avons caractérisé les 2 absorbants par les fonctions $\psi_s = f(H_s)$ et $\psi_c = f(H_c)$. En outre, la détermination de la fonction $\psi_s = f(H_s)$ a mis en lumière la faible variabilité intersemences de cette fonction, ainsi que les relations « potentiel-teneur en eau-germination ».

Rappelons aussi que nous avons qualifié le volume de la semence d'hétérogène (plusieurs unités distinctes) en concluant à la seule possibilité de déterminer une valeur moyenne de ψ_s pour une teneur en eau moyenne H_s . La fonction $\psi_s = f(H_s)$ est donc une fonction « globale » définie pour l'ensemble de la semence maintenue intacte. En conséquence, la méconnaissance de la répartition des potentiels au sein de la semence interdit toute référence à une conductivité hydrique $K_s(H_s)$ et, *a fortiori*, à sa détermination expérimentale. En ce qui concerne la fonction $K_c(H_c)$, compte tenu de la difficulté d'une mesure précise sur toute la gamme de teneur en eau du matériau, nous utiliserons une estimation $\hat{K}_c(H_c)$, déduite de la valeur expérimentale de K_c à la saturation et de la forme de la fonction $\psi_c(H_c)$ (CAMPBELL, 1974).

On obtient :

$$\hat{K}_c(H_c) = 3,0 \cdot 10^{-8} \left[\frac{H_c}{0,246} \right]^{7,94} \text{ (m/s)} .$$

C'est donc dans le cadre des informations et des contraintes défini par la caractérisation des 2 absorbants que nous proposerons un modèle du « système terre-graine ».

III. CHOIX D'UN MODÈLE DU SYSTÈME « TERRE-GRAINE »

A. Modèle à couche de transfert : propositions pour une analyse du « système terre-graine »

La semence s'humectant aussi bien en phase liquide qu'en phase vapeur (c'est sur cette base qu'est obtenue la relation $\psi_s = f(H_s)$), nous séparerons les 2 cas d'imbibition correspondants pour les combiner ensuite.

1. Transferts en phase liquide

Le raisonnement s'appuiera sur le schéma de la figure 5 qui représente une fraction de volume de semence limitée par une couche poreuse fictive, d'épaisseur Δx arbitraire. La face externe de cette couche poreuse est en contact avec le milieu extérieur ; elle est donc caractérisée à chaque instant par la valeur du potentiel ψ_e existant à l'extérieur de la semence et à son contact, telle que $\psi_e = f(H_e)$.

La face interne de la couche poreuse est en contact avec le contenu séminal lui-même et est donc définie par un potentiel ψ_s moyen de la semence, tel que $\psi_s = f(H_s)$.

A chaque valeur H_s de l'humidité moyenne de la semence, on peut associer une conductivité correspondante de la couche poreuse $K(H_s)$.

La loi de DARCY généralisée, écrite sous forme différentielle, selon la direction Ox des transferts (fig. 5) et au sein de cette couche poreuse fictive aura la forme :

$$q_x = \frac{dV_x}{Sdt} = - K(H_s) \frac{\partial \psi}{\partial x} .$$

Si on choisit un intervalle de temps Δt , pendant lequel le volume d'eau transféré à travers la couche poreuse fictive

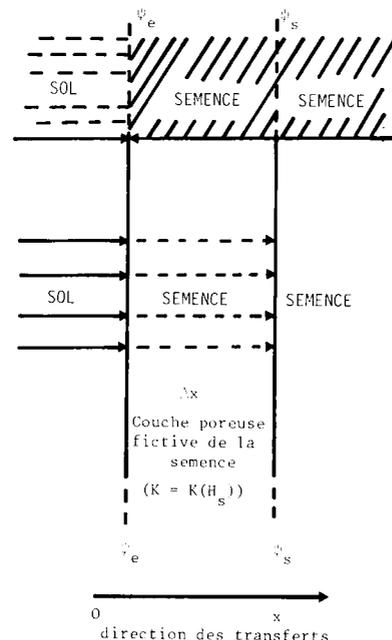


Figure 5
 Modèle à couche fictive de transfert.
 Model with a supposed transfer-layer.

est Δv , ceci pour une valeur approchée $\frac{\Delta\psi}{\Delta x}$ de la valeur exacte $\frac{\partial\psi}{\partial x}$, l'équation précédente s'écrira :

$$\frac{\Delta V}{S\Delta t} = - K(H_s) \cdot \frac{\Delta\psi}{\Delta x}$$

ou

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = - K(H_s) \cdot S \cdot \frac{\Delta\psi}{\Delta x}$$

Δt est choisi suffisamment petit pour qu'on puisse admettre que H_s et $K(H_s)$ restent constantes sur l'intervalle $[t; t + \Delta t]$. En explicitant $\Delta\psi$, on peut écrire :

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = - K(H_s) \cdot S \cdot \frac{(\psi_s(H_s) - \psi_c(H_c))}{\Delta x} \quad (1)$$

Dans l'expression précédente apparaissent 2 termes inconnus relatifs à la semence, $K(H_s)$ d'une part et Δx d'autre part. De plus, la formulation précédente, conformément au schéma donné par la figure 5, ne fait pas apparaître le terme $K(H_c)$ relatif au milieu extérieur. Or, on ne peut écarter d'emblée le rôle de la fonction $K(H_c)$ sur l'expression d'un flux d'eau vers la semence ou sur une variation très rapide de la valeur ψ_c au contact de la semence, mal prise en compte par l'estimation d'une valeur moyenne expérimentale $\psi_c(H_c)$. Nous sommes donc amené à envisager 2 cas successifs.

1^{er} cas : la conductivité à l'extérieur de la semence est non limitante

C'est le cas, par exemple, lorsqu'on plonge une semence dans un volume d'eau. Dans ce cas, $\psi_c = 0$ et K_c n'est pas limitante.

L'imbibition est donc bien fonction *uniquement* des caractéristiques de la semence, et l'on peut poser la relation :

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = - K(H_s) \cdot S \frac{(\psi_s - \psi_c)}{\Delta x}$$

ou

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{-K(H_s)}{\Delta x} \cdot S(\psi_s - \psi_c).$$

En posant alors

$$\frac{K(H_s)}{\Delta x} = K'(H_s) \quad [T^{-1}]$$

on obtient :

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = - K'(H_s) \cdot S \cdot (\psi_s - \psi_c) \quad (2)$$

Le terme $K'(H_s)$ n'est plus une conductivité et doit être considéré comme une fonction d'ajustement. L'impossibilité de mesurer $K(H_s)$ amène ainsi à estimer une fonction de H_s , telle que la relation (2) soit vérifiée.

2^e cas : la conductivité à l'extérieur de la semence est limitante

Un tel cas pourra se présenter lorsque la couche de sol entourant la semence subira un dessèchement intense, soit par les prélèvements de la semence proprement dits, soit par évaporation, soit par toute combinaison de ces 2 phénomènes. La relation (2) ne faisant pas explicitement apparaître le terme K_c , on se propose de traduire tout rôle limitant

de K_c sur la cinétique d'imbibition par une diminution correspondante de la variable S . Du point de vue du *résultat* de l'imbibition, il est en effet équivalent de diminuer un débit par réduction du terme K_c ou par réduction du terme S . Si la conductivité K_c est limitante, nous sommes donc conduit à parler de « surface équivalente » d'imbibition, *celle-ci étant définie comme la surface d'imbibition en phase liquide qui apparaît fonctionnelle si on suppose que K_c est non limitante* ; ainsi tout caractère limitant de K_c sera « reporté » sur la variable S . Ce choix résulte de la schématisation arbitraire retenue en figure 5 et de la quasi-impossibilité de mesurer une conductivité sur de très petits volumes entourant la semence et dans le cas de sols très secs.

L'écriture reste alors identique à celle déjà présentée et on écrira :

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = - K'(H_s) \cdot S \cdot (\psi_s - \psi_c) \quad (3)$$

S : « surface équivalente d'imbibition », estimée selon (3) si la fonction $K'(H_s)$ est préalablement connue.

Dans le 1^{er} cas, comme dans le 2^e, nous sommes donc ramené à un formalisme unique, le terme S pouvant avoir le sens d'une surface *réelle* (1^{er} cas) ou d'une surface *équivalente* (2^e cas) qui prend alors en compte l'ensemble des propriétés conductrices limitantes du matériau autour de la semence.

Dans le cas du matériau terreux utilisé, un calcul d'ordre de grandeur prenant en compte les caractéristiques hydriques du matériau ($K_c(H_c)$, $\psi_c(H_c)$) amène à proposer la décomposition du domaine de teneur en eau du matériau donné par le tableau 6. Le domaine considéré comme non limitant correspond à un ensemble de teneurs en eau du matériau (et donc de valeurs de conductivité $K(H_c)$), telles que le gradient de potentiel dans le sol entourant la semence et nécessaire pour assurer l'alimentation de celle-ci reste petit (< 1 bar/cm). Ce calcul indicatif se trouve d'ailleurs partiellement confirmé par l'expérience (fig. 6), puisque les cinétiques d'imbibition pour $H_c = 0,196$ ou $H_c = 0,110$ sont comparables.

2. Prise en compte des transferts en phase gazeuse

La présentation précédente propose un modèle du système terre-graine dans le cas où existe un contact liquide « sol-semence ». Or, la semence s'humecte aussi en phase vapeur et les données expérimentales indiquent que la vitesse d'humectation des semences en phase vapeur n'est jamais négligeable par rapport à celle observée en phase liquide.

TABLEAU 6

*Schématization des domaines d'alimentation hydrique (d'après un calcul d'ordre de grandeur).
Schematic diagram of water supply (order of magnitude).*

H_c	0	<	0,100	<	0,248	(saturation)
$ \psi_c $ bars	—	>	2,5	>	0	
$\dot{K}_c(H_c)$ (m/s)	—	<	$2,4 \cdot 10^{-11}$	<	$3,0 \cdot 10^{-8}$	
Domaine d'alimentation en eau	limitant		non limitant			
Sens de la variable S	équivalente		réelle			

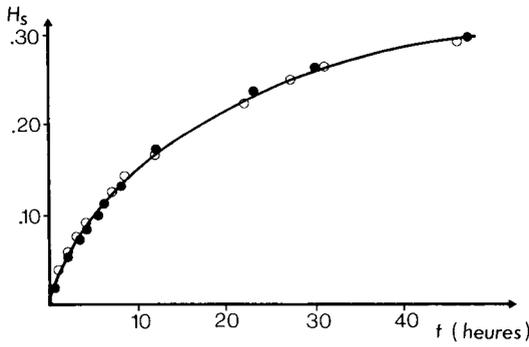


Figure 6
 Imbibition des semences dans des massifs d'agrégats pour deux humidités H_c (densité sèche = 0,9).
 (●) : $H_c = 0,196$, $|\psi_e| = 0,7$ bar, $n = 20$, $\sigma H_s = 0,009$
 (○) : $H_c = 0,110$, $|\psi_e| = 1,7$ bar, $n = 20$, $\sigma H_s = 0,008$.
 Seed imbibition in aggregate bed for two water contents (density = 0.9).
 (●) : $H_c = 0,196$, $|\psi_e| = 0,7$ bar, $n = 20$, $\sigma H_s = 0,009$
 (○) : $H_c = 0,110$, $|\psi_e| = 1,7$ bar, $n = 20$, $\sigma H_s = 0,008$.

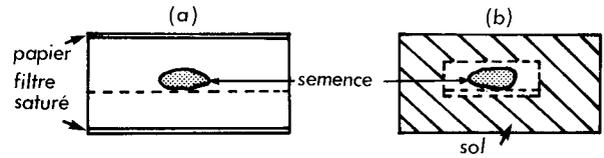
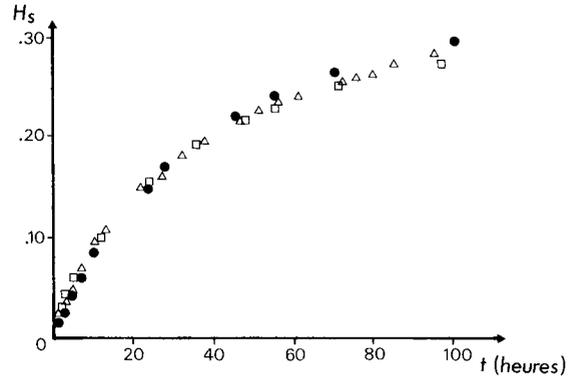


Figure 8
 Imbibition en phase gazeuse : dispositifs utilisés et cinétiques obtenues dans une vapeur saturante et dans un milieu agrégé humide ($H_c = 0,20$).

(a) ● : vapeur saturante, $T = 20^\circ\text{C}$, $H_{re} = 1$.

(b) □ △ : agrégats humides, $T = 20^\circ\text{C}$, $H_{re} \sim 1$.
 $n = 20$, $\sigma H_s \leq 0,010$.

Imbibition in water vapor phase : experimental procedure and kinetics in saturated water vapor and in moistened aggregates ($H_c = 0,20$).

(a) ● : water vapor, $T = 20^\circ\text{C}$, $H_{re} = 1$.

(b) □ △ : moistened aggregates, $T = 20^\circ\text{C}$, $H_{re} \sim 1$.
 $n = 20$, $\sigma H_s \leq 0,010$.

Les figures 7 et 8 permettent de comparer ces flux liquides ou gazeux lorsque toute la surface de la semence est fonctionnel ; n = nombre de semences utilisées pour l'estimation d'une valeur moyenne).

vertes d'une lame d'eau, en phase liquide, avec ou sans hile fonctionnel (n = nombre de semences utilisées pour l'estimation d'une valeur moyenne).

Il n'y a pas d'incompatibilité entre la modélisation proposée jusqu'à présent et l'introduction de transferts en phase vapeur à partir du moment où le terme S est fractionné en 2 composantes, une surface d'imbibition en phase liquide (S_l) et une surface d'imbibition en phase vapeur (S_v).

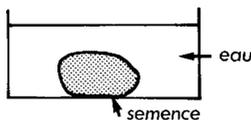
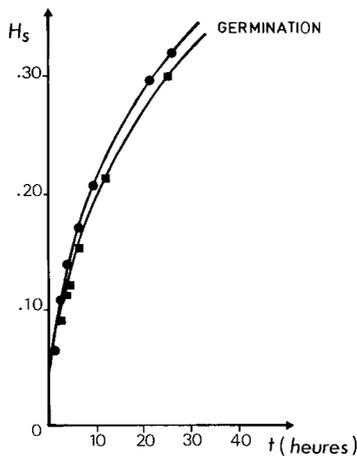


Figure 7
 Imbibition en phase liquide : dispositif utilisé et cinétique d'imbibition ($T = 20^\circ\text{C}$, $\psi_e = 0$).

● : hile intact
 ■ : hile imperméabilisé.

Imbibition in the liquid phase : experimental procedure and results ($T = 20^\circ\text{C}$, $\psi_e = 0$).

● : intact hilum
 ■ : waterproofed hilum.

$$S_t = S_l + S_v \quad (4)$$

S_t : surface totale de la semence.

L'apport d'un terme supplémentaire se fera donc sur la base des lois qui régissent les transferts en phase gazeuse, en tenant compte du schéma précédemment représenté (fig. 5) et de la relation (4). Dorénavant, l'indice « l » sera relatif aux transferts liquides, l'indice « v » aux transferts en phase vapeur.

Une densité de flux en phase vapeur s'exprime en fonction d'un gradient de concentration, lequel peut être remplacé par un gradient de pression par l'intermédiaire de la loi des gaz parfaits.

$$q_x = - \frac{1}{\rho_w} \frac{DM}{RT} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (5)$$

En écrivant l'expression (5) en termes finis et en l'appliquant au modèle de « système terre-graine » proposé, nous ferons apparaître des termes permettant d'établir une analogie formelle avec le cas de transfert en phase liquide.

V_v : volume d'eau qui transite en phase vapeur à travers la couche poreuse fictive d'épaisseur Δx .

S_v : surface concernée par les transferts en phase vapeur, réelle si S_l est réelle (d'après (4)).

$D(H_s)$: coefficient de diffusion de la vapeur d'eau dans la couche poreuse fictive d'épaisseur Δx , analogue au terme $K(H_s)$.

p_c : pression partielle de la vapeur d'eau sur la face externe de la couche poreuse fictive.

p_s : pression partielle de la vapeur d'eau sur la face interne de la couche poreuse fictive, analogue au terme ψ_s .

L'équation (5) s'écrira alors :

$$\frac{\Delta V_v}{S_v \Delta t} = - \frac{1}{\rho_w} D(H_s) \frac{M}{RT} \left(\frac{p_s - p_e}{\Delta x} \right). \quad (6)$$

soit

$$\frac{\Delta V_v}{\Delta t} = - \frac{M}{\rho_w RT} S_v \frac{D(H_s)}{\Delta x} \cdot (p_s - p_e). \quad (7)$$

En posant

$$\frac{D(H_s)}{\Delta x} = D'(H_s) \quad [LT^{-1}] \quad (8)$$

on écrira :

$$\frac{\Delta V_v}{\Delta t} = - \frac{M}{\rho_w RT} S_v \cdot D'(H_s) \cdot (p_s - p_e). \quad (9)$$

Comme dans le cas des transferts liquides et conformément au choix issu de la figure 5, nous exprimons une quantité d'eau absorbée par la semence en fonction d'un terme caractéristique de celle-ci ($D'(H_s)$), qui n'est donc plus un coefficient de diffusion de la vapeur d'eau (d'après (8)). On considère ainsi que le coefficient de diffusion de la vapeur d'eau dans le milieu extérieur à la semence est non limitant puisqu'il n'apparaît pas dans (9). Ceci est confirmé par un calcul d'ordre de grandeur (BRUCKLER, 1979) qui montre que, dans un petit volume d'air entourant une semence suspendue au-dessus d'une nappe d'eau libre, la valeur du coefficient de diffusion de la vapeur d'eau dans l'air permet d'obtenir un flux théorique supérieur au flux maximal absorbé par la semence, en phase gazeuse, dans les mêmes conditions.

On définit au total 2 expressions analogues, en phase liquide et en phase vapeur. Elles introduisent respectivement 2 fonctions d'ajustement ($K'(H_s)$ et $D'(H_s)$), ainsi que les variables S , $\Delta\psi$, Δp avec :

$$\begin{aligned} S_t &= S_l + S_v \\ \Delta\psi &= \psi_s - \psi_e \\ \Delta p &= p_s - p_e \end{aligned}$$

3. Combinaison des transferts liquides et gazeux

En se fondant sur la relation $S_t = S_l + S_v$, à chaque instant :

$$\left(\frac{\Delta V}{\Delta t} \right)_t = \left(\frac{\Delta V}{\Delta t} \right)_l + \left(\frac{\Delta V}{\Delta t} \right)_v.$$

En explicitant chaque composante, on écrira :

$$\left(\frac{\Delta V}{\Delta t} \right)_t = - K'(H_s) \cdot S_l \cdot (\psi_s - \psi_e) - \frac{M}{\rho_w RT} \times D'(H_s) \cdot S_v \cdot (p_s - p_e)$$

puisque

$$H_s = \frac{\rho_w}{\rho_s V_s} \cdot V$$

ρ_w, ρ_s : masses volumiques de l'eau et de la semence à la conservation,
 V, V_s : volume d'eau absorbée et volume de la semence,

il vient :

$$\frac{\Delta H_s}{\Delta t} = \frac{-\rho_w}{\rho_s V_s} K'(H_s) S_l (\psi_s - \psi_e) - \frac{M}{\rho_s V_s RT} D'(H_s) S_v (p_s - p_e)$$

en posant :

$$\alpha_l = \frac{\rho_w}{\rho_s V_s} = \text{Cte} \quad \text{et} \quad \alpha_v = \frac{M}{\rho_s V_s RT} = \text{Cte}.$$

On écrira sous forme simplifiée :

$$\left(\frac{\Delta H_s}{\Delta t} \right)_t = - \alpha_l K'(H_s) S_l (\psi_s - \psi_e) - \alpha_v D'(H_s) S_v (p_s - p_e) \quad (10)$$

La relation (10) condense ainsi l'ensemble de la modélisation proposée. Nous précisons ultérieurement les dispositifs expérimentaux permettant de mesurer S_l et S_v lorsqu'il y a imbibition simultanée en phase liquide et vapeur.

Nous pouvons faire ici 2 remarques :

- Il est parfaitement possible de relier les variables citées plus haut (« contact terre-graine » et humidité du lit de semence) à celles de la relation (10). On peut en effet considérer que le « contact terre-graine » correspond à la variable S_l/S_t (la variable S_v correspondant, par définition, à un « non-contact ») et que l'humidité du lit de semence correspond à la variable $(\psi_s - \psi_e)$. Mais on voit immédiatement que si la relation (10) est expérimentalement vérifiée, un « mauvais contact terre-graine » ($S_l/S_t \rightarrow 0$) n'implique pas une humectation nulle ($S_v \neq 0$).
- Si la semence présente des phénomènes de gonflement, alors $S = S(H_s)$. Nous reviendrons sur l'existence des phénomènes de gonflement, en notant seulement ici leur éventualité.

B. Estimation des fonctions $K'(H_s)$ et $D'(H_s)$

Les fonctions $K'(H_s)$ et $D'(H_s)$ sont relatives aux transferts en phase liquide ou en phase gazeuse.

— En phase liquide, on écrira :

$$\left(\frac{dH_s}{dt} \right)_l = - \alpha_l K'(H_s) S_l (\psi_s - \psi_e).$$

Si on imbibe la semence dans un volume d'eau,

$$\begin{cases} S_l = S_t \\ \psi_e = 0 \end{cases}$$

$$\left(\frac{dH_s}{dt} \right)_l = - \alpha_l K'(H_s) S_t \psi_s. \quad (11)$$

— En phase gazeuse, on aura :

$$\left(\frac{dH_s}{dt} \right)_v = - \alpha_v D'(H_s) S_v (p_s - p_e).$$

Si on imbibite la semence en phase gazeuse saturante,

$$\begin{cases} S_v = S_t \\ p_e = p_0 \end{cases}$$

$$\left(\frac{dH_s}{dt}\right)_v = -\alpha_v D'(H_s) S_t (p_s - p_0) \quad (12)$$

Pour intégrer (11) et (12), 2 conditions sont nécessaires :

— connaître la forme analytique des fonctions $K'(H_s)$ et $D'(H_s)$; après quelques essais préliminaires, les fonctions $K'(H_s)$ et $D'(H_s)$ sont choisies de la forme :

$$K'(H_s) = ae^{bH_s}$$

$$D'(H_s) = a' e^{b'H_s}$$

en raison des performances de la fonction choisie dans l'estimation des paramètres ;

— tenir compte du gonflement des semences au cours de l'humectation (fig. 11). Lors de l'estimation des paramètres du modèle, nous avons tenu compte de la variation de la surface humectée due à ce gonflement (variation du terme S) de sorte que les paramètres ajustés sont bien uniquement fonction de H_s (BRUCKLER, 1979).

Les figures 9 et 10 donnent une représentation graphique des cinétiques d'imbibition calculées correspondant aux estimations suivantes des paramètres obtenues par ajustement non linéaire :

$$K'(H_s) = 1,050 \cdot 10^{-8} e^{7,793 H_s} \text{ (h}^{-1}\text{)},$$

$$D'(H_s) = 1,885 \cdot e^{7,802 H_s} \text{ (m} \cdot \text{h}^{-1}\text{)}.$$

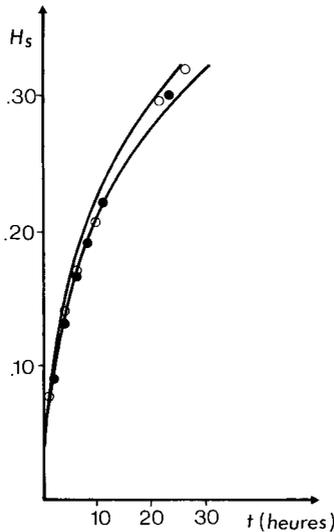


Figure 9
Cinétique d'imbibition en phase liquide ($|\psi_e| = 0$) : valeurs expérimentales et valeurs calculées, $H_s = f(t)$.
○ : données expérimentales utilisées dans l'estimation des paramètres.
● : données expérimentales indépendantes de l'estimation ($n = 30$, $\sigma H_s \leq 0,025$).
// : intervalles de confiance sur H_s .
Imbibition in liquid phase ($|\psi_e| = 0$) : experimental and calculated values, $H_s = f(t)$.
○ : experimental data used for estimation.
● : experimental data non used for estimation ($n = 30$, $\sigma H_s \leq 0,025$).
// : confidence intervals for H_s .

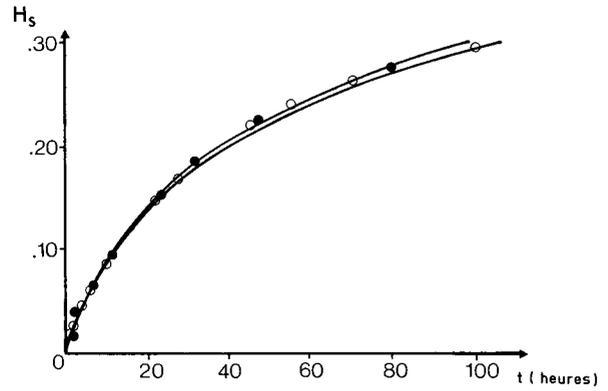


Figure 10
Cinétique d'imbibition en phase vapeur ($|\psi_e| = 0$) : valeurs expérimentales et valeurs calculées, $H_s = f(t)$.
○ : données expérimentales utilisées dans l'estimation des paramètres.
● : données expérimentales indépendantes de l'estimation ($n = 5$, $\sigma H_s \leq 0,010$).
// : intervalles de confiance sur H_s .
Imbibition in water vapor phase ($|\psi_e| = 0$) : experimental and calculated values, $H_s = f(t)$.
○ : experimental data used for estimation.
● : experimental data non used for estimation ($n = 5$, $\sigma H_s \leq 0.010$).
// : confidence intervals for H_s .

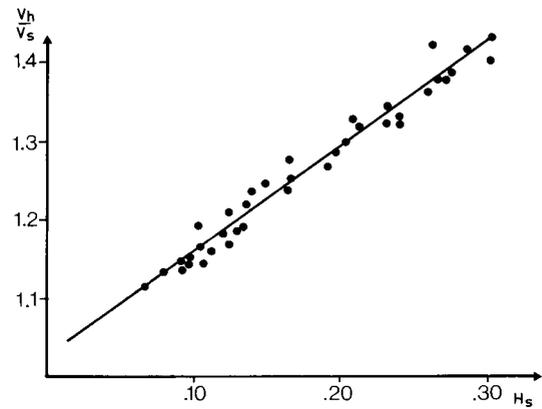


Figure 11
Rapport du volume humide de la semence (V_h) au volume à la conservation (V_s) en fonction de sa teneur en eau ($n = 37$, $r = 0,98$).
Ratio of the moistened seed volume (V_h) to dry volume (V_s) versus seed moisture ($n = 37$, $r = 0.98$).

L'intervalle de confiance sur la variable H_s est déterminé par les bornes inférieure et supérieure de l'intervalle de confiance des paramètres $K'(H_s)$ et $D'(H_s)$ à 95 p. 100 :

$$a \in [0,799 \cdot 10^{-8} ; 1,300 \cdot 10^{-8}] \quad a' \in [1,792 ; 1,977]$$

$$b \in [6,487 ; 9,100] \quad b' \in [7,492 ; 8,113].$$

C. Simulation de l'imbibition

Dans des cas d'imbibition relativement simples du point de vue des valeurs affectées aux différentes variables (semence placée dans un volume d'eau : $S_t = S_t$, $\psi_e = 0$) les expressions $\left(\frac{dH_s}{dt}\right)_l$ et $\left(\frac{dH_s}{dt}\right)_v$ peuvent être intégrables et l'on obtient une solution analytique $H_s = f(t)$.

Dans d'autres cas (si ψ_c n'est plus constant et nul mais devient une grandeur variable par exemple), cette intégration ne sera pas nécessairement possible. Il devient alors nécessaire d'utiliser un calcul par différences finies pour calculer toute cinétique d'imbibition moyenne (calcul de $\frac{\Delta H_s}{\Delta t}$ pour un pas de temps Δt et sommation des termes $\frac{\Delta H_s}{\Delta t}$ pour obtenir H_s).

Les valeurs Δt sont déterminées empiriquement, de façon telle que leur diminution n'améliore que de façon négligeable l'estimation de H_s à chaque valeur de t . Les pas de temps Δt sont fonction de la vitesse du phénomène, et on trouve ainsi :

- en phase liquide, $\Delta t = 0,25$ h, ($\psi_c = 0$),
- en phase gazeuse, $\Delta t = 1$ h, ($H_{rc} = 1$).

Le choix de ces 2 pas de temps permet ainsi de calculer une cinétique d'imbibition moyenne appartenant à l'intervalle de confiance représenté sur les figures 9 et 10 pour les cas expérimentaux correspondants.

D'une façon générale, les répétitions effectuées pour des conditions expérimentales données permettent d'aboutir aux conclusions suivantes :

- les cinétiques d'imbibition obtenues sont très reproductibles, pourvu que le potentiel initial des semences soit identique pour chaque semence et que les conditions expérimentales soient très bien contrôlées (température, « contact », potentiel extérieur ψ_c),

- l'écart type σ sur la teneur en eau H_s est dans la plupart des cas inférieur à 0,01. Cette homogénéité du matériel vis-à-vis d'un phénomène bien spécifié est illustré sur les figures 9 et 10 par la représentation de 2 séries de mesures indépendantes aboutissant aux mêmes valeurs moyennes H_s .

Pour les ordres de grandeur qui nous seront nécessaires et compte tenu de l'homogénéité des réponses du matériel, nous utiliserons une prévision moyenne, définie par la valeur moyenne des paramètres estimés, assortie d'une incertitude de 0,01 à 0,02 sur le terme H_s .

IV. CONCLUSION

La modélisation proposée a permis de réduire progressivement un « système terre-graine » complexe, voire imprécis, à un système à 2 variables. L'intérêt d'une telle démarche est de préciser le problème initial de l'humectation des semences en proposant une démarche expérimentale ultérieure : la mesure simultanée des variables mises en jeu dans le modèle et des cinétiques d'imbibition correspondant à ces variables. Dans la mesure où un tel modèle se trouve vérifié pour une large gamme de conditions expérimentales, son application devrait permettre de mieux prévoir la sensibilité des réponses des semences aux variations des conditions de milieu.

Les limites du modèle relèvent de difficultés d'ordre théorique ou métrologique : en effet, les choix qui sont effectués (introduction de la fonction $K'(H_s)$ par exemple) sont liés aussi bien à l'existence *a priori* de plusieurs fonctions $K(H_s)$ au sein d'une semence qu'à l'impossibilité de réaliser les mesures quasi ponctuelles nécessaires à la caractérisation physique de l'absorbant.

Ce dernier point rappelle que l'obtention de modèles de moins en moins arbitraires suppose, au minimum, l'obtention de moyens de mesures de plus en plus performants.

Reçu le 23 novembre 1981.

Accepté le 3 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.

Campbell, Gaylon S., 1974. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. *Soil Sci.*, **117**, 6, 311-314.

Collis-George N., Hector J. B., 1966. Germination of seeds as influenced by matrix potential and by area of contact between seed and soil water. *Aust. J. Soil Res.*, **4**, 145-164.

Come D., 1971. Dégazage des enveloppes séminales lors de leur imbibition. I. Cas général. *Physiol. vég.*, **9** (3), 439-446.

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.

Hegarty T. W., 1978. The physiology of seed hydration and dehydration and the relation between water stress and the control of germination : a review. *Plant Cell Environ.*, **1**, 101-119.

Owen P. C., 1952. The relation of germination of wheat to water potential. *J. exp. Bot.*, **38**, 188-203.