



HAL
open science

L'imbibition et la germination des semences en conditions seches. Influence des caracteres physiques du lit de semences

Laurent Bruckler

► **To cite this version:**

Laurent Bruckler. L'imbibition et la germination des semences en conditions seches. Influence des caracteres physiques du lit de semences. Sciences du Vivant [q-bio]. Institut National Agronomique Paris Grignon, 1979. Français. NNT: . tel-02859594

HAL Id: tel-02859594

<https://hal.inrae.fr/tel-02859594>

Submitted on 8 Jun 2020

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

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

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.

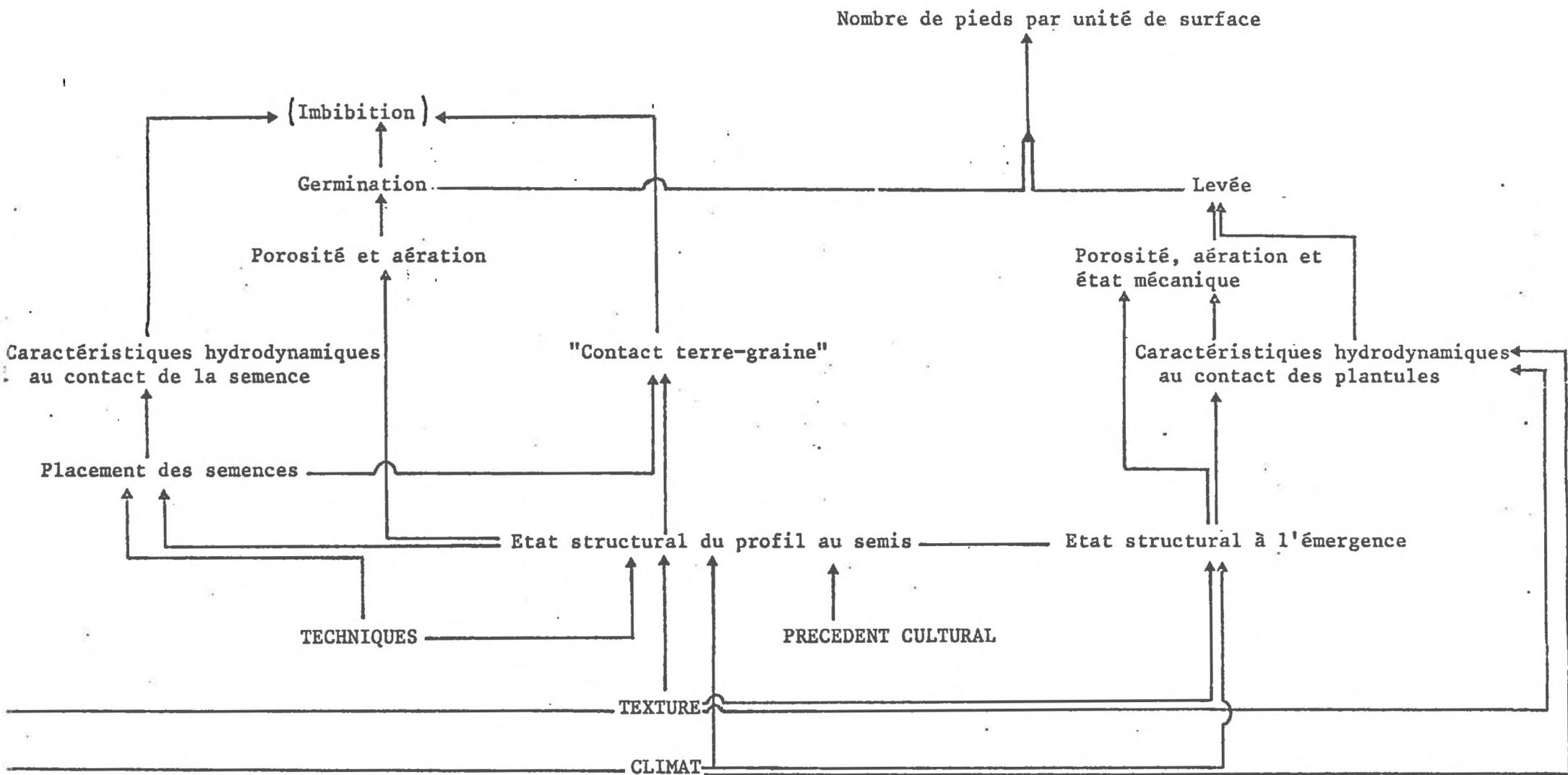
D'une part, il devra choisir des conditions de mise en contact du sol et de la semence qui ne soient pas limitantes vis-à-vis de la germination -sauf l'alimentation hydrique-. Ces conditions seront relatives au choix d'une température et à l'oxygénation des semences.

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 ($T = 20^{\circ}\text{C}$).



(lire le schéma en commençant par le bas)

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

(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.

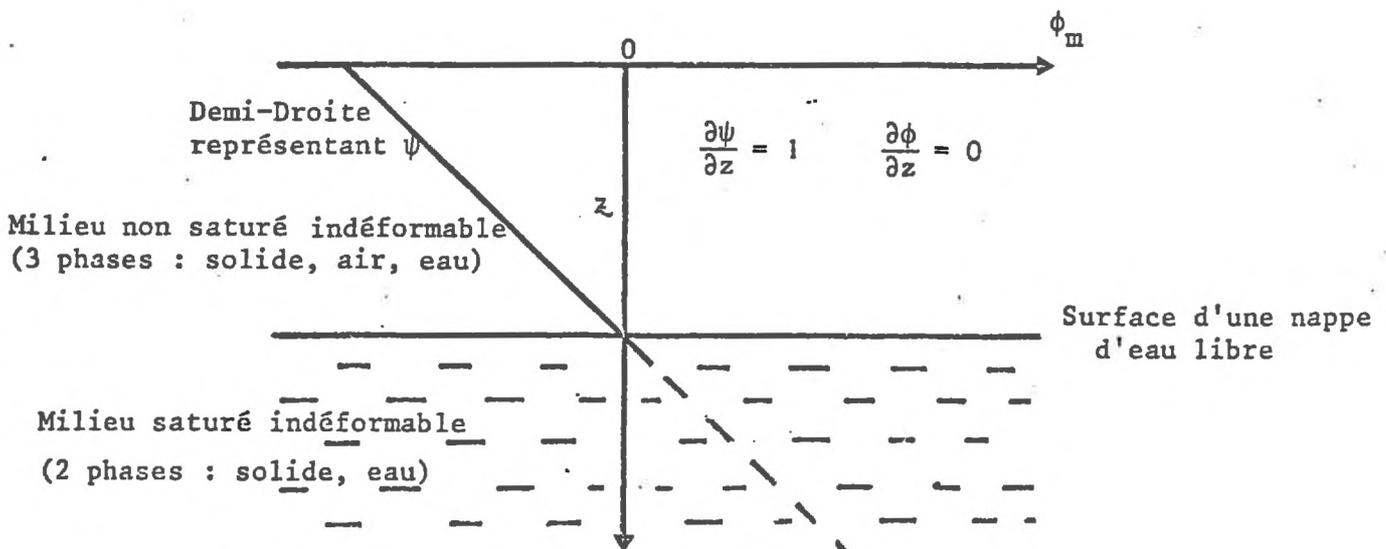


Schéma 2 : Représentation d'un état d'équilibre.

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 semencés, 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 $\left(\frac{\partial \theta}{\partial z}\right)$, 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 :

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

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 $\Delta H_s = 0,02$.

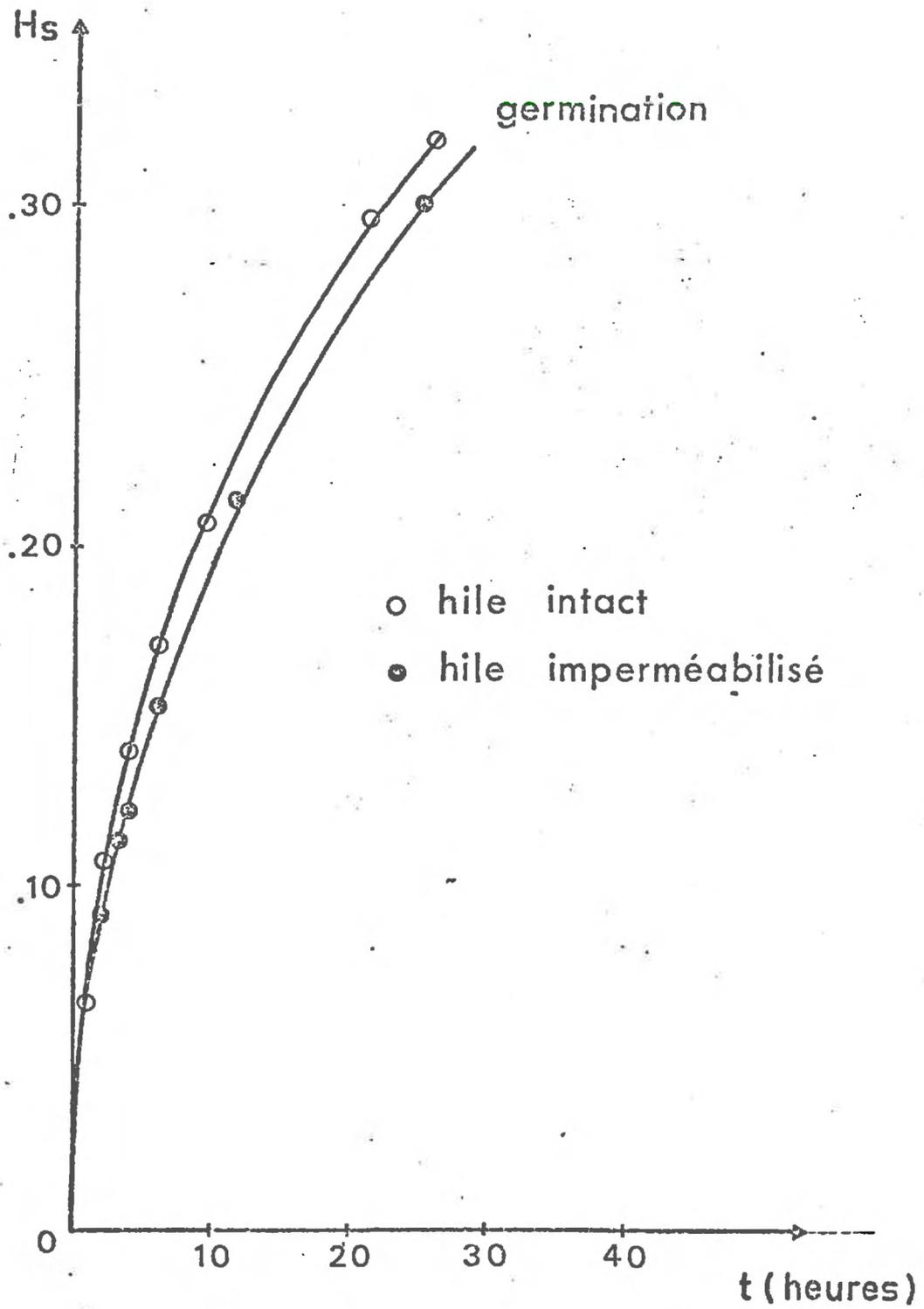


FIGURE 1 : Rôle du hile sur la vitesse d'imbibition en phase liquide :
Humidité de la semence en fonction du temps
($n = 10, \sigma_{H_s} \leq 0,016$).

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 : $m_t = m_e + m_m$

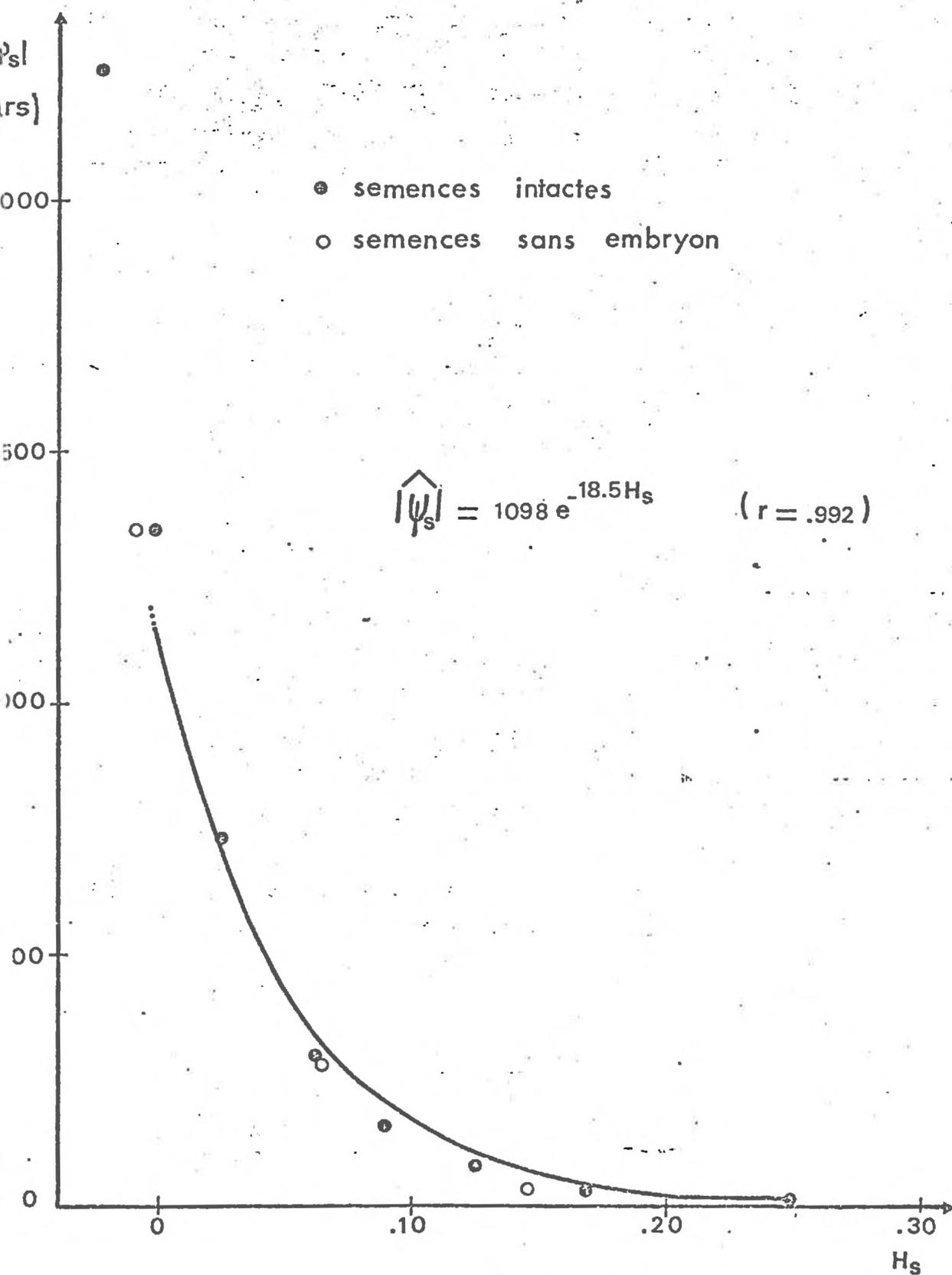


FIGURE 2 : Potentiel ψ_s de la semence de maïs en fonction de sa teneur en eau : Semences avec et sans embryon ($\sigma H_s \leq 0,005$).

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 travaillons 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.

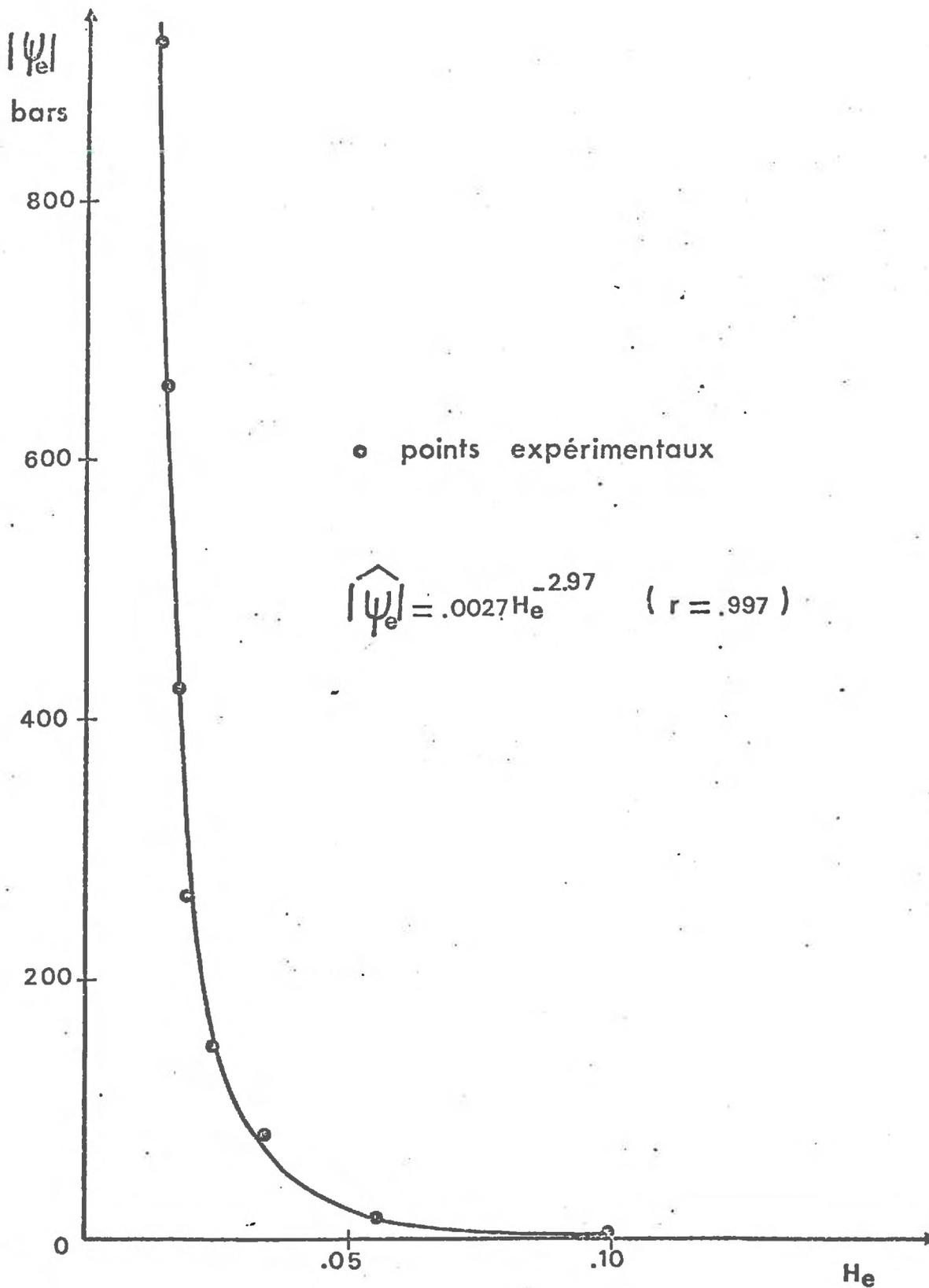


FIGURE 3 : Potentiel du sol en fonction de sa teneur en eau : Sol de Montluel - Equilibres en phase gazeuse ($\sigma H_e \leq 0,007$)

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 $D(H_s)$.

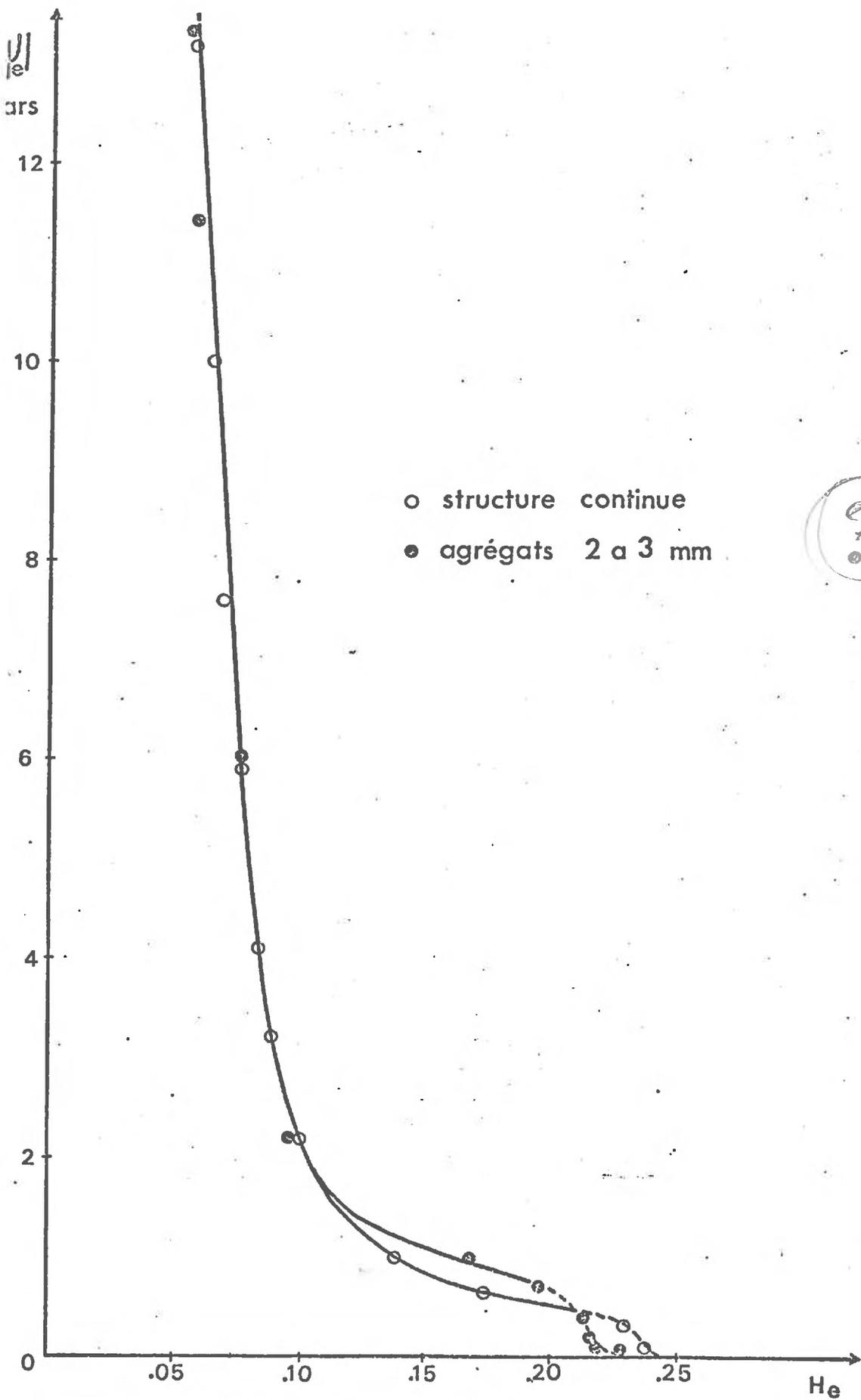
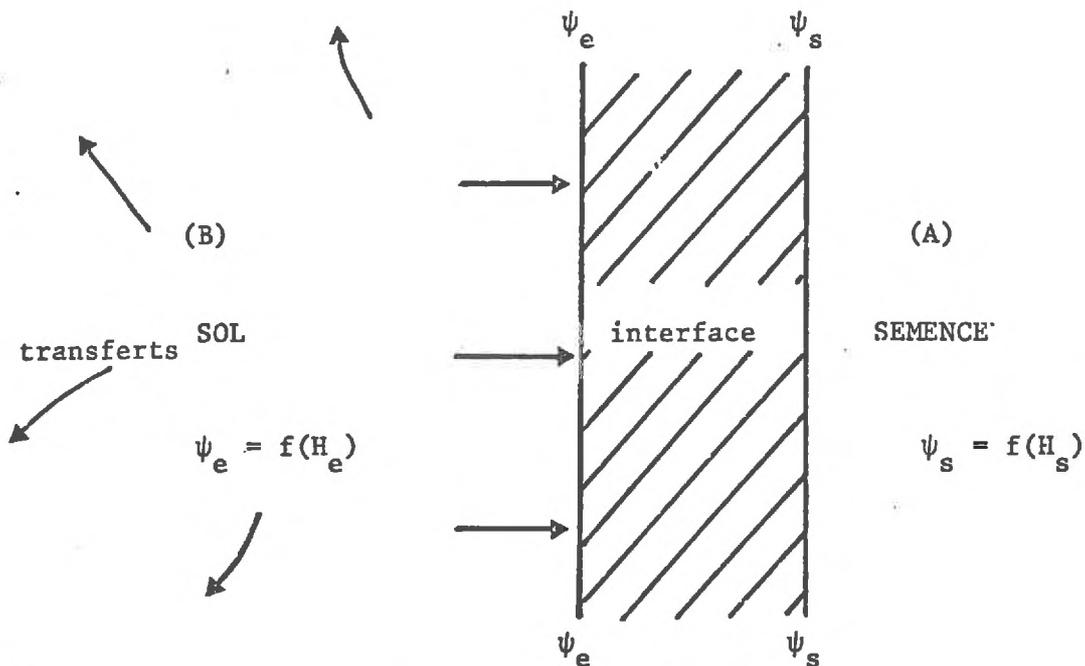


FIGURE 4 : Potentiel du sol en fonction de sa teneur en eau : Sol de Montluel - Mesures sur presse Richard.

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).

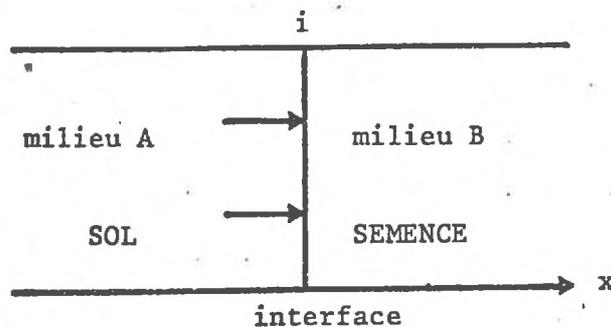


Schéma 4 : Schéma à 2 compartiments.

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 :

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

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

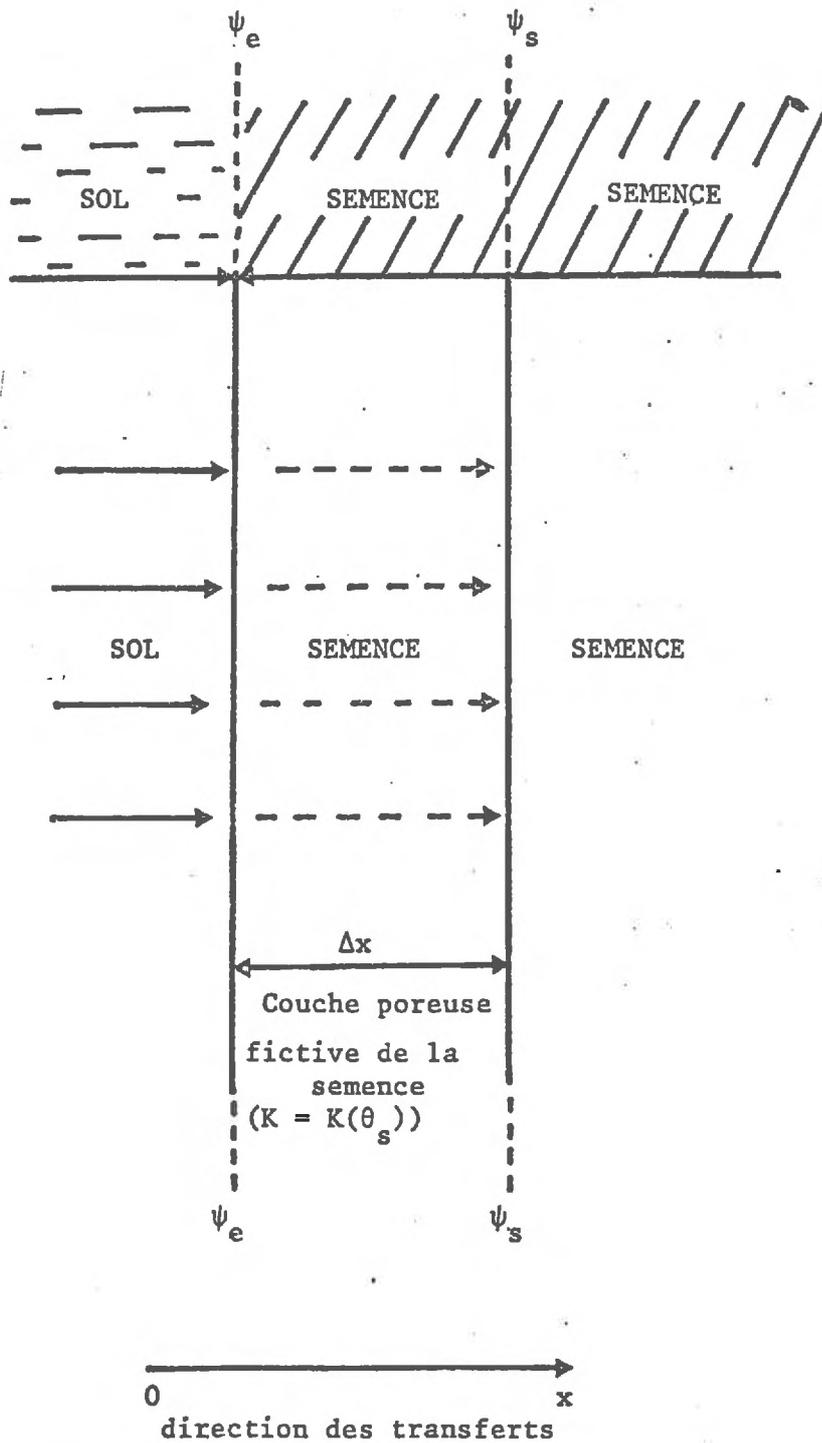
$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = -K(\theta_s) S \frac{\Delta \psi}{\Delta x} \quad (4)$$

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'écrit :

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

$\overline{K_{AB}}$, 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

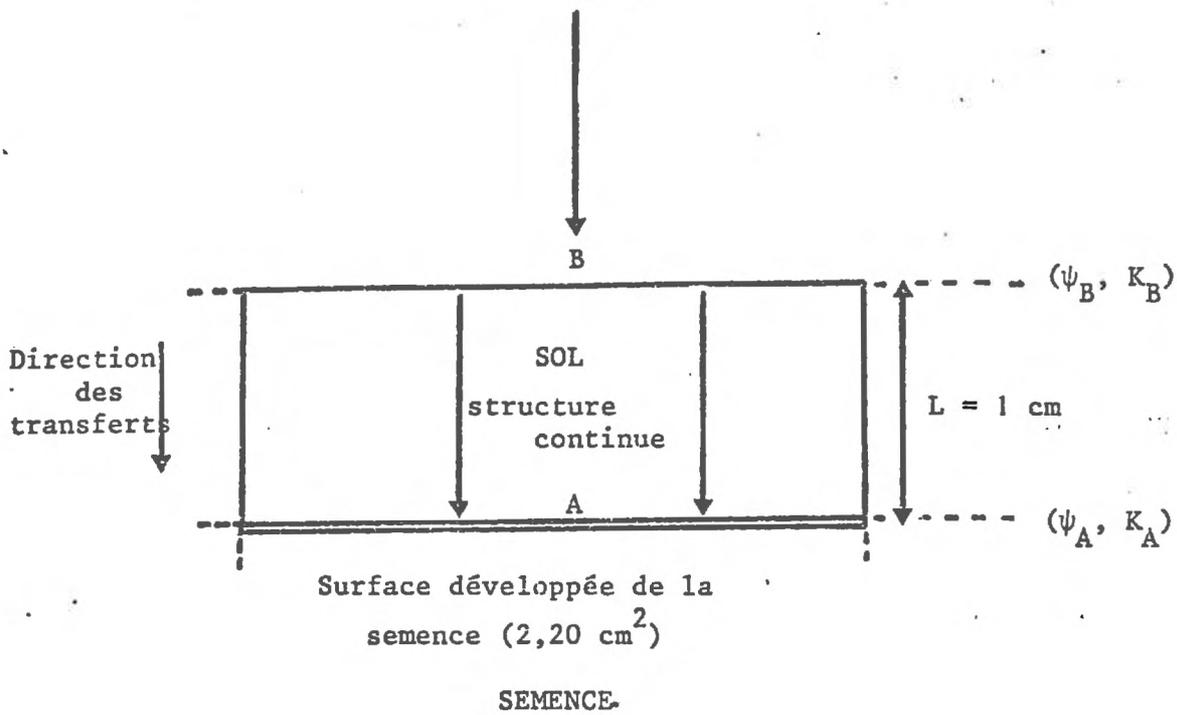


Schéma 6 : Transferts d'eau vers la semence.
Calcul d'ordres de grandeur.

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} indécélérables 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. Écriture 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 :

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

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

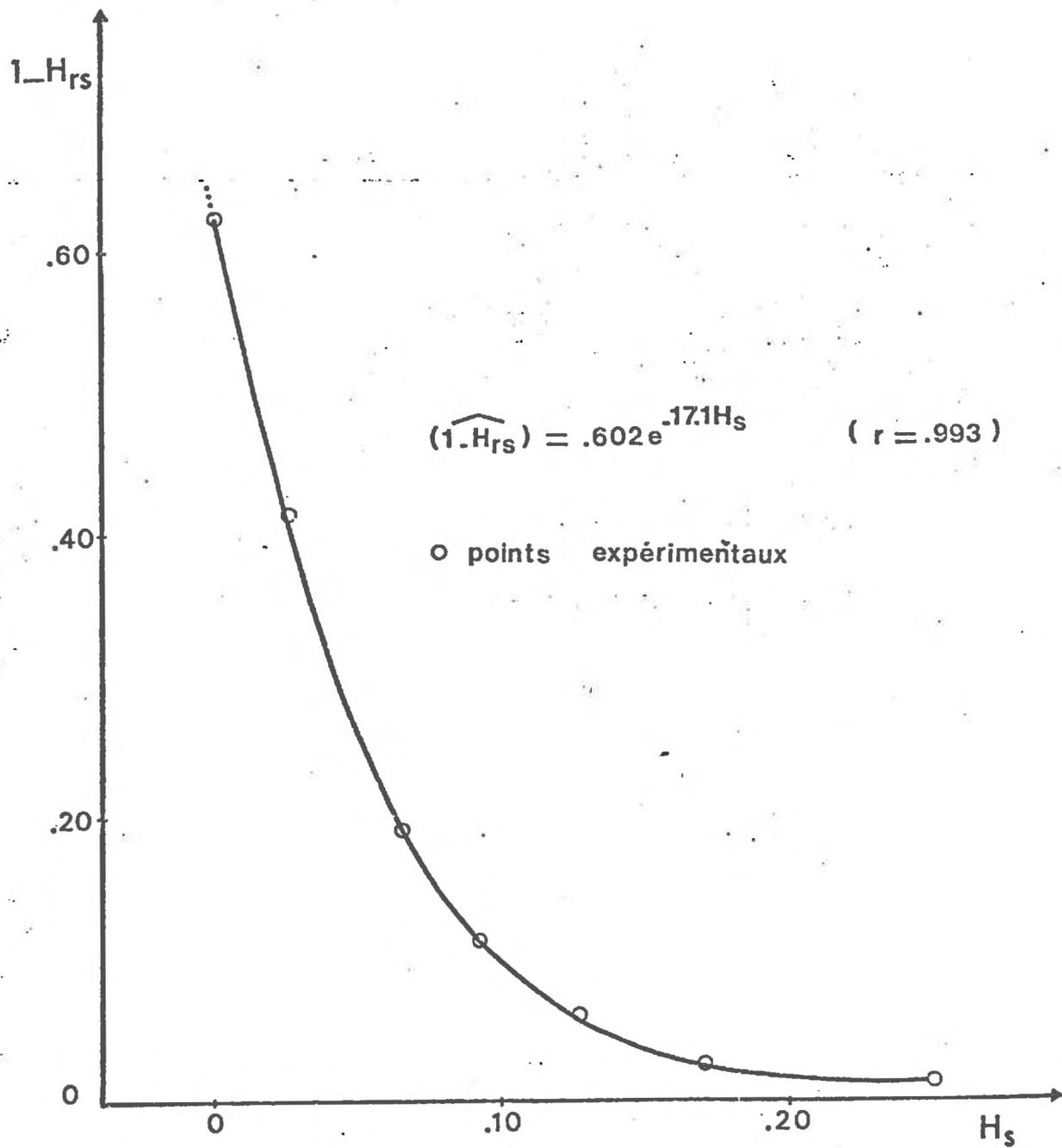


FIGURE 5 : Différence entre l'humidité relative d'une vapeur saturante et l'humidité relative équivalente de la semence ($1 - H_{rs}$) en fonction de l'humidité de la semence (H_s)
 $(\sigma_{H_s} \leq 0,005)$

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.

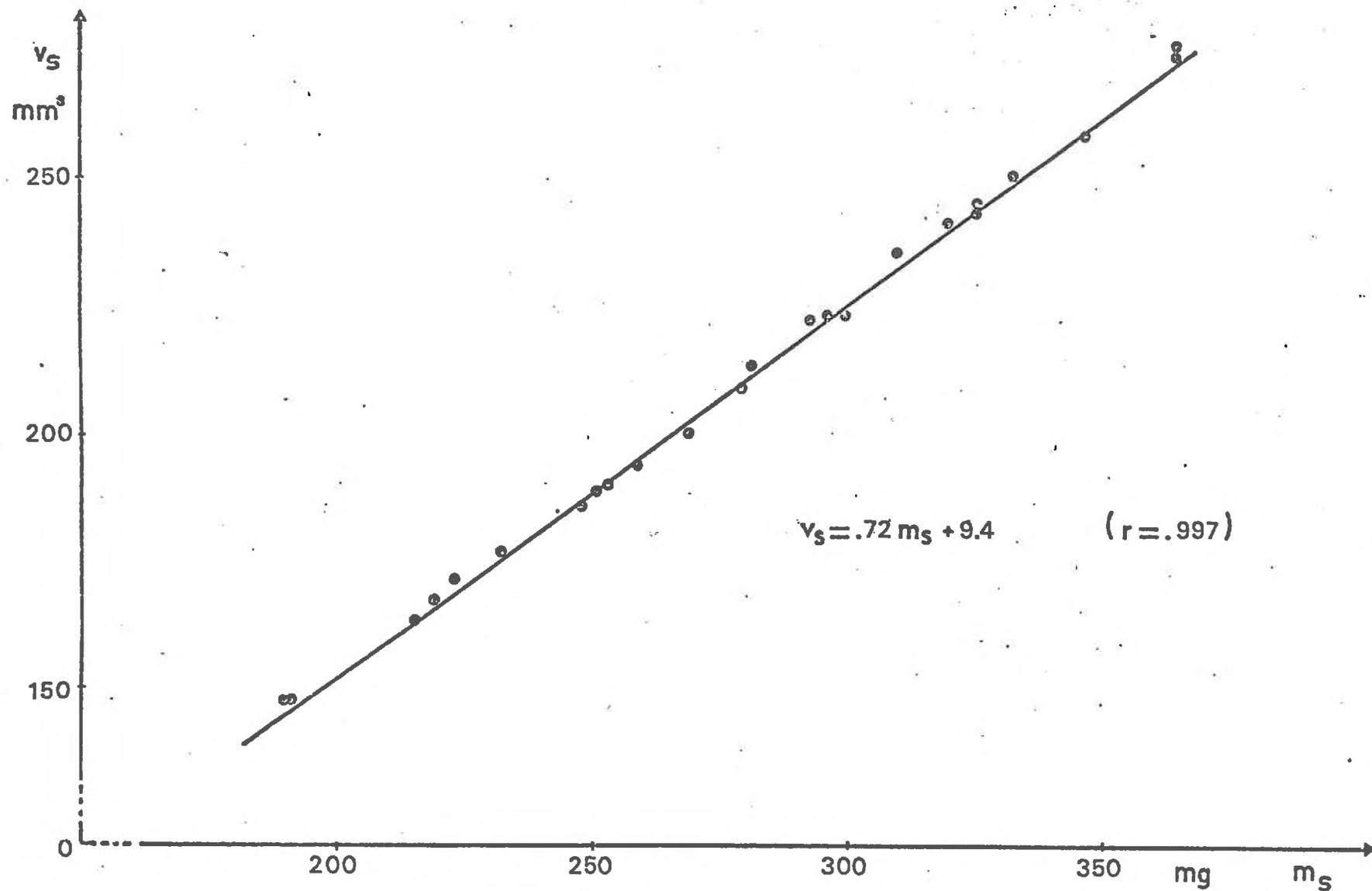


FIGURE 6 : Volume de la semence à la conservation en fonction de sa masse (n = 24)

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 :

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

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

Tableau 8 : Estimation de la surface de la semence.

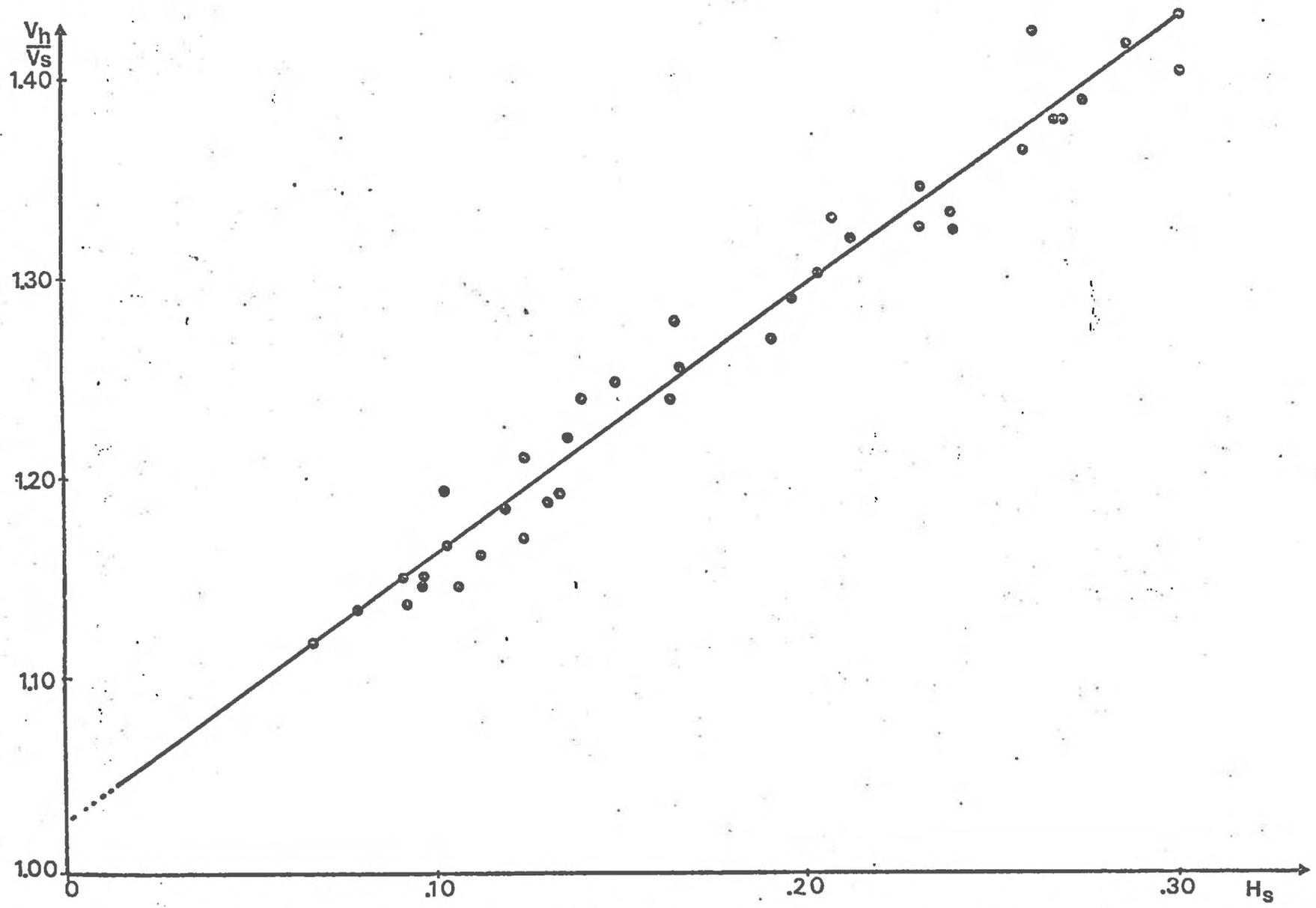


FIGURE 7 : Rapport du volume humide de la semence (V_h) au volume à la conservation (V_s) en fonction de sa teneur en eau ($n = 37$; $r = 0,98$) :

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.

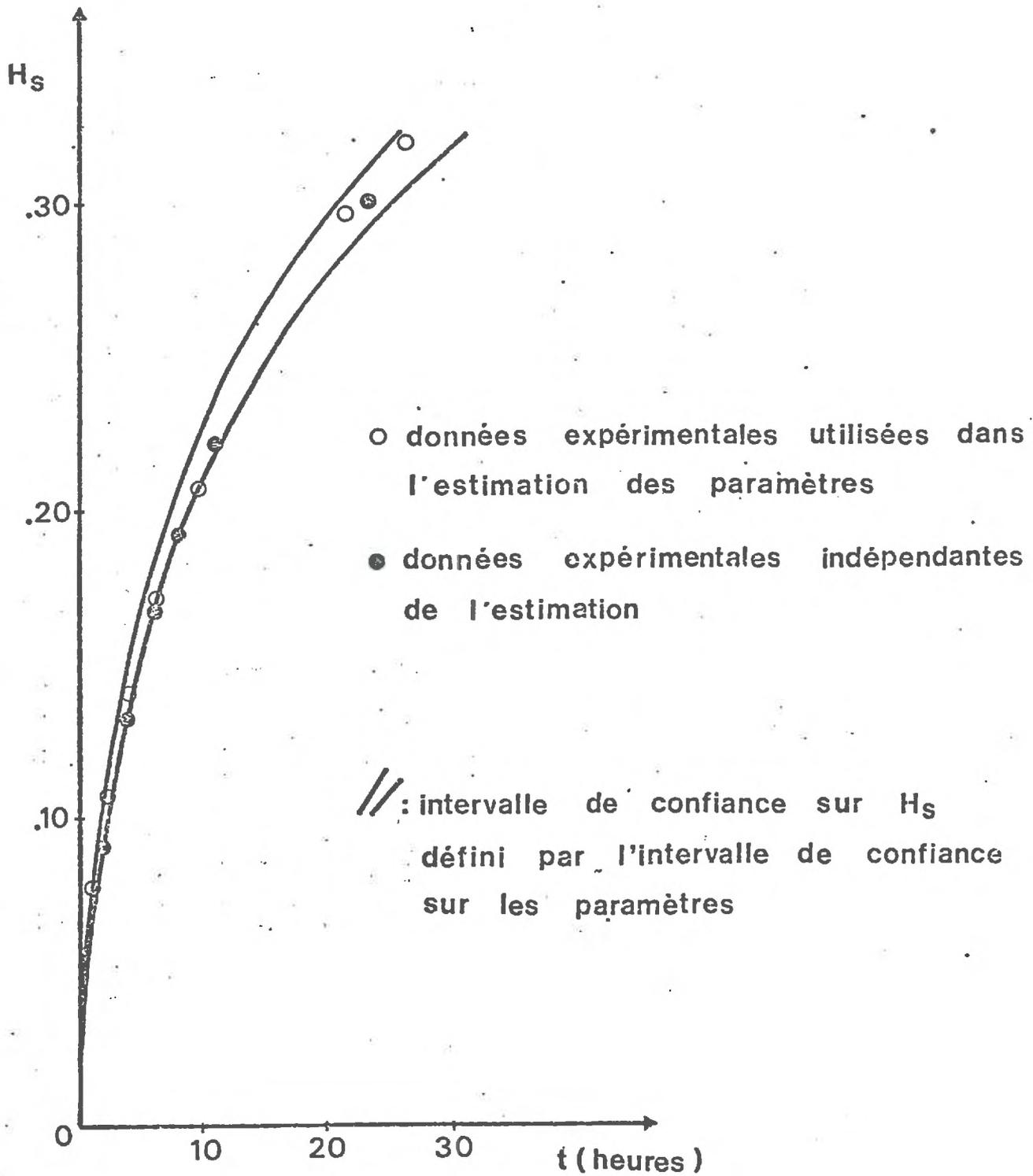


FIGURE 8 : Estimation des paramètres du coefficient $K'(H_s)$: Valeurs expérimentales et valeurs calculées $H_s = f(t)$.
 (Données expérimentales indépendantes : $n = 30$; $\sigma_{H_s} \leq 0,025$)

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).

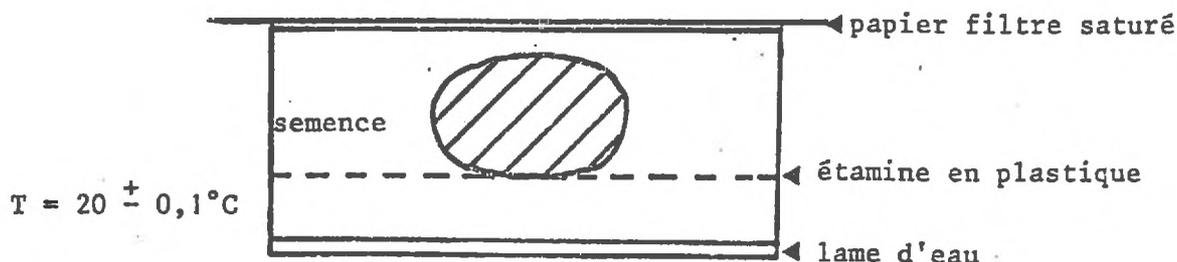


Schéma 7 : Dispositif d'imbibition en phase gazeuse.

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 .

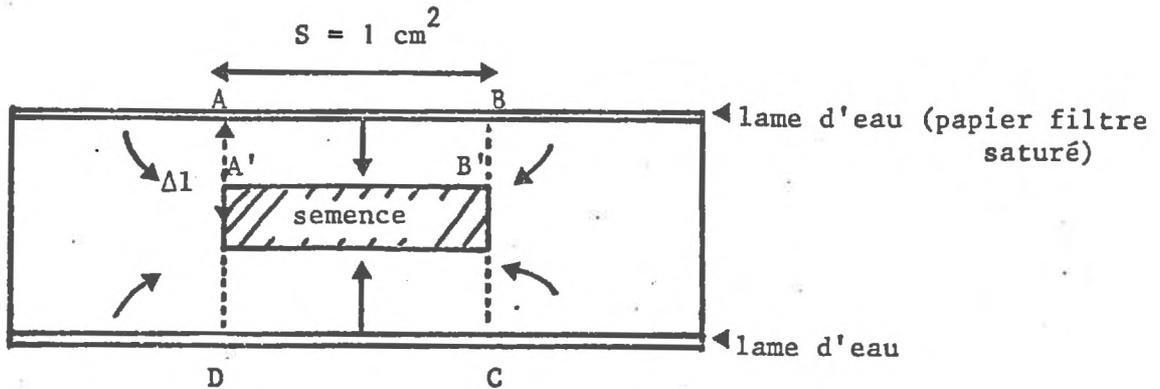


Schéma 8 : Schématisation du dispositif d'imbibition en phase gazeuse.

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 $H_s = f(t)$

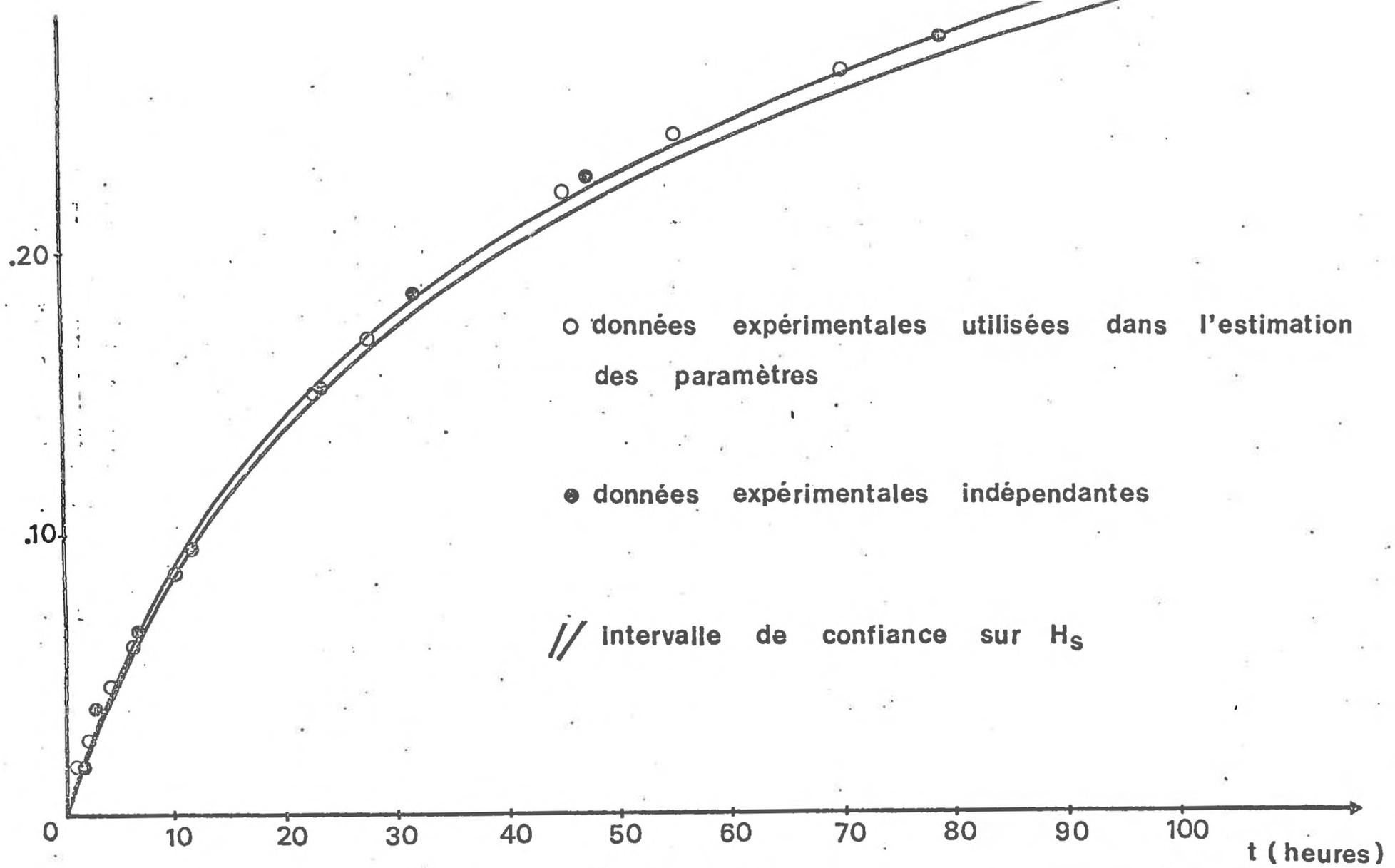


FIGURE 9 : Estimation des paramètres du coefficient $D'(H_s)$: Valeurs expérimentales et valeurs calculées.
 (Données expérimentales indépendantes : $n = 5$; $\sigma_{H_s} \leq 0,010$)

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) :

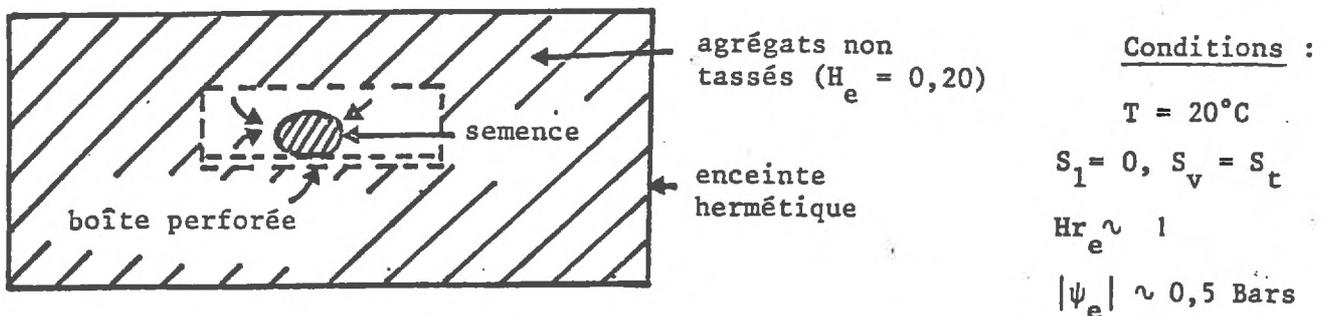


Schéma 9 : Imbibition en phase gazeuse dans un massif d'agrégats.

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

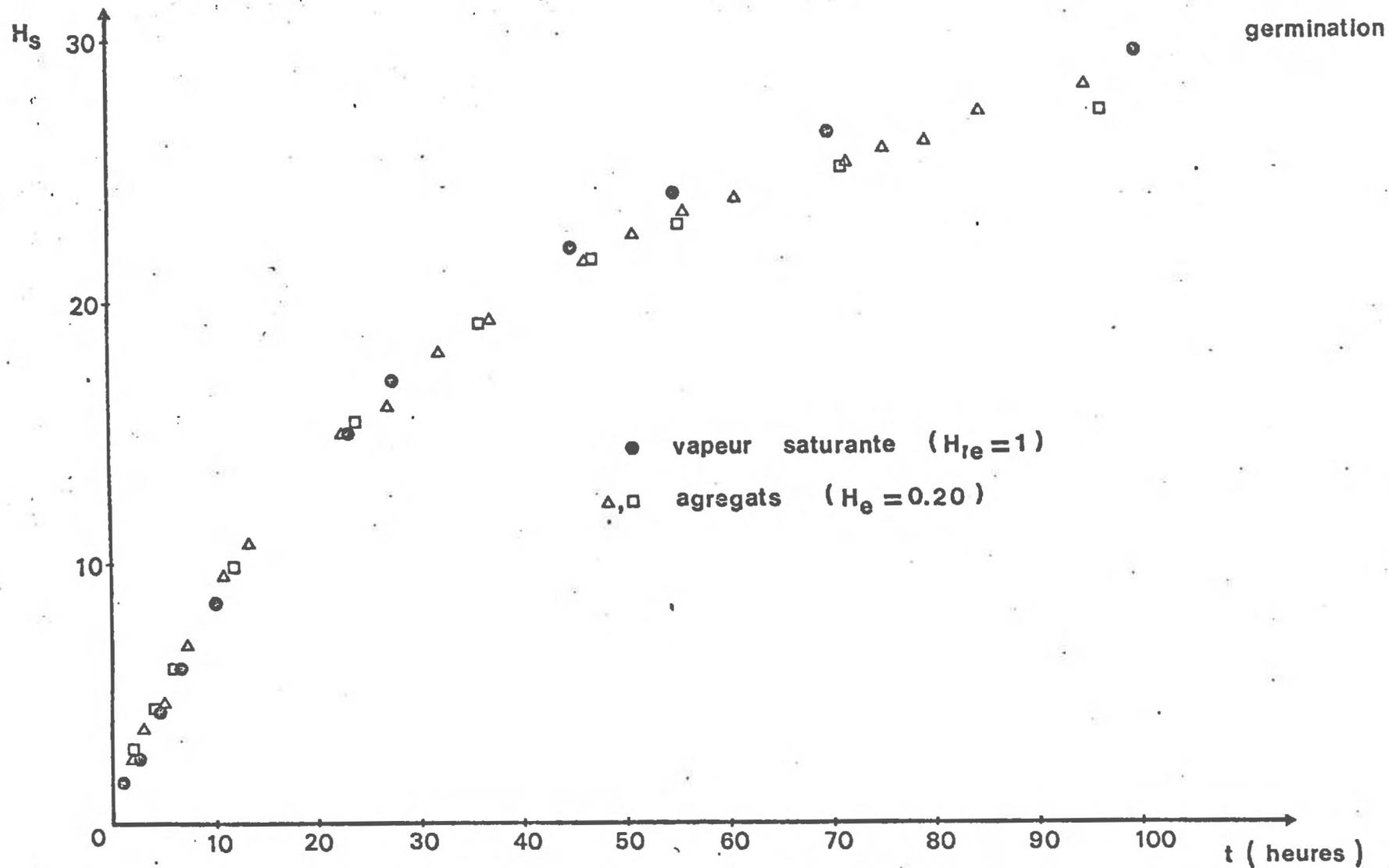


FIGURE 10 : Imbibition en phase gazeuse : Comparaison des cinétiques obtenues dans une vapeur saturante ($H_{re} = 1$) et dans un milieu agrégé humide ($H_e = 0,20$) (Milieu agrégé : $n = 20$; $\sigma H_s \leq 0,010$)

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 $\frac{\Delta H_s}{\Delta t}$).

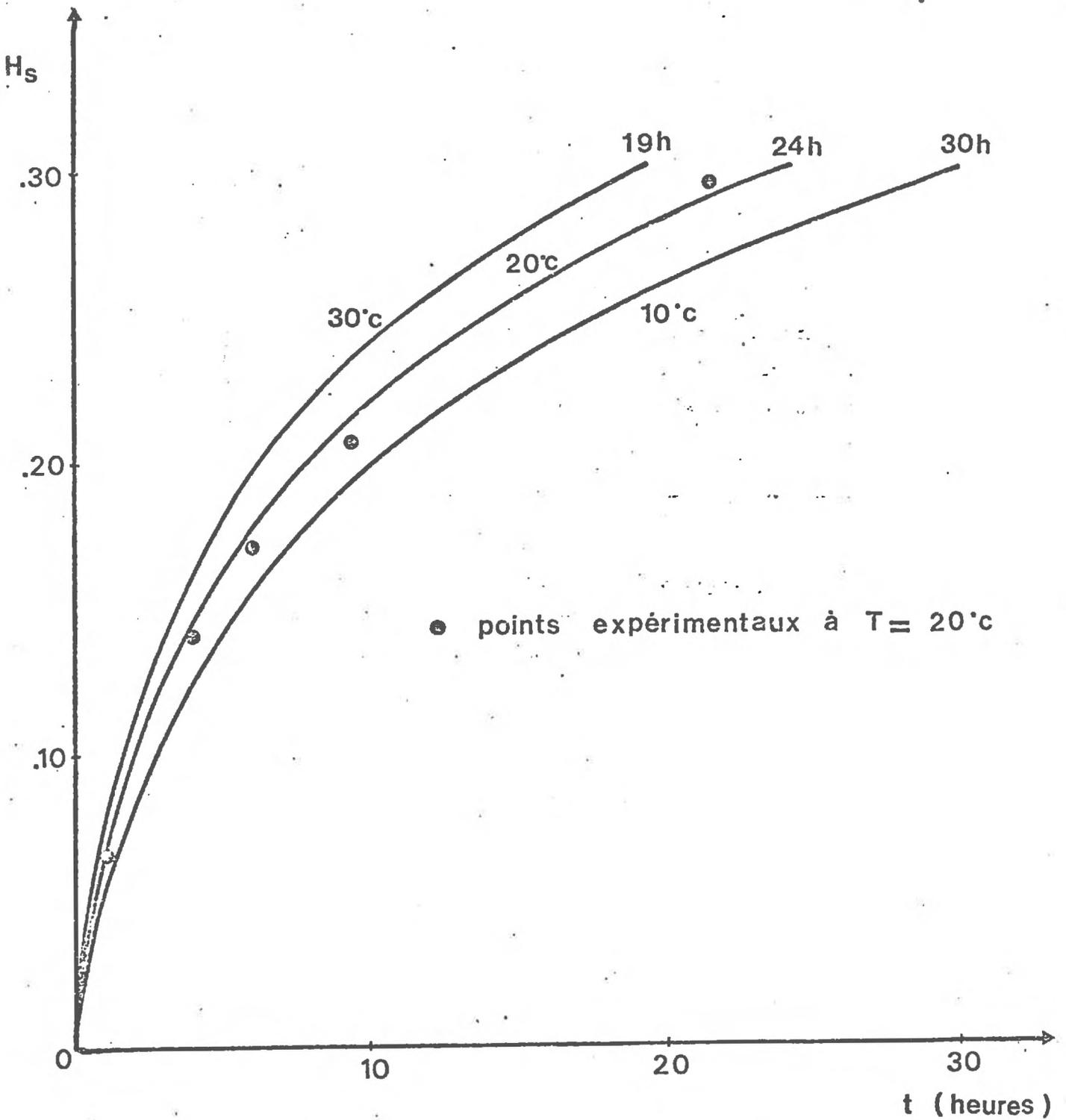
3.2. Précision de la simulation.

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)

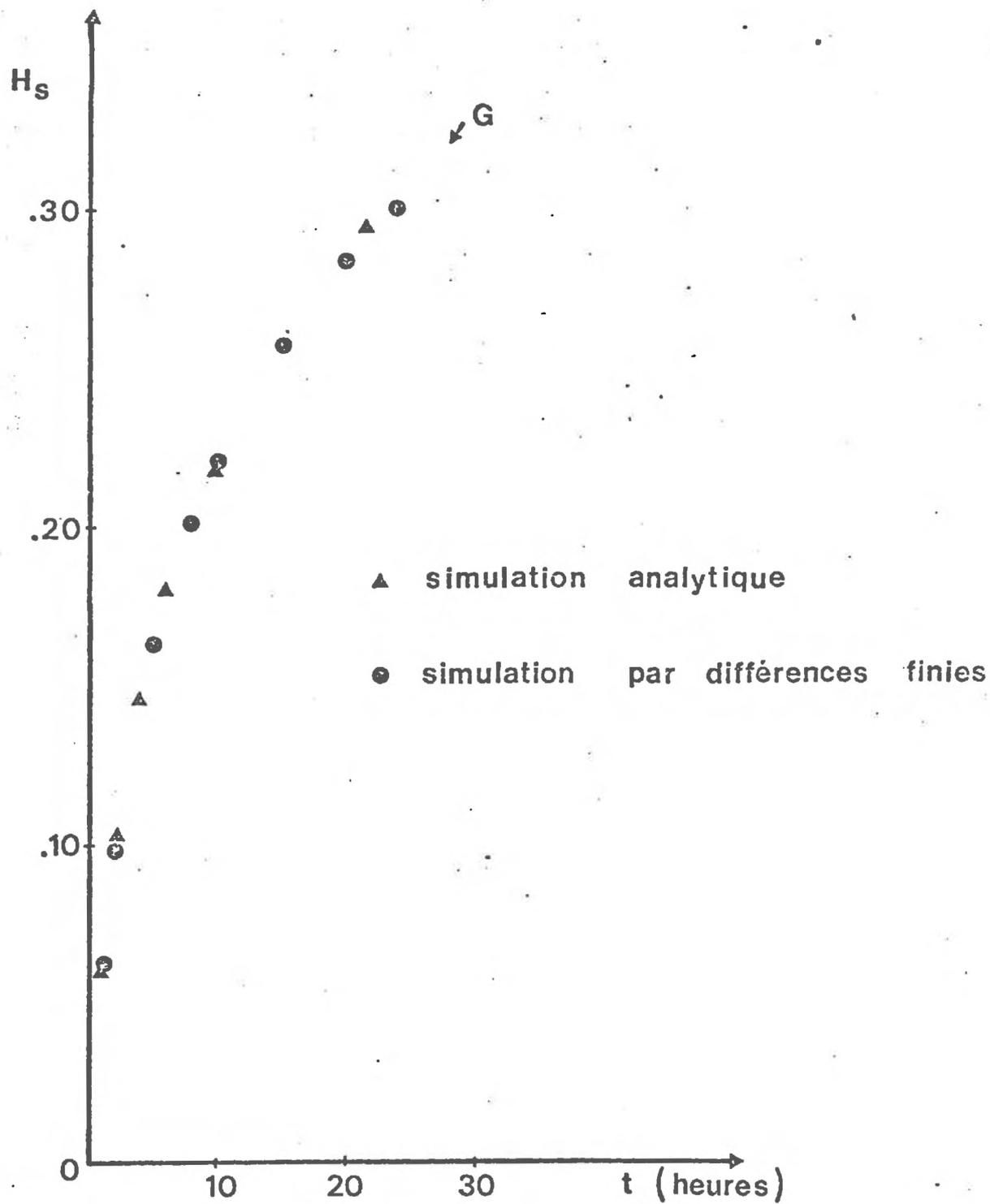


FIGURE 12 : Imbibition en phase liquide : Comparaison des simulations analytiques et par différences finies ($\Delta t = 0,25h$).
 (Valeurs moyennes)

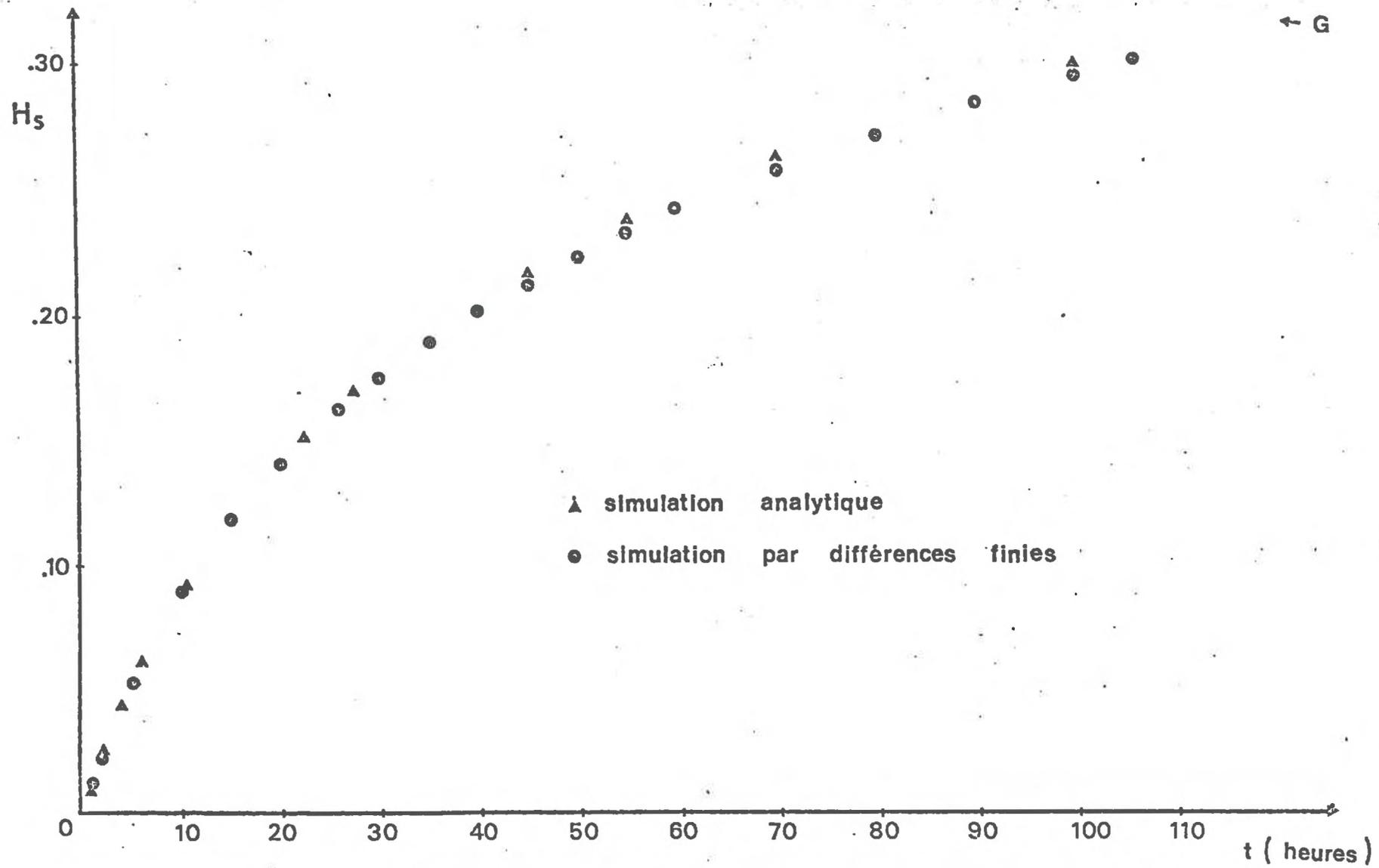


FIGURE 13 : Imbibition en phase gazeuse : Comparaison des simulations analytiques et par différences finies ($\Delta t = 1h$) (Valeurs moyennes)

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.

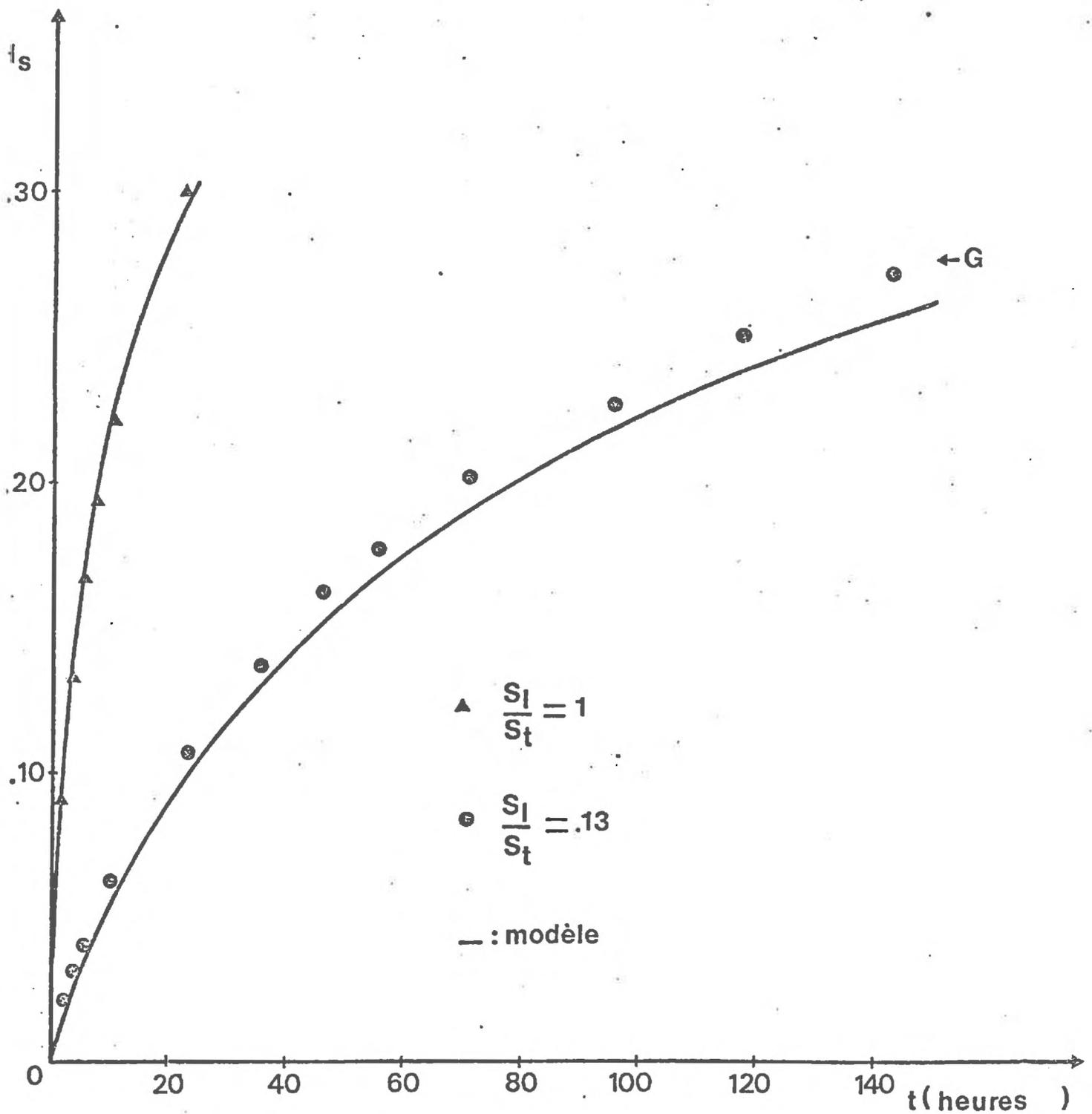


FIGURE 14 : Rôle de la surface d'imbibition sur la vitesse d'imbibition en phase liquide : Données expérimentales et modélisées.

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

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

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.

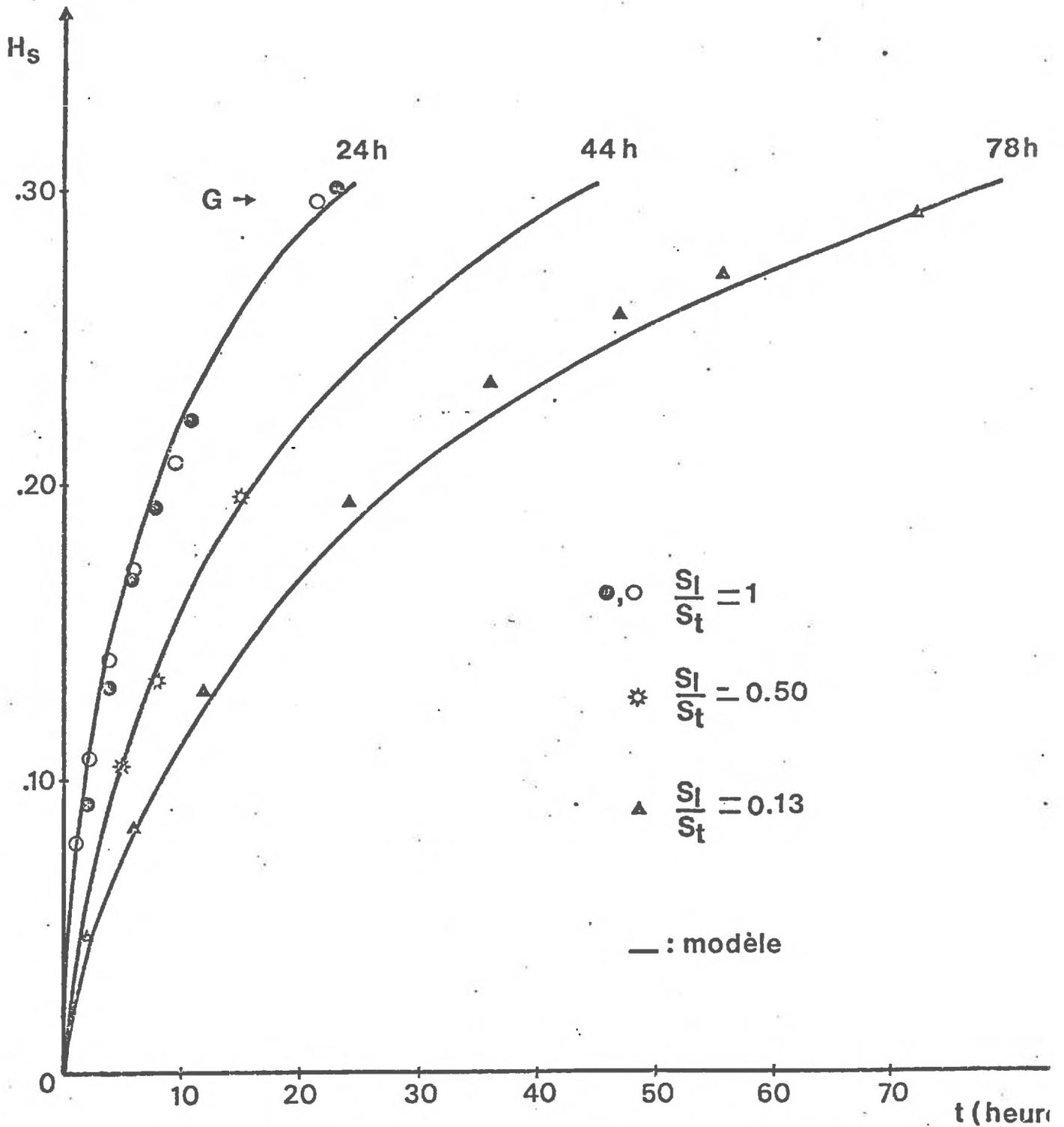


FIGURE 15 : Imbibition en phases liquide et gazeuse : Rôle du rapport S_1/S_t sur la vitesse d'imbibition.

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

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

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_l/S_t	0,13	1,00	0,13
S_v/S_t	0 (1)	0	0,87	0,50

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

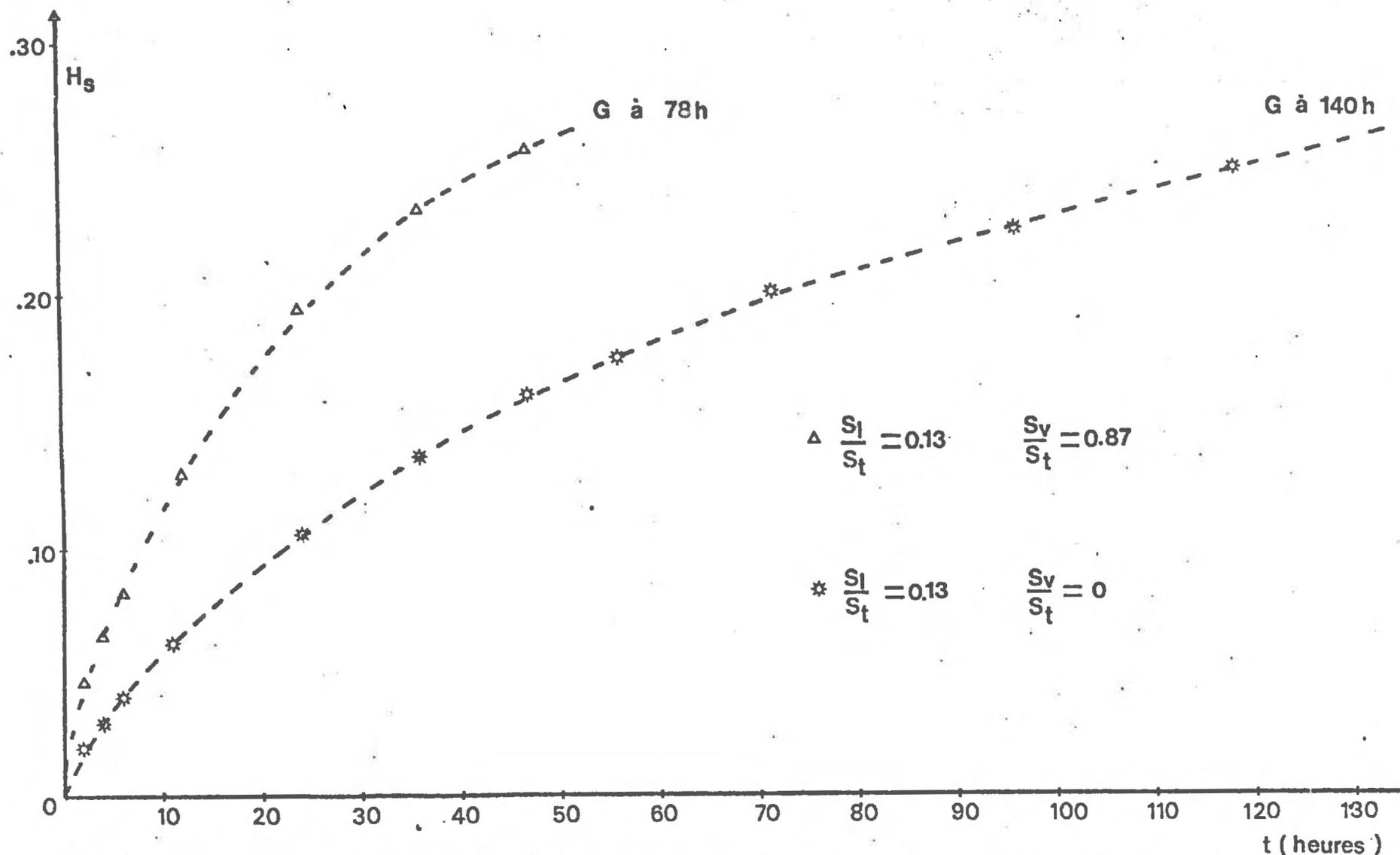


FIGURE 16 : Rôle de la surface d'imbibition en phase gazeuse sur la vitesse d'imbibition. (Données expérimentales)
 $\left(\frac{S_v}{S_t} = 0,87, n = 5, \sigma_{H_s} \leq 0,012 ; \frac{S_v}{S_t} = 0, n = 5, \sigma_{H_s} \leq 0,010\right)$

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'explicitier 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.

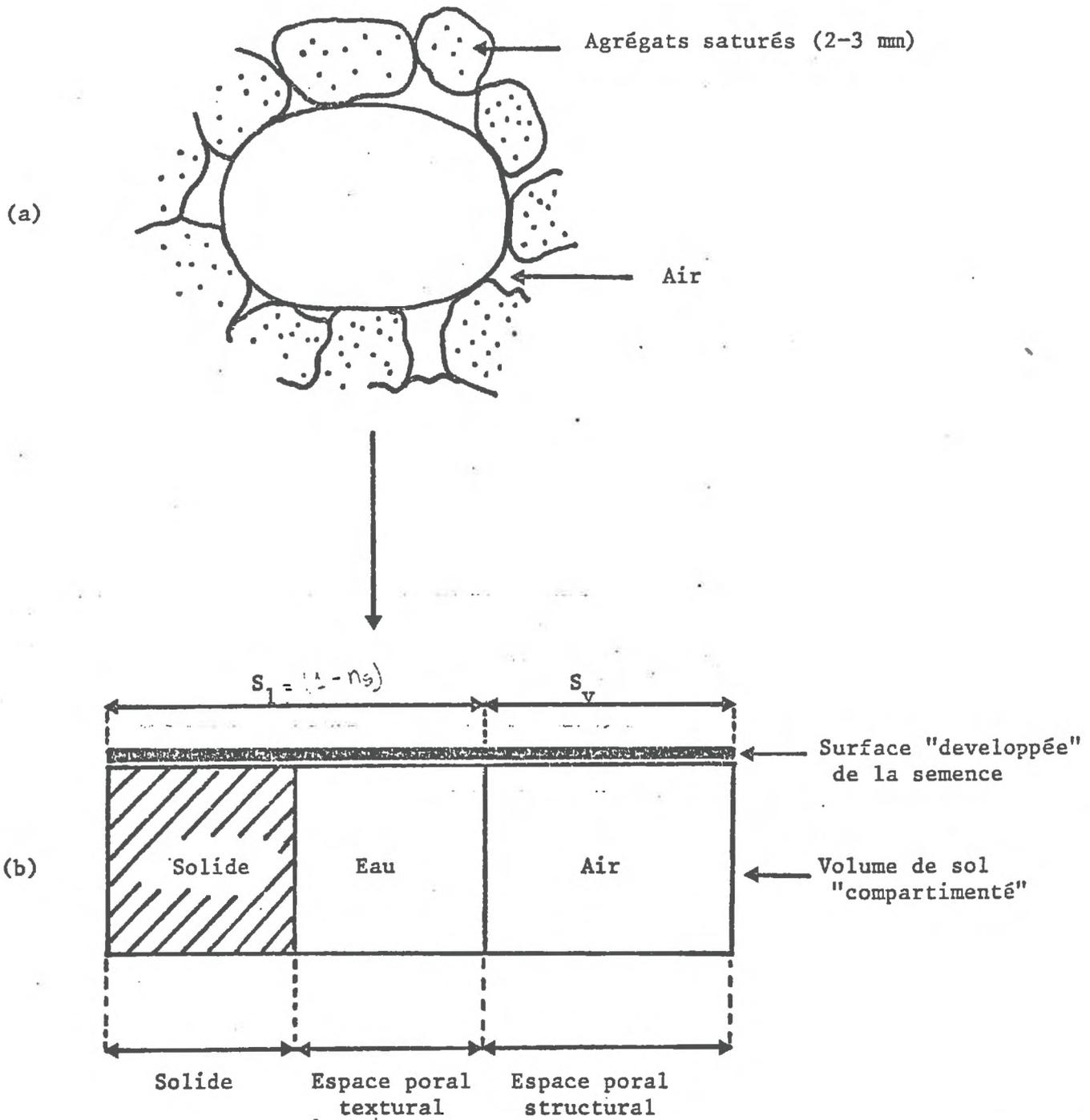
Nous nous sommes appuyés dans ce qui suit sur la notion de système de porosité présentée par P. STENGEL (1979).

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.

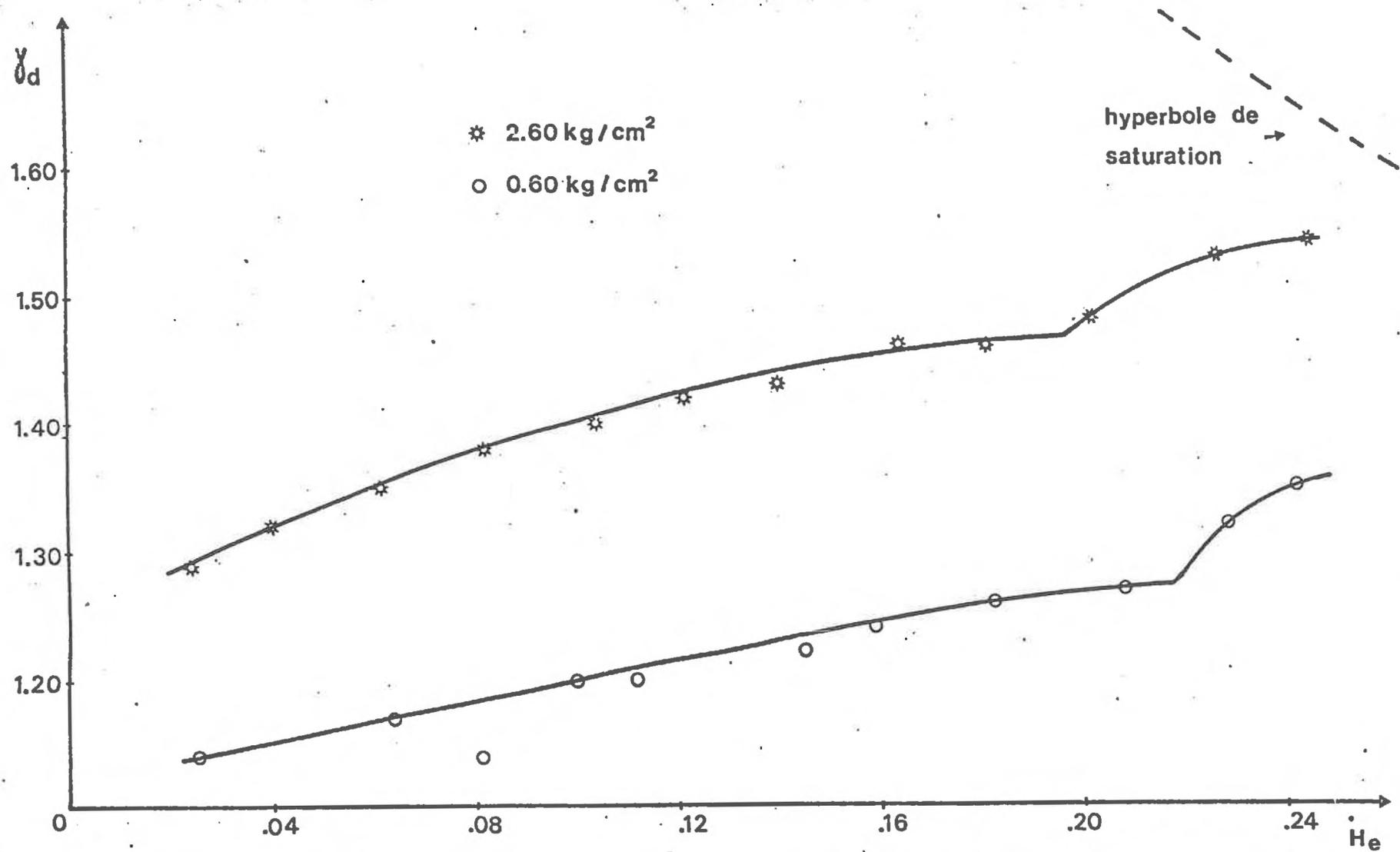


FIGURE 17 : Densité des massifs d'agrégats (2-3 mm) en fonction de l'humidité massique du matériau (2 niveaux d'énergie).

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

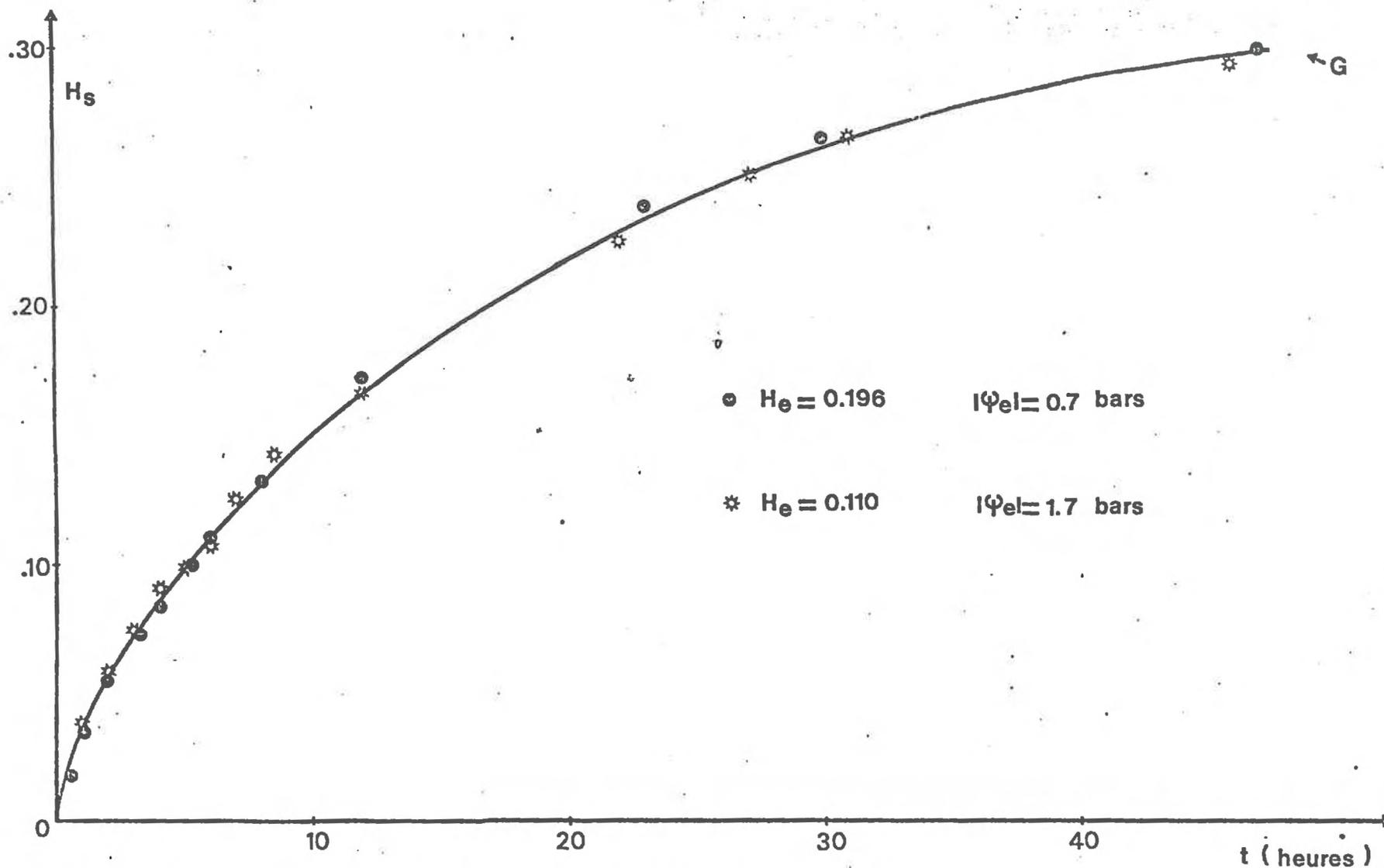


FIGURE 18 : Imbibition dans des massifs d'agrégats à deux humidités.

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

(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 :

$$n = 1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s} \quad n_s = 1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_a} \quad \text{avec } \begin{array}{l} \gamma_d = \text{densité du volume} \\ \quad \text{d'agrégats} \\ \gamma_a = \text{densité d'un agrégat} \\ \gamma_s = \text{densité de solide} \end{array}$$

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

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 $(1 - n_s ; S_1)$

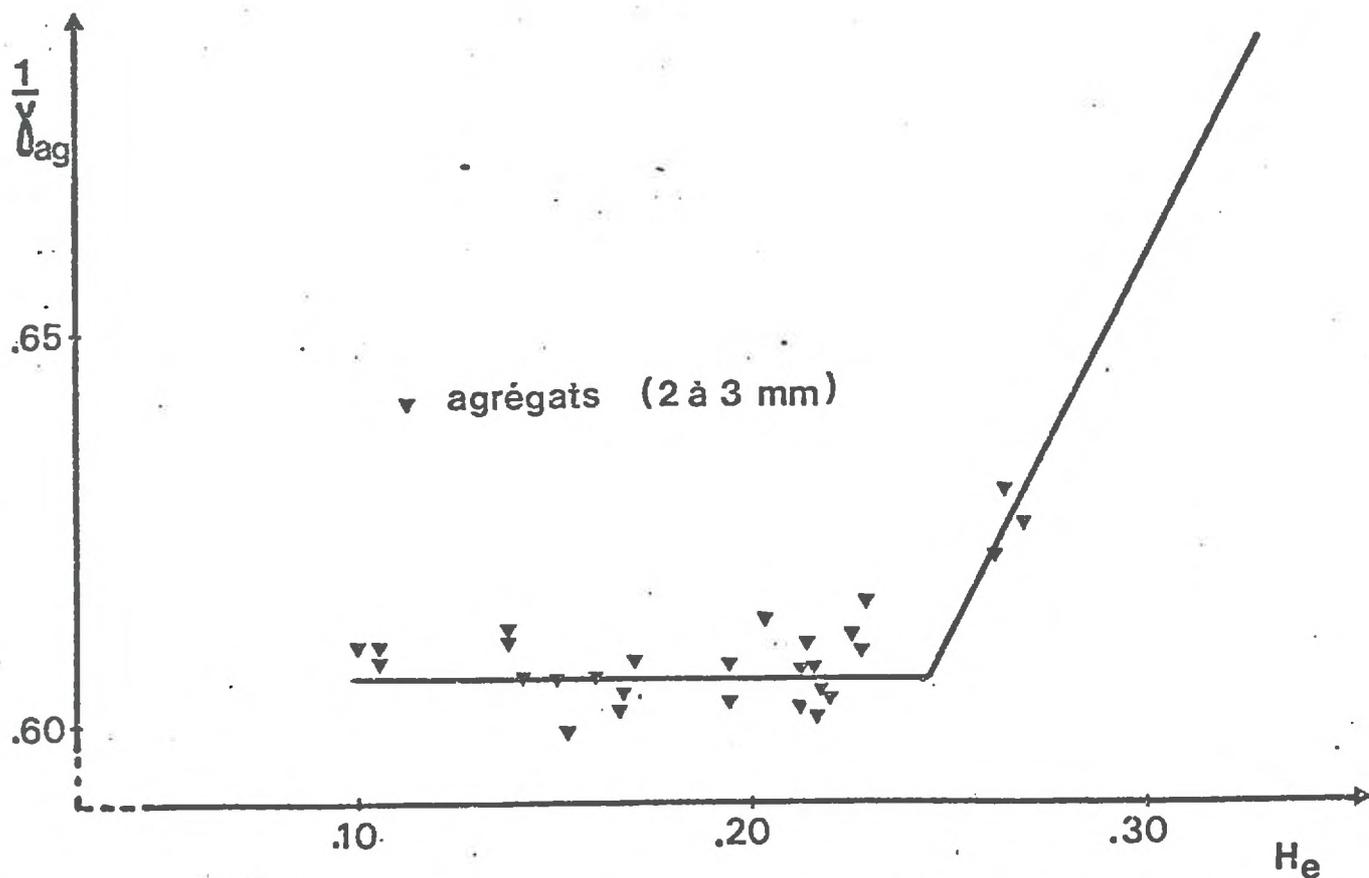
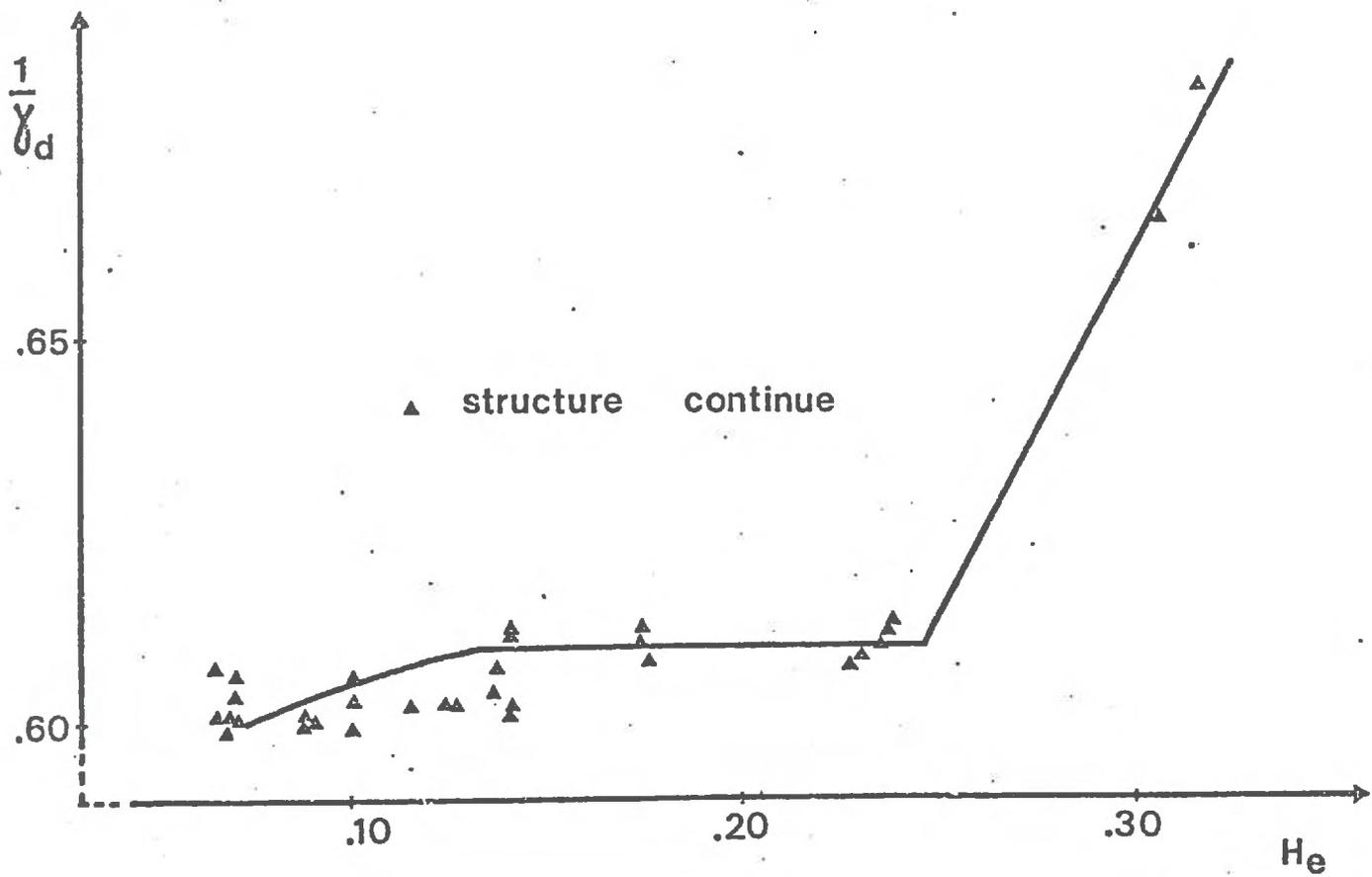


FIGURE 19 : Courbes de retrait sur structure continue et sur agrégats (Variation de volume du matériau en fonction de l'humidité massique. Sol de Montluel).

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).

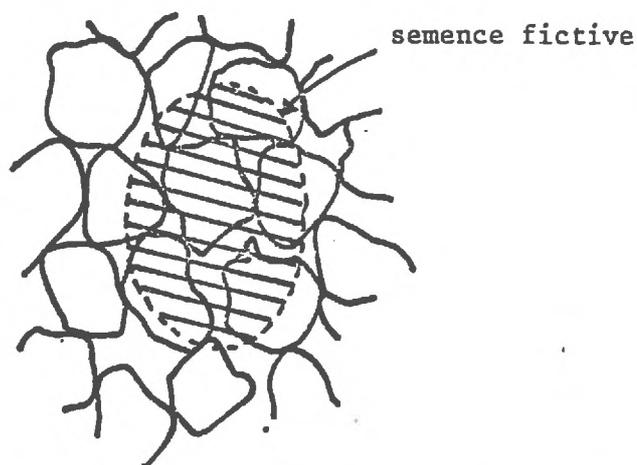


Schéma 11 : Substitution d'une semence à un volume d'agrégats.

(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.

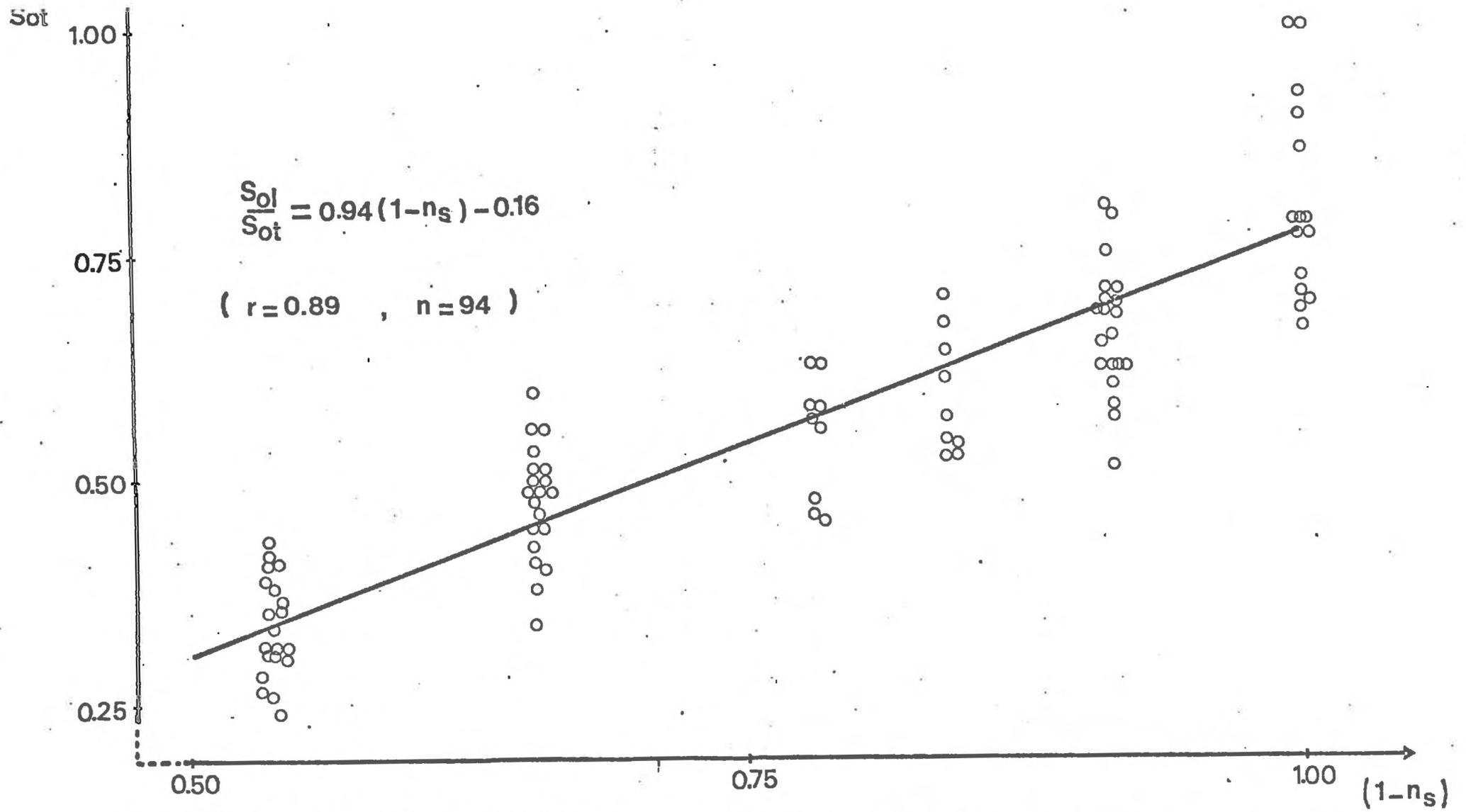


FIGURE 20 : Rôle de l'état structural autour de la semence sur la définition d'une surface liquide
 d'imbibition : $S_{ol}/S_{ot} = f(1 - n_s)$

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 interpréterons 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.

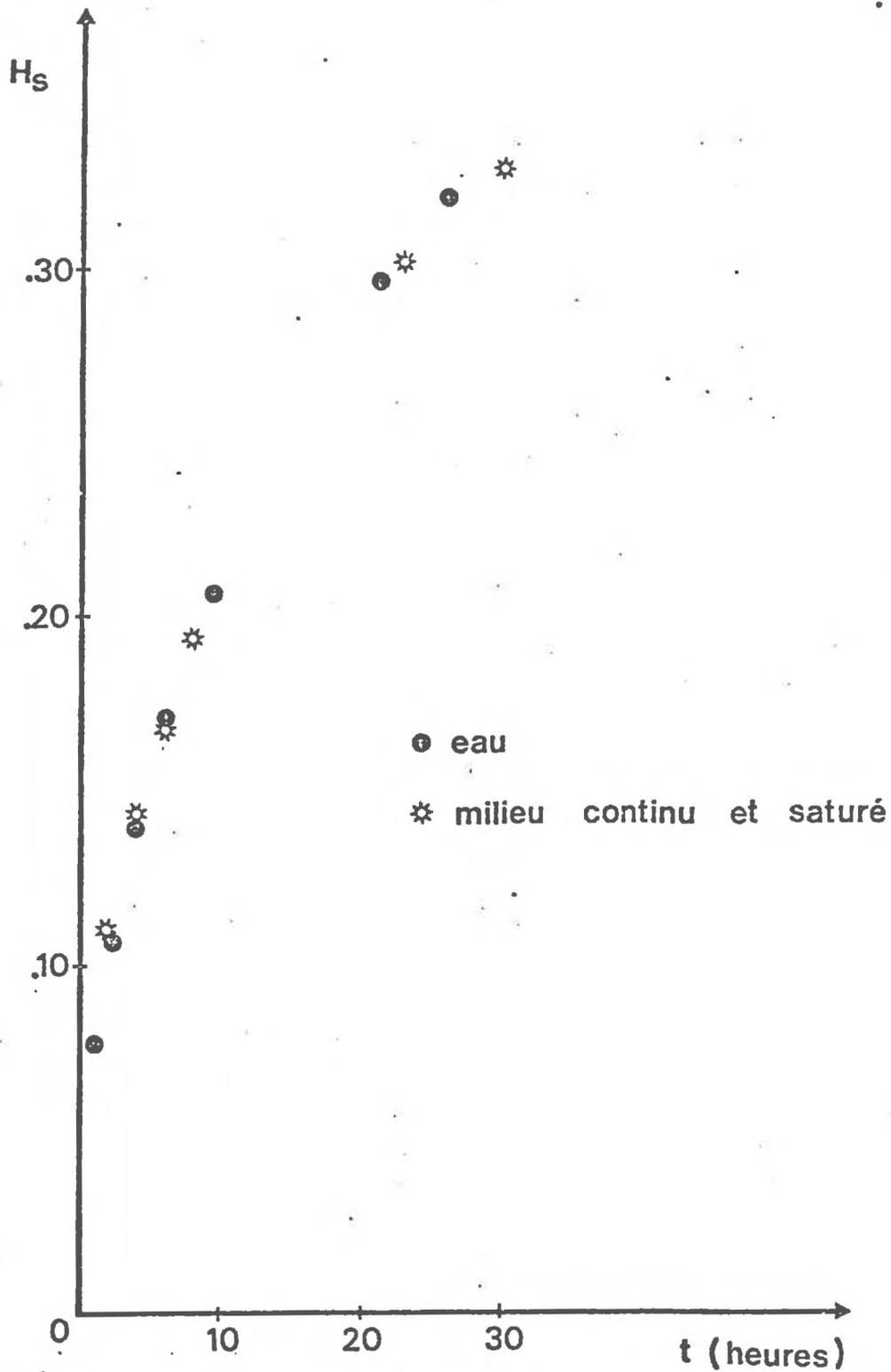


FIGURE 21 : Comparaison des cinétiques d'imbibition dans un volume d'eau et dans un milieu continu et saturé

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

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

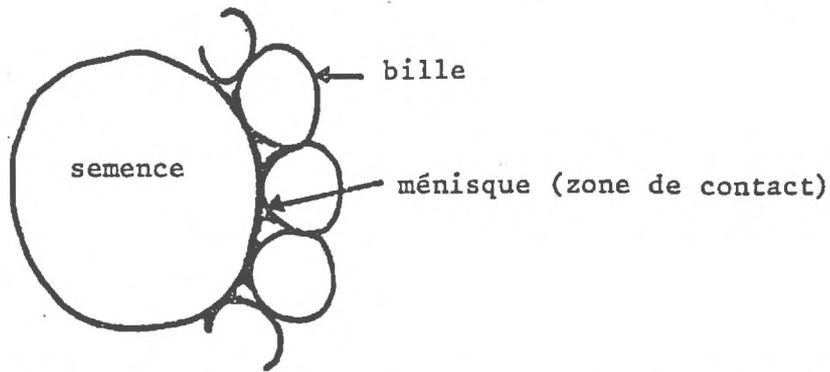


Schéma 12 : "Contact terre-graine" simulé par un système de billes.

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.

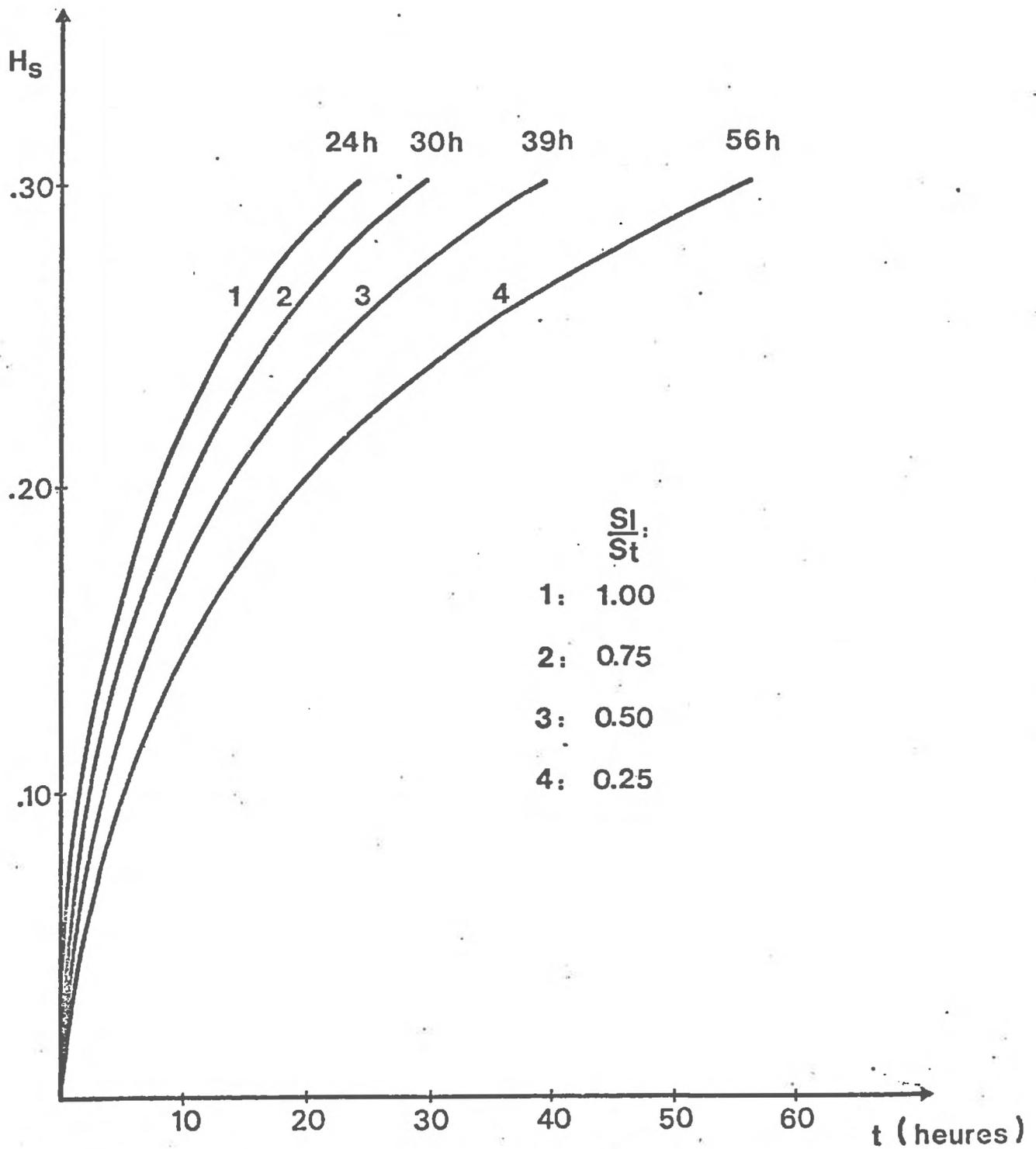


FIGURE 22 : Imbibition en phases liquide et gazeuse : Rôle du rapport $\frac{S_1}{S_t}$ sur la cinétique d'imbibition (Simulations, $\Delta t = 0,25h$)

Caractéristiques hyd. des éléments structuraux
Caractérisation du sol vis-à-vis de l'imbibition
Etat structural du sol
Surface d'imbibition
Estimation de S_1/S_t (2)
Simulation des heures d'obtention de :
$H_s = 0,26$
$H_s = 0,30$
Détermination

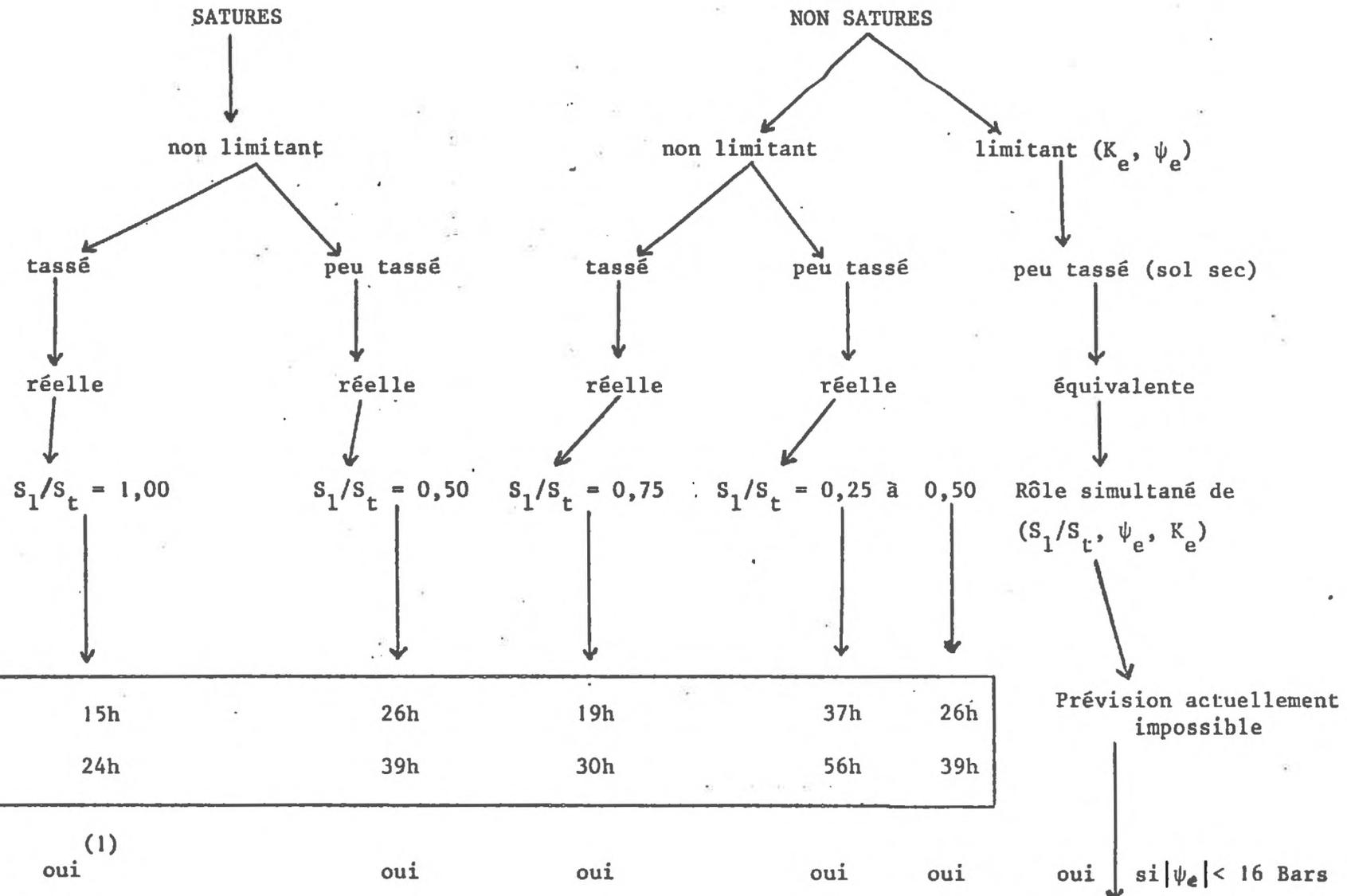


Tableau 17 : Schéma de cas typiques d'imbibition en fonction de l'humidité et de l'état structural du sol.

Analyse des termes $(S_1/S_t, \psi_e, K_e)$ dans le cas de "sols secs".

(1) en l'absence d'asphyxie
 (2) d'après l'analyse du "contact terre-graine".

CHAPITRE IV

RÔLE DU POTENTIEL EXTÉRIEUR À LA SEMENCE SUR LA CINÉTIQUE

D'IMBIBITION.

L'analyse du "contact terre-graine" a mis en relief la nécessité de prendre en considération l'ensemble des termes $(S_1/S_t, K_e, \psi_e)$ dans le cas d'un "milieu sec".⁽¹⁾ Compte-tenu du choix de modèle effectué, nous pouvons réduire l'ensemble de ces trois variables à deux en mettant en pratique la définition de "surface équivalente". L'ensemble $(S_1/S_t, K_e, \psi_e)$ se limite alors au couple $(S_1/S_t$ "équivalent", $\psi_e)$ qui apparaît indirectement dans l'expression modélisée :

$$\left(\frac{dH_s}{dt}\right)_t = -\alpha_1 K'(H_s) S_1 (\psi_s - \psi_e) - \alpha_v D'(H_s) S_v (p_s - p_e)$$

Nous aurons donc à réaliser deux étapes :

- vérifier que l'imbibition des semences est convenablement appréhendée sur la base d'une proportionnalité instantanée entre un flux et un gradient de potentiel $(\psi_s - \psi_e$ ou $p_s - p_e)$;

- si cette hypothèse est confirmée, nous examinerons quelle déformation subit la relation "système de porosité-surface d'imbibition" lorsqu'on passe de faibles valeurs $|\psi_e|$ à de fortes valeurs $|\psi_e|$, c'est-à-dire, lorsque le sol se dessèche.

(1) cf. tableau 17.

A. ÉTUDE ANALYTIQUE DU RÔLE DE LA VARIABLE ψ_e

Si l'on se reporte à l'expression modélisée de la cinétique d'imbibition des semences,

$$\left(\frac{dH}{dt}\right)_t = -\alpha_l K'(H_s) S_l (\psi_s - \psi_e) - \alpha_v D'(H_s) S_v (p_s - p_e)$$

on constate que le terme prépondérant permettant -ou non- d'obtenir une teneur en eau critique H_c apparaît sous la forme $(\psi_s - \psi_e)$ ou $(p_s - p_e)$. En particulier, le flux vers la semence doit être nul si

$$\begin{cases} \psi_s = \psi_e \\ p_s = p_e \end{cases}$$

Les termes S_l et S_v ne peuvent, par contre, jamais rendre un débit nul, sauf si $S_l = S_v = 0$, ce qui constitue un cas aberrant. Nous serons conduits à vérifier si le flux d'eau vers la semence est proportionnel à $(\psi_s - \psi_e)$ ou $(p_s - p_e)$, ce dernier étant nul dans le cas particulier où le gradient de potentiel milieu extérieur-semence est nul.

I IMBIBITION EN PHASE GAZEUSE.

1.1. Principe de mesure.

On réalise les manipulations d'imbibition des semences en plaçant celles-ci dans une phase gazeuse à humidité relative connue selon le dispositif suivant (schéma 13).

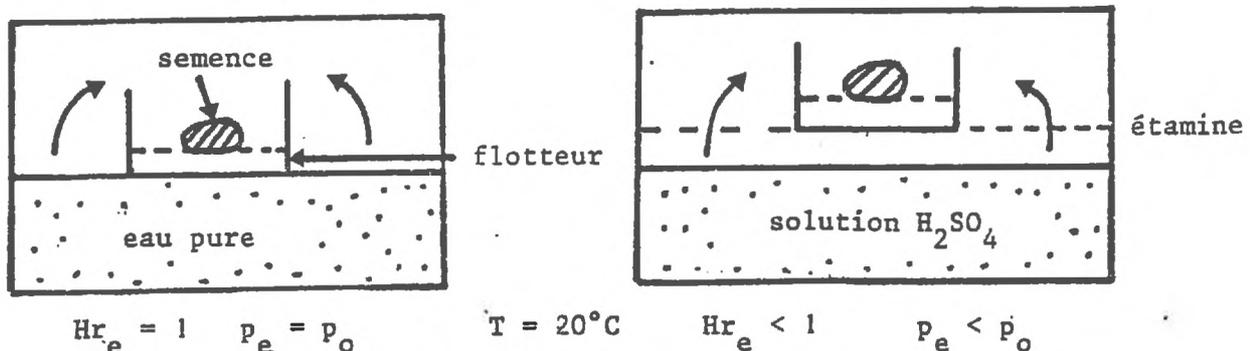


Schéma 13 : Dispositifs d'imbibition en phase gazeuse.

Les manipulations sont réalisées à 20°C pour une surface d'imbibition égale à la surface totale de la semence. Celles-ci sont préalablement amenées à une valeur unique du potentiel, par mise en équilibre avec une phase gazeuse à potentiel connu (1 340 Bars). Nous considérerons donc toutes les semences dans un même état physique initial.

1.2. Confrontation des données expérimentales et modélisées.

En choisissant trois valeurs de l'humidité relative à l'extérieur de la semence (100 % ; 97,5 % ; 80,5 % ; cinq à dix semences pour chaque valeur H_{r_e}), la comparaison des données expérimentales et modélisées concerne aussi bien des indicateurs qualitatifs couplés (germination/pas de germination - palier de teneur en eau/pas de palier) que l'ensemble de la cinétique proprement dite.

Le tableau 18 correspond au premier type de confrontation. On constate que les prévisions qualitatives sont vérifiées : obtention -ou non- d'un palier de teneur en eau, germination si $H_s \geq H_c$. De plus, si l'on considère les différences entre les valeurs H_s à l'équilibre, obtenues expérimentalement et par modélisation, la fonction caractéristique $\psi_s = f(H_s)$ se révèle être un outil adéquat pour la prévision de "valeurs limites" : la semence vérifie les propriétés fondamentales de tout absorbant, à savoir, annulation du flux si le gradient de potentiel "sol-semence" est réduit à 0. Sa seule propriété spécifique est de germer si $|\psi_e| \leq 16$ Bars

N° essai	Hr % e	Germination		Equilibre		H _s à l'équilibre		ψ _e (Bars)	
		(1) th	(2) exp	th	exp	th	(3) exp	th	(4) exp
1	100	oui	oui	non	non	-	-	0	0
2	97,5	non	non	oui	oui	0,167	0,157	34	40
3	80,5	non	non	oui	oui	0,063	0,057	294	330

- (1) prévision théorique par simulation (th)
 (2) observation ou mesure expérimentale (exp)
 (3) sur l'ensemble des mesures, $\sigma_{H_s} < 0,005$
 (4) d'après relation $\psi_s = f(H_s)$

Tableau 18 : Données expérimentales et modélisées pour 3 conditions d'imbibition en phase gazeuse.

Le tableau 19 et la figure 23 complètent cette première série d'observations. La figure 23 met en évidence l'adéquation entre les simulations (1) et les mesures, bien que certains résidus soient de l'ordre de 0,01 à 0,02, notamment sur la partie moyenne de deux cinétiques. Ces écarts ne semblent ni dûs à des fluctuations de température (ordre de grandeur) ni à des erreurs de mesure (sens de variation systématique). En l'absence d'une hypothèse explicative affinée pour interpréter ces différences et au vu de leur ordre de grandeur, nous admettrons que les mesures ne peuvent infirmer le schéma d'imbibition proposé. Cette affirmation est d'ailleurs validée par la concordance, en termes de durées d'imbibition, entre les valeurs expérimentales et simulées (tableau 19).

N° essai	H _r %	Caractéristique de la fin d'imbibition	H _s (germination ou palier)	Heure d'obtention de H _s	
				exp	th
1	100	germination	~ 0,290	~ 190h	186h
2	97,5	palier	0,157	~ 150h	140h
3	80,5	palier	0,057	50h > t > 35h	45h

Tableau 19 : Rôle du potentiel extérieur sur la cinétique d'imbibition en phase gazeuse - Prévion et contrôle expérimental.

(Les colonnes 3 et 4 ne sont qu'un rappel)

II IMBIBITION EN PHASE LIQUIDE.

La réalisation de conditions expérimentales qui permettent de placer la semence dans un milieu à potentiel connu, pour une surface d'imbibition liquide déterminée et sans caractère limitant de la conductivité pose des problèmes difficiles. En effet, on peut d'emblée séparer deux types de dispositifs :

(1) Pour les simulations et d'après ce qui précède, on a posé à l'équilibre $\psi_s = \psi_e$.

- ceux qui mettent en oeuvre l'emploi de solutions osmotiques toujours définies par une conductivité infinie : une hypothèse implicite suppose alors que la semence se comporte comme un volume limité par une membrane semi-perméable parfaite. Parce que cette hypothèse ne nous semble pas convenablement vérifiée, nous écartons l'utilisation de telles méthodes. (Notons également que cette hypothèse n'est pas facilement vérifiable).

- ceux utilisant un matériau qui enrobe la semence. Le potentiel de ce dernier doit être connu, et pour assurer un contact parfait "matériau-semence" ($S_1 = S_t$), celui-ci doit être saturé pour la valeur de l'humidité choisie. Si l'on veut aussi mettre en évidence le rôle de ψ_e sur la cinétique d'imbibition, nous devons travailler dans une gamme relativement élevée -en valeur absolue- de potentiel à l'extérieur de la semence ⁽¹⁾ ; cette dernière condition est par ailleurs contradictoire avec l'obtention d'une valeur non limitante de K_e .

Il ne semble donc pas exister de conditions expérimentales "idéales", contrairement au cas relativement simple de l'imbibition en phase gazeuse. Nous avons finalement choisi de travailler avec une phase argileuse pure, saturée, telle que :

$$\begin{cases} |\psi_e| = 16 \text{ Bars} \\ H_e = 0,36 \end{cases}$$

La valeur $|\psi_e|$ doit permettre l'obtention d'un palier hydrique des semences. Le contact "argile-semence" est réalisé par compression mécanique de fragments argileux autour des semences, aboutissant ainsi à la constitution de pastilles argileuses continues enrobant les semences. (schéma 14). Cette compression devient difficile lorsque $|\psi_e| > 16$ Bars et rend ainsi difficile la multiplication des cas expérimentaux.

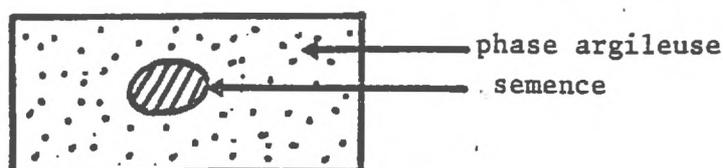


Schéma 14 : Imbibition des semences dans une phase argileuse continue et saturée $|\psi_e| = 16$ Bars

(1) Le niveau élevé nécessaire d'une valeur absolue du potentiel à l'extérieur de la semence découle évidemment de l'ordre de grandeur des valeurs $|\psi_e|$.

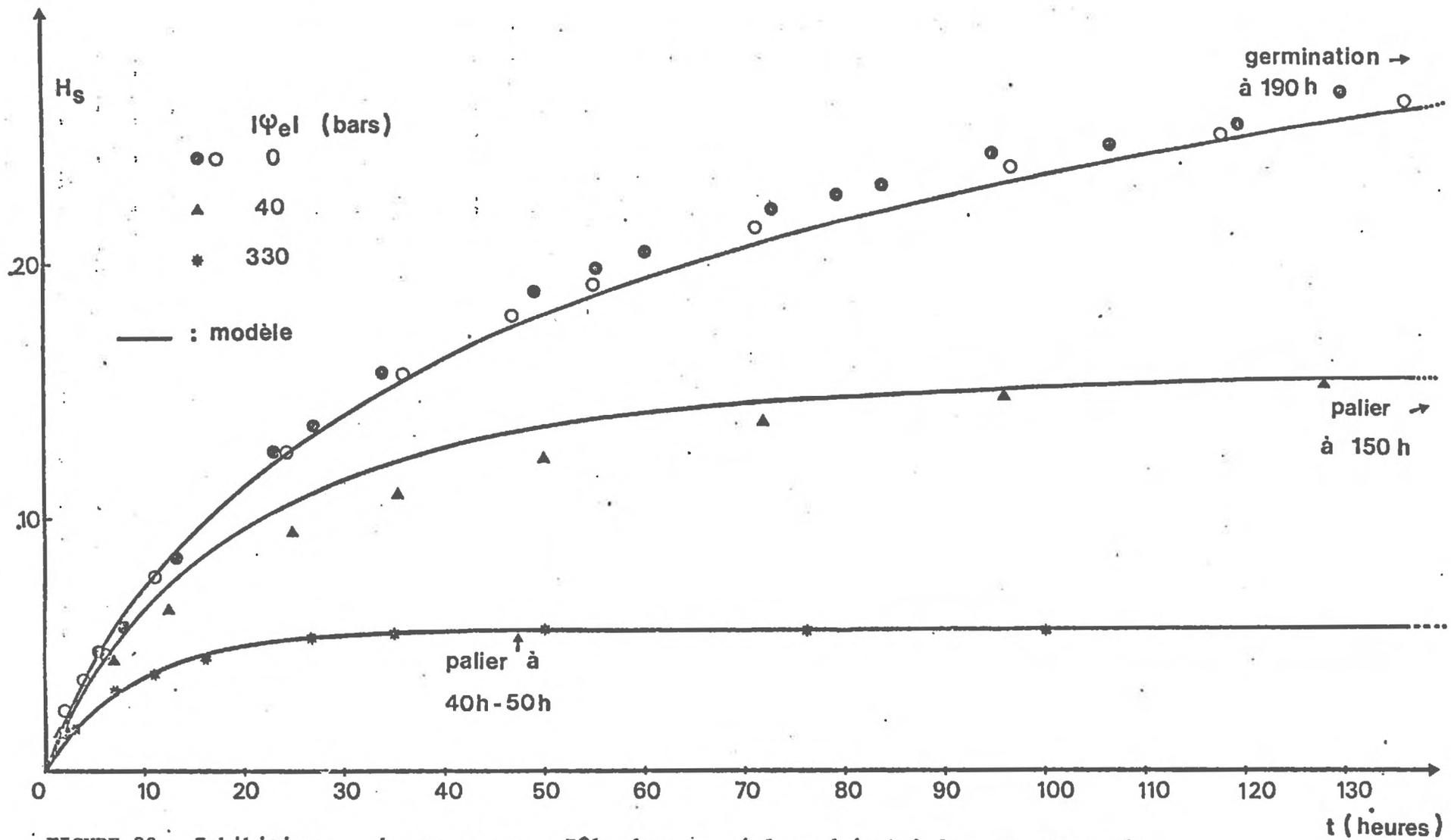


FIGURE 23 : Imbibition en phase gazeuse : Rôle du potentiel extérieur à la semence sur la cinétique d'imbibition.

(quel que soit ψ_e , $n = 5$, $\sigma H_s \leq 0,005$)

Bien que l'observation visuelle permette de faire le diagnostic d'un bon contact "argile-semence", cette observation ne permet pas pour autant d'affirmer le caractère fonctionnel de la totalité de la surface en phase liquide.

De plus, si la valeur $|\psi_e| = 16$ Bars doit bien permettre d'obtenir une teneur en eau constante des semences, l'humidité du matériau coïncide avec un domaine de faible conductivité (cf. tableau 6). On ne peut écarter l'éventualité du rôle de K_e sur la limitation du flux d'eau vers la semence : l'ensemble de la cinétique est donc a priori complexe.

En se concentrant dans un premier temps sur la partie finale de l'imbibition représentée sur la figure 24 (nous reviendrons ultérieurement sur l'ensemble de la cinétique), on observe à 60 heures un palier de teneur en eau ($H_s = 0,256$) alors que la fonction caractéristique $\psi_s = f(H_s)$ fixe une valeur à l'équilibre $H_s = 0,249$. De plus, aucune semence ne germe : ces résultats constituent une confirmation supplémentaire de la notion d'humidité critique (On ne peut cependant écarter ici le rôle des conditions d'oxygénation défavorables pour la germination).

Remarque : Dans le cas de cette manipulation "destructive", chaque point de la figure 24 correspond à l'aboutissement d'une cinétique d'imbibition individuelle (A chaque mesure, une pastille est détruite : H_s est mesurée ainsi que ψ_e). La répartition des points indique la réalisation d'un ensemble de cinétique très homogènes pour des conditions expérimentales bien spécifiées.

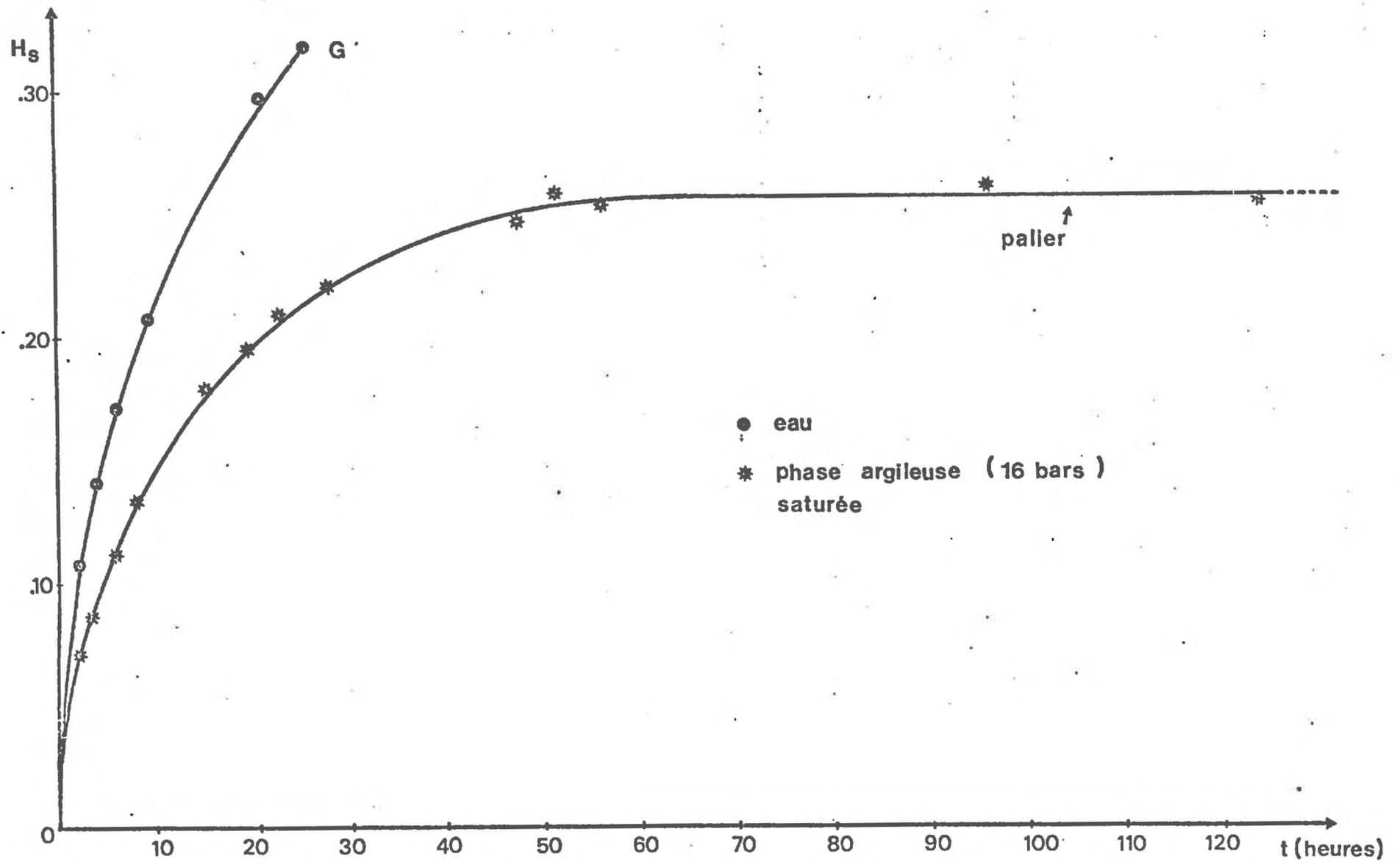


FIGURE 24 : Imbibition en phase liquide : Obtention d'un palier hydrique des semences dans une pâte argileuse continue et saturée (n = 13).
Remarque : le tracé continu correspondant est approximatif et non modélisé.

III CONCLUSION PARTIELLE.

Conformément à leur définition d'absorbant, les semences présentent un palier hydrique lorsque $\psi_s = \psi_e$. Cette propriété est vraie quelle que soit la phase d'imbibition et met en relief l'intérêt de la fonction $\psi_s = f(H_s)$ utilisée dans une optique prévisionnelle et associée à la notion d'humidité critique.

En phase gazeuse où le coefficient de diffusion de la vapeur d'eau dans l'air n'est pas limitant et où il n'y a pas d'ambiguïté sur la mesure d'une surface réelle d'imbibition, on notera l'adéquation des données expérimentales au modèle sur l'ensemble de la cinétique.

Le débit peut donc toujours être décrit sur la base d'une proportionnalité :

- à une surface d'imbibition -réelle ou équivalente-,
- à une différence de potentiel "sol-semence" -en phase liquide ou gazeuse-.

On conçoit dès lors la forte sensibilité des réponses relatives à la germination observées au champ qui renvoient systématiquement au "contact terre-graine" et à "l'humidité du lit de semences". C'est bien l'action conjuguée de ces deux variables, $(S_1/S_t, \psi_s - \psi_e)$, qu'il nous reste à clarifier en organisant dans des manipulations plus complexes les différentes conclusions acquises.

B. IMBIBITION DES SEMENCES DANS UN MILIEU AGRÉGÉ SUR TOUT LE DOMAINE DE TENEUR EN EAU DU MATÉRIAU.

Nous avons fait les analyses préliminaires permettant d'explicitier les différentes cinétiques d'imbibition réalisées pour des valeurs ψ_e caractérisant un état initial. L'indication de la "teneur en eau" d'un milieu agrégé ne constitue évidemment qu'une qualification globale qui signifie dans notre cas :

- une valeur initiale de ψ_e et des paramètres dérivés ($K_e = f(\psi_e)$),
- des conditions devant aboutir à une perturbation de la relation "état structural-surface d'imbibition" définie pour des conditions d'alimentation en eau non limitantes.

C'est ce double jeu de conditions qu'un dispositif expérimental doit provoquer et qu'une analyse doit expliciter.

I CHOIX D'UN DISPOSITIF EXPERIMENTAL.

Les manipulations sont effectuées comme précédemment avec le sol de "Montluel", en choisissant une large gamme d'humidité. Un tel domaine de potentiels de l'eau du sol permet de prendre en compte les différents "cas-types" possibles, tels qu'ils ont été définis par un calcul préliminaire (tableau 7). Rappelons succinctement les trois "cas-types mis à jour :

a) large domaine d'humidité du sol pour lequel le potentiel à l'extérieur de la semence reste négligeable par rapport au potentiel de celle-ci : domaine des transferts à très faible gradient et non limitant vis-à-vis des prélèvements de la semence, (terme K_e),

b) domaine d'apparition de conditions limitantes pour l'alimentation de la semence (rôle de K_e) : introduction de la notion de surface équivalente et germination parfois impossible,

c) domaine de très fortes valeurs absolues de potentiel : prédominance a priori des transferts en phase gazeuse.

Les semences sont imbibées dans des massifs d'agrégats (2-3 mm) caractérisés par une faible densité ($\bar{\gamma}_d \sim 1$), obtenus par arrangement manuel des agrégats autour de la semence (énergie minimale apportée au système). Cette faible valeur de $\bar{\gamma}_d$, due notamment à la quasi-impossibilité de tasser un matériau très sec, permettra de simuler la fabrication d'un lit de semence "soufflé", définissant un "contact terre-graine" défavorable. Les massifs d'agrégats contenant les semences sont placés à température constante ($T = 20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$) et ne sont soumis à aucune évaporation. Les variations d'humidité du milieu ne sont dues qu'aux prélèvements négligeables des semences. Le tableau 20 résume le dispositif expérimental adopté.

H_e	0,196	0,110	0,087	0,065	0,043	0,029
$ \psi_e $ (Bars)	0,3	1,9	3,7	9,1	31	96
$\bar{\gamma}_d$ (1)	$\sim 1,00$					
n_s (1)	$\sim 0,46$					

Tableau 20 : Caractéristiques physiques des massifs agrégés.

Pour chaque massif d'agrégats, les mesures d'humidité (H_s) sont effectuées sur 20 semences, réparties en 4 lots de 5.

II ANALYSE SOMMAIRE DES CINÉTIQUES D'IMBIBITION OBTENUES (figure 25).

La germination a lieu pour les valeurs de ψ_e égales à -0,3, -1,9, -3,7, -9,1 Bars et aucune germination n'apparaît à partir de $|\psi_e| = 31$ Bars. Toutes les germinations sont déclenchées pour $H_s \geq 0,26$. Autrement dit, les résultats obtenus confirment bien la valeur du couple (H_c, ψ_c) utilisé comme critère de germination.

(1) Ces valeurs n'ont pas été mesurées pour chaque échantillon mais elles sont très reproductibles pour une mise en place des agrégats déterminée.

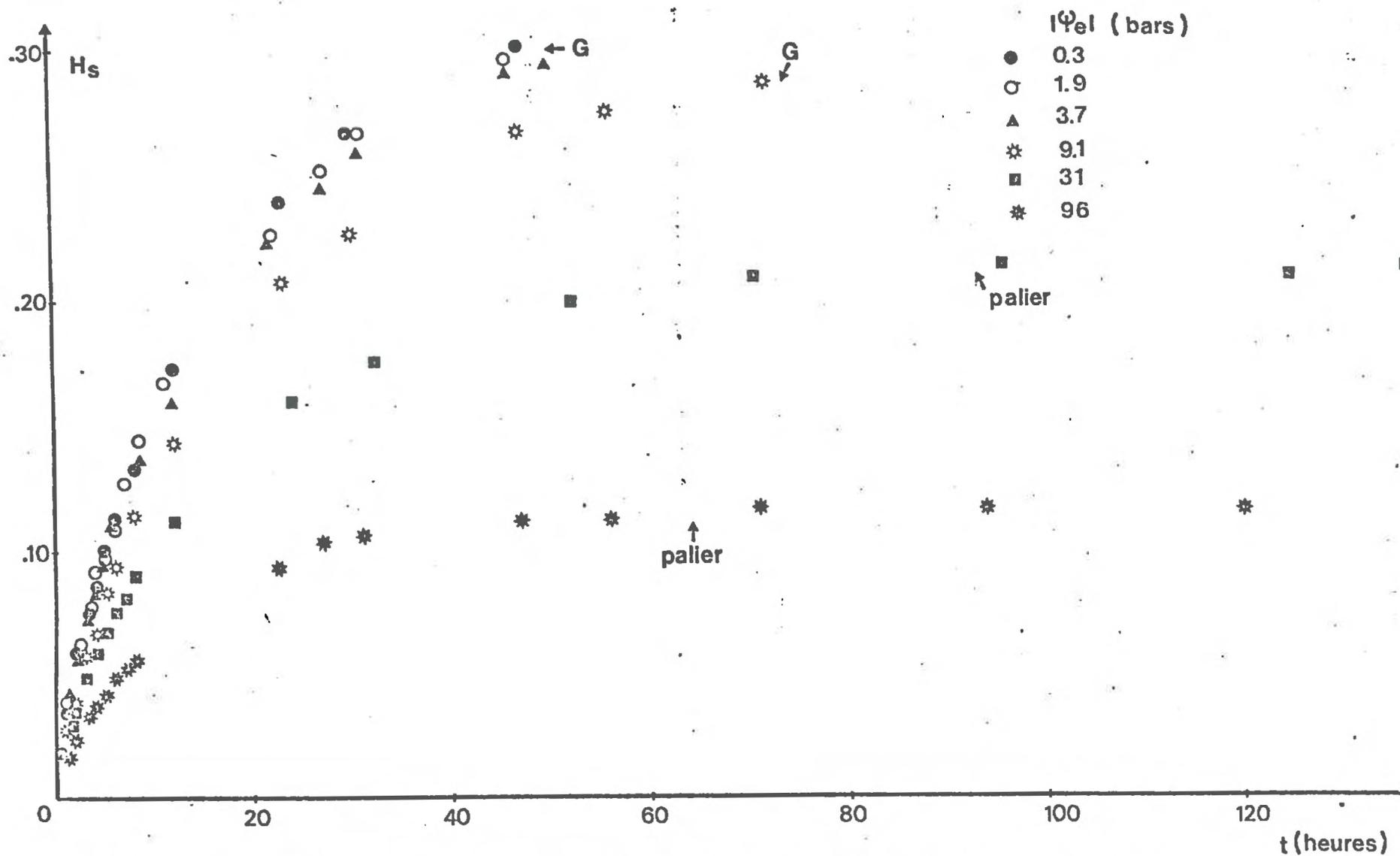


FIGURE 25 : Imbibition dans des massifs d'agrégats : Rôle de l'humidité sur les cinétiques d'imbibition. (quelle que soit H_e , $n = 20$, $\sigma H_s \leq 0,009$)

Aux deux plus fortes valeurs de $|\psi_e|$, les semences atteignent un palier hydrique. A l'équilibre des deux absorbants -flux nul-, on vérifie la relation approchée $\psi_e \approx \psi_s$ comme l'indique le tableau 21.

H_e	0,196	0,110	0,087	0,065	0,043	0,029
$ \psi_e $ Bars (1)	0,3	1,9	3,7	9,1	31	96
$ \psi_s $ Bars (2)	-	-	-	-	25	100
G	oui	oui	oui	oui	non	non

(1) d'après relation $\psi_e = f(H_e)$

(2) d'après relation $\psi_s = f(H_s)$

Tableau 21 : Rôle de ψ_e sur la détermination d'un palier hydrique des semences.

Les cinétiques d'imbibition sont strictement classées selon les valeurs initiales du potentiel $|\psi_e|$: pour un même état physique de la semence -une même humidité- le flux varie en sens inverse de la valeur $|\psi_e|$. La seule exception concerne le cas des fortes humidités du sol ($\psi_e = -0,3$ Bar , $\psi_e = -1,9$ Bar , $H_e > 0,110$) pour lesquelles les cinétiques sont superposables : compte-tenu des valeurs $|\psi_e|$ faibles, et conformément aux premières prévisions effectuées (tableau 7), cette similitude des cinétiques permet de vérifier l'existence d'un large domaine de teneur en eau du sol (faible domaine de potentiel) assurant une alimentation maximale, comparable à celle obtenue sur papier filtre saturé pour une surface d'imbibition précisée. Autrement dit, la connaissance d'une fonction quelconque $\psi_e = f(H_e)$ permet bien de séparer les cas d'imbibition non limitante des semences.

III ANALYSE MODELISEE DES CINETIQUES D'IMBIBITION.

3.1. Prise en compte des deux types de transferts -liquides et gazeux-

Pour déterminer l'existence et la part des transferts liquides dans le cas de sols à forte valeur $|\psi_e|$, nous nous proposons de suivre le schéma suivant : nous simulerons une cinétique d'imbibition moyenne des semences en supposant que tous les transferts sont dûs à la phase gazeuse et concernent la surface totale de la semence. La comparaison ultérieure des couples " H_s expérimental- H_s théorique" sera un indicateur de l'importance des transferts liquides : si des transferts liquides interviennent, alors H_s expérimental $>$ H_s théorique.

Le tableau 22 et la figure 26 (H_s exp = f(H_s th), respectivement "expérimental" et "théorique") sont construits selon ce principe. L'analyse de la figure 26 et du tableau 22 correspondant fait apparaître deux cas d'imbibition.

a) Pour la plus faible teneur en eau du sol ($H_e = 0,029$, $|\psi_e| = 96$ Ba) les mesures expérimentales sont interprétables en prenant en compte uniquement des transferts gazeux : la surface d'imbibition liquide est nulle ou négligeable et il y a contact sans humectation au sens où on l'entend généralement (transferts liquides).

b) Au delà de cette teneur en eau ($H_e \geq 0,043$, $|\psi_e| \leq 31$ Bars) on minore systématiquement les valeurs H_s mesurées en ignorant l'existence de transferts liquides : c'est ce que montrent tous les indicateurs du tableau 22 (augmentation de la pente de la droite de regression, de l'ordonnée à l'origine, augmentation de la valeur $|H_s$ exp - H_s th|, surestimation du temps nécessaire à l'obtention de $H_s = 0,28$). Pour ces conditions d'imbibition, on observe donc des transferts simultanés en phase liquide et gazeuse, la part des transferts liquides étant une fonction croissante de la teneur en eau H_e .

expérimental

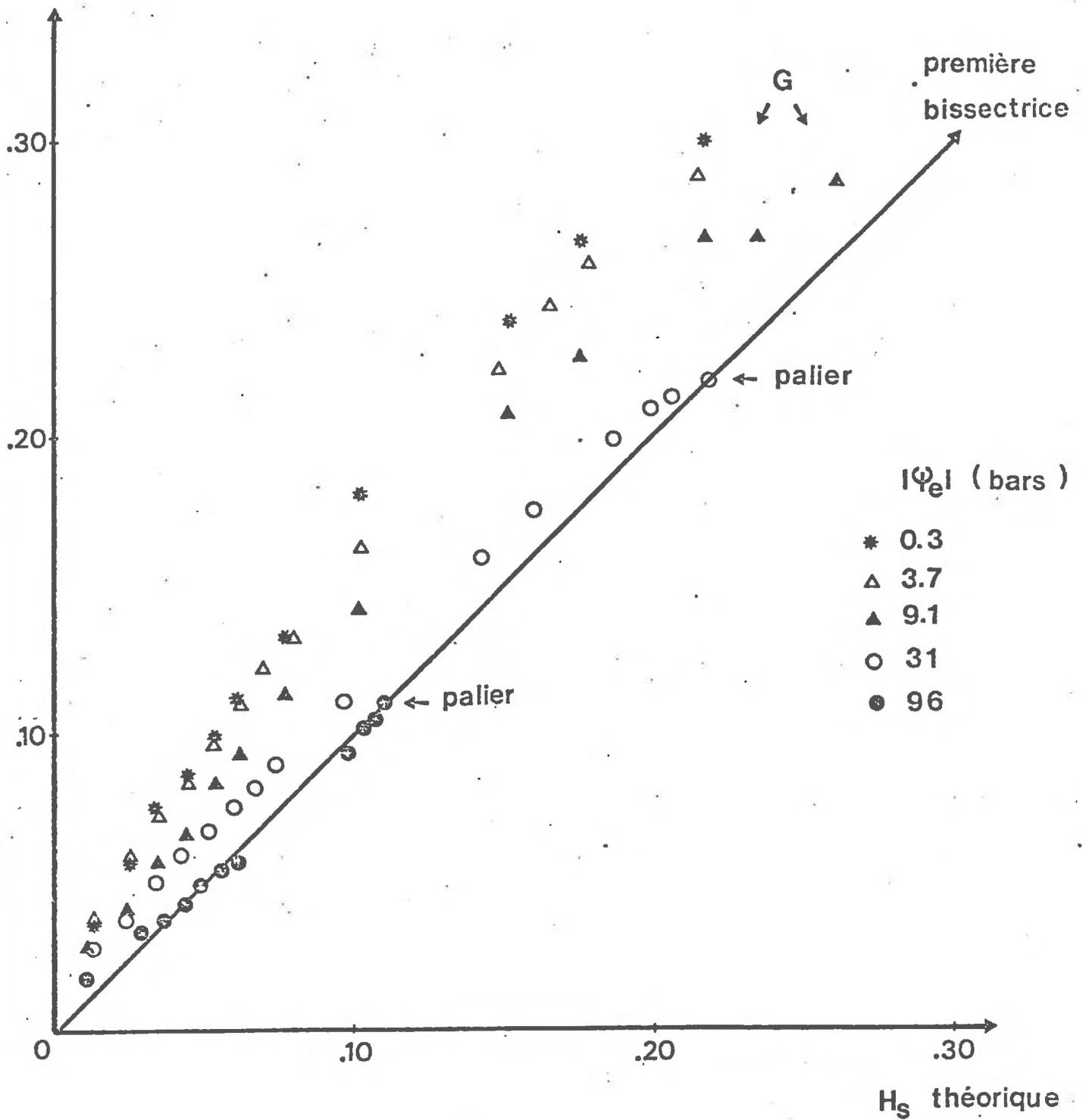


FIGURE 26 : Imbibition dans des massifs d'agrégats : Mise en évidence des transferts liquides (" H_s théorique" est calculé sur la seule base de transferts gazeux).

H_e	$ \psi_e $	Régression(1) $H_{s \text{ exp}} = f(H_{s \text{ théorique}})$ (2)	Ecart $ H_{s \text{ exp}} - H_{s \text{ th}} $ maximum	Heure d'obtention de $H_{s \text{ eq}}$ ou $H_s = 0,28$ (3)	
				Expérimental	Théorique
0,196	0,3	$H_{s \text{ exp}} = 1,330 H_{s \text{ th}} + 0,028$	0,090	40h	88h ⁽⁶⁾
0,087	3,7	$H_{s \text{ exp}} = 1,263 H_{s \text{ th}} + 0,029$	0,079	48h	88h ⁽⁶⁾
0,065	9,1	$H_{s \text{ exp}} = 1,086 H_{s \text{ th}} + 0,023$	0,056	63h	88h ⁽⁶⁾
0,043	31	$H_{s \text{ exp}} = 0,953 H_{s \text{ th}} + 0,017$	0,016	80 à 90 h ⁽⁵⁾	> 150h
0,029	96	$H_{s \text{ exp}} = 0,937 H_{s \text{ th}} + 0,003$	0,006	60 à 70 h ⁽⁴⁾	60h

Tableau 22 : Mise en évidence des transferts liquides pour une imbibition dans des massifs d'agrégats.

- (1) $r^2 \sim 0,99$; $n = 11$ à 15 , quelle que soit H_e
- (2) "H_s théorique" suppose que la totalité des transferts s'effectue en phase gazeuse.
- (3) $H_{s \text{ eq}} = H_s$ à l'équilibre
- (4) $H_{s \text{ eq}} = 0,112$
- (5) $H_{s \text{ eq}} = 0,210$
- (6) On a fait l'approximation $H_{re} = 1$.

Remarque : sur la figure 26 il est concevable qu'aux fortes humidités H_s , les valeurs " $H_{s \text{ exp}}$ " et " $H_{s \text{ th}}$ " puissent "se rapprocher" de la première bissectrice ; $H_{s \text{ exp}}$ étant élevée, le flux réel d'eau vers la semence est faible et les variations de H_s lentes ; la cinétique "théorique", définie pour une valeur H_s plus faible, est caractérisée par un flux plus élevé tendant ainsi à réduire l'écart $|H_{s \text{ exp}} - H_{s \text{ th}}|$.

3.2. Recherche de "surfaces équivalentes" d'imbibition.

La démarche précédente oblige à introduire dans la plupart des cas le fractionnement de la surface totale de la semence en ses deux composantes, S_1 et S_v . Seul est connu jusqu'à présent l'intervalle de variation du rapport $\frac{S_1}{S_t}$.

$$\begin{cases} \frac{S_1}{S_t} = 0 & \text{si } H_e = 0,029 \\ \frac{S_1}{S_t} \sim 0,35 & \text{si } H_e = 0,200 \end{cases} \quad (\text{cf. chapitre 3 : "contact terre-graine"})$$

Le tableau 23 indique les valeurs $\left(\frac{S_1}{S_t}\right)$ qui minimisent pour chaque valeur $|\psi_e|$ les résidus $(H_{s \text{ exp}} - H_{s \text{ th}})_{(1)}$.

H_e	0,029	0,043	0,065	0,196
$ \psi_e $ (Bars)	96	31	9,1	0,3
$\frac{S_1}{S_t}$	0	0,07	0,24	0,37
$\frac{(S_1/S_t)}{(S_1/S_t) \text{ pour } H_e = 0,196}$	0	0,19	0,65	1,00
K_e (ordre de grandeur) (cm/sec)	10^{-13} à 10^{-14}	10^{-12}	10^{-11}	10^{-7}

Tableau 23 : Recherche de surfaces équivalentes (cf.fig. 27)

(1) " $H_{s \text{ th}}$ " n'a plus le même sens que précédemment puisqu'interviennent les deux types de transfert.

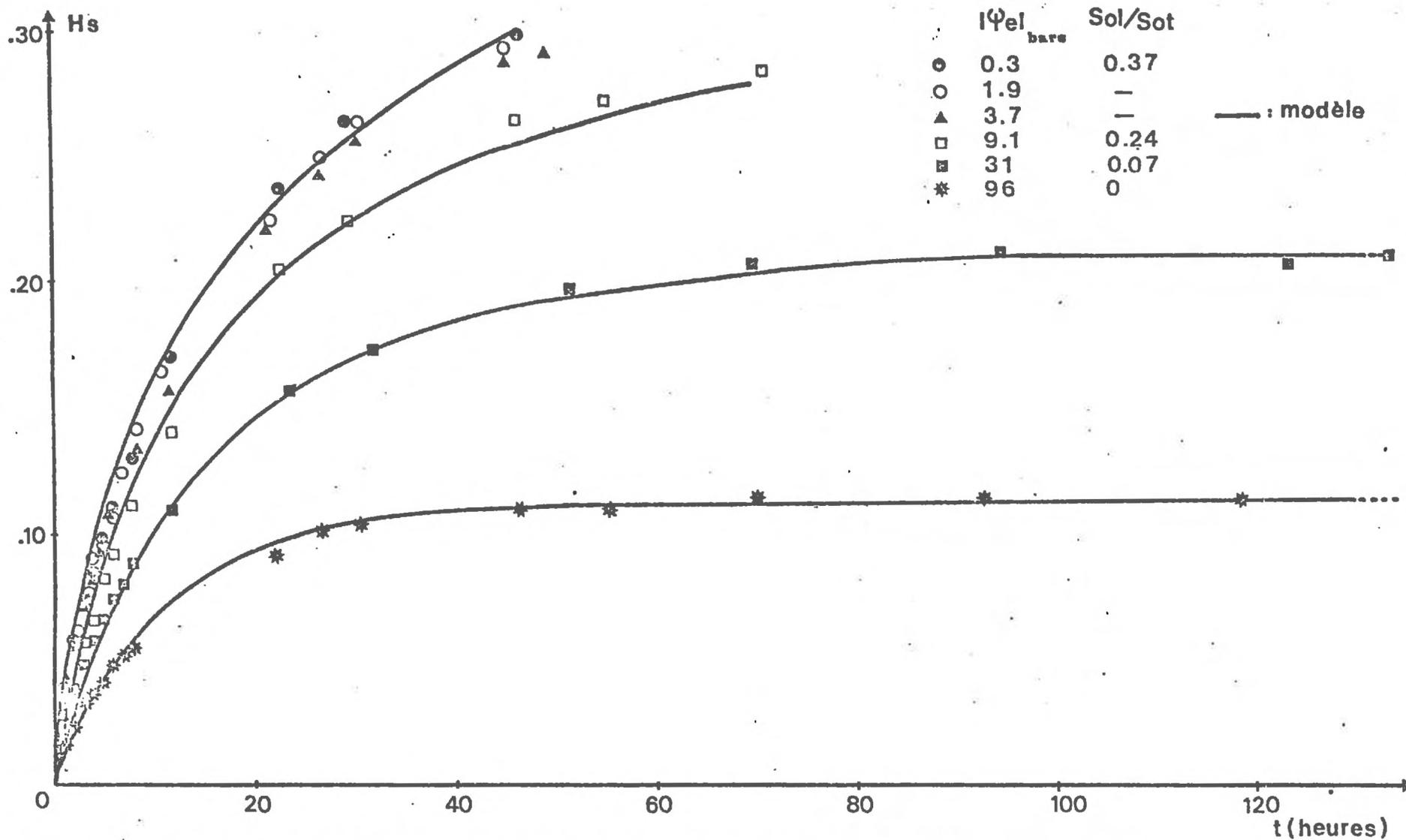


FIGURE 27 : Imbibition dans des massifs d'agrégats : Recherche des surfaces équivalentes.
 (Les données expérimentales sont celles de la figure 25).

Le tableau précédent justifie plusieurs observations relatives aux valeurs (S_1/S_t) obtenues :

a) Le rapport $\left[(S_1/S_t) / (S_1/S_t)_{H_e = 0,196} \right]$ traduit la diminution progressive des flux liquides par rapport au cas non limitant défini par $|\psi_e| = 0,3$ Bars. On constate que celle-ci est sans rapport d'ordre de grandeur avec les variations de K_e . Les variations du rapport (S_1/S_t) expriment aussi bien des variations de surface réelle que le jeu simultanément d'un gradient de potentiel et d'une valeur de K_e autour de la semence sur la cinétique résultante.

b) Lorsque $H_e = 0,196$, on observe une forte convergence entre la valeur (S_1/S_t) estimée sur l'ensemble de la cinétique d'imbibition ($S_1/S_t = 0,37$) et la valeur précédemment obtenue -pour un même état structural et une même humidité- au cours de l'analyse du "contact terre-graine" ($S_1/S_t = 0,34$). Les cinétiques obtenues en milieu agrégé humide et peu tassé sont donc très reproductibles.

c) Dans l'intervalle $[0 ; 0,37]$, défini pour les variations de S_1/S_t , on peut faire l'hypothèse d'une variation continûment décroissante de la fonction $S_1/S_t = f(\psi_e)$ (figure 28) sans toutefois prétendre à une explication fine de cette liaison -le choix du modèle l'interdit-. Une telle liaison sera fonction de l'état structural du sol -le tassement permettant d'augmenter la borne supérieure de S_1/S_t sans que cet état puisse en modifier la borne inférieure (à $|\psi_e| = 96$ Bars, quelque soit l'état structural, $S_1/S_t = 0$). (1)

D'une façon générale, l'analyse des résultats en termes de décomposition des flux et de surface équivalente semble particulièrement efficace. La mise en oeuvre de cette méthode n'étant inféodée à aucun système "terre-graine" particulier, nous la généraliserons en l'appliquant à un cas expérimental déjà rencontré (semences enrobées dans une phase argileuse saturée).

(1) La figure 28 ne fait que reprendre les données du tableau 23. Nous donnons ici une expression analytique de la fonction $S_{ol}/S_{ot} = f(\psi_e)$ qui sera utilisée ultérieurement.

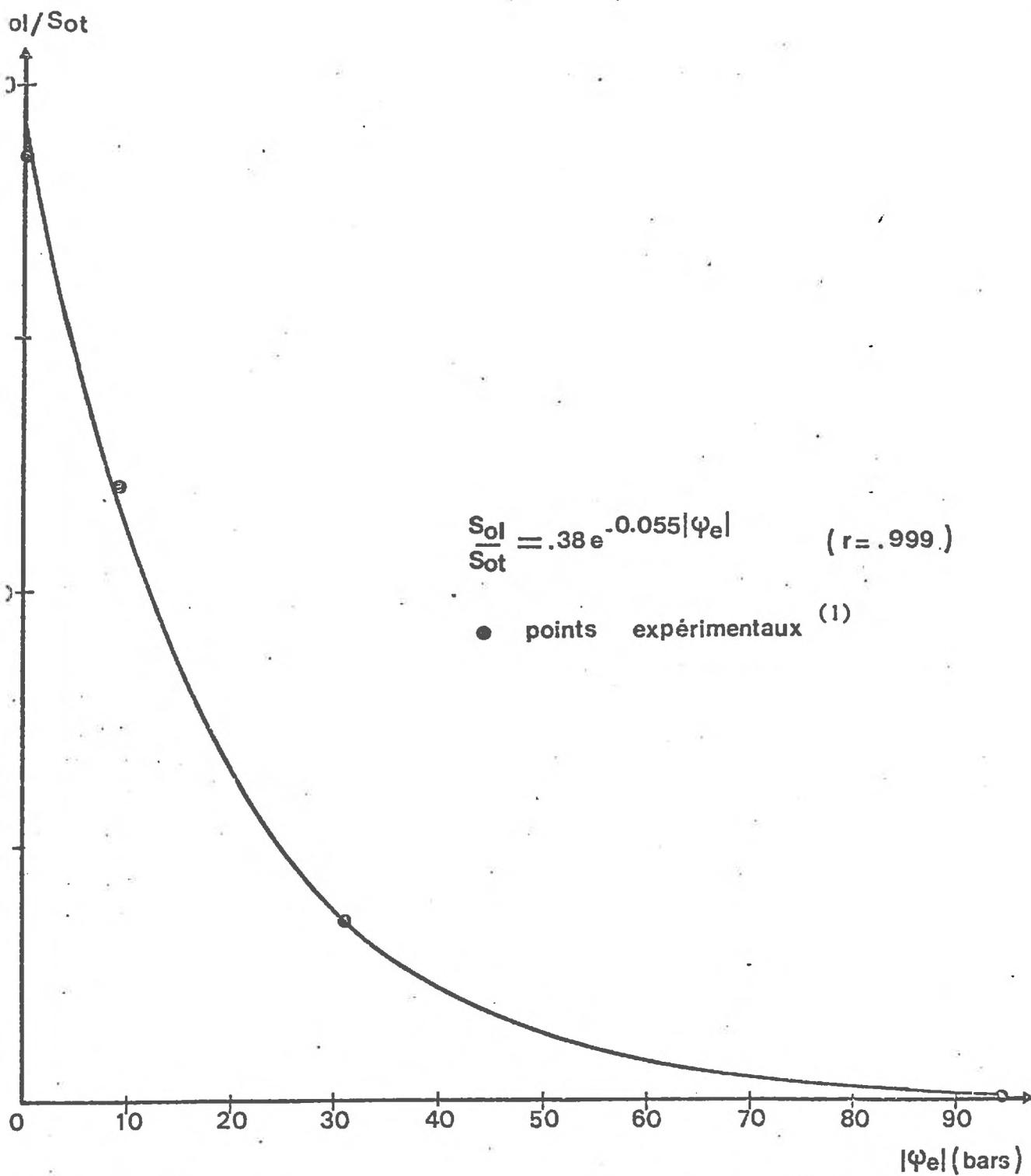


FIGURE 28 : Relation entre le rapport S_{ol}/S_{ot} et le potentiel à l'extérieur de la semence.

(1) Les "points expérimentaux" sont ici les valeurs calculées obtenues pour différentes expériences (Tableau 23).

IV GENERALISATION DE L'ANALYSE DES RESULTATS EN TERMES DE "SURFACE EQUIVALENTE".

Au cours de ce chapitre (partie A, paragraphe 2), nous avons présenté et partiellement analysé l'imbibition de semences enrobées d'une phase argileuse continue et saturée, telle que $|\psi_e| = 16$ Bars. Nous avons développé par ailleurs le caractère probablement limitant dans ce cas de la conductivité ⁽¹⁾ et qui justifie l'introduction du concept de "surface équivalente".

La figure 24 (chapitre 4, partie A), qui donne une comparaison entre deux cinétiques en phase liquide -eau pure et argile à 16 Bars- indique une différenciation très rapide de celles-ci. Or, au moins au début de l'imbibition, le potentiel du sol est dans tous les cas négligeables par rapport à celui de la semence. On peut donc en inférer un rôle probablement limitant des transferts d'eau à l'extérieur de la semence dans le cas de la phase argileuse -terme K_e -.

D'autre part, la structure de l'argile autour de la semence étant continue et l'observation visuelle permettant le diagnostic d'un bon "contact terre-graine" nous ferons l'hypothèse suivante : en supposant que toute la surface de la semence fonctionne en phase liquide, ($S_v = 0$), la détermination de $\frac{S_1}{S_t} < 1$ sera interprétée comme une mise en évidence du caractère limitant des transferts à l'extérieur de la semence (figure 29).

Le tableau 24 compare les résultats de la recherche de surfaces équivalentes pour la phase argileuse et pour le sol de "Montluel".

(1) Voir tableau 6 pour un ordre de grandeur de K_e puisqu'aux faibles teneurs en eau la conductivité est presque uniquement déterminée par les caractéristiques de la phase argileuse.

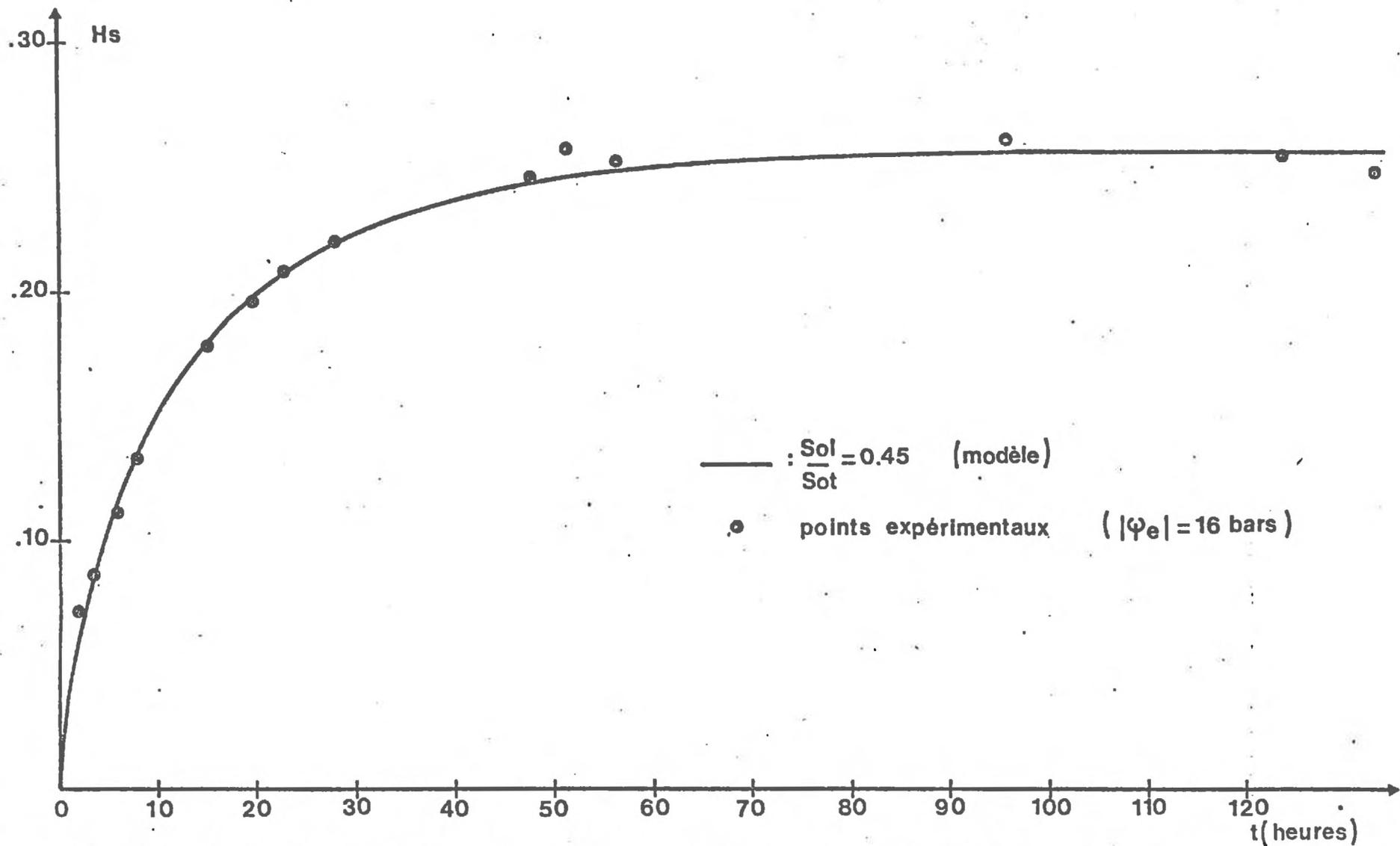


FIGURE 29 : Imbibition dans une phase argileuse continue et saturée : Données expérimentales et modélisées. (Les données expérimentales sont celles de la figure 24).

	Phase argileuse		Sol limoneux de Montluel	
	Cas (1)	Cas (2)	Cas (1)	Cas (2)
$ \psi_e $ (Bars)	0	16	~ 0	16
Etat structural	continu	continu	peu tassé ($\bar{\gamma}_d \sim 1$)	peu tassé ($\bar{\gamma}_d \sim 1$)
$\frac{S_1}{S_t}$	1,00	0,45	0,37	0,16 *
$\frac{S_1}{S_t} (2) / \frac{S_1}{S_t} (1)$	0,45		0,43	

Tableau 24 : Recherche de surface équivalente pour une phase argileuse et un sol limoneux.

* d'après relation $\frac{S_1}{S_t} = f(\psi_e)$

La proximité des valeurs 0,45 et 0,43 semble indiquer un même effet des caractéristiques hydriques des deux sols sur la cinétique d'imbibition lorsque H_e est progressivement réduite. Ce phénomène se conçoit d'autant mieux qu'aux faibles valeurs H_e , les caractéristiques hydriques déterminantes sont en fait celle de la phase argileuse. Enfin, dans l'hypothèse où la totalité de la surface de la semence fonctionne réellement en phase liquide dans la pâte argileuse, ces résultats peuvent permettre de confirmer le sens des "surfaces équivalentes" déterminées précédemment. Ces surfaces intègrent l'ensemble des effets pouvant limiter un flux vers la semence (K_e , S réelle).

V CONCLUSION.

Les résultats expérimentaux et l'analyse modélisée qui leur est associée mettent en évidence différents cas typiques d'imbibition, tels qu'ils ont pu être décrits dans leurs grandes lignes. L'utilisation simultanée de la décomposition des flux, du concept de surface équivalente, et

l'analyse de situations comparatives permettent de proposer un schéma d'ensemble du processus de l'imbibition.

C'est en se basant sur ce schéma d'ensemble que nous proposerons une typologie des réponses des semences à différents systèmes physiques.

C. TYPLOGIE DES RÉPONSES DES SEMENCES DE MAÏS.

Cette typologie a été ébauchée à la suite de l'analyse du "contact terre-graine" (chapitre 3) : elle peut maintenant être complétée en couvrant l'ensemble du domaine des teneurs en eau du matériau et des conditions physiques associées (niveau de tassement).

I PRINCIPE DE CONSTRUCTION.

Les conditions d'alimentation en eau de la semence sont classées en opérant des "coupures" sur des caractéristiques du sol qui renvoient aux deux variables explicatives de l'imbibition : potentiel de l'eau du sol et état structural.

La définition d'intervalles $[\psi_e]$ discriminants découle des résultats acquis : germination possible/impossible, définition de H_e , approximation $\psi_s - \psi_e = \psi_s$ légitime ou non.

L'état structural -en fait, le niveau de tassement- est défini de la manière suivante :

- domaine non limitant : le milieu "tassé" correspond à une structure quasi-continue ($\bar{\gamma}_d = 1,6$) tandis que le milieu "peu tassé" est défini pour une gamme de variation de densité de 0,9 à 1,3.

- domaine limitant : le milieu "tassé" est paramétré par une densité égale à 1,4, compte-tenu de la difficulté de tassement de sols secs. Le choix provient notamment de l'analyse de la figure 17 (Relations "densité-teneur en eau-énergie"). Le milieu "peu tassé" est peu modifié par rapport à sa définition relative au domaine précédent. Seule sa gamme de variation est réduite et, en termes de densité, s'étend sur l'intervalle $[0,9 - 1,0]$.

Dans le cas où $|\psi_e| > 16$ Bars, on a seulement pris en compte le cas où le milieu est "peu tassé" (sol "sec", difficulté de tassement au semis).

Le choix de ces niveaux de tassement, associé à une humidité du milieu extérieur à la semence, définit des rapports S_1/S_t utilisables dans une simulation :

- Dans le cas de sols peu tassés, on se réfère aux résultats schématisés sur la figure 28 ($S_1/S_t = f(\psi_e)$ pour $\bar{\gamma}_d \sim 1$).

- Dans le cas de sols plus ou moins tassés, on affecte à la valeur $\frac{S_1}{S_t}$ définie en milieu "peu tassé" un facteur d'accroissement qui découle de l'effet du tassement sur l'amélioration du "contact terre-graine" (cf chapitre 3, tableau 14). Ainsi, si le passage de $\bar{\gamma}_d = 0,9$ à $\bar{\gamma}_d = 1,4$ se traduit par un accroissement de la surface d'imbibition de 1,7 environ (tableau 14), on affecte au rapport $\frac{S_1}{S_t}$ mesuré lorsque $\bar{\gamma}_d = 0,9$ ce facteur multiplicatif, et ceci, quelle que soit la valeur ψ_e considérée.

L'ensemble de ces règles de construction permet d'établir le tableau 25

II COMMENTAIRE SUR LA TYPOLOGIE

Le tableau synthétise un ensemble de cas typiques résultant de combinaisons des deux variables prises en compte. Rappelons cependant quelques conditions dans lesquelles la lecture du tableau doit être effectuée :

- la température est constante et égale à 20°C,
 - l'intervalle $[|\psi_e| = 12 \text{ Bars} ; |\psi_e| = 16 \text{ Bars}]$ correspond à un seuil critique extrêmement délicat vis à vis du jugement sur la germination,

- les cas dégagés sont a priori transposables à d'autres classes texturales -on se réfère en effet à des fonctions caractéristiques d'un matériau et non pas à une classe texturale particulière- bien que les sols "sableux" suivent probablement un schéma moins nuancé (variations brutales des fonctions $\psi_e = f(H_e)$, $K_e = f(\psi_e)$, $\frac{S_1}{S_t} = f(\psi_e)$).

Pour un état structural donné -agrégats calibrés et peu tassés par exemple- un regard d'ensemble sur le tableau 25 reconstitue le profil instantané d'un lit de semences en voie de dessèchement : la partie droite du tableau correspond alors aux semences les plus superficielles, la partie gauche aux semences placées en profondeur, tandis que la partie centrale délimite une profondeur "intermédiaire" et critique.

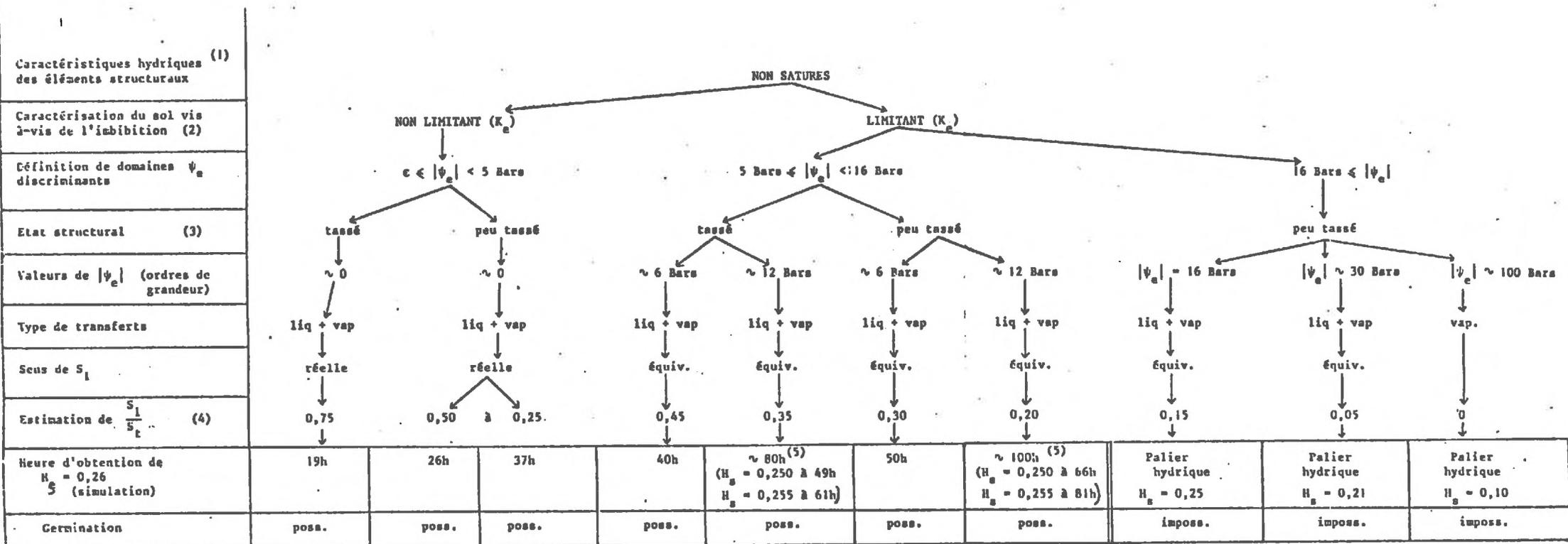
Une telle lecture du tableau illustre bien les rôles décisifs de la localisation des semences dans le profil et de la vitesse de dessèchement de ce dernier.

III CONCLUSION PARTIELLE.

Après avoir contrôlé expérimentalement le rôle de la variable $(\psi_s - \psi_e)$, nous avons pu rendre compte des cinétiques d'humectation dans le cas de milieux agrégés portés à une humidité choisie. A l'aide de ces résultats, nous avons proposé une typologie des réponses des semences de maïs pour différents états physiques du lit de semence.

Dans tous les cas, nous avons considéré un système isolé "sol-semence" pour lequel les variations d'humidité du milieu ne sont dûs qu'aux prélèvements négligeables de la semence : ainsi, la situation initiale caractérisant le milieu (mise en imbibition) se confond avec la situation finale (germination ou équilibre hydrique des semences).

En réalité, le dessèchement des couches de surface peut être très rapide. Pour cette raison, il est nécessaire de compliquer "le système terre-graine" en imposant au contact de la semence des variations d'humidité au cours de l'humectation.



(1) Pour le domaine saturé, cf. tableau 17.
 (2) Le domaine non limitant correspond à un rôle négligeable de K_e et à l'approximation possible $\psi_e - \psi_0 = \psi_0$
 (3) Pour la définition des états structuraux, cf. texte.
 (4) Pour l'estimation de S_1/S_t , cf. texte.
 (5) Pour $|\psi_e| \sim 12$ Bars, $H_c = 0,26$ constitue une valeur asymptotique.

Tableau 25 : Typologie des cinétiques d'imbibition en milieu non saturé.

TROISIÈME PARTIE

CHAPITRE V

=====

IMBIBITION ET GERMINATION DES SEMENCES DANS UN LIT DE

SEMENCES EN VOIE DE DESSÈCHEMENT.

La typologie qui vient d'être construite met en évidence le problème majeur de la "réussite d'un semis en conditions sèches". Les résultats de l'imbibition -et, corrélativement, de la germination- sont très sensibles aux variations du potentiel extérieur à la semence et des termes qui en dérivent (K_e , S). C'est précisément dans le lit de semences que ces variations de potentiel sont importantes, déterminant des gradients hydriques élevés pour des pas d'espace et de temps généralement réduits (cm, heures).

L'analyse du rôle de la localisation des semences dans un lit de semences se réduit alors au problème suivant : conjuguer la réalisation simultanée de deux cinétiques -celle du dessèchement du sol et celle de l'imbibition des semences- pour proposer un schéma d'imbibition des semences soumises à des conditions variables d'alimentation en eau. Pour atteindre cet objectif, deux exigences sont imposées :

- suivre l'évolution des profils hydriques d'un lit de semences soumis à un régime évaporatif choisi, pour prévoir l'imbibition et à la germination des semences à différentes profondeurs,

- connaître indépendamment l'évolution de la teneur en eau des semences pour différentes localisations dans le profil et confronter la prévision aux données expérimentales.

Le premier point renvoie immédiatement à la disponibilité d'une technique non destructive de mesure des teneurs en eau permettant notamment de déterminer celles-ci sur de petits volumes, à proximité immédiate de la semence. Le deuxième impose la mise en place d'un dispositif bien contrôlé qui simulera un lit de semences soumis à un régime évaporatif imposé et permettra de connaître les fonctions $H_s = f(t)$.

A. MESURE DES TENEURS EN EAU PAR ATTENUATION γ .

I PRINCIPE.

Nous ne donnerons ici qu'une description succincte de la technique adoptée (1). Le dispositif de mesure (schéma 15) comporte une source émettrice de rayons "gamma" (source $^{137}\text{C}_s$) dont les impulsions sont détectées (détecteur) et comptées (analyseur et enregistrement des comptes) après traversée d'un échantillon dont la teneur en eau volumique est à mesurer. Le principe de mesure de celle-ci (θ_e) revient à comparer le nombre d'impulsions enregistrées pour un échantillon de référence - lame d'air - à celui obtenu après traversée de l'échantillon-sol. Ce principe est synthétisé dans la relation :

$$N_w = N_o e^{-1(\mu_s \rho_s + \mu_w \rho_w \theta_e)}$$

- N_o = nombre d'impulsions pour l'échantillon de référence (lame d'air)
 N_w = nombre d'impulsions pour l'échantillon-sol
 l = épaisseur de l'échantillon-sol
 μ_s = coefficient d'absorption massique du sol
 μ_w = coefficient d'absorption massique de l'eau
 ρ_s = masse volumique sèche de l'échantillon-sol
 ρ_w = masse volumique de l'eau
 θ_e = humidité volumique de l'échantillon-sol.

(1) Pour une présentation détaillée de la mesure des teneurs en eau par atténuation γ , voir la bibliographie et aussi "Mesures par atténuation γ des teneurs en eau d'un profil hétérogène en voie de dessèchement". L. BRUCKLER et R. GUENNELON (à paraître).

L'atténuation des rayons γ incidents est donc fonction de la masse volumique et de la teneur en eau du volume traversé, pourvu que les deux coefficients d'absorption massique caractéristiques du sol et de l'eau μ_s et μ_w soient préalablement connus.

La théorie de la mesure par atténuation γ montre que la valeur utile des coefficients μ_w et μ_s n'est pas leur valeur théorique ⁽¹⁾, mais leur valeur expérimentale, assortie d'une incertitude sur leur mesure. L'emploi de valeurs théoriques dans le calcul des teneurs en eau, appliqué à un dispositif particulier, conduirait en effet à commettre une véritable erreur de mesure. Le tableau 26 compare les valeurs expérimentales ⁽²⁾ obtenues aux valeurs théoriques, la concordance entre les deux séries de données constituant un bon indicateur de la qualité de l'appareillage de mesure.

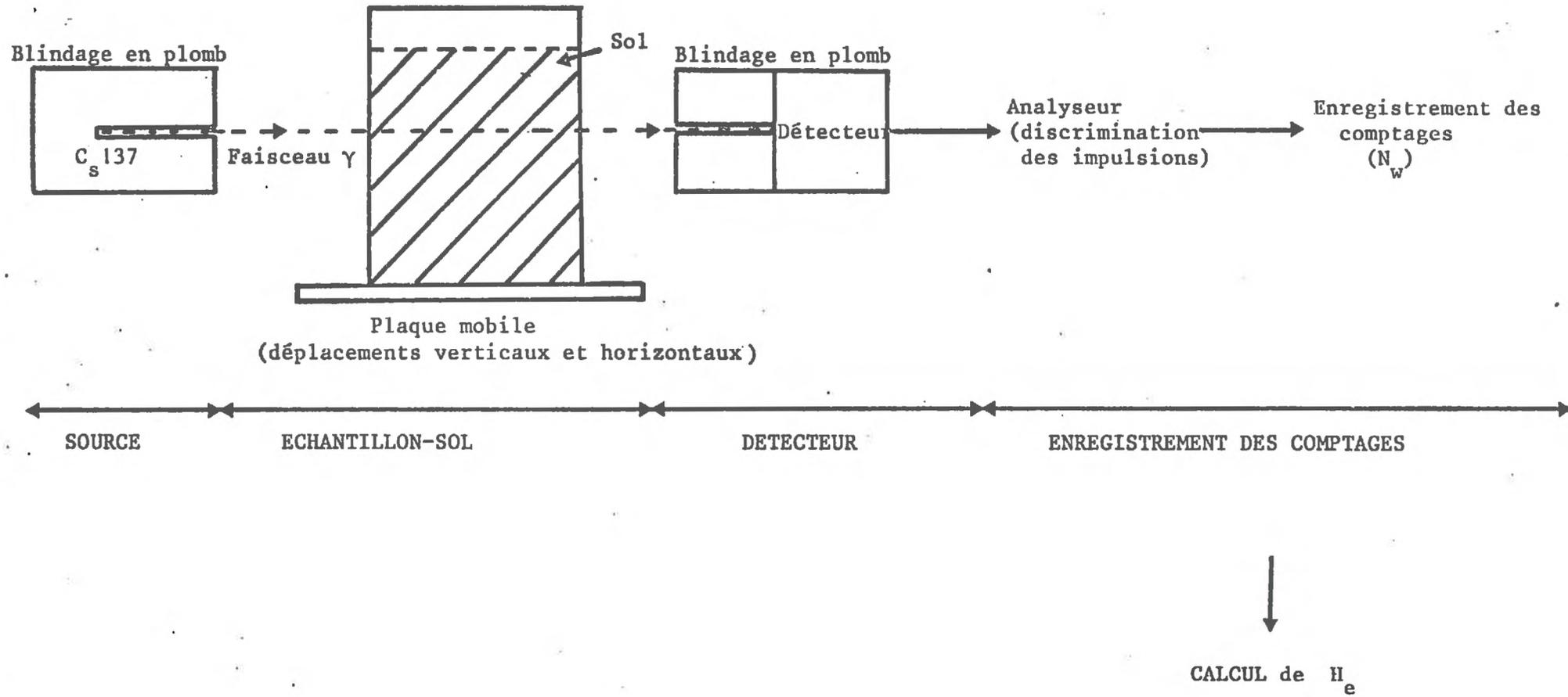
	μ_w	μ_s
Valeur théorique	0,0860	0,0770
Valeur expérimentale	0,0855	0,0771
Incertitude absolue	0,0010	0,0015
Incertitude relative	0,012	0,0199

Tableau 26 : Valeurs théoriques et expérimentales des coefficients μ_w et μ_s .

De telles valeurs expérimentales sont obtenues par d'autres auteurs pour des dispositifs analogues au nôtre (GARDNER, 1972 ; COREY, 1971).

-
- (1) Elle est calculée et fonction de la composition chimique et de la structure physique de l'élément considéré.
- (2) dans le calcul, on a éliminé "l'effet Compton", pour obtenir les valeurs expérimentales relatives à notre propre appareillage.

SCHEMA 15 : Dispositif de mesure des teneurs en eau par atténuation γ .



II MESURE DE LA TENEUR EN EAU POUR UN MILIEU HETEROGENE.

L'utilisation d'une seule source émettrice d'un faisceau γ ne permet d'établir qu'une seule équation $N_w = f(N_o)$, donc de ne connaître qu'une seule inconnue (θ_e). C'est pourquoi la plupart des travaux relatifs aux mesures d'humidité par atténuation γ sont appliqués à des systèmes physiques "simples" (structure continue, sable pur) pour lesquels la densité $\bar{\gamma}_d$ est pratiquement constante et connue.

En d'autres termes, la grandeur θ est mesurable si deux conditions sont réalisées :

- a) $\bar{\gamma}_d$ doit être invariante quelle que soit la teneur en eau du matériau (pas de phénomènes notables de retrait-gonflement à l'échelle du volume de mesure de θ).
- b) $\bar{\gamma}_d$ doit être homogène sur l'ensemble du profil scruté.

Si le premier point est vérifié pour le "sol de Montluel" (cf. figure 19 : courbes de retrait), l'arrangement des éléments structuraux du lit de semences ne permet pas d'admettre, a priori, la vérification du second. Une étude préalable de la distribution des densités dans le lit de semences qui servira de modèle expérimental est donc nécessaire ; il faudra, de plus, prévoir les conséquences de cette distribution de $\bar{\gamma}_d$ sur la précision de mesure de l'humidité.

Deux lits de semences ont été réalisés : l'un absolument sec, l'autre caractérisé par une humidité homogène $-H_e = 0,11-$, tous deux obtenus par un arrangement manuel des agrégats (2 à 3 mm). Puisque l'humidité est connue, la mesure par atténuation γ a été mise en oeuvre pour connaître la répartition des densités dans chaque volume mis en place. Sur 26 points scrutés dans chaque cas, on aboutit au résultat global donné par le tableau 27.

	$H_{e1} = 0$	$H_{e2} = 0,11$
$\bar{\gamma}_d$	0,940	0,941
$\sigma \bar{\gamma}_d$	0,026	0,023

Tableau 27 : Caractéristiques physiques des lits de semences réalisés.

En confondant les résultats obtenus aux deux humidités, on construit le tableau 28.

Intervalles définis sur $\bar{\gamma}_d$	< 0,925	0,925 - 0,955	> 0,955
Fréquences observées $Z^{(1)}$	28,7	40,4	30,9

(1) la distribution est légèrement disymétrique mais ceci n'est dû qu'à trois valeurs sur 52.

Tableau 28 : Distribution des densités sur 52 points scrutés.

Les valeurs moyennes $\bar{\gamma}_d$ (0,940 et 0,941) sont identiques et les lits de semences présentent la même variabilité ($\sigma_1 = 0,026$; $\sigma_2 = 0,023$). Quelle que soit l'humidité du matériau, la porosité texturale des agrégats est donc pratiquement invariante et l'arrangement structural issu du protocole de fabrication aboutit à un état structural unique et reproductible.

D'autre part, sous hypothèse de normalité sur la distribution des valeurs $\bar{\gamma}_d$, on obtient sur la moyenne de 10 points scrutés ⁽¹⁾ un intervalle de confiance sur $\bar{\gamma}_d$ tel que, à 95 % :

(1) nous mesurerons en effet θ_e en un point en moyennant les mesures sur dix zones centrées autour de ce point.

$$\bar{\gamma}_d \in [0,940 - 0,016 ; 0,940 + 0,016]$$

Cette indétermination sur la valeur ponctuelle de $\bar{\gamma}_d$ participera à l'incertitude de mesure de θ_e puisqu'en chaque point, on ne pourra estimer qu'une valeur probable de la densité.

III INCERTITUDE DE MESURE SUR θ_e

Nous n'avons jamais utilisé jusqu'à présent l'humidité H_e ou θ_e comme variable explicative des transferts d'eau vers un absorbant, mais la précision des mesures de θ_e est ici déterminante, puisque les valeurs ψ_e en seront déduites.

En choisissant une valeur $H_e = 0,10$ ⁽¹⁾ pour illustrer notre calcul d'incertitude, le tableau 29 décompose en ses différents termes l'incertitude relative totale définie sur H_e .

Source d'incertitude	Densité du volume scruté	Epaisseur scrutée	Coefficient μ_w	Emission aléatoire du rayonnement	Total
Valeur de l'incertitude relative	0,036	0,0007	0,012	0,084	0,133

Tableau 29 : Sources d'incertitudes sur la mesure de H_e .

Les incertitudes dues à l'émission aléatoire du rayonnement ⁽²⁾ et à l'intervalle de confiance défini sur $\bar{\gamma}_d$ sont ici prépondérantes et on aboutit au terme du calcul à l'intervalle : $H_e = 0,100 \pm 0,013$.

(1) On aurait pu choisir une valeur H_e plus faible en restant dans l'ordre de grandeur des teneurs en eau que nous rencontrerons. Le calcul montre qu'on aboutit toujours au même ordre de grandeur de l'incertitude absolue.

(2) Ce terme pourrait être diminué si le temps de comptage en un point était augmenté : cette exigence est ici contradictoire avec le nombre de points à scruter, lui-même fonction de la vitesse de dessèchement du profil.

A titre de comparaison, on a mesuré pour un lit de semences préalablement humecté de façon homogène, la teneur en eau moyenne \bar{H}_e selon deux méthodes -gravimétrie et atténuation γ - (tableau 30).

	\bar{H}_e	ΔH_e
Gravimétrie (1)	0,118	< 0,001
Atténuation γ	0,116	0,011

Tableau 30 : Comparaison des mesures par gravimétrie et par atténuation γ .

IV CONCLUSION.

La technique de mesure adoptée a des avantages décisifs : pas de destruction de l'échantillon, rapidité relative des mesures, pas d'espaces réduits de l'ordre de quelques millimètres. Néanmoins, le cumul de différentes sources d'incertitude nuit à sa précision comparativement à d'autres méthodes. On peut accepter cette marge d'incertitude en prenant le parti de confronter systématiquement les mesures avec des résultats acquis indépendamment (mesures gravimétriques par exemple) : la convergence dégagée d'un ensemble de données indépendantes constituerait alors un argument en faveur de la validité des valeurs moyennes de H_e obtenues par atténuation γ .

(1) Pour cette mesure, la faible incertitude est due à la précision des pesées (0,1 mg).

B. IMBIBITION DES SEMENCES DANS UN LIT DE SEMENCES EN VOIE DE DESSÈCHEMENT.

I PRINCIPE DE LA MANIPULATION.

Il découle de l'expression modélisée du flux d'eau vers la semence tel que nous l'avons établi :

$$\left(\frac{\Delta H_s}{\Delta t}\right)_t = -\alpha_1 \cdot K' \cdot (H_s) \cdot i \cdot S_1 \cdot (\psi_s - \psi_e) - \alpha_v \cdot D' \cdot (H_s) \cdot i \cdot S_v \cdot (p_s - p_e)$$

En excluant les constantes (α_1 , α_v), cette relation combine différents types de fonctions comme l'indique le tableau 31.

Fonctions de H_s			Fonctions de t		
Fonctions	Connue	Inconnue	Fonctions	Connue	Inconnue
$\psi(H_s)$	X		$\psi_e(t)^{(1)}$		X
$p_s(H_s)$	X		$p_e(t)^{(1)}$		X
$K'(H_s)$	X		$\frac{So_1}{So_t}(t)^{(2)}$		X
$D'(H_s)$	X				
$i(H_s)$	X				

(1) pour une localisation donnée dans le profil : sinon $\psi_e = f(t, z)$

(2) $\frac{So_1}{So_t}$ est une fonction de ψ_e , donc de t .

Tableau 31 : Fonctions explicitant le flux vers la semence.

Le principe de la manipulation consiste à obtenir les fonctions inconnues pour prévoir les cinétiques d'imbibition à partir de l'expression de $(\Delta H_s / \Delta t)_t$, dans le cas où les semences sont placées dans un lit de semences en voie de dessèchement.

Toutes les fonctions caractéristiques de la semence sont connues , les termes complémentaires permettant d'accéder à l'expression d'un flux étant uniquement fonction de la variable t . En fait, cette série de fonctions découle de la seule mesure de l'humidité H_e .

Le mode d'obtention des fonctions de t renferme cependant deux hypothèses qu'il est utile de formuler :

a) à chaque instant et pour une profondeur quelconque du profil, les valeurs du potentiel de l'eau en phase liquide et en phase gazeuse tendent vers une valeur unique d'équilibre, ce qui justifie la conversion directe $H_e(t) \rightarrow \psi_e(t) \rightarrow p_e(t)$ (cf. chapitre I).

b) il existe une fonction unique et continue $So_1/So_t = f(\psi_e)$ si, et seulement si, l'état structural initial est caractérisé (cf. chapitre IV et figure 28).

Si le principe de la manipulation est ainsi posé, il reste à en définir les modalités pratiques et les choix qu'elles impliquent.

II CONCEPTION PRATIQUE DE LA MANIPULATION.

2.1. Dispositif d'ensemble (schéma 16).

Le schéma du dispositif général (schéma 16) comporte trois unités aux fonctions distinctes :

a) Appareillage de mesure de H_e .

Le principe de la mesure et les difficultés d'ordre général de la manipulation ont déjà été exposés : seules seront précisées les conditions pratiques de mesures -pas de temps, pas d'espace-.

En effectuant plusieurs cycles consécutifs de scrutation sur différentes verticales de la cuve contenant le lit de semences -pas verticaux

de 4 mm, pas horizontaux de 30 mm-, la détermination de la teneur en eau pour une profondeur "z" donnée sera réalisée dans les limites suivantes : $H_e(z)$ est obtenue en cumulant 10 mesures ponctuelles dans l'intervalle ($z - 4 \text{ mm} ; z + 4 \text{ mm}$).

- on définit ainsi une estimation de la densité apparente $\bar{\gamma}_d$ (1)

- les profils hydriques sont construits à un temps moyen \bar{t} appartenant à l'intervalle maximal $[\bar{t} - 3h ; \bar{t} + 3h]$ pour une durée totale de manipulation de l'ordre de 140 heures (2).

Ce choix constitue pratiquement le seul compromis permettant d'estimer un intervalle de confiance sur $\bar{\gamma}_d$ tout en conservant des intervalles définis sur \bar{t} raisonnables par rapport à la vitesse des phénomènes.

b) Mesure des cinétiques d'imbibition.

L'imbibition des semences s'effectue à température constante ($T = 20^\circ\text{C}$) on réalise dans des conditions identiques deux semis (dans deux cuves). L'énergie de tassement est minimale -arrangement manuel des agrégats de 2 à 3 mm, $\bar{\gamma}_d = 0,94$ -. L'état structural ainsi obtenu simule les conditions d'un "contact terre-graine défavorable" et dont toutes les références physiques sont connues :

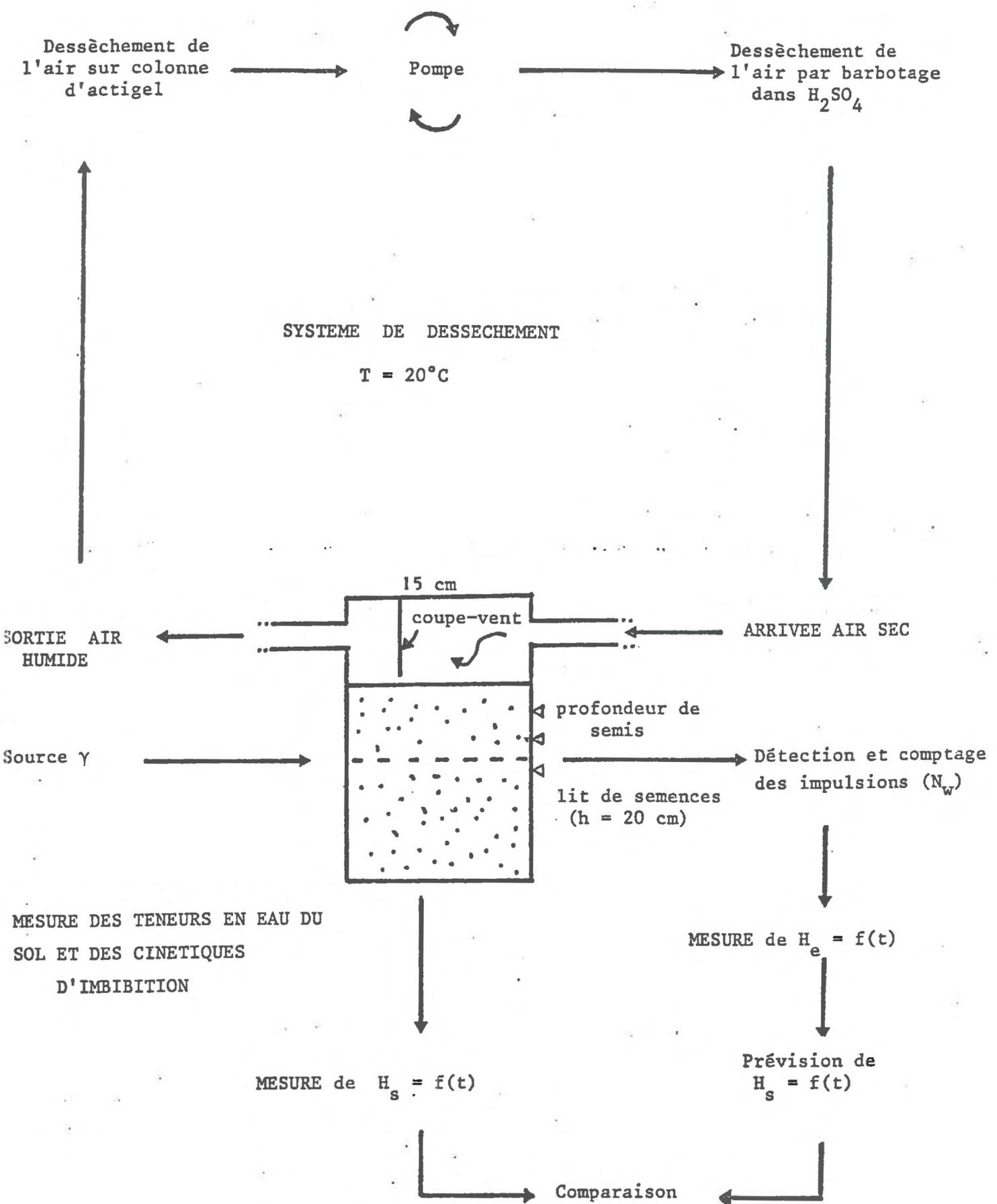
- la première cuve sans prélèvement de semences durant toute la phase d'imbibition -donc sans perturbation- servira à la mesure de H_e par atténuation γ . Les semences placées dans cette cuve seront prélevées en fin de manipulation pour contrôler les germinations.

- la deuxième cuve permettra de prélever des semences en cours d'imbibition et d'obtenir des relations expérimentales $H_s = f(t)$ pour chaque profondeur de semis : trois profondeurs ont été choisies (-1 cm, -3 cm, -6cm) d'après des résultats préliminaires et doivent aboutir à trois cas typiques d'imbibition.

(1) cf. précédemment.

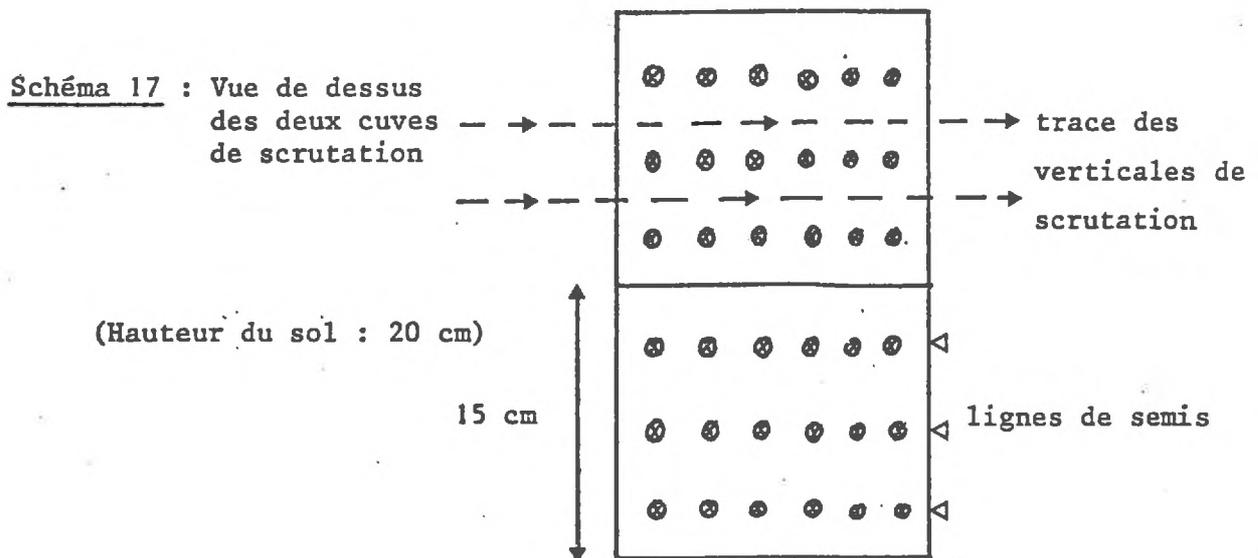
(2) les mesures par atténuation ne sont évidemment pas instantanées ; notons que les cycles de scrutation sont plus rapides en début de manipulations quand la vitesse des phénomènes est maximale.

SCHEMA 16 : Dessèchement du lit de semences : Disposition et Fonction des différentes parties du montage.



Le total des semences disponibles est de 36, soit 12 semences par profondeur. Ce nombre limité de semences est imposé par les caractéristiques géométriques de la cuve ⁽¹⁾ ; il permet de supprimer les interactions entre les prélèvements d'eau dûs aux semences ⁽²⁾ et il est compensé par l'homogénéisation initiale de celles-ci -même valeur ψ_s -

Le prélèvement des semences se fait par un fin fil métallique qui les ceinture et qui apparait à la surface du lit de semences.



c) Mise au point d'un dispositif de dessèchement.

Le choix d'un système de dessèchement est ici primordial. Tout dispositif d'évaporation par radiation aboutirait, en effet, à de forts gradients thermiques, incompatibles avec nos hypothèses. Cette constatation amène à mettre en place un dispositif de dessèchement par circulation d'air sec, mais les rares données techniques disponibles -débit d'air par exemple- ne sont pas directement convertibles en références physiques -niveau maximal d'évaporation journalière par exemple-.

- (1) elles-mêmes fonctions de l'appareillage de mesure de H_e (atténuation γ).
- (2) au vue des caractéristiques de semis du maïs au champ, ce sont bien des conditions sans interactions qu'il faut analyser.

Un bref calcul préliminaire qui relie ces données techniques à une grandeur caractéristique de l'évaporation va nous permettre de définir nos conditions expérimentales.

Schématisons le passage d'un air sec (on pose arbitrairement $H_{r1} = 0,01$ au dessus du lit de semences en deux phases :

- entrée de l'air sec dans tout le volume clos disponible au dessus de la surface du lit (volume V)
- saturation de cet air ($H_{r2} = 1$) et évacuation hors de l'enceinte.

Situation initiale	Situation finale
volume V	volume V
$H_{r1} = \frac{p_1}{p_o}$	$H_{r2} = \frac{p_2}{p_o}$
T = 20°C	T = 20°C

En assimilant la vapeur d'eau à un gaz parfait et puisque T = cte, on écrit :

$$p_1 V = p_o V_o \quad (1), \quad V_o \text{ volume fictif de vapeur d'eau ramené à } p_o \text{ (situation initiale)}$$

$$p_2 V = p_o V_o' \quad (2), \quad V_o' \text{ volume fictif de vapeur d'eau ramené à } p_o \text{ (situation finale)}$$

$$\text{D'après (1) et (2), } \frac{p_1}{p_2} = \frac{V_o}{V_o'}, \quad \text{ou } V_o' = \frac{p_2}{p_1} \cdot V_o \quad (3)$$

On peut écrire d'autre part :

$$V_o' = V_o + \Delta V \quad (4) \quad \Delta V \text{ étant l'accroissement du volume de vapeur}$$

d'eau ramené à p_o lorsque la phase gazeuse passe de H_{r1} à H_{r2} .

D'après (3) et (4),

$$\frac{P_2}{P_1} V_o = V_o + \Delta V \quad (5) \quad \text{soit} \quad \Delta V = V_o \left(\frac{P_2}{P_1} - 1 \right) \quad (6)$$

ou
$$\Delta V = V_o \left(\frac{P_2}{P_o} \cdot \frac{P_o}{P_1} - 1 \right) = V_o \left(\frac{H_{r2}}{H_{r1}} - 1 \right) \quad (7)$$

Et d'après (1),

$$V_o = \frac{P_1}{P_o} \quad (8)$$

En combinant (7) et (8),

$$\Delta V = \frac{P_1}{P_o} V \left(\frac{H_{r2}}{H_{r1}} - 1 \right) = H_{r1} V \left(\frac{H_{r2}}{H_{r1}} - 1 \right) = V(H_{r2} - H_{r1})$$

$$\Delta V = V(H_{r2} - H_{r1}) \quad (9)$$

D'après (9), le volume de vapeur d'eau saturé déplacé ΔV est une fonction simple de V -rôle du débit- et de la différence (H_{r2} - H_{r1}) -rôle du dessèchement préalable de l'air-.

Puisque par hypothèse la vapeur d'eau est un gaz parfait, on écrit :

$$m = P_o \Delta V \cdot \frac{M}{RT} \quad (10) \quad \text{avec } M, \text{ masse molaire de l'eau}$$

m, masse d'eau évaporée correspondant à ΔV.

Et compte-tenu du débit assuré par la pompe, on obtient pour 24 heures de fonctionnement, m = 124 g.

Une nappe d'eau libre soumise aux conditions de dessèchement décrites verrait son niveau s'abaisser d'environ 6 mm/jour. Un contrôle expérimental nous a permis de vérifier cette prévision puisque nous avons obtenu un abaissement de la nappe de 5 à 6 mm⁽¹⁾, valeur déjà élevée de l'évaporation.

(1) il n'est pas surprenant que 6 mm constitue une borne supérieure de l'évaporation si l'on considère l'hypothèse extrême posée dans notre calcul (H_{r1} = 0,01).

Les trois points qui précèdent (a), b), c)) résument donc l'ensemble des techniques expérimentales adoptées et de leurs contraintes : c'est dans ce cadre que nous présenterons les résultats obtenus.

III RESULTATS DE BASE : OBTENTION DES PROFILS HYDRIQUES.

Les courbes représentatives des profils hydriques successifs sont données par la figure 30 : elles ont été lissées d'après l'incertitude sur chaque valeur de H_e .

Le profil 5 est un profil gravimétrique réalisé après destruction de l'une des cuves à t : 144 heures ; il confirme l'allure générale des profils précédents obtenus par atténuation γ . On observe d'autre part qu'au bout d'une heure de dessèchement, la première couche d'agrégats est totalement décolorée. Une mesure de teneur en eau par pesée permet d'affecter à cette couche une humidité $H_e = 0,011$, en équilibre avec l'humidité relative de l'air au dessus de sa surface. ⁽¹⁾

3.1. Essai de vérification des profils moyens déterminés.

Outre la mesure de profils gravimétriques, il est raisonnable de chercher si certaines conséquences qui découlent des lois de diffusion sont vérifiées lorsqu'on met en jeu les valeurs moyennes acquises (H_e).

a) Loi d'évaporation cumulée.

Que les flux évaporatifs s'effectuent de façon prépondérante en phase liquide ou en phase gazeuse, l'évaporation cumulée Q est une fonction linéaire de la racine carrée du temps (PHILIP, 1957 ; GARDNER, 1959) : ⁽²⁾

$$Q = a \sqrt{t} + b$$

t = temps

(1) cet équilibre explique pourquoi sur la figure 30 le point ($z = 0$, $H_e = 0,011$) constitue un "pivot" autour duquel sont construits les profils.

(2) il s'agit d'une déduction théorique à partir des lois de diffusion.

La figure 31 représente la fonction particulière (1) .

$$Q = 9,69 \sqrt{t} - 4,89 \quad Q \text{ en g} \quad \begin{cases} r = 0,993 \\ n = 5 \end{cases}$$

Mise à part la faible variance résiduelle obtenue par ajustement linéaire, on remarquera que les quantités journalières évaporées sont bien inférieures aux prélèvements maximaux calculés permis par le flux d'air sec ; on a affaire à un dessèchement strictement contrôlé par les caractéristiques hydriques du système -en particulier, $H_e = 0,011$ en surface-.

b) Profondeur du front de dessèchement.

La profondeur du "front de dessèchement" est aussi une fonction linéaire de \sqrt{t} (GARDNER, 1959) mais le problème consiste à définir un estimateur du "front" dont il est question.

Nous avons construit deux estimateurs indépendants :

- d'après les profils obtenus par atténuation γ , profondeur z_1 du point d'inflexion des profils hydriques, (2)

- d'après les observations visuelles de dessèchement (parois des cuves transparentes), profondeur d'apparition d'une décoloration des agrégats (z_2)

La figure 32 représente les deux régressions linéaires obtenues :

$$z_1 = 3,1 \sqrt{t} + 0,3 \quad n = 5 \quad , \quad r = 0,991$$

$$z_2 = 3,8 \sqrt{t} - 1,8 \quad n = 9 \quad , \quad r = 0,997$$

(1) elle est obtenue par détermination des surfaces comprises entre deux profils successifs et par pesée de leurs images.

(2) elle est obtenue à partir de la représentation graphique des profils hydriques ; l'incertitude sur z_1 reste limitée (± 2 mm).

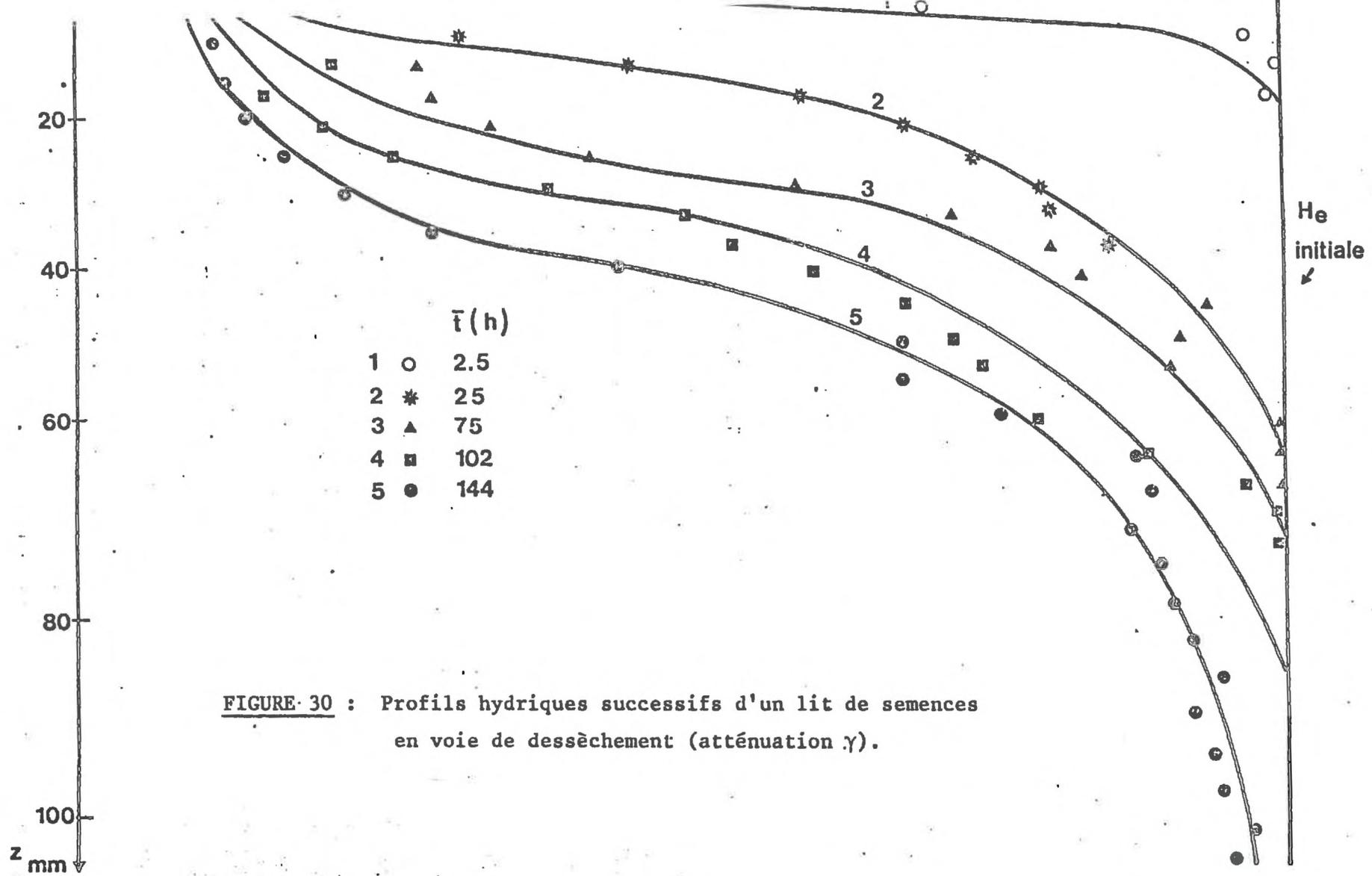


FIGURE 30 : Profils hydriques successifs d'un lit de semences en voie de dessèchement (atténuation γ).

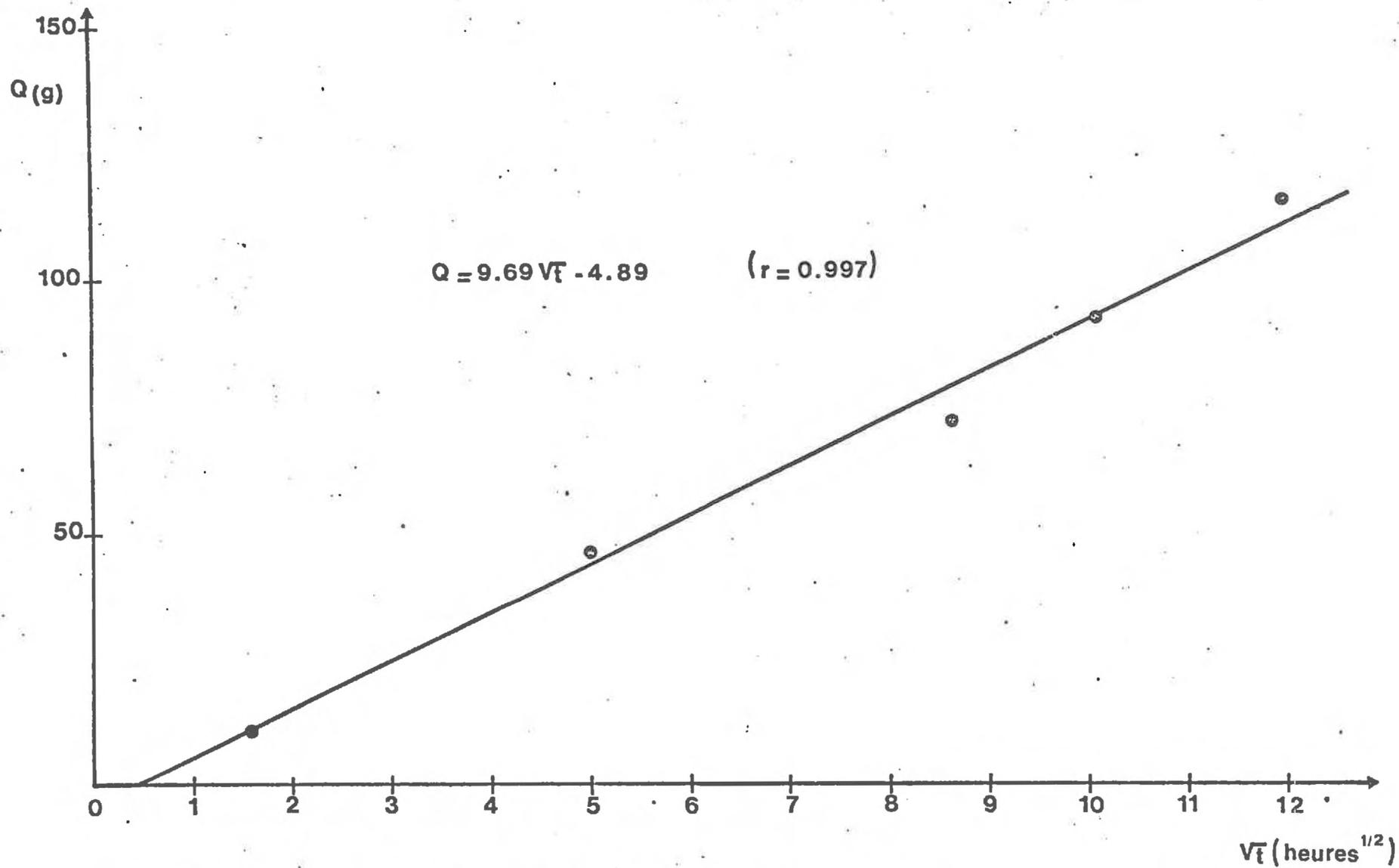


FIGURE 31 : Vérification de la loi d'évaporation cumulée en fonction du temps. (lit de semences en voie de dessèchement).

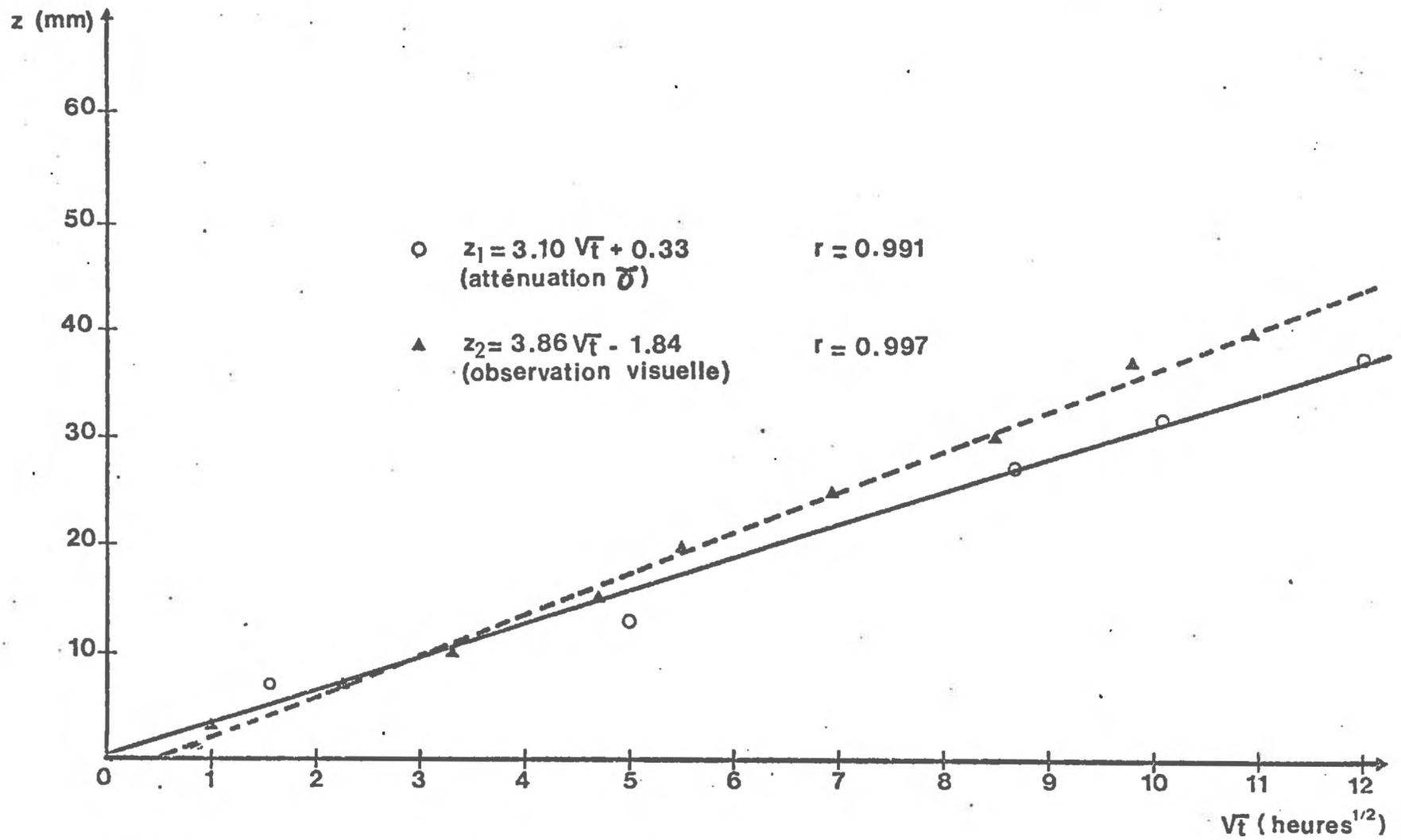


FIGURE 32 : Progression du front de dessiccation en fonction du temps (lit de semences en voie de dessèchement)

Pour expliquer la différence observée ($z_1 - z_2$), nous pouvons mettre en cause la définition imprécise de z_2 pour des valeurs \sqrt{t} comprises entre 5 et 6 -transition diffuse du point de vue de la coloration-. Mais d'une façon générale, les vérifications effectuées confirment les valeurs moyennes de H_e obtenues par atténuation γ . Dans la suite du travail, nous utiliserons donc les profils hydriques de la figure 30.

IV PREVISION DE L'IMBIBITION.

4.1. Analyse préliminaire des relations $\bar{\psi}_e = f(z, t)$.

La combinaison des relations $H_e = f(z, t)$ -profils hydriques- et $\psi_e = f(H_e)$ -relation "potentiel/teneur en eau"- permet de décrire les relations $\psi_e = f(z, t)$ (tableau 32).

\bar{t} (1) \ z	10 mm	30 mm	60 mm
2,5	1,6 ⁽¹⁾	1,4	1,4
25	34	2,6	1,4
75	297	5,9	1,6
102	577	22	2,1
144	1201	109	2,8

Tableau 32 : Relations $|\psi_e| = f(z, t)$ pour un sol en voie de dessèchement.

(1) $|\psi_e|$ en Bars

Parallèlement à la manipulation décrite, nous avons réalisé indépendamment une cinétique d'imbibition "de référence" (figure 33) définie pour les conditions suivantes :

$\bar{\gamma}_d = 0,94$ état structural du lit de semence

$H_e = 0,122$ humidité initiale du lit de semence

niveau d'évaporation : $E = 0$

Pour cette cinétique "enveloppe" -puisque $E = 0$ - la germination est déclenchée approximativement à 50h. En confrontant cette réponse avec les données du tableau 32, on peut proposer les prévisions qualitatives suivantes :

- $z = 60$ mm : Jusqu'à 75 heures, $|\psi_e|$ est pratiquement invariant et toujours négligeable par rapport à ψ_s . Pour une telle profondeur, la cinétique doit alors être pratiquement semblable à celle correspondant à la cinétique-enveloppe.
- $z = 10$ mm : Dès 25 heures, la grandeur $|\psi_e|$ est égale à 34 Bars. Pour une telle valeur, la variable H_s est inférieure ou égale à 0,17 ce qui est d'un ordre de grandeur bien inférieur à H_c . Aucune germination ne sera a priori observée mais on observera un temps t de flux nul tel que : $|\psi_e|_t = |\psi_s|_t$.
- $z = 30$ mm : La germination doit être possible au moins pour une partie des semences puisqu'à 75 heures on vérifie encore $|\psi_e| < 12$ Bars. Cependant, si l'on considère la progression rapide du front de dessiccation un certain nombre de jeunes plantules seront probablement desséchées après germination.

4.2. Simulation de l'imbibition.

Tous les termes utiles qui explicitent le flux $(\frac{\Delta H_s}{\Delta t})_t$ (cf. tableau 31) étant déduits des mesures de $\overline{H_e}$, un calcul par différences finies ($\Delta t = 1$ heure) aboutit aux résultats condensés dans le tableau 33 et la figure 34. (1)

	Heure de flux nul : $\frac{\Delta H_s}{\Delta t} = 0$		H_s pour $\frac{\Delta H_s}{\Delta t} = 0$	
	th (1)	exp. (2)	th	exp.
$z = 10$ mm	25 h	25 à 30 h	0,173	0,170
$z = 30$ mm	60 h	60 à 65 h	0,294	0,300
$z = 60$ mm	pas de flux nul	pas de flux nul	germination	germination
$z = 20$ mm (3)	44 h	-	0,253	-

- (1) simulation
 (2) résultats expérimentaux
 (3) simulation uniquement

Tableau 33 : Comparaisons globales des données expérimentales et simulées (Imbibition dans un lit de semences en voie de dessèchement).

D'une façon générale, l'adéquation entre données expérimentales et simulées est très satisfaisante : on vérifie l'ensemble du "montage" et des hypothèses sous-jacentes qui décrivent le flux d'eau vers la semence.

Plusieurs remarques complémentaires précisent ce constat :

- (1) Pour le calcul, on se reportera à l'annexe 5 : il suffit de calculer simultanément et pas à pas les fonctions de t et de H_s pour obtenir des expressions de la forme $(\Delta H_s / \Delta t)_n$.

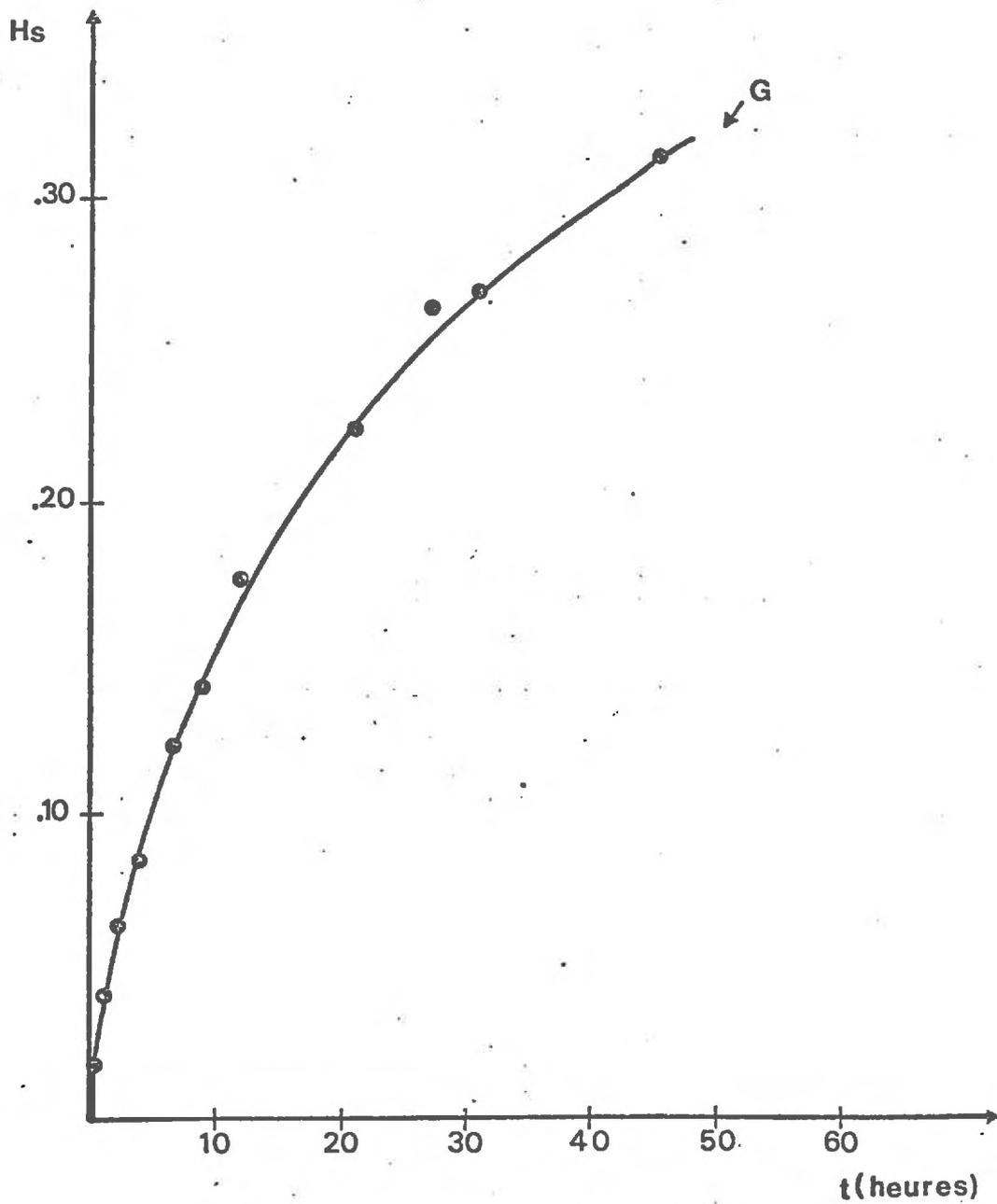


FIGURE 33 : Cinétique d'imbibition de référence
 (agrégats 2 à 3 mm, $H_e = 0,12$, $n = 10$)

(Le tracé continu est approximatif)

a) Au vu des heures d'obtention d'un flux nul, la modélisation s'applique pour de "faibles" valeurs absolues $|\psi_e|$ c'est-à-dire précisément dans un domaine de précision maximale. En effet, lorsque les teneurs en eau H_e sont "élevées", l'incertitude relative sur H_e est minimale ; d'autre part, en considérant la forme de la relation $\bar{\psi}_e(H_e)$, c'est aussi pour les fortes valeurs de H_e que les variations résultantes de ψ_e sont faibles, minimisant ainsi le poids de l'incertitude sur l'humidité.

b) Conformément à l'analyse préliminaire du tableau 32, les cinétiques simulées -et réelles- synthétisent trois cas typiques d'imbibition⁽¹⁾

- - 60 mm, les variations d'humidité sont négligeables. La cinétique d'imbibition est comparable à celle de référence ; le taux de germination est égal à 100 % ;

- à 30 mm, les variations d'humidité deviennent importantes en fin du processus d'imbibition. On retrouve des plantules desséchées dans le profil⁽²⁾ ;

- à 10 mm, le flux est nul dès 25 heures : aucune semence ne germe et les semences se dessèchent (un cas identique est d'ailleurs simulé à 20 mm).

Par différenciation de leur cinétique d'imbibition, les semences fonctionnent comme des "marqueurs" du dessèchement du profil. Cette proposition est également vérifiée pour la valeur particulière $z = 0$ (surface). La comparaison des potentiels de six semences posées en surface et de la couche superficielle (0 - 5 mm) aboutit aux estimations suivantes ($t = 140$ h) :

$$|\psi_s| = 1550 \text{ Bars} \quad (3)$$

$$|\psi_e| = 1500 \text{ Bars} \quad (3)$$

-
- (1) par rapport au problème d'imbibition et de germination en conditions sèches, il semble bien que ces trois cas soient de fait les seuls possibles (FENNECH et PAPY, 1977).
- (2) rappelons que la circulation d'air sec est continue : il faudrait vérifier au champ si la succession jour-nuit et la vitesse de croissance racinaire rend ce cas fréquent.
- (3) d'après les relations expérimentales $\psi_s = f(H_s)$ et $\psi_e = f(H_e)$

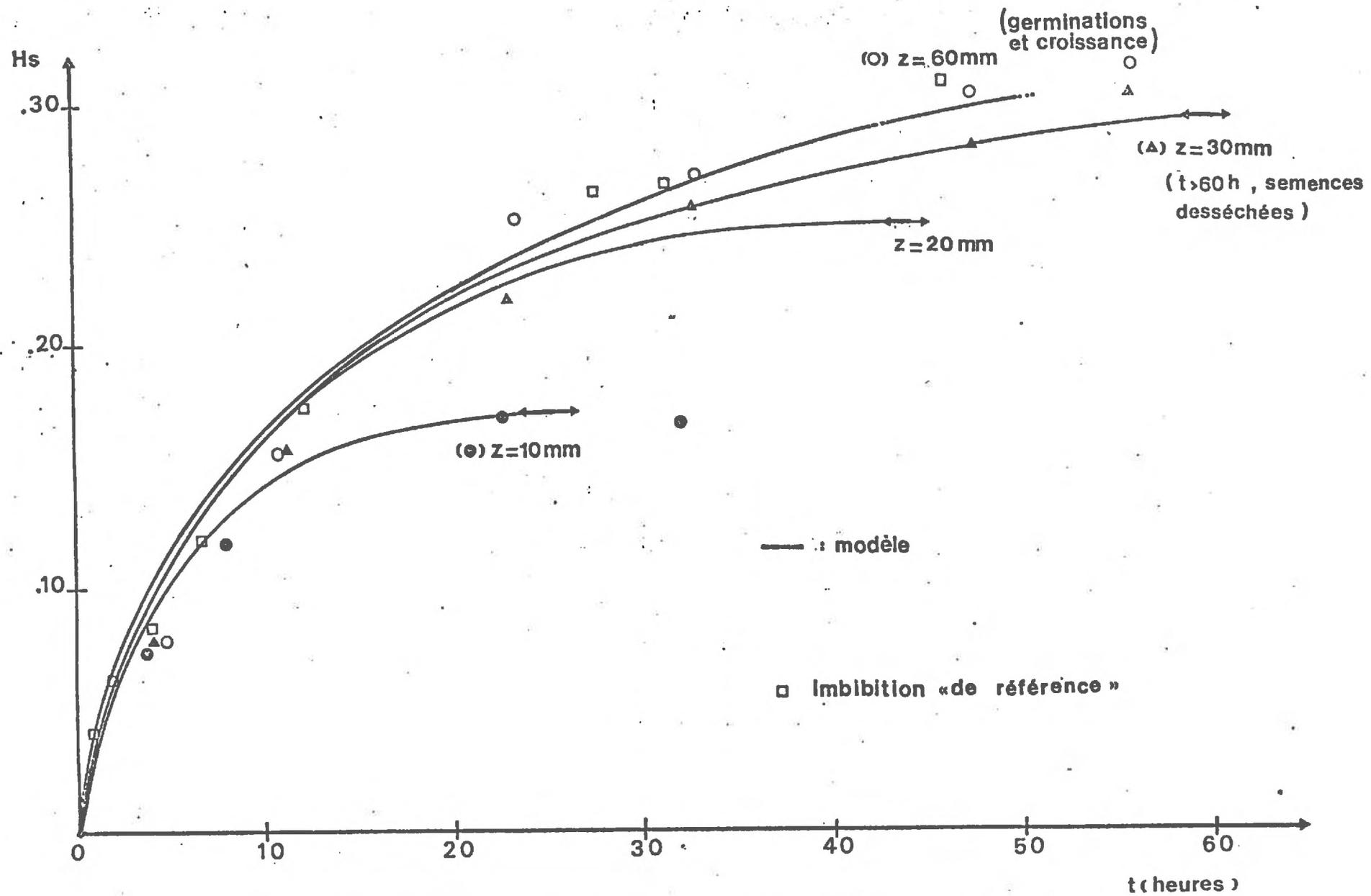


FIGURE 34 : Imbibition dans un lit de semences en voie de dessèchement.
 Données expérimentales et modélisés.

Cette dernière mesure illustre bien les gradients hydriques lièrement élevés observables dans les quelques centimètres qui d le lit de semence. C'est précisément sur cette base que nous avi posé la manipulation décrite et les techniques de mesure associé

V CONCLUSION PARTIELLE.

Un dispositif simulant un lit de semences soumis à un dessè intense et définissant un "contact terre-graine défavorable" nou de reconstituer, expérimentalement et par simulation, trois cas d'imbibition. Le processus d'imbibition rend compte, à lui-seul, global de germinations observé ⁽¹⁾ (33 %).

Dans un dernier paragraphe, nous présenterons les conséquer du dessèchement ultérieur du profil.

(1) donnant des plantules vivantes.

C. PREMIÈRE ÉTUDE DU DESSÈCHEMENT DES SEMENCES DANS UN LIT
DE SEMENCES SOUMIS À ÉVAPORATION.

Après imbibition partielle et obtention d'un flux nul s'amorce dessiccation des semences, conformément à la progression du front de sèchement. La rapidité du dessèchement d'une semence humide placée à l'air libre (figure 35) suggère l'hypothèse suivante: Dans un lit de semences en voie de dessèchement, on peut poser comme première approximation l'égalité instantanée des valeurs ψ_e et ψ_s au cours de la dessiccation du profil. La valeur ψ_s est donc à chaque instant fonction avec $\psi_e = \psi_s$. La prévision de l'évolution progressive des teneurs en de l'absorbant pourrait alors suivre le schéma suivant (schéma 18).

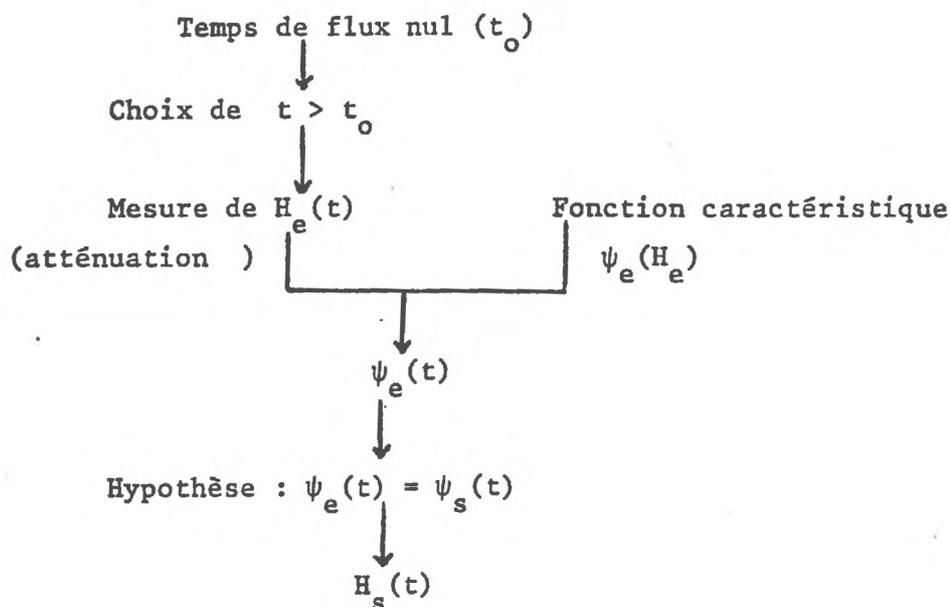


Schéma 18 : Modèle de prévision du dessèchement des semences.

Les résultats numériques conformes à ce schéma sont illustrés la figure 36. Les valeurs H_s mesurées présentent une variabilité n rencontrée jusqu'à présent au cours de l'humectation -rôle éventue la valeur individuelle de H_s pour laquelle $\frac{\Delta H_s}{\Delta t} = 0$. Malgré cette persion et bien que l'hystérésis probable de la fonction $\psi_s(H_s)$ ai

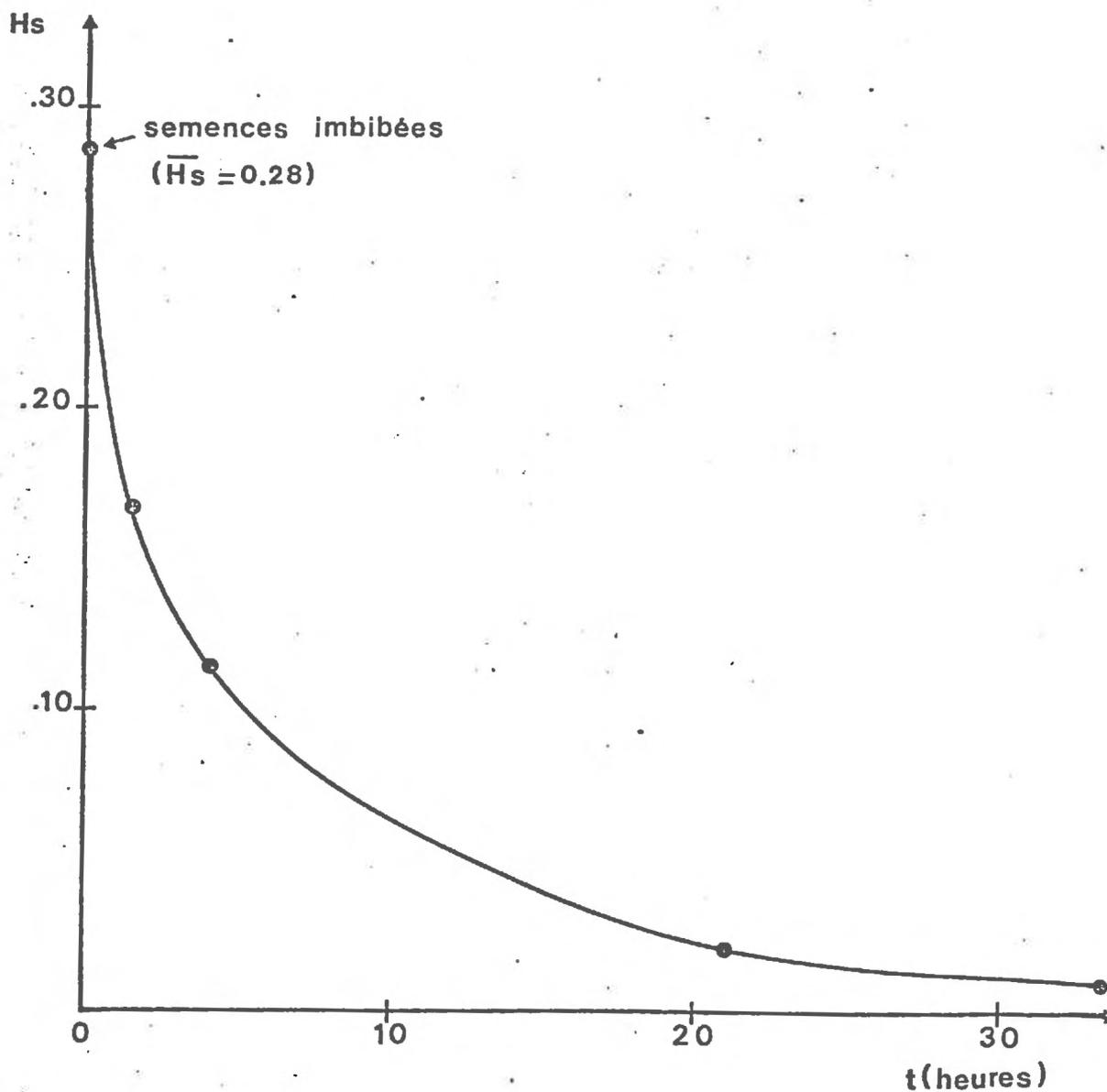


FIGURE 35 : Dessèchement des semences à l'air libre (valeurs moyennes, $n = 30$)

5Le tracé continu est approximatif

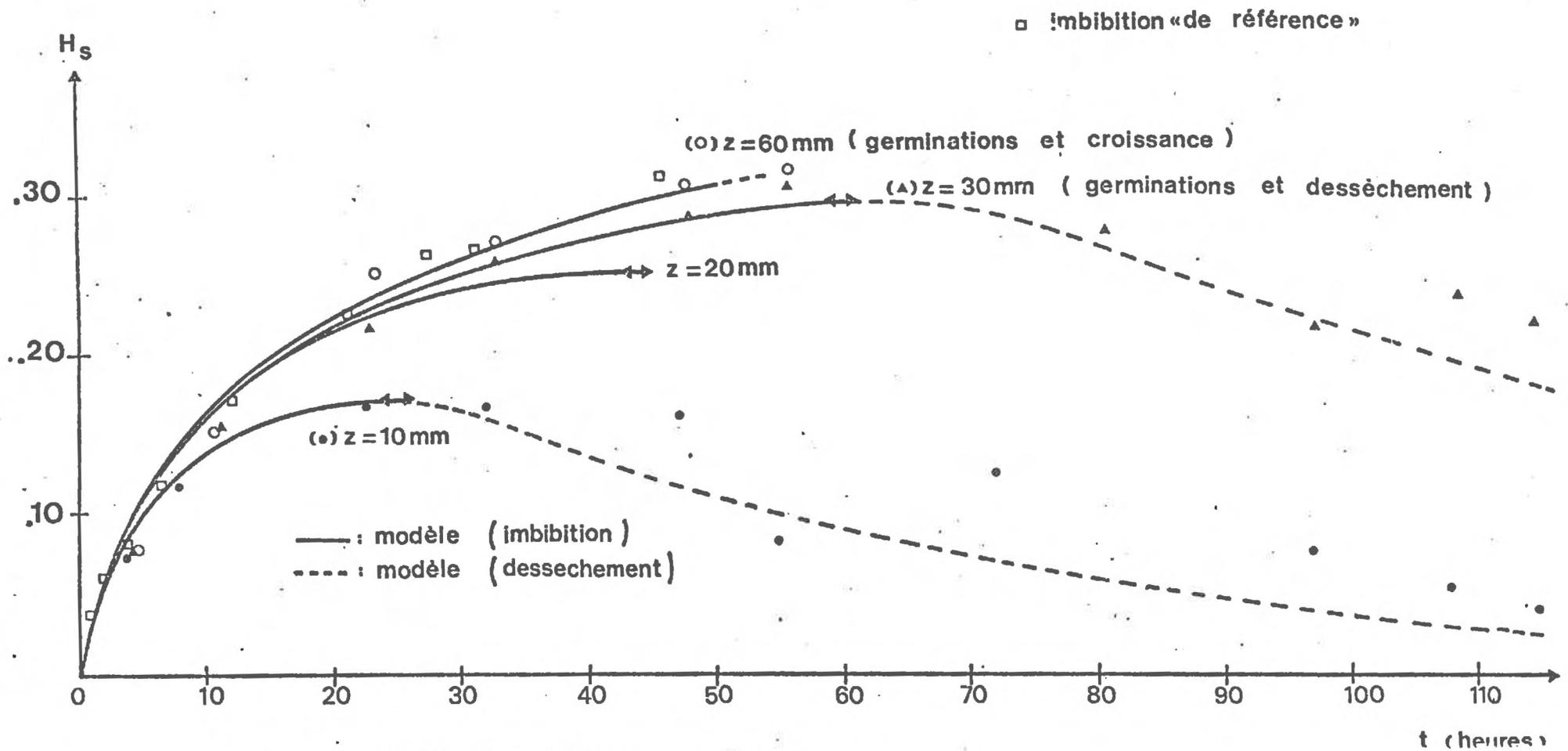


FIGURE 36 • Imbibition

négligée, le schéma proposé constitue une première hypothèse raisonnable pour l'analyse du dessèchement des semences.

En termes de germination, les semences plus ou moins desséchées pourront germer si deux conditions sont réalisées :

- d'une part, réhumectation superficielle du profil,
- d'autre part, conservation de leur aptitude à s'imbiber puis à

* Première condition : Réhumectation du profil.

En excluant de notre champ d'étude l'analyse des conséquences d'un apport extérieur d'eau, nous n'envisagerons que le cas d'une redistribution interne dans le profil des couches profondes vers les couches superficielles (figure 37)⁽¹⁾. On vérifie de façon approchée la conservation entre les deux instants qui encadrent la phase de redistribution. Rapporté à l'ensemble de la hauteur du lit de semences, les teneurs en eau moyennes sont telles que :

$$\bar{H} \text{ initiale} : 0,088 \quad (1) \qquad \bar{H} \text{ finale} : 0,090 \quad (1)$$

(1) moyenne sur 30 mesures.

L'analyse de la figure 37 révèle notamment que la redistribution est trop lente pour déclencher une deuxième série de germinations affectant les semences les plus superficielles. La frange qui limite les valeurs $[|\psi_e| = 12 \text{ Bars} ; |\psi_e| = 16 \text{ Bars}]$ ne se déplace verticalement que de quelques millimètres après sept jours de redistribution⁽²⁾. On pourrait réaliser ce résultat en posant qu'en l'absence de condensations atmosphériques sur les faibles profondeurs de semis, la redistribution interne est toujours insuffisante pour modifier notablement les résultats issus du premier cycle de dessèchement.

(1) la cuve contenant les lits de semences est isolée et il n'y a pas d'aucune évaporation ($T = 20^\circ\text{C}$).

(2) un phénomène isolé de redistribution est d'ailleurs un cas d'écoulement. En conditions naturelles, elle sera au moins combinée avec la poursuite du processus d'évaporation.

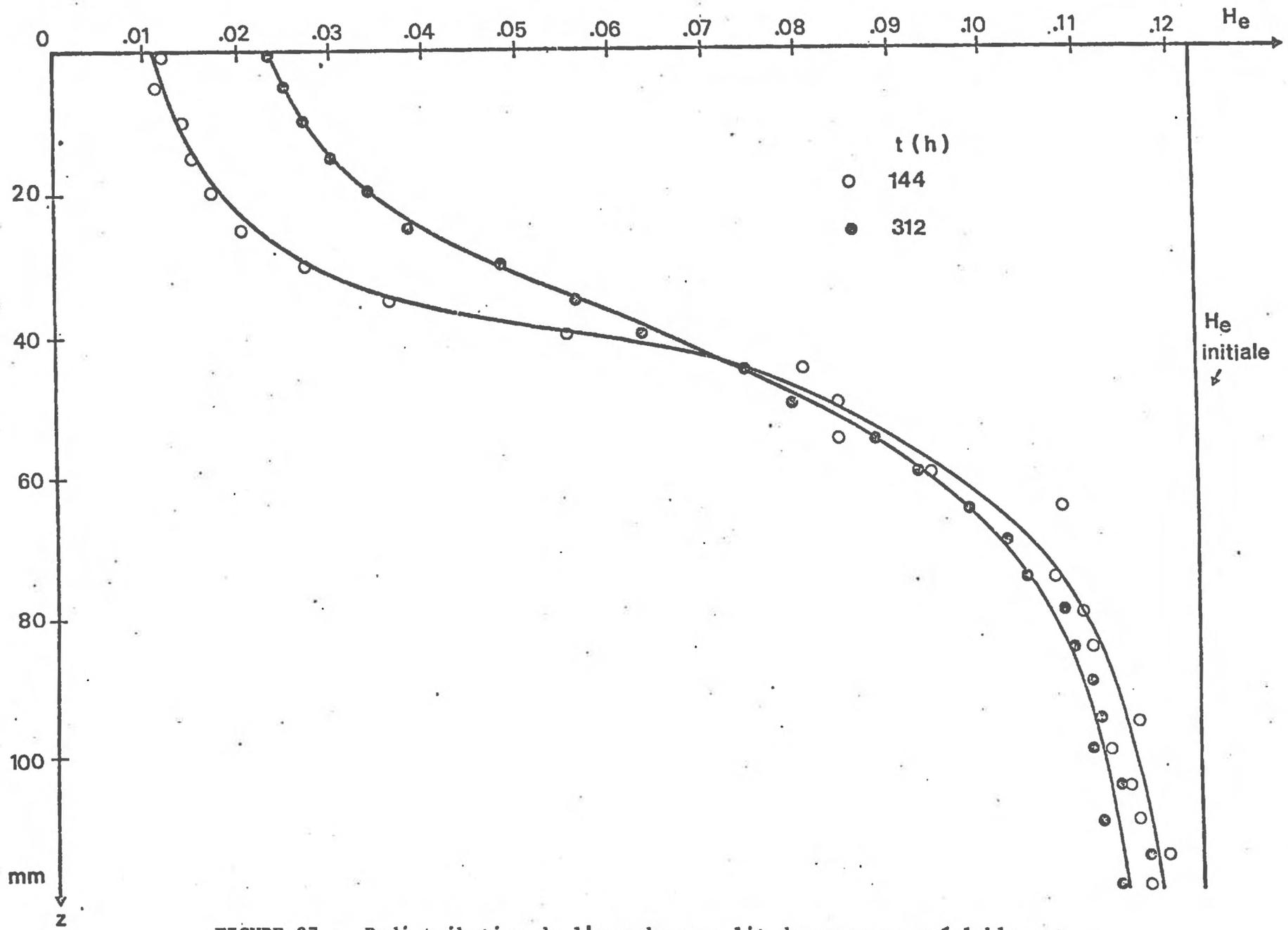


FIGURE 37 : Redistribution de l'eau dans un lit de semences préalablement desséché en surface.

* Deuxième condition : "Réversibilité" de la germination.

Il s'agit d'un retour, du point de vue du physiologiste, à un système différent de celui abordé jusqu'à présent -la semence après un premier cycle humectation-dessèchement-. Compte tenu de l'optique physique adoptée jusqu'à présent et de l'investissement restreint dont ces phénomènes ont -pour nous- été l'objet, nous présenterons nos propres résultats dans l'annexe 6.

CONCLUSION.

En phase d'imbibition ou de dessèchement, les semences présentent un comportement conforme à leur définition d'absorbant. La différence de potentiel sol-semence détermine toujours le sens (imbibition ou dessèchement) et en partie la valeur absolue du flux d'eau vers la semence. Les conditions climatiques suivant le semis seront déterminantes sur l'obtention d'un premier taux de germination, les taux partiels ultérieurs n'étant fonction que des évènements climatiques ⁽¹⁾ et de l'état physiologique des semences ⁽²⁾ (Tableau 34).

(1) susceptibles d'une analyse fréquentielle.

(2) cf. annexe 6.

Profondeur du semis	z = 0	z = 1 cm	z = 2 cm	z = 3 cm	z = 6 cm
Temps de flux nul	ε	25h	44h	60h	pas de flux nul
H_s pour $\frac{\Delta H_s}{\Delta t} = 0$	~ 0	0,17	0,25	0,29	germination
Taux de germination	0	0	0	0 < < 100 %	100 %
Conséquences du dessèchement ultérieur du profil	conservation intacte des semences	deshydratation des semences	deshydratation des semences	deshydratation des semences et plantules (1)	(conséquences éventuelles sur la levée)
Conservation de "l'aptitude à germer"	oui	oui	oui	oui si croissance racinaire << 5 mm	-
Temps nécessaire à la germination si réhumectation du profil ($\psi_e \sim 0$)	50h	< 50h (2)	< 50h (2)	< 50h (2)	-

Caractéristiques hydriques initiales du lit de semences : $|\psi_e| < 2$ Bars

Niveau maximal d'évaporation : 6 mm/j

Etat structural initial du lit de semences : $\bar{\gamma}_d = 0,94$ - agrégats 2 à 3 mm

Qualification du contact terre-graine : Défavorable.

Tableau 34 : Typologie des réponses des semences dans un lit de semences en voie de dessèchement.

(1) si croissance racinaire lente.

(2) cf. annexe 6.

CHAPITRE VI

DÉFINITION D'UN DOMAINE DE VALIDITÉ DU MODÈLE : RÔLE

SPÉCIFIQUE DES SEMENCES.

Nous avons développé à plusieurs occasions l'ensemble des hypothèses qui fixent le cadre de notre modélisation. Si les perturbations possibles du "système terre-graine" tel que nous l'avons défini peuvent provenir du sol -cas particulier des textures sableuses par exemple-, de la semence -rôle des caractères morphologiques et physiologiques de celle-ci-, ou des conditions de leur mise en contact -variations de température notamment-, c'est vers l'absorbant "semence" que nous orienterons ici la discussion : la diversité morphologique et/ou physiologique des semences sèches, et le caractère très partiel des connaissances acquises à leur sujet lorsqu'on adopte un point de vue "physique", justifieraient à eux seuls ce choix prioritaire.

I CARACTÈRE GÉNÉRAL D'UNE FONCTION $\psi_s(H_s)$.

Pour caractériser une semence en tant qu'absorbant, il suffit de construire de façon explicite une fonction $\psi_s(H_s)$ et d'obtenir des données expérimentales explicables par la seule existence de cette fonction. Une telle relation $\psi_s(H_s)$ est représentée sur la figure 38 dans le cas du colza, tandis que la figure 39 illustre l'obtention de paliers de teneurs en eau sur blé et pois (solutions osmotiques, PEG 6 000). En comparant les relations $\psi_s(H_s)$ relatives au maïs et au colza, on peut constater la similitude des ordres de grandeur et de la forme de la courbe représentative $\psi_s(H_s)$. Vis à vis du phénomène d'imbibition, les fonctions $\psi_s(H_s)$ laissent donc apparaître une homogénéité du "matériau-semence" difficilement concevable a priori.

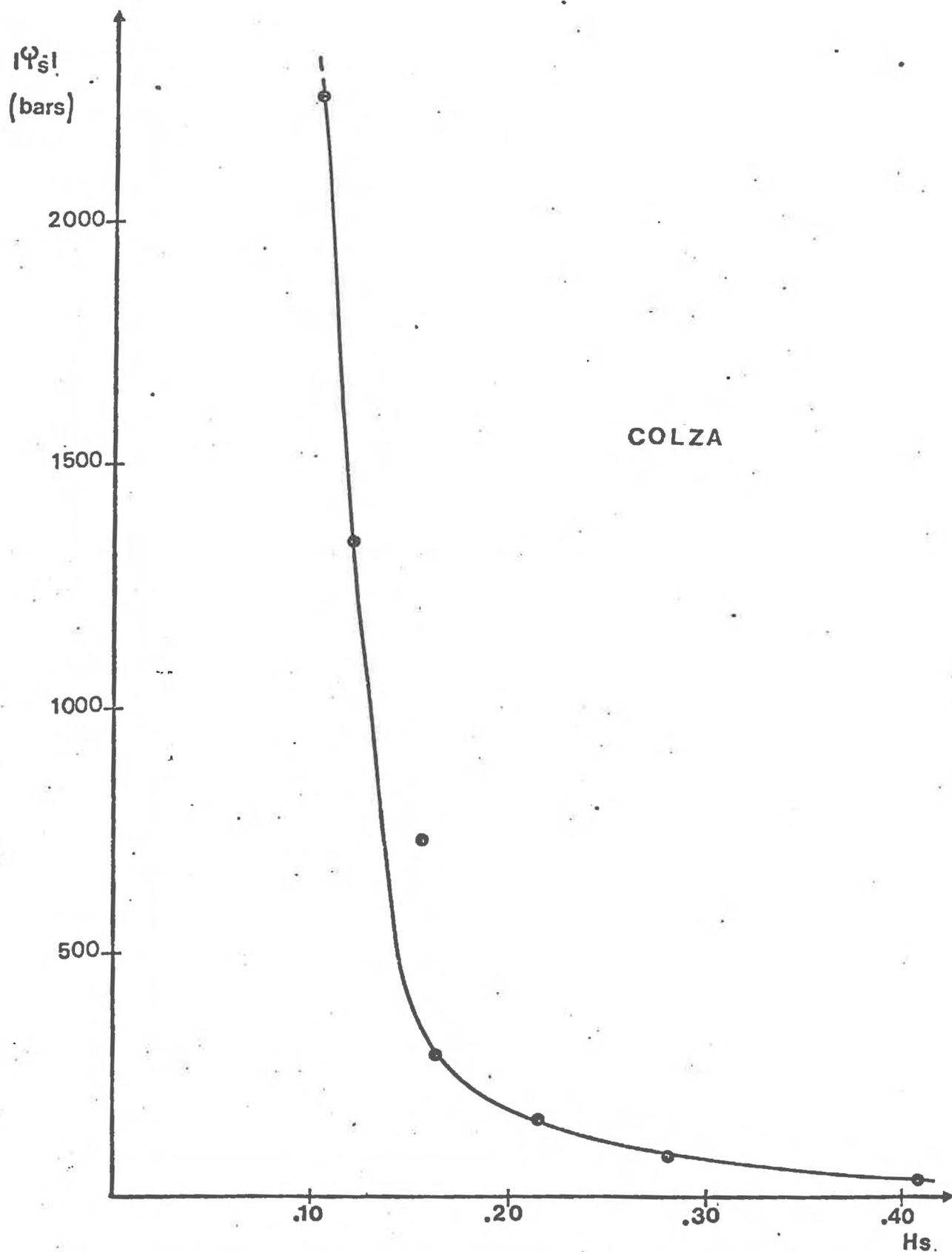


FIGURE 38 : Potentiel des semences de colza en fonction de leur teneur en eau (10 lots de 5 semences par point, $\sigma_{H_s} \leq 0,024$)

La figure 39 -paliers hydriques observés sur pois et blé- est comparable à des résultats expérimentaux obtenus précédemment sur maïs et pour lesquels était vérifiée l'égalité $\psi_s = \psi_e$: par analogie, cette égalité sera ici supposée. La caractérisation des semences par une fonction $\psi_s(H_s)$ apparemment toujours de même "type", conduit à un ensemble de propriétés particulièrement importantes :

a) elle permet de s'affranchir de la variable descriptive H_s pour travailler sur la variable ψ_s .

b) la fonction $\psi_s(H_s)$ peut être insérée dans une modélisation du "système terre-graine".

c) la connaissance des ordres de grandeur de ψ_s , la définition d'un couple (H_e, ψ_e) , la forme de la courbe $\psi_s(H_s)$ constituent des données de base qui permettent une première prévision des résultats d'un semis si quelques caractéristiques du lit de semences sont connues.

Remarque : Pour le Blé, OWEN (1951) trouve une valeur expérimentale $|\psi_c|$ de l'ordre de 30 Bars. Dans les cas respectifs du maïs, du riz, du soja de la betterave, ERICKSON (1951) cite les valeurs $|\psi_c|$ suivantes : 12,5 Bars, 7,9 Bars, 6,6 Bars, 3,5 Bars.

Ces valeurs sont tout à fait compatibles avec l'intervalle [12 Bars, 16 Bars] défini sur $|\psi_c|$ -cas du maïs-. De même, dans le cas du blé, nous obtenons effectivement un palier de teneur en eau pour $|\psi_e| = 32$ Bars (La figure 39 a été construite à l'aide de données non publiées obtenues au Laboratoire d'Agronomie de l'I.N.A.P.G.).

II DIFFERENCIATION DES SEMENCES PAR LE FONCTIONNEMENT DE LEUR SURFACE.

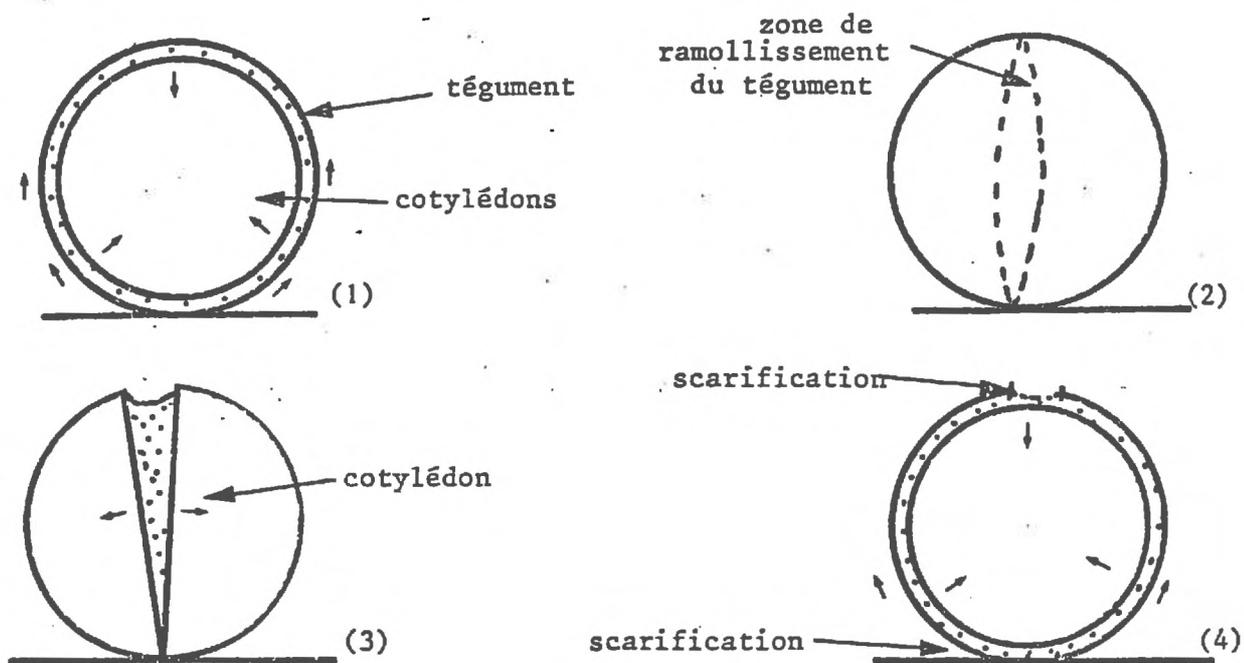
Le modèle proposé spécifie la variable S (surface d'imbibition). Rappelons que S est définie sur la paroi externe de la semence et que cette définition n'a de sens que s'il n'existe aucune discontinuité au sein du volume séminal. Les semences de maïs, ou de blé par exemple, présentent

Humidité relative de la phase gazeuse (p/p ₀)		0,975	0,939	0,888	0,805	0,583	0,371
ψ_s (m)		-349,5	-869	-1639	- 2994	-7448	-13688
ψ_s (Bars)		- 34,3	- 85,2	-160,8	-293,6	-730,3	-1342,0
pF		4,54	4,94	5,21	5,48	5,87	6,13
H_s (1)	μ	0,266	0,147	0,088	0,048	0,010	-0,022
	σ	0,018	0,010	0,016	0,007	0,008	0,024

Tableau 35 : Relation $\psi_s(H_s)$ / Cas du Colza.

(1) moyenne sur 10 lots de 5 semences.

effectivement des téguments très adhérents au contenu séminal proprement dit et la définition de S est alors fondée. Des résultats partiels sur Blé⁽¹⁾ semblent d'ailleurs indiquer un fonctionnement de la surface d'imbibition analogue à celui observé sur maïs (figure 40, rôle du rapport S_e/S_t sur la cinétique d'humectation). Cependant, le schéma d'imbibition qui résulte du rôle de la variable S ne peut être directement transposé à des semences telles que le colza ou le pois : celles-ci présentent en effet un interstice macroscopique séparant le tégument du contenu séminal. Cette "lame d'air" fonctionne comme un véritable "espace" capillaire qui permet, lorsque le milieu est tel que $\psi_e \sim 0$, la distribution de l'eau sur l'ensemble de la surface de la semence si l'humectation est réalisée en un point. Ceci se traduit expérimentalement par une série de phénomènes d'ascension capillaire facilement observables et succinctement représentés sur le schéma 19 (Ces observations sont d'ailleurs confirmées par les mesures de prélèvement d'eau des semences).



- (1) ascension capillaire entre l'enveloppe tégumentaire et les cotylédons.
- (2) ramollissement des téguments le long de la ligne de jonction des deux cotylédons.
- (3) semence sans tégument : ascension capillaire entre cotylédons.
- (4) semence sacrifiée : en haut de la semence apparaît l'eau localisée entre tégument et cotylédons.

Schéma 19 : Phénomènes d'ascension capillaire chez le Pois.

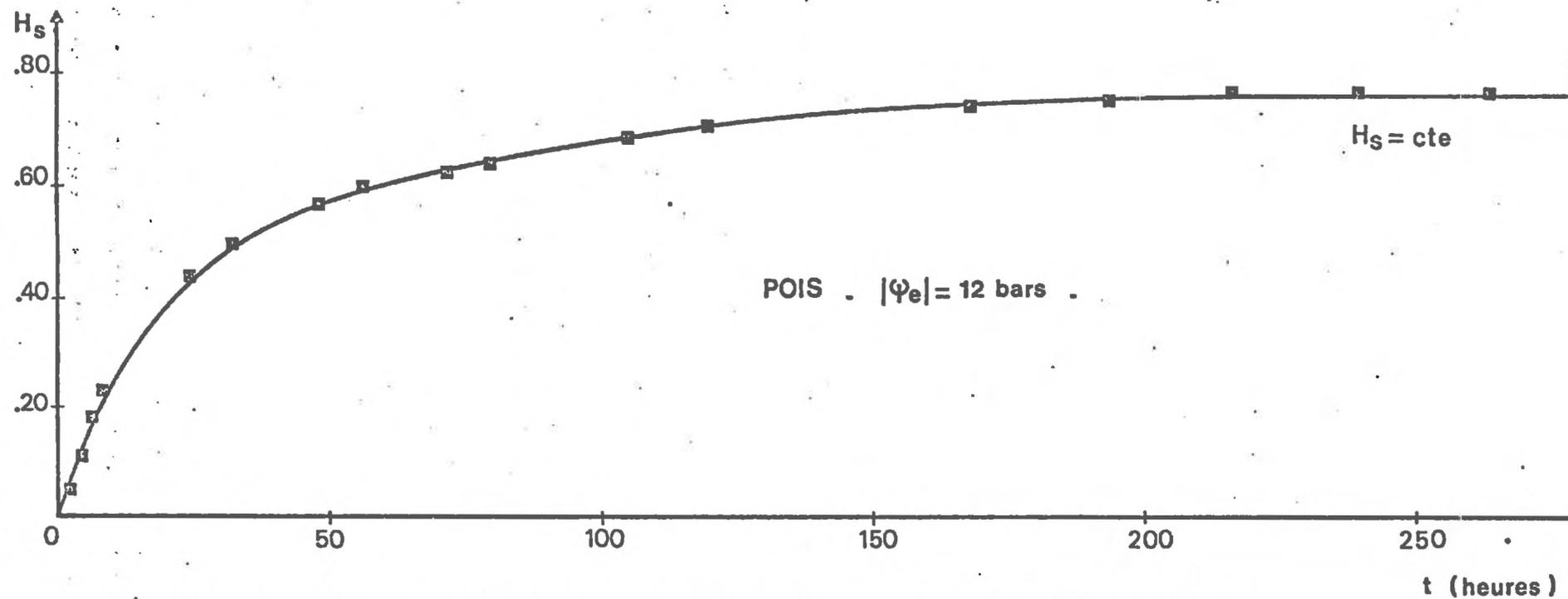
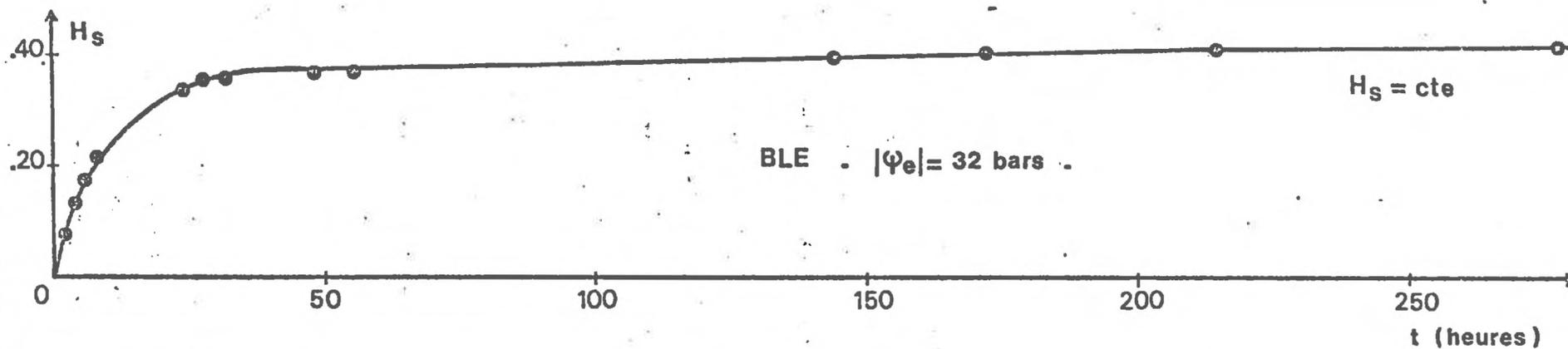
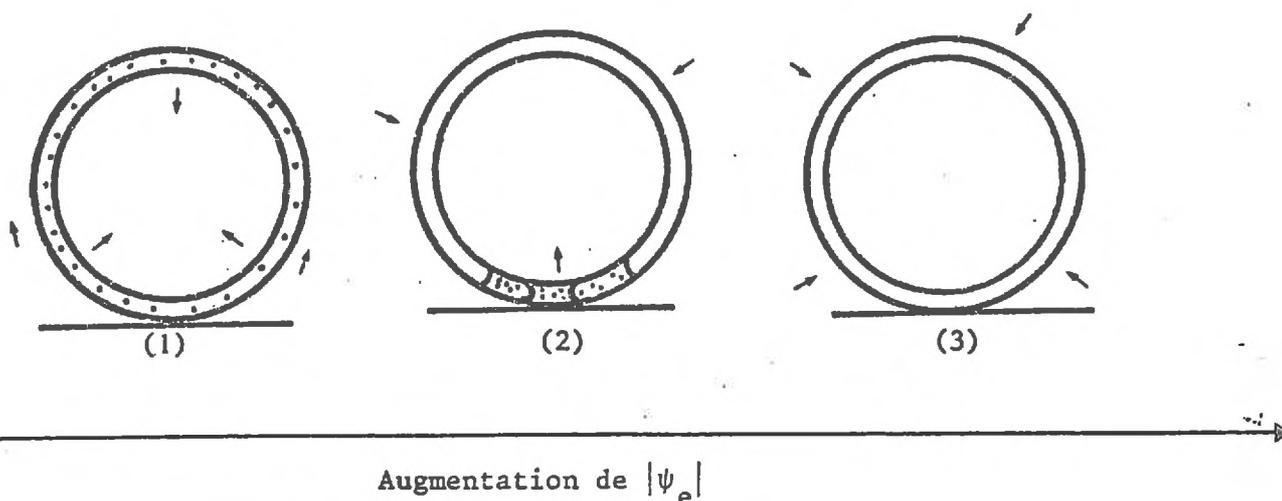


FIGURE 39 : Obtention de paliers hydriques (blé, pois) par mise en équilibre avec des solutions osmotiques -PEG 6000- (valeurs moyennes, $n = 30$)

Si on prolonge l'analogie avec une "lame capillaire", on conclut à l'existence d'une valeur limite du potentiel extérieur ($\psi_e \neq 0$), pour laquelle la circulation spontanée de l'eau entre les parois qui délimitent la lame d'air n'est plus possible : on est -en théorie- ramené progressivement à un cas de circulation en phase gazeuse entre téguments et contenu séminal, comme l'illustre le schéma 20.



- (1) Imbibition totale en phase liquide
 (2) Imbibition en phases liquide et gazeuse.
 (3) Imbibition totale en phase gazeuse.

Schéma 20 : Rôle de ψ_e sur le "type d'imbibition" des semences de pois ou colza.

Le cas (1) correspond à un domaine d'alimentation non limitant ; puisque le cas (2) est un état transitoire, la majeure partie de l'imbibition de ces semences en "conditions sèches" correspond au cas (3), d'ailleurs abordé dans l'étude du maïs (imbibition totale en phase gazeuse).

Au total, une distinction apparaît selon les semences lorsqu'on essaie de définir l'existence et le rôle d'une surface d'imbibition. La particularité introduite par les semences du type colza ou pois ne doit pas -a priori- poser de difficulté théorique ou expérimentale, mais aboutit nécessairement à une redéfinition du "contact terre-graine".

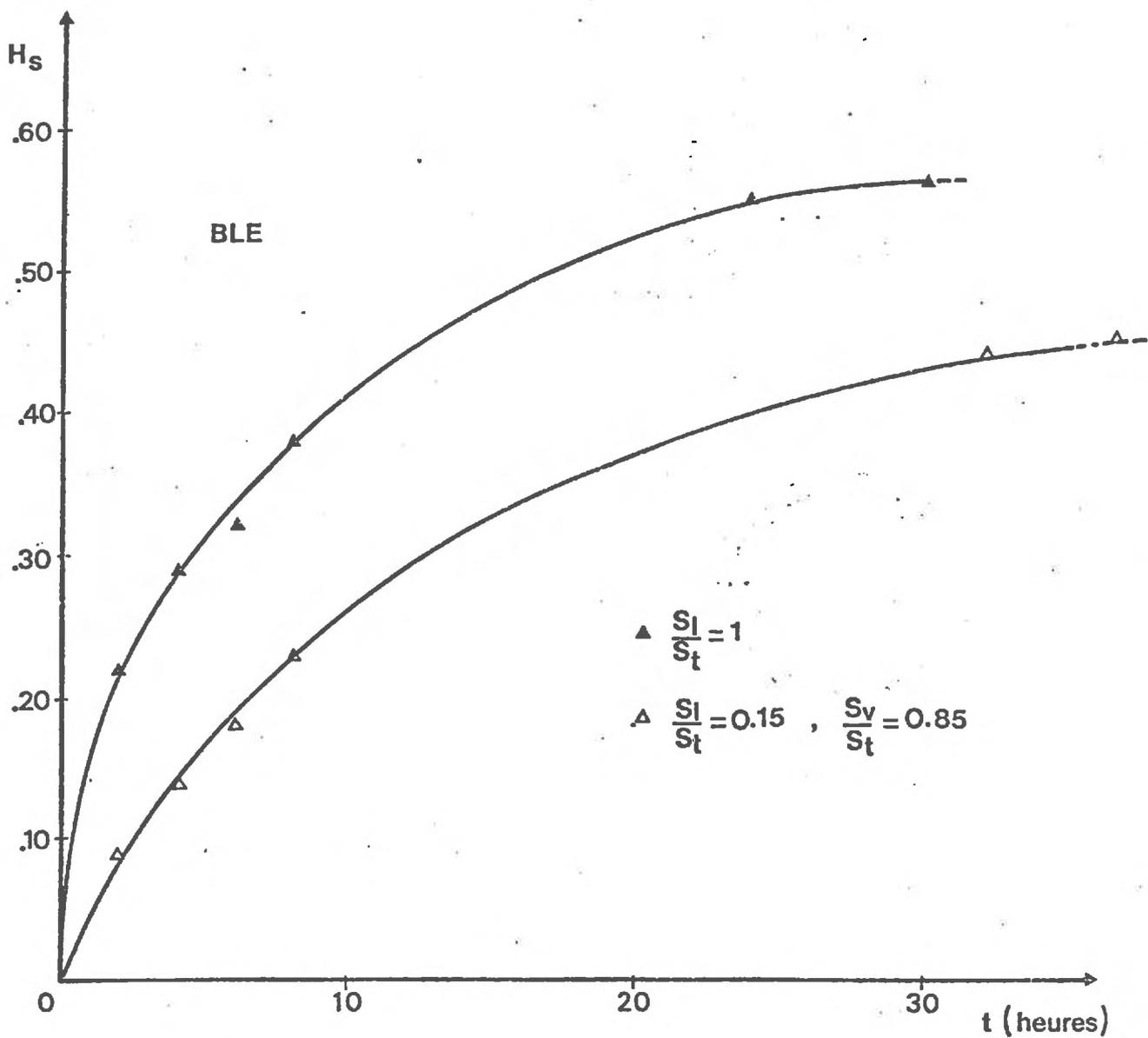


FIGURE 40 : Rôle du rapport $\frac{S_1}{S_t}$ sur la cinétique d'imbibition du blé.
 (valeurs moyennes, n = 10).

Enfin, rappelons que certaines semences -légumineuses notamment- présentent des phénomènes d'imperméabilité tégumentaire partielle ce qui nécessite la prise en charge de cette difficulté supplémentaire.

III CONCLUSION.

Par rapport au terme $(\psi_s - \psi_e)$, les semences sèches sont pratiquement interchangeables : seules diffèrent des propriétés caractéristiques de l'espèce -valeur H_c par exemple-. Une typologie des semences vis-à-vis du processus de l'imbibition devra par contre analyser préalablement les conséquences de la morphologie de l'absorbant sur le fonctionnement de sa surface, pour redéfinir ensuite le concept de "contact terre-graine".

C O N C L U S I O N

En partant d'un problème posé en termes agronomiques -l'installation d'un peuplement- et physiologiques -la germination- nous avons limité le thème général de "la germination en conditions sèches" à une phase déterminante : l'imbibition des semences. Notre travail a ainsi pris la forme d'une application des lois de diffusion à un système constitué de deux compartiments discontinus, l'un étant "biologique". Ce terme "biologique" ne doit d'ailleurs pas comporter d'ambiguïté. Pour le physicien, le caractère biologique d'un constituant correspond à un ensemble de contraintes d'origine physiologique qu'une réduction physique doit respecter.

La justification du caractère d'absorbant de la semence et la proposition conjointe d'un modèle du "système terre-graine" ont permis de dégager progressivement deux variables de l'imbibition : la surface d'imbibition et la différence de potentiel sol-semence.

L'analyse de la première a notamment permis de préciser le concept de "contact terre-graine", puisqu'on obtient une forte corrélation entre le système de porosité au contact de la semence et la détermination d'une surface d'imbibition en phase liquide.

Dans un deuxième temps, les grands traits d'un schéma général d'imbibition ont pu être donnés. Dans le cas de sols humides, les surfaces d'imbibition en phases liquide et gazeuse -donc l'état structural- déterminent la cinétique d'humectation et le moment probable de germination qui en résulte. Cet effet persiste au cours du dessèchement progressif du sol, mais les transferts en phase gazeuse deviennent prépondérants, et on peut même constater la disparition totale de l'imbibition liquide. Dans le même temps, l'égalité éventuelle des potentiels du sol et de la semence à un niveau inférieur au potentiel critique aboutit à l'obtention d'un palier hydrique des semences et à l'absence de germination. Enfin, en combinant ces conclusions partielles, il a été possible de reconstituer -par voie expérimentale et par simulation- une description des cas possibles

d'imbibition, de germination, de dessèchement des semences placées dans un milieu agrégé soumis à un régime évaporatif continu. Nous avons ainsi précisé le rôle de la localisation des semences dans le lit de semence.

La nécessité de travailler sur des "matériau -type" -sol ou semence- a été admise d'emblée : dans la mesure où l'analyse est conduite en se référant à des propriétés synthétiques des absorbants, l'extrapolation des résultats acquis se trouve considérablement facilitée. Ainsi, nous avons pu dégager les premières bases d'une typologie des semences vis-à-vis du phénomène de l'imbibition. En ce qui concerne le sol, bien que le matériau choisi ne constitue en rien une classe texturale très particulière, il demeure que deux des pôles du triangle de texture n'ont pas été abordés.

Le cas des sols sableux -fréquemment étudié dans la littérature- est probablement aussi susceptible d'une analyse fondée sur l'analogie avec des systèmes de sphères non poreuses simulant les grains de sable et les semences. Une modélisation de ce type conduit à délimiter nettement deux domaines de teneur en eau du sol, l'un non limitant, l'autre limitant : ces deux domaines se superposent d'ailleurs à ceux définis par les deux branches distinctes des courbes représentatives des fonctions $\psi(H)$ et $K(H)$ des sols sableux. Il s'agit donc d'une modélisation dont les conclusions semblent compatibles avec nos propres résultats.

Le cas des sols argileux correspond à une complication du "système terre-graine" due aux phénomènes de retrait -gonflement-. Ainsi, un sol comportant environ 45 % d'argile présente un retrait volumique de 25 à 30 % lorsque son humidité passe de 26 % (capacité de rétention) à 10 %. En l'absence d'observations fines, il est actuellement impossible de prévoir les conséquences de ce phénomène sur la définition du "contact terre-graine" et son évolution au cours de l'imbibition. Rappelons seulement qu'à la suite du dessèchement continu du sol, on tend a fortiori à se rapprocher d'un cas d'imbibition strictement en phase gazeuse pour lequel le contact "liquide" n'existe plus.

Les difficultés propres à chaque compartiment -sol ou semence- ne peuvent cependant conduire à sous estimer la nécessité d'une démarche analytique qui s'intéresse avant tout à leur mise en relation. Mais c'est

au champ que les conditions concrètes de cette mise en relation sont réalisées et l'une des voies de travail consiste à tester la résistance des conclusions acquises à un changement d'échelle (par changement d'échelle, on entend ici l'ensemble des perturbations qui affectent le système défini en conditions contrôlées et pouvant aller jusqu'à sa redéfinition complète). Un essai au champ a été mis en place à cet effet en collaboration avec la Chaire d'Agronomie de l'I.N.A.P.G.. Il devrait apporter au moins trois réponses :

- La première, d'ordre général, est relative à la pertinence des réponses typiques obtenues en laboratoire et à la définition d'une gamme de variation autour de ces réponses-types, si elles s'avèrent fondées.

- La deuxième doit préciser le poids des facteurs et conditions perturbateurs non pris en charge dans notre travail : il s'agit notamment du rôle des variations de température sur l'imbibition et la germination. Compte-tenu des carences actuelles sur ce problème, son insertion dans une prévision ne peut se faire que de façon empirique et fragmentaire.

- Enfin, il est possible d'utiliser au champ les semences comme des marqueurs du dessèchement du lit de semences et de l'état structural. La mesure des cinétiques d'imbibition pour différents états structuraux peut conduire à préciser le schéma suivant :

cinétiques d'imbibition → surfaces d'imbibition → comparaison des états structuraux.

Ces liaisons permettraient de paramétrer et classer les états structuraux de surface par rapport à un objectif et de définir des références à atteindre.

L'obtention de références concerne aussi celles relatives au dessèchement des couches de surface. Mais pour des raisons théoriques et métrologiques, la prévision de l'évolution des profils hydriques des couches de surface reste actuellement très difficile. Dans notre propre travail d'ailleurs, nous n'avons pu que fournir des données expérimentales qui caractérisaient un profil en voie de dessèchement, sans pour autant proposer une modélisation générale du système. Celle-ci pourrait alors aboutir à une véritable typologie de l'évolution des couches superficielles en voie de dessèchement.

D'un point de vue plus général, l'importance de ces couches vis-à-vis des fonctions "puits" d'origine biologique (semences, plantules) ou des propriétés mécaniques des matériaux (tassement) justifierait une analyse à plusieurs échelles, souhaitée tant par les agronomes que par les physiciens du sol.

ANNEXE 1 : Analyse du sol de Montluel

1. Granulométrie sans décalcification (pour ‰)

- particules comprises entre 0	et 0,002 mm :	115	(A)
- particules comprises entre 0,002	et 0,020 mm :	242	(LF)
- particules comprises entre 0,020	et 0,050 mm :	463	(LG)
- particules comprises entre 0,050	et 0,200 mm :	156	(SF)
- particules comprises entre 0,200	et 2 mm :	24	(SG)

2. Matières organiques (‰) : 13,0

Carbone organique total - Méthode ANNE - (‰) : 7,6

dont :

Teneur en carbone des fractions légères dans le sol (‰) : 1,58

3. Capacité d'échange - Méthode de METSON - (meq pour 100 g) : 5,6

Calcium échangeable (meq pour 100 g) : 3,4

Sodium échangeable (meq pour 100 g) : 0,027

ANNEXE 2 : Expression analytique des fonctions ψ_s, ψ_e .

Le tableau A₁ donne les expressions analytiques ajustées des fonctions ψ_s et ψ_e .

Tableau A₁ : Expressions analytiques $\psi_s = f(H_s)$, $\psi_e = f(H_e)$.

	en m	en Bars	r
(1) $ \psi_s $	$ \psi_s = 11198,1 e^{-18,51H_s}$	$ \psi_s = 1098,9 e^{-18,51H_s}$	0,9
(2) $ \psi_e $ (< 16 Bars)	$ \psi_e = 0,0527 H_e^{-2,696}$	$ \psi_e = 0,00517 H_e^{-2,696}$	0,9
(3) $ \psi_e $ (> 16 Bars)	$ \psi_e = 0,0272 H_e^{-2,970}$	$ \psi_e = 0,00267 H_e^{-2,970}$	0,9

Remarques : Les expressions (2) et (3) diffèrent suffisamment pour justifier les deux types de mesures (presse Richard et phase gazeuse).

Ainsi, pour $H_e = 0,02$

$$|\psi_e| (2) = 197 \text{ Bars}$$

$$|\psi_e| (3) = 297 \text{ Bars} \quad (1)$$

D'autre part, les relations $\psi_e = f(H_e)$ s'expriment souvent par rapport à la variable sans dimension $\left(\frac{H_e}{H_{sat}}\right)$ (H_{sat} , humidité massique à la saturation).

Les expressions (2) et (3) deviennent respectivement :

$$|\psi_e| \text{ (Bars)} = 0,227 \left(\frac{H_e}{H_{sat}}\right)^{-2,696}$$

$$|\psi_e| \text{ (Bars)} = 0,172 \left(\frac{H_e}{H_{sat}}\right)^{-2,970}$$

Si $H \rightarrow H_{sat}$, $\psi_e \rightarrow \psi_{sat}$, potentiel au point d'entrée d'air ($\sim 0,2$ Bars)

(point d'entrée d'air : apparition d'un système triphasique solide-eau-air

(1) cependant, à 16 Bars, on a : $H_{e(2)} = 0,051$ et $H_{e(3)} = 0,053$

Annexe 3 : Estimation de la conductivité (K_e) du sol de Montluel.

1. Principe de l'estimation.

On suppose dans le sol l'existence de réseaux de capillaires continus, répartis de façon aléatoire ; les contributions de chaque classe de pores compris dans le domaine qui s'étend du plus petit rayon possible ($r = 0$) au plus grand pore rempli d'eau ($r = R$) sont sommées pour obtenir la conductivité hydraulique résultante.

Si la distribution des pores dans le milieu est décrite par une loi de répartition $F(r)$, la contribution des pores de rayons r , $r \in [0, R]$, à la détermination de K s'écrit

$$K = \int_0^R M r^2 F(r) dr \quad (1)$$

avec $n = \int_0^R F(r) dr$

M	constante
r	rayon des pores
R	rayon du plus grand pore rempli d'eau
n	porosité totale

Une variation $d\theta$ d'humidité entraîne une variation dK , telle que :

$$dK = \left[\int_0^R M r^2 F(r) dr \right] d\theta \quad (2)$$

Cette variation $d\theta$ d'humidité volumique s'écrira aussi :

$d\theta = F(r) dr$ (3), correspondant au remplissage ou à la vidange d'une nouvelle classe de pore.

D'après (2) et (3), $dK = \left[\int_0^R M r^2 F(r) dr \right] F(r) dr$

ou $K = M \cdot \int_0^R \int_0^R r^2 F(r) dr \cdot F(r) dr$

En adoptant pour le sol de Montluel un modèle capillaire, on peut expliciter ψ de deux façons :

$$1) \quad \psi = \frac{-2A}{r} \quad (\text{Loi de JURIN}) \quad (4) \quad (A, \text{ tension superficielle})$$

$$2) \quad \psi = \psi_{\text{sat}} \left(\frac{H}{H_{\text{sat}}} \right)^{-b} \quad (5) \quad (\text{ajustement trouvé précédemment, cf. Annexe 2})$$

D'après (4) et (5), il vient :

$$r = \frac{-2A}{\psi} = \frac{-2A}{\psi_{\text{sat}}} \left(\frac{H_{\text{sat}}}{H} \right)^{-b} = \frac{-2A}{\psi_{\text{sat}}} \left(\frac{\theta_{\text{sat}}}{\theta} \right)^{-b} \quad \text{si } \bar{\gamma}_d = \text{cte.}$$

$$\text{or : } K = M \int_0^R \int_0^R r^2 F(r) dr \cdot F(r) dr = M \int_0^\theta \int_0^\theta \left(\frac{-2A}{\psi_{\text{sat}}} \right)^2 \left(\frac{\theta_{\text{sat}}}{\theta} \right)^{-2b} d\theta \cdot d\theta$$

puisque $F(r)dr : d\theta$

$$\text{ou } K = M' \int_0^\theta \int_0^\theta \left(\frac{\theta_{\text{sat}}}{\theta} \right)^{2b} d\theta \cdot d\theta$$

$$\text{ou } K = M'' (\theta)^{2b + 2}$$

$$\text{Si } \theta = \theta_{\text{sat}} \quad K = K_{\text{sat}}, \quad \text{et } M'' = K_{\text{sat}} / (\theta_{\text{sat}})^{2b + 2}$$

$$\text{d'où : } K = K_{\text{sat}} \left(\frac{\theta}{\theta_{\text{sat}}} \right)^{2b + 2} \quad (6)$$

D'après (5) et (6),

$$K = K_{\text{sat}} \left(\frac{\psi_{\text{sat}}}{\psi} \right)^{2 + 2/b}$$

A l'aide du modèle capillaire, et compte-tenu des simplifications envisagées, on peut donc prévoir : $K = f(\theta)$ ou $K = f(\psi)$.

Remarque : Ce type de modélisation a fait l'objet de nombreuses investigations. Sa confrontation avec des valeurs expérimentales nous permet d'avancer que ce type d'ajustement sera largement suffisant pour un usage sommaire de calcul d'ordre de grandeur (GAYLON S. CAMPBELL, 1974).

Annexe 4 : Rôle de la température sur la germination.

Les données de cette annexe sont relatives à deux types de semences, maïs et colza. Elles présentent une description succincte des effets de la température sur la vitesse moyenne de germination et sur l'étalement de celle-ci dans le temps.

Les figures A1 et A2 représentent les taux cumulés de germination en fonction du temps, respectivement pour le maïs et le colza. L'allure de ces courbes représentatives est identique et on observe un même classement en fonction de la température.

Le temps de latence $t_{\epsilon \%G}$ (temps nécessaire pour atteindre la première germination : c'est donc un indicateur de la durée d'imbibition) est une fonction décroissante de la température jusqu'à une valeur de l'ordre de 20°C (figure A3). Ainsi, lorsque l'on passe de 20°C à 10°C, ce temps de latence est multiplié par un facteur environ égal à 2,5.

En désignant par $t_{\epsilon \%G}$ la durée du temps de latence, le tableau A3 indique le facteur multiplicatif à affecter à $t_{\epsilon \%G}$ pour obtenir la durée au bout de laquelle 50 % ou 100 % de germination sont atteints à partir de la première germination.

T°C	28	23	20	18	15	12	8
$\frac{t_{50 \%G} - t_{\epsilon \%G}}{t_{\epsilon \%G}}$	0,52	0,52	0,56	0,42	0,51	0,46	0,38
$\frac{t_{100 \%G} - t_{\epsilon \%G}}{t_{\epsilon \%G}}$	1,50	1,50	1,40	1,26	1,29	1,30	1,21

Tableau A3 : Etalement des germinations dans le temps par rapport au temps de latence (1) - Maïs -

(1) on a éliminé les données obtenues à 10°C

2. Valeurs numériques de $K(H_e)$.

Le tableau A2 donne les valeurs calculées de $K(H_e)$ pour une valeur de b trouvée précédemment ($b = 2,97$; $2b + 2 = 7,94$) (cf. Annexe 2).

On remarquera qu'il faut obtenir une mesure expérimentale du terme K_{sat} pour calculer chaque valeur de K .

A partir de la loi de Darcy en écoulement saturé,

$$q_{sat} = K_{sat} \left(\frac{\Delta H}{L} \right)$$

- K_{sat} , conductivité à saturation
- $\left(\frac{\Delta H}{L} \right)$, gradient de charge hydraulique.

Nous avons mesuré le terme K_{sat} pour 2 valeurs de $\frac{\Delta H}{L}$ (en structure continue) :

on obtient : $K_{sat} = 3,0 \times 10^{-6}$ cm/sec (milieu peu perméable)

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

Tableau A2 : Valeur de $K_e = f(H_e)$: $K = K_{sat} \left(\frac{H_e}{H_{sat}} \right)^{2b + 2}$

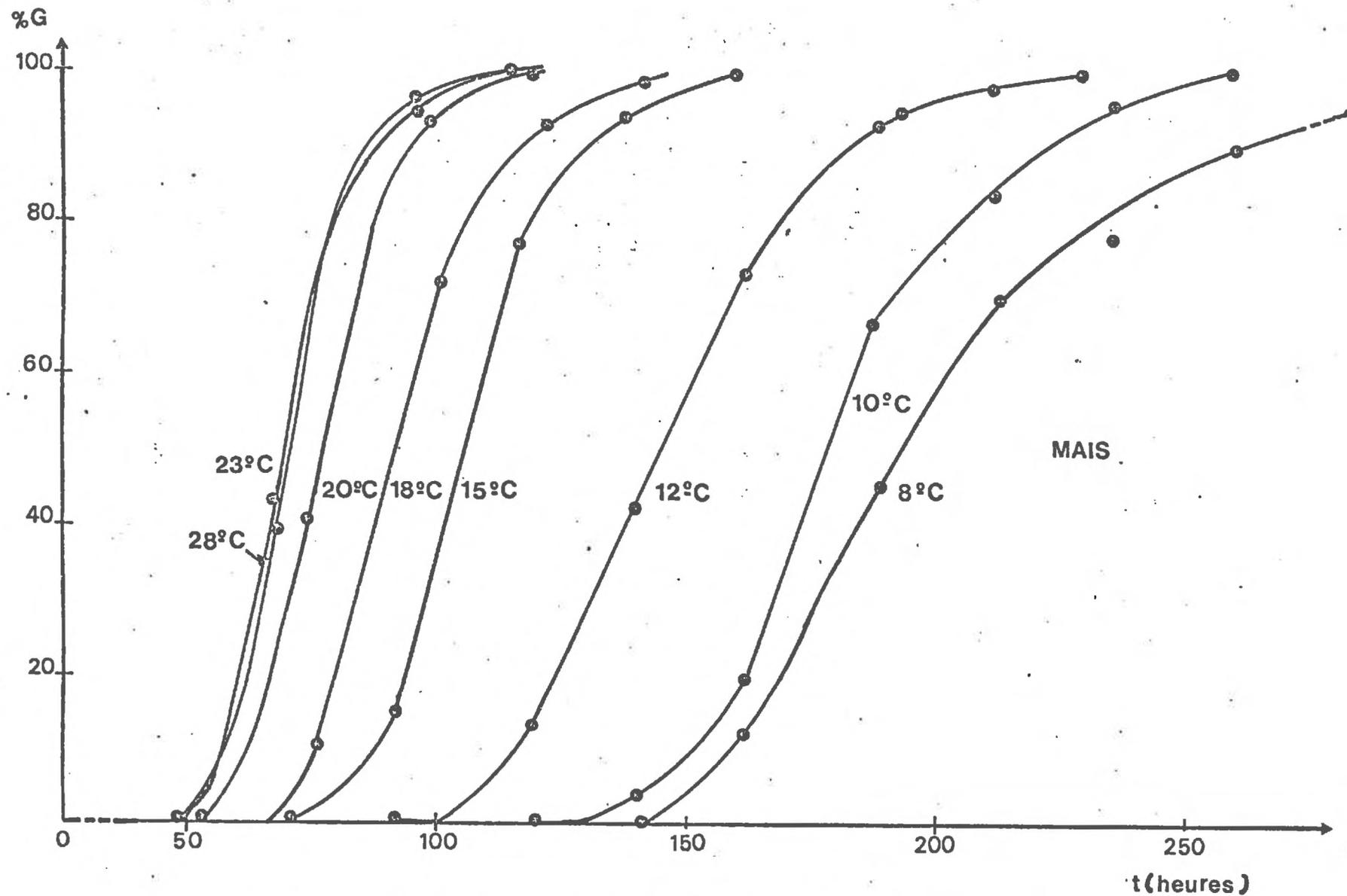


FIGURE A1 : Taux cumulés de germinations du Maïs en fonction du temps (lots de 200 semences).

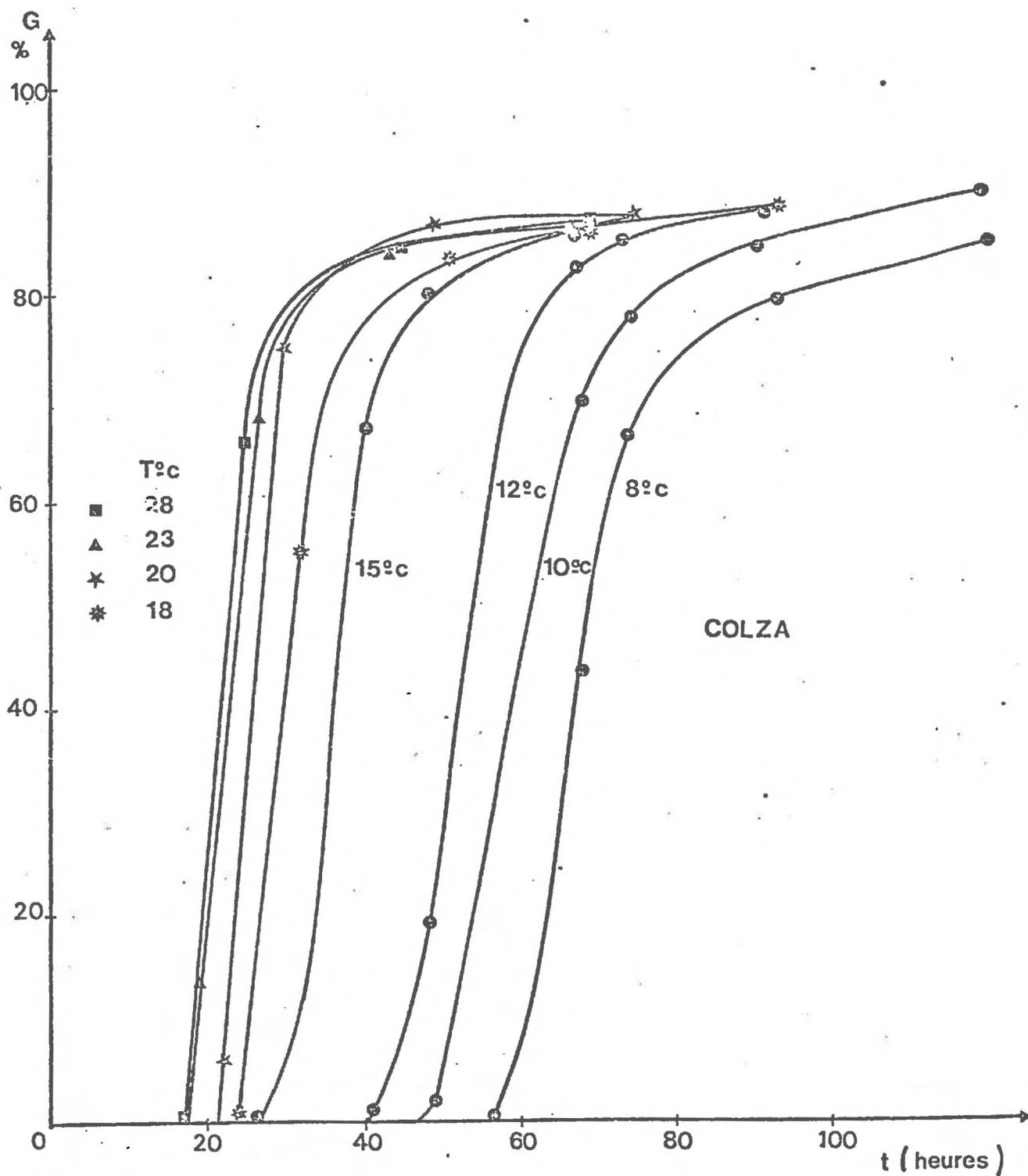


FIGURE A2 : Taux cumulés de germinations du colza en fonction du temps (lots de 200 semences).

Au vu de ce tableau, il apparaît que l'étalement -dissymétrique- des germinations dans le temps est de l'ordre de grandeur de la durée d'imbibition. De plus, en se plaçant dans un intervalle $[12^{\circ}\text{C}, 20^{\circ}\text{C}]$, les coefficients définis dans le tableau présentent une gamme de variation réduite.

Les physiologistes mesurent généralement cet étalement par un "temps moyen de germination (t_m)" défini comme suit :

$$t_m = \frac{N_1 t_1 + N_2 t_2 + \dots + N_n t_n}{N_1 + N_2 + \dots + N_n}$$

(N_1 est le nombre d'embryons qui ont germé au temps t_1 , N_2 le nombre d'embryons ayant germé entre t_1 et t_2 , etc...)

On a aussi :

$$t_m = \frac{1}{N} (N_1 t_1 + N_2 t_2 + \dots + N_n t_n), \text{ si } N_1 + N_2 + \dots + N_n = N$$

t_m a donc la dimension d'un temps, et pour toute valeur $\frac{N_i}{N}$, le coefficient t_m est d'autant plus grand que l'intervalle $[t_{i-1}, t_i]$ est grand.

(La figure A4 représente graphiquement les coefficients " t_m " en fonction de la température).

La vitesse de germination est maximale à une température de l'ordre de 20°C . Dans le cadre de notre travail, il semble intéressant de ne pas travailler à une température inférieure à 20°C , en se plaçant ainsi dans des conditions où l'homogénéité du lot est maximale, du point de vue du temps d'apparition de la germination.

Ces résultats relatifs à la germination doivent être interprétés en se rappelant que les cinétiques d'imbibition sont elles aussi fonction directe de la température, le flux vers la semence étant d'autant plus grand que la température est élevée. Il serait nécessaire à ce propos d'approfondir la nature de cette liaison en recherchant notamment la part des paramètres physiques -tels que la viscosité de l'eau- et celle due à l'action de la température sur le métabolisme de la germination.

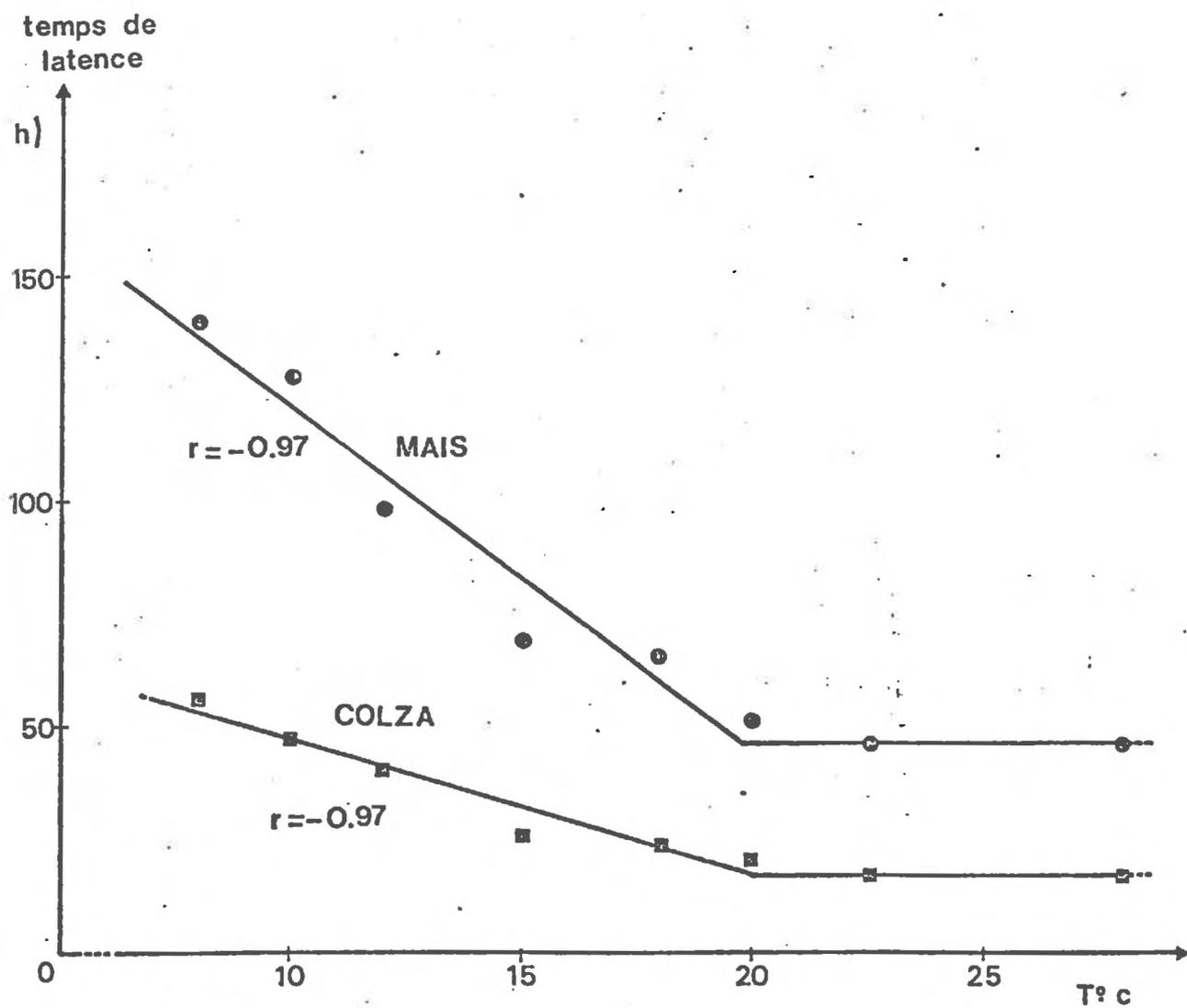


FIGURE A3 : Temps de latence en fonction de la température (Maïs et Colza)

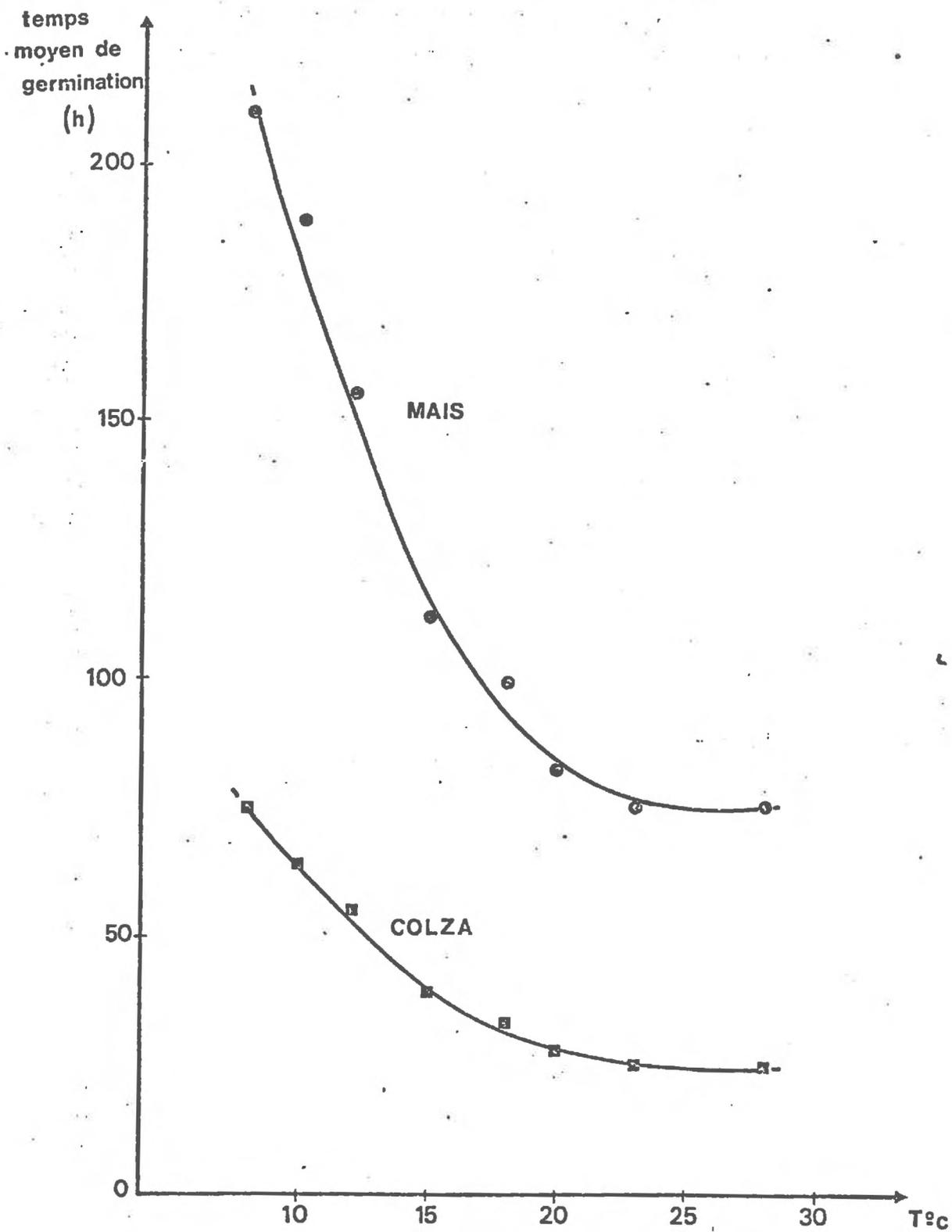


FIGURE A4 : Temps moyen de germination en fonction de la température (Maïs et Colza)

Au total, les données de cette annexe permettent de réaliser une première jonction entre l'imbibition sensu-stricto et la détermination du laps de temps pendant lequel s'étalent les germinations.

Annexe 5 : Principe des modes de calcul de H_s .

Considérons le cas d'une imbibition en phase liquide sur une surface S de la semence et telle que $\psi_e = 0$. (1)

Solution analytique

Solution par différences finies

A l'instant t , l'humidité de la semence est égale à H_s et le flux s'écrit :

$$\frac{dH_s}{dt} = -\alpha_1 S.K'(H_s) (\psi_s - \psi_e)$$

$$\frac{\Delta H_s}{\Delta t} = -\alpha_1 S.K'(H_s) (\psi_s - \psi_e)$$

puisque on pose $\psi_e = 0$

$$\frac{dH_s}{dt} = -\alpha_1 S.K'(H_s) \cdot \psi_s$$

$$\frac{\Delta H_s}{\Delta t} = -\alpha_1 S.K'(H_s) \cdot \psi_s$$

avec, par hypothèse :

$$K'(H_s) = a_1 e^{a_2 H_s}$$

$$\psi_s(H_s) = c_1 e^{c_2 H_s} \quad (\text{annexe 2})$$

d'où,

$$\frac{dH_s}{dt} = -\alpha_1 \cdot S \cdot a_1 e^{a_2 H_s} \cdot c_1 e^{c_2 H_s}$$

$$\frac{\Delta H_s}{\Delta t} = -\alpha_1 \cdot S \cdot a_1 e^{a_2 H_s} \cdot c_1 e^{c_2 H_s}$$

Jusqu'ici, les expressions sont identiques : c'est le mode d'obtention de H_s qui diffère.

(1) on pourrait mener un calcul analogue pour une humectation en phase gazeuse.

A. Solution analytique.

L'expression précédente s'écrit :

$$dH_s = -\alpha_1 \cdot S \cdot a_1 c_1 \cdot e^{(a_2 + c_2)H_s} dt$$

ou

$$e^{-(a_2 + c_2)H_s} \cdot dH_s = -\alpha_1 S a_1 c_1 dt$$

En choisissant des bornes d'intégration convenables, on écrira :

$$\int_0^{H_s} e^{-(a_2 + c_2)H_s} \cdot dH_s = -\alpha_1 S \cdot a_1 \cdot c_1 \int_0^t dt$$

Après intégration, il vient :

$$H_s = \left(-\frac{1}{a_2 + c_2} \right) \text{Log}(1 - \alpha_1 a_1 c_1 (a_2 + c_2) S \cdot t.)$$

On obtient donc $H_s = f(t)$. La solution est simple si $S = \text{cte}$, or, le gonflement de la semence impose d'écrire :

$$H_s = \left(-\frac{1}{a_2 + c_2} \right) \text{Log}(1 - \alpha_1 a_1 c_1 (a_2 + c_2) \cdot S_0 \cdot i \cdot t)$$

On obtient la solution finale à l'aide du programme d'ajustement non linéaire. En utilisant comme données les triplets expérimentaux ($t, H_s, i(H_s)$), le programme permet d'estimer les valeurs (a_1 et a_2) et calcule les valeurs " H_s théoriques" qui correspondent aux temps expérimentaux précédemment définis.

B. Solution par différences finies.

Elle suppose les valeurs a_1 et a_2 connues (cf précédemment).

L'expression du flux est toujours :

$$\frac{\Delta H_s}{\Delta t} = -\alpha_1 \cdot S_0 \cdot (a_1 e^{a_2 H_s}) \cdot (c_1 e^{c_2 H_s})$$

ou

$$\frac{\Delta H_s}{\Delta t} = -\alpha_1 S_0 \cdot \underbrace{(i)}_{i(H_s)} \cdot \underbrace{(a_1 e^{a_2 H_s})}_{K'(H_s)} \cdot \underbrace{(c_1 e^{c_2 H_s})}_{\psi_s(H_s)}$$

Déroulement du calcul numérique :

(1) $t = 0$, $H_s = 0$; choix de Δt .

calcul de $i(H_s) = i(0)$

calcul de $K'(H_s) = K'(0)$

calcul de $\psi_s(H_s) = \psi_s(0)$

calcul de $\left(\frac{\Delta H_s}{\Delta t}\right)_1$ entre $t = 0$ et $t = \Delta t$

on pose : $H_{s1} = \left(\frac{\Delta H_s}{\Delta t}\right)_1$ à $t_1 = \Delta t$

(2) $t = t_1$

calcul de $i(H_s) = i(H_{s1})$

calcul de $K'(H_s) = K'(H_{s1})$

calcul de $\psi_s(H_s) = \psi_s(H_{s1})$

calcul de $\left(\frac{\Delta H_s}{\Delta t}\right)_2$ entre $t_1 = \Delta t$ et $t_2 = 2 \Delta t$

on pose : $H_{s2} = \left(\frac{\Delta H_s}{\Delta t}\right)_1 + \left(\frac{\Delta H_s}{\Delta t}\right)_2$ à $t_2 = 2 \Delta t$

(3) calcul de $i(H_s) = i(H_{s2})$

calcul de $K'(H_s) = K'(H_{s2})$

etc...

H_s s'exprime donc selon la forme :

$$H_s = \left(\frac{\Delta H_s}{\Delta t}\right)_1 + \left(\frac{\Delta H_s}{\Delta t}\right)_2 + \dots + \left(\frac{\Delta H_s}{\Delta t}\right)_n$$

Remarques :

- Le choix du pas de temps Δt est évidemment déterminant puisqu'on affecte aux fonctions de H_s , entre t et $t + \Delta t$, leur valeur calculée à l'instant Δt . Ainsi, en phase liquide, les gains de précisions deviennent négligeables au dessous de $\Delta t = 0,25h$.

- On conçoit que quelle que soit la forme des fonctions $i(H_s)$, $K'(H_s)$, $\psi_s(H_s)$, leur calcul par différence finie soit toujours possible tandis que leur intégration dans une solution analytique ne l'est pas nécessairement.

- On peut ajouter à l'expression de $\frac{\Delta H_s}{\Delta t}$ autant de termes que l'on veut.

Ainsi, si $\psi_e \neq 0$, on aura la phase de calcul suivante :

- calcul de $\psi_s(H_s) = \psi_s(H_{sn})$
- rappel de ψ_e
- calcul de $\psi_s(H_{sn}) - \psi_e$

etc...

Il est donc clair que cette solution est particulièrement adaptée aux cas d'expressions fonction simultanée de plusieurs variables.

Annexe 6 : Etude expérimentale de la "réversibilité" de la germination.

Nous séparerons les cas où un premier cycle d'imbibition aboutit -ou non- à la germination des semences.

A. Cas où le premier cycle d'imbibition n'aboutit pas à la germination.

1. Cinétiques d'imbibition après un premier cycle "d'humectation-dessèchement".

Parmi les variables possibles, nous n'avons retenu que les deux suivantes :

1.1. Rôle du nombre de cycles "imbibition-dessèchement".

Le tableau A4 présente les cinétiques d'humectation obtenues pour une première imbibition, puis pour une deuxième (c'est-à-dire après un premier cycle humectation-dessèchement).

t	2h	4h	6h	8h	24h
Premier cycle (H_s)	0,058 (0,008) ^x	0,082 (0,012)	0,103 (0,013)	0,120 (0,014)	0,229 (0,020)
Deuxième cycle (1) (H_s)	0,064 (0,008)	0,092 (0,010)	0,115 (0,015)	0,137 (0,019)	- -

x entre parenthèses, écart type (lots de 30 semences).

(1) première imbibition (9h), puis dessèchement, puis deuxième imbibition.

Tableau A4 : succession de cycles d'imbibition (cas du maïs)

Les cinétiques présentées dans le tableau restent comparables, bien que la deuxième imbibition soit légèrement plus rapide que la première.

Des résultats du même type sont obtenues sur colza - la $n^{\text{ième}}$ imbibition est plus rapide que la première - et une synthèse récente (HEGARTHY, 1978) montre que ces conclusions sont généralisables.

1.2. Rôle de la valeur H_s à laquelle survient le dessèchement.

Nous avons réalisé un deuxième cycle d'imbibition, soit après 9h de première imbibition ($H_s \sim 0,13$), soit après 20h de première imbibition ($H_s \sim 0,20$), puis dessèchement. Les deux cinétiques obtenues sont comparables entre elles et comparables à la cinétique de première imbibition quoique légèrement plus rapides en moyenne. Ici encore, des résultats identiques sont obtenus sur colza.

Au total, la durée du premier cycle ou le nombre de cycles initiaux semblent peu affecter la cinétique d'imbibition finale. Ces résultats tendraient à minimiser l'hystérésis de la relation $\psi_s = f(H_s)$. Si l'hystérésis intervient, elle définit une valeur $|\psi_s| = f(H_s)$ plus grande pour la $n^{\text{ième}}$ imbibition que pour la première lorsque H_s est donné.

2. Conservation de l'aptitude des semences à germer.

Dans toutes les manipulations effectuées (maïs ou colza) et quels que soient les traitements préliminaires d'imbibition et de dessèchement, on aboutit à la conclusion suivante : Les semences (maïs et colza) dont la radicule n'a pas percé les téguments conservent intégralement leur aptitude à germer après déshydratation(s) puis réimbibition(s).

D'autre part, la germination a lieu plus rapidement dans le cas d'un $n^{\text{ième}}$ cycle que d'un premier cycle. Ce phénomène est interprétable en posant l'existence d'une "avance physiologique" acquise et conservée au cours des cycles d'imbibition préliminaires. Une recherche bibliographique confirme d'ailleurs les bases d'une telle interprétation et le caractère général de la conservation de l'aptitude à germer lorsque la radicule n'a pas percé le tégument.

B. Cas où le premier cycle d'imbibition aboutit à la germination.

1. Cas du Maïs : Le tableau A5 regroupe les résultats de "regermination" observées sur un lot de 100 semences préalablement germées (0 à 2 mm), puis desséchées avant une deuxième imbibition. Les symboles utilisés sont les suivants :

RSP : Racine séminale principale

RSS : Racine séminale secondaire

RA : Racine adventive

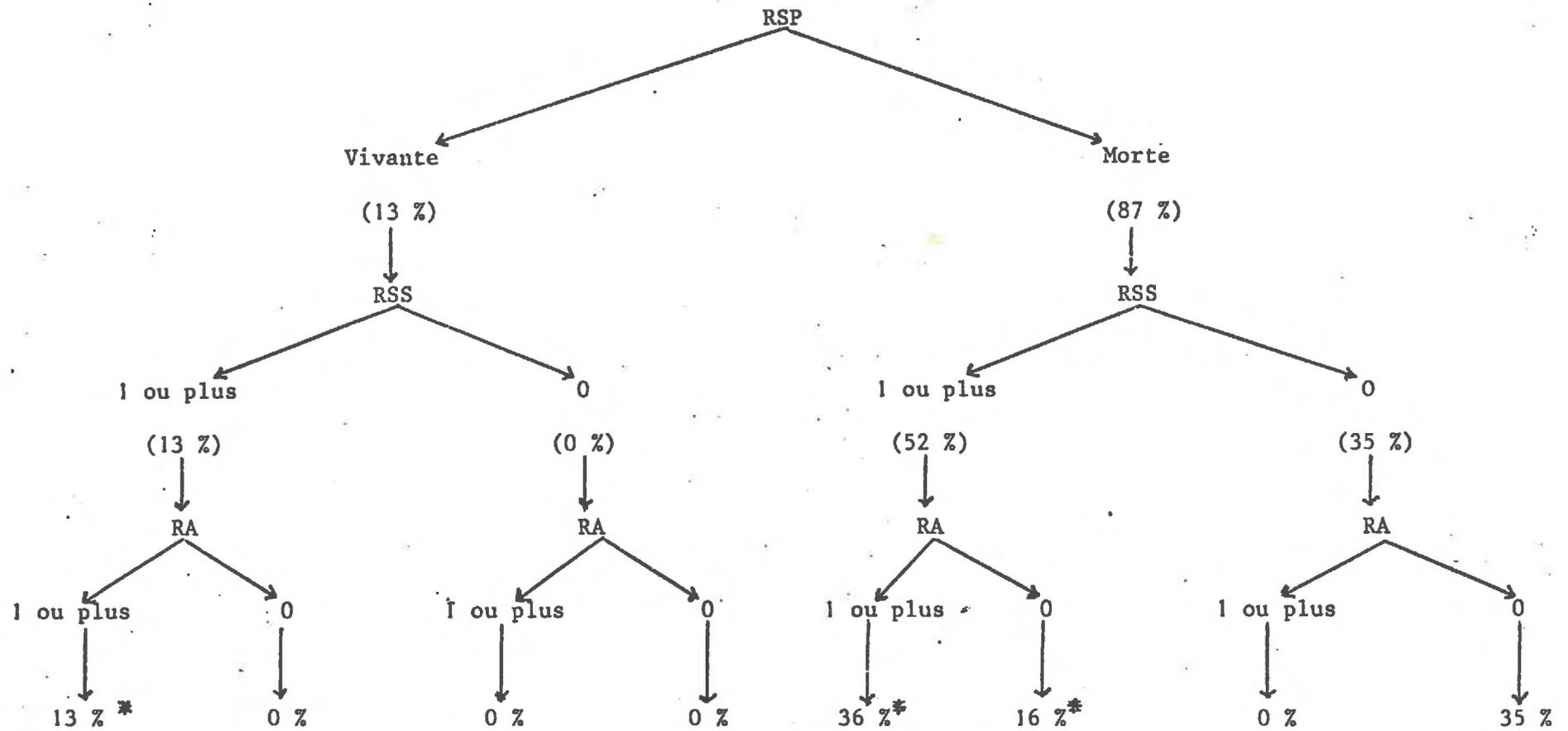
Au vue de ce tableau, une première germination suivi de dessèchement ne signifie pas l'absence de plantule après réimbibition, dans la mesure où des racines (RSS, RA) peuvent se différencier. Certaines semences conservent leur radicule intacte (RSP) tandis que la majorité (87 %) présente une radicule morte (RSP), mais différencient d'autres racines.

De plus, les plantules qui conservent la racine séminale principale vivante (RSP) différencient tous les autres types possibles de racines, tandis que certaines plantules ne sont pas observées (en particulier, si RSS = 0, alors RA = 0)

Au total, le taux de "regermination" -plantules a priori viables- est de 65 %. Bien que non nulle, l'aptitude à "germer" n'est pas intégralement conservée.

Si le dessèchement survient après germination et croissance de 5 mm de la racine séminale principale, le dessèchement de RSS est irréversible mais 10 % des semences sont capables de différencier une racine séminale secondaire.

2. Cas du Colza : Les semences germées de colza (0 à 3 mm) sont desséchées puis réimbibées. 35 % présentent une racine séminale morte (racine nécrosée, aucune nouvelle différenciation), 65 % présentent une racine séminale vivante.



* semences pouvant a priori donner une plantule fonctionnelle (65 %)

Tableau A5 : "Réversibilité de la germination" après une première germination (Maïs)

Il suffit cependant de choisir des plantules nettement germées (croissance de la racine $\gg 2$ mm) pour réduire ce taux de "regermination" à des valeurs pratiquement nulles.

C. Synthèse.

a) L'imbibition est un processus réversible. La cinétique du $n^{\text{ième}}$ cycle est, en moyenne, comparable à celle du premier cycle (tendance à être plus rapide).

b) Les semences préhumectées, desséchées et non germées conservent intégralement leur aptitude à germer et leur germination est plus rapide que celle d'un lot témoin.

c) La "regermination" de semences déjà germées est possible jusqu'à une limite absolue où l'irréversibilité est totale (radicule de quelques mm). Cette regermination semble notamment être fonction de l'aptitude des semences à différencier différents types de racines : elle serait donc fonction du type de système racinaire de la future plante.

d) On peut synthétiser les résultats relatifs à la "réversibilité" par la figure A5.

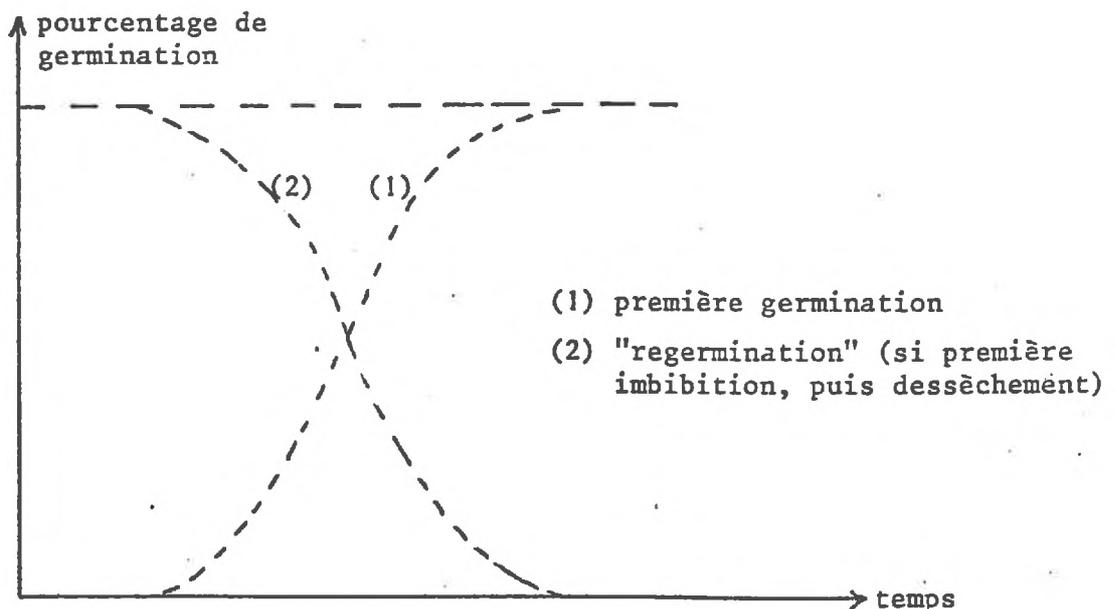


Figure A5 : Représentation schématique des taux de germination et de "regermination".

e) Ces conclusions semblent généralisables (HEGARTHY, 1978).

BIBLIOGRAPHIE

=====

- AMEMIYA M. - The influence of aggregate size on soil moisture content-capillary conductivity relations.
Soil Science Society Proceedings, 1965.
- BERRIE A.M.M. and DRENNAN D.S.H. - The effect of hydratation-dehydratation on seed germination.
New Phytol., 1971, 70, 135-142.
- BRUCE R.R. - Hydraulic conductivity evaluation of the soil profil from soil water retention relations.
Soil Sci. Soc. Amer. Proc., vol. 36, 1972.
- CARY J.W. and TAYLOR S.A. - The interaction of the simultaneous diffusions of heat and water vapor.
Soil Science Society Proceedings, 1962.
- CARY J.W. and TAYLOR S.A. - Thermally driven liquid and vapor phase transfer of water and energy in soil.
Soil Science Society Proceedings, 1962.
- CASSEL D.K., NIELSEN D.R. and BIGGAR J.W. - Soil-water movement in response to imposed temperature gradients.
Soil Sci. Soc. Amer. Proc., vol. 33, 1969.
- COLLIS-GEORGE N. and JENNIFER B. HECTOR - Germination of seeds as influenced by matric potential and by area of contact between seed and soil water.
Aust. J. Soil Res., 1966, 4, 145-164.
- COLLIS-GEORGE N. and JOCELYN E. SANDS - The control of seed germination by moisture as a soil physical property.
- COME D. - Dégazage des enveloppes séminales lors de leur imbibition.
I - Cas général. *Physiol. Vég.* 1971, 9(3), 439-446.
- COME D. - Dégazage des enveloppes séminales lors de leur imbibition.
II - Cas de graines de Pommier.
Physiol. Vég., 1971, 9(3), 447-452.

- COME D. et SEMADENI A. - Dégazage des enveloppes séminalles lors de leur imbibition - III. Application à l'étude de la dureté des graines d'*Hedysarum coronarium* L.
Physiol. Vég., 1973, 11(1), 171-177.
- COREY J.C., PETERSON S.F. and WAKAT M.A. - Measurement of attenuation of $^{137}\text{C}_s$ and ^{241}Am gamma rays for density and water content determinations.
Soil Sci. Soc. Amer. Proc., vol. 35, 1971.
- CREVECOEUR M., DELTOUR R. and BRONCHART R. - Cytological study on water stress during germination of *Zea mays*.
Planta (Berl.) 132, 31-41, (1976)
- DASBERG S - Soil-water movement to germinating seeds.
Journal of experimental Botany, Vol. 22, n° 73, pp. 999-1008.
November 1971.
- DASBERG S. and MENDEL K. - The effect of soil water and aeration on seed germination.
Journal of experimental Botany, Vol. 22, n° 73, pp. 992-998,
November 1971.
- DASBERG S., HILLEL D. and ARNON I. - Response of grain sorghum to seedbed compaction.
Agronomy Journal, Volume 58, March-April, 1966.
- EGGLE MUJICA - Influence de la température sur la germination et la croissance du maïs, var. LG 11. Contribution à l'étude particulière de l'action des chocs thermiques sur l'allongement du mésocotyle des plantules étiolées.
Thèse de Docteur Ingénieur - Paris 6, 1976.
- FAURE A. - Influence de la phase argileuse sur la susceptibilité au tassement des sols.
Science du Sol - Bulletin de l'A.F.E.S. n° 2, 1976.
- FENNECH J. et PAPY F. - Conditions de réussite de la levée en climat méditerranéen - Cas des cultures de céréales en sec au Nord du Maroc.
Ann. agron., 1977, 28(6), 599-635.

- FRITTON D.D., DON KIRKHAM and SHAW R.H. - Soil water evaporation, isothermal diffusion, and heat and water transfer.
Soil Sci. Soc. Amer. Proc., vol. 34, 1970.
- GARDNER Walter H., CAMPBELL Gaylon S., and CALISSENDORFF C. - Systematic and Random errors in duals gamma energy soil bulk density and water content measurements.
Soil Sci. Soc. Amer. Proc., vol. 36, 1972.
- GARDNER W.H. and CALISSENDORFF C., 1967 - Gamma ray and neutron attenuation in measurement of soil bulk density and water content.
p. 101-113. In isotope and radiation techniques in soil physics and irrigation studies. International Atomic energy Agency, Vienne.
- GARDNER H.R. - Prediction of evaporation from homogeneous soil based on the flow equation.
Soil Sci. Amer. Proc., vol. 37, 1973.
- GARDNER W.R. - Solutions of the flow equation for the drying of soils and other porous media.
Soil Society proceedings, 1959.
- GAYLON S. CAMPBELL - A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data.
Soil Science, vol. 117, n° 6, June 1974.
- HADAS A. - Factors affecting seed germination under soil moisture stress.
Israël J. Agric. Res. 20:1, January 1970.
- HADAS A. and RUSSO D. - Water uptake by seeds as affected by water stress, Capillary Conductivity, and seed-soil water contact. I - Experimental study. II - Analysis of experimental data.
Agronomy Journal vol. 65, Sept.-Oct. 1974, p. 643-652.
- HADAS A. - Effects of soil moisture stress on seed germination.
Agronomy Journal vol. 61, March-April 1969, p. 325-327.
- HADAS A. - A suggested method for testing seed vigour under water stress in simulated arid conditions.
Seed Sci. and Technol., 5, 519-525 (1977).
- HADAS A. - A simple laboratory approach to test and estimate seed germination performance under field conditions.
Agronomy Journal, vol. 69, July-August 1977.

- HANKS R.J. and GARDNER H.R. - Influence of different diffusivity - water content relations on evaporation of water from soils.
Soil Science Society Proceedings, 1965.
- HEGARTY T.W. - The physiology of seed hydration and dehydration, and the relation between water stress and the control of germination : a review.
Plant, cell and environment (1978) 1, 101-119.
- HEGARTY T.W. - Seed activation and seed germination under moisture stress
New phytol. (1977) 78, 349-359.
- HERKELRATH W.N., MILLER E.E. and GARDNER W.R. - Water uptake by plants :
I - Divided root experiment ; II - The root contact model.
Soil Sci. Soc. Am. J.;, vol. 41, 1977.
- HILLEL D. and HADAS A. - Isothermal drying of structurally layered soil columns.
Soil Science, vol. 113, n° 1.
- HSIEH J.J.C., GARDNER W.H. and CAMPBELL G.S. - Experimental control of soil water content in the vicinity of root hairs.
Soil Sci. Amer. Proc., vol. 36, 1972.
- JACKSON Ray D. - Water vapor diffusion in relatively dry soil :
I - Theoretical considerations and sorption experiments
II - Desorption experiments
III - Study - state experiments
Soil Science Society Proceedings, 1964.
- DON KIRKHAM and POWERS W.L. - Advanced Soil physics (Wiley-interscience)
- MAN SINGH MANOHAR and Dr. HEYDECKER W. - Effects of water potential on germination of pea seeds.
Nature, April 4, 1964, vol. 202.
- MARCELLIN P. - Mesure de la diffusion des gaz dans les organes végétaux.
Bull. Soc. Franç. de Physiologie Végétale, T. 9, 1963.
- OWEN P.C. - The relation of germination of wheat to water potentiel.
Journ. of Experimental Botany, vol. 3, n° 8, pp. 188-203, June 19

- PARMAR M.T. and MOORE R.P. - Carbowax 6000, Mannitol and Sodium chloride for simulating drought conditions in germination studies of corn (*Zea mays* L.) of strong and weak vigor.
Agronomy Journal, vol. 60, March-April 1968.
- PHILLIPS Romald E. - Water diffusivity of germinating Soybean, Corn and Cotton seed.
Agronomy Journal, vol. 60, September-October 1968.
- RANJIT KUMAR GHOSH - Determination of unsaturated hydraulic conductivity from moisture retention function.
Soil Science, vol. 124, n° 2.
- SHAYKEWICH C.F. and WILLIAMS J. - Resistance to water absorption in germinating rapeseed (*Brassica napus* L.)
Journal of experimental Botany, vol. 22, n° 70, February 1971.
- SHAYKEWICH C.F. and WILLIAMS J. - Influence of hydraulic properties of soil on pre-germination water absorption by rapeseed (*Brassica napus*).
Agronomy Journal, vol. 63, May-June 1971.
- SHARMA M.L. - Simulation of drought and its effects on germination of five pasture species.
Agronomy Journal, vol. 65, November-December 1973.
- STENGEL P. - Utilisation de l'analyse des systèmes de porosité pour la caractérisation de l'état physique du sol in situ.
Ann. Agron., 30(1), pp. 27-51, 1979
- THEVENOT C. et COME D. - Manifestation de la dormance embryonnaire du Pommier (*Pirus malus* L.) en fonction des conditions thermiques de germination.
Physiol. Vég., 1973, 11(1), 151-160.
- THEVENOT C. et COME D. - Influence de la présentation de l'eau et de l'oxygène sur la germination des embryons de Pommier (*Pirus malus* L)
Note présentée par L. PLANTEFOL.
C.R. Acad. Sc. Paris, t. 277 (23 Juillet 1973).
- TINGEY D.T. and STOCKWELL Cynthia - Semipermeable membrane system for subjecting plants to water stress.
Plant Physiol. (1977) 60, 58-60.

- TISSAOUI T. et COME D. - Mise en évidence de trois phases physiologiques différentes au cours de la "germination" de l'embryon de Pommier non dormant, grâce à la mesure de l'activité respiratoire.
Physiol. Vég., 1975, 13(1), 95-102.

- TOUZARD J. - Influence de diverses conditions constantes de température et d'humidité sur la longévité des graines de quelques espèces cultivées.
"Advances in horticultural Science and their applications".
Volume I - PERGAMON PRESS - 1961.

- WAGGONER P.E. and PARLANGE J.Y. - Water uptake and water diffusivity of seeds -
Plant Physiol. (1976) 57, 153-156.

- WILLIAMS J. and SHAYKEWICH C.F. - Influence of soil water matric potential and hydraulic conductivity on the germination of rape (*Brassica napus* L.)
Journal of experimental Botany, vol. 22, n° 72, p. 586-597,
August 1971.

- YADAV R.C. and GUPTA J.P. - Germination and seedling emergence in relation to soil moisture and post-sowing compaction.
Indian J. Agric. Sci. 47(9), p. 448-455, September 1977.

- ZUR B. - Osmotic control of the matric soil-water potential :
 - I - Soil-water system
Soil Science, vol. 102, n° 6
 - II - Soil-plant system
Soil Science, vol. 103, n° 1