

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

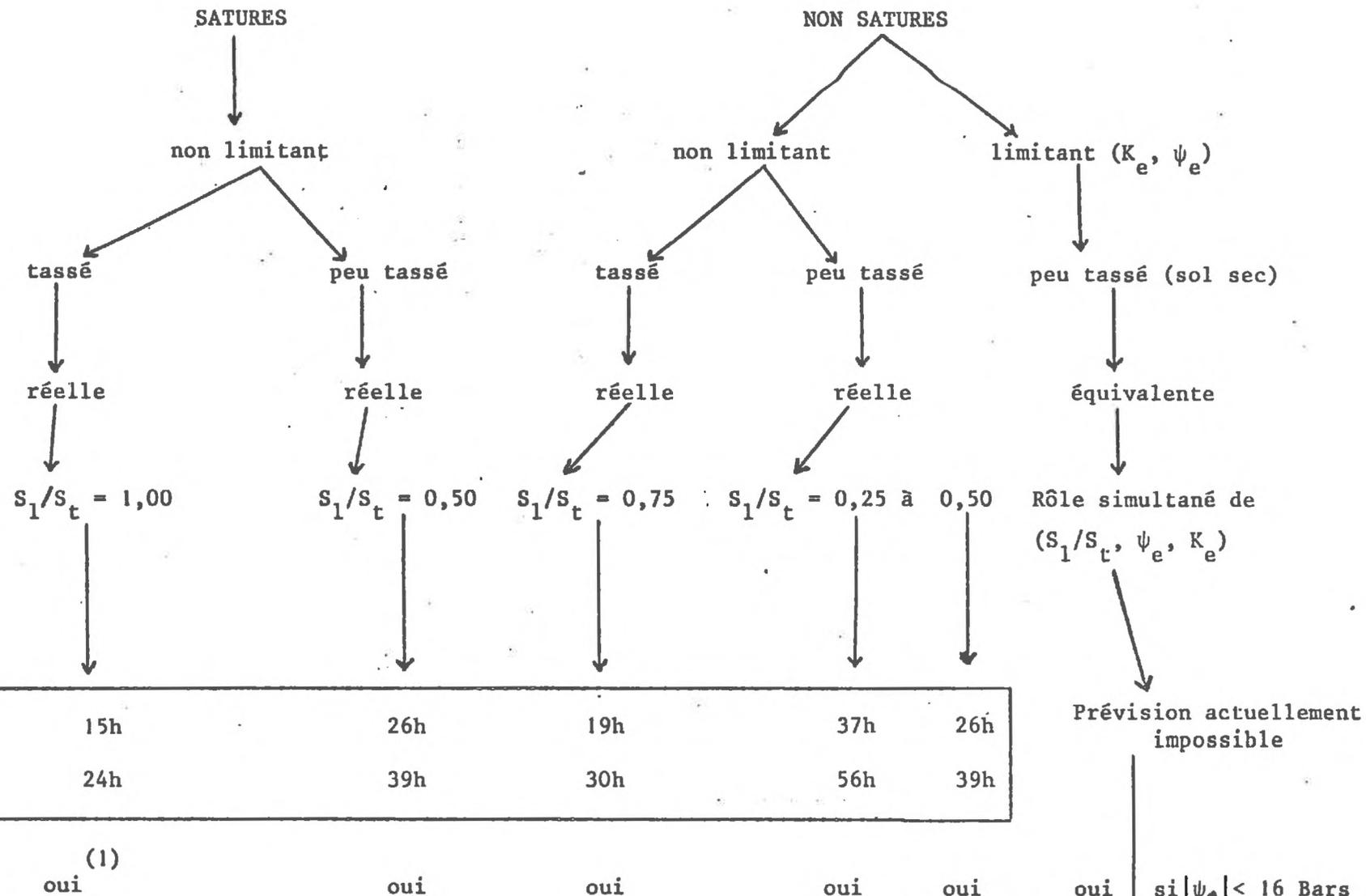


Tableau 17 : Schéma de cas typiques d'imbibition en fonction de l'humidité et de l'état structural du sol.

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).

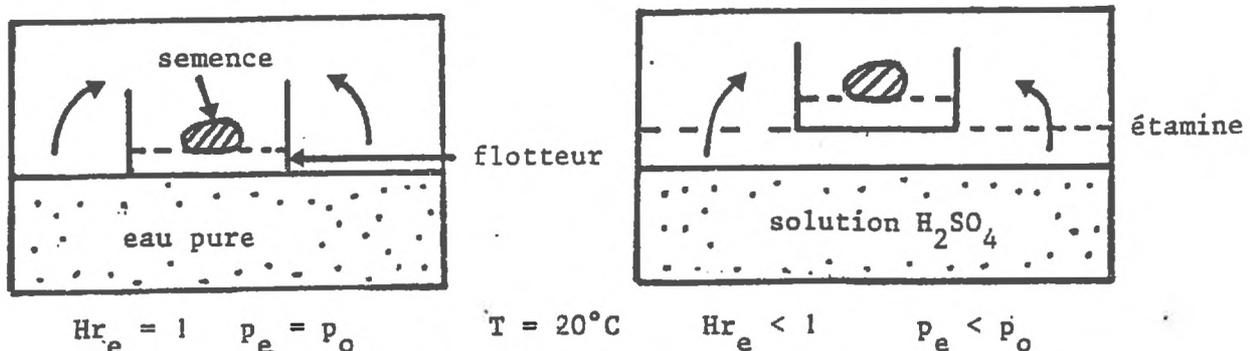


Schéma 13 : Dispositifs d'imbibition en phase gazeuse.

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 %	Caractéristi- que de la fin d'imbibition	H _s (germi- nation 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.

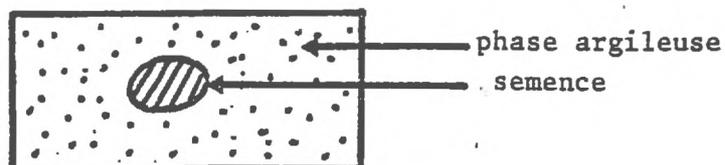


Schéma 14 : Imbibition des semences dans une phase argileuse continue et saturée $|\psi_e| = 16$ Bars

(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 $|\psi_e|$.

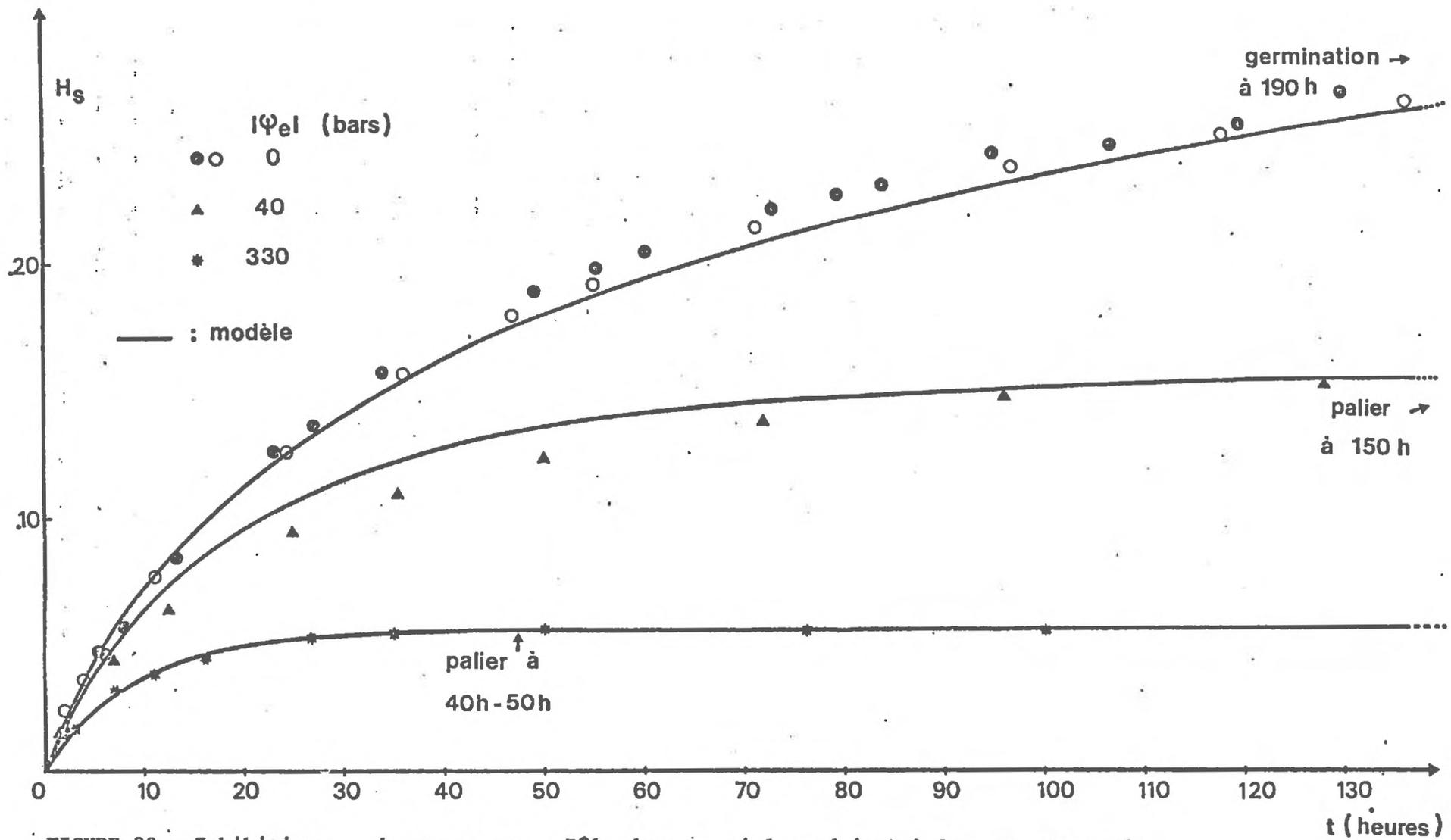


FIGURE 23 : Imbibition en phase gazeuse : Rôle du potentiel extérieur à la semence sur la cinétique d'imbibition.

(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.

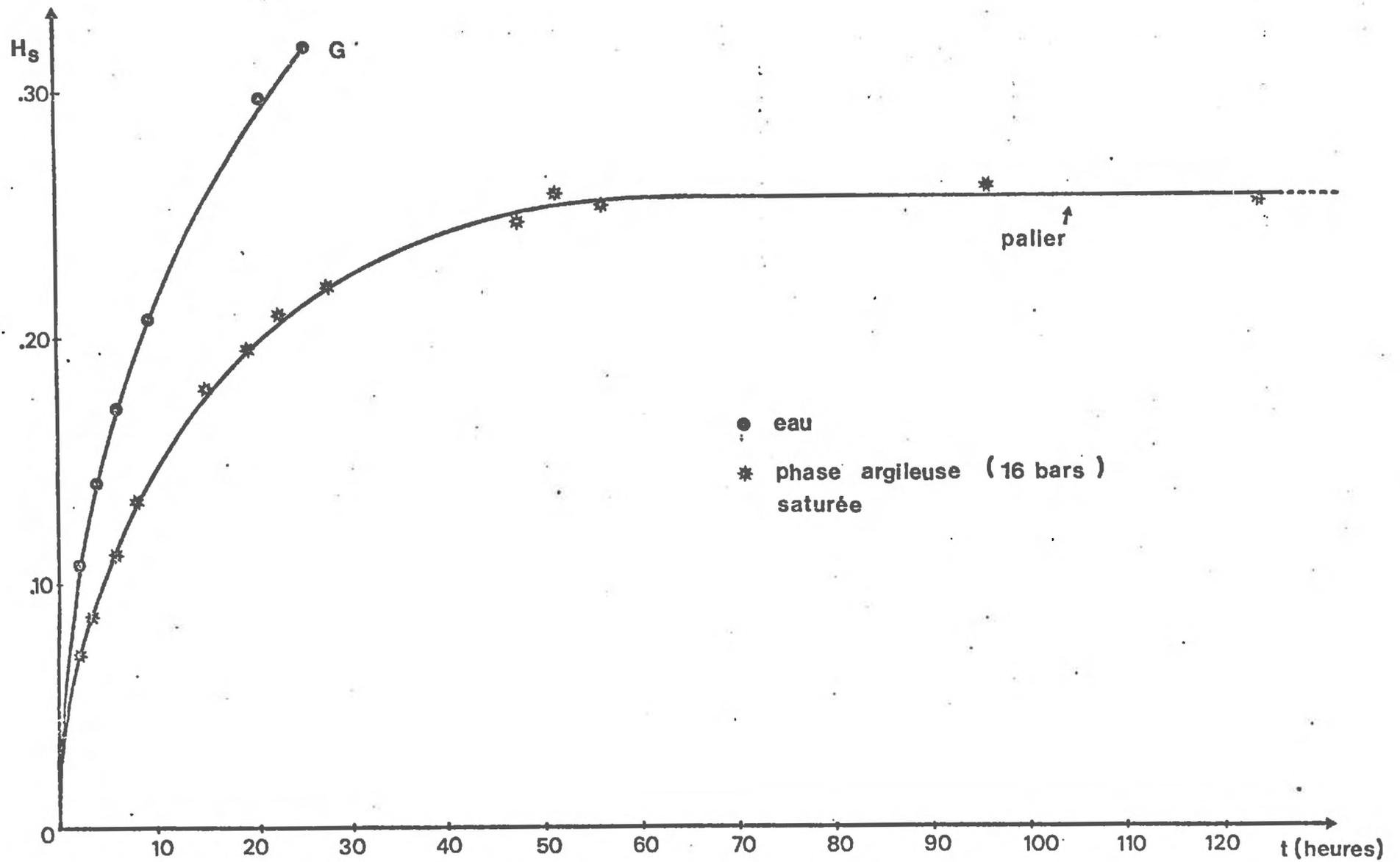


FIGURE 24 : Imbibition en phase liquide : Obtention d'un palier hydrique des semences dans une pâte argileuse continue et saturée (n = 13).
Remarque : le tracé continu correspondant est approximatif et non modélisé.

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.

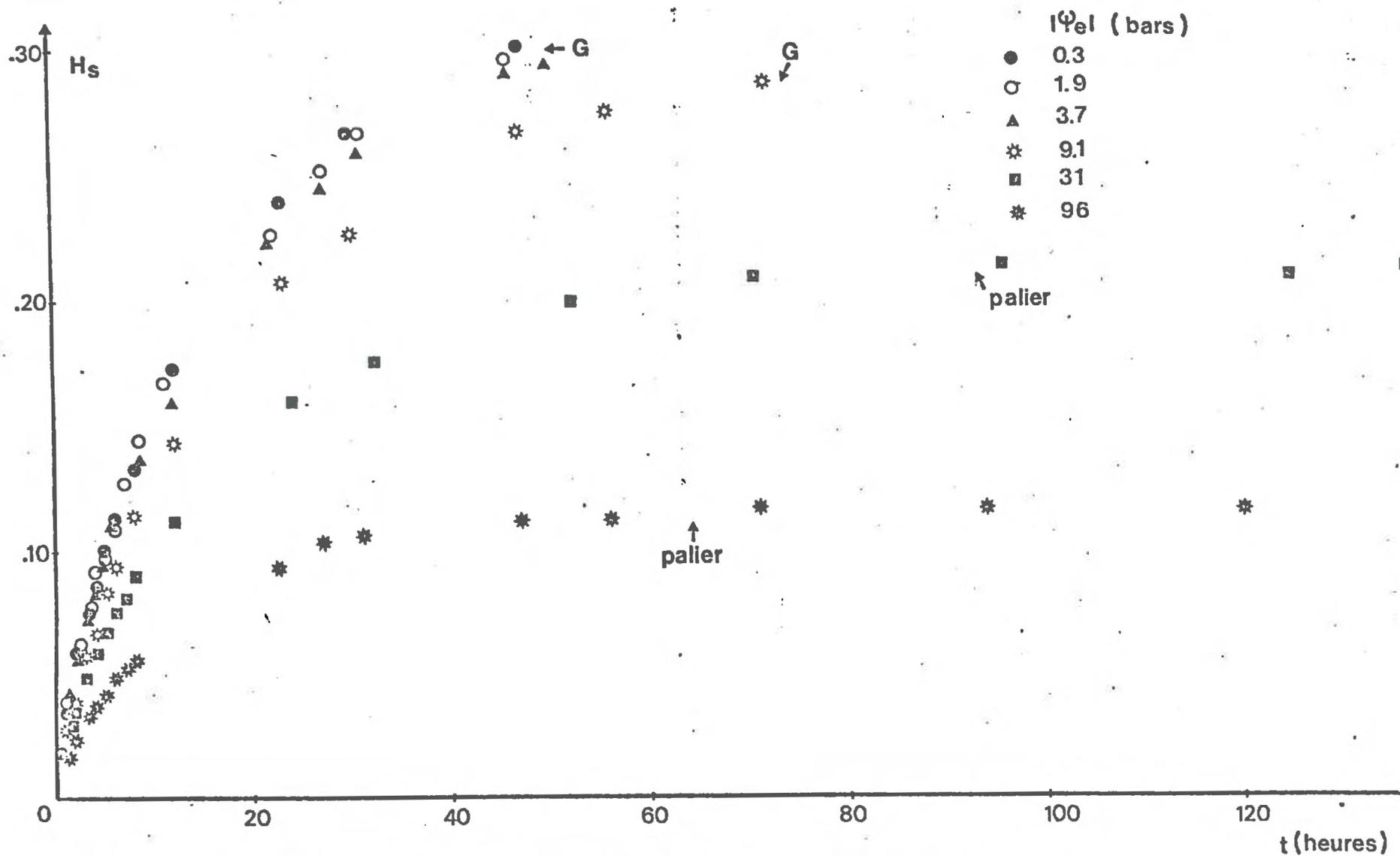


FIGURE 25 : Imbibition dans des massifs d'agrégats : Rôle de l'humidité sur les cinétiques d'imbibition. (quelle que soit H_e , $n = 20$, $\sigma H_s \leq 0,009$)

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

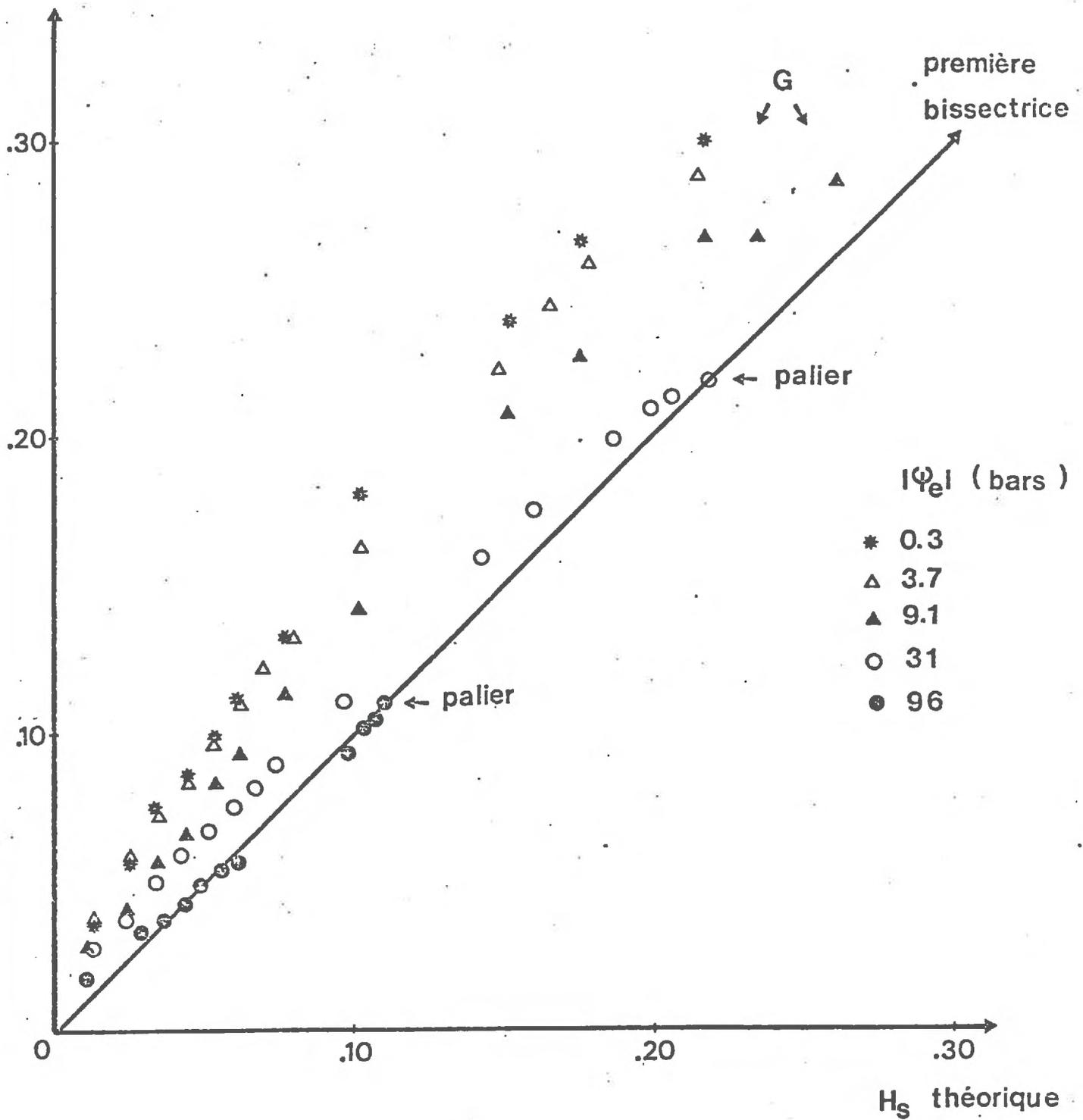


FIGURE 26 : Imbibition dans des massifs d'agrégats : Mise en évidence des transferts liquides (" H_s théorique" est calculé sur la seule base de transferts gazeux).

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.

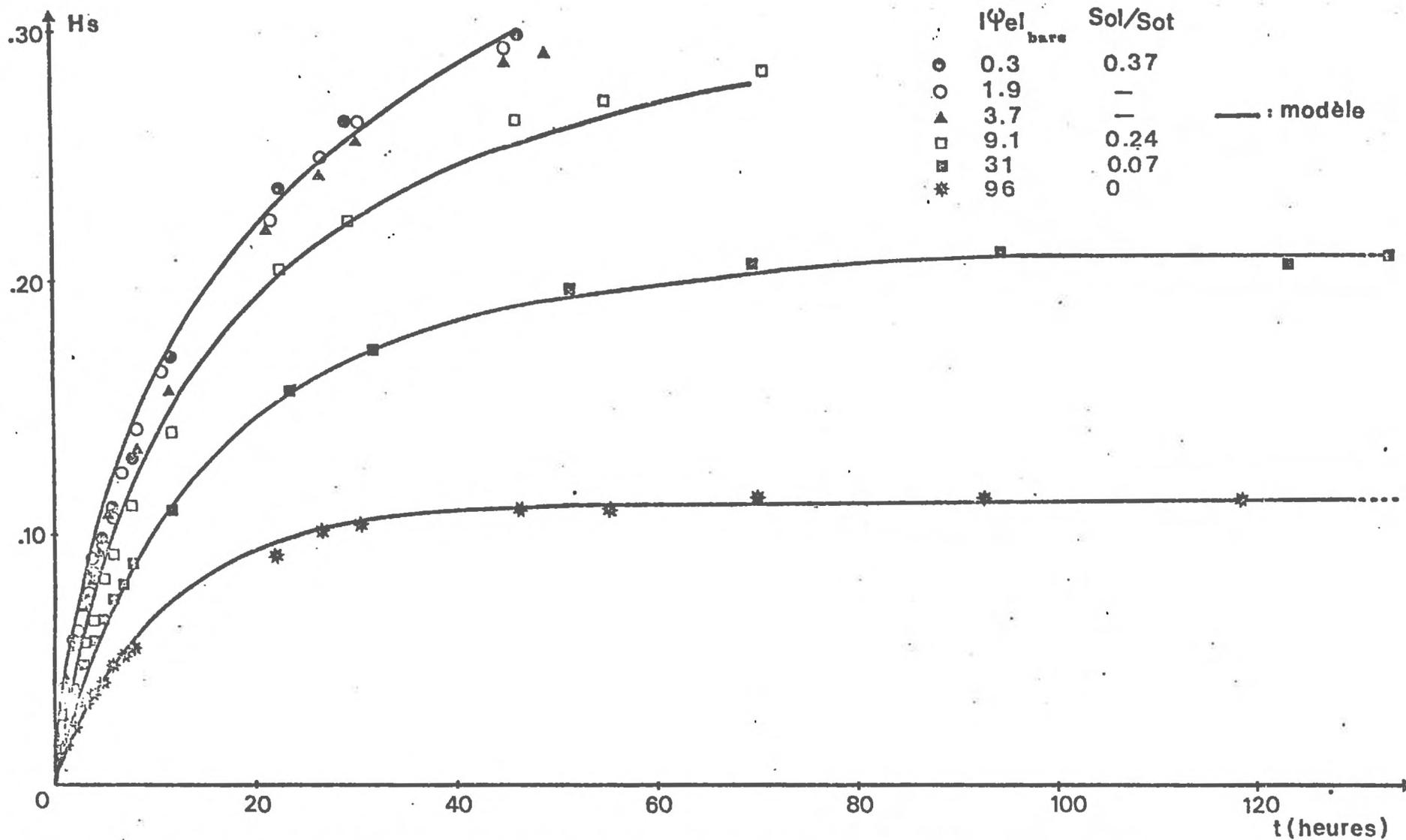


FIGURE 27 : Imbibition dans des massifs d'agrégats : Recherche des surfaces équivalentes.

(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.

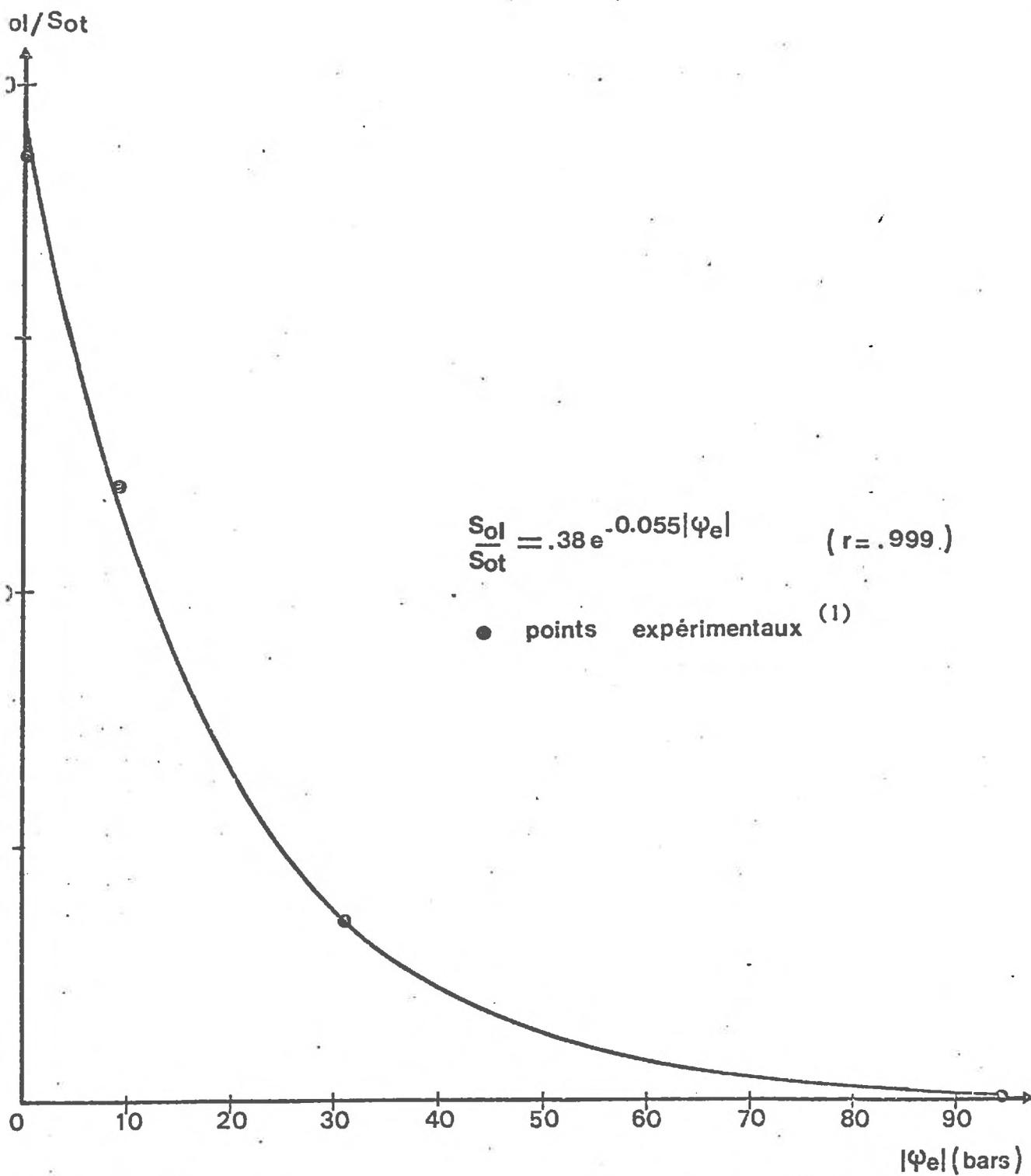


FIGURE 28 : Relation entre le rapport S_{ol}/S_{ot} et le potentiel à l'extérieur de la semence.

(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.

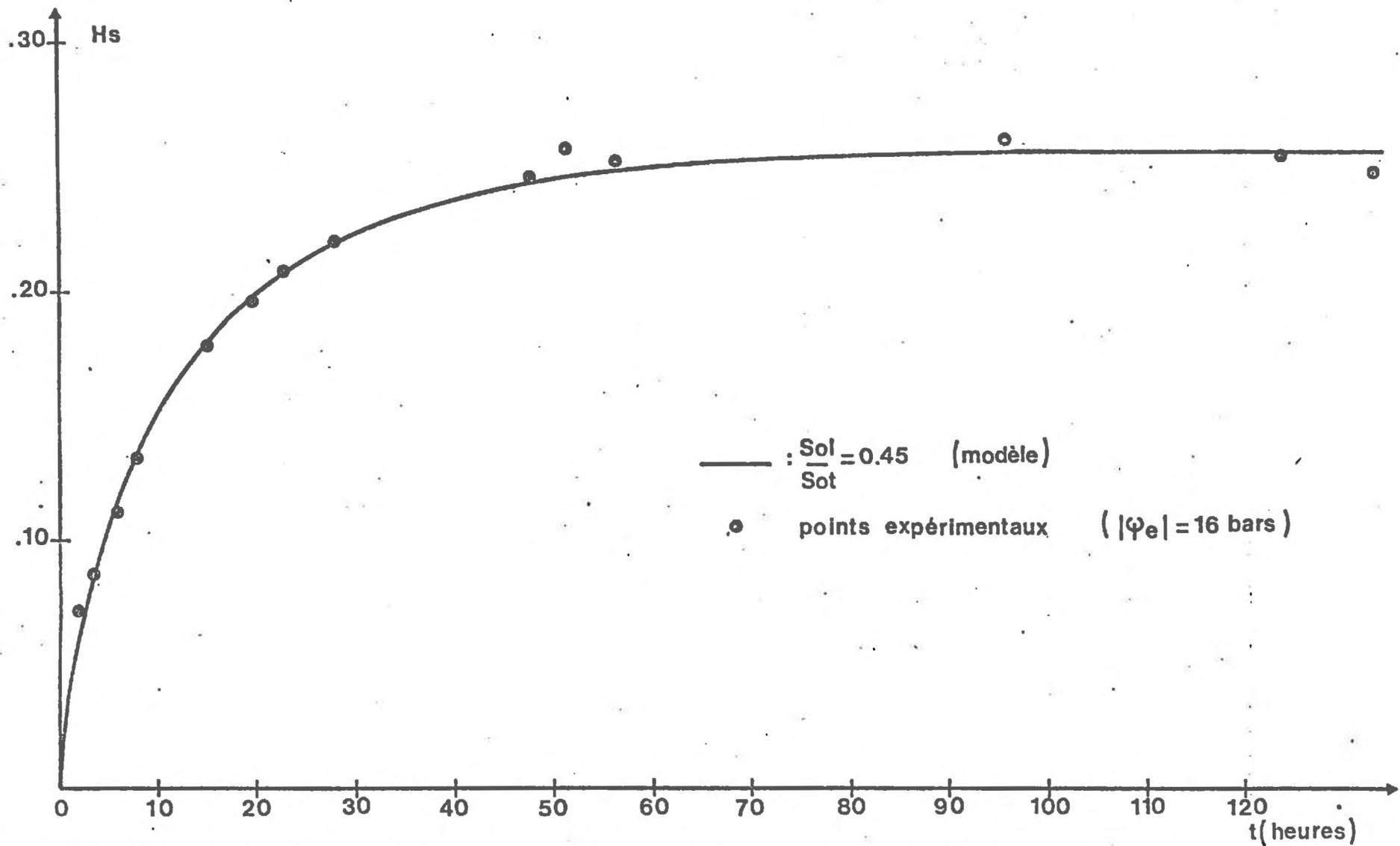


FIGURE 29 : Imbibition dans une phase argileuse continue et saturée : Données expérimentales et modélisées. (Les données expérimentales sont celles de la figure 24).

	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. TYPOLOGIE 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.

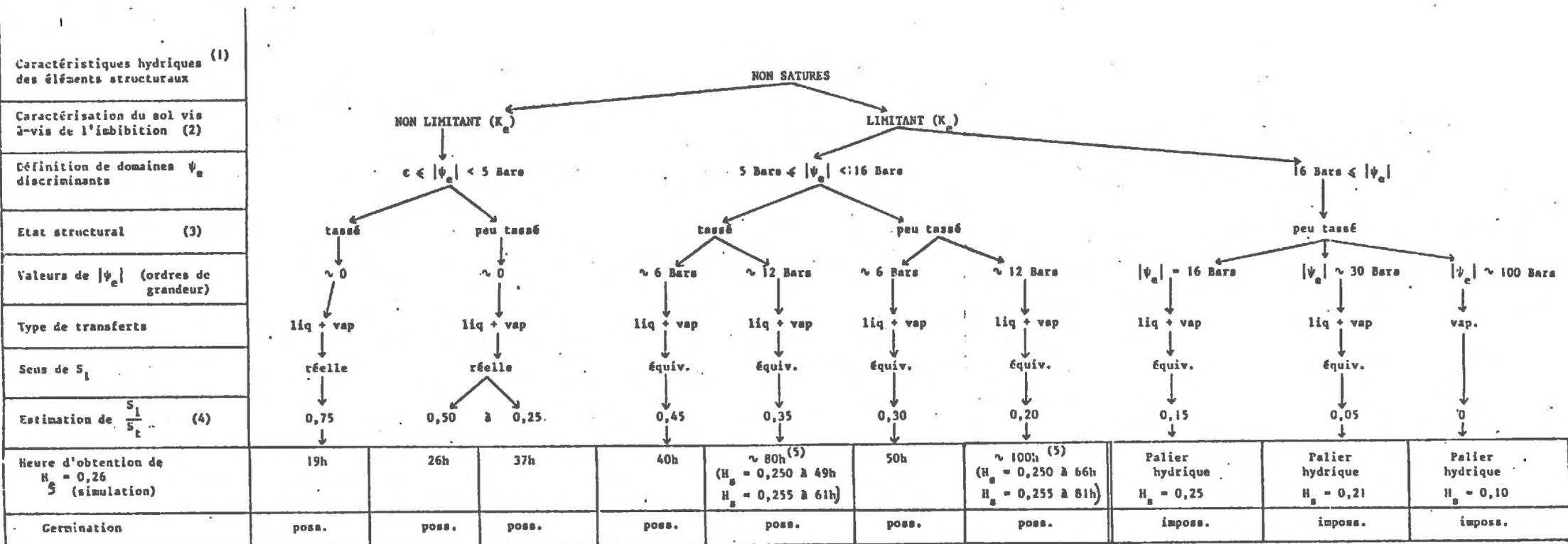
Une telle lecture du tableau illustre bien les rôles décisifs de la localisation des semences dans le profil et de la vitesse de dessèchement de ce dernier.

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_l/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.

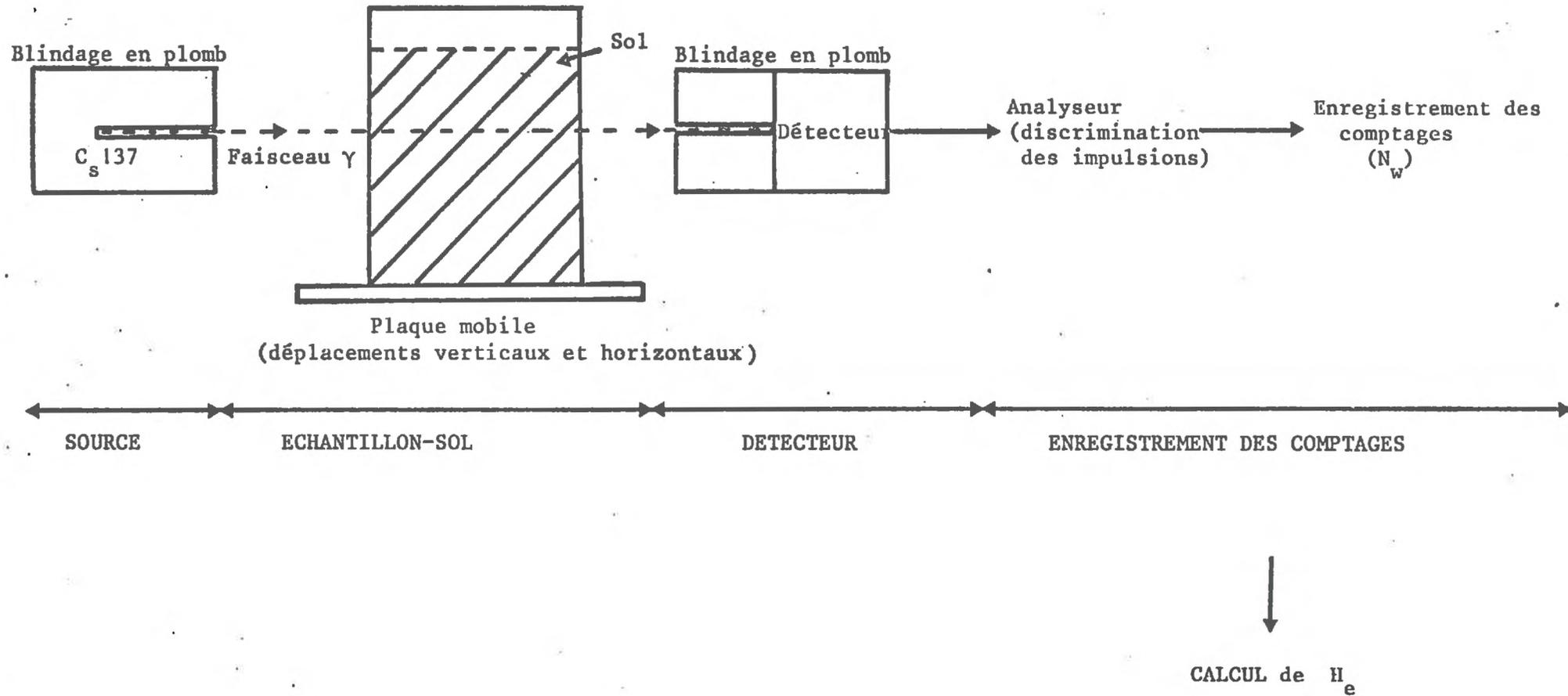
	μ_w	μ_s
Valeur théorique	0,0860	0,0770
Valeur expérimentale	0,0855	0,0771
Incertitude absolue	0,0010	0,0015
Incertitude relative	0,012	0,0199

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 :

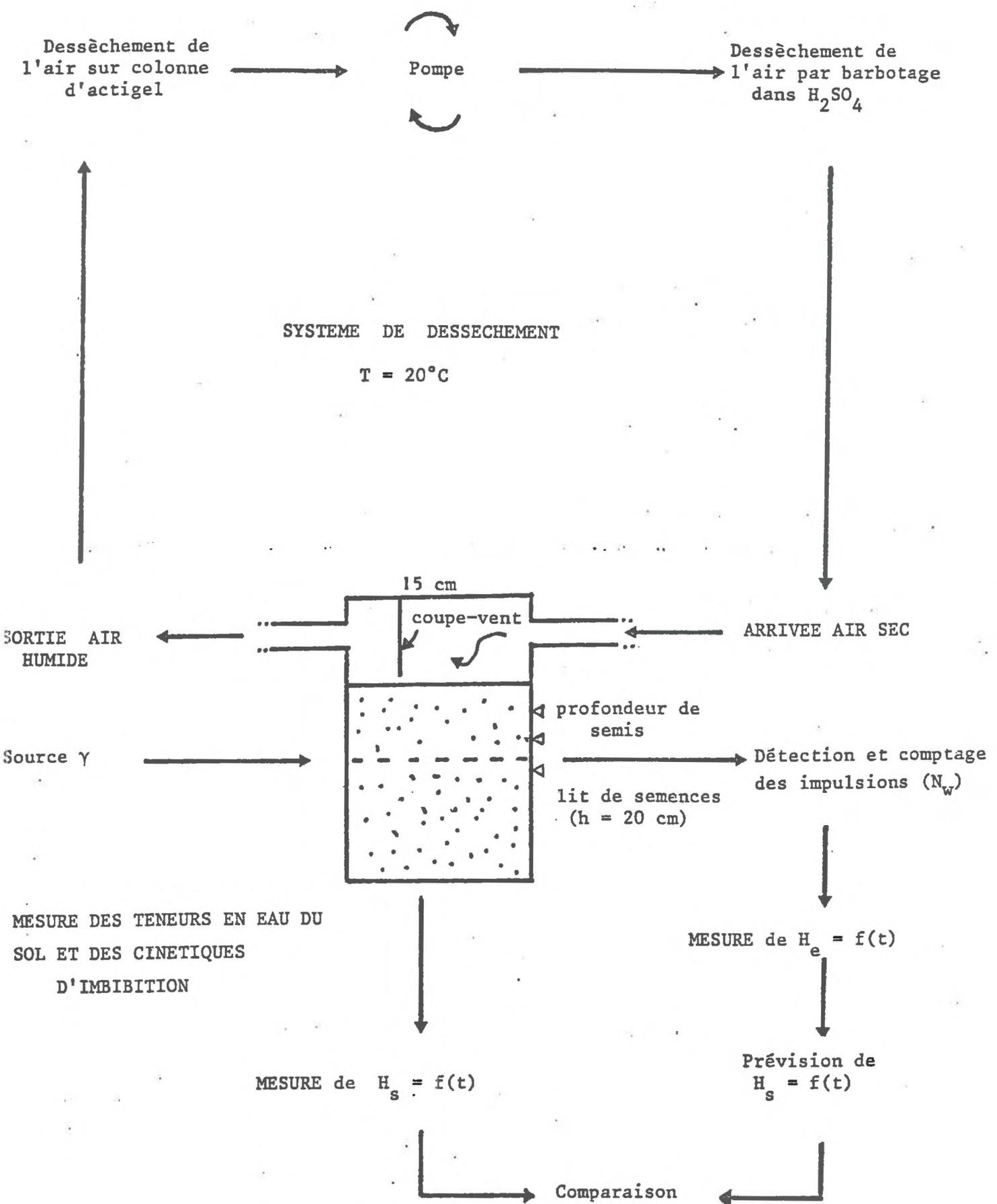
- la première cuve sans prélèvement de semences durant toute la phase d'imbibition -donc sans perturbation- servira à la mesure de H_e par atténuation γ . Les semences placées dans cette cuve seront prélevées en fin de manipulation pour contrôler les germinations.

- 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.

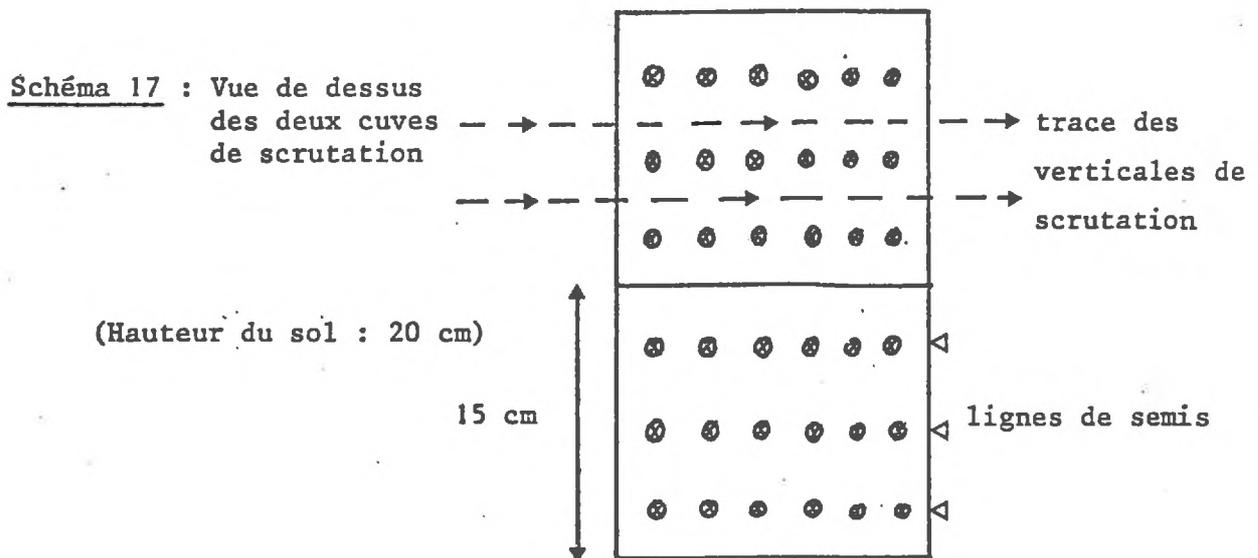
(2) les mesures par atténuation ne sont évidemment pas instantanées ; notons que les cycles de scrutation sont plus rapides en début de manipulations quand la vitesse des phénomènes est maximale.

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
$H_{r1} = \frac{p_1}{p_0}$	$H_{r2} = \frac{p_2}{p_0}$
T = 20°C	T = 20°C

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

$$p_1 V = p_0 V_0 \quad (1), \quad V_0 \text{ volume fictif de vapeur d'eau ramené à } p_0 \text{ (situation initiale)}$$

$$p_2 V = p_0 V_0' \quad (2), \quad V_0' \text{ volume fictif de vapeur d'eau ramené à } p_0 \text{ (situation finale)}$$

$$\text{D'après (1) et (2), } \frac{p_1}{p_2} = \frac{V_0'}{V_0}, \quad \text{ou } V_0' = \frac{p_1}{p_2} \cdot V_0 \quad (3)$$

On peut écrire d'autre part :

$$V_0' = V_0 + \Delta V \quad (4) \quad \Delta V \text{ étant l'accroissement du volume de vapeur d'eau ramené à } p_0 \text{ lorsque la phase gazeuse passe de } H_{r1} \text{ à } H_{r2}.$$

D'après (3) et (4),

$$\frac{P_2}{P_1} V_0 = V_0 + \Delta V \quad (5) \quad \text{soit} \quad \Delta V = V_0 \left(\frac{P_2}{P_1} - 1 \right) \quad (6)$$

$$\text{ou} \quad \Delta V = V_0 \left(\frac{P_2}{P_0} \cdot \frac{P_0}{P_1} - 1 \right) = V_0 \left(\frac{H_{r2}}{H_{r1}} - 1 \right) \quad (7)$$

Et d'après (1),

$$V_0 = \frac{P_1}{P_0} \quad (8)$$

En combinant (7) et (8),

$$\Delta V = \frac{P_1}{P_0} V \left(\frac{H_{r2}}{H_{r1}} - 1 \right) = H_{r1} V \left(\frac{H_{r2}}{H_{r1}} - 1 \right) = V(H_{r2} - H_{r1})$$

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

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 :

$$m = p_0 \Delta V \cdot \frac{M}{RT} \quad (10) \quad \text{avec } M, \text{ masse molaire de l'eau}$$

$m, \text{ masse d'eau évaporée correspondant à } \Delta V.$

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

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).

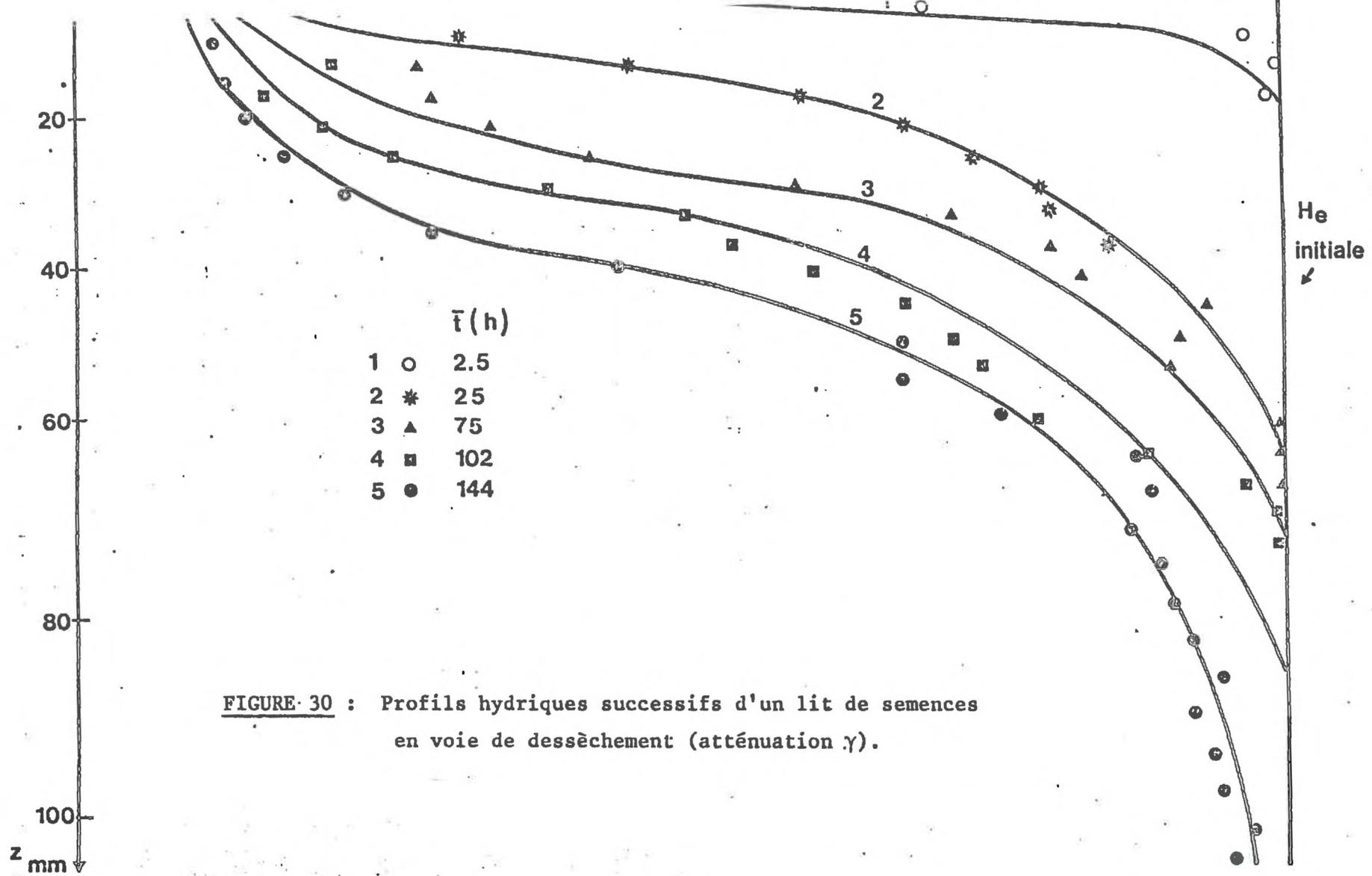


FIGURE 30 : Profils hydriques successifs d'un lit de semences en voie de dessèchement (atténuation γ).

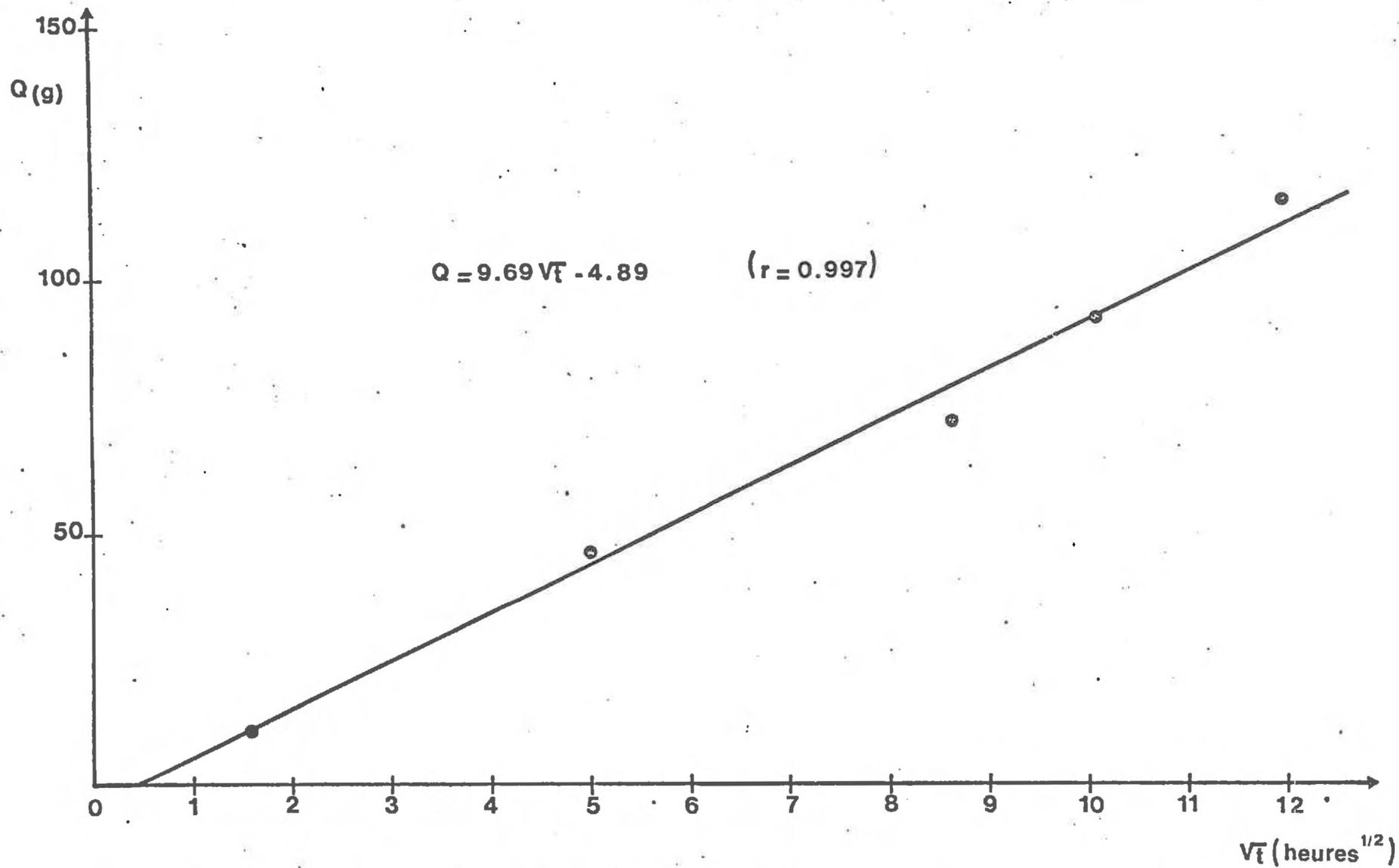


FIGURE 31 : Vérification de la loi d'évaporation cumulée en fonction du temps. (lit de semences en voie de dessèchement).

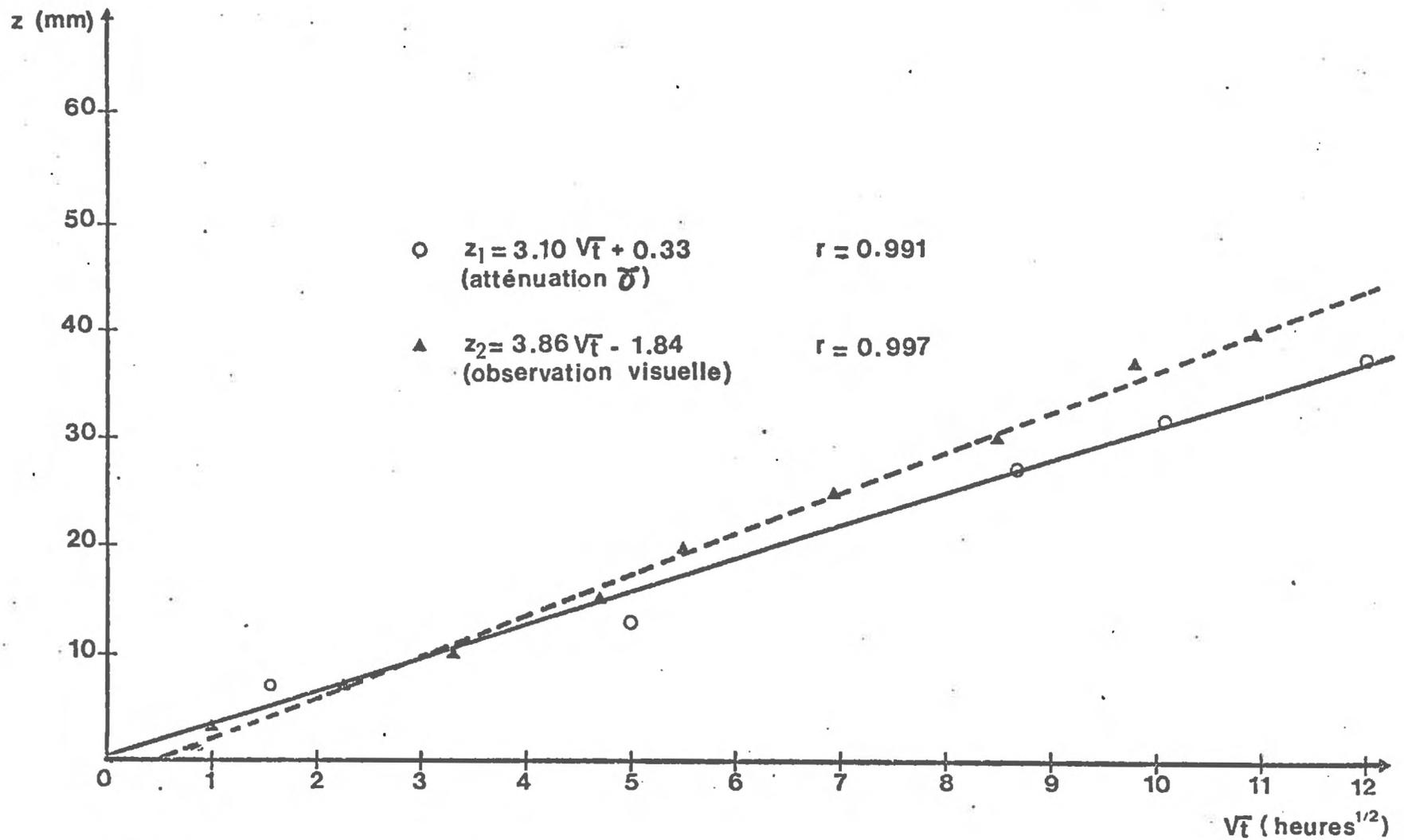


FIGURE 32 : Progression du front de dessiccation en fonction du temps (lit de semences en voie de dessèchement)

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) \diagdown 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 $(\Delta H_s / \Delta t)_n$.

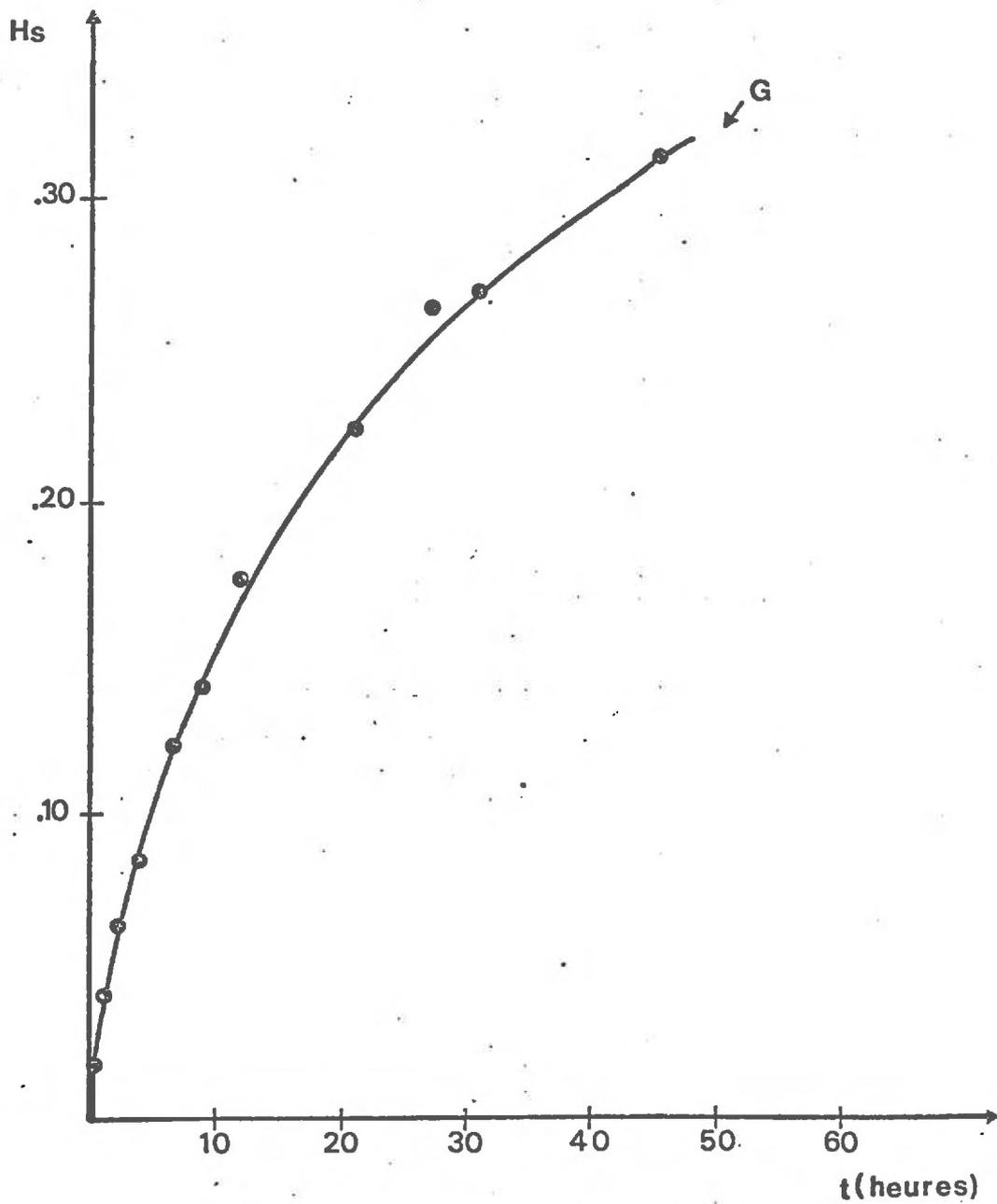


FIGURE 33 : Cinétique d'imbibition de référence
 (agrégats 2 à 3 mm, $H_e = 0,12$, $n = 10$)

(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 $\psi_e = f(H_e)$

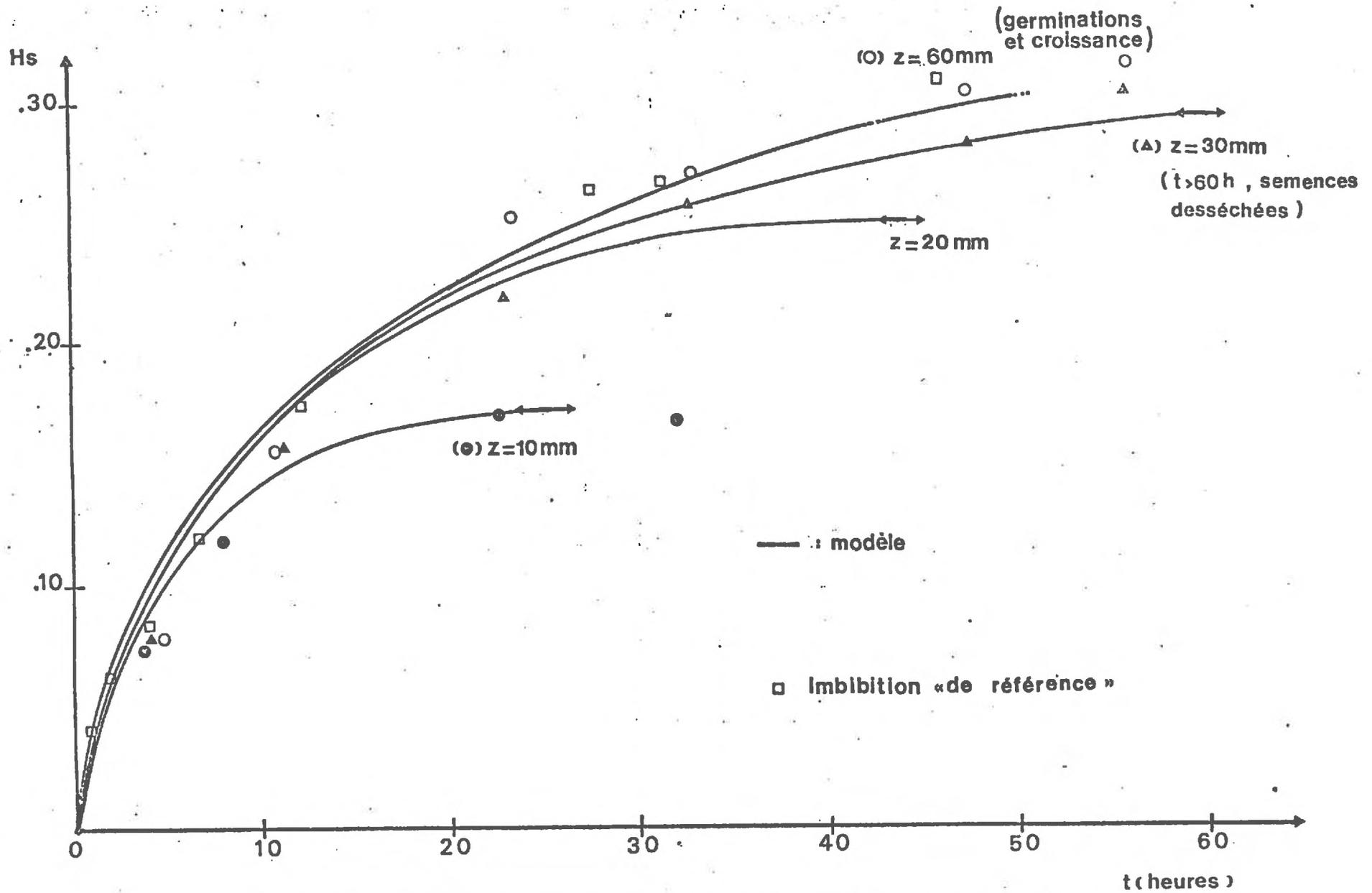


FIGURE 34 : Imbibition dans un lit de semences en voie de dessèchement.
 Données expérimentales et modélisés.

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).

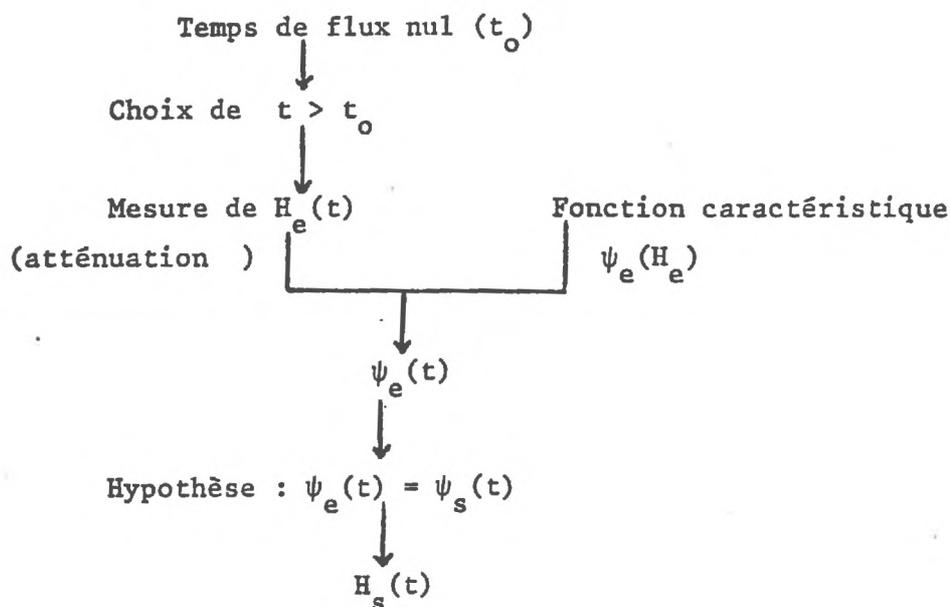


Schéma 18 : Modèle de prévision du dessèchement des semences.

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 éventuelle 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

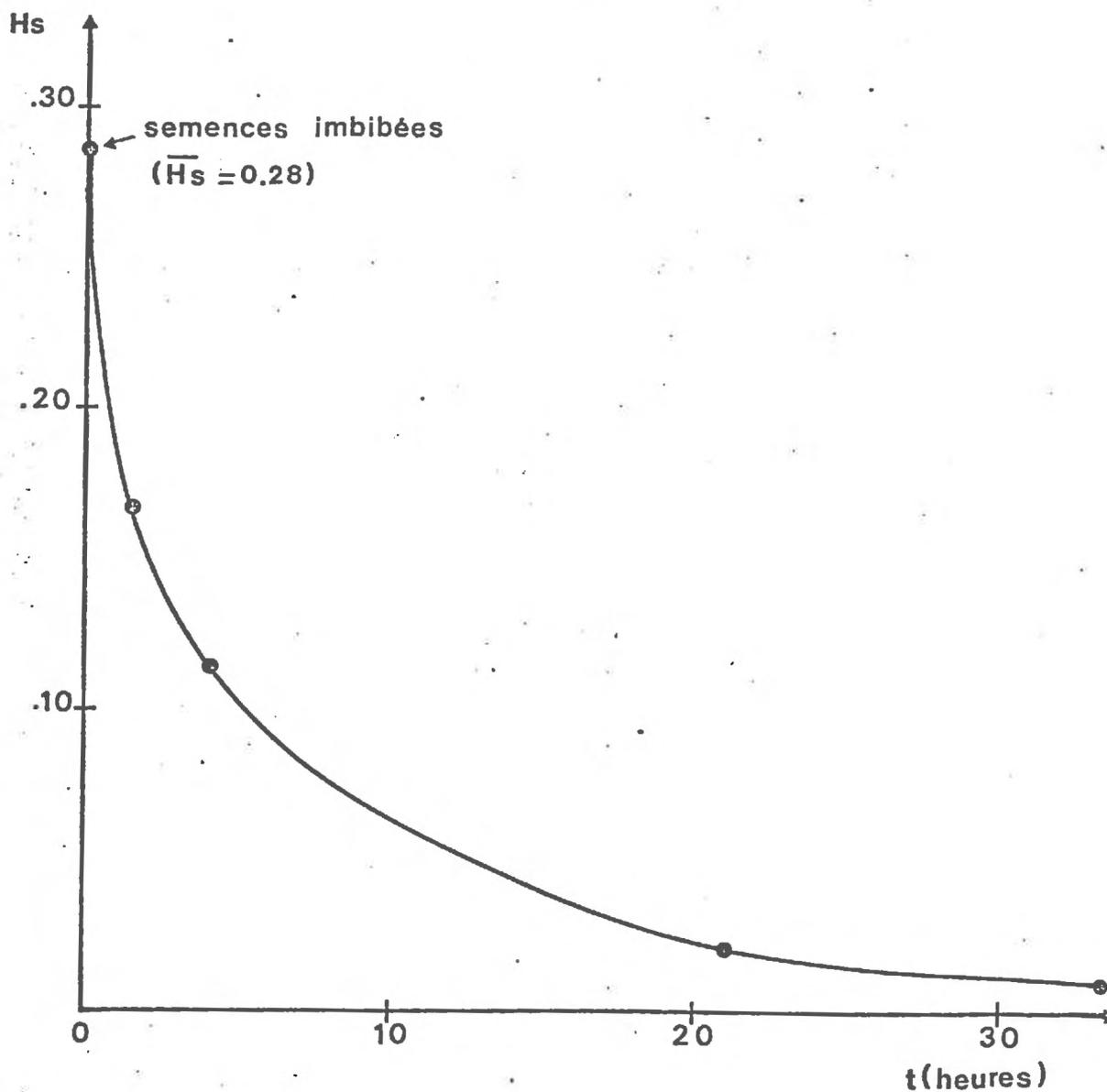


FIGURE 35 : Dessèchement des semences à l'air libre (valeurs moyennes, $n = 30$)

5Le tracé continu est approximatif

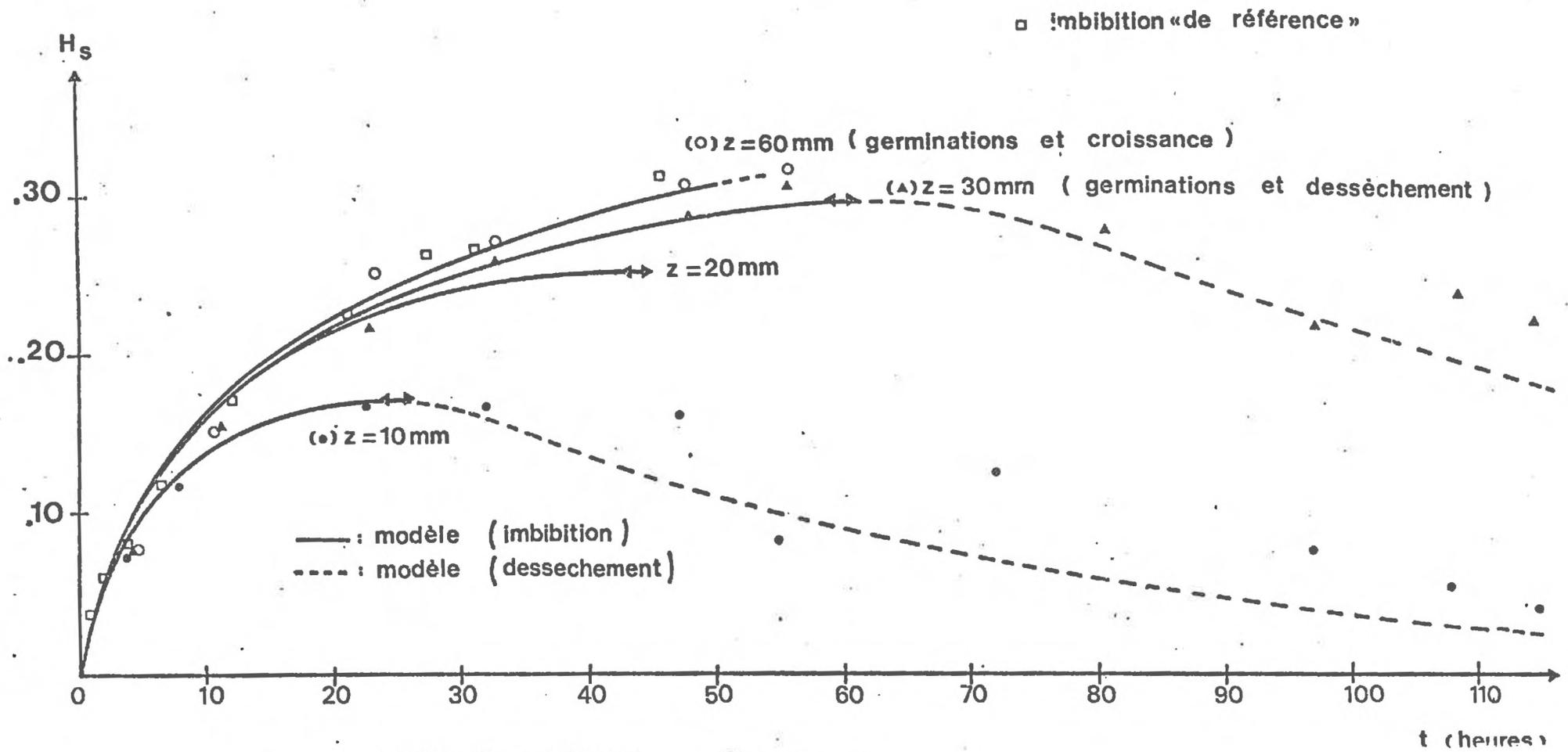


FIGURE 36 • Imbibition

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.

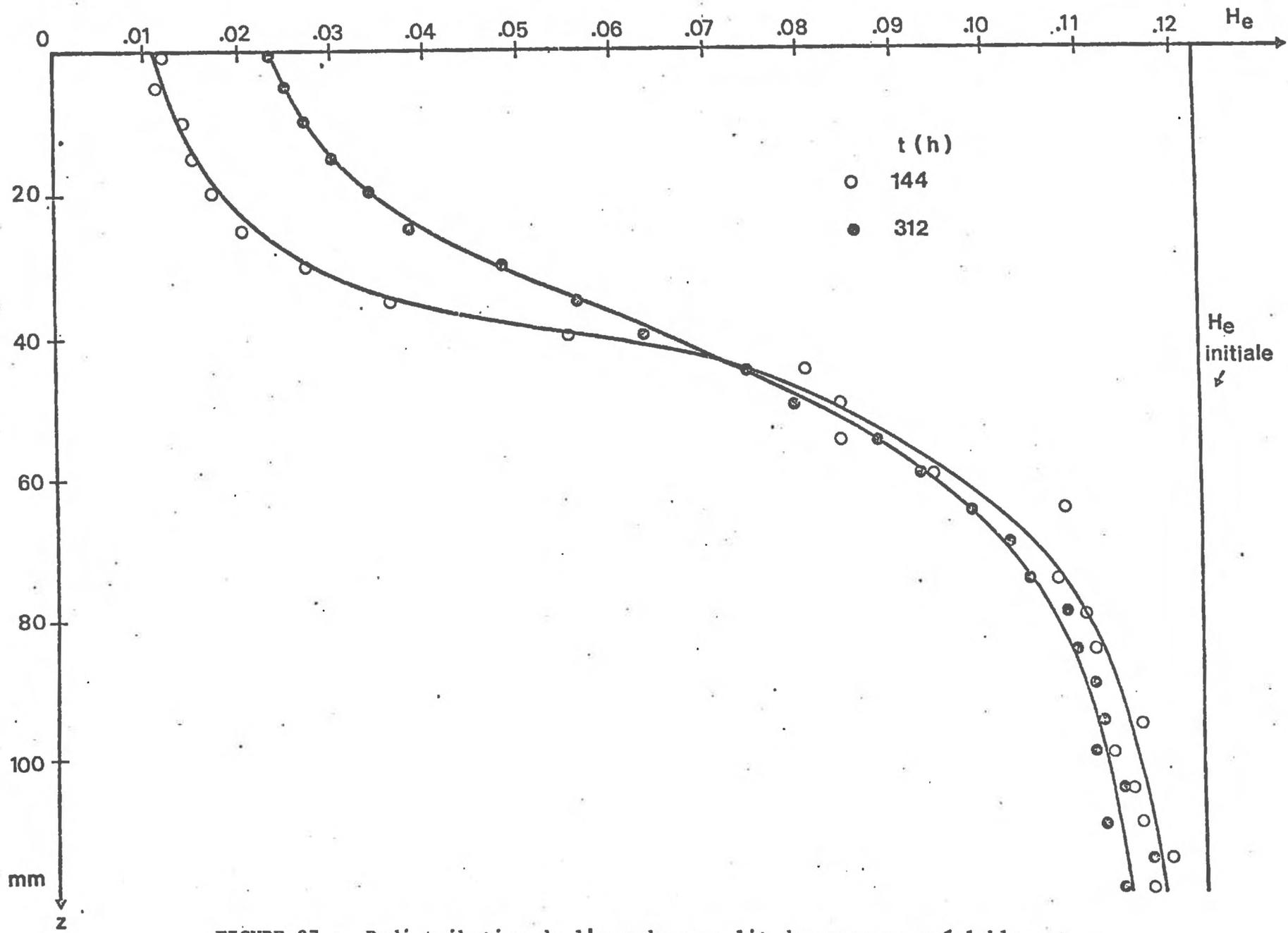


FIGURE 37 : Redistribution de l'eau dans un lit de semences préalablement desséché en surface.

* 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.

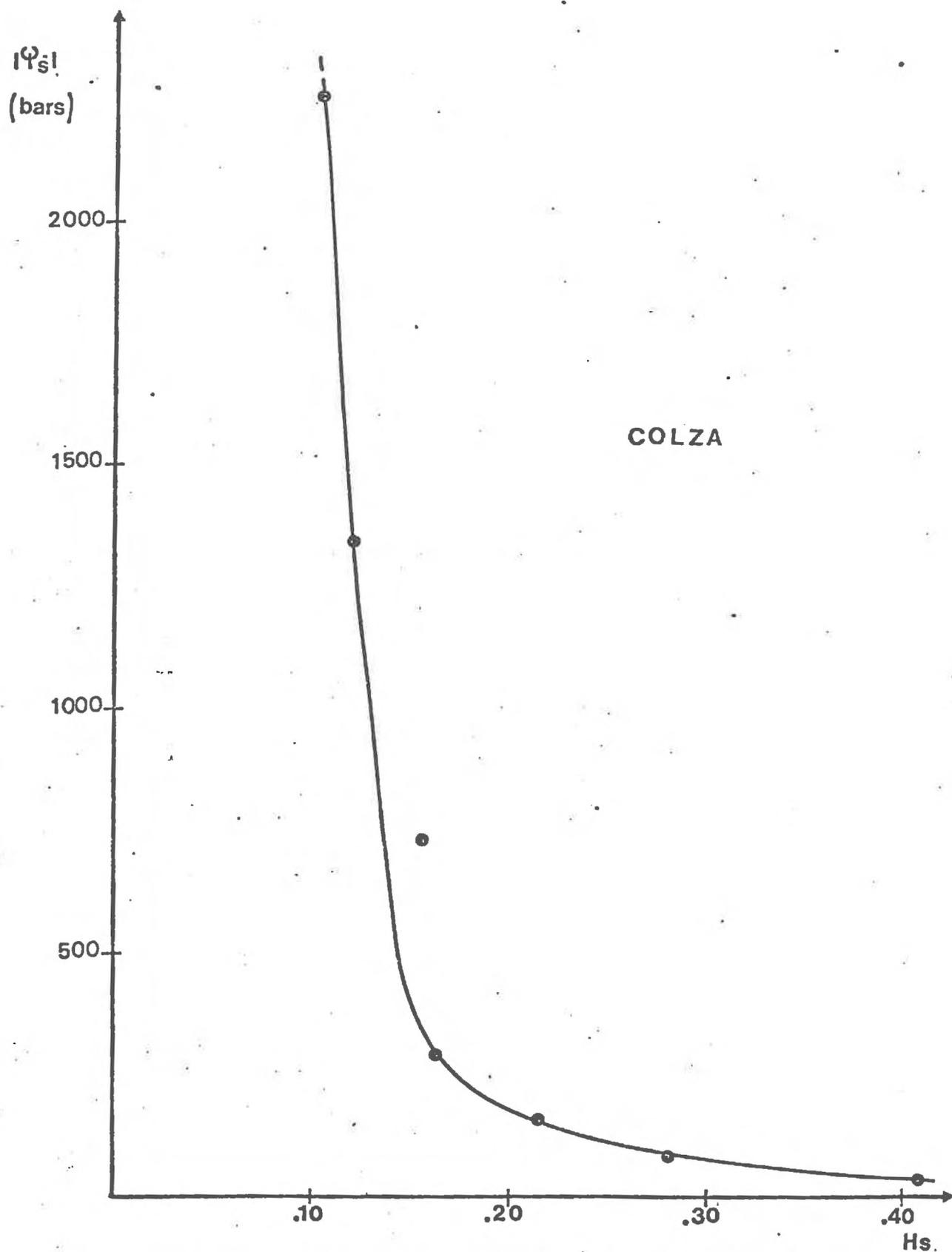


FIGURE 38 : Potentiel des semences de colza en fonction de leur teneur en eau (10 lots de 5 semences par point, $\sigma_{H_s} \leq 0,024$)

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.

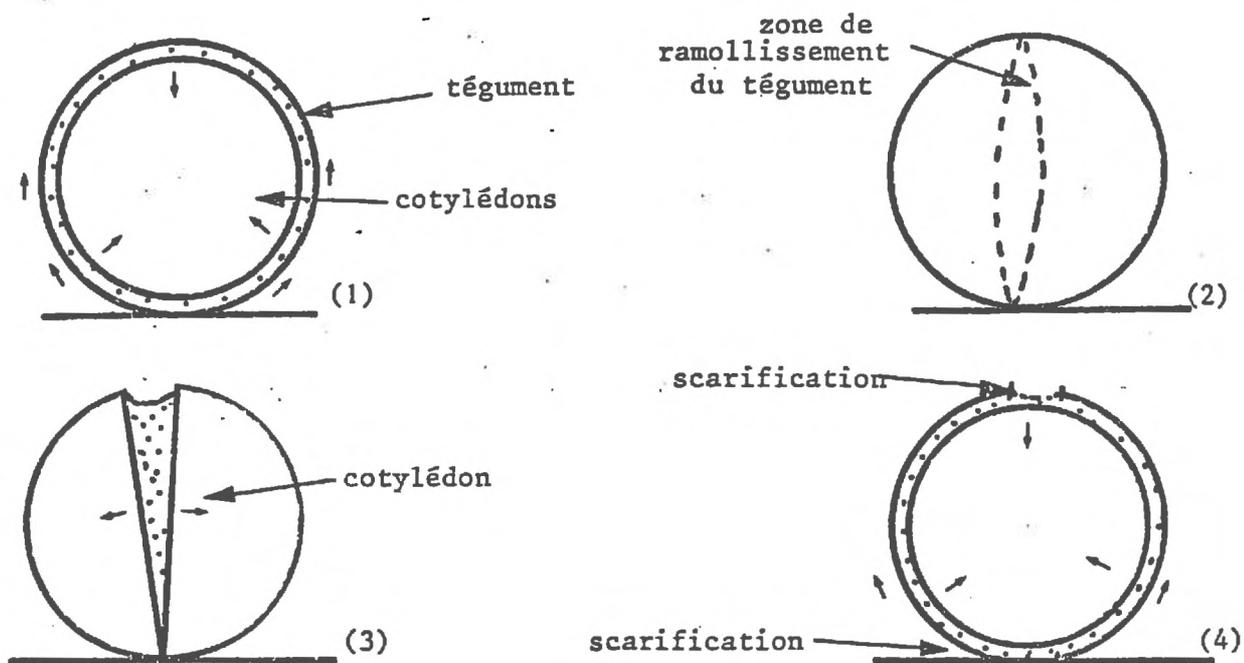
Le modèle proposé spécifie la variable S (surface d'imbibition). Rappelons que S est définie sur la paroi externe de la semence et que cette définition n'a de sens que s'il n'existe aucune discontinuité au sein du volume séminal. Les semences de maïs, ou de blé par exemple, présentent

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.

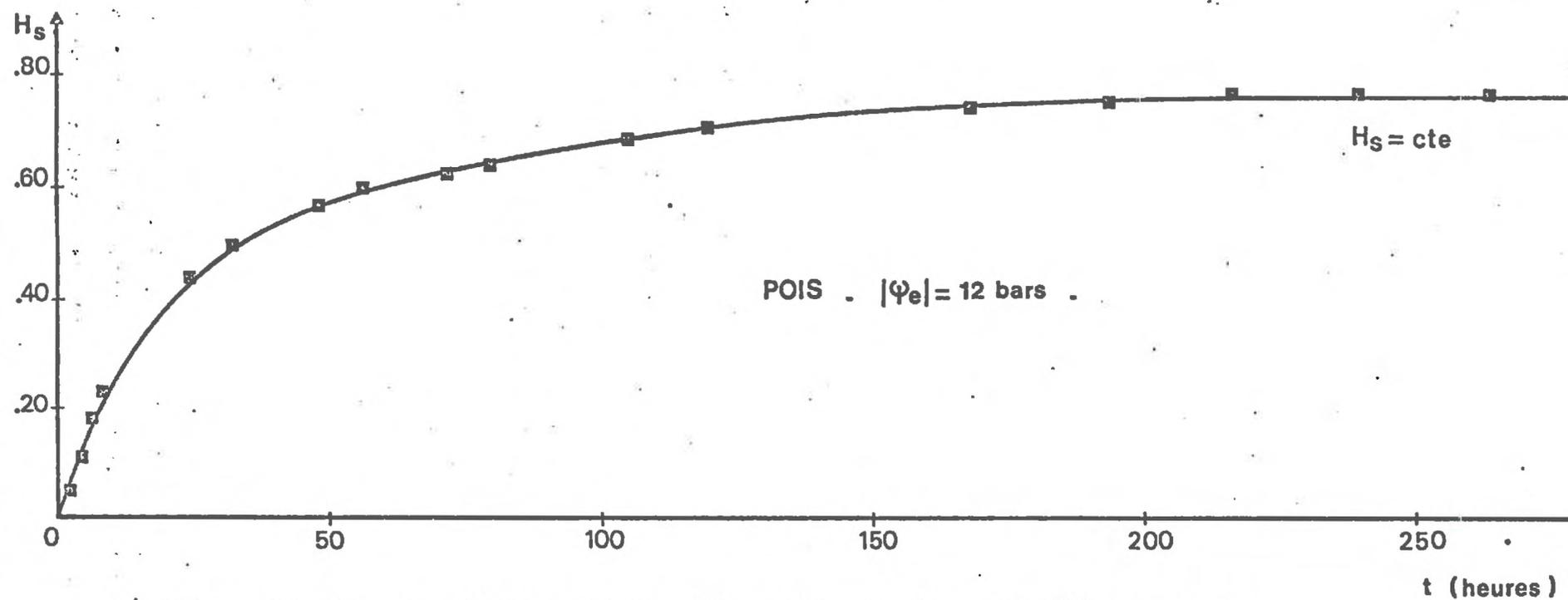
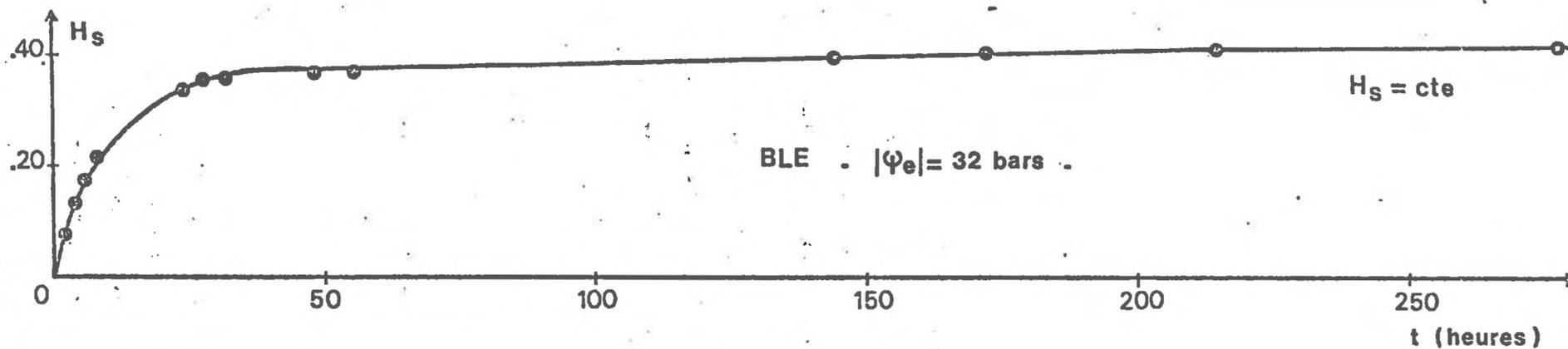
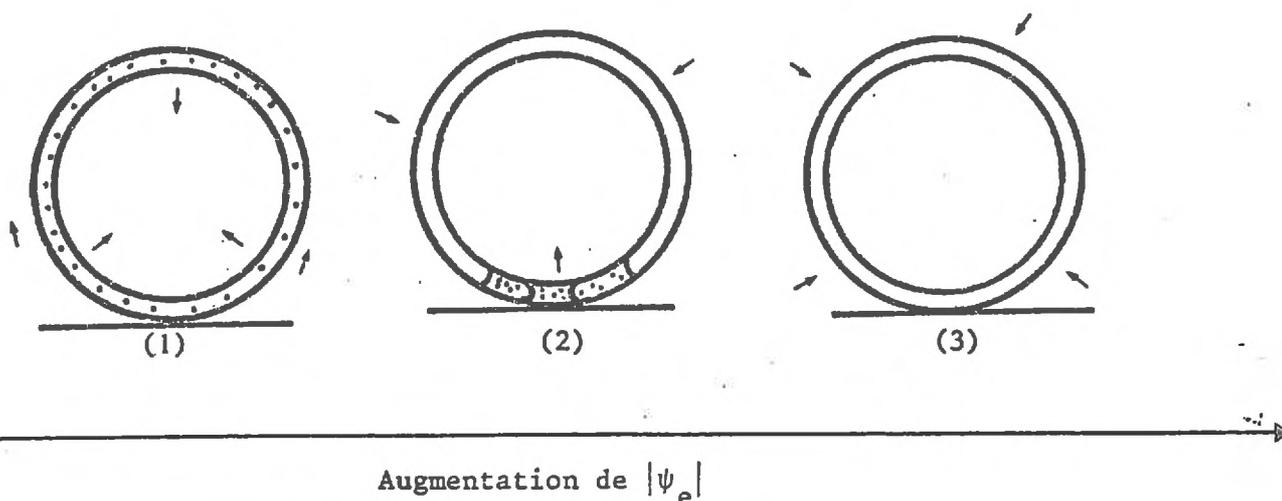


FIGURE 39 : Obtention de paliers hydriques (blé, pois) par mise en équilibre avec des solutions osmotiques -PEG 6000- (valeurs moyennes, $n = 30$)

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".

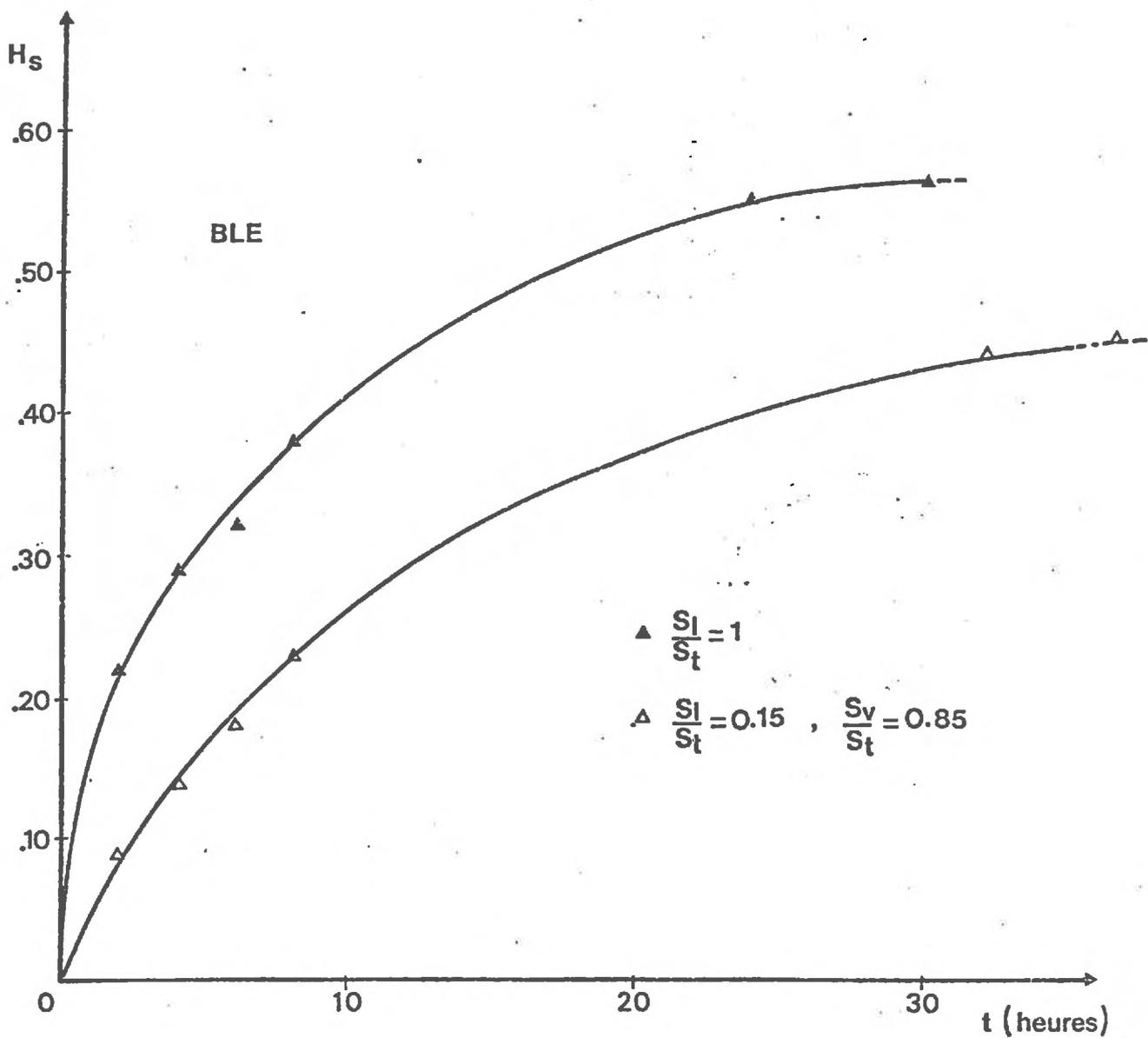


FIGURE 40 : Rôle du rapport $\frac{S_1}{S_t}$ sur la cinétique d'imbibition du blé.
 (valeurs moyennes, n = 10).

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 $F(r)dr : d\theta$

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

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

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

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

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

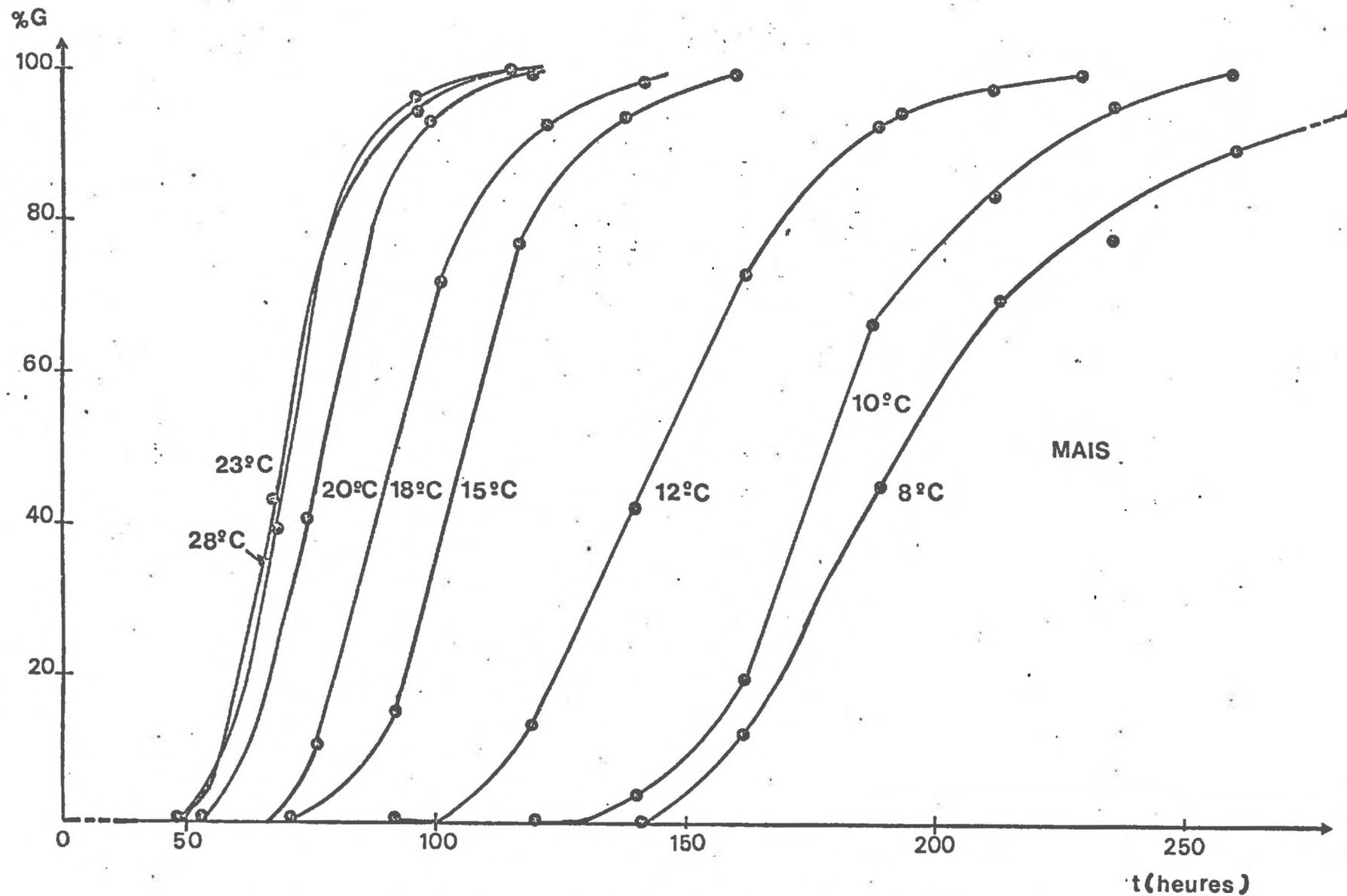


FIGURE A1 : Taux cumulés de germinations du Maïs en fonction du temps (lots de 200 semences).

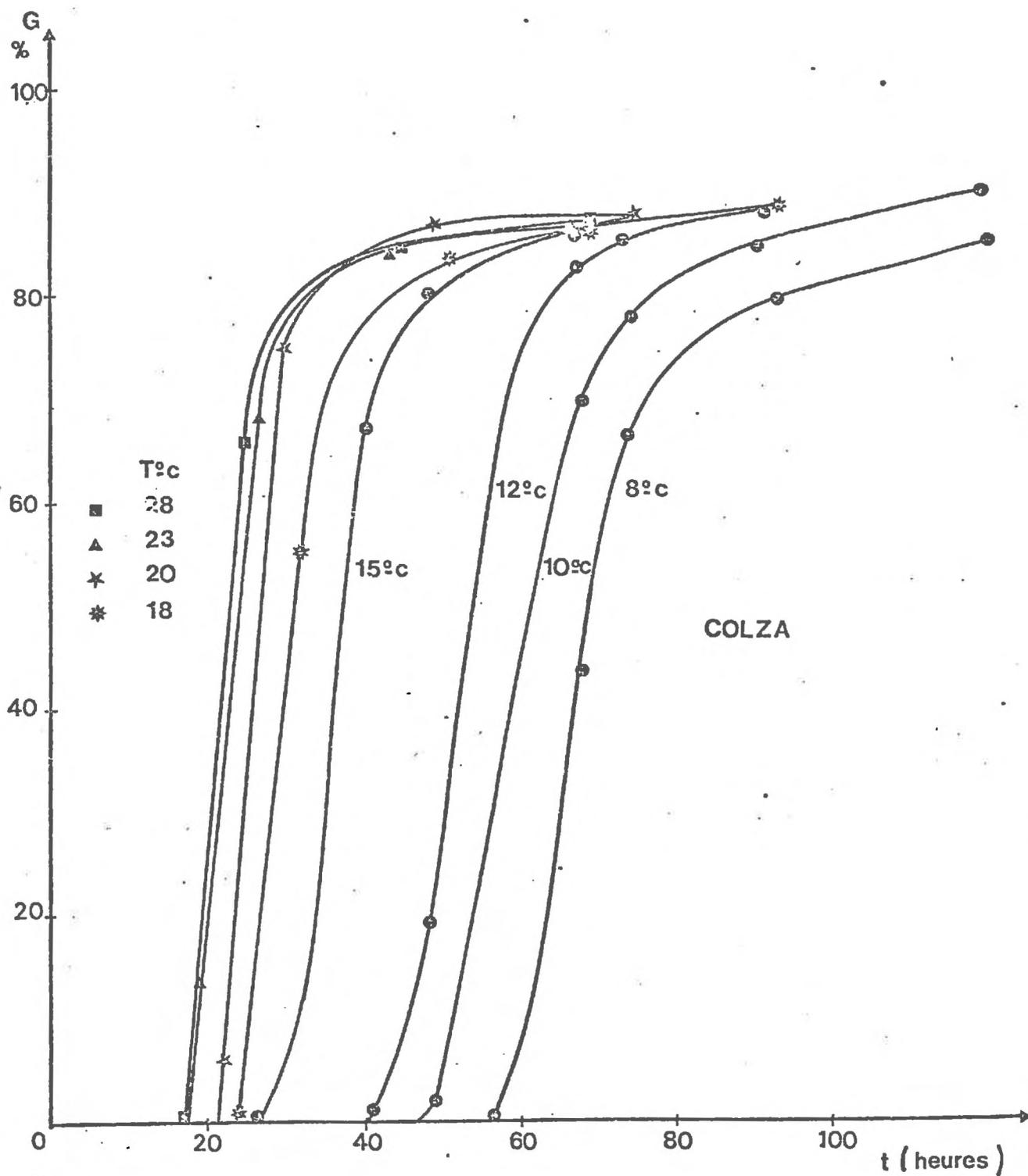


FIGURE A2 : Taux cumulés de germinations du colza en fonction du temps (lots de 200 semences).

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.

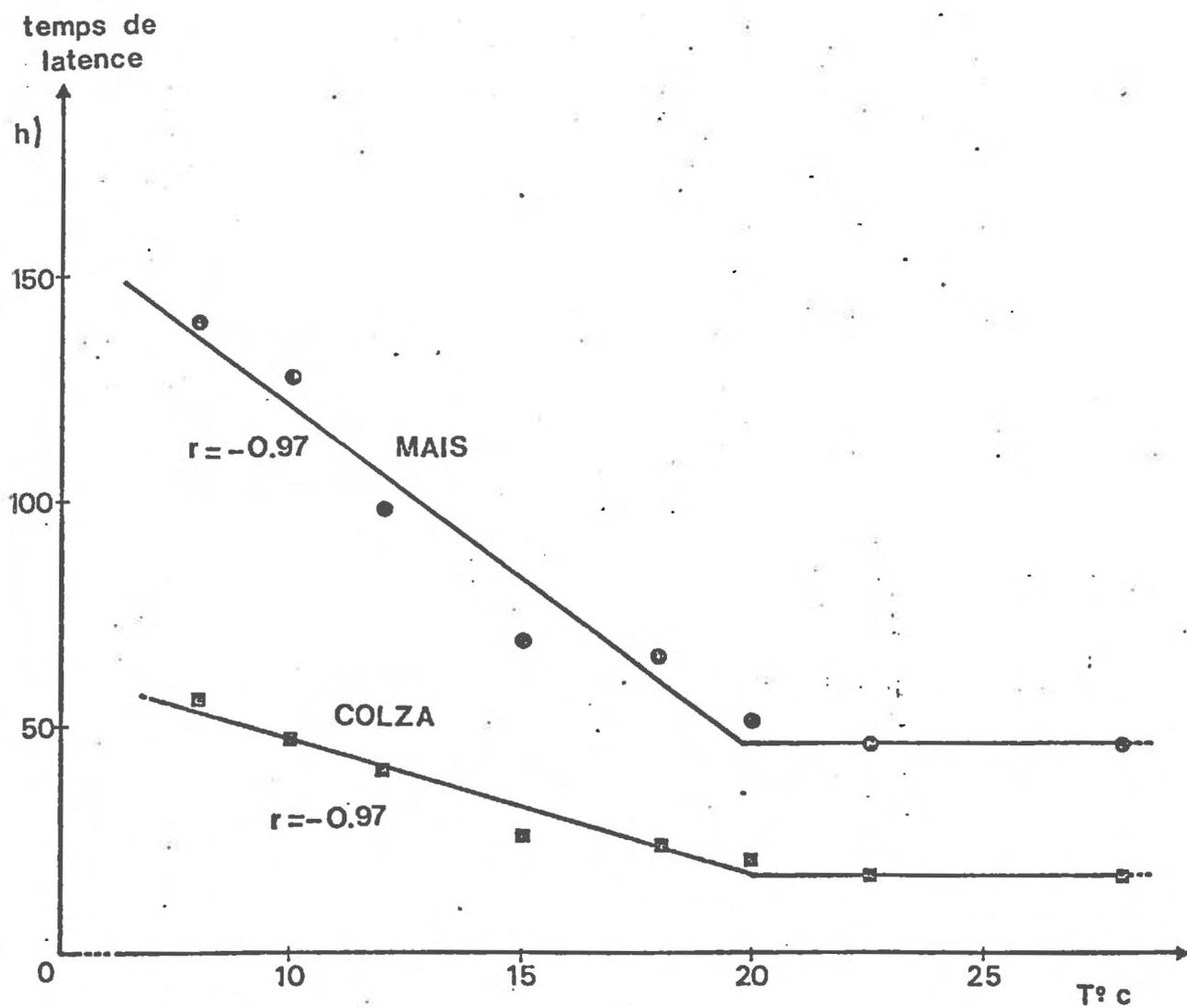


FIGURE A3 : Temps de latence en fonction de la température (Maïs et Colza)

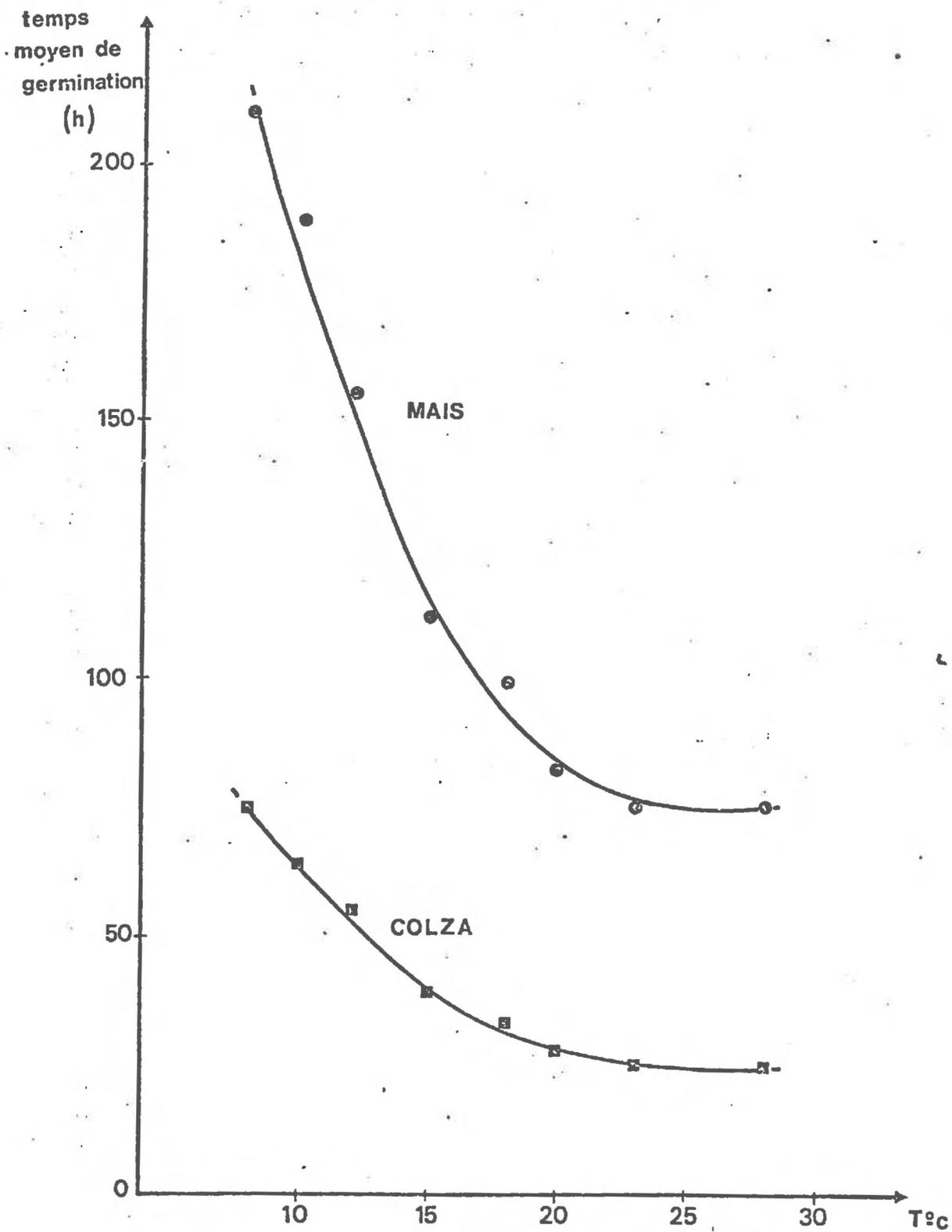


FIGURE A4 : Temps moyen de germination en fonction de la température (Maïs et Colza)

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 $(a_1 \text{ et } a_2)$ 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

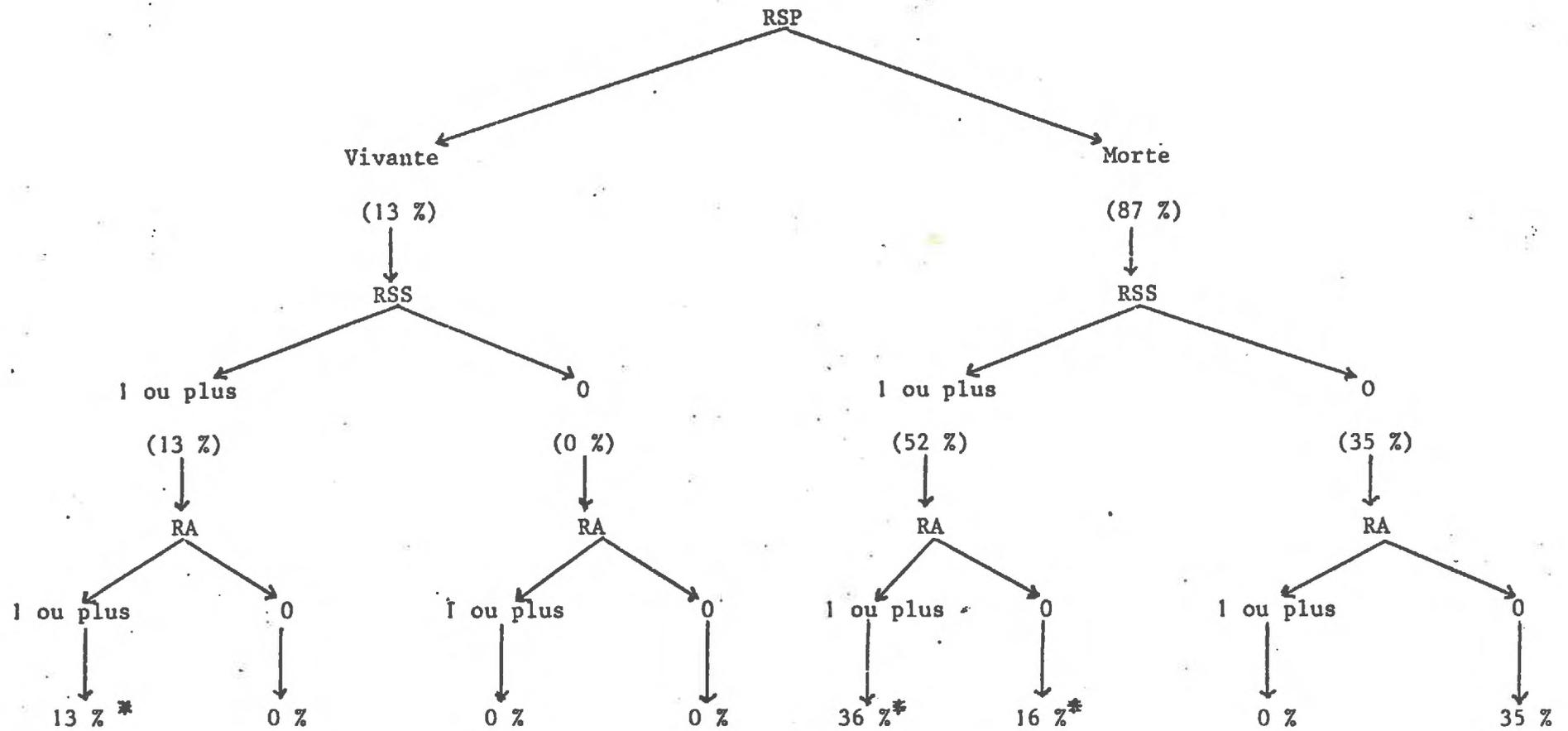
Au vue de ce tableau, une première germination suivi de dessèchement ne signifie pas l'absence de plantule après réimbibition, dans la mesure où des racines (RSS, RA) peuvent se différencier. Certaines semences conservent leur radicule intacte (RSP) tandis que la majorité (87 %) présente une radicule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

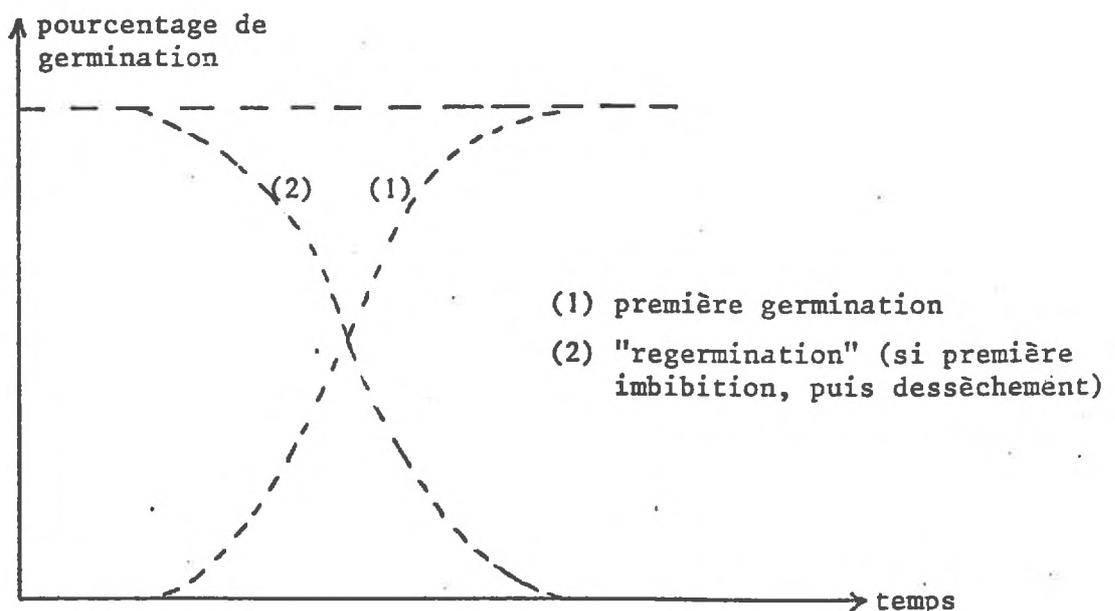


Figure A5 : Représentation schématique des taux de germination et de "regermination".

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 $^{241}\text{A}_m$ 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