

S TH. & HC 32
Jéant

INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE PARIS - GRIGNON

THÈSE

**L'IMBIBITION ET LA GERMINATION
DES SEMENCES EN CONDITIONS SECHES :
INFLUENCE DES CARACTERES PHYSIQUES DU LIT DE SEMENCES**

présentée à L'INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE PARIS - GRIGNON

par

Laurent BRUCKLER

Ingénieur Agronome de l'Institut National Agronomique Paris - Grignon

pour obtenir le titre de DOCTEUR INGÉNIEUR « Sciences Agronomiques »

Soutenue le 19 Octobre 1979 devant la commission d'examen

MM. SEBILLOTTE

Président

CALVET

Rapporteur

BOCQUIER

ROLLIER

MONNIER

GUENNELON

AVANT - PROPOS

=====

Ce travail est le résultat d'une coopération entre la Chaire d'Agronomie de l'Institut National Agronomique Paris-Grignon (I.N.A.P.G.) et la Station de Science du Sol du Centre de Recherches Agronomiques d'Avignon (I.N.R.A.)

A ce titre, j'ai pu bénéficier de l'encadrement à la fois d'Agronomes et de Physiciens du sol.

Ces derniers ont orienté efficacement ce travail vers une analyse physique et une modélisation du système sol-semence : je remercie en premier lieu Gérard MONNIER et Roger GUENNELON d'avoir apporté leur compétence à l'encadrement de ce travail ; je ne saurais oublier Pierre STENGEL, dont les critiques pertinentes venaient souvent au bon moment.

Je remercie aussi sincèrement Michel SEBILLOTTE et Jean BOIFFIN de la Chaire d'Agronomie de l'I.N.A.P.G., qui sont à l'origine de ce travail et en ont constamment amélioré le déroulement par leur expérience et leurs critiques.

Je n'oublie pas Daniel COME, Directeur du Laboratoire de Physiologie des organes végétaux (C.N.R.S.) et la Chaire de physiologie végétale de l'I.N.A.P.G. qui m'ont ouvert leurs portes : la collaboration de Yvon LE DEUNFF y a toujours été amicale et utile.

Soient aussi remerciés tous les membres du jury d'avoir bien voulu y participer.

Enfin, je suis reconnaissant envers tous ceux des personnels technique et administratif : ils m'ont toujours apporté leur aide, tout en me faisant part de leur "métier".

DEUXIEME PARTIE.

CHAPITRE III ROLE DE LA SURFACE D'IMBIBITION SUR LES CINETIQUES D'IMBIBITION

page 54.

A - Analyse de la variable S

- I Variable S_l : cas des transferts liquides
- II Variable S_v : cas des transferts gazeux
- III Combinaison des transferts liquides et gazeux
- IV Conclusion partielle

B - Analyse du "contact terre-graine"

- I Principe de recherche d'une liaison entre un système de porosité et une surface d'imbibition
- II Choix de conditions expérimentales et d'une technique de mesure
- III Analyse du système de porosité
- IV Analyse de la relation "système de porosité - surface d'imbibition"
- V Conclusion partielle

C - Synthèse sur les relations "Etat structural-Humidité-Contact terre-graine".

- I Contact "terre-graine" et humidité
- II Construction d'une typologie et analyse des résultats

CHAPITRE IV ROLE DU POTENTIEL EXTERIEUR A LA SEMENCE SUR LA CINETIQUE D'IMBIBITION.

page 69.

A - Etude analytique du rôle de la variable ψ_e

- I Imbibition en phase gazeuse
- II Imbibition en phase liquide
- III Conclusion partielle

B - Imbibition des semences dans un milieu agrégé sur tout le domaine de teneur en eau du matériau.

- I Choix d'un dispositif expérimental
- II Analyse sommaire des cinétiques d'imbibition obtenues
- III Analyse modélisée des cinétiques d'imbibition
- IV Généralisation de l'analyse des résultats en terme de "surface équivalente"
- V Conclusion partielle.

C - Typologie des réponses des semences de maïs

- I Principe de construction
- II Commentaire sur la typologie
- III Conclusion partielle

TROISIEME PARTIE

CHAPITRE V IMBIBITION ET GERMINATION DES SEMENCES DANS UN LIT DE SEMENCES EN VOIE DE DESSECHEMENT.

page 88

A - Mesure des teneurs en eau par atténuation γ .

- I Principe
- II Mesure de la teneur en eau pour un milieu hétérogène
- III Incertitude de mesure sur θ_e
- IV Conclusion partielle

B - Imbibition des semences dans un lit de semences en voie de dessèchement.

- I Principe de la manipulation
- II Conception pratique de la manipulation
- III Résultats de base : obtention de profils hydriques
- IV Prévission de l'imbibition
- V Conclusion partielle

C - Première étude du dessèchement des semences dans un lit de semences soumis à évaporation.

- I Caractère général d'une fonction $\psi_s(H_s)$
- II Différenciation des semences par le fractionnement de leur surface
- III Conclusion partielle

CONCLUSION.

- Annexe 1 : Analyse du sol de Montluel
- Annexe 2 : Expression analytique des fonctions ψ_s, ψ_e
- Annexe 3 : Estimation de la conductivité (K_e) du sol de Montluel
- Annexe 4 : Rôle de la température sur la germination
- Annexe 5 : Principe des modes de calcul de H_s
- Annexe 6 : Etude expérimentale de la "réversibilité" de la germination.

LISTE DES PRINCIPAUX SYMBOLES

=====

Indices.

s	indice relatif à la semence
e	indice relatif au milieu extérieur à la semence
w	indice relatif à l'eau.

Grandeurs physiques.

θ	humidité volumique
H	humidité massique
H_e	humidité massique du milieu extérieur à la semence
H_s	humidité massique de la semence (par rapport au poids à la conservation)
H_c	humidité critique de la semence
ϕ	potentiel total de l'eau (L)
ψ_e	potentiel du milieu extérieur à la semence (L)
ψ_s	potentiel de la semence (L)
γ_d	densité sèche du milieu extérieur à la semence
γ_a	densité sèche d'un agrégat terreux (2-3 mm)
γ_s	densité de solide
n	porosité totale du sol
n_s	porosité structurale
n_t	porosité texturale
K	conductivité hydrique (LT^{-1})
$D(\theta)$	coefficient de diffusivité de l'eau (L^2T^{-1})
D	coefficient de diffusion de la vapeur d'eau (L^2T^{-1})
t	temps (T)
T	température ($^{\circ}K$)
ρ_w	masse volumique de l'eau (ML^{-3})
g	accélération de la pesanteur (LT^{-2})
z	abscisse sur un axe Oz (L)
q	flux d'eau (LT^{-1})
M	masse molaire de l'eau (M mole $^{-1}$)

R	constante des gaz parfaits	$(ML^2T^{-2} \text{ mole}^{-1} \text{ } ^\circ K^{-1})$
$\mu(T)$	viscosité de l'eau	$(ML^{-1}T^{-1})$
m	masse	(M)
V	volume	(L^3)
P	pression	$(ML^{-1}T^{-2})$
P_{atm}	pression atmosphérique	$(ML^{-1}T^{-2})$
P_o	pression de vapeur saturante de l'eau	$(ML^{-1}T^{-2})$
P_w	pression effective de l'eau	$(ML^{-1}T^{-2})$
P_e	pression partielle de vapeur d'eau à l'extérieur de la semence	$(ML^{-1}T^{-2})$
P_s	pression partielle de vapeur d'eau équivalente à l'intérieur de la semence	$(ML^{-1}T^{-2})$
H_r	humidité relative	
S	surface	(L^2)
S_t	surface totale de la semence	(L^2)
S_l	surface de la semence humectée en phase liquide	(L^2)
S_v	surface de la semence humectée en phase gazeuse	(L^2)
S_{ol}	surface initiale de la semence ($H_s = 0$) humectée en phase liquide	(L^2)
S_{ov}	surface initiale de la semence ($H_s = 0$) humectée en phase gazeuse	(L^2)

Coefficients.

$K'(H_s)$	coefficient d'ajustement relatif aux transferts liquides sol-semence	(T^{-1})
$D'(H_s)$	coefficient d'ajustement relatif aux transferts gazeux sol-semence	(LT^{-1})
α_1	constante relative aux transferts liquides sol-semence	(L^{-3})
α_v	constante relative aux transferts gazeux sol-semence	$(M^{-1}L^{-2}T^2 \text{ mole})$

Notations algébriques ou statistiques.

Δx	variation finie de la variable x
dx	différentielle de la variable x
μ	moyenne relative à une variable précisée
σ	écart type relatif à une variable précisée
\bar{x}	moyenne relative à une variable x

I N T R O D U C T I O N

La phase d'installation du peuplement végétal constitue une étape déterminante dans l'élaboration du rendement : elle est en effet sanctionnée par un nombre de pieds par unité de surface et définit ainsi un degré potentiel d'exploitation du milieu. Ce constat d'ordre général est particulièrement fondé dans le cas de plantes ne présentant pas de phénomènes compensatoires -absence de tallage- et pour lesquels on recherche toujours un taux de survie maximal des semences mises en terre. Sur la succession des phénomènes qui s'étalent du semis à la levée, les problèmes agronomiques décelés renvoient aussi bien à la germination proprement dite -percée de la racine- qu'à la levée -croissance et émergence des plantules-. Ces deux phénomènes, bien distincts du point de vue des facteurs et conditions qui les déterminent, doivent être étudiés séparément et nous n'aborderons ici que la première étape.

La germination proprement dite constitue une phase véritablement critique lors de l'apparition de "conditions sèches". On observe ainsi au champ, à la suite du dessèchement rapide du lit de semences, des taux de germination très inférieurs au pouvoir germinatif des semences utilisées (taux maximal de germination obtenu en conditions standard).

La germination des semences sèches étant définie comme une activation métabolique de la semence consécutive à une réhydratation, il n'est pas surprenant de constater que les conditions pratiques de "bonne germination" observées par les agronomes sont celles qui supposent des conditions favorables à la réhydratation des semences : il en est ainsi du tassement du sol autour de la semence (roulage) ou du semis en profondeur où les variations d'humidité sont plus lentes et de moindre intensité qu'en surface. Plus précisément, et malgré de nombreux obstacles à la constitution d'un diagnostic -la distinction plus ou moins claire entre la germination et la levée, la variabilité des lits de semences et leur difficulté de caractérisation, la rapidité des phénomènes et leur localisation dans l'espace- les agronomes

ont dégagé quelques hypothèses fortes relatives à la mise en place d'un peuplement. Celles-ci peuvent être résumées dans des schémas du type de celui présenté (schéma 1). Si la levée est souvent raisonnée en termes d'obstacles mécaniques à l'émergence -par exemple l'apparition d'une croûte de battance sur sol limoneux- on invoque surtout deux conditions physiques pour rendre compte d'un taux global ou d'une vitesse de germination.

- la qualité du "contact terre-graine" estimée par une notation de l'état structural.

- "l'humidité au contact des semences".

(plus fréquemment d'ailleurs, on ne note qu'une profondeur de semis et les conditions climatiques générales récentes.)

On effectue ainsi directement l'analyse de résultats de germination à l'aide de variables qui ne peuvent définir que des transferts d'eau, donc un processus d'imbibition. Or ce dernier n'est pas explicité -ou peu- dans des schémas du type de celui présenté (schéma 1).

Les agronomes aboutissent alors à un ensemble de liaisons qui spécifient l'importance des variables à prendre en compte et leur sens d'action. Mais ces liaisons sont parfois qualitatives -"plus le sol est sec, moins la germination est facile"- et laissent généralement un large domaine d'incertitude pour les cas intermédiaires situés entre des conditions qualifiées "d'humides" ou de "sèches". (FENNECH et PAPY, 1977).

Ainsi, les difficultés combinées de mise en place d'outils d'observation et d'analyse de situations au champ et la nécessité de rendre compte du déterminisme du passage de l'eau du sol vers la semence, orientent la recherche vers une analyse détaillée des relations physiques du "système terre-graine". Une telle analyse, centrée autour du processus d'imbibition proprement dit, cautionnée par des observations agronomiques fréquentes (cf. les variables explicatives précédemment citées), devra nécessairement s'articuler sur les lois qui régissent les transferts d'eau en milieu non saturé.

Si l'agronome est conduit vers l'analyse physique d'un phénomène bien spécifié, il ne peut ignorer ni les contraintes dues aux propriétés physiologiques de la semence, ni l'analyse des relations imbibition-germination, car c'est bien par rapport à la germination que se situent concrètement les problèmes.

D'une part, il devra choisir des conditions de mise en contact du sol et de la semence qui ne soient pas limitantes vis-à-vis de la germination -sauf l'alimentation hydrique-. Ces conditions seront relatives au choix d'une température et à l'oxygénation des semences.

D'autre part, des travaux antérieurs relatifs à la germination apportent des précisions essentielles sur les relations imbibition-germination (HUNTER and ERICKSON, 1952 ; OWEN, 1952 ; HADAS, 1970). Ils permettent de connaître, pour un grand nombre d'espèces cultivées (maïs, blé, riz, soja, betterave), une teneur en eau caractéristique au dessous de laquelle la germination est impossible.

En travaillant sur une espèce pour laquelle une telle humidité critique existe, on se donne les moyens de relier l'obtention de cette teneur en eau particulière à une possibilité de germination. L'analyse du processus d'imbibition peut ainsi déboucher sur un premier diagnostic relatif à la germination, puisque au delà de l'humidité critique, on ne considérera plus l'eau comme facteur limitant de la germination.

Une analyse physique des transferts d'eau du sol vers la semence qui s'appuie sur les lois générales de l'écoulement et qui débouche sur un modèle possible du "système terre-graine" constituera la première partie de notre travail. Une deuxième partie permettra de tester expérimentalement la pertinence des variables impliquées dans le modèle et d'étudier leur influence, en s'efforçant de les séparer. Enfin, nous aborderons dans une troisième partie le fonctionnement plus complexe d'un système "terre-graine" en place dans un lit de semence soumis à un dessèchement.

Nous avons choisi le Maïs -semence de grosse taille, semis de printemps susceptible de coïncider avec des conditions sèches, absence de tallage, existence d'une humidité critique- en cherchant à analyser le système "sol-semence" pour des conditions connues et constantes ($T = 20^{\circ}\text{C}$).

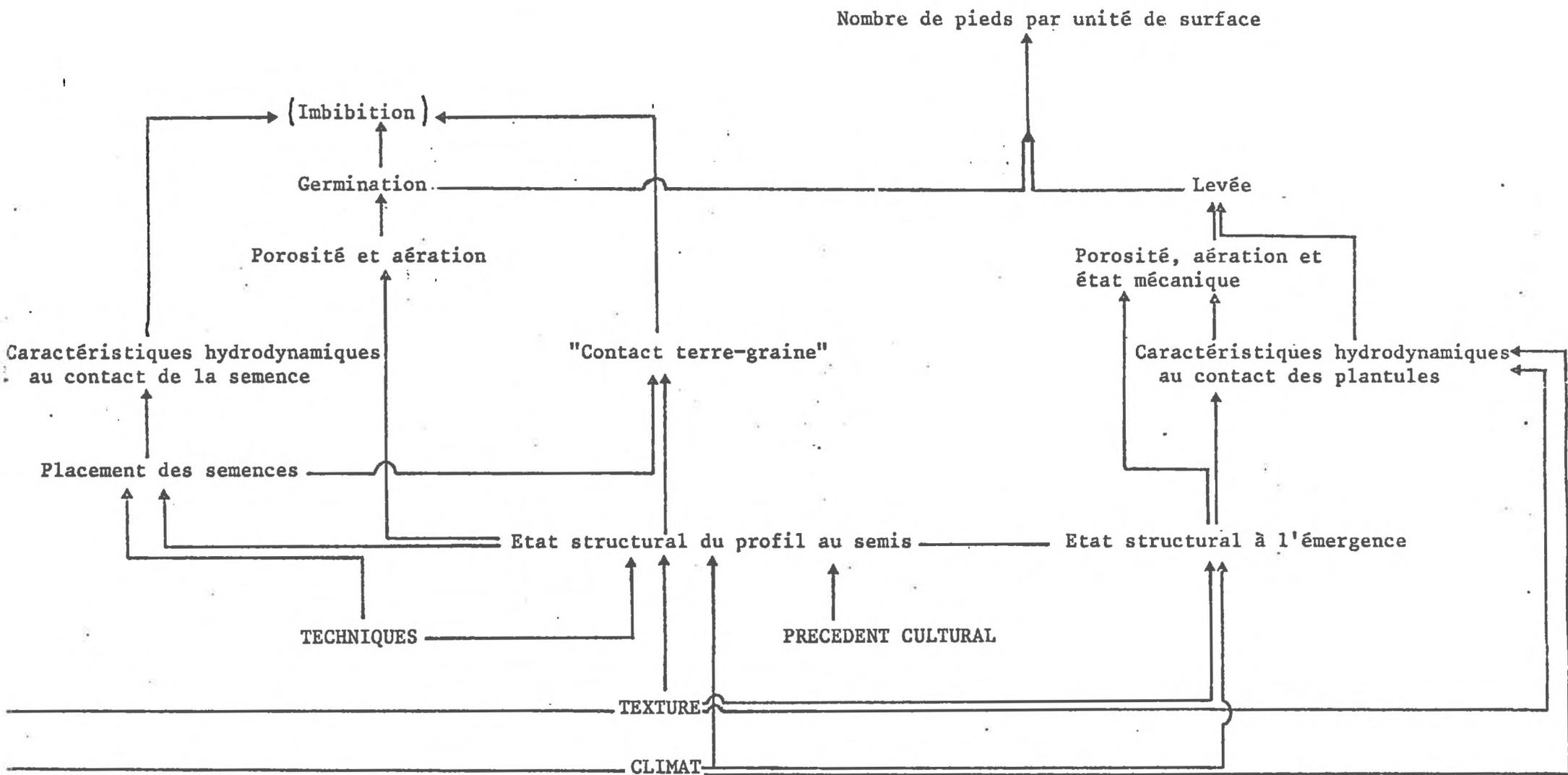


Schéma 1 : Rôle schématisé du milieu sur l'obtention du nombre de pieds par unité de surface.

(lire le schéma en commençant par le bas)

(on n'a pas pris en compte les propriétés spécifiques des semences : état sanitaire, faculté germinative, etc...)

Ce choix nécessaire posera évidemment le problème de l'extrapolation des conclusions acquises. Il n'existe pas -à notre connaissance- de travail conduit en laboratoire sur ce thème qui débouche sur un schéma synthétique des relations "état physique du profil-imbibition-germination". Pour notre part, des études théoriques ou expérimentales partielles s'efforceront, même sommairement, de proposer des liaisons entre l'imbibition, la germination et l'installation d'un peuplement.

PREMIÈRE PARTIE



CHAPITRE I

FORMULATION GÉNÉRALE DES LOIS QUI RÉGISSENT LES TRANSFERTS D'EAU.

Nous avons proposé d'analyser les transferts d'eau du sol vers la semence : le présent chapitre rappelle les lois générales qui régissent ces transferts, ainsi que le choix des variables effectués. Dans la mesure où le lit de semences, sur l'ensemble du domaine de teneurs en eau possibles, est le siège aussi bien de transferts liquides que de transferts en phase gazeuse, nous présenterons successivement les lois qui régissent ces deux types de phénomènes.

I TRANSFERTS LIQUIDES.

1.1. Domaine de définition des lois présentées.

Les lois qui régissent les transferts liquides sont formulées dans le cadre des hypothèses suivantes :

- l'écoulement est isotherme (c'est un argument qui impose le choix d'une température constante),
- la phase liquide est constituée par de l'eau pure,
- l'air est en tout point à la pression atmosphérique,
- il n'y a pas d'interaction d'ordre chimique entre la phase liquide et la phase solide, ou elles sont négligeables.

Par rapport aux conditions du milieu naturel, notons dès maintenant que c'est l'hypothèse d'isothermie qui semble la plus contraignante.

1.2. Choix des variables.

. Teneur en eau : on exprime l'humidité d'un élément de matériau par sa teneur en eau volumique θ ou sa teneur en eau massique H . Si on définit pour ce matériau homogène une densité γ_d , on obtient la relation :

$$\theta = \gamma_d \cdot H \quad (1) \quad \begin{aligned} \theta &= \text{humidité volumique (L}^3/\text{L}^3) \\ H &= \text{humidité massique (M/M)} \\ \gamma_d &= \text{densité du volume de matériau} \end{aligned}$$

. Potentiel total de l'eau :

On peut définir, en tout point du sol, un potentiel total de l'eau ϕ égal à la somme des potentiels de pression, osmotique, gravitaire, si les autres composantes de ϕ sont négligeables.

$$\phi = \phi_m + \phi_o + \phi_g \quad (2)$$

Compte tenu des hypothèses précédentes (la phase liquide est constituée par de l'eau pure, $\phi_o = 0$), le potentiel total se réduit à ses composantes ϕ_m et ϕ_g .

$$\phi = \phi_m + \phi_g \quad (3)$$

ϕ_m , potentiel de pression, est aussi appelé suction ψ ⁽¹⁾ en milieu non saturé. Cette suction est proportionnelle à la différence entre la pression effective de l'eau p_w et la pression atmosphérique p_{atm} .

$$\psi = \frac{p_w - p_{atm}}{\rho_w \cdot g} \quad (4) \quad \begin{aligned} \rho_w &= \text{masse volumique de l'eau (ML}^{-3}\text{)} \\ g &= \text{accélération de la pesanteur (LT}^{-2}\text{)} \\ \psi &= \text{suction (L)} \end{aligned}$$

(1) Elle résulte des forces de capillarité et d'adsorption dues à la matrice solide. (suction matricielle).

La succion matricielle est une grandeur négative dans la zone non saturée puisque la pression de l'eau y est inférieure à la pression atmosphérique. Dans la théorie capillaire, cette différence de pression est égale à la tension définie au niveau des interfaces solide-liquide-gaz.

En termes d'énergie, cette grandeur ψ négative correspond à la perte d'énergie que subit une masse d'eau lorsqu'elle passe d'une nappe d'eau libre à un point où elle est portée spontanément à une pression p_w . Elle peut être mesurée par la hauteur d'une colonne d'eau et a ainsi les dimensions d'une longueur.

ϕ_g , potentiel gravitaire, sera dénommé "z", cote du point considéré mesurée par rapport à un niveau de référence (surface d'une nappe d'eau libre) sur un axe vertical dirigé vers le bas.

(3) s'écrit alors :

$$\phi = \psi - z \quad (5)$$

Pour un état d'équilibre, $\phi = \text{cte}$, soit $\psi - z = \text{cte}$ ou encore

$$\frac{\partial \psi}{\partial z} = 1$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0$$

Le schéma 2 donne une représentation graphique de ce système d'équations.

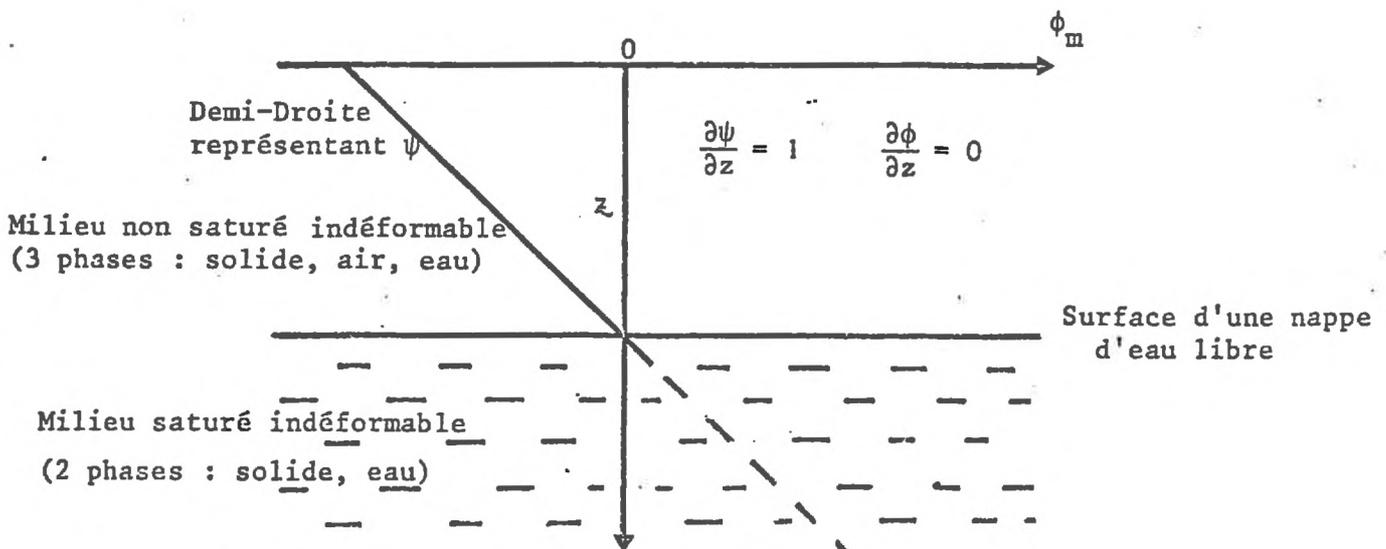


Schéma 2 : Représentation d'un état d'équilibre.

Toute différence de potentiel total d'un point à un autre constitue le moteur des transferts d'eau : l'état d'équilibre est toujours défini par l'unicité de la valeur du potentiel total en chaque point et non pas par l'égalité des teneurs en eau volumique θ .

Remarquons en outre (schéma 2) qu'en milieu saturé, ϕ_m devient positif : on parle alors de "charge hydraulique".

1.3. Equations régissant les lois de l'écoulement.

1.3.1. Equation d'état.

L'équation d'état exprime que la pression d'eau p_w est, en tout point, fonction de la température T , de la masse volumique de l'eau ρ_w , et de la concentration en eau du milieu (θ) :

$$p_w = f(T, \rho_w, \theta) \quad (6)$$

Si on opère dans des conditions isothermes ($T = \text{cte}$), sachant que l'eau est incompressible ($\rho_w = \text{cte}$), l'équation (6) devient :

$$p_w = f(\theta) \quad (7)$$

et d'après (4) et (7),

$$\psi = f(\theta) \quad (8)$$

La grandeur ψ est donc une fonction de θ : dans la théorie capillaire, la valeur absolue de la grandeur ψ est d'autant plus grande que le rayon de courbure des interfaces eau-air est plus petit, donc que la concentration en eau du milieu est plus faible.

Cette relation (8) est caractéristique du milieu utilisé : elle permet, comme nous allons le voir, de relier une grandeur descriptive θ à une grandeur ψ directement utilisée dans l'expression d'un flux (volume par unité de surface et de temps).

1.3.2. Equation de Darcy.a) En milieu saturé :

La loi de Darcy exprime la proportionnalité entre un flux et un gradient de potentiel, le coefficient de proportionnalité étant égal à la conductivité hydrique du matériau. L'existence d'un gradient de potentiel dans un volume donné apparaît ainsi comme le moteur des déplacements de l'eau.

$$\text{En notation vectorielle, } \vec{q} = -K(\theta \text{ sat}) \cdot \text{grad } \phi \quad (9)$$

$$\vec{q} = \text{flux d'eau} \quad (\text{LT}^{-1})$$

$\theta \text{ sat}$ = humidité volumique du milieu saturé

$$K(\theta \text{ sat}) = \text{conductivité du matériau lorsque } \theta = \theta \text{ sat.} \quad (\text{LT}^{-1})$$

$\text{grad } \phi$ = gradient de potentiel total de l'eau

En milieu saturé, $K(\theta \text{ sat})$ est égale à la perméabilité du matériau. De plus, le potentiel de pression est une grandeur positive directement proportionnelle à la pression hydrostatique en chaque point (on parle de charge hydraulique).

b) En milieu non saturé :

On peut généraliser la loi de Darcy en milieu non saturé, la valeur $K(\theta)$ devenant alors une fonction de θ , et le gradient de potentiel total étant généralement largement déterminé par un gradient de succion matricielle. Dans notre cas, nous pourrions effectivement négliger le potentiel gravitationnel.

En notation scalaire, selon un axe vertical Oz

$$q_z = -K(\theta) \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (10)$$

et si $\phi = \psi - z$,

$$q_z = -K(\theta) \left[\frac{\partial (\psi - z)}{\partial z} \right] \quad (11)$$

$$q_z = -K(\theta) \left[\frac{\partial \psi}{\partial z} - 1 \right] \quad (12) \quad \text{ou} \quad q_z = -K(\theta) \frac{\partial \psi}{\partial z} + K(\theta) \quad (13)$$

En situation d'équilibre, $\phi = \text{cte}$, $\frac{\partial \psi}{\partial z} = 1$ et $q_z = 0$

S'il n'y a pas d'équilibre :

- en milieu non saturé, si z est négligeable devant $\psi - z$,

$$\text{alors } q_z = -K(\theta) \frac{\partial \psi}{\partial z} \quad (\psi, \text{ potentiel matriciel})$$

- en milieu saturé, si $\frac{\partial \phi_m}{\partial z} \rightarrow 0$ (gradient de charge hydraulique nul),
 $q_z \rightarrow K(\theta \text{ sat})$

Remarquons que, comme la variable $\psi(\theta)$, le paramètre K est une fonction de θ . Notons aussi que $K(\theta)$ est toujours défini par le rapport de deux grandeurs (un flux et un gradient de potentiel).

La relation $K(\theta)$, fonction croissante de θ peut être sommairement décrite dans la théorie capillaire par le fait que le nombre de pores conducteurs et fonctionnels du sol décroît lorsque la teneur en eau du sol décroît. Enfin, le terme $K(\theta)$ est fonction uniquement des caractéristiques physiques du matériau et de θ si et seulement si la viscosité de l'eau est constante, c'est-à-dire si l'on opère dans des conditions isothermes, ce qui entre dans le cadre de nos hypothèses préalables.

D'une façon générale, on peut exprimer $K(\theta)$ sous la forme :

$$K(\theta) = \frac{k(\theta)}{\mu} \cdot \rho_w \cdot g \quad (14)$$

$k(\theta)$: perméabilité intrinsèque du matériau.

μ : viscosité de l'eau, $\mu = \mu(T)$

Notons également que les relations $\psi(\theta)$, $K(\theta)$ présentent des phénomènes d'hystérésis, et que l'on peut s'affranchir de ce problème supplémentaire en travaillant toujours en humidification ou en dessèchement, c'est-à-dire avec une variation monotone de θ . Puisque nous nous intéresserons au dessèchement du lit de semences, nous travaillerons en dessiccation lorsqu'il s'agira du sol.

c) Introduction du coefficient de diffusivité $D(\theta)$.

Rappelons l'écriture scalaire de la loi de Darcy généralisée, selon un axe Oz, lorsque $\phi = \psi$.

$$q_z = -K(\theta) \frac{\partial \psi}{\partial z}$$

Si, pour une variation monotone de θ , on peut définir une fonction continue $\psi(\theta)$ unique, on peut alors écrire l'égalité précédente sous la forme :

$$q_z = -K(\theta) \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (15)$$

et en posant $D(\theta) = K(\theta) \cdot \frac{\partial \psi}{\partial \theta}$ (16)

$$q_z = -D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (17)$$

On exprime de cette façon un flux comme une grandeur proportionnelle à un gradient de concentration $(\frac{\partial \theta}{\partial z})$, le paramètre de proportionnalité étant égal au coefficient de diffusivité du milieu porté à l'humidité θ . On exprime ainsi la loi de Darcy généralisée sous une forme analogue à la première loi de diffusion de Fick, sachant que le terme $D(\theta)$ n'a aucune signification physique mais est introduit par manipulation mathématique.

1.3.3. Equation de continuité.

Si l'on s'intéresse au bilan hydrique relatif à un volume de sol, selon un axe Oz, on peut démontrer l'équation de continuité :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial q_z}{\partial z} \quad (18)$$

θ : humidité volumique
 q_z : flux selon l'axe Oz
 t : temps
 Oz : direction des transferts

Cette équation de continuité exprime la conservation de la matière au cours de la détermination du bilan hydrique : elle signifie, par exemple, que si le matériau perd de l'eau ($\frac{\partial \theta}{\partial t} < 0$), cette perte correspond à un accroissement du flux selon Oz ($-\frac{\partial q_z}{\partial z} > 0$). Inversement si le matériau s'humidifie ($\frac{\partial \theta}{\partial t} > 0$), cette augmentation de la teneur en eau volumique θ correspond à une diminution du flux selon Oz ($-\frac{\partial q_z}{\partial z} < 0$). Elle permet aussi d'écrire l'équation générale de l'écoulement.

1.3.4. Equation générale de l'écoulement.

On obtient cette équation à partir de la loi de Darcy généralisée et de l'équation de continuité, c'est-à-dire :

$$q_z = -K(\theta) \frac{\partial \phi}{\partial z} = -K(\theta) \frac{\partial}{\partial z} (\psi - z) = -K(\theta) \left[\frac{\partial \psi}{\partial z} - 1 \right] \quad (19)$$

et

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial q_z}{\partial z} \quad (20)$$

En remplaçant (19) dans (20)

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial \left[-K(\theta) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} - 1 \right) \right]}{\partial z} = \frac{\partial \left[K(\theta) \frac{\partial \psi}{\partial z} \right]}{\partial z} - \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} \quad (21)$$

Si on introduit la valeur $D(\theta)$ dans l'expression précédente,

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial \left[D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right]}{\partial z} - \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} \quad (22)$$

expression qui se simplifie dans le cas où l'on néglige le potentiel gravitationnel (z).

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial \left[D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right]}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) = D(\theta) \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \quad (23)$$

L'expression (23) permet, généralement par résolution numérique, de traiter les problèmes d'écoulement dans le cadre des hypothèses énoncées jusqu'à présent.

L'ensemble des lois décrites fait clairement apparaître que seule la connaissance de fonction $K(\theta)$ et $\psi(\theta)$ permet de décrire les mouvements de l'eau. Mais notons également que ces deux fonctions sont dissymétriques : la fonction $\psi(\theta)$ caractérise l'état énergétique de l'eau dans un volume porté à une humidité θ , tandis que le coefficient de proportionnalité $K(\theta)$ est défini par le rapport des mesures de deux grandeurs physiques (un flux, un gradient de potentiel).

Enfin, notons que nous avons pu écrire la loi de Darcy généralisée sous une forme analogue à la première loi de Fick permettant de décrire les transferts en phase gazeuse.

II TRANSFERTS EN PHASE GAZEUSE.

Les considérations précédentes étaient relatives aux transferts en phase liquide. Cependant, les transferts en phases liquide et gazeuse peuvent coexister, la réduction de ces types à un seul n'étant possible que par comparaison des ordres de grandeur de chacun.

Nous nous limiterons au cas isotherme où des transferts de vapeur d'eau ont lieu lorsque, entre deux points quelconques d'un milieu, existe un gradient de concentration de vapeur d'eau, ou, ce qui revient au même, un gradient de pression.

2.1. Loi de Fick.

La première loi de Fick, relative aux transferts d'un gaz (ici, selon un axe Oz) s'écrit sous forme différentielle :

$$q'_z = -D \cdot \frac{\partial c}{\partial z} \quad (24) \quad q'_z \text{ (MT}^{-1} \text{ L}^{-2} \text{)}, \text{ flux selon l'axe Oz}$$

D, coefficient de diffusion du gaz selon Oz dans le milieu considéré
(L² T⁻¹)

$\frac{\partial c}{\partial z}$ gradient de concentration c selon Oz (ML⁻⁴)

Cette forme est analogue à la loi de Darcy généralisée écrite au moyen du coefficient de diffusivité $D(\theta)$.

2.2. Ecriture en termes de pression.

Pour une masse de gaz dm contenue dans un volume dv , la concentration sera définie par :

$$c = \frac{dm}{dv} \quad (25)$$

Si on assimile le gaz à un gaz parfait, la loi des gaz parfait s'écrira

$$p dv = \frac{dm}{M} RT \quad (26)$$

p	pression du gaz	$(ML^{-1}T^{-2})$
dv	volume occupé par la masse dm	(L^3)
M	masse molaire du gaz	(M)
R	constante des gaz parfaits	
T	température absolu	$^{\circ}K$

On déduit de (25) et (26), $c = \frac{dm}{dv} = \frac{M}{RT} p$. (27)

et on écrit la première loi de Fick sous la forme,

$$q'_z = -D \frac{\partial \left(\frac{M}{RT} p \right)}{\partial z} = - \frac{DM}{RT} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) \quad (28)$$

Dans le cas de la vapeur d'eau appartenant à un mélange gazeux, $\frac{\partial p}{\partial z}$ représentera le gradient de pression partielle de la vapeur d'eau.

Pour exprimer le flux q'_z en terme de volume liquide par unité de surface et de temps et se ramener à une expression homogène par rapport aux transferts sous forme liquide, on écrira :

$$q'_{z_{vol}} = q'_z = - \frac{1}{\rho_w} \frac{DM}{RT} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) \quad (29)$$

$$q'_{z_{vol}} \quad (LT^{-1})$$

2.3. Ecriture en termes de potentiels.

En restant dans des conditions isothermes, à la température T, si on appelle p_0 la pression de vapeur saturante de l'eau à cette température, p la pression partielle réelle de la vapeur d'eau à cette même température, la relation qui lie p à une grandeur mesurant un potentiel s'écrit :

$$\phi = - \frac{RT}{Mg} \ln \frac{p}{p_0} \quad (30) \text{ (in HENIN, 1976)}$$

ϕ (L), potentiel de la vapeur d'eau (m)
 g accélération de la pesanteur.

Pour chaque valeur de p correspond donc une grandeur équivalente ϕ , ϕ étant nul lorsque $p = p_0$ (pression de vapeur saturante)

Dans une enceinte close à température constante, un corps poreux humide sera donc en équilibre avec une phase de vapeur d'eau au bout d'un temps suffisamment long, l'équilibre étant défini par $\phi_{liq} = \phi_{vap}$

$$\text{ou} \quad \psi_{liq} = \phi_{vap} \quad (31)$$

A cet équilibre correspondra une teneur en eau θ pour le corps poreux, définie par la relation $\psi_{liq} = f(\theta)$, et une pression partielle de la vapeur d'eau définie par la relation $\phi_{vap} = f(p)$.

III CONCLUSION PARTIELLE.

La présentation des lois générales de l'écoulement permet d'aboutir à la conclusion suivante : quelle que soit la phase de transfert, on peut définir tout absorbant par une grandeur unique, le potentiel (ψ ou ϕ). Si on connaît de plus un coefficient de proportionnalité (K ou D), on accède à l'expression d'un flux.

Dans notre cas, si la caractérisation physique indépendante du sol et de la semence est une nécessité, nous aurons à mettre en relation ces deux compartiments. Cette mise en contact pose d'ailleurs un problème que la présentation précédente n'a pas explicité. En effet, les lois de la diffusion supposent toujours l'existence d'un milieu sans discontinuité au sein duquel sont décrits les écoulements liquides. Si l'on veut appliquer ces lois à un système terre-graine, il faut s'assurer que la semence étudiée

ne présente pas de lame d'air macroscopique et pratiquement continue entre le tégument et le contenu séminal interne. Dans ce cas, cette lame pourrait fonctionner comme une véritable barrière aux transferts d'eau liquide.

A cet égard, le choix du maïs semble justifié puisque l'observation morphologique de la semence montre que le tégument est adhérent au contenu séminal. L'hypothèse de continuité est donc, a priori, vérifiée. Compte-tenu de cette constatation, nous chercherons à établir un modèle permettant d'explicitier les transferts "sol-semence", construit à partir des lois rappelées dans ce chapitre.

CHAPITRE II

=====

ÉLABORATION D'UN MODÈLE DU "SYSTÈME TERRE-GRAINE"

A. CARACTÉRISATION PHYSIQUE DES ABSORBANTS.

La synthèse des résultats agronomiques généraux relatifs à la germination, nous a conduit à analyser de façon spécifique l'imbibition des semences et les relations "imbibition-germination". Simultanément, les lois physiques qui régissent les écoulements (chap. I) nous amènent à réduire les absorbants à des couples de fonctions $(K(\theta), \psi(\theta))$ afin de pouvoir les mettre en relation. Si cette réduction est connue dans le cas des sols et si rien ne s'oppose théoriquement à sa réalisation pour une semence, il est nécessaire cependant d'examiner dans un premier temps les particularités dues aux propriétés physiologiques ou morphologiques de cette semence (cas du maïs, var. LG 11) et d'en déduire toutes conséquences utiles pour la détermination des fonctions $\psi(\theta)$, $K(\theta)$.

I QUESTIONS PRELIMINAIRES SUR LES PROPRIETES DE LA SEMENCE.

1.1. Choix des conditions expérimentales en vue d'obtenir une relation $\psi_s = f(H_s)$.

ψ_s = potentiel des semences

H_s = teneur en eau massique des semences, sans dimension

(σH_s = écart type sur H_s)

La relation $\psi_s = f(H_s)$ étant a priori une relation hystérétique,⁽¹⁾ il est clair que la construction de celle-ci doit se faire pour une variation monotone et croissante de H_s (humectation). D'autre part, la relation $\psi_s = f(H_s)$ étant fonction des liaisons "eau-composants cellulaires", elle peut être variable selon les conditions d'imbibition et le métabolisme associé à chaque type de conditions. On aura donc intérêt à déterminer cette fonction dans des conditions proches

(1) c'est du moins ce que permettent de penser les indications sur la réversibilité de l'imbibition fournies par les physiologistes (HEGARTY, 1978).

de celles réalisées ultérieurement au cours d'imbibition des semences (aération, température) ; notons qu'en ce qui concerne l'oxygénation, les conditions limitantes peuvent apparaître lorsque la semence est totalement entourée d'une couche continue d'eau (COME, 1970), le flux d'oxygène étant alors d'autant plus intense que la lame d'eau est de 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).

1.2. Homogénéité et isotropie du matériau.

Ces propriétés concernent aussi bien le volume de la semence que sa surface. Le volume de la semence étant hétérogène (trois unités distinctes : tégument, embryon, réserve), 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 de chaque unité sur la détermination d'une fonction ψ_s .

D'autre part, au sein d'un volume quelconque et pour une valeur donnée d'un gradient de potentiel, rappelons que l'on peut expliciter un flux d'eau, toujours défini pour une surface donnée de transfert (chap. I) : dans le cas général, cette surface est supposée homogène. Dans le cas du flux d'eau à travers la surface d'une semence, cette hypothèse n'est pas nécessairement réalisée. Elle pose d'autant plus problème que le "contact terre-graine" suggère un rôle prépondérant de la surface d'imbibition de la semence.

Dans le cas du maïs, deux zones peuvent a priori fonctionner de façon particulière :

- le hile, point d'attache à la plante mère, à structure ligneuse,
- la zone sus-jacente à l'embryon qui ne couvre qu'une faible fraction de la surface totale de la semence (HEGARTY, 1978). L'ordre de grandeur de ce recouvrement est estimé à 10 p.cent de la surface totale de la semence.

Pour le premier point, il apparaît que la présence du hile n'introduit pas d'hétérogénéité considérable de la surface des semences (cf fig. 1 : En comparant l'imbibition de semences avec hile intact ou imperméabilisé, les différences répercutées sur H_s sont de 0,01 à 0,02 ($n = 10$, $\sigma H_s < 0,016$)

Pour le deuxième point, des différences du même ordre de grandeur sont observées entre l'une ou l'autre face de la semence (avec ou sans embryon)⁽¹⁾, cependant, bien que les cinétiques d'imbibition soient peu contrastées d'une face à l'autre, il ne faut pas perdre de vue que c'est l'embryon qui germe et la germination est plus rapide dans le cas où on imbibe uniquement la face avec embryon que dans le cas où on imbibe la face sans embryon.

Au total, en choisissant des conditions expérimentales particulières lorsque nous l'estimerons utile par rapport à l'objet de la manipulation et à la précision de mesures (imperméabilisation du hile par exemple), nous admettrons l'hypothèse d'homogénéité de surface de la semence, son volume étant par contre hétérogène.

1.3. Variabilité et stabilité du matériel.

Si on peut réduire considérablement l'hétérogénéité des fractions d'un volume de sol (tamisage, destruction de la matière organique, tri granulométrique), la variabilité d'origine physiologique des semences (maturation, conditions de récoltes) est généralement inconnue a priori et non décelable à l'aide de critères d'observations simples et non destructives.

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

- déterminer la variabilité de la fonction $\psi_s = f(H_s)$
- réduire au minimum et a priori la variabilité d'origine physiologique des semences (même récolte, même conservation, tri des semences sur une gamme de poids donnée : 290 à 340 mg),
- assurer la stabilité du matériel au cours du temps (conservation à 5°C en atmosphère sèche) (TOUZARD, 1961).

(1) à 20°C, ces différences sont inférieures à $\Delta H_s = 0,02$.

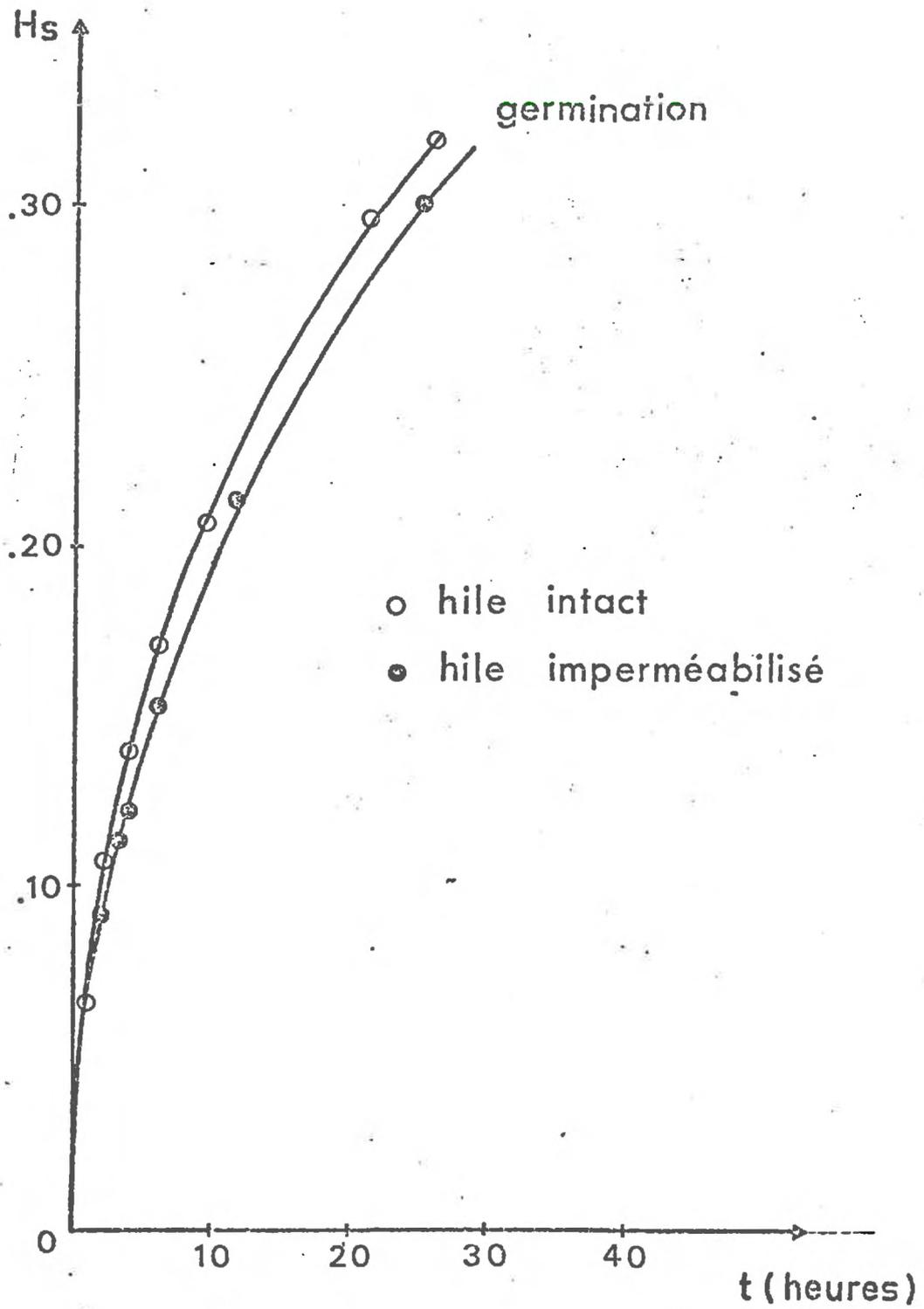


FIGURE 1 : Rôle du hile sur la vitesse d'imbibition en phase liquide :
Humidité de la semence en fonction du temps
($n = 10, \sigma_{H_s} \leq 0,016$).

Remarque : Une congélation des semences dans l'azote liquide (fracturation des téguments (COME, 1975) n'a aucun effet sur l'étalement des germinations dans le temps : celui-ci n'a donc pas son origine dans une plus ou moins grande perméabilité de ceux-ci, mais dans une variabilité d'origine physiologique des semences.

1.4. Problèmes particuliers liés à la physiologie des semences.

Dans la mesure où nous rechercherons une liaison entre une cinétique d'imbibition (augmentation de la teneur en eau de la semence au cours du temps) et le déclenchement de la germination, aucun problème physiologique particulier (inhibition, dormance) ne doit masquer cette relation. Ces exigences justifient a fortiori le choix du maïs comme semence de travail.

II CARACTERISATION EXPERIMENTALE DES ABSORBANTS.

Dans un premier temps, nous chercherons des fonctions $\psi_s = f(H_s)$ et $\psi_e = f(H_e)$, caractéristiques des absorbants (ψ_s , ψ_e potentiels de la semence et du sol ; H_s , H_e humidités massiques de la semence et du sol). En discutant ensuite la possibilité de définition des paramètres K_s et K_e (respectivement, conductivité de la semence et du sol), nous chercherons alors à mettre en relation les deux compartiments "sol" et "semence".

2.1. Relation (ψ_s) = f (H_s)

2.1.1. Principe de mesure.

La mesure du potentiel est effectuée en plaçant les semences en équilibre avec une phase gazeuse à humidité relative (p/p_o) connue (la phase gazeuse est elle-même en équilibre avec une solution H_2SO_4).⁽¹⁾

D'après la relation $\psi = \frac{RT}{Mg} \ln \left(\frac{p}{p_o} \right)$, la connaissance de p/p_o permet de calculer la valeur ψ . (cf chap. I)

(1) Pour la relation "concentration en H_2SO_4 /valeur de $\frac{p}{p_o}$ ", cf. "Handbook of Chemistry and Physics, 1978".

$\frac{P}{P_0}$: humidité relative de la phase gazeuse

ψ : potentiel de l'eau, défini en phase gazeuse (m)

La qualité d'une telle mesure est liée au caractère plus ou moins constant de la température. Considérons en effet les données suivantes :

T°C	p_0 (mmHg)	
19°C	16,477	p_0 = pression de vapeur saturante à T°C
20°C	17,535	
21°C	18,650	

A $T = 20^\circ\text{C}$, pour une humidité relative $p/p_0 = Hr = 0,975$, la pression partielle de vapeur d'eau⁽⁹⁾ est de 17,097 mm Hg. Si la température diminue instantanément de 1°C , la pression de vapeur devient égale à la pression de vapeur saturante à 19°C (16,477 mm Hg) : il y a condensation de l'eau et la valeur absolue du potentiel en phase gazeuse passe de 349 m ($\frac{P}{P_0} = 0,975$) à 0 (vapeur saturante). Les mesures sont donc effectuées dans un bac climatisé placé dans une enceinte elle-même climatisée ($T = 20^\circ\text{C}$; $\Delta T \leq 0,1^\circ\text{C}$).

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 $Hr = p/p_0 \sim 1$, forte sensibilité aux variations de T) : pour couvrir un large domaine de potentiel de l'eau de la semence, nous avons donc mesuré deux 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.

2.1.2. Conditions expérimentales.

La fonction $\psi_s = f(H_s)$ est déterminée dans le cas d'une humectation, réalisée au cours d'un premier cycle d'imbibition. Chaque couple expérimental (ψ_s, H_s) est construit avec dix répétitions (10 semences). Bien

que ce soit l'embryon qui germe, l'imbibition concerne la totalité du volume séminal. Il semble donc pertinent de vérifier si la relation $\psi_s = f(H_s)$ est bien une relation caractéristique du "matériau-semence", plus ou moins indépendante de la présence ou de l'absence de l'embryon (ou de sa viabilité). Pour cette raison, nous avons effectué quelques mesures de la fonction $\psi_s = f(H_s)$ sur des semences sans embryon.

2.1.3. Résultats expérimentaux.

Les tableaux 1 à 3 récapitulent les résultats expérimentaux obtenus. Rappelons que la plupart d'entre eux sont obtenus grâce à un dispositif expérimental qui met en jeu les transferts en phase gazeuse. Pour l'instant, seules nous intéressent des valeurs d'équilibres $H_s = f(\psi_s)$; mais nous aurons ultérieurement à modéliser ces transferts s'ils ne sont pas d'un ordre de grandeur négligeable par rapport à celui des transferts liquides.

2.1.4. Analyse des résultats expérimentaux. (cas du maïs)

(fig. 2 et tableaux 1 à 3).

2.1.4.1. Ordres de grandeur - Conséquences.

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_e) concernera donc des teneurs en eau très faibles, très généralement inférieures au point de flétrissement permanent (5,5 % dans le cas du sol choisi).

2.1.4.2. Relation "imbibition-germination" : Définition d'une humidité critique .

Les tableaux 1, 2, 3 définissent une fonction $\psi_s = f(H_s)$. Ils permettent en outre d'approcher la liaison "teneur en eau (H_s)-germination" :

- Pour des valeurs $|\psi_s| > 16$ Bars (tableau 1), les semences sont en équilibre avec le potentiel extérieur ; leur teneur en eau est constante (palier hydrique) et on n'observe aucune germination même après un mois d'équilibre.

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 (m)		-349,5	-869	-1639	-2994	-7448	-13688	-23073	-45518
ψ_s (Bars)		-34,3	-85,2	-160,8	-293,6	-730,3	-1342,0	-2262	-4658
pF		4,54	4,94	5,21	5,48	5,87	6,13	6,36	6,68
H_s *	μ	0,168	0,125	0,090	0,063	0,025	-0,001	-0,024	-0,041
	σ	0,005	0,005	0,004	0,003	0,002	0,004	0,003	0,003

* La teneur en eau H_s est exprimée par rapport au poids de la semence à la conservation. (1) (Pour cette raison, on peut obtenir $H_s < 0$)
 μ et σ calculés sur 10 semences.

Tableau 1 : Cas du maïs - Relation $\psi_s = f(H_s)$ ($|\psi_s| > 34$ Bars)

Potentiel de l'eau du sol (ψ_e) (Bars)	Humidité du sol (H_e)	H_s		Nb. de semences germées à l'équilibre	Croissance radicule (5 j)
		μ	σ		
- 16	0,055	0,248	0,010	2 sur 10	0,5 à 1 mm

Tableau 2 : Cas du maïs - Relation $\psi_s = f(H_s)$ ($|\psi_s| = 16$ Bars)

Potentiel de l'eau du sol (ψ_e) (Bars)	Humidité du sol (H_e)	H_s		Nb. de semences germées	Croissance radicule (4 j)
		μ	σ		
- 7,6	0,070	Pas d'équilibre		10 sur 10	> 10 mm

Tableau 3 : Cas du maïs - Relation $\psi_s = f(H_s)$ ($|\psi_s| = 7,6$ Bars)

(1) La teneur en eau à la conservation est d'environ 10 %

- Pour des valeurs $|\psi_s| < 16$ Bars (tableau 3), il n'y a pas de palier hydrique : toutes les semences germent et présentent des phénomènes de croissance radriculaire (il n'y a donc pas d'équivalence entre la valeur nulle du potentiel de la semence et le déclenchement possible de la germination).

- Pour $|\psi_s| = 16$ Bars (tableau 2, $\bar{H}_s = 0,245$), il semble que l'on atteigne pratiquement un seuil H_s séparant un domaine de germination possible et un domaine de germination impossible : deux 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 amenés à définir une humidité critique (H_c), au delà de laquelle l'eau n'est plus le facteur limitant de la germination. Associé à une valeur approchée $H_c \sim 0,25$ à $0,26$, nous pouvons définir un intervalle $|\psi(H_c)|$ limité par les bornes (12 Bars, 16 Bars). Notons que de tels seuils ont pu être définis pour d'autres semences et coïncident avec les données fournies par les physiologistes (OWEN, 1951).

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 $(0, H_c)$ au delà duquel l'eau ne sera plus une variable explicative de l'absence de germination.

2.1.4.3. Rôle du matériau sur la définition d'une fonction $\psi_s = f(H_s)$

La figure 2 présente aussi des résultats $\psi_s = f(H_s)$ dans le cas de semences sans embryon. Dans le cas de semences avec ou sans embryon, les teneurs en eau H_s sont définies comme suit (pour une valeur ψ_s donnée) :

- m_t	= masse totale de la semence sèche	}	
- m_e	= masse de l'embryon sec	}	à la
- m_m	= masse de la semence sèche sans embryon.	}	conservation

On a : $m_t = m_e + m_m$

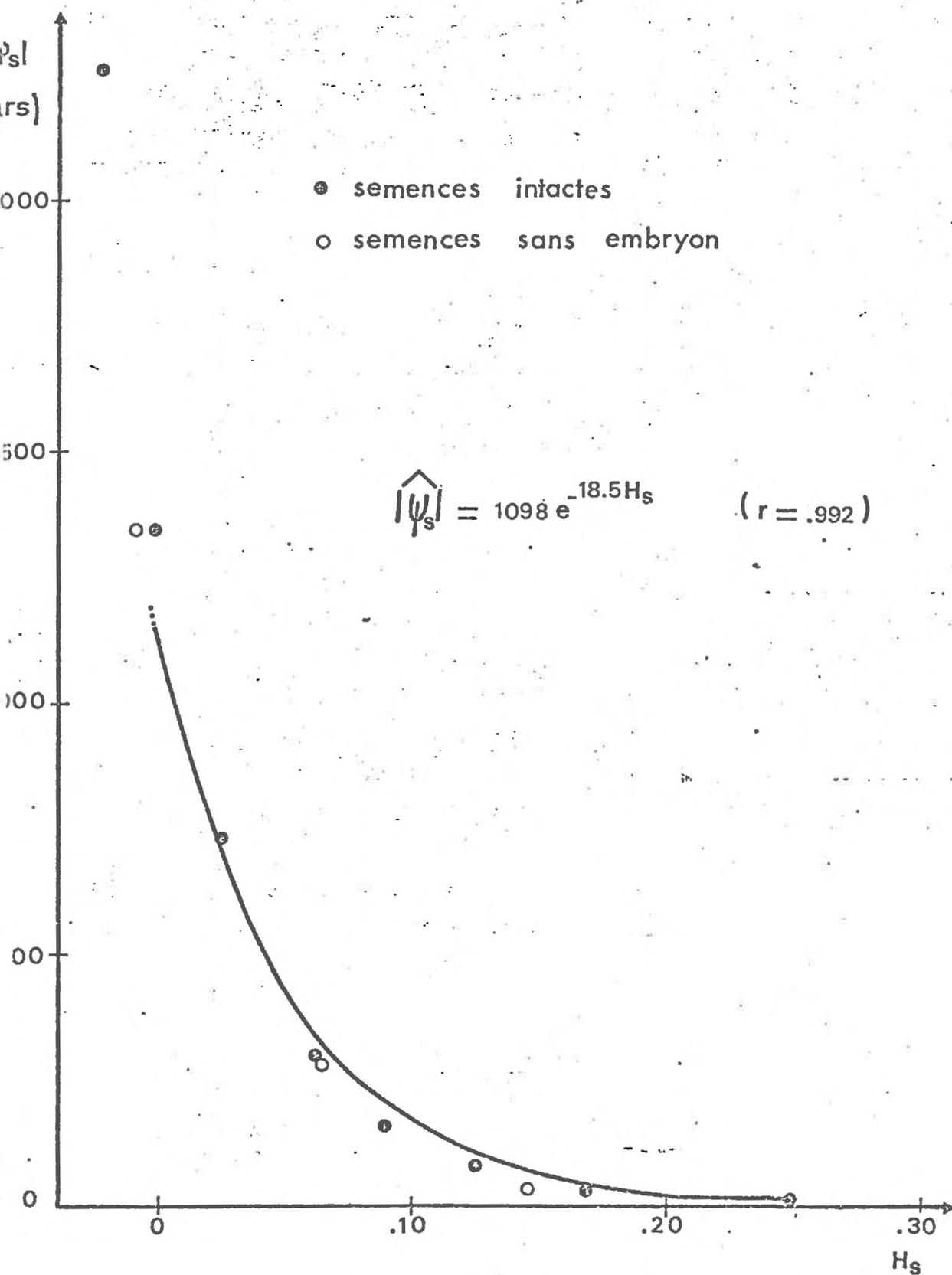


FIGURE 2 : Potentiel ψ_s de la semence de maïs en fonction de sa teneur en eau : Semences avec et sans embryon ($\sigma_{H_s} \leq 0,005$).

soit m_w la masse d'eau absorbée par une semence :

$$m_w = m_{wm} + m_{we} \quad (\text{mêmes indices que précédemment})$$

Dans le cas d'une semence avec embryon,

$$\text{on définit } H_{s1} = \frac{m_w}{m_t} = \frac{m_{wm} + m_{we}}{m_m + m_e} \approx \frac{m_{wm} + m_{we}}{m_m} \quad \left(\frac{m_e}{m_m + m_e} \sim 0,04 \right)$$

$$H_{s1} = \frac{m_{wm}}{m_m} + \frac{m_{we}}{m_m} \quad (1)$$

Dans le cas d'une semence sans embryon,

$$\text{on définit } H_{s2} = \frac{m_{wm}}{m_m} \quad (2)$$

D'après (1) et (2), il vient $H_{s1} - H_{s2} \approx \frac{m_{we}}{m_m} \ll 1$, ce que l'on vérifie expérimentalement (cf. figure 2).

Ainsi, la relation $\psi_s = f(H_s)$ est essentiellement une caractéristique du "matériau semence", peu modifiée par la présence de l'embryon. Ce rôle déterminant de l'ensemble du matériau sur la définition $\psi_s = f(H_s)$ nous semble compatible avec la faible variabilité intersemence de la relation $\psi_s = f(H_s)$; 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.

2.2. Relation $\psi_e = f(H_e)$.

2.2.1. 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 (1966) a 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 ^{augmenter} accroître la difficulté de l'analyse du "contact terre-graine". Pour ces raisons, nous avons choisi un matériau limoneux (70 % de limons fins et grossiers) dont l'analyse est fournie par l'annexe 1. (Dans le texte, ce sol sera intitulé "sol de Montluel").

2.2.2. Conditions de mesures.

Afin de nous situer ^{de contact} d'emblée dans des ordres de grandeur (ψ_e) comparables à ceux déterminés par la semence (ψ_s), nous avons décomposé la construction de la relation $\psi_e = f(H_e)$ en deux étapes :

- obtention d'une fonction $\psi_e = f(H_e)$ sur une très large gamme de potentiels, particulièrement développée dans le domaine des faibles teneurs en eau du sol. Le dispositif expérimental est analogue à celui utilisé pour les semences (équilibre en phase gazeuse).

- obtention d'une fonction $\psi_e = f(H_e)$ dans l'intervalle (0,16 Bars) à l'aide d'une presse Richard. Pour chaque type de mesure, nous travaillerons en dessiccation.

2.2.3. Résultats expérimentaux.

Le tableau 4 et la figure 3 sont relatifs aux mesures effectuées par mise en équilibre avec une phase gazeuse.

Les résultats de la mesure sur membrane poreuse (presse Richard) sont donnés par la figure 4, sur structure continue et sur agrégats : à l'exception du domaine des fortes teneurs en eau ($H_e > 0,10$; $\psi_e > -2$ Bars), les résultats relatifs aux deux états structuraux sont identiques (cette

Tableau 4 : Relation $\psi_e = f(H_e)$ obtenue en phase gazeuse

(sol de Montluel)
(agrégats 2 à 3 mm)

$ \psi_e $ (Bars)	H_e	
	μ ^{xx}	σ ^{xxx}
924	0,0139	0,0004
658	0,0155	0,0005
424	0,0177	0,0001
264	0,0194	0,0005
148	0,0242	0,0007
80	0,0345	0,0006
(16) ^x	(0,0550)	(0,0002)
(2) ^x	(0,1000)	(0,0002)

^x mesures effectuées à la presse Richard

^{xx} $\frac{\Delta H_e}{H_e} \sim 0,0001$

^{xxx} moyenne et écart-type calculés sur 3 répétitions.

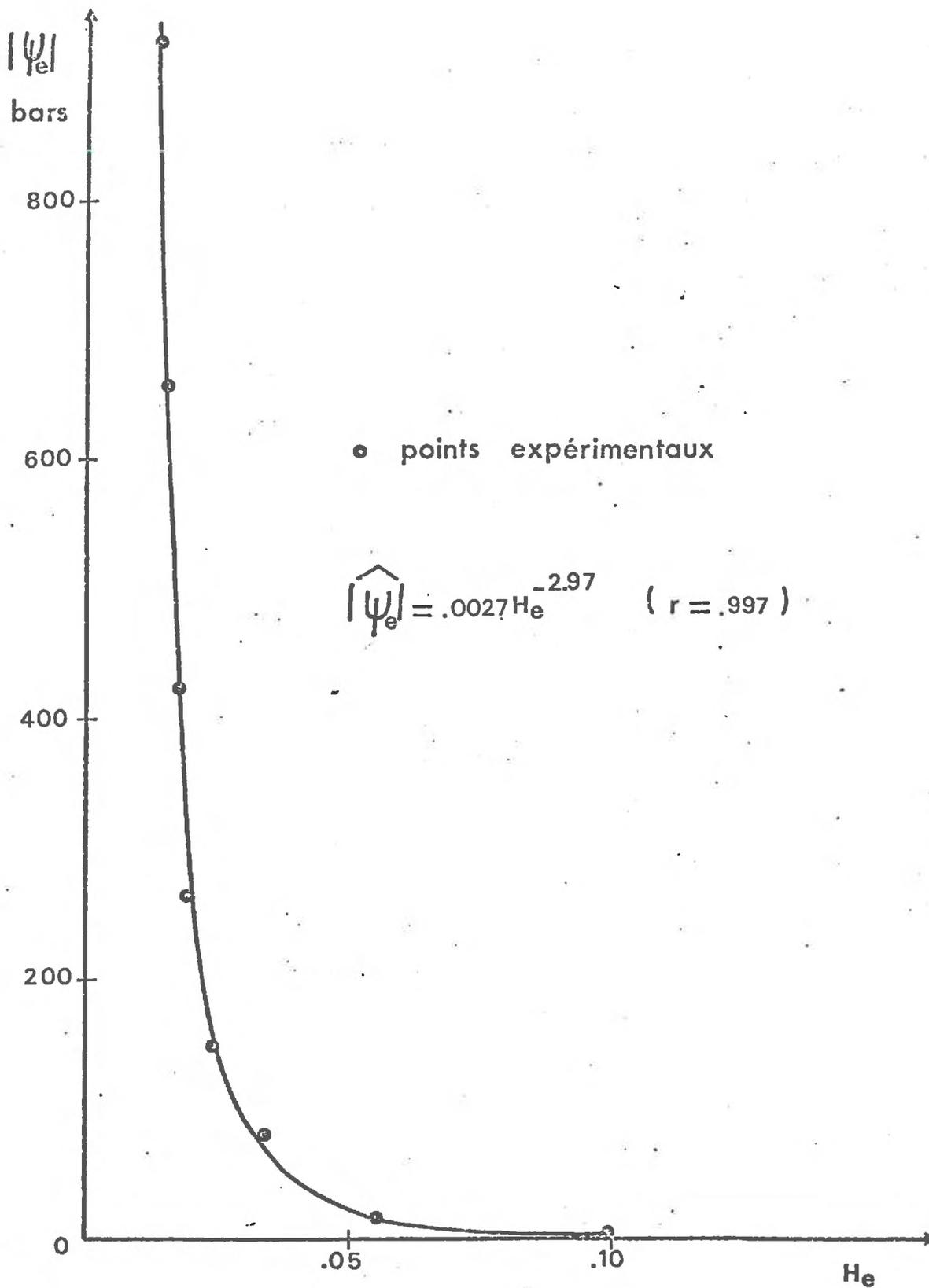


FIGURE 3 : Potentiel du sol en fonction de sa teneur en eau : Sol de Montluel - Equilibres en phase gazeuse ($\sigma H_e \leq 0,007$)

observation est compatible avec l'hypothèse de caractéristiques hydriques du sol déterminées par son espace poral textural). Autrement dit, on pourra, dans le domaine des faibles teneurs en eau, assimiler les relations $\psi(H_e)$ obtenues sur structure continue ou sur agrégats de 2-3 mm, ainsi que les valeurs $K(H_e)$. (La conductivité mesurée ou calculée sur une structure continue étant alors supposée égale à la conductivité intra-agrégats).

La juxtaposition des figures 3 et 4 représente donc l'ensemble de la fonction $\psi_e = f(H_e)$.

2.3. Conclusion partielle relative aux fonctions ψ_e et ψ_s .

Dans des conditions expérimentales identiques et pour des ordres de grandeur semblables, nous avons caractérisé les deux absorbants par les fonctions $\psi_s = f(H_s)$ et $\psi_e = f(H_e)$ (L'annexe 2 donne une expression analytique de ces fonctions). En outre, la détermination de la fonction $\psi_s = f(H_s)$ a mis en lumière le rôle déterminant du "matériau-semence", la faible variabilité de cette fonction, et les relations "teneur en eau-germination". (Celles-ci sont schématisées dans le tableau 5).

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 que nous avons maintenue intacte.

Tout se passe donc comme si nous donnions une définition strictement ponctuelle de la semence, ou, ce qui revient au même, la définition d'une semence qui ne présente pas de gradient de potentiel au sein même de ses composants. L'implication nécessaire de cette définition de ψ_s est l'impossibilité de définir une fonction $K_s(H_s)$ ⁽¹⁾ caractéristique de la semence : le caractère fondamentalement hétérogène du volume séminal poserait d'ailleurs à lui seul le problème du sens d'une fonction $K_s(H_s)$ unique, sans même tenir compte des difficultés techniques de mesure de K_s .

(1) En se basant sur l'équivalence $\phi_1 = \phi_v$, l'existence de vapeur d'eau à l'intérieur de la semence à une pression partielle p homogène aboutirait à la même impossibilité de définition d'un coefficient $D(H_s)$.

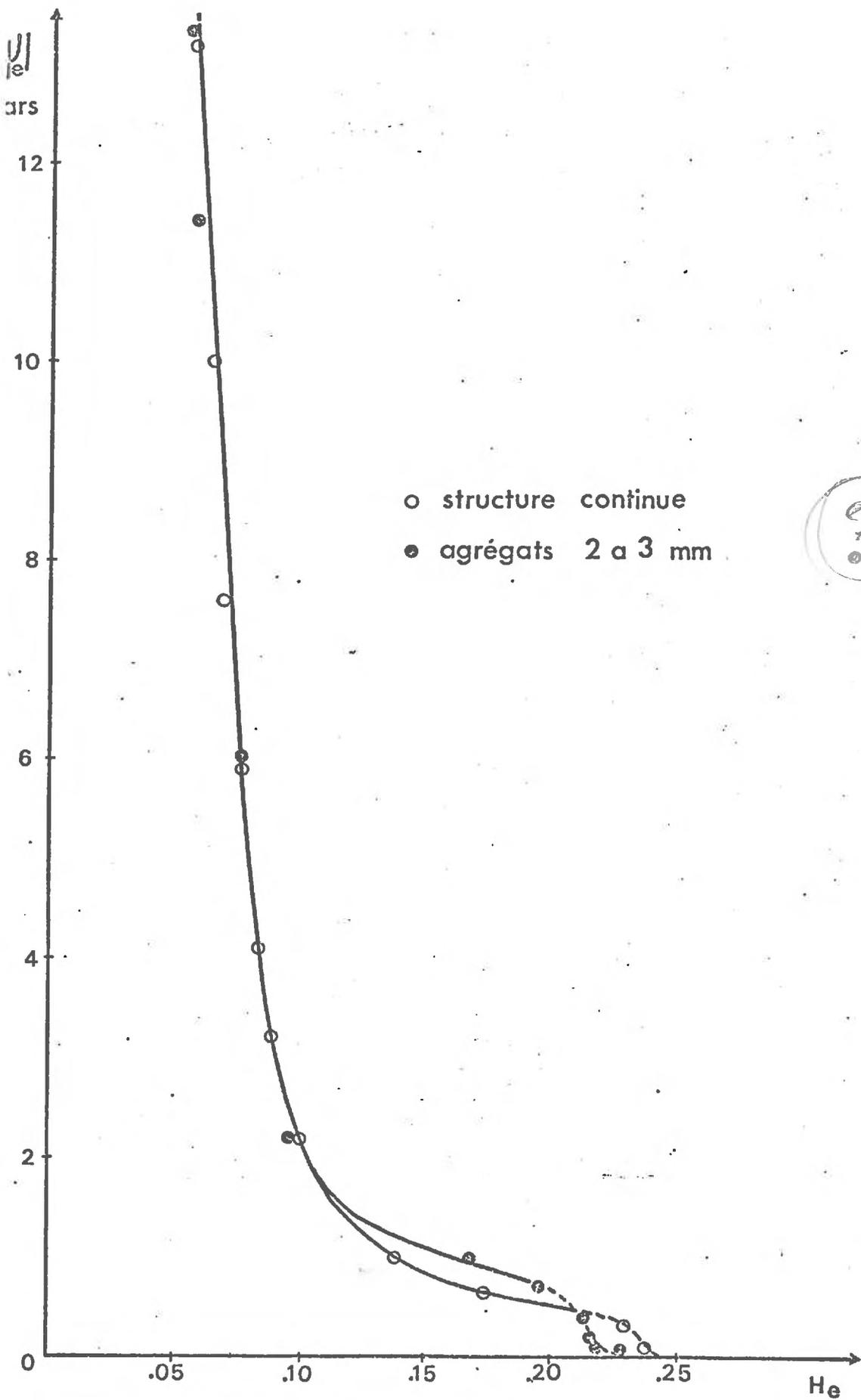
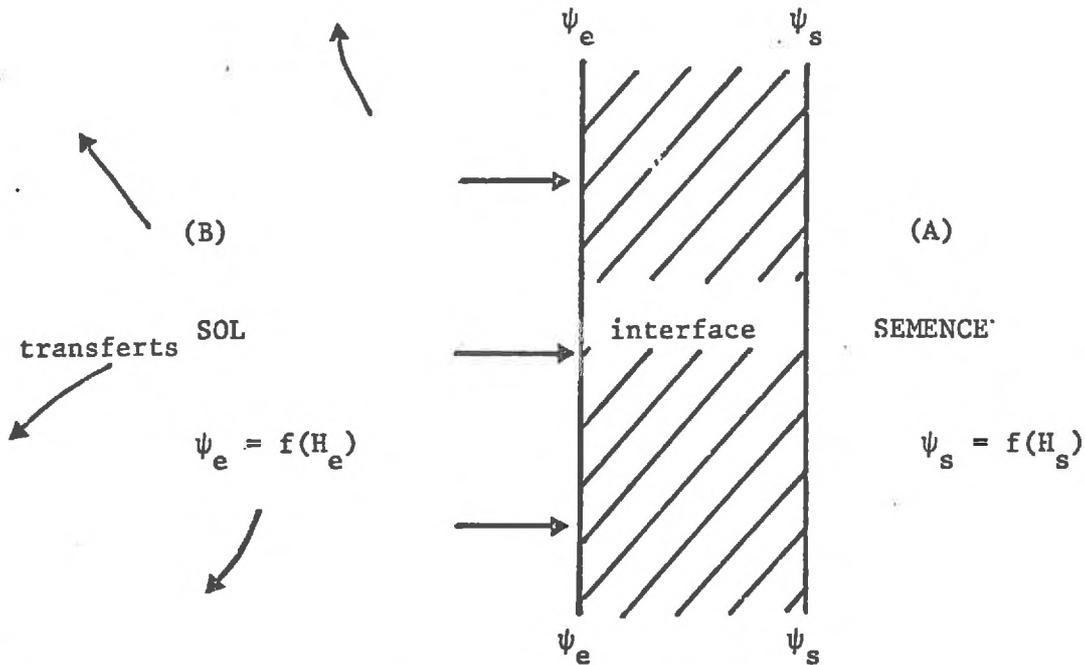


FIGURE 4 : Potentiel du sol en fonction de sa teneur en eau : Sol de Montluel - Mesures sur presse Richard.

Nous sommes donc ramenés à une situation schématisée par le schéma 3.

Schéma 3 : Schéma du "système sol-semence".



La partie (A) (semence) est définie par la fonction $\psi_s = f(H_s)$ et séparée de la partie (B) (sol), $\psi_e = f(H_e)$ par un interface dont nous ne pouvons donner dès à présent une représentation claire : cet interface se situe au noeud du problème de modélisation du système "sol-semence" que nous aurons à expliciter.

Notons enfin que, si pour la semence (A), il existe une relation globale $\psi_s = f(H_s)$, la valeur instantanée ψ_e est fonction d'une part des prélèvements de la semence, d'autre part de l'ensemble des mouvements de l'eau dans le compartiment (B) : ceux-ci seront directement fonction de la valeur $K_e(H_e)$.

Nous devons donc modéliser un système avec au moins deux impératifs :

- définir un interface sol-semence,
- prendre en compte le rôle de la fonction $K_e(H_e)$ puisqu'elle conditionnera la valeur ψ_e au contact de la semence.

C'est au travers de ces deux exigences que nous proposerons un modèle du système "terre-graine".

Tableau 5 : Domaines de germination possible ou impossible

$\psi_e^{(1)}$	< - 16 Bars	> - 16 Bars
$\psi_s^{(1)}$	< - 16 Bars	> - 16 Bars
H_e	< 0,055	0,055 < ψ_e < 0,246 *
H_s	< 0,26	> 0,26
Germination	Impossible	Possible

* saturation (point d'entrée d'air)

(1) nous réduisons ici l'intervalle (12 Bars, 16 Bars) à une valeur unique (16 Bars).

B. CHOIX D'UN MODÈLE DU SYSTÈME "TERRE-GRAINE".

Nous venons de spécifier deux exigences -au minimum- auxquelles doit répondre une modélisation du "système terre-graine". Rappelons que celle-ci sera nécessairement basée sur les lois de diffusion et que nous avons déjà défini des variables utilisables (Chapitre I).

Un premier contrôle qualitatif de la cohérence du modèle sera acquis si ce dernier n'aboutit pas à des contradictions avec les hypothèses fortes dégagées par les agronomes (Rôles du "contact terre-graine" et de l'humidité du lit de semence). Avant de définir ce modèle, nous proposons une revue synthétique des réponses déjà apportées à la modélisation du "système terre-graine".

I ANALYSE DES MODELES DU "SYSTEME TERRE-GRAINE".

1.1. Modèle de "diffusion interne" (modèle 1).

Il constitue la réponse modélisée la plus fréquente au problème posé (HADAS, 1970 ; SHAYKEWICH and WILLIAMS, 1971 ; PHILLIPS, 1968). Il est basé sur la résolution de l'équation générale de l'écoulement présentée précédemment ; pour des transferts selon un axe Oz, on écrira (Chapitre I) :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D(\theta) \cdot \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \quad , \text{ dans le cas où l'on néglige le terme}$$

de potentiel gravitationnel.

Si l'on schématise la semence par une sphère de rayon a , ayant un coefficient de diffusivité D , on peut écrire l'équation de l'écoulement en coordonnées sphériques sous la forme :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{D(\theta)}{r} \frac{\partial^2}{\partial r^2} (r\theta)$$

θ humidité volumique de la semence
 r distance du centre de la semence à un point quelconque de la sphère,
 $D(\theta)$ coefficient de diffusivité de la semence.

Remarquons que l'écriture d'un tel modèle consiste à se placer d'emblée "à l'intérieur de la semence", en posant des conditions initiales et aux limites bien définies :

- l'humidité initiale de la semence est homogène

$$\theta = \theta_0 \quad \text{à } t = 0, \quad 0 < r < a \quad (a = \text{rayon})$$

- la semence est placée instantanément au contact d'un milieu caractérisé par une humidité constante

$$\theta = \theta_f, \quad t > 0, \quad r = a$$

- la semence est un corps homogène et isotrope.

Les auteurs proposent une solution analytique de l'équation de diffusion : elle permet finalement de déterminer une fonction $D(\theta)$ ajustée aux mesures expérimentales d'imbibition des semences. Remarquons que ce terme D aura nécessairement le sens d'un coefficient d'ajustement moyen, compte tenu de l'hypothèse d'homogénéité et d'isotropie du volume de la semence.

Mais en posant l'existence d'une humidité constante au contact de la semence, ce modèle s'interdit de prendre en compte le caractère complexe et variable dans le temps du "système terre-graine" -dessèchement du lit de semences par exemple-.

Ainsi le domaine d'application de ce modèle se limite à l'estimation d'une fonction $D(\theta)$. On trouve, selon les semences, des valeurs de D allant de 10^{-3} à 10^{-9} cm^2/j (PHILLIPS, 1968). Cette variabilité du coefficient de diffusivité constitue un argument qui cautionne la mise en place d'une typologie des semences vis à vis de l'imbibition. Il s'agit donc bien d'un modèle de caractérisation des semences imbibées en phase liquide et non d'une modélisation du "système terre-graine" : c'est vers un modèle discontinu à deux compartiments qu'il semble plus efficace de s'orienter.

1.2. Modèle à deux compartiments (modèle 2).

On peut essayer de résoudre le problème physique de l'imbibition des semences en considérant le système "sol-semence" comme la superposition de deux couches (schéma 4).

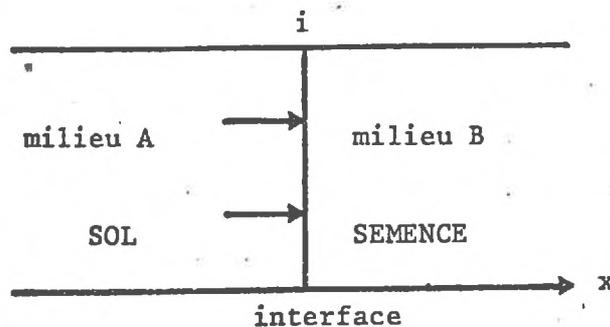


Schéma 4 : Schéma à 2 compartiments.

Considérons deux compartiments A et B, (A, sol ; B, semence) en contact au niveau d'un interface i .

Dans le milieu A, le flux q_A dirigé vers B s'écrit :

$$q_A = -K(\theta_A) \frac{\partial \psi_A}{\partial x} \quad \text{en négligeant le terme gravitationnel}$$

De même, dans le milieu B, le flux q_B reçu de A s'écrit :

$$q_B = -K(\theta_B) \frac{\partial \psi_B}{\partial x}$$

Puisque $q_A = q_B$, on écrira :

$$K(\theta_A) \frac{\partial \psi_A}{\partial x} = K(\theta_B) \frac{\partial \psi_B}{\partial x}$$

$$\text{ou} \quad D(\theta_A) \frac{\partial \theta_A}{\partial x} = D(\theta_B) \frac{\partial \theta_B}{\partial x} \quad (1)$$

Dans les milieux A et B, on aura simultanément, en appliquant l'équation de continuité :

$$\left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right)_A = \frac{\partial}{\partial x} \left(D(\theta_A) \frac{\partial \theta_A}{\partial x} \right) \quad \text{et} \quad \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right)_B = \frac{\partial}{\partial x} \left(D(\theta_B) \frac{\partial \theta_B}{\partial x} \right) \quad (2)$$

et à chaque instant, à l'interface i , $\psi_{iA} = \psi_{iB}$ (3)

Le principe de calcul à l'interface consisterait à résoudre les équations (2) et (3). Ce modèle se place à "l'intérieur" de chacun des compartiments "sol" et "semence". On peut même remarquer qu'il s'y place avec une égale précision (pour chaque compartiment, détermination d'un gradient de teneur en eau), alors que seule la teneur en eau globale de la semence nous intéresse. Outre les difficultés préliminaires de définition et de mesure des coefficients nécessaires (coefficients de diffusivité du sol et de la semence), un tel modèle pourra se heurter à la mise en oeuvre de contrôles expérimentaux opérés au niveau de petites couches de sol et de la semence. Pour éviter ces difficultés, c'est vers un troisième type de solution que nous nous orienterons.

2. Modèle à couche de transfert. Propositions pour une analyse du "système terre-graine" (modèle 3).

Rappelons succinctement les questions posées pour lesquelles un modèle doit proposer des réponses :

- nécessité d'une définition physique d'une interface "sol-semence",
- prise en compte du rôle de la conductivité à l'extérieur de la semence $K_e(H_e)$,

- en outre, le modèle proposé devra tenir compte de la définition globale du potentiel $\psi_s(H_s)$, c'est-à-dire relatif à tout le volume de la semence.

2.1. Explicitation du modèle envisagé.

Reportons-nous au schéma 5 : il 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 $\psi_e = f(\theta_e)$.

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 $\psi_s = f(\theta_s)$.

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

La première équation de diffusion écrite sous forme différentielle, selon la direction Ox des transferts (schéma 5) et au sein de cette couche poreuse fictive aura la forme :

$$q_x = -K(\theta_s) \frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (1) , \quad \frac{\partial \psi}{\partial x} \quad \text{gradient de potentiel existant au sein de la couche poreuse}$$

Pour une petite surface S , on peut expliciter q_x :

$$q_x = \frac{dV_x}{S dt} = -K(\theta_s) \frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (2) \quad \begin{array}{l} dV_x = \text{volume qui transite pendant} \\ \text{dt (L}^3\text{)} \\ S = \text{surface concernée par les} \\ \text{transferts (L}^2\text{)} \end{array}$$

Si on choisit un pas de temps Δt , pendant lequel le volume d'eau transféré de part et d'autre de la couche fictive 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 :

$$\frac{\Delta V}{S \Delta t} = -K(\theta_s) \frac{\Delta \psi}{\Delta x} \quad (3)$$

ou

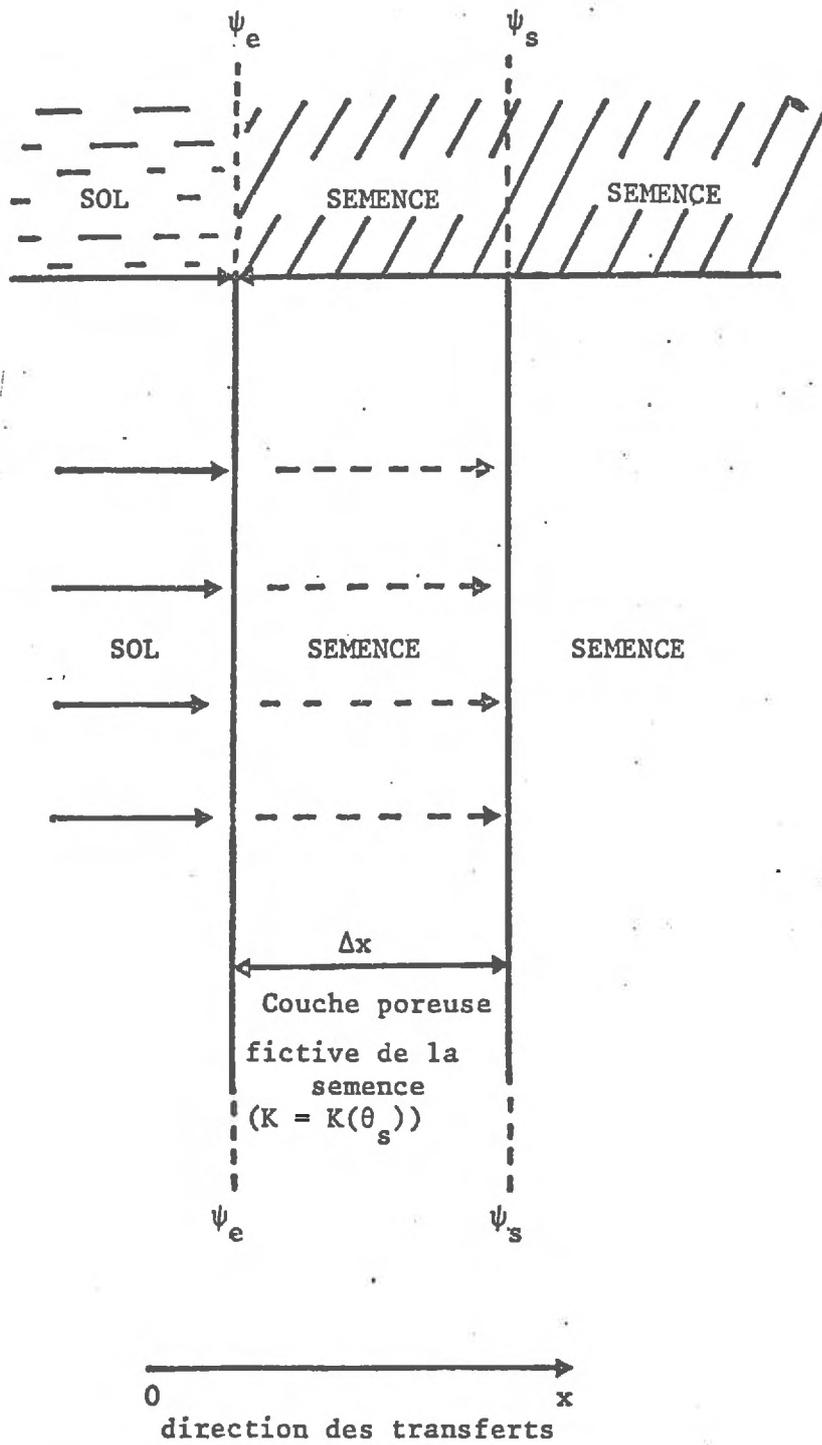
$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = -K(\theta_s) S \frac{\Delta \psi}{\Delta x} \quad (4)$$

ΔV volume d'eau transféré pendant le temps t

$K(\theta_s)$ conductivité de la couche poreuse, considérée constante sur l'intervalle de temps $(t, t + \Delta t)$ ou sur l'intervalle de temps en eau correspondant de la semence.

S surface relative aux transferts.

$\frac{\Delta \psi}{\Delta x}$ valeur approchée du gradient de potentiel réalisé entre t et $t + \Delta t$.



SCHEMA 5 : Modèle à couche de transfert.

En explicitant $\Delta\psi$, (4) s'écrit :

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = -K(\theta_s) \cdot S \frac{(\psi_s(\theta_s) - \psi_e(\theta_e))}{\Delta x} \quad (5)$$

Dans l'expression précédente, n'apparaît qu'un terme $K(\theta_s)$ relatif à la semence. Or, nous l'avons vu, on ne peut écarter d'emblée le rôle de la fonction $K(\theta_e)$ sur l'expression d'un flux d'eau vers la semence. Nous sommes donc amenés à envisager deux cas successifs.

1er 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, $\psi_e = 0$ et K_e tend vers l'infini.

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

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = -K(\theta_s) \cdot S \frac{(\psi_s - \psi_e)}{\Delta x} \quad (6)$$

ou

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{-K(\theta_s)}{\Delta x} \cdot S (\psi_s - \psi_e) \quad (7)$$

$$\text{Et en posant } \frac{K(\theta_s)}{\Delta x} = K'(\theta_s) \quad (8)$$

on obtient
$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = -K'(\theta_s) \cdot S \cdot (\psi_s - \psi_e) \quad (9)$$

$K'(\theta_s)$: coefficient d'ajustement fonction de l'humidité de la semence (T^{-1})

Ainsi la relation (9) exprime un flux d'eau vers la semence ($\Delta V/\Delta t$)

- en fonction de deux variables, la surface d'imbibition (S) d'une part, la différence de potentiel sol-semence ($\psi_s - \psi_e$) d'autre part
- en fonction d'un coefficient d'ajustement $K'(\theta_s)$, rapport de deux grandeurs ($K(\theta_s)$ et Δx).

Nous pouvons dès maintenant faire ici 3 remarques :

- Il est parfaitement possible de relier les variables citées plus haut ("contact terre-graine" et humidité du lit de semences) à celles de la relation (9). Tout se passe en effet comme si le "contact terre-graine" constituait une retraduction globale de la variable S et l'humidité du lit de semences celle de la variable $(\psi_s - \psi_e)$. Par exemple, si $S \rightarrow 0$ (contact défavorable), on obtient $\frac{\Delta V}{\Delta t} \rightarrow 0$ et la semence ne s'humecte pas : a fortiori, elle ne germe pas.

- La comparaison des modèles 1 et 3 montre qu'ils aboutissent toujours à l'estimation d'un paramètre (K' ou D), définissant plus ou moins les propriétés conductrices de la semence.

- Enfin, 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.

2ème 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 deux phénomènes. La relation (9) ne faisant pas explicitement apparaître le terme K_e , on se propose de traduire tout rôle limitant de K_e 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_e ou par réduction du terme S. Si la conductivité K_e est limitante, nous sommes donc conduits 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_e est non-limitante ; ainsi tout caractère limitant de K_e sera "reporté" sur la variable S.

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

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = -K'(\theta_s) \cdot S \cdot (\psi_s - \psi_e) \quad (10)$$

S "surface équivalente" d'imbibition

$K'(\theta_s)$ coefficient d'ajustement fonction de l'humidité de la semence
(défini précédemment)

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

Nous nous proposons de justifier ici l'introduction de ce concept de "surface équivalente".

2.2. Justification du concept de "surface équivalente."

Nous pouvons justifier l'introduction du concept de "surface équivalente" en développant deux idées :

2.2.1. L'équivalence introduite entre une diminution de K_e et une diminution de S n'a, a priori, rien d'illusoire.

En effet, si on place une semence dans un volume d'eau,

$\theta_e = 1$, $K_e \rightarrow \infty$, et $S =$ surface totale de la semence.

Si on place une semence dans un sol dont on fait tendre l'humidité vers 0,

$\theta_e \rightarrow 0$, $K_e \rightarrow 0$, et $S \rightarrow 0$

Entre ces deux seuils extrêmes, on peut postuler l'existence d'une fonction continue $S = f(K_e)$. En fait, les variations simultanées de S et de K_e ont une origine unique, à savoir, les variations de θ_e (ou de ψ_e)

2.2.2. Un calcul d'ordre de grandeur peut nous permettre de préciser les termes "limitant" et "non limitant" relatifs à K_e , ainsi que les domaines respectifs de chacun des cas.

Nous nous proposons donc d'estimer la fonction $K_e(H_e)$ pour approcher par un calcul d'ordre de grandeur, le rôle de $K_e(H_e)$ sur les transferts d'eau vers la semence. L'annexe 3 développe le principe d'estimation de $K_e(H_e)$ et les résultats sont donnés par le tableau 6 (CAMPBELL, 1973).

Le calcul d'ordre de grandeur des transferts d'eau vers la semence est construit de la façon suivante :

Considérons la surface de la semence développée sur un plan (schéma 6) et surmontée d'une couche de sol d'égale surface et d'épaisseur $L = 1$ cm (ordre de grandeur des distances des transferts vers la semence) (DASBERG, 1971).

Soit A un point de contact de la semence avec le sol (ψ_A, K_A) et B un point du sol à 1 cm de A (ψ_B, K_B). Au départ (avant imbibition), le milieu extérieur à la semence est homogène ($\psi_A = \psi_B, K_A = K_B$). Au cours de l'imbibition, le flux d'eau q_{AB} vers la semence s'écrira :

$$q_{AB} = -\overline{K_{AB}} \frac{(\psi_A - \psi_B)}{L} \quad (11)$$

$\overline{K_{AB}}$, conductivité moyenne définie sur la distance AB.

K_A est un bon estimateur de $\overline{K_{AB}}$ si les gradients hydriques selon AB sont faibles et on pourra écrire :

$$q_{AB} \approx -K_A \left(\frac{\psi_A - \psi_B}{L} \right) \quad (12)$$

ou

$$-\left(\frac{\psi_A - \psi_B}{L} \right) \approx \frac{q_{AB}}{K_A} \quad (13)$$

H_e	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,22	0,24
K_e (cm/sec)	$6,7 \cdot 10^{-15}$	$1,6 \cdot 10^{-12}$	$4,1 \cdot 10^{-11}$	$4,0 \cdot 10^{-10}$	$2,4 \cdot 10^{-9}$	$1,0 \cdot 10^{-8}$	$3,4 \cdot 10^{-8}$	$9,9 \cdot 10^{-8}$	$2,5 \cdot 10^{-7}$	$5,8 \cdot 10^{-7}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$2,5 \cdot 10^{-6}$

Tableau 6 : Valeurs de $K_e = f(H_e)$

SEMENCE ENROBEE
DANS UNE STRUCTURE
CONTINUE

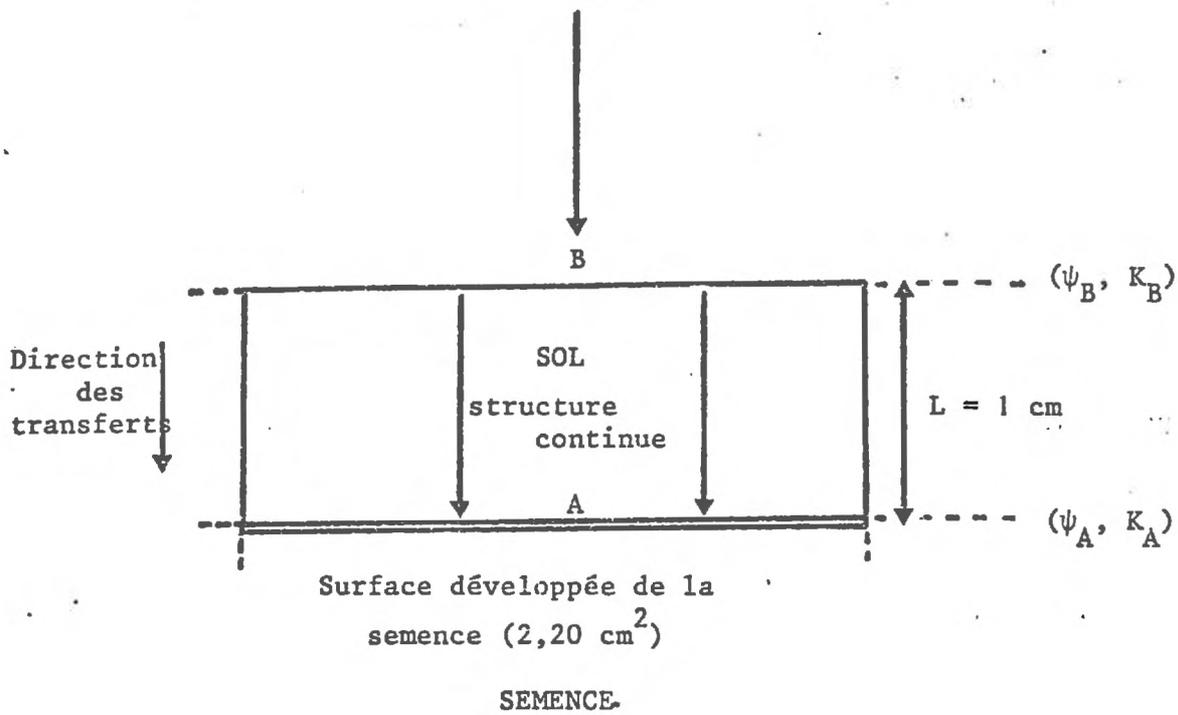


Schéma 6 : Transferts d'eau vers la semence.
Calcul d'ordres de grandeur.

Pour un flux maximal q_{AB} (quantité maximale d'eau que peut prélever la semence) et une valeur K_A caractéristique des conditions initiales d'imbibition, on peut calculer $(\frac{\psi_A - \psi_B}{L})$, c'est-à-dire le gradient de potentiel nécessaire pour assurer le transfert q_{AB} en phase liquide.

Ce dernier terme sera convertible en gradient hydrique autour de la semence. Ce calcul suppose que l'on puisse effectivement réaliser un "contact parfait sol-semence" ce qui sera impossible pour de très faibles valeurs de H_e (cf. p. 61)

Le tableau 7 présente les résultats issus de la relation (13) (détermination de gradients hydriques autour de la semence pour différentes conditions initiales d'imbibition).

Pour la clarté de l'analyse du calcul d'ordre de grandeur, on peut fractionner l'ensemble du domaine des teneurs en eau du sol (H_e) en classes correspondant à des cas contrastés d'imbibition (tableau 7).

● Cas des "fortes humidités" ($H_e \geq 0,10$, $|\psi_e| \leq 2,5$ Bars)

Les gradients de potentiels nécessaires pour assurer un débit maximal q_{AB} sont très faibles, et corrélativement, définissent des gradients hydriques généralement ^{no revealable} indécélablés par des techniques de mesure de teneur en eau non destructives telles que l'atténuation γ (1).

Dans ce domaine de potentiels de l'eau du sol, on peut donc schématiser l'ensemble de l'imbibition comme un transfert d'eau nécessitant un faible gradient, dans un milieu aux caractéristiques hydrodynamiques sensiblement constantes et non limitantes. Le terme S a donc ici le sens d'une surface réelle d'imbibition.

(Notons en outre que les semences de maïs germent dans ce domaine :

$$|\psi_e| < 16 \text{ Bars}$$

● Cas des "humidités moyennes" ($0,06 \leq H_e \leq 0,10$;
2,5 $|\psi_e| < 11,4$ Bars)

Les gradients hydriques et les gradients de potentiel à développer autour de la semence augmentent rapidement. Les gradients de teneur en eau

(1) Cette technique sera présentée dans la troisième partie.

Tableau 7 : Estimation des gradients hydriques autour de la semence (Sol de Montluel)

Humidité initiale (H_A)	0,040	0,060	0,080	0,100	0,120	0,140	0,160	0,180	0,200	0,220	0,240
Potentiel initial (ψ_A , Bars)	37,9	11,4	4,8	2,5	1,4	0,9	0,6	0,4	0,3	0,2	0,2
Conductivité initiale (K_A , cm/sec)	$1,6 \cdot 10^{-12}$	$4,1 \cdot 10^{-11}$	$4,0 \cdot 10^{-10}$	$2,4 \cdot 10^{-9}$	$1,0 \cdot 10^{-8}$	$3,4 \cdot 10^{-8}$	$9,8 \cdot 10^{-8}$	$2,5 \cdot 10^{-7}$	$5,8 \cdot 10^{-7}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$2,5 \cdot 10^{-6}$
$\psi_A - \psi_B$ (1) (Bars)	758	30,3	3,1	0,5	0,1	0,04	0,01	ϵ	ϵ	ϵ	ϵ
Humidité en B (1) (H_B)	0,014	0,039	0,067	0,094	0,117	0,138	0,159	0,179	0,199	0,219	0,240
$\dot{\psi}_A - \psi_B$ (2) (Bars)	1516	60,6	6,2	1,0	0,2	0,07	0,02	0,01	ϵ	ϵ	ϵ
Humidité en B (2) (H_B)	0,011	0,032	0,061	0,089	0,114	0,136	0,158	0,179	0,199	0,219	0,240

(1) $q_{AB} = 10$ mg/h/semence

(2) $q_{AB} = 20$ mg/h/semence

Remarques : 1) Tous les potentiels sont exprimés en valeur absolue

2) Les valeurs q_{AB} choisies proviennent de données expérimentales.

deviennent décelables, bien que restant encore faibles en valeur absolue. Si les gradients hydriques nécessaires ne sont pas atteints, le milieu extérieur à la semence est limitant et la notion de surface équivalente introduite précédemment prendra alors tout son intérêt. (Ici encore, la germination est possible).

● Cas des "faibles humidités" ($H_e < 0,06$, $|\psi_e| > 11,4$ Bars)

Les forts gradients hydriques indiquent a posteriori que ce domaine correspond probablement au cas où le calcul est le moins légitime puisque K_A devient un mauvais estimateur de K_{AB} .

Cependant, le calcul fait apparaître de très forts gradients de potentiels et de teneurs en eau, pratiquement irréalisables en un temps court (on a choisi un pas de temps de 1 heure) sur la seule base d'écoulements liquides.

D'autre part, c'est dans ce domaine qu'un bon "contact terre-graine" est extrêmement difficile à réaliser (milieu "sec")

Ces deux données -importance des gradients hydriques à réaliser en phase liquide, "contact terre-graine" défavorable- apparaissent très importantes. S'il est clair que la semence peut parfaitement s'humecter en phase gazeuse -c'est sur cette base que nous avons déterminé la fonction $\psi_s(H_s)$, Chap. II A- nous avons jusqu'à présent priviliégié les transferts en phase liquide et ce choix nous a permis de préciser un interface "sol-semence". Dans un grand nombre de cas -"fortes ou moyennes" humidités-, il semble que la réalisation d'un flux d'eau liquide maximal vers la semence ne nécessite que des gradients hydriques faibles ou modérés. On peut donc concevoir que pour de telles situations initiales, la majeure partie des transferts s'effectuent en phase liquide.

Mais c'est précisément dans le cas des "faibles humidités" que les transferts semblent irréalisables sur la seule base de déplacements liquides. Ces données suggèrent donc d'introduire maintenant un modèle d'humectation en phase gazeuse, si l'on veut rendre compte ultérieurement des cas d'imbibition dans des lits de semences plus ou moins desséchés.

Ainsi, après avoir présenté un modèle d'imbibition en phase liquide -dans l'esprit des agronomes, le contact "terre-graine" renvoie d'ailleurs exclusivement à des transferts liquides- et justifié le concept de "surface équivalente", nous nous proposons de compléter le modèle synthétisé par la relation (10).

2.3. Prise en compte des transferts en phase gazeuse vers la semence

Il n'y a pas d'incompatibilité entre la modélisation proposée jusqu'à présent (modèle 3) et l'introduction de transferts en phase vapeur à partir du moment où le terme S est fractionné en deux composantes, une surface d'imbibition en phase liquide (S_l) et une surface d'imbibition en phase gazeuse (S_v).

$$S_t = S_l + S_v \quad (14)$$

S_t surface totale

L'apport d'un terme supplémentaire se fera donc comme précédemment, sur la base des lois qui régissent les transferts en phase gazeuse, en tenant compte du schéma précédemment représenté (schéma 5) et de la relation (14). (Dorénavant, l'indice "l" sera relatif aux transferts liquides, l'indice "v" aux transferts gazeux).

Rappelons l'expression d'un flux de vapeur d'eau défini par un gradient de pression partielle $\frac{\partial p}{\partial x}$

$$q_x = - \frac{1}{\rho_w} \frac{DM}{RT} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (15)$$

D coefficient de diffusion de la vapeur d'eau dans le milieu considéré
($L^2 T^{-1}$)

q_x flux selon Ox (LT^{-1})

En écrivant l'expression (15) en termes finis et en l'appliquant au modèle de "système terre-graine" proposé, nous ferons apparaître les termes suivants :

ΔV_v volume d'eau qui transite en phase vapeur pendant Δt de part et d'autre de la couche poreuse d'épaisseur Δx

S_v surface concernée par les transferts en phase vapeur.

$D(\theta_s)$ coefficient de diffusion de la vapeur d'eau dans la couche poreuse fictive d'épaisseur Δx .

p_e pression partielle de la vapeur d'eau sur la face externe de la couche poreuse

p_s pression partielle de la vapeur d'eau sur la face interne de la couche poreuse. (1)

L'équation (15) s'écrira alors :

$$\frac{\Delta V_v}{S_v \Delta t} = - \frac{1}{\rho_w} D(\theta_s) \frac{M}{RT} \frac{(p_s - p_e)}{\Delta x} \quad (16)$$

soit

$$\frac{\Delta V_v}{\Delta t} = - \frac{M}{\rho_w RT} S_v \frac{D(\theta_s)}{\Delta x} \cdot (p_s - p_e) \quad (17)$$

En posant

$$\frac{D(\theta_s)}{\Delta x} = D'(\theta_s) \quad (18)$$

on écrira :

$$\frac{\Delta V_v}{\Delta t} = - \frac{M}{\rho_w RT} S_v \cdot D'(\theta_s) \cdot (p_s - p_e) \quad (19)$$

Comme dans le cas des transferts liquides, nous exprimons une quantité d'eau absorbée par la semence en fonction de ses propriétés (terme $D'(\theta_s)$). Tout se passe donc comme si l'on considérait le coefficient de diffusion de la vapeur d'eau dans le milieu extérieur comme non limitant. Cette hypothèse sera vérifiée lors de l'estimation du coefficient d'ajustement $D'(\theta_s)$, sans quoi cette détermination n'aurait aucun sens. (2)

On définit donc deux expressions analogues, aux différences finies, en phase liquide et en phase vapeur. Elles introduisent respectivement deux coefficients d'ajustement $K'(\theta_s)$ et $D'(\theta_s)$, ainsi que les variables S , $\Delta\psi$, Δp avec

$$S = S_l + S_v$$

$$\Delta\psi = \psi_s - \psi_e$$

$$\Delta p = p_s - p_e$$

Rappelons par la relation (20) l'équivalence entre les termes Δp et $\Delta\psi$:

(1) Il s'agit d'une pression partielle introduite par analogie avec ψ_s .

(2) cf. page 45.

$$\psi = - \frac{Mg}{RT} \ln \left(\frac{p}{p_0} \right) \quad (20) \quad \text{et en écrivant } \frac{p}{p_0} = \text{Hr} \quad (21)$$

(Hr, humidité relative)

il vient :

$$\psi = - \frac{Mg}{RT} \ln (\text{Hr}) \quad (22)$$

Dans le cas d'une imbibition uniquement en phase vapeur, on aura :

$$\frac{\Delta v_v}{\Delta t} = - \frac{M}{\rho_w RT} \cdot S_v \cdot D'(\theta_s) (p_s - p_e)$$

$$\text{ou } \frac{\Delta v_v}{\Delta t} = \frac{M}{\rho_w RT} S_v D'(\theta_s) (p_e - p_s) \quad (23)$$

$$\text{avec } \text{Hr}_s = \frac{p_s}{p_0} \quad (24) \quad \text{et } \text{Hr}_e = \frac{p_e}{p_0} \quad (25)$$

$$\text{d'après (24) et (25), } p_e - p_s = p_0 \text{Hr}_e - p_0 \text{Hr}_s = p_0 (\text{Hr}_e - \text{Hr}_s) \quad (26)$$

Si la pression de vapeur à l'extérieur de la semence est saturante,

$$\text{Hr}_e = 1$$

$$\text{et la relation (26) s'écrit : } p_e - p_s = p_0 (1 - \text{Hr}_s) \quad (27)$$

Dans de nombreux cas, nous pourrions faire l'approximation $\text{Hr}_e = 1$ et le flux $(\Delta v_v / \Delta t)$ sera donc directement proportionnel à $(1 - \text{Hr}_s)$ (Relations (23) et (27)). C'est cette fonction $(1 - \text{Hr}_s) = f(\text{H}_s)$, issue de la relation $\psi_s = f(\text{H}_s)$, que représente la figure 5. (Dans le cas où $\psi_s \rightarrow 0$, $\text{Hr}_s \rightarrow 1$ d'après (22), et $(1 - \text{Hr}_s) \rightarrow 0$: le gradient de pression partielle de vapeur d'eau est bien nul et il n'y a pas d'imbibition quelle que soit la phase).

2.4. Combinaison des transferts liquides et gazeux.

2.4.1. Ecriture en termes de débit.

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

$$\left(\frac{\Delta V}{\Delta t}\right)_t = \left(\frac{\Delta V}{\Delta t}\right)_l + \left(\frac{\Delta V}{\Delta t}\right)_v \quad (28)$$

En explicitant chaque composante, on écrira :

$$\left(\frac{\Delta V}{\Delta t}\right)_t = -K'(\theta_s) \cdot S_l \cdot (\psi_s - \psi_e) - \frac{M}{\rho_w RT} \cdot D'(\theta_s) \cdot S_v \cdot (p_s - p_e) \quad (29)$$

2.4.2. Ecriture en termes d'humidité de la semence (H_s).

Soit m_s la masse d'une semence au moment de la mise en imbibition.
Soit H_s la teneur en eau massique d'une semence lorsqu'elle a absorbé une masse d'eau m_w

$$\text{Par définition, } H_s = \frac{m_w}{m_s} \quad (30)$$

Si ρ_w et ρ_s représentent respectivement les masses volumiques de l'eau et de la semence sèche, on aura par définition :

$$m_w = \rho_w V_w \quad (31)$$

$$m_s = \rho_s V_s \quad (32)$$

V_s volume de la semence sèche

V_w volume d'eau absorbé

$$\text{En combinant (30), (31), (32), il vient : } H_s = \frac{\rho_w}{\rho_s V_s} \cdot V_w \quad (33)$$

Enfin, en combinant (29) et (33), nous écrivons :

$$\left(\frac{\Delta H_s}{\Delta t}\right)_t = \frac{-\rho_w}{\rho_s V_s} K'(\theta_s) S_l (\psi_s - \psi_e) - \frac{M}{\rho_s V_s RT} D'(\theta_s) S_v (p_s - p_e) \quad (34)$$

$$\text{en posant : } \alpha_l = \frac{\rho_w}{\rho_s V_s} = \text{cte} \quad (35) \quad \text{et} \quad \alpha_v = \frac{M}{\rho_s V_s RT} = \text{cte} \quad (36)$$

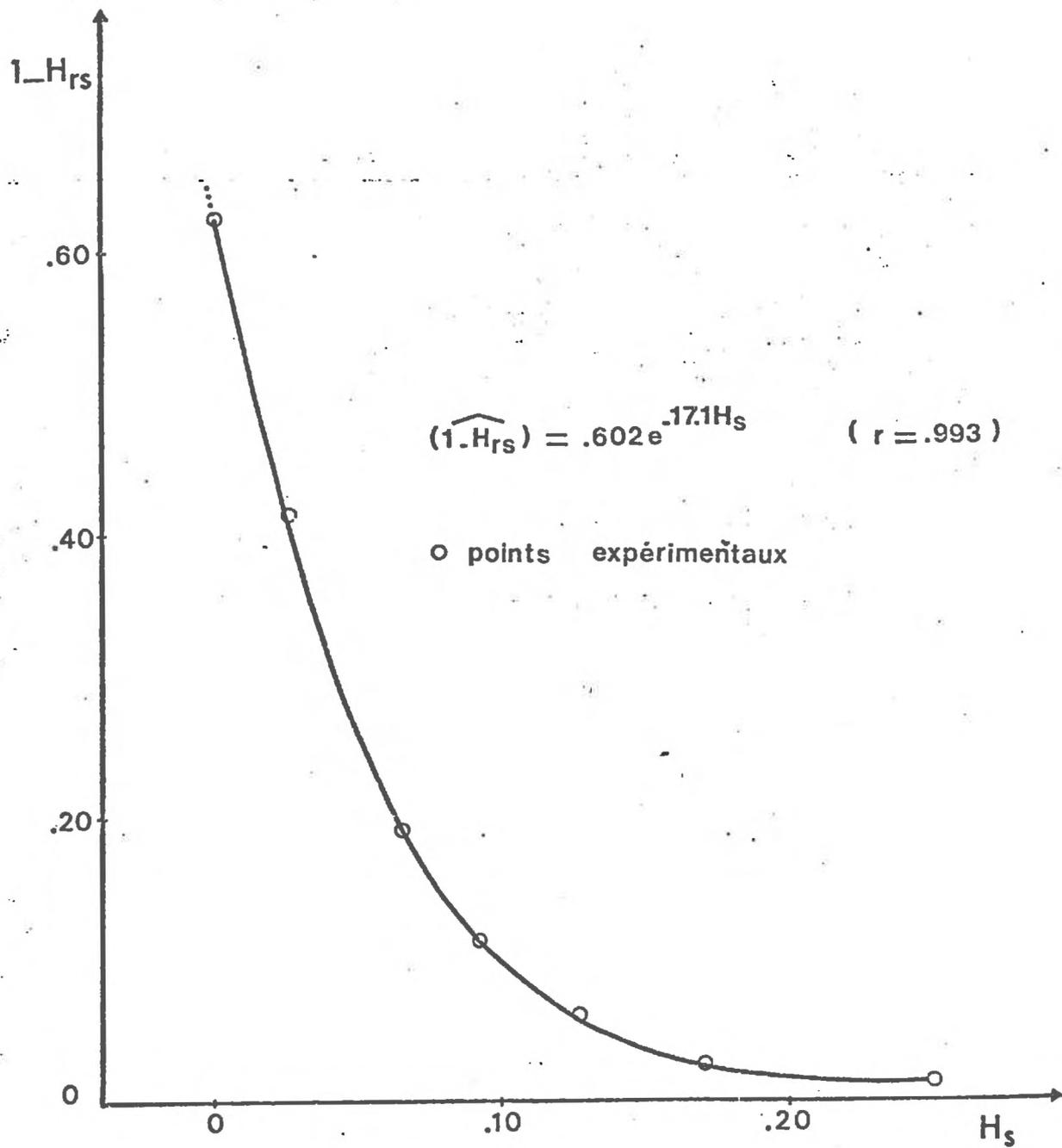


FIGURE 5 : Différence entre l'humidité relative d'une vapeur saturante et l'humidité relative équivalente de la semence ($1 - H_{rs}$) en fonction de l'humidité de la semence (H_s)
 $(\sigma_{H_s} \leq 0,005)$

On écrira sous forme simplifiée :

$$\left(\frac{\Delta H_s}{\Delta t} \right)_t = - \alpha_l K'(\theta_s) S_l (\psi_s - \psi_e) - \alpha_v D'(\theta_s) S_v (p_s - p_e) \quad (37)$$

La relation (37) condense ainsi l'ensemble de la modélisation proposée.

2.5. Conclusion partielle relative au modèle proposé (modèle 3).

Après avoir mis au jour les exigences que devait remplir le choix d'un modèle, nous avons rapidement analysé deux modélisations possibles du "système terre-graine" (modèles 1 et 2). Leur caractère incomplet ou leur difficulté de mise en oeuvre nous ont orienté vers un troisième modèle (modèle à couche de transfert). En introduisant une couche poreuse fictive, nous avons pu traiter le problème à partir des lois de diffusion, de façon analogue aux transferts d'eau dans un volume de matériau donné.

L'analyse nous a conduit à tenir compte du caractère limitant ou non de la conductivité à l'extérieur de la semence et à introduire le concept de "surface équivalente". Nous avons justifié ce choix, et nous l'avons spécifié, notamment par un calcul d'ordre de grandeur qui nous a aussi suggéré le poids prépondérant des transferts gazeux dans le cas de sols très secs. En traitant les transferts gazeux de façon analogue aux transferts liquides, nous avons finalement proposé une combinaison additive de ces deux types de transferts (équation (37)).

La forme du modèle définit deux coefficients d'ajustements ($K'(H_s)$ et $D'(H_s)$), définis seulement par leurs dimensions et fonctions uniquement de la teneur en eau de la semence (H_s), et deux variables explicatives (surface, différence de potentiel "sol-semence").

Avant même de tester par voie expérimentale le poids exact de chacune de ces deux variables, nous nous proposons d'estimer les deux paramètres utiles du modèle.

C. ESTIMATION DES PARAMÈTRES DU MODÈLE.

Nous venons de définir deux paramètres, l'un strictement relatif aux transferts liquides, l'autre aux transferts gazeux. Il est clair que nous séparerons les deux types de conditions expérimentales correspondants afin de déterminer indépendamment chacun de ces deux paramètres.

I ESTIMATION DU COEFFICIENT $K'(H_s)$.

Nous nous plaçons ici dans le cas d'une imbibition en phase liquide pour lequel on peut écrire :

$$\frac{\Delta H_s}{\Delta t} = -\alpha_1 K'(H_s) S_1 (\psi_s - \psi_e) \quad (1)$$

ou

$$\frac{dH_s}{dt} = -\alpha_1 K'(H_s) S_1 (\psi_s(H_s) - \psi_e(H_e)) \quad (2)$$

Si on imbibe la semence dans un volume d'eau (immersion totale),⁽¹⁾ alors,

$$\begin{cases} \psi_e(H_e) = 0 & , & K_e(H_e) \rightarrow \infty \\ S_1 = S_t & \text{avec } S_t, \text{ surface totale de la semence} \end{cases}$$

L'expression (2) devient :

$$\frac{dH_s}{dt} = -\alpha_1 K'(H_s) S_t \psi_s(H_s) \quad (3)$$

La fonction $\psi_s(H_s)$ étant déterminée, la relation (3) est intégrable si :

- d'une part, la valeur S_t est connue,
- d'autre part, la fonction $K'(H_s)$ a une forme analytique explicitée.

L'intégration permettrait alors d'obtenir une expression " H_s calculée", à partir de laquelle les valeurs " H_s mesurées" rendent l'estimation de $K'(H_s)$ possible.

(1) Les résultats d'une telle manipulation sont données dans le tableau (9).
Les semences sont juste recouvertes d'une lame d'eau.

1.1. Estimation de la surface de la semence.

Le semence ne présentant pas de centre de symétrie, il faut, pour déterminer S_t , résoudre les deux problèmes suivants :

- choisir un modèle simulant la forme de la semence,
- tenir compte éventuellement du gonflement de la semence induisant des variations de S_t .

Le tableau 8 donne les estimations de surface de la semence pour trois modèles géométriques de semences (le volume moyen d'une semence est égal à 240 mm^3 . Voir tableau 8, page suivante).

La forme sphérique correspondant à une surface minimale, nous avons choisi pour valeur moyenne de S_t à la mise en imbibition, $S_t = 220 \text{ mm}^2$, correspondant à une forme pratiquement cylindrique.

Le gonflement des semences a été abordé par voie expérimentale -détermination du volume des semences après immersion puis pesée dans le pétrole- et permet d'aboutir aux conclusions suivantes :

- La densité des semences à la conservation étant pratiquement constante (cf. figure 6, $\rho_s = 1,373$) la connaissance du poids des semences suffit à la détermination de leur volume à la mise en imbibition.

- Tout accroissement m_w de la masse d'eau contenue dans la semence (Δm_w en mg, $\rho_w = 1$.) correspond pratiquement à un accroissement $\Delta V = \frac{1}{\rho_w} \Delta m_w$ (ΔV en mm^3) du volume de la semence. La liaison obtenue, issue des données de la figure 7, est de la forme :

$$\Delta V = 0,97 \frac{\Delta m}{\rho_w} + 6,6 \quad r = 0,985 \quad \begin{array}{l} \Delta V \text{ en } \text{mm}^3 \\ \Delta m \text{ en mg} \end{array}$$

Nous pouvons utiliser les informations relatives au gonflement de la semence pour en déduire les variations de sa surface: Assimilons la semence à une sphère (le modèle géométrique présenté n'est pas sphérique, mais l'erreur introduite par cette simplification est négligeable), de rayon r_0 , volume V_0 , surface S_0 à la mise en imbibition.

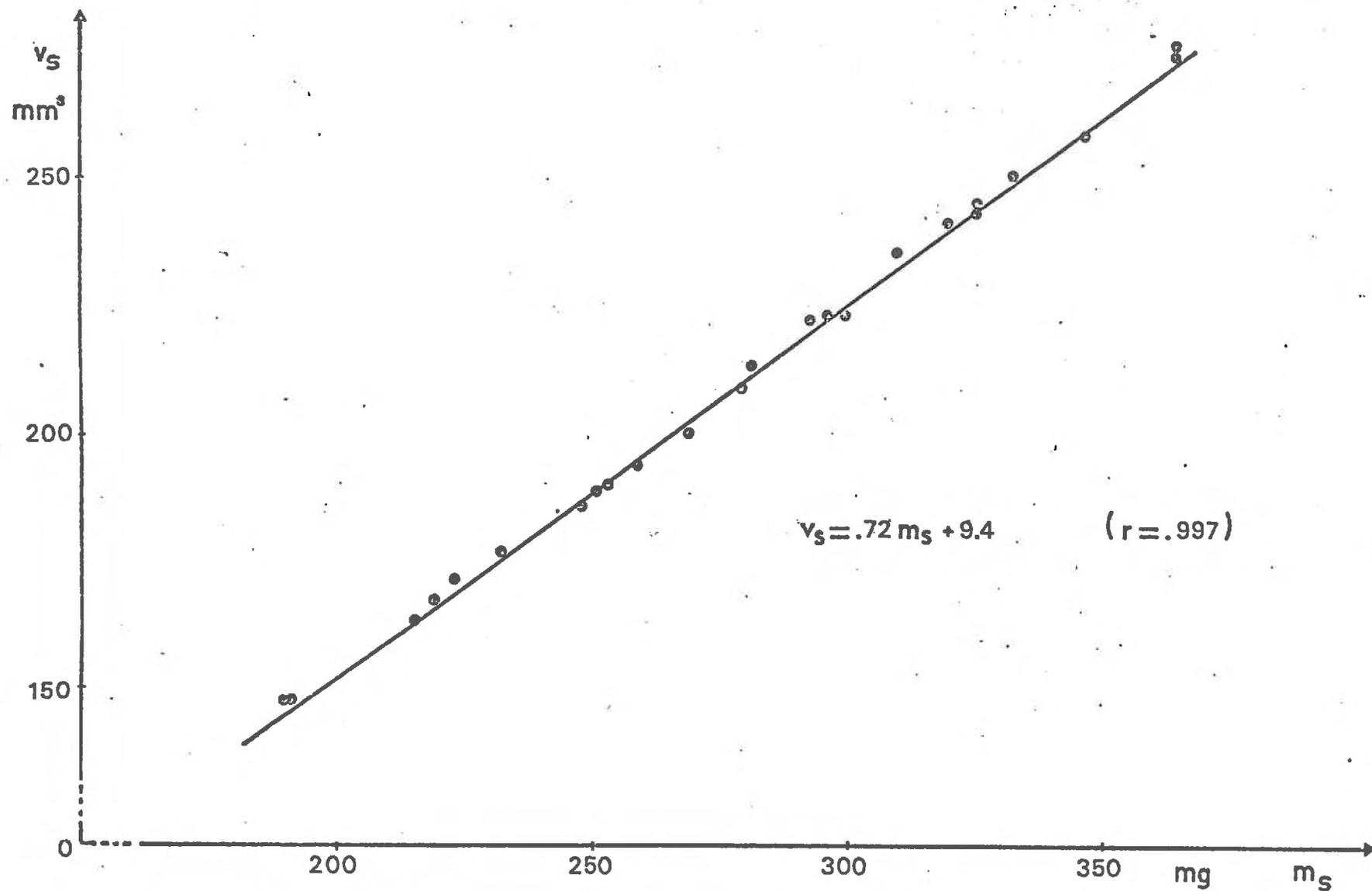


FIGURE 6 : Volume de la semence à la conservation en fonction de sa masse (n = 24)

Pour un accroissement de volume égal à dV_o , on obtient :

$$V_o + dV_o = \frac{4\pi}{3} (r_o + dr_o)^3 \quad (4)$$

$$\text{d'où : } r_o + dr_o = \left[\frac{3}{4\pi} (V_o + dV_o) \right]^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

$$\text{et } S_o + dS_o = 4\pi \left[\left(\frac{3}{4\pi} (V_o + dV_o) \right)^{\frac{1}{3}} \right]^2 \quad (6)$$

$$\text{ou } S_o + dS_o = (4\pi)^{\frac{1}{3}} \left[3(V_o + dV_o) \right]^{\frac{2}{3}} \quad (7)$$

$$\text{or } dV_o = \frac{1}{\rho_w} dm_w \quad (8) \quad \text{et } m_w = m_s H_s \quad (9)$$

$$m_w = \rho_s V_o H_s \quad (10)$$

$$dm_w = \rho_s V_o dH_s \quad (11)$$

D'après (8) et (11) ,

$$dV_o = \frac{\rho_s}{\rho_w} V_o dH_s \quad (12)$$

$$\text{et } S_o + dS_o = (4\pi)^{\frac{1}{3}} \left[3 \left(V_o + \frac{\rho_s}{\rho_w} V_o dH_s \right) \right]^{\frac{2}{3}} \quad (13)$$

$$\text{ou } S_o + dS_o = S_o \left(1 + \frac{dS_o}{S_o} \right) = S_o i = (4\pi)^{\frac{1}{3}} \left[3 \left(V_o + \frac{\rho_s}{\rho_w} V_o dH_s \right) \right]^{\frac{2}{3}} \quad (14)$$

Nous appellerons le terme "i" relatif aux variations de surface d'imbibition ($i = 1 + \frac{dS_o}{S_o}$, $i \geq 1$) "l'indice de gonflement" des semences. L'application numérique montre que cet indice varie de 1,00 à 1,25 lorsque H_s varie de 0 à 0,30. L'effet du gonflement sur les variations de surface n'est donc pas à négliger, et nous écrirons dorénavant :

$$S_t = S_o + dS_o = S_o \left(1 + \frac{dS_o}{S_o} \right) = i S_o \quad (15)$$

Forme de la semence	Sphère	Cylindre	Parallélépipède
S_t (mm ²)	187	219	234

Tableau 8 : Estimation de la surface de la semence.

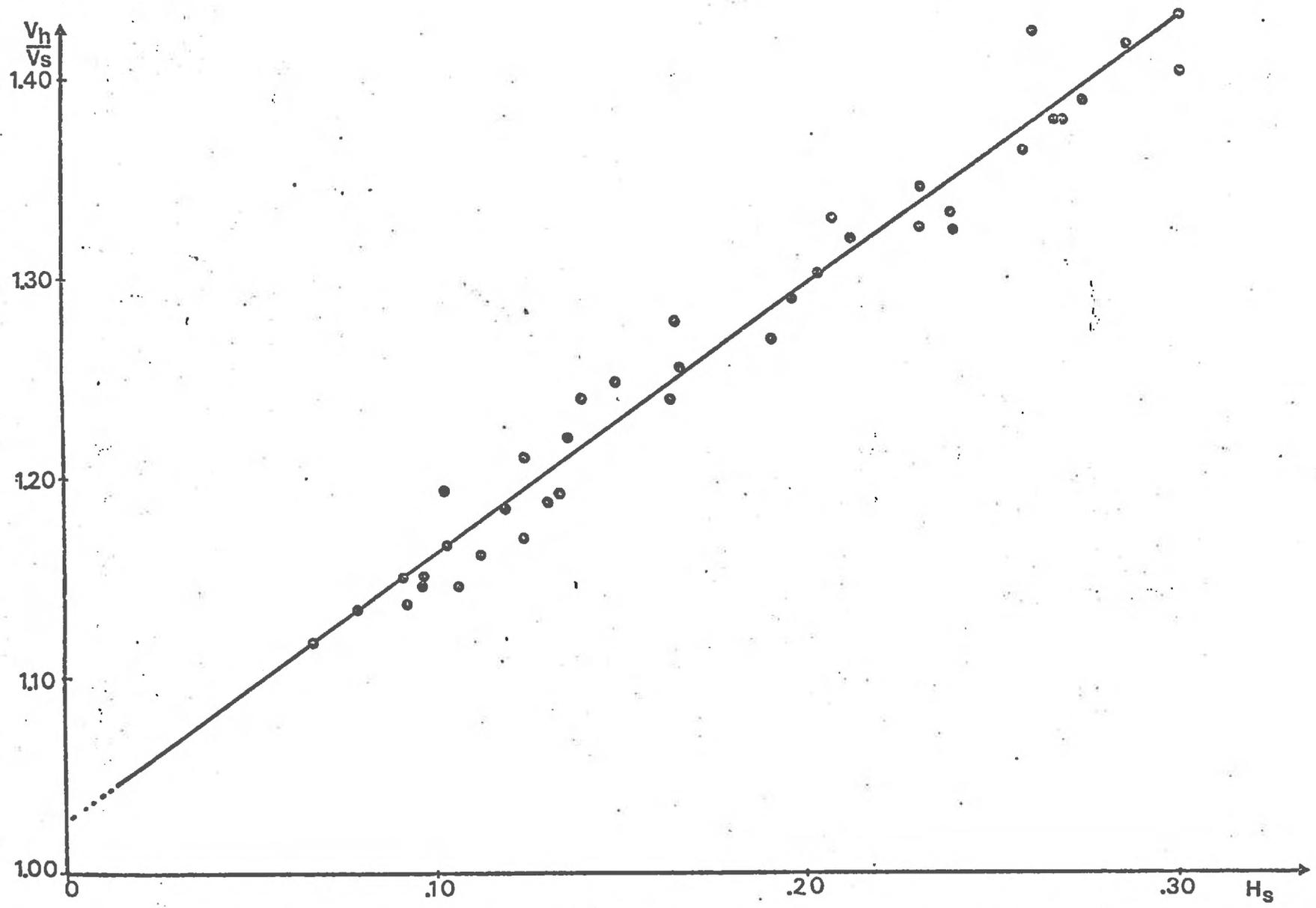


FIGURE 7 : Rapport du volume humide de la semence (V_h) au volume à la conservation (V_s) en fonction de sa teneur en eau ($n = 37$; $r = 0,98$).

1.2. Forme de la fonction $K'(H_s)$.

Après recherches préliminaires, la fonction $K'(H_s)$ est choisie de la forme : $K'(H_s) = a_1 e^{a_2 H_s}$, fonction de la seule variable H_s , a_1 et a_2 étant à estimer. La forme exponentielle de cette fonction n'a pas ici à être discutée : seules nous intéressent ses performances relatives à l'estimation du paramètre $K'(H_s)$.

1.3. Résultats de l'estimation de $(K'(H_s))$.

Puisque nous avons déterminé la loi de variation de la surface de la semence et une forme de la fonction $K'(H_s)$, nous pouvons réaliser l'estimation proprement dite du paramètre $K'(H_s)$ ⁽¹⁾. Les données suivantes condensent les principaux résultats obtenus par ajustement non linéaire :

Estimations :

$$a_1 = 1,050 \times 10^{-8} \quad \text{intervalle de confiance à 95 \%} \\ \left[0,799 \times 10^{-8} ; 1,300 \times 10^{-8} \right] \quad (\text{m/h/m})$$

$$a_2 = 7,793 \quad \text{intervalle de confiance à 95 \%} \\ \left[6,487 ; 9,100 \right]$$

Remarque : Les résidus ne sont pas distribués normalement : ceci est dû au biais systématique introduit par l'ajustement $\psi_s = f(H_s)$ pour lequel on n'a pas un coefficient de corrélation $r = 1$.

Si l'on se reporte à la figure 8, on constate que l'intervalle de confiance défini sur la fonction H_s correspond, pour $H_s = 0,26 = H_c$, à un intervalle de confiance défini par rapport à t de l'ordre de $\left[14 \text{ h}, 17 \text{ h} \right]$ (Dans ce cas d'ailleurs, rappelons que bien que H_c soit atteinte à environ 15 heures, la germination est déclenchée plus tardivement).

Après estimation du paramètre $K'(H_s)$, l'analyse des résidus a montré que l'adéquation des valeurs estimées aux valeurs expérimentales était fortement liée à la qualité de l'ajustement $\psi_s = f(H_s)$: les résultats relatifs à la détermination de $K'(H_s)$ pourraient être améliorés si l'ajustement $\psi_s = f(H_s)$ devenait parfait ($r = 1$).

(1) L'intégration de $\left(\frac{dH_s}{dt} \right)_1$ est donnée dans l'annexe 5.

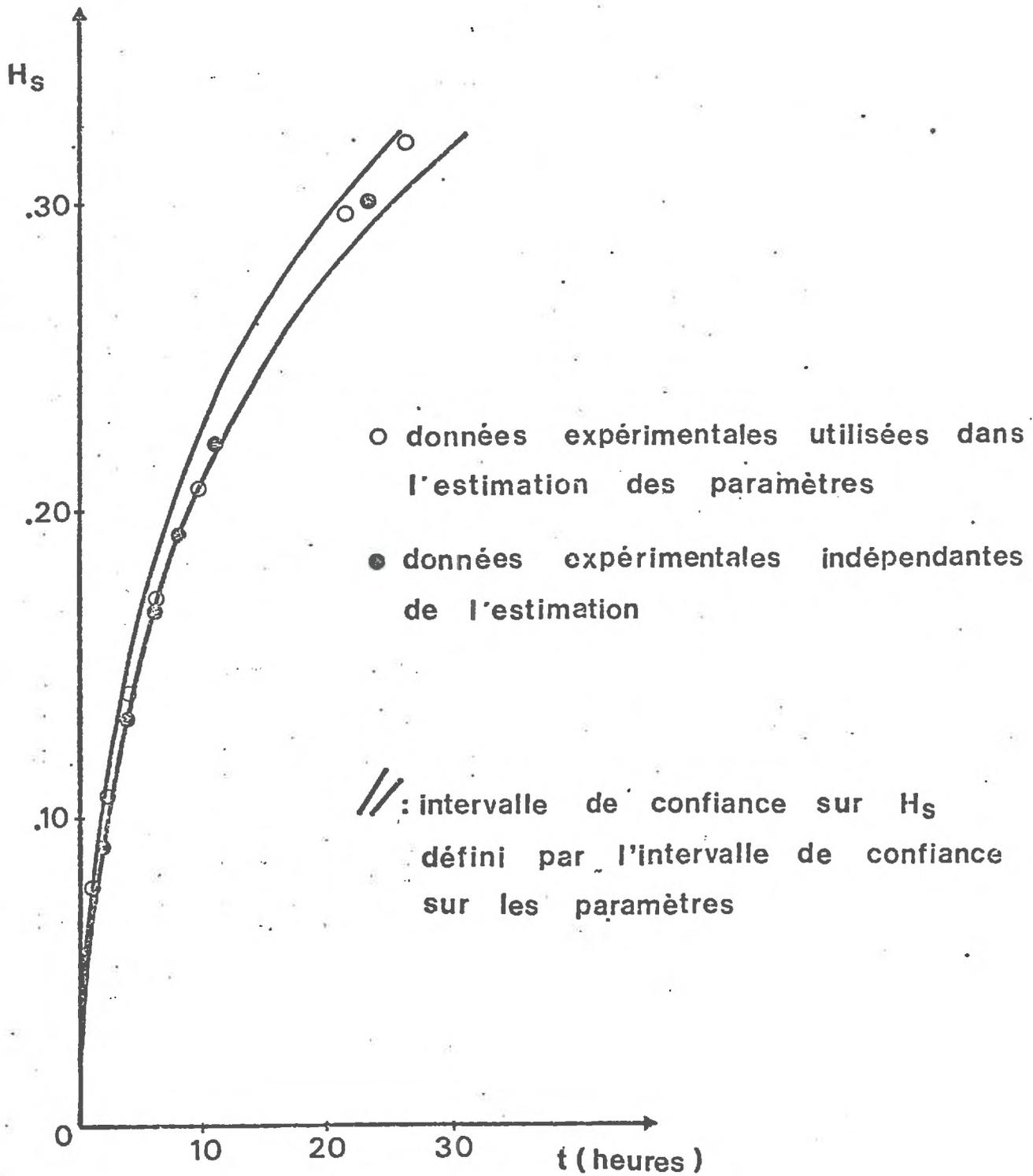


FIGURE 8 : Estimation des paramètres du coefficient $K'(H_s)$: Valeurs expérimentales et valeurs calculées $H_s = f(t)$.
 (Données expérimentales indépendantes : $n = 30$; $\sigma_{H_s} \leq 0,025$)

II ESTIMATION DU COEFFICIENT $D'(H_s)$.

Le principe d'établissement de la relation $D' = f(H_s)$ est le même que précédemment puisque la structure des deux modèles d'imbibition -phase liquide et phase gazeuse- est strictement analogue.

En phase vapeur, on aura donc :

$$\frac{dH_s}{dt} = - \alpha_v D'(H_s) S_v (p_s - p_e) \quad (16)$$

$$\frac{dH_s}{dt} = + \alpha_v D'(H_s) S_v p_o (Hr_e - Hr_s) \quad (17)$$

$$\text{avec } Hr_e = \frac{p_e}{p_o}, \quad Hr_s = \frac{p_s}{p_o}$$

2.1. Choix des conditions expérimentales.

Si on réalise une imbibition en phase gazeuse dans une vapeur saturante, pour des semences entières, alors : $Hr_e = 1$

$$S_v = S_t = i(H_s) S_o,$$

i , indice de gonflement

$$\text{et } \frac{dH_s}{dt} = \alpha_v D'(H_s) i S_o p_o (1 - Hr_s) \quad (18)$$

Le seul terme à définir dans cette expression est $D'(H_s)$ pour lequel, après différents essais, on choisit de façon analogue au cas précédent une forme $D'(H_s) = b_i e^{b_2 H_s}$. A la différence cependant du cas précédent où l'on vérifiait la condition $K_e(H_e) \rightarrow \infty$, on ne dispose plus d'une condition comparable pour une imbibition en phase gazeuse (Dans l'air, le coefficient de diffusion de la vapeur d'eau a une valeur finie).

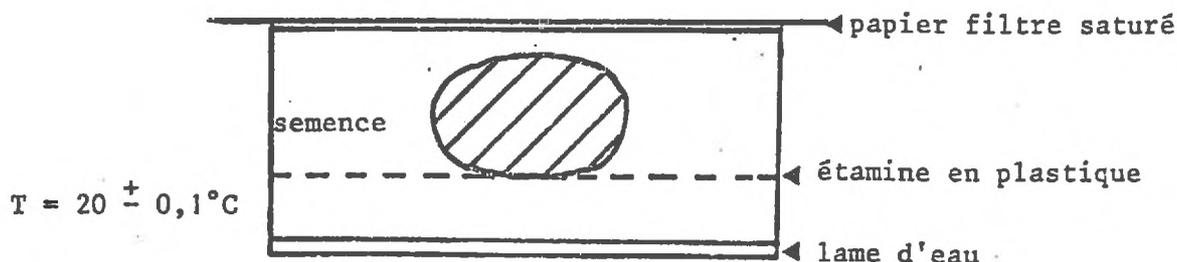


Schéma 7 : Dispositif d'imbibition en phase gazeuse.

t (h)	1	2,15	4	6	9,40	21,25	26
H _s (Valeurs expérimentales) *	0,078	0,107	0,140	0,171	0,207	0,296	0,319
H _s (Valeurs estimées)	0,010	0,102	0,145	0,179	0,218	0,294	0,313
H _s (intervalle de confiance à 95 %)	0,051	0,092	0,136	0,170	0,210	0,284	0,302
	0,068	0,113	0,156	0,188	0,226	0,304	0,324

* $\sigma < 0,015$ (immersion totale)

Tableau 9 : Données expérimentales et données ajustées : H_s = f(t)

En appliquant au schéma expérimental (cf. schéma 7) un calcul d'ordre de grandeur, nous chercherons à confirmer l'hypothèse " D_a non limitant" (D_a , coefficient de diffusion de la vapeur d'eau dans l'air) qui doit être vérifiée pour que D' soit fonction uniquement de H_s .

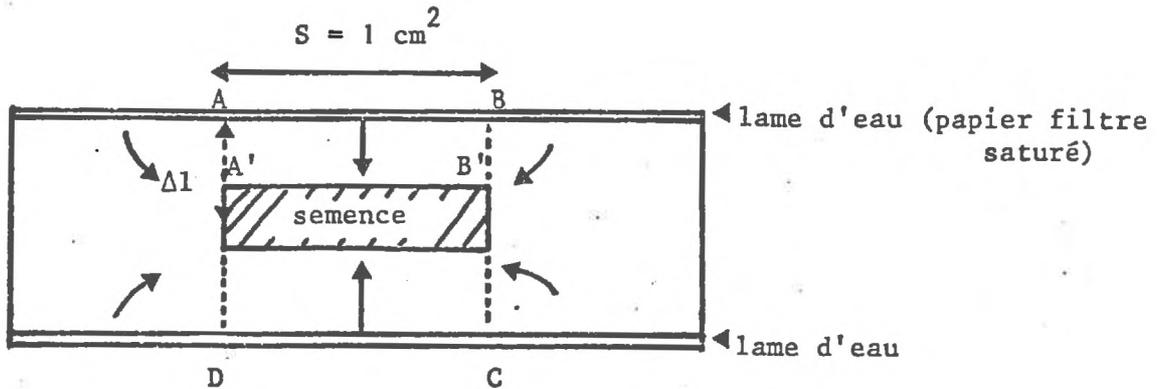


Schéma 8 : Schématisation du dispositif d'imbibition en phase gazeuse.

L'expression d'un flux gazeux dans un milieu caractérisé par un coefficient de diffusion D est de la forme :

$$q_z = - \frac{DM}{RT} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) \quad (18) \quad \text{avec} \quad q_z = \frac{dm}{S dt}$$

Bien que tout le volume gazeux représenté sur le schéma 8 contribue à l'alimentation de la semence, limitons-nous à la contribution du volume cylindrique ABCD. Pour une face horizontale de la semence, la direction des transferts est verticale et leur mesure sur un intervalle de temps Δt est donnée par :

$$\frac{\Delta m}{S dt} = - \frac{DM}{RT} \frac{\Delta p}{\Delta l} \quad (19)$$

Sur la face AB : $p = p_0$

Sur la face A'B' : $p' = p_s$

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} = - \frac{DM}{RT} S \left(\frac{p_s - p_0}{\Delta l} \right) = + \frac{DM}{RT} \frac{S}{\Delta l} p_0 (1 - H r_s) \quad (20)$$

En prenant pour D la valeur du coefficient de diffusion de la vapeur d'eau dans l'air à 20°C, pour p_s la valeur au début de l'imbibition, le calcul aboutit au résultat suivant :

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} \sim 37 \text{ mg/h} \quad (\text{pour deux faces de la semence})$$

En phase gazeuse, les quantités d'eau prélevées par la semence étant bien inférieures à cette valeur, au début de l'imbibition, ce calcul confirme l'hypothèse : " D_a non limitant". Les conditions d'existence du coefficient $D'(H_s)$ sont donc remplies.

2.2. Fonction $D'(H_s)$ obtenue par ajustement.

Les résultats sont présentés dans le tableau 10 et correspondent à la figure 9.

$$b_1 = 1,885 \quad \text{Intervalle de confiance à 95 \%} \\ [1,792 ; 1,977] \quad (\text{m}^2/\text{h/m})$$

$$b_2 = 7,802 \quad \text{Intervalle de confiance à 95 \%} \\ [7,492 ; 8,113]$$

Comme dans le cas de l'imbibition en phase liquide, l'analyse des résidus montre que l'adéquation du modèle aux données est fortement liée à la qualité de l'ajustement $p_s = f(H_s)$ ou, ce qui revient au même, $1 - Hr_s = f(H_s)$

Malgré cette difficulté, les conditions expérimentales choisies permettent de définir une valeur moyenne et un intervalle de confiance pour $D'(H_s)$, $K'(H_s)$, fonctions des caractéristiques de la semence.

Avant de passer à l'étude expérimentale des variables dégagées par cette modélisation, nous condenserons dans un dernier paragraphe une discussion sur le modèle proposé.

t' (h)	1	2	4	6	10	22,5	27,5	45	55	70	100	120
H_s (valeurs expérimentales) (x)	0,017	0,026	0,046	0,060	0,086	0,149	0,169	0,221	0,242	0,265	0,296	0,310
H_s (valeurs estimées)	0,012	0,024	0,044	0,061	0,089	0,151	0,169	0,216	0,237	0,261	0,299	0,318
H_s (intervalle de confiance à 95 %)	0,011	0,023	0,042	0,059	0,087	0,149	0,167	0,214	0,235	0,260	0,296	0,315
	0,013	0,025	0,045	0,063	0,092	0,153	0,171	0,218	0,238	0,264	0,302	0,322

(x) $\sigma < 0,01$

Tableau 10 : Ajustement d'une fonction $D'(H_s)$

Données expérimentales et données ajustées $H_s = f(t)$

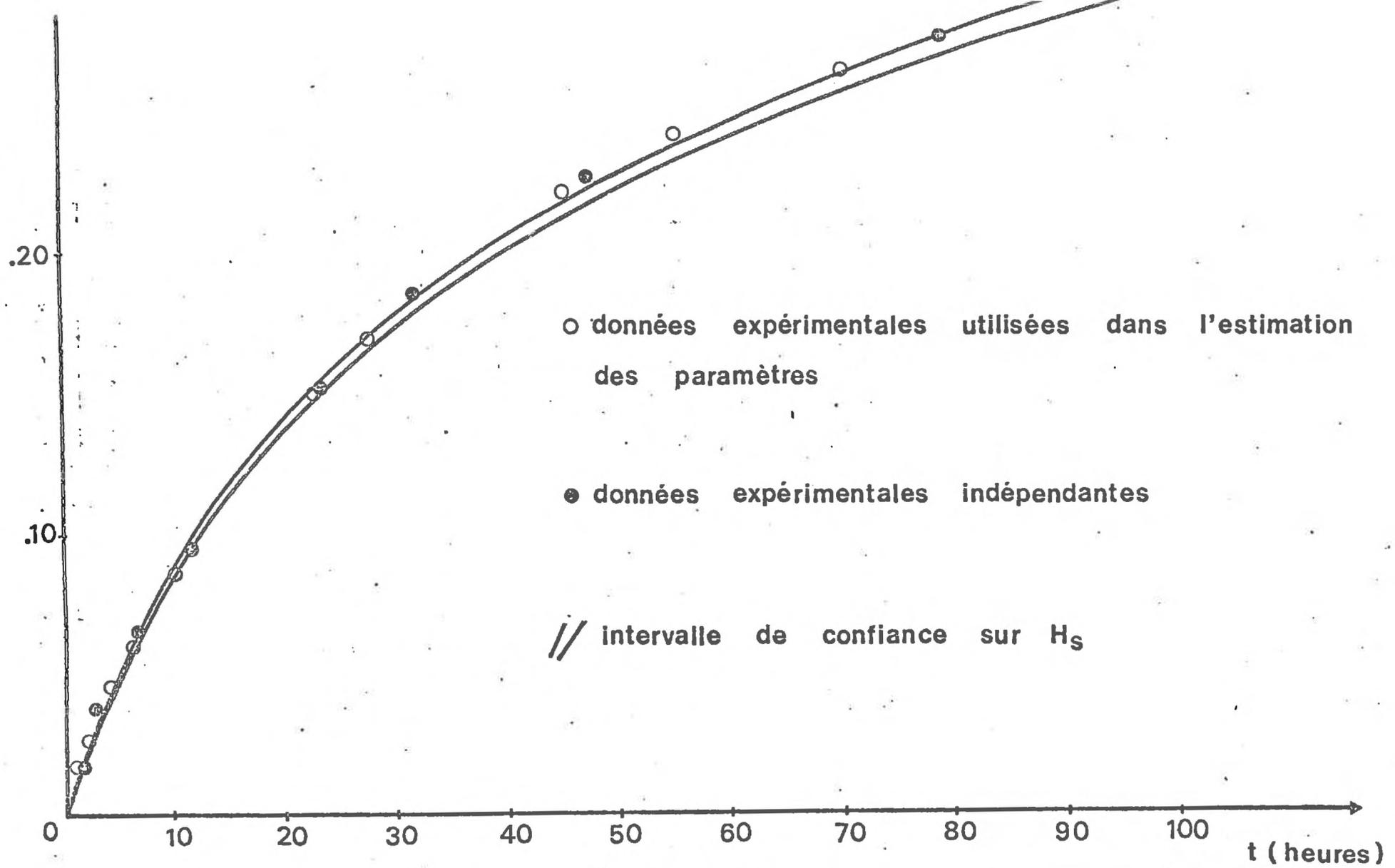


FIGURE 9 : Estimation des paramètres du coefficient $D'(H_s)$: Valeurs expérimentales et valeurs calculées.
 (Données expérimentales indépendantes : $n = 5$; $\sigma_{H_s} \leq 0,010$)

D. DISCUSSION SUR LA MODÉLISATION.

Après avoir souligné le poids de chacun des types de transferts d'eau vers la semence, nous discuterons le plus précisément possible le sens des paramètres $K'(H_s)$ et $D'(H_s)$. En prévision de la simulation ultérieure de l'imbibition, nous préciserons une méthode de calcul qui nous paraît adéquate.

I COMPARAISON DES TRANSFERTS LIQUIDES ET GAZEUX (cf. figures 8 et 9).

La semence s'imbibe aussi bien en phase liquide qu'en phase gazeuse : cette constatation est absolument cohérente avec la notion même de potentiel de l'eau. De plus, les vitesses d'imbibition pour chaque phase, bien que différentes, restent situées dans des ordres de grandeur comparables, empêchant ainsi de négliger l'un des termes par rapport à l'autre. On conçoit donc, que même dans des cas où l'on peut définir "un contact terre graine" défavorable, la majeure partie des transferts d'eau puisse alors s'effectuer en phase gazeuse.

On peut même avancer, a priori, qu'une semence disposée dans un sol humide ($Hr_e \sim 1$) et définissant une surface d'imbibition liquide pratiquement nulle doit s'humecter à la même vitesse que dans notre manipulation précédente (vapeur saturante, $Hr_e = 1$). Un tel cas peut être simulé par le montage suivant (schéma 9) :

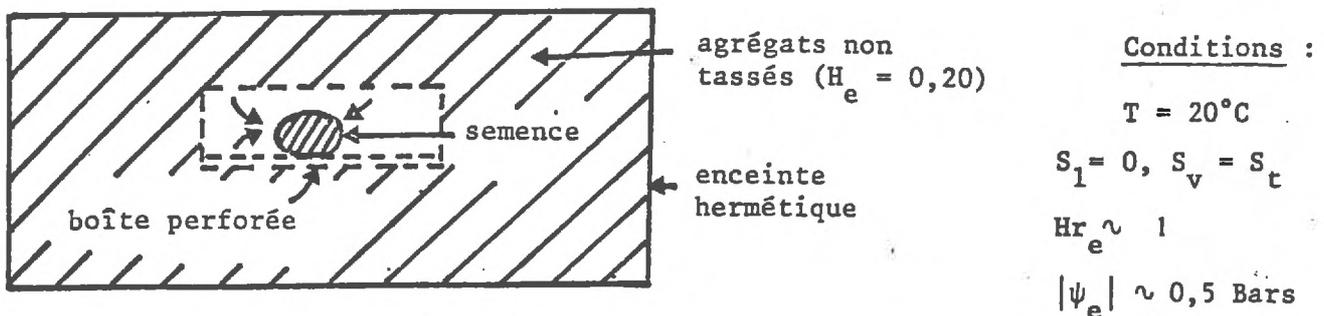


Schéma 9 : Imbibition en phase gazeuse dans un massif d'agrégats.

La figure 10 illustre la similitude des résultats expérimentaux obtenus par les deux manipulations réalisées. Notons que les semences, après imbibition, germent ($t = 120$ h), cette germination impliquant notamment un transfert d'oxygène du milieu extérieur jusqu'à la semence.

II SENS DES TERMES K' ET D' .

2.1. Sens par rapport aux choix du modèle.

Dans l'élaboration du choix d'un modèle, nous avons spécifié l'absence de signification physique des termes K' et D' . Cependant, si l'existence d'une couche poreuse limitant la semence est introduite a priori et par analogie avec une couche poreuse d'un matériau quelconque, c'est bien au début de l'imbibition ($H_s = 0$) que cette couche poreuse à l'existence physique la plus claire (structure poreuse des enveloppes, COME, 1971). Si on modélise la semence par une sphère de rayon $r = 2,5$ mm, sachant que $K' = \frac{K}{\Delta x}$ et $D' = \frac{D}{\Delta x}$, on vérifiera aussi $\Delta x \leq 2,5$ mm.

Au début de l'imbibition, ($H_s = 0$), on vérifie :

$$\left. \begin{array}{l} K(H_s = 0) \leq K'(H_s = 0) \cdot \Delta x \\ D(H_s = 0) \leq D'(H_s = 0) \cdot \Delta x \end{array} \right\} \text{ avec } \Delta x = 2,5 \text{ mm}$$

Et le calcul numérique aboutit aux résultats suivants :

$$K(H_s = 0) \leq 7,3 \times 10^{-13} \quad (\text{cm/sec})$$

$$D(H_s = 0) \leq 0,05 \quad (\text{cm}^2/\text{sec})$$

On constate ainsi que la valeur de K est de l'ordre de grandeur de la valeur trouvée pour certaines semences (WILLIAMS, 1971) par des modèles du type "n° 1" et la valeur de D est bien inférieure à la valeur du coefficient de diffusion de la vapeur d'eau dans l'air (à 20°C , $D_a \sim 0,26 \text{ cm}^2/\text{sec}$). De plus, on remarquera la faible valeur de la conductivité de la semence, comparable à celle d'un sol déjà très sec (humidité inférieure à 0,04 pour le sol de Montluel).

2.2. Sens par rapport au choix des conditions expérimentales -
Rôle de la température.

Le choix d'une température constante est implicite dans la détermination des fonctions $K'(H_s)$ et $D'(H_s)$: rappelons que $K'(H_s)$ provient d'un terme de conductivité ($K(H_s)$) et que tout terme de conductivité est fonction de la température par l'intermédiaire de la viscosité de l'eau $\mu(T)$.

Par le calcul, on peut mettre en évidence le rôle d'un paramètre physique tel que la viscosité $\mu(T)$ sur la cinétique d'imbibition en faisant l'hypothèse -très probablement fausse- qu'une variation de T n'induit qu'une variation du terme $\mu(T)$.

Pour l'imbibition de semences en phase liquide à deux températures T_1 et T_2 ($T_1 > T_2$), on aura respectivement :

$$\begin{aligned} \text{à } T_1 : \quad K_1(H_s) &= \frac{k(H_s)}{\mu_1} \cdot \rho_w \cdot g & (21) \quad \mu_1, \mu_2 &: \text{viscosité de l'eau à } T_1, T_2 \\ & & & \rho_w &: \text{masse volumique de l'eau} \\ \text{à } T_2 : \quad K_2(H_s) &= \frac{k(H_s)}{\mu_2} \cdot \rho_w \cdot g & (22) \quad g &: \text{accélération de la pesanteur} \\ & & & k(H_s) &: \text{perméabilité intrinsèque de la semence.} \end{aligned}$$

En combinant (21) et (22), il vient :

$$K_2(H_s) = \frac{\mu_1}{\mu_2} K_1(H_s) \quad (23)$$

et en divisant chaque membre de (23) par Δx , il vient :

$$K'_2(H_s) = \frac{\mu_1}{\mu_2} K'_1(H_s) \quad (24)$$

D'autre part,

$$\mu(T) = M \cdot e^{-E_a/RT} \quad (25)$$

M : constante

E_a : énergie d'activation de l'eau (3,9 kcal/mole)

R : constante des gaz parfaits

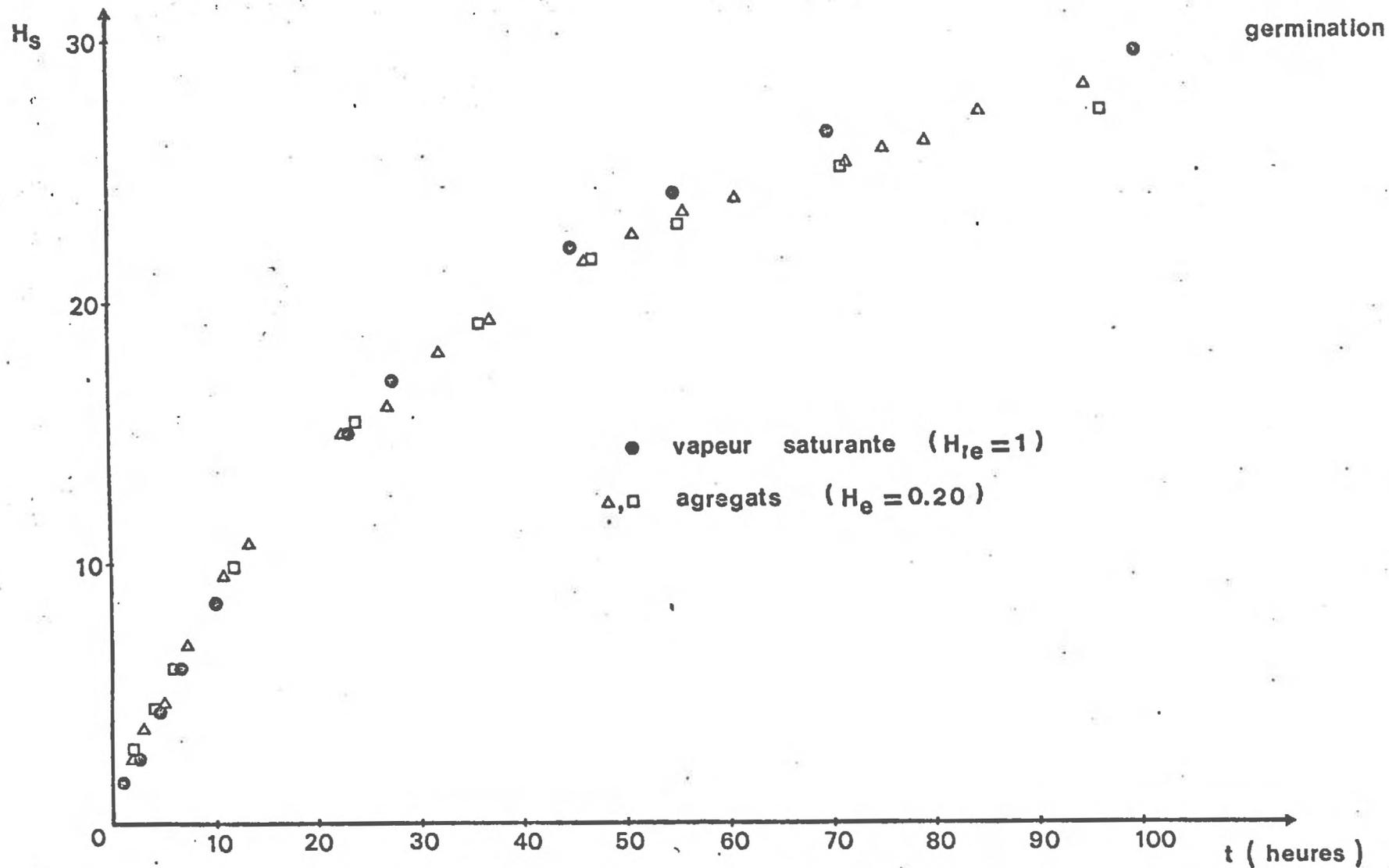


FIGURE 10 : Imbibition en phase gazeuse : Comparaison des cinétiques obtenues dans une vapeur saturante ($H_{re} = 1$) et dans un milieu agrégé humide ($H_e = 0,20$) (Milieu agrégé : $n = 20$; $\sigma H_s \leq 0,010$)

Cette variation de la viscosité en fonction de la température (relation (25)) est illustrée par le tableau suivant, pour trois températures T_1 , T_2 , T_3 ($T_1 = 30^\circ\text{C}$, $T_2 = 20^\circ\text{C}$, $T_3 = 10^\circ\text{C}$).

Couple (T_1, T_2)	Couple (T_2, T_2)	Couple (T_3, T_2)
$\frac{\mu_2}{\mu_1} = 1,245$	$\frac{\mu_2}{\mu_2} = 1$	$\frac{\mu_2}{\mu_3} = 0,789$

En reportant les valeurs de ce tableau dans la relation (24), nous pouvons simuler les cinétiques d'imbibition correspondant à chaque température choisie (tableau 11, figure 11).

Ainsi, la détermination d'une fonction $K'(H_s)$ -dépendant uniquement des propriétés de la semence- impose le choix d'une température constante. Toute modification de température, par l'intermédiaire de la viscosité de l'eau, induit des variations non négligeables du terme $K'(H_s)$ et donc de l'ensemble de la cinétique d'imbibition (tableau 11). Il serait cependant illusoire de réduire l'action de la température sur la germination à cette seule modification physique des propriétés conductrices de la semence dans la mesure où la cinétique d'imbibition n'est qu'une composante de la vitesse de germination. Nous avons développé ce rôle global de la température sur la germination dans l'annexe 4 qui pourra constituer une première base pour l'extrapolation des résultats obtenus à $T = 20^\circ\text{C}$.

En choisissant ainsi une température connue et constante, il nous reste à examiner rapidement une méthode de calcul possible de simulation.

III SIMULATION DE L'IMBIBITION.

3.1. Choix d'une méthode.

A partir des expressions précédentes $\left(\frac{dH_s}{dt}\right)_l$ ou $\left(\frac{dH_s}{dt}\right)_v$, nous avons pu, par intégration, trouver une forme analytique $H_s = f(t)$ ⁽¹⁾. Dans d'autres cas, -si ψ_e n'est plus constant et nul mais devient une grandeur variable par exemple- cette intégration ne sera pas nécessairement possi-

(1) cf. annexe 5.

T°C	10°C	20°C	30°C
Heure d'obtention de $H_s = 0,30$ (h)	30	24	19
Heure d'obtention de $\frac{H_s = 0,30 \text{ à } T^\circ\text{C}}{H_s = 0,30 \text{ à } 10^\circ\text{C}}$	1,00	0,80	0,63

Tableau 11 : Simulation du rôle des variations de viscosité de l'eau sur la cinétique d'inhibition

$$(S_1 = S_t, \psi_e = 0)$$

ble. Nous avons donc comparé, pour les manipulations précédentes -imbibition en phase liquide ou en phase gazeuse-, la cinétique moyenne issue de la forme analytique $H_s = f(t)$ à celle provenant d'un calcul par différences finies (calcul de $\frac{\Delta H_s}{\Delta t}$ pour un pas de temps Δt donné et sommation des termes $\frac{\Delta H_s}{\Delta t}$ pour obtenir H_s). Le mode de calcul est présenté dans l'annexe 5.

Les figures 12 et 13 comparent ces deux modes de calcul :

- en phase liquide, $\Delta t = 0,25$ h , $\psi_e = 0$
- en phase gazeuse, $\Delta t = 1$ h , $Hr_e = 1$

En termes de valeurs moyennes, les cinétiques obtenues sont identiques et nous pouvons donc utiliser un calcul par différences finies, à condition de déterminer un pas de temps adapté à la vitesse du phénomène (rappelons que le choix d'un pas de temps est déterminant puisqu'il définit l'erreur acceptée en assimilant une différentielle exacte $\frac{dH_s}{dt}$ à une différence $\frac{\Delta H_s}{\Delta t}$).

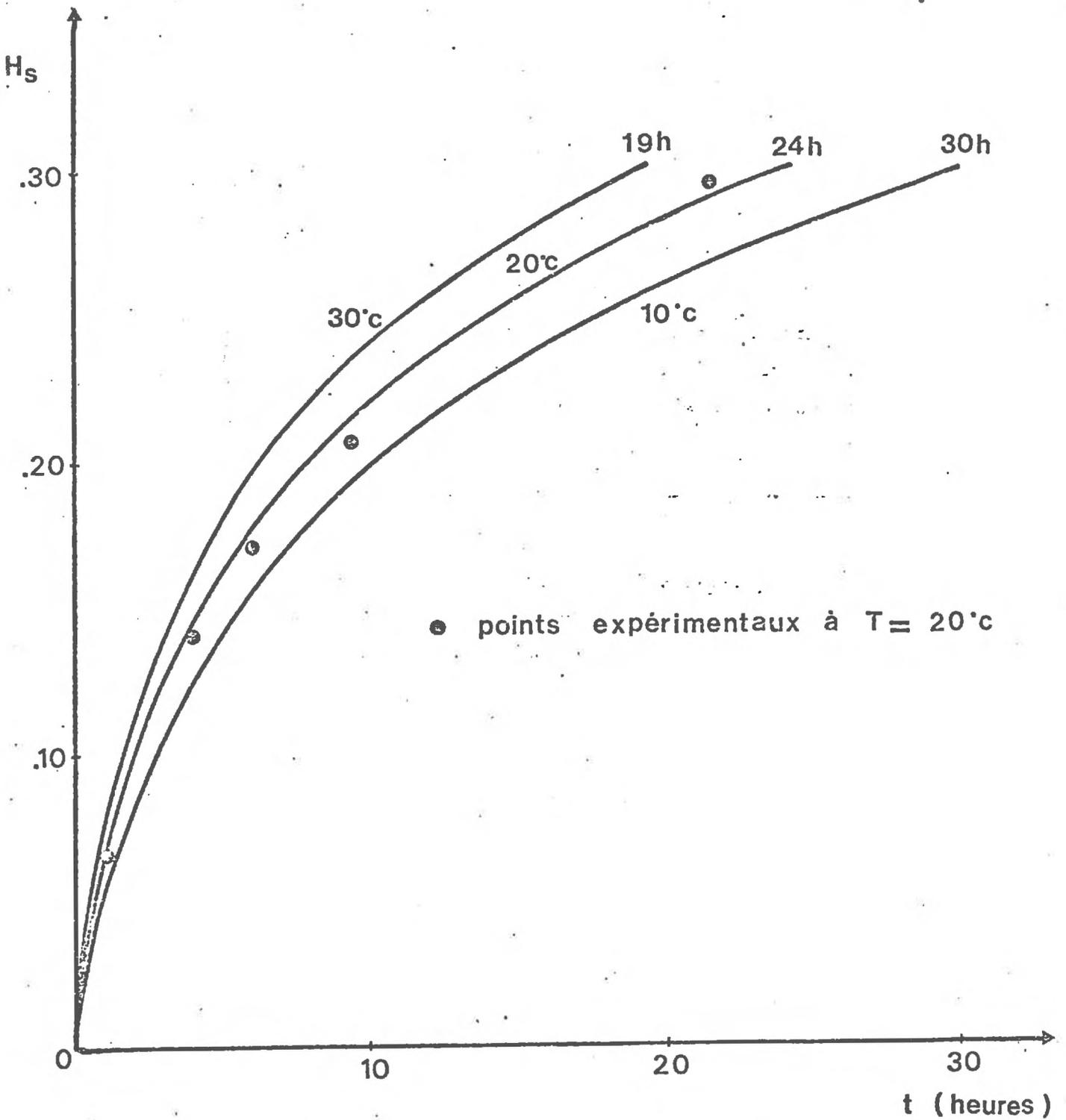
3.2. Précision de la simulation.

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_e)

- 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 8 et 9 par la représentation de deux séries de mesures indépendantes aboutissant aux mêmes valeurs moyennes H_s .

Malgré ce facteur favorable, il est difficile d'utiliser directement l'intervalle de confiance défini par les ajustements des paramètres pour prédire un intervalle de confiance de teneur en eau H_s puisque des points expérimentaux sont situés "à l'extérieur" de celui-ci : il ne s'agit donc pas d'un intervalle prédictif



FIGURÉ 11 :-Rôle de la viscosité de l'eau sur la cinétique d'imbibition :
Simulation à trois températures.

(Toute la surface de la semence est humectée)

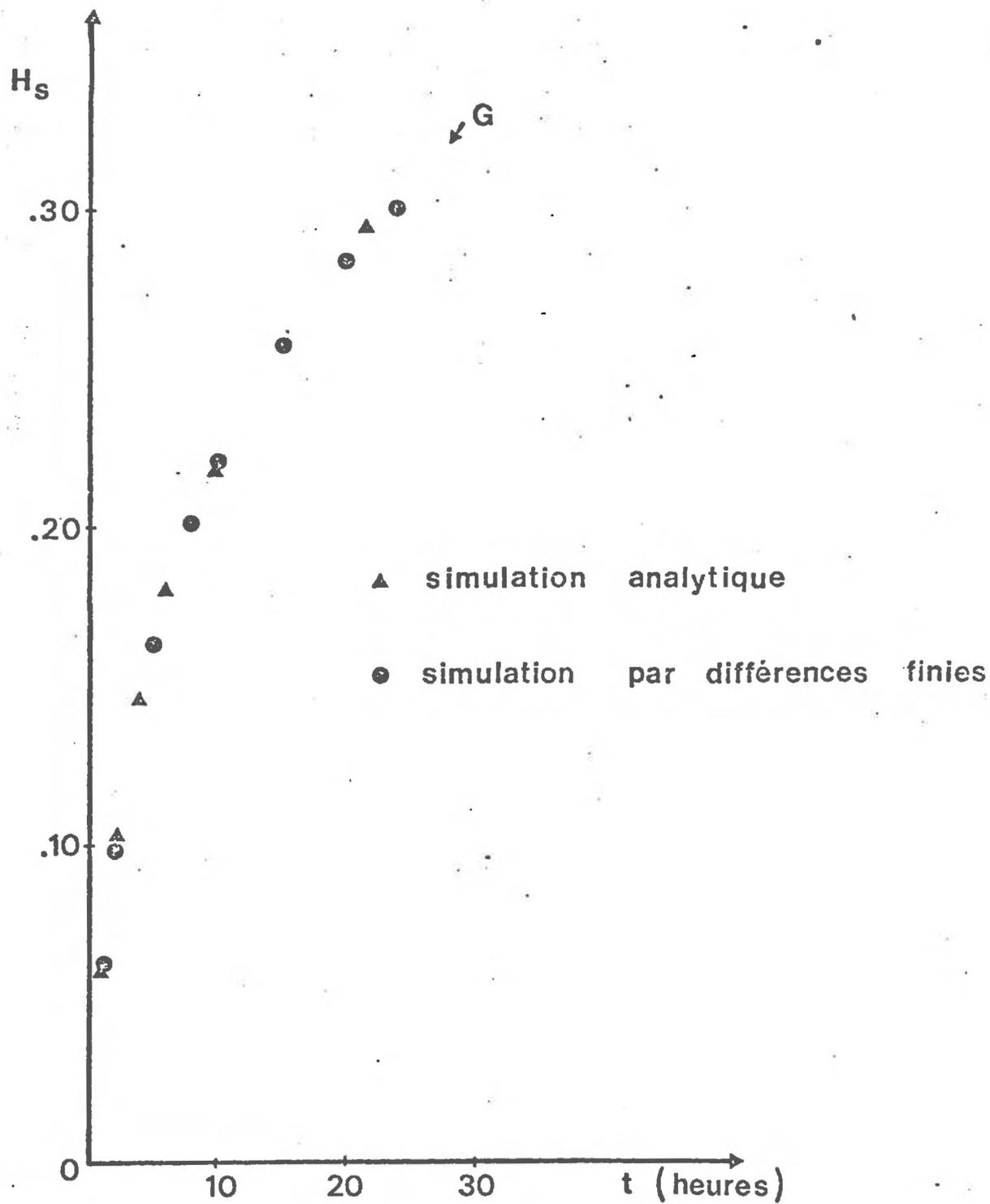


FIGURE 12 : Imbibition en phase liquide : Comparaison des simulations analytiques et par différences finies ($\Delta t = 0,25h$).
 (Valeurs moyennes)

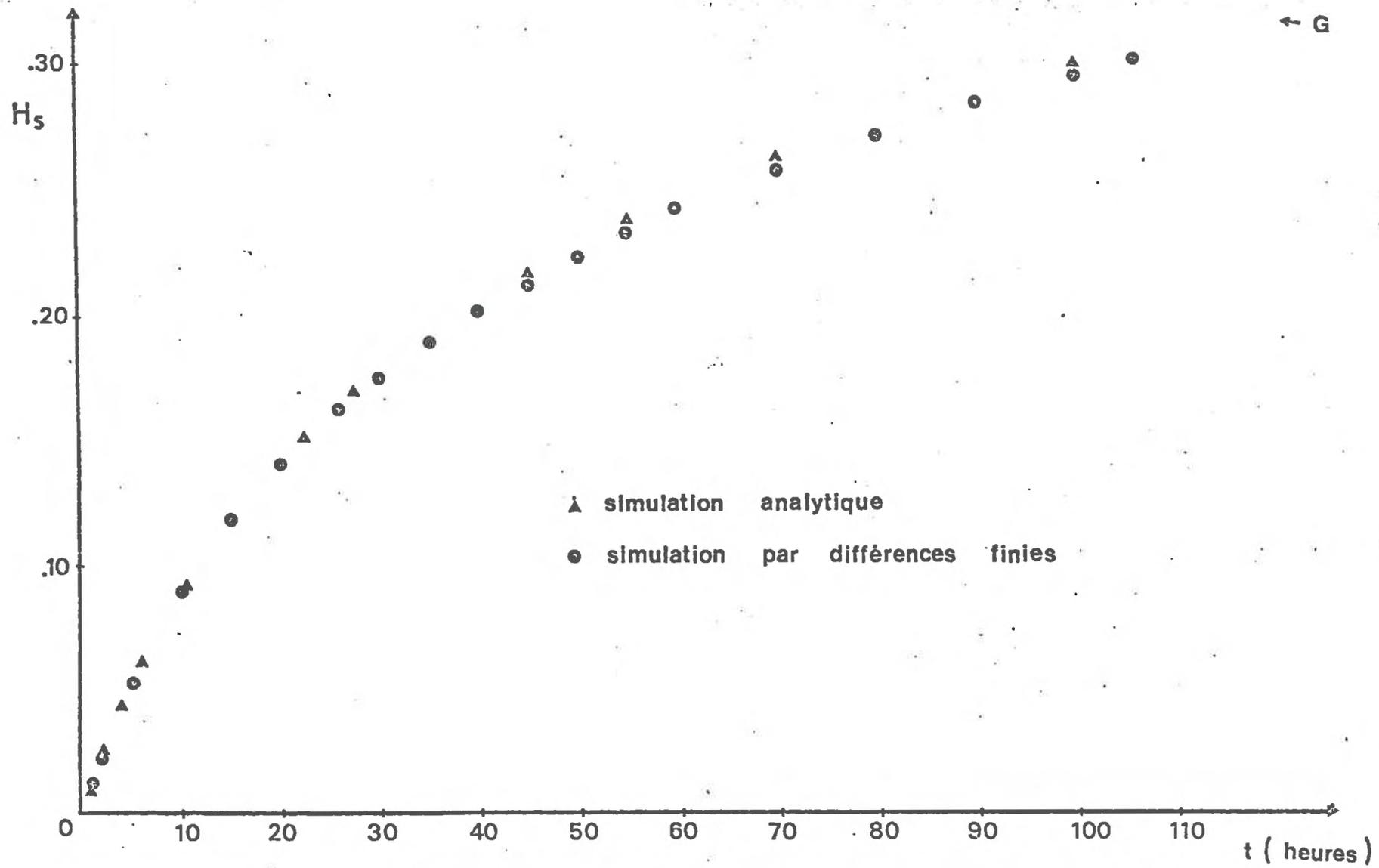


FIGURE 13 : Imbibition en phase gazeuse : Comparaison des simulations analytiques et par différences finies ($\Delta t = 1h$) (Valeurs moyennes)

Pour les ordres de grandeurs 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 .

3.3. Relations "imbibition-germination".

Nous nous étions proposé de préciser les relations "teneur en eau-germination", ce que nous avons réalisé en introduisant la notion d'humidité critique H_c . Il est cependant nécessaire d'insister sur le fait que la vitesse d'imbibition n'est qu'une composante de la vitesse de germination et que la valeur H_c ne spécifie qu'une possibilité de germination (l'eau n'est plus limitante). En particulier, dans la plupart des résultats présentés jusqu'à présent où les conditions d'hydratation sont loin d'être limitantes ($S = S_t$, $\psi_e = 0$), les semences germent au delà de la valeur $H_c = 0,26$

Sur l'ensemble de notre travail, cette constatation peut être ^{ou élargie} élargie : l'intervalle de teneur en eau qui sépare l'obtention de la valeur H_c et le déclenchement de la germination (critère morphologique) est d'autant plus petit que la cinétique d'imbibition est plus lente. Les prévisions d'heures d'obtention d'une humidité critique laissent donc exister une incertitude quant à l'heure exacte de germination.

Nous garderons présente à l'esprit cette incertitude en essayant de la préciser après l'obtention de références expérimentales présentées dans une deuxième partie.

IV CONCLUSION.

Nous avons jusqu'à présent proposé un modèle, en essayant de discuter son sens et son intérêt. Il nous a permis notamment de réduire progressivement un "système terre-graine" complexe à un système à deux variables. Le problème initial de l'imbibition se trouve donc précisé et nous sommes amenés à analyser plus finement le rôle des variables S et $\Delta\psi$. Ce sera l'objet de notre deuxième partie.

DEUXIÈME PARTIE

CHAPITRE III

RÔLE DE LA SURFACE D'IMBIBITION SUR LA CINÉTIQUE D'IMBIBITION.

En nous appuyant sur les lois de diffusion, nous avons proposé une approche modélisée des transferts d'eau vers la semence. L'écriture de notre modèle exprime la proportionnalité entre la quantité dH_s/dt et la surface d'imbibition -termes S_1 et S_v -, quelle que soit la phase et la valeur du potentiel extérieur à la semence -terme ψ_e -.

Au cours de ce chapitre, nous chercherons à vérifier si ces variables S_1 et S_v peuvent prendre le sens que ce modèle leur assigne : nous serons donc amenés à comparer des cinétiques d'imbibition mesurées expérimentalement aux réponses modélisées correspondantes, c'est-à-dire, obtenues pour un même couple (S_1, S_v).

Au cours d'une première partie, nous proposerons une étude analytique des termes S_1 et S_v pour étudier dans un deuxième temps le "contact terre-graine" proprement dit.

A. ANALYSE DE LA VARIABLE S_1 .

I VARIABLE S_1 : CAS DES TRANSFERTS LIQUIDES.

Au cours d'une imbibition en phase liquide, la variation d'humidité de la semence en fonction du temps sera de la forme :

$$\left(\frac{dH_s}{dt} \right)_1 = - \alpha_1 K'(H_s) S_1 (\psi_s - \psi_e)$$

En travaillant sur des substrats saturés (papier filtre), la relation précédente s'écrit :

$$\left(\frac{dH_s}{dt} \right)_1 = -\alpha_1 K'(H_s) S_1 \cdot \psi_s, \text{ puisque } \psi_e = 0$$

Quelle que soit la valeur S_1 et toutes choses égales par ailleurs, la comparaison d'une cinétique "théorique" (équation précédente) à une cinétique "expérimentale" est la condition nécessaire et suffisante à la réalisation d'un test sur le rôle de la variable S : la condition préalable en est la mesure précise de la valeur S_1 .

Pour remplir cette condition, nous avons recouvert d'un vernis élastique permettant le gonflement des semences une fraction déterminée de la surface de la semence en réalisant sur la partie non recouverte une imbibition strictement en phase liquide. Ce dispositif permet de définir un intervalle de surface relative (S_1/S_t) compris entre les bornes $S_1/S_t = 0,13$ et $S_1/S_t = 1$. La borne inférieure peut être comparée à un contact très défavorable tandis que la borne supérieure correspond à un contact parfait.

Le rapport (S_1/S_t) = 0,13 équivaut à une surface réelle d'imbibition $S_1 = 0,28 \text{ cm}^2$ (détermination de S_1 par photographie sur 10 semences, agrandissement, puis pesée des images : $\overline{S_1} = 0,28 \text{ cm}^2$, $\sigma\overline{S_1} = 0,02 \text{ cm}^2$)

C'est aux bornes de cet intervalle [S_1/S_t] que nous chercherons à vérifier l'adéquation des données expérimentales à une réponse modélisée. En combinant ultérieurement transferts liquides et gazeux, nous étendrons cette vérification à des valeurs intermédiaires S_1/S_t .

La figure 14 donne une représentation graphique des résultats expérimentaux (points figuratifs) et modélisés⁽¹⁾ (ligne continue). Pour le calcul, on se reportera à l'annexe 5. Nous admettrons ici comme acceptables les résidus sur H_s dont l'ordre de grandeur est de 0,01 à 0,02.

Cette proportionnalité -approchée- entre les termes dH_s/dt et S_1 constitue une première vérification de la validité du modèle et du rôle de la variable S sur la cinétique d'imbibition : en termes d'ordre de grandeurs, les réponses modélisées indiquent que la valeur $H_c = 0,26$ est atteinte dès 15h si $S_1/S_t = 1$, et au bout de 150h si $S_1/S_t = 0,13$.

(1) La surface $S = 0,28 \text{ cm}^2$ ne comprenant pas le hile, nous avons effectué la modélisation en recherchant préalablement un coefficient $K'(H_s)$ caractéristique de toute la surface de la semence sauf le hile.

Pour appréhender le fonctionnement d'ensemble de la surface d'humectation -termes S_l et S_v -, il nous reste à analyser l'imbibition en phase gazeuse et l'additivité des deux types de flux.

II VARIABLE S_v : CAS DES TRANSFERTS GAZEUX.

Nous avons réalisé la même démarche expérimentale que pour l'étude des transferts liquides : cette identité est d'ailleurs contenue dans la forme même du modèle additif adopté.

Nous avons testé une gamme de six surfaces d'imbibition en disposant sur la semence un nombre variable de taches vernies de dimension connue (9 mm^2). Cependant, quelle que soit la valeur S_v ainsi mesurable, l'interprétation des résultats peut être faite en admettant l'existence d'une diffusion de vapeur d'eau sous les taches imperméables sur une largeur de 0,7 à 0,8 mm. Tout se passe donc comme si une imperméabilisation imparfaite permettant ce phénomène de diffusion aboutissait systématiquement à une majoration de la surface fonctionnelle par rapport à la surface apparente.

Pour tester cette hypothèse, nous avons mieux défini les surfaces d'imbibition en phase gazeuse, en réalisant une imbibition simultanée en phase liquide sur une surface donnée de la semence et en phase gazeuse sur la surface restante. Une surface d'imbibition en phase gazeuse est alors toute surface qui n'est pas en contact avec de l'eau liquide. Pour un tel dispositif, le phénomène de diffusion invoqué ne peut plus exister.

Du même coup, en combinant les deux types de transfert, nous sommes donc directement amenés à vérifier si l'hypothèse d'additivité des flux constitue une approximation acceptable du processus d'imbibition.

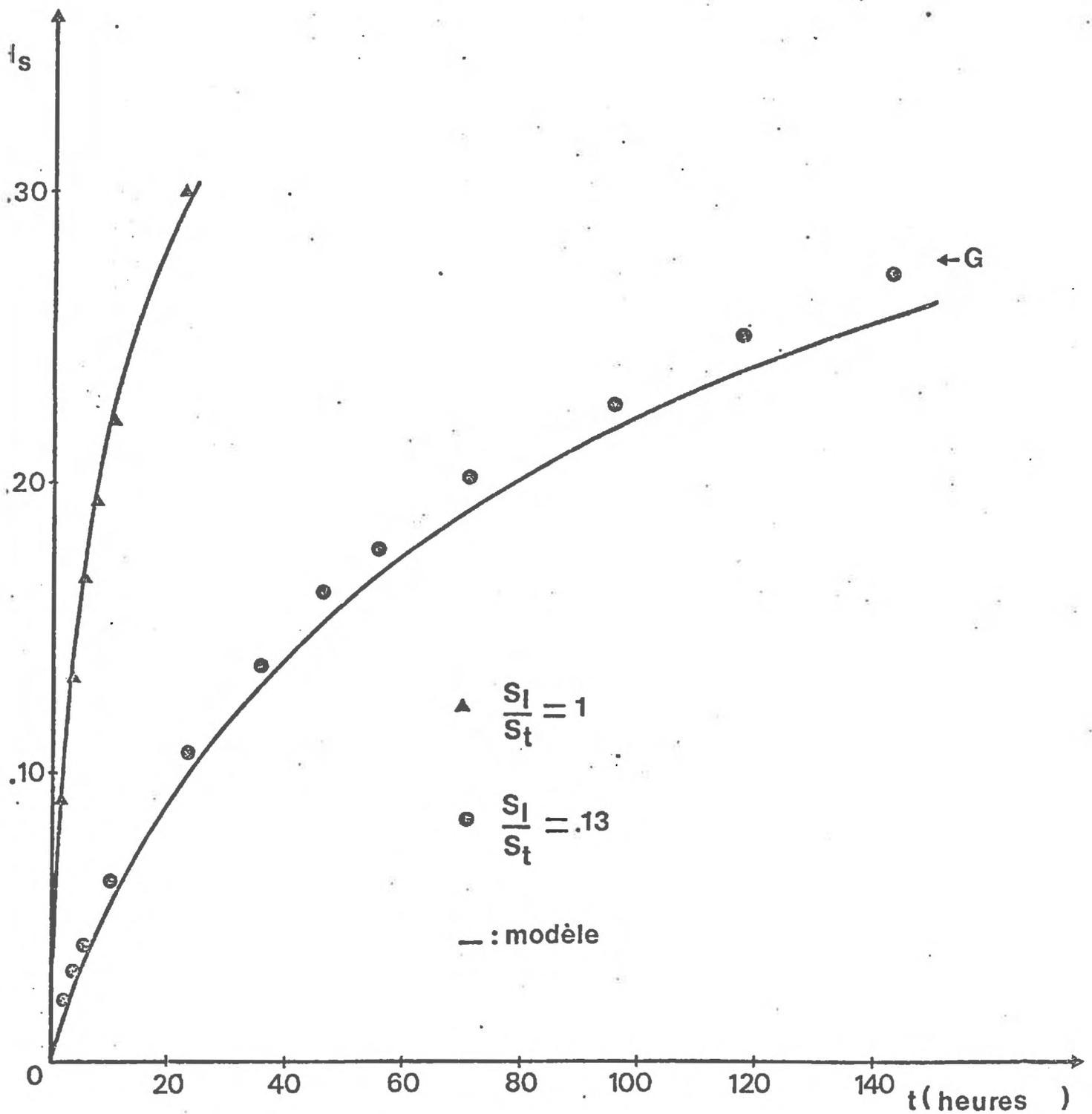


FIGURE 14 : Rôle de la surface d'imbibition sur la vitesse d'imbibition en phase liquide : Données expérimentales et modélisées.

$$\left(\frac{S_1}{S_t} = 1 ; n = 10 ; \sigma_{H_s} \leq 0,016 ; \right.$$

$$\left. \frac{S_1}{S_t} = 0,13 ; n = 5 ; \sigma_{H_s} \leq 0,010 \right)$$

III COMBINAISON DES TRANSFERTS LIQUIDES ET GAZEUX.

Deux manipulations qui cumulent ces types de transfert sont proposées :

- la première définit un rapport $\frac{S_1}{S_t} = 0,13$, comme dans le cas d'imbibition en phase liquide présenté plus haut. Cependant, le recouvrement de la semence par l'élastomère étant supprimé, nous réalisons une humectation simultanée en phase gazeuse ($S_v/S_t = 0,87$) : les semences sont ici posées sur des fragments de papier filtre saturés tels que $S_1 = 0,28 \text{ cm}^2$, $S_v = 1,92 \text{ cm}^2$

- la deuxième permet de modifier le rapport S_1/S_t . Nous l'avons choisi égal à 0,5 afin de nous placer dans un domaine intermédiaire de l'intervalle $[S_1/S_t]$. Les semences sont dans ce cas à moitié immergées dans de l'eau pure.

Le tableau 12 résume l'ensemble des expérimentations mises en place, en excluant les transferts en phase gazeuse seule pour les raisons évoquées plus haut.

La figure 15 correspond aux cinétiques mesurées expérimentalement dans le cas où les deux types de transfert coexistent (points figuratifs) et représente aussi les simulations obtenues par différences finies (courbes continues) à partir de l'expression :

$$\left(\frac{dH_s}{dt}\right)_t = \left(\frac{dH_s}{dt}\right)_l + \left(\frac{dH_s}{dt}\right)_v$$

Pour mémoire, on a reproduit graphiquement le cas où $S_1/S_t = 1,00$. En terme de valeurs moyennes, l'adéquation des valeurs expérimentales aux valeurs estimées est satisfaisante si l'on considère l'ordre de grandeur des résidus sur H_s ($\sim 0,01$). D'autre part, dans le cas où $S_1/S_t = 0,50$, l'observation a posteriori de chaque semence montre que certaines semences sont caractérisées par un rapport S_1/S_t légèrement supérieur à 0,50 (les semences étant colorées par un fongicide, la surface correspondant à un contact liquide se trouve décolorée : une observation visuelle permet alors facilement de déterminer si le rapport S_1/S_t est bien égal à 0,5). Il apparaît que les semences définissant un rapport S_1/S_t légèrement supérieur à 0,5 réalisent également les cinétiques d'imbibition les plus rapides.

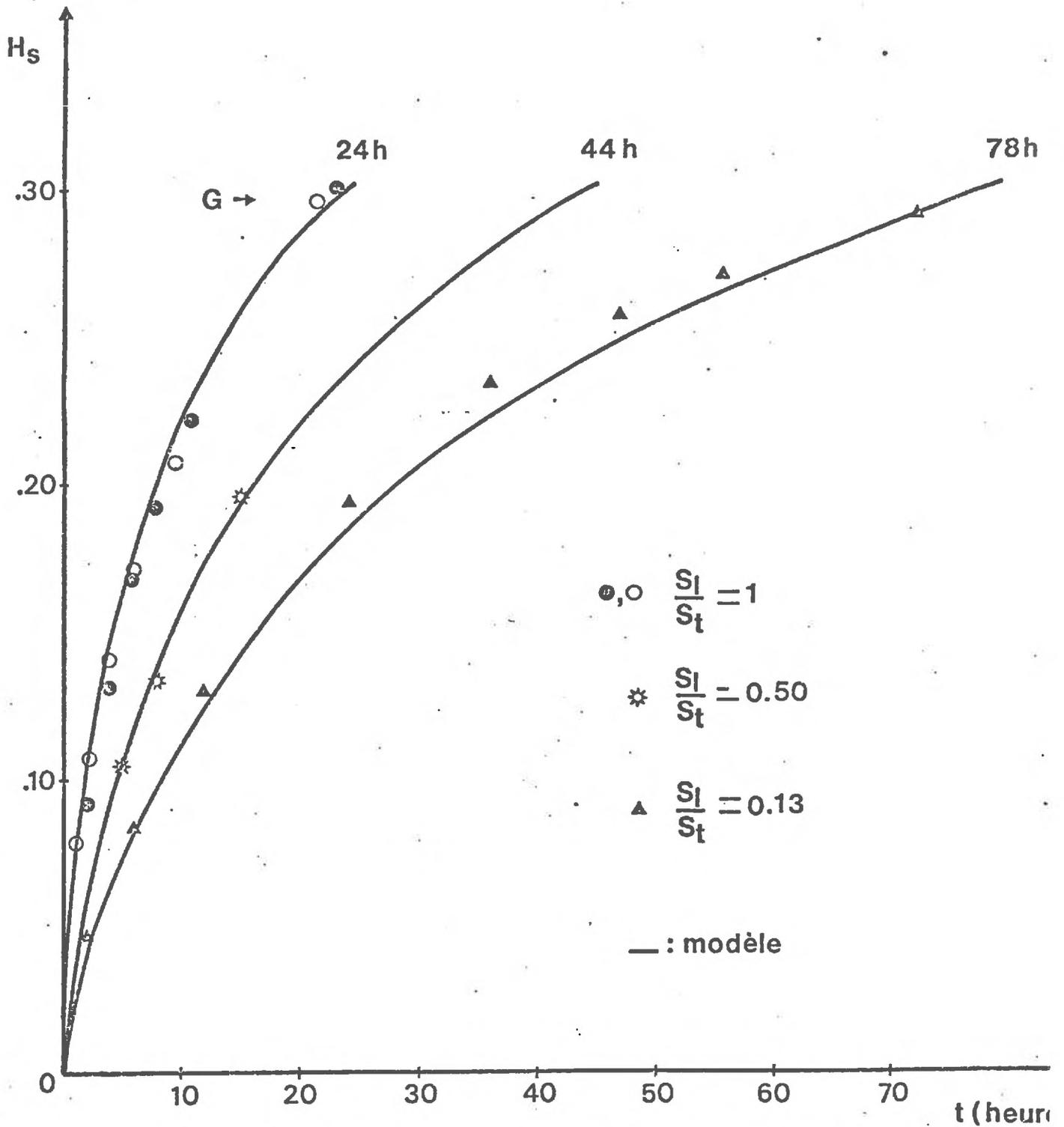


FIGURE 15 : Imbibition en phases liquide et gazeuse : Rôle du rapport S_1/S_t sur la vitesse d'imbibition.

$\left(\frac{S_1}{S_t} = 1, n = 10, \sigma_{H_s} \leq 0,016 ; \frac{S_1}{S_t} = 0,50, n = 15, \sigma_{H_s} \leq 0,008 ;$

$\frac{S_1}{S_t} = 0,13, n = 5, \sigma_{H_s} \leq 0,012)$

Le tableau 13 résume les principales conclusions obtenues par simulation des cinétiques pour chaque cas expérimental représenté sur la figure 15. Ces données prévisionnelles et compatibles avec les mesures expérimentales, mettent ainsi en relief le rôle discriminant du rapport S_1/S_v sur la cinétique d'imbibition et sur l'heure probable de germination qui en résulte (rapport de 1 à 3 lorsque l'on passe de $S_1/S_t = 1,00$ à $S_1/S_t = 0,13$).

IV CONCLUSION PARTIELLE.

Plusieurs points importants ont pu être dégagés à travers cette étude analytique du terme S. D'abord la nécessité de prendre en compte de façon simultanée transferts liquide et gazeux : pour une valeur S_1 donnée, la figure 16 illustre le rôle de la surface d'imbibition en phase gazeuse sur la vitesse d'humectation des semences. De plus la proportionnalité entre un débit et une surface fonctionnelle (S_1 ou S_v), ainsi que l'additivité des deux flux, constituent une approximation acceptable du processus d'imbibition.

Enfin, notre modèle constitue un outil : c'est précisément à l'aide de cet outil d'analyse que nous nous proposons de définir "le contact terre-graine".

	Phase liquide		Phases liquide et gazeuse	
	S_1/S_t	0,13	1,00	0,13
S_v/S_t	0 (1)	0	0,87	0,50

Tableau 12 : Rapports S_1/S_t et S_v/S_t choisis pour l'analyse des variables S_1 et S_v .

(1) recouvrement par élastomère.

S_l (cm ²)	S_v (cm ²)	S_l/S_t	Heure d'obtention de $H_c = 0,26$ ⁽¹⁾	Heure d'obtention de $H_s = 0,30$
2,20	0	1,00	15h	24h
1,10	1,10	0,50	30h	44h
0,28	1,92	0,13	53h	78h

Tableau 13 : Rôle de la surface d'imbibition sur la cinétique d'imbibition - Données du modèle.

(1) H_c = humidité critique

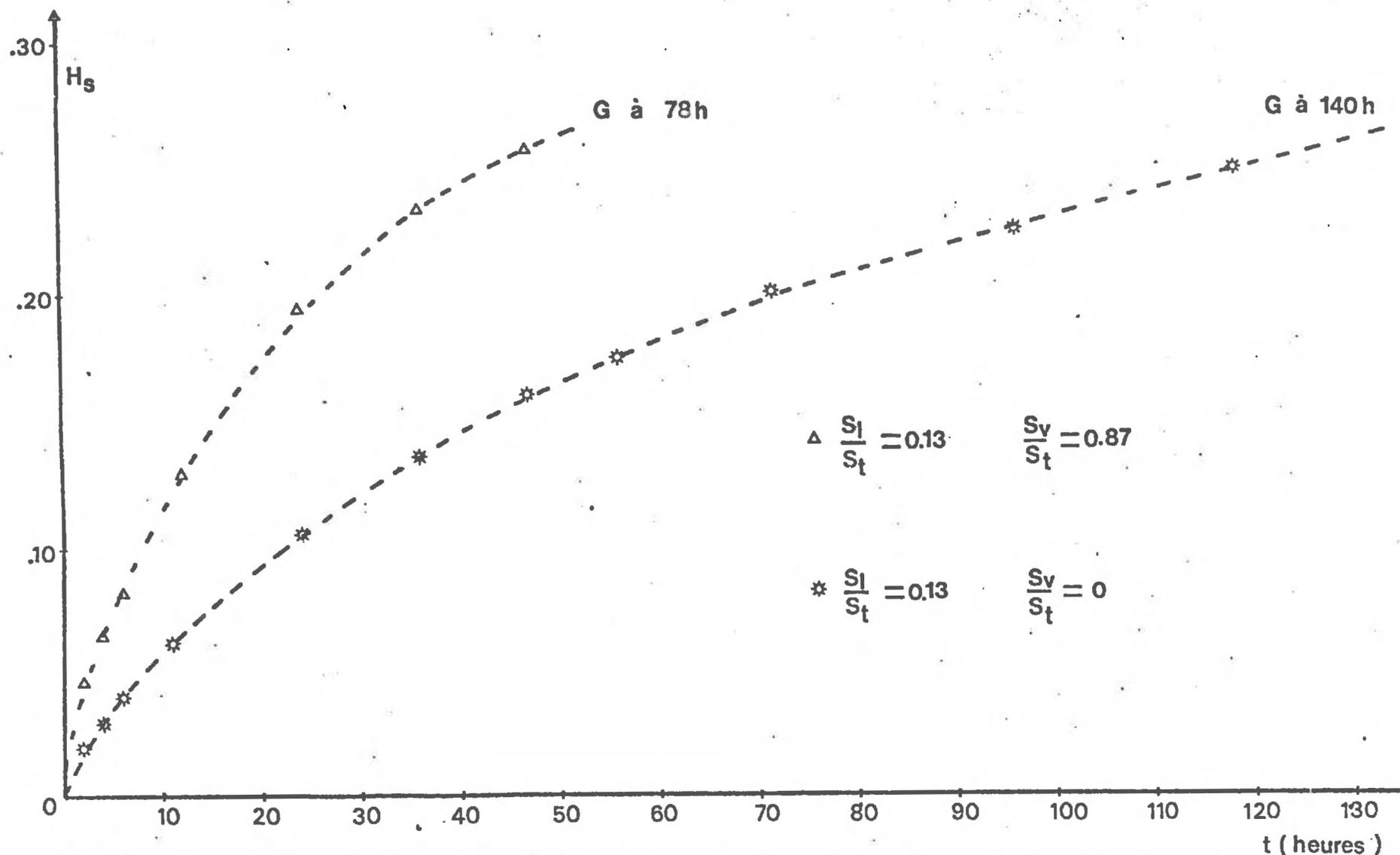


FIGURE 16 : Rôle de la surface d'imbibition en phase gazeuse sur la vitesse d'imbibition. (Données expérimentales)

$$\left(\frac{S_v}{S_t} = 0,87, n = 5, \sigma_{H_s} \leq 0,012 ; \frac{S_v}{S_t} = 0, n = 5, \sigma_{H_s} \leq 0,010\right)$$

B. ANALYSE DU "CONTACT TERRE-GRAINE".

Nous avons à plusieurs reprises évoqué l'analogie entre le concept de "contact terre-graine" et la définition d'une surface d'imbibition liquide. Puisque nous disposons d'un outil qui rend compte de façon adéquate du rôle de la surface d'imbibition, nous nous proposons d'expliciter les liaisons :

état structural du lit de semences ↔ système de porosité → surface d'imbibition fonctionnelle → vitesse d'imbibition → germination.

Dans le cas de semences placées dans un volume d'agrégats aux caractéristiques physiques connues, nous nous affranchirons d'une étude morphologique détaillée du système "éléments structuraux - semence", (1) en recherchant une liaison statistique globale entre un système de porosité et une surface d'imbibition correspondante.

I PRINCIPE DE RECHERCHE D'UNE LIAISON ENTRE UN SYSTEME DE POROSITE ET UNE SURFACE D'IMBIBITION.

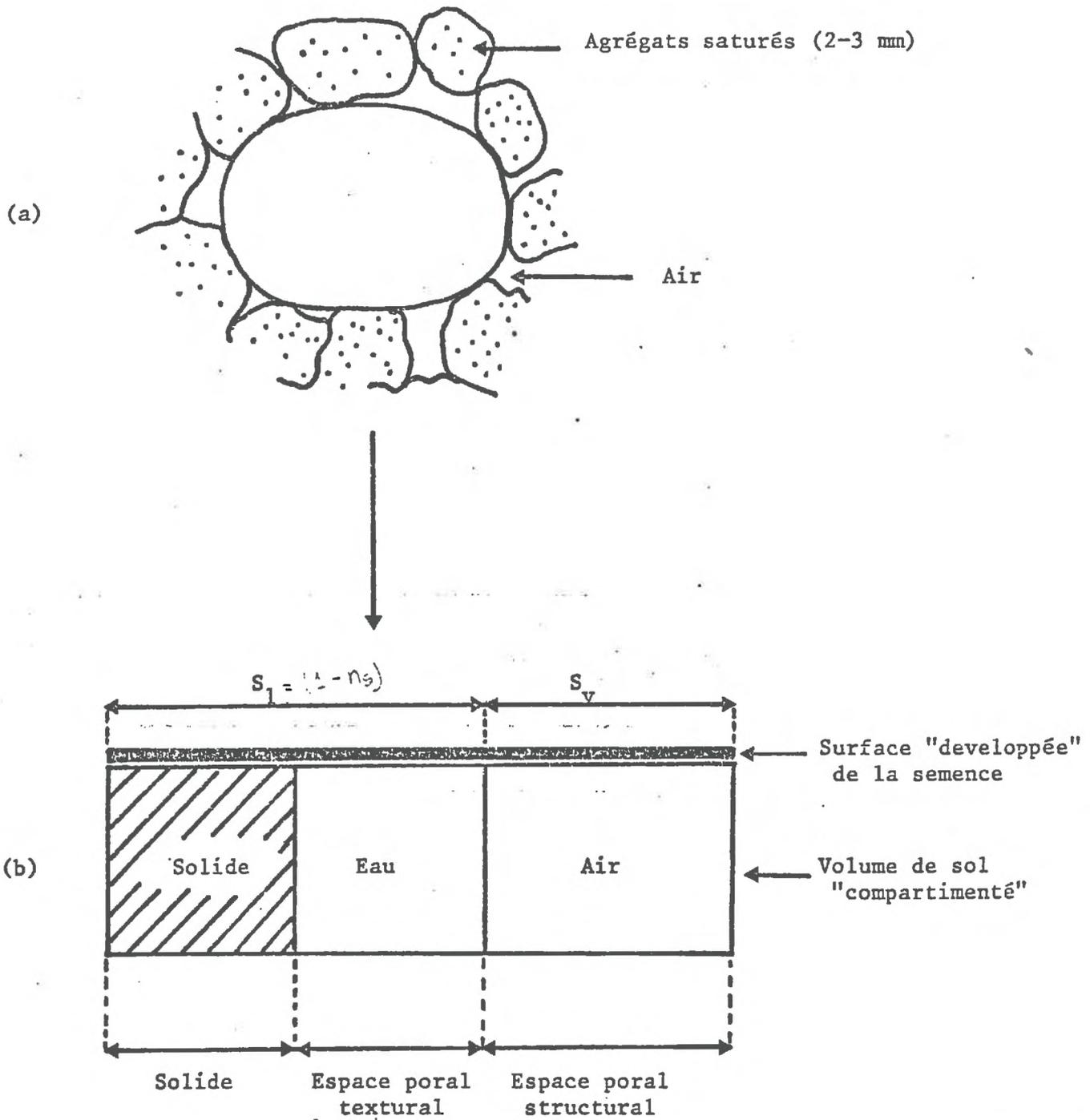
Nous nous sommes appuyés dans ce qui suit sur la notion de système de porosité présentée par P. STENGEL (1979).

Considérons le schéma 10, représentant le cas simple d'une semence placée dans un milieu agrégé (a)), dont les agrégats sont saturés, de petite taille (2-3 mm) et contiennent toute l'eau du système.

On peut décomposer en trois "compartiments" le volume total du milieu agrégé (b)) :

1. le volume de solide
2. le volume poral textural : ce volume ne contient que de l'eau si les agrégats sont saturés, et un mélange "air + eau" s'ils ne le sont pas.
3. le volume poral structural, qui est ici un volume d'air.

(1) Une étude morphologique fine pose des problèmes difficiles, techniques notamment.



SCHEMA 10 : Modélisation du "contact terre-graine".

Remarque : Dans le schéma (b), la limite horizontale inférieure des trois compartiments est arbitraire (le volume peut être illimité).

Si on développe sur une section plane de ce volume une surface égale à la surface totale de la semence, on peut concevoir le "découpage" fictif de celle-ci de la façon suivante (b)). Elle comporte :

- une surface d'imbibition en phase gazeuse, S_v , disposée sur une section plane du volume poral structural (air)

- une surface d'imbibition en phase liquide, S_l , disposée sur une section plane du volume "solide + volume poral textural" saturé. Dans ce cas, il doit exister un film d'eau continu au niveau de la surface S_l .⁽¹⁾ Si le volume poral textural n'est pas saturé, la surface liquide ne représente plus qu'une fraction de la section "solide + volume poral textural". A la limite, si le milieu est absolument sec, $S_l = 0$.

La recherche d'une liaison "état structural - surface d'imbibition" repose donc sur l'hypothèse mécaniste suivante :

Le schéma ("b") constitue un modèle physique du "contact terre-graine". Si le modèle était parfait, on concevrait alors l'existence d'une liaison stricte entre la définition des compartiments du volume de sol et des couples (S_l , S_v). La recherche d'une relation "état structural-surface d'imbibition" sous forme d'une liaison statistique globale permettra précisément d'évaluer la plus ou moins bonne adéquation de ce modèle aux cas expérimentaux choisis.

II CHOIX DE CONDITIONS EXPERIMENTALES ET D'UNE TECHNIQUE DE MESURE.

On minimisera la distance -théorique- entre le cas ("a") et ("b") en plaçant les semences dans des massifs d'agrégats homogènes⁽²⁾ de sorte que l'état structural de l'ensemble du massif soit bien spécifié- et en perturbant le moins possible celui-ci au contact même de la semence, de sorte que cet état structural moyen soit un bon indicateur de celui existant au niveau de l'absorbant. Si on réalise des massifs d'agrégats initialement non tassés et contenant des semences, nous obtiendrons des états structuraux contrastés en soumettant ces massifs à des pressions variables : ceci est obtenu à l'aide d'oedomètres permettant d'exercer une large gamme de pressions (A. FAURE, 1976).

(1) Le mélange "solide + eau" se comporte en effet comme une boue qui humidifie la semence à son contact.

(2) cf. tableau 14.

La figure 17 donne une représentation graphique de la densité des massifs d'agrégats obtenue (γ_d) pour deux séries de couples possibles "énergie-teneur en eau" (E, H_e). Il apparaît notamment que la force exercée sur le matériau n'est jamais suffisante pour paramétrer complètement un état structural : encore faut-il choisir une teneur en eau du matériau.

Dans notre cas, ce choix est fait selon deux axes. D'une part, l'humidité doit être suffisamment élevée pour pouvoir atteindre le domaine des fortes densités (structure continue).

D'autre part, elle doit réaliser des conditions d'alimentation en eau non limitantes afin que la "surface équivalente" précédemment définie ait en fait le sens d'une surface réelle d'imbibition (cf. chapitre II).

En choisissant $H_e = 0,20$, cette deuxième condition est remplie si l'on considère l'ordre de grandeur de K_e à cette humidité (tableaux 6 et 7) et le fait que la cinétique d'imbibition des semences est unique, que l'on choisisse $H_e = 0,20$ ou $H_e = 0,11$, comme l'illustre la figure 18. Si la valeur K_e pour $H_e = 0,20$ était limitante, elle le serait nécessairement plus pour $H_e = 0,11$ et l'imbibition serait plus lente dans ce deuxième cas, ce qui n'est pas réalisé.

Remarquons que cette identité des cinétiques pour $H_e = 0,11$ ou $H_e = 0,2$ est parfaitement compatible avec le calcul d'ordre de grandeur que nous avons effectué au cours du chapitre II.

Nous choisissons donc une valeur $H_e = 0,20$, pour une gamme de pression appliquée allant de 0 -énergie minimale apportée au système, disposition manuelle des agrégats autour de la semence- à une valeur permettant d'obtenir une structure continue autour de la semence-contact "parfait" sol-semence-.

Nous mesurerons les teneurs en eau des semences au bout de temps courts -0 à 6 h- afin de pouvoir toujours négliger le potentiel de l'eau du sol par rapport à celui de la semence. A partir de la teneur en eau de la semence, nous déterminerons la valeur du couple (S_1, S_v) permettant d'absorber cette quantité d'eau au bout d'un temps donné en utilisant le modèle additif présenté.

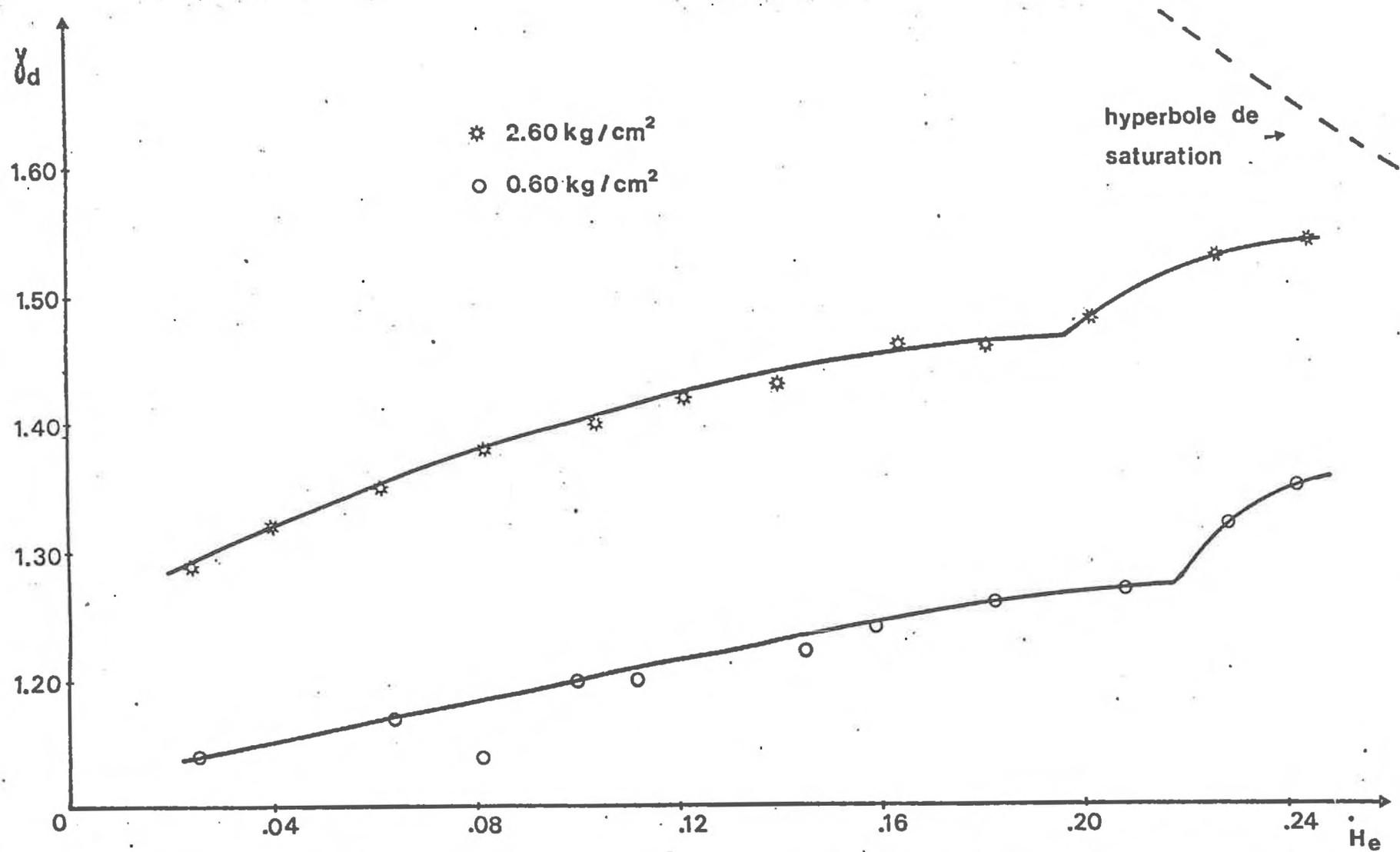


FIGURE 17 : Densité des massifs d'agrégats (2-3 mm) en fonction de l'humidité massique du matériau (2 niveaux d'énergie).

Remarque : l'hyperbole de saturation correspond à un système à deux phases, solide et eau.

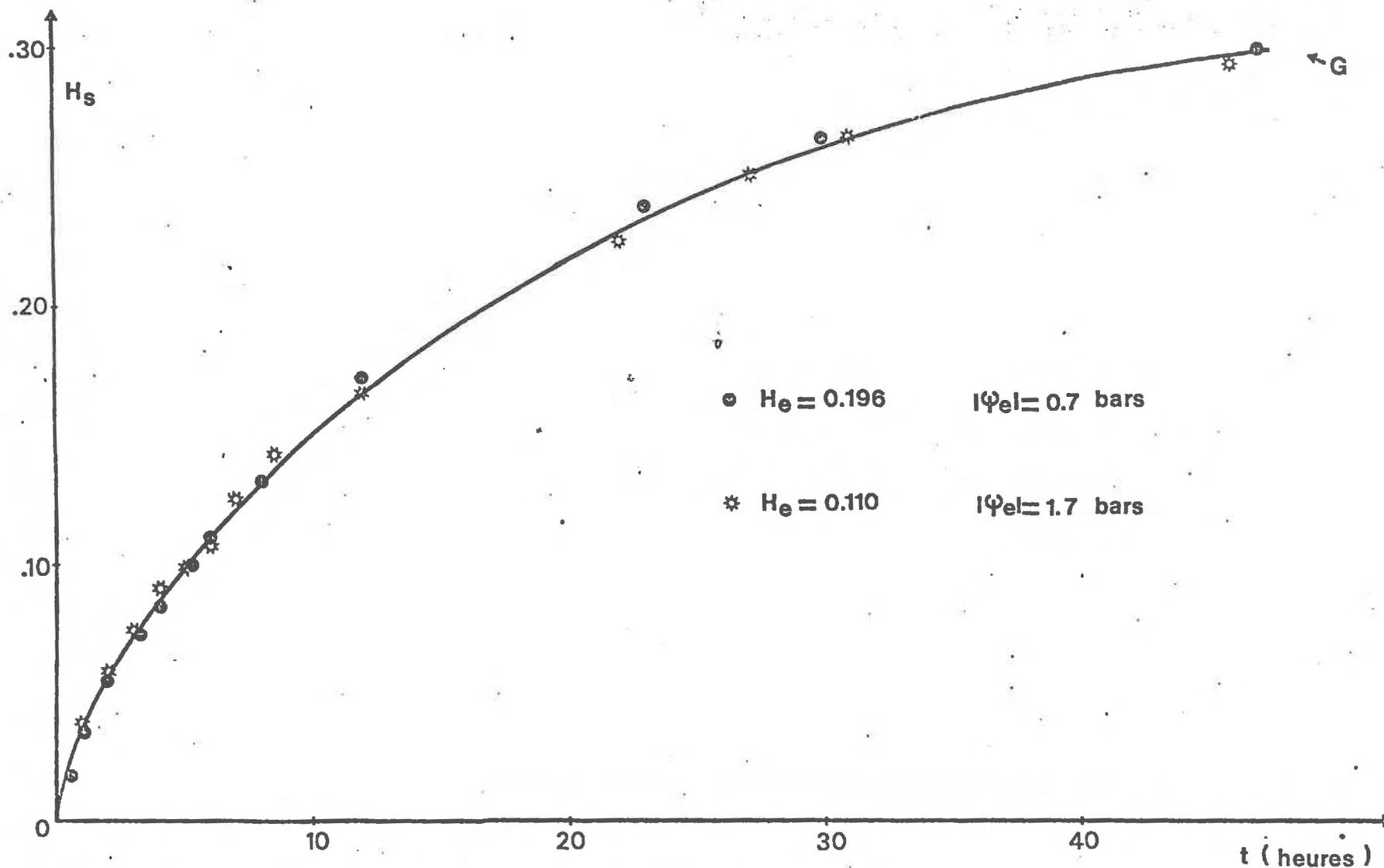


FIGURE 18 : Imbibition dans des massifs d'agrégats à deux humidités.

($H_e = 0,196$, $n = 20$, $\sigma_{H_s} \leq 0,009$; $H_e = 0,110$, $n = 20$, $\sigma_{H_s} \leq 0,008$)

(La ligne continue est approximative)

III ANALYSE DU SYSTEME DE POROSITE.

L'analyse du système de porosité, telle que nous l'avons succinctement présenté, doit nous permettre d'obtenir trois mesures de porosité :

- Porosité totale (n)
- Porosité structurale (n_s)
- Porosité texturale (n_t)

Rapportées à l'ensemble du massif d'agrégats contenant les semences, ces valeurs sont additives et on écrira : $n = n_s + n_t$

Ces valeurs s'expriment de la façon suivante :

$$n = 1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s} \quad n_s = 1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_a}$$

$$n_t = \gamma_d \left(\frac{1}{\gamma_a} - \frac{1}{\gamma_s} \right)$$

avec γ_d = densité du volume d'agrégats
 γ_a = densité d'un agrégat
 γ_s = densité de solide

γ_s densité de solide, est une constante mesurée expérimentalement ; γ_d est mesurée sur chaque massif d'agrégats après compression oedométrique.

La figure 19, courbes de retrait du sol de Montluel sur agrégats et sur structure continue (variations du volume du matériau en fonction de son humidité), permet de connaître la valeur γ_a lorsque $H_e = 0,20$ (On remarquera que les valeurs γ_a sur agrégats ou sur structure continue sont pratiquement confondues : nous pouvons donc bien considérer que les agrégats de 2-3 mm sont définis par un seul type de porosité de "type textural"). Nous supposons que γ_a est une constante, autrement dit, qu'il n'y a pas de modification de l'arrangement textural au cours de la compression (Ceci semble raisonnable sauf pour la plus forte valeur de la pression utilisée 10 kg/cm^2 : dans ce cas, s'il y a modification texturale, on aura $\gamma_d > \gamma_a$).

Ainsi, en nous appuyant sur le schéma 10, nous chercherons à corréler les couples $(1 - n_s ; S_1)$

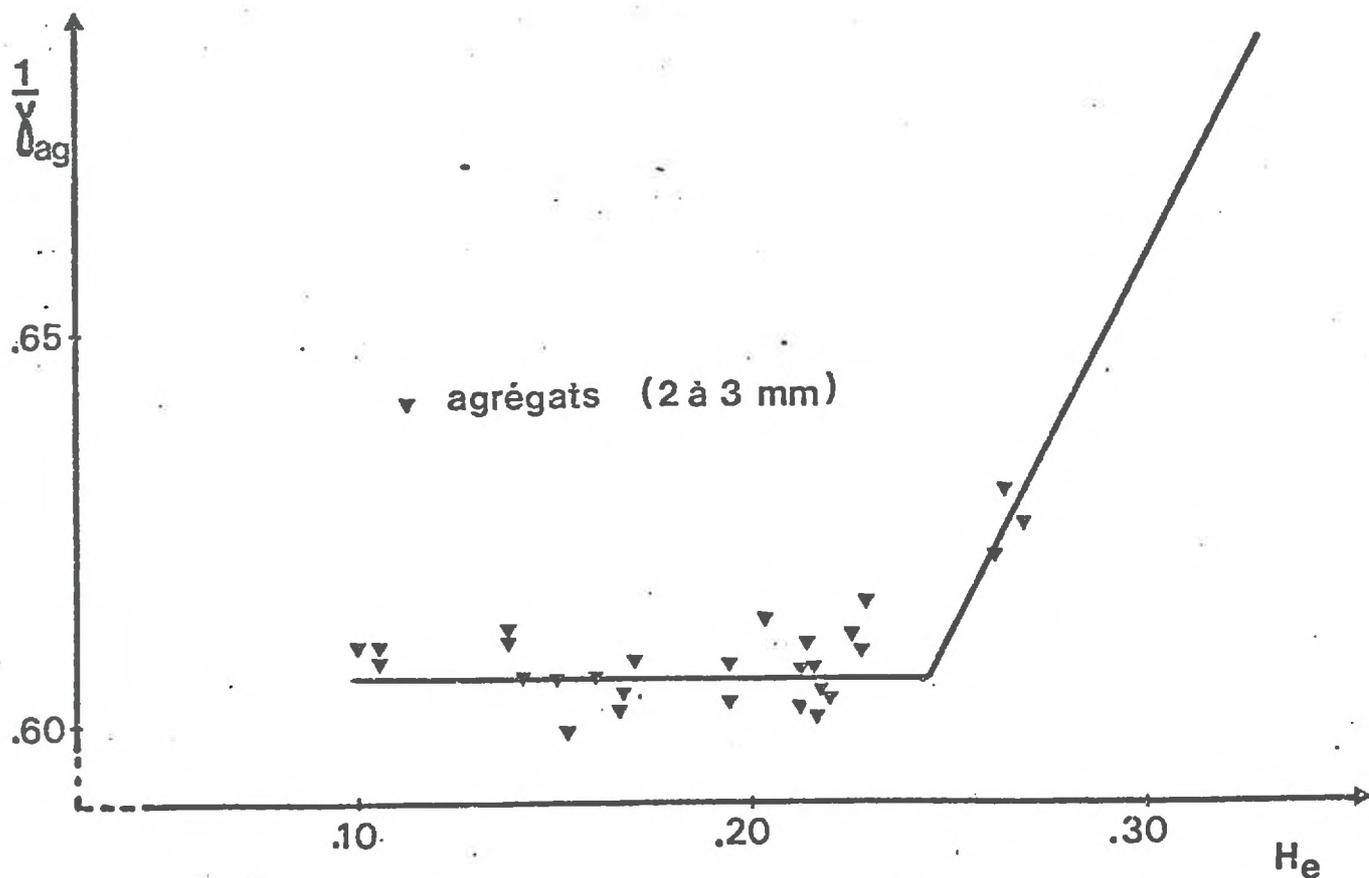
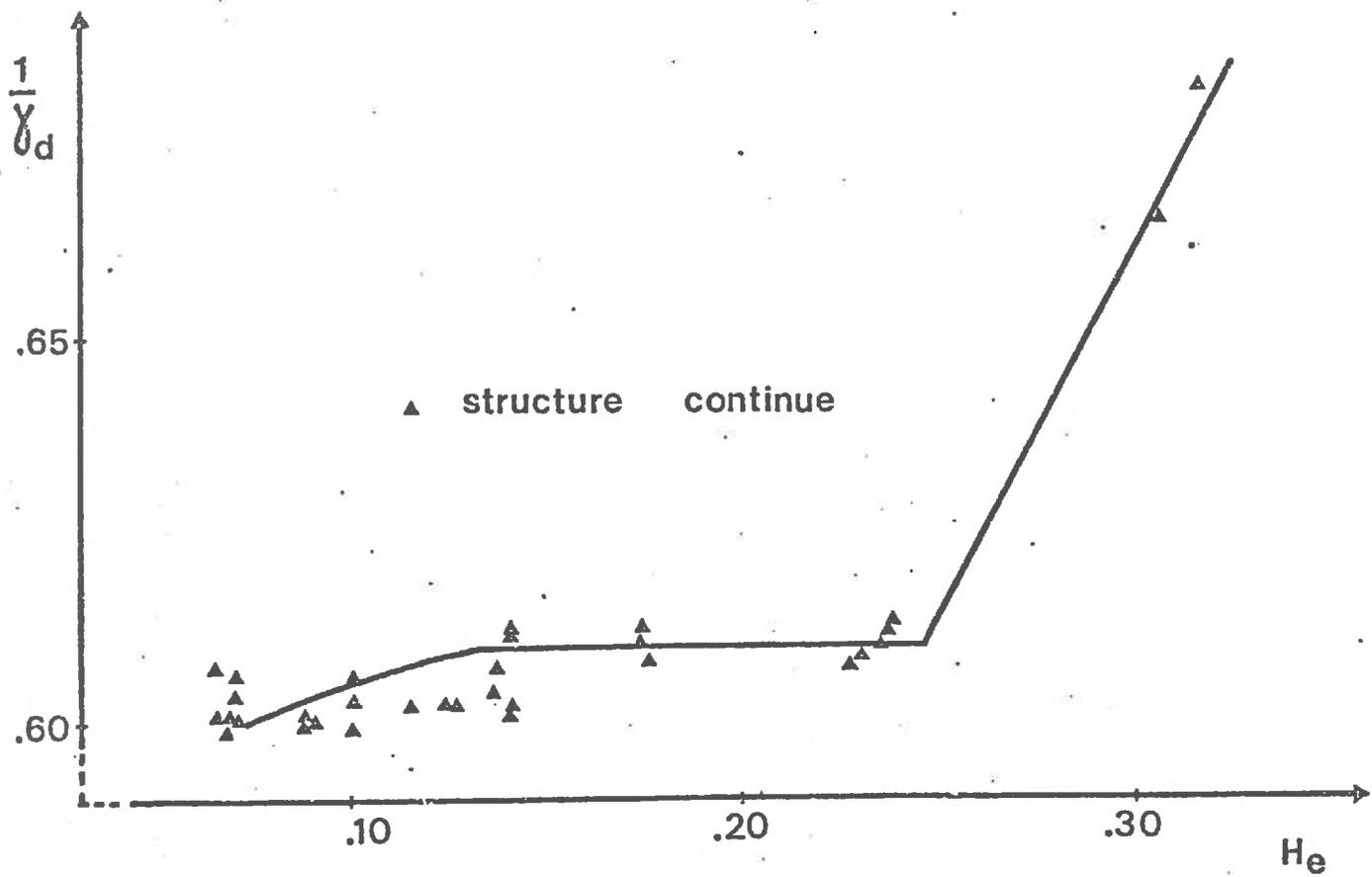


FIGURE 19 : Courbes de retrait sur structure continue et sur agrégats (Variation de volume du matériau en fonction de l'humidité massique. Sol de Montluel).

Remarque : Pour $H_e > 0,246$, la pente de la courbe est posée égale à 1 (droite de HAINES)

Pour une valeur γ_d donnée, les mesures de H_s sont effectuées sur cinq semences pour chaque durée d'imbibition ce qui permet d'obtenir vingt valeurs de H_s pour chaque état structural défini.

Le calcul de S_1 est effectué en posant $\psi_e = 0$; $Hr_e = 1,00$;
 $S_1 + S_v = S_t$, à partir de l'expression $(\frac{dH_s}{dt})_t$ intégrée. (1)

IV ANALYSE DE LA RELATION "SYSTEME DE POROSITE-SURFACE D'IMBIBITION".

En travaillant toujours sur des agrégats de 2-3 mm portés à une humidité approximative $H_e \approx 0,20$ (Sol de Montluel), nous avons réalisé une série d'états structuraux. Le tableau 14 donne les paramètres physiques des systèmes de porosité correspondants ainsi que les surfaces d'imbibition liquides calculées dans chacun de ces "systèmes terre-graine". Pour la construction de ce tableau, rappelons que toute augmentation de densité apparente est traduite uniquement par une réduction de porosité structurale.

Comme nous l'avons indiqué, nous avons orienté la démarche vers la recherche d'une liaison $(1 - n_s ; S_1/S_t)$, liaison qui peut également être interprétée comme un véritable "modèle de substitution" qui consiste à remplacer sans perturbation un volume d'agrégats par un égal volume de semence (schéma 11).

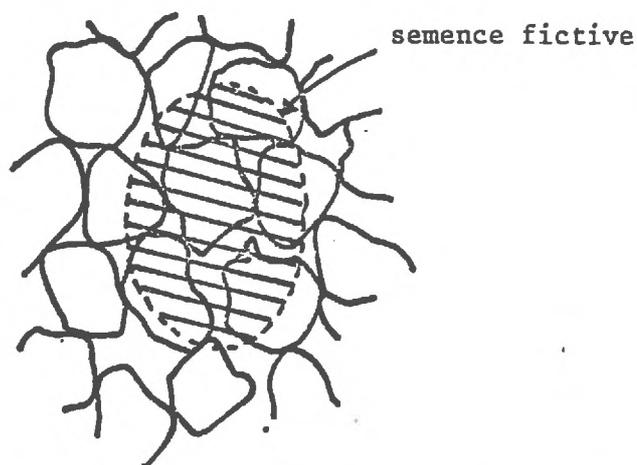


Schéma 11 : Substitution d'une semence à un volume d'agrégats.

(1) Nous n'avons pas développé ce calcul algébrique relativement simple mais long et fastidieux : il permet d'obtenir l'expression $H_s = f(S, t)$ pour laquelle S_{ov} ou S_{ol} sont les seules inconnues.

Pression oedométrique (Kg/cm ²)	H _e	γ _d	Porosité totale (n)	Porosité texturale (n _t) (1)	Porosité structurale (n _s)	1 - n _s	S ₁ /S _t	
							μ	σ
0	0,196 (0,001)*	0,880 (0,020)	0,678 (0,008)	0,214 (0,005)	0,464 (0,013)	0,536	0,340	0,057
0,130	0,182 (0,003)	1,080 (0,006)	0,607 (0,020)	0,262 (0,001)	0,346 (0,003)	0,654	0,476	0,064
0,390	0,215 (0,006)	1,290 (0,003)	0,531 (0,001)	0,313 (0,008)	0,218 (0,002)	0,782	0,547	0,070
0,390	0,235 (0,004)	1,387 (0,009)	0,499 (0,006)	0,336 (0,002)	0,160 (0,005)	0,840	0,594	0,069
2,599	0,188 (0,001)	1,507 (0,002)	0,452 (0,009)	0,365 (0,006)	0,086 (0,001)	0,914	0,665	0,073
10,395	0,211 (0,005)	1,669 (0,006)	0,393 (0,002)	0,393 (0,002)	0	1,000	0,818	0,115

Tableau 14 : Effet de l'état structural sur la réalisation d'une surface d'imbibition liquide.

* Les chiffres entre parenthèses indiquent les écarts-types.

(1) La porosité texturale est rapportée à l'ensemble du volume agrégé. Ceci explique ses variations.

En condensant les résultats du tableau 14, on peut construire la régression linéaire suivante (figure 20) :

$$S_{ol}/S_{ot} = 0,94 (1 - n_s) - 0,16$$

$$r = 0,89 \quad r^2 = 0,80$$

$$n = 94$$

Le choix d'une forme linéaire provient du schéma théorique proposé ; quant aux coefficients, seule leur analyse nous permettra de préciser le sens de la régression obtenue.

Le coefficient $a = 0,94$, proche de 1, valide a posteriori le choix des variables $(S_{ol}/S_{ot}, 1 - n_s)$. Dans le cas d'un sol permettant une alimentation non limitante, le terme $(1 - n_s)$ est un bon estimateur de la surface d'imbibition liquide fonctionnelle, au moins dans le cas de milieux agrégés homogènes.

Le coefficient négatif $b = -0,16$ ne fait que traduire un phénomène bien visible sur le tableau 14. La valeur numérique du rapport S_1/S_t est toujours inférieure à la valeur du paramètre $(1 - n_s)$. Nous avons prévu cette possibilité en avançant que dans le cas où les agrégats ne sont pas saturés (c'est le cas de cette manipulation), le terme $(1 - n_s)$ doit surestimer la surface liquide réelle d'imbibition. En prolongeant le raisonnement, on doit aussi conclure que le terme S_1/S_t doit prendre la valeur 1 lorsque le milieu est continu ($n_s = 0$) et saturé autour de la semence. Tout doit alors se passer comme si la semence était entourée d'un film d'eau continu ; c'est effectivement selon ce schéma que s'effectue l'imbibition dans un sol saturé à structure continue (figure 21), dont les caractéristiques sont données par le tableau 15.

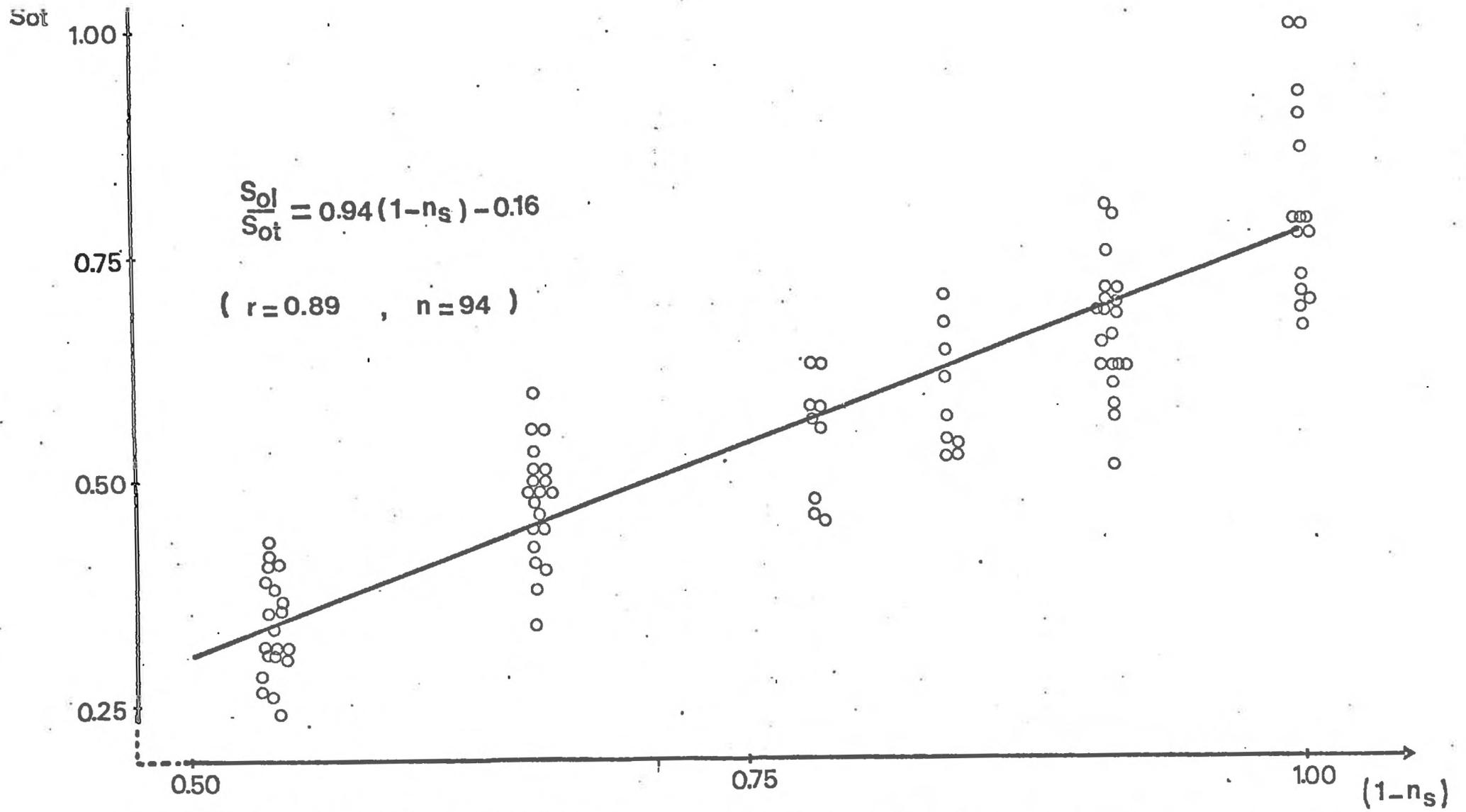


FIGURE 20 : Rôle de l'état structural autour de la semence sur la définition d'une surface liquide
 d'imbibition : $S_{ol}/S_{ot} = f(1 - n_s)$

γ_d	H_e	θ_e	n	S_1/S_t
1,637	0,250	0,409	0,405	1,00
(0,006)	(0,008)	(0,012)	(0,002)	

Tableau 15 : Effet d'une structure saturée et continue sur la détermination d'une surface d'imbibition. (moyenne sur 6 massifs continus - 30 semences).

Le milieu est saturé puisque $\theta_e = n$, et à porosité structurale nulle : en effet, la porosité texturale du matériau est égale à 0,400 et on a donc $n = n_t$.

On peut donc interpréter le coefficient $b = -0,16$, comme une diminution de la surface d'imbibition par rapport à la prévision $(1 - n_s)$ due à la non saturation des éléments structuraux. Si l'on admet que $0,94 \neq 1$, la valeur 0,16 correspond à la fraction S_1/S_t non fonctionnelle lorsque $n_s = 0$ (structure continue, contact "parfait", milieu non saturé)⁽¹⁾. Dans ce cas, le terme à corrélérer ne doit plus être $(1 - n_s)$ mais $[(1 - n_s) - 0,16 (1 - n_s)]$. En appliquant ce terme correctif à chaque état structural, on peut construire le tableau 16.

Malgré la correction introduite, on maintient un décalage presque systématique entre les deux variables S_1/S_t et $(1 - n_s)$ ($1 - 0,16$). Sans pousser plus avant l'analyse, nous interprèterons ce dernier comme une perturbation systématique de l'état structural autour de la semence induite par l'introduction d'un élément de grande taille : la semence, précisément.

Remarque : Certains auteurs (COLLIS GEORGE) ont cherché à rendre compte de l'effet de l'humidité du sol sur la détermination d'une surface d'imbibition en modélisant le sol par un ensemble de billes entourant la semence. Dans ce cas, la surface d'imbibition au niveau du contact "bille-semence" est déterminée par les dimensions du ménisque défini à ce niveau, lui-même fonction de l'humidité du sol (Plus le sol est sec, plus le diamètre du ménisque diminue - schéma 12).

(1) cette valeur particulière 0,16 doit évidemment changer si l'humidité H_e est modifiée.

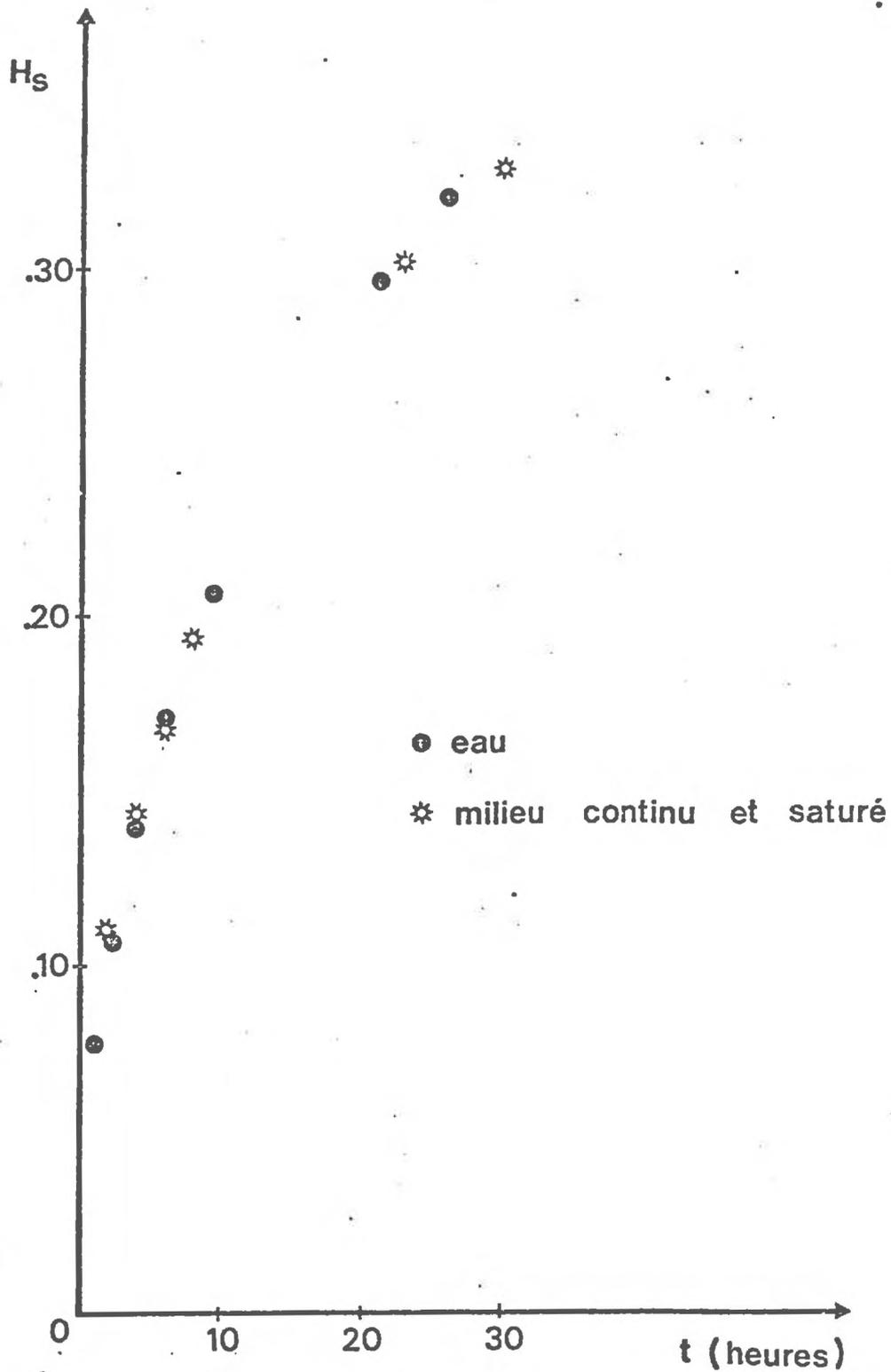


FIGURE 21 : Comparaison des cinétiques d'imbibition dans un volume d'eau et dans un milieu continu et saturé

(eau : $n = 10$, $\sigma_{H_s} \leq 0,016$; milieu saturé et continu : $n = 30$

$\sigma_{H_s} \leq 0,009$)

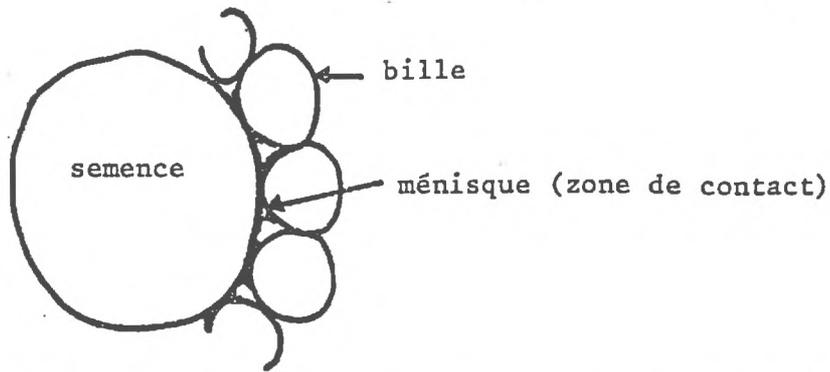


Schéma 12 : "Contact terre-graine" simulé par un système de billes.

Si un tel schéma peut être un modèle dans le cas de sols très sableux, il n'est absolument pas pertinent dans le cas de milieux agrégés poreux ; en effet, un tel modèle prévoit une réduction extrêmement rapide de la surface d'imbibition pour des variations restreintes de potentiel, ce qui n'est pas le cas.

L'intérêt de ce schéma est cependant de montrer que dans le cas des sols très sableux, la réduction de surface d'imbibition, parallèle à la chute de conductivité, doit être très brutale. On doit ainsi pouvoir définir deux domaines d'humidité contrastés qui délimitent des conditions "favorables" ou "défavorables" d'imbibition.

V CONCLUSION PARTIELLE.

Au cours d'une première partie de ce chapitre, nous avons montré que la surface d'imbibition était une variable de l'humectation et que celle-ci pouvait être insérée dans un modèle construit à partir des lois de diffusion.

En adoptant une démarche différente, nous avons utilisé un outil d'analyse pour expliciter les liaisons "état structural-vitesse d'humectation", autrement dit, le "contact terre-graine". Il apparaît que celui-ci est toujours réductible à une conséquence de l'arrangement des éléments structuraux autour de la semence sur la détermination d'une surface d'imbibition liquide. En particulier, la porosité structurale (n_s) permet, dans le cas de milieux homogènes (une seule classe d'éléments structuraux) de construire des indicateurs du contact "terre-graine".

γ_d	$(1 - n_s)$	$(1 - n_s) (1 - 0,16)$	s_1/s_t
0,880	0,536	0,450	0,340
1,080	0,654	0,549	0,476
1,290	0,782	0,657	0,547
1,387	0,840	0,706	0,594
1,507	0,914	0,768	0,665
1,669	1,000	0,840	0,818

Tableau 16 : Relation "corrigée" entre le système de porosité et la détermination d'une surface d'imbibition.

On pourrait multiplier les essais, mais il semble beaucoup plus pertinent à l'avenir de passer à une troisième étape : utiliser les cinétiques d'imbibition des semences comme des marqueurs de l'état structural vis-à-vis d'un phénomène bien spécifié, afin de pouvoir ébaucher une typologie des lits de semences au champ. (Rappelons cependant que toute extrapolation des conclusions acquises est fortement conditionnée par les connaissances initiales relatives au fonctionnement de la surface de la semence).

Avant de rediscuter ces thèmes de travail, nous proposons une première ébauche des réponses de la semence correspondant à des états structuraux choisis a priori.

C. SYNTHÈSE SUR LES RELATIONS "ÉTAT STRUCTURAL-HUMIDITÉ-CONTACT TERRE-GRAINE".

I "CONTACT TERRE-GRAINE" et HUMIDITÉ.

Il est clair que la qualification d'un "contact terre-graine" n'a aucun intérêt si elle n'est associée à une notation d'humidité au contact de la semence. Ceci est particulièrement net si l'on considère les cas limites d'une structure continue, soit saturée ($S_1/S_t = 1$), soit totalement sèche ($S_1/S_t = 0$). Au cours du passage progressif d'un cas à l'autre, plusieurs facteurs peuvent perturber une liaison "état structural-surface d'imbibition" du type de celle dégagée plus haut.

a) Pour un état structural donné, le sol se desséchant, la surface d'imbibition liquide doit décroître (réduction du nombre de pores fonctionnels).

b) Le tassement du sol devenant de plus en plus difficile (cf. figure 22), la gamme d'états structuraux possible se réduit.

c) Enfin, l'alimentation en eau devenant limitante (rôle des paramètres K_e et ψ_e), c'est l'ensemble des termes (S_1/S_t , ψ_e , K_e) qui déterminera une cinétique d'humectation. Dans le cas particulier de notre modélisation, le terme S_1 perdra le sens d'une surface réelle pour acquérir celui de surface équivalente.

En se basant sur ces constats, nous construirons une première ébauche d'une typologie des réponses des semences aux couples "humidité-état structural".

II CONSTRUCTION D'UNE TYPOLOGIE DES REPONSES ET ANALYSE DES RESULTATS.

(tableau 17)

En définissant des limites relatives au caractère limitant -ou non- de la teneur en eau du matériau vis-à-vis de l'imbibition et à l'état structural du lit de semences, le tableau 17 définit une gamme de réponses en termes de possibilité de germination et d'heure probable de réalisation de celle-ci (figure 22).

Outre le caractère discriminant des couples "humidité-état structural" sur la cinétique résultante (rapport de 1 à 2,5 en restant dans le domaine non limitant), il apparaît que la prévision des cinétiques d'humectation dans le cas de "sols secs" est actuellement impossible sur la base des conclusions acquises. Ce cas des "sols secs", qui renvoie immédiatement à l'analyse du couple (ψ_e , K_e), constituera l'objet de notre prochain chapitre.