



# Moyens de prevision et de controle du fonctionnement hydrique des couches de surface des sols nus ou faiblement couverts. Rapport final

Laurent Bruckler, . Dg 12

## ► To cite this version:

Laurent Bruckler, . Dg 12. Moyens de prevision et de controle du fonctionnement hydrique des couches de surface des sols nus ou faiblement couverts. Rapport final. CEE–TSD A 233, 1987. hal-02858019

**HAL Id: hal-02858019**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02858019>**

Submitted on 8 Jun 2020

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

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

CODE CEE : TSD A 233

CODE INRA : 4118 A

1er Juillet 1985 - 1er Juillet 1987

MOYENS DE PREVISION ET DE CONTROLE DU FONCTIONNEMENT  
HYDRIQUE DES COUCHES DE SURFACE DES SOLS NUS  
OU FAIBLEMENT COUVERTS

RAPPORT FINAL N° 4 (1er Janvier 1987 - 30 Juin 1987)

BRUCKLER, L.

## Introduction

La réussite de la mise en place du peuplement végétal est, en conditions méditerranéennes, fortement conditionnée par les réussites successives de la germination et de la levée des plantules. Ces deux phases (germination et levée) sont particulièrement sensibles aux variations, dans le temps, de la teneur en eau et de la température du lit de semences. Sur un plan physique, ces deux variables (teneur en eau, température), ne sont prévisibles assez finement qu'à l'aide de la modélisation complète du système physique "Sol/Atmosphère".

Le présent rapport se propose ainsi de répondre à deux objectifs distincts :

- d'une part, mettre au point et valider dans des conditions proches de la pratique agricole un modèle local de transferts couplés d'eau (en phases liquide et gazeuse) et de chaleur à l'interface "sol-atmosphère". Il s'agit donc de prévoir, dans le cas d'un sol nu ou faiblement couvert, d'une part les flux hydriques et thermiques à la surface du sol, d'autre part l'évolution des profils hydriques et thermiques au cours du temps dans les couches de surface du sol.
- d'autre part, en supposant les profils hydriques et thermiques d'un sol connus (mesurés ou estimés), mettre au point et valider "in situ" dans des conditions climatiques et techniques variées (Maroc) un modèle de prévision de la germination, de la levée et de l'enracinement précoce dans le cas du blé.

Ces deux objectifs distincts seront traités séparément, dans la mesure où ils correspondent à deux étapes méthodologiques bien différenciées sur le plan du travail scientifique.

### I. Modélisation des transferts couplés d'eau et de chaleur à l'interface Sol/Atmosphère.

#### 1. Bases physiques de la modélisation des transferts d'eau et de chaleur à l'interface "Sol-Atmosphère".

Les équations décrivant à l'échelle macroscopique les transferts couplés d'eau et de chaleur dans un sol partiellement saturé proviennent de la combinaison des lois élémentaires des transferts utilisées classiquement en physique du sol :

- a) loi de DARCY généralisé pour les transferts hydriques en phase liquide.
- b) loi de FICK pour les transferts hydriques en phase gazeuse.
- c) Loi de FOURRIER pour les transferts thermiques.

La combinaison mathématique de ces équations théoriques permet d'obtenir les relations décrivant les transferts couplés d'eau et de chaleur à l'échelle locale (ou spatiale si la parcelle est <sup>supposée</sup> homogène), sur un sol nu éventuellement stratifié. Pour décrire complètement les transferts d'eau et de chaleur dans le continuum "sol-atmosphère", les équations précédentes décrivant les mouvements de l'eau et de la chaleur dans le sol sont couplées à une modélisation de la couche limite de surface. Cette modélisation est fondée d'une part sur l'approche théorique de PRANDT qui permet de décrire les transferts de quantité de mouvement, de chaleur et de masse dans les basses couches de l'atmosphère, d'autre part sur le calcul du bilan radiatif à la surface du sol. Cette approche est actuellement utilisée classiquement en bioclimatologie.

Le modèle choisi, ainsi brièvement décrit, a été mis en oeuvre pour simuler le comportement thermique et hydrodynamique des couches superficielles du sol d'une parcelle expérimentale. Les équations, écrites pour des écoulements supposés unidirectionnels et verticaux, sont résolues par la méthode des éléments finis appliquée à des éléments linéaires allant de 0,2 mm près de la surface à 10 cm à la base du profil considéré (à 80 cm de profondeur). L'intégration dans le temps est réalisée avec un pas de temps variable ajusté automatiquement au cours du processus de calcul. A chaque pas de temps, les flux de surface sont calculés ainsi que les profils de teneur en eau et de température.

## 2. Expérimentation "in situ".

Le site expérimental choisi est constitué d'une parcelle de 1,1 ha sur sol nu, localisé sur le Centre INRA d'Avignon. La surface du sol est horizontale, et l'environnement immédiat de la parcelle comprend du sol nu, des cultures (céréales à l'épiaison, maraîchages) et des bâtiments. Pour limiter les effets advectifs dans la direction des vents dominants, (N  $\rightarrow$  S, S  $\rightarrow$  N), et se situer ainsi dans une zone à flux conservatif, un anneau de garde de 20 à 25 m délimite la parcelle expérimentale proprement dite où sont localisées les mesures. Celle-ci forme finalement une surface carrée de 0,36 ha (60 m x 60 m) située à l'intérieur de la parcelle de 1,1 ha. L'expérience a été réalisée après une forte période pluvieuse qui a dégradé l'état de surface recouvert d'une croûte de battance d'environ 5 mm d'épaisseur, fortement fissurée à l'état sec.

Au cours de la période d'étude, une irrigation a été effectuée par un ensemble d'asperseurs répartis régulièrement sur la parcelle et l'anneau de garde. Cette irrigation a induit une forte hétérogénéité des apports d'eau qui n'était d'ailleurs pas recherchée dans la conception du protocole expérimental.

Cinq sites de mesure ont été équipés chacun d'un tube d'accès pour humidimètre neutronique (de 0 à 80 cm) et de 5 tensiomètres aux profondeurs  $z = 15, 30, 45, 60$  et  $80$  cm. Douze sites de mesures ont été munis de sondes thermiques implantées horizontalement aux côtes  $z = 1, 2, 6, 11$  et  $26$  cm.

De plus, un mât a été installé au centre de la parcelle afin de mesurer (4 niveaux,  $z = 38, 54, 92$  et  $128$  cm) les profils de vent, de températures sèches et humides dans l'air. Les différentes composantes du rayonnement (solaire incident réfléchi, net) ont également été mesurées. Toutes ces informations, à l'exception des mesures neutroniques et tensiométriques (mesures journalières) ont été acquises automatiquement au pas demi-horaire.

Enfin, une analyse physique globale et préliminaire du site de mesures a été effectuée en 52 points de la parcelle expérimentale répartis de façon régulière sur une grille hexagonale centrée, la distance entre deux points adjacents étant de  $10$  m. Les variables mesurées en chacun de ces points sont :

- la composition granulométrique
- la masse volumique sèche.

L'analyse de ces deux variables permet ainsi de caractériser l'hétérogénéité constitutive de la parcelle. En ce qui concerne la composition granulométrique de la parcelle, la variabilité apparaît très faible. En ce qui concerne la masse volumique sèche, les valeurs obtenues sont très homogènes jusqu'à  $25$  cm ( $1,3$  g/cm<sup>3</sup>) aussi bien en profondeur que d'un site de mesure à l'autre. Des mesures complémentaires de masse volumique sèche de  $25$  à  $80$  cm de profondeur montrent que sur l'ensemble du profil considéré ( $0$  à  $80$  cm), le profil moyen de masse volumique sèche doit être schématisé par un système multicouches.

### 3. Estimation des paramètres du modèle.

Dans une première phase, l'expérimentation doit aboutir à la connaissance des principaux paramètres caractéristiques de la parcelle, aussi bien sur le plan hydrodynamique (transferts en phase liquide et gazeuse) que thermique.

3.1. Caractérisation hydrodynamique de la parcelle expérimentale : Relation entre la conductivité hydraulique du sol ( $K$ ) et la teneur en eau volumique ( $\theta$ ).

Les transferts d'eau liquide dans les sols reposent sur l'utilisation de la loi de Darcy généralisée en milieu non saturée, laquelle fait intervenir la conductivité hydraulique du sol, qui est une fonction fortement non linéaire de la teneur en eau.

L'estimation -et, a fortiori la prédiction- de ce coefficient de transfert est problème crucial en physique des transferts vis-à-vis duquel la physique du sol général n'a sans doute pas porté une attention suffisante dans la dernière décennie. La base actuelle de la modélisation proposée repose essentiellement sur les travaux de MUALEM (1976), Van GENUCHTEN (1981) qui proposent des modèles capillaires de prévision de la conductivité hydraulique. Ceux-ci donnent des résultats variés pour des sols ne présentant pas de porosité lacunaire de grande taille (porosité texturale uniquement) et sont mal adaptés aux sols réels présentant une structure plus complexe et plus hétérogène. De plus, la mesure même de la conductivité hydraulique repose souvent sur des approximations qui ne sont pas vérifiées dans une large gamme de situations. Partant de ce constat, notre travail s'est orienté dans plusieurs directions :

a) Mise au point de méthodes nouvelles de mesure de la conductivité hydraulique

On propose l'utilisation simultanée de la modélisation fine des transferts hydriques en utilisant la loi de Darcy et l'acquisition de données expérimentales simples et précises permettant de caler la fonction  $K(\theta)$ .

Ces données sont d'une part des flux (mesurés par une balance, en laboratoire) et d'autre part des potentiels matriciels (mesurés par tensiométrie en laboratoire).

Les premiers résultats obtenus sont encourageants dans la mesure où l'utilisation des méthodes de simulation et de calage permet de bien restituer les données expérimentales acquises. Malgré tout, nous pensons que des progrès restent à faire, notamment en ce qui concerne la forme même de la fonction  $K(\theta)$  ajustée dans les modèles. Pour cette raison, nous avons cherché à proposer de nouveaux modèles capillaires plus réalistes et donc plus performants.

b) Recherche de modèles capillaires de prédiction de  $K(\theta)$  performants

Les modèles capillaires qui cherchent à prédire la conductivité hydraulique  $K(\theta)$  utilisent tous, à la base même de leur conception, l'information donnée par la relation  $\psi(\theta)$  qui correspond à une description de la porosité du milieu. En conséquence, l'amélioration des modèles de prédiction de  $K(\theta)$  passe par l'amélioration des modèles de prédiction de  $\psi(\theta)$  : ces modèles semblent beaucoup plus réalistes que les modèles actuels. Il reste cependant à tester maintenant leur caractère opérationnel et leur adaptation à une large gamme de situations concrètes. Ces modèles, dans leur forme générale, sont des modèles "à palier" qui représentent en fait une distribution plurimodale de la porosité, propriété beaucoup plus générale que les

modèles habituels correspondant à une distribution unimodale de la porosité. Des travaux sont en cours sur ces problèmes et seront prolongés jusqu'à l'obtention d'une amélioration significative par rapport aux modèles actuels.

3.2. Caractérisation des transferts en phase gazeuse dans les sols :  
Estimation du coefficient de diffusion en phase gazeuse.

D'un point de vue théorique, dans le cas de transferts monodimensionnels, l'équation qui régit les transferts gazeux s'écrit de la façon suivante :

$$\epsilon \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ D_s \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \right] \quad (1)$$

où C représente la concentration du gaz transféré dans la phase gazeuse, t le temps, x les coordonnées sur un axe Ox monodimensionnel.  $\epsilon$  et  $D_s$  correspondent respectivement à la porosité du sol disponible pour les transferts et au coefficient de diffusion en phase gazeuse. Ces deux grandeurs constituent précisément les inconnues du problème qu'il faut estimer. Dans ce but, et en collaboration avec le S.I.A.E. (Scottish Institute of Agricultural Engineering), nous avons mis au point une cellule de mesure de diffusion gazeuse basée sur le principe d'utilisation de traceurs radioactifs. La résolution de l'équation (1) par des méthodes numériques avec calage simultané des coefficients  $\epsilon$ ,  $D_s$  sur les données expérimentales fournies par le traceur radioactif (Krypton<sup>85</sup>) permet alors d'obtenir des estimations  $\hat{\epsilon}$ ,  $\hat{D}_s$ . L'analyse théorique de la méthode de calcul employée a permis de préciser la qualité des estimations obtenues. De plus, les conditions optimales de mesure ont pu être définies par des études de simulation. Par rapport aux méthodes antérieurement utilisées, il nous semble que l'estimation simultanée de deux paramètres constitue un progrès méthodologique décisif. Enfin, la méthode proposée a pu être validée sur des échantillons tests pour lesquels la valeur des deux paramètres était connue.

En conclusion, la méthode d'estimation proposée est actuellement opérationnelle et fiable : la diffusion gazeuse dans les sols est réduite de 80 à 99 % par rapport à la diffusion gazeuse dans l'air, et la plus grande part de la porosité libre à l'air des sols fonctionne comme un milieu de transfert en phase gazeuse. Ces résultats peuvent être considérés comme décisifs pour améliorer la prévision des transferts de masse et de chaleur dans les sols.



### 3.3. Caractérisation thermique de la parcelle expérimentale

La caractérisation thermique de la parcelle "in situ" doit aboutir au calcul de la capacité calorifique de chaque horizon ( $C(\theta)$ ) et de la conductivité thermique apparente du sol en place ( $\lambda^*(\theta)$ ).

#### 3.3.1. Capacité calorifique ( $C(\theta)$ ).

Cette grandeur n'a pas fait l'objet de mesure directe : elle est estimée à partir des fractions volumiques de chaque constituant du sol (solide, liquide, gaz) et de la capacité calorifique volumique de chaque constituant (de VRIES, 1966).

$$C(\theta) = \sum_i x_{si} C_{si} + \theta C_w + (n - \theta) C_a$$

$x_{si}$  : fraction volumique du constituant "i" de solide

$\theta$  : teneur en eau volumique

$n$  : porosité totale

$C_{si}$ ,  $C_w$ ,  $C_a$  : capacité calorifique volumique de chaque constituant de solide, de l'eau et de la phase gazeuse.

#### 3.3.2. Conductivité thermique ( $\lambda^*(\theta)$ ).

La mesure de la diffusivité thermique "in situ"  $\alpha(\theta)$  à partir de mesures de températures du sol à différentes profondeurs (1, 2, 6, 11, 26 cm) et de profils obtenus par prélèvements permet d'estimer la conductivité thermique  $\lambda^*(\theta)$  selon la relation :

$$\lambda^*(\theta) = \alpha(\theta) \cdot C(\theta)$$

L'estimation de la diffusivité thermique "in situ" a fait l'objet d'une étude méthodologique approfondie portant sur les différentes méthodes employées classiquement. Dans tous les cas, l'hypothèse de base suppose la validité de l'équation de conduction thermique linéaire. A partir de l'évolution connue de la température à un niveau, le principe consiste à générer pour différentes valeurs de diffusivité thermique la température du sol à un deuxième niveau que l'on cale au mieux sur les mesures.

Trois méthodes sont plus ou moins classiquement utilisées :

- la méthode du stock thermique qui est l'analogue, dans le domaine thermique, à la méthode du bilan hydrique. Il est dans ce cas nécessaire de bien



connaître le flux thermique à une cote donnée (flux-mètre) ou de déterminer à chaque instant la cote du plan de flux nul thermique.

- la méthode numérique fondée sur la résolution de l'équation de conduction par une technique numérique classique. Dans ce cas,  $\alpha$  est considérée comme constante sur une couche de sol et il faut bien connaître les conditions aux limites supérieure et inférieure de la couche considérée (3 cotes de mesure au minimum).
- la méthode harmonique, fondée sur la décomposition en série de FOURRIER de la température à une profondeur donnée. Dans ce cas, l'hypothèse relativement forte introduite suppose l'existence d'un régime périodique établi et l'estimation se fait sur une période de 24 heures.

De plus, des comparaisons entre les estimations de la conductivité thermique obtenues "in situ" et en laboratoire ont été effectuées. Dans ce dernier cas, le conductivimètre employé est un cylindre métallique contenant du sol et passant d'une température d'équilibre  $T_1$  à une température  $T_2$ .

L'estimation est faite par résolution de l'équation de conduction thermique dans le cylindre en régime transitoire par la méthode des éléments finis (BRUCKLER et al., 1987). Le calage de  $\lambda^*(\theta)$  est effectué sur l'évolution de la température mesurée au cours du temps au centre de la cellule.

D'une façon générale, les résultats expérimentaux montrent qu'il y a une concordance satisfaisante dans les estimations des valeurs moyennes de conductivité thermique entre les différentes méthodes utilisées "in situ" ou en laboratoire. Par contre, on constate que le modèle de DE VRIES fournit une estimation systématiquement plus élevée de la conductivité thermique (50 à 100 %) sur tout le domaine de teneur en eau. Les mêmes remarques peuvent être faites pour le modèle de JOHANSEN (1975).

Au total, pour la couche 0,5 cm à 30 cm, les méthodes d'estimation utilisées "in situ" et en laboratoire donnent des estimations convergentes de la relation  $\lambda^*(\theta)$ , qui est ainsi connue avec une précision satisfaisante. Par contre, il est très douteux de pouvoir utiliser un modèle du type de celui proposé par DE VRIES pour un sol quelconque dans une optique prévisionnelle, sans une vérification expérimentale et un paramètre de calage.

### 3.4. Caractérisation de la surface du sol.

A partir des mesures atmosphériques, il faut également déterminer les paramètres de la surface du sol nécessaires à la modélisation, à savoir l'albedo et la

longueur de rugosité caractéristique de la surface. L'albedo est estimée à partir des mesures de rayonnement global incident et réfléchi. On peut ainsi mettre en évidence le rôle de la teneur en eau superficielle sur la valeur de l'albedo. La longueur de rugosité est estimée à partir de l'analyse des profils de vent.

4. Validation du modèle : Comparaison avec les données expérimentales in situ.

La période totale de l'expérimentation "in situ" (7 jours) est scindée en deux phases :

- une première phase de 3 jours, dite phase de calage,
- une deuxième phase de 4 jours, dite phase de validation.

La phase de calage a ainsi permis de montrer l'inadéquation du modèle de MUALEM pour la prévision de la conductivité hydraulique et une nouvelle relation  $K(\theta)$  a dû être obtenue par calage. C'est cette nouvelle relation qui est alors testée au cours de la phase de validation.

En ce qui concerne la prévision des profils hydriques des couches de surface, on constate que, après calage, la simulation donne des résultats assez conformes à l'expérience. Ainsi, les écarts entre teneurs en eau volumiques calculées et observées sont de 0,01 à 0,02  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$  sur une gamme de 0 à 0,30  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ . De plus, il n'y a pas de dégradation de la qualité de la simulation sur toute la période de validation.

En ce qui concerne l'évolution thermique, la variation de la température au cours du temps est proche de celle mesurée. A 1 cm de profondeur, les écarts maximums entre températures calculées et mesurées sont de l'ordre de 2°C à 3°C sur une gamme de 15 à 35°C et la forme générale de l'évolution thermique est bien reconstituée. Enfin, la comparaison des flux hydriques calculés et mesurés est très bonne sur toute la période quelle que soit la méthode d'estimation des flux de chaleur latente "in situ".

Au total, la modélisation semble satisfaisante dans l'ensemble et le couplage physique entre les transferts hydriques et thermiques est bien restitué. Malgré tout, à la suite de ce travail expérimental et théorique, il semble utile de faire quelques restrictions :

1. Sur le plan de la validation de la modélisation proposée, il apparaît finalement très risqué d'utiliser sans vérification expérimentale stricte des modèles préliminaires d'estimations de paramètres :

- ce point a été vérifié en ce qui concerne les transferts thermiques (différence entre les modèles proposés et les mesures in situ ou en laboratoire).

- ce point n'a pas été vérifié de façon rigoureuse pour les transferts hydriques, mais l'analyse des résultats semble converger pour mettre en évidence le rôle crucial de l'estimation de  $K(\theta)$  notamment.

2. Il en découle que, sur le plan expérimental, une caractérisation physique fine et complète est à l'heure actuelle indispensable pour tester convenablement une modélisation de type mécaniste pour les transferts couplés de masse et de chaleur.
3. En corollaire, il faut admettre que ces modèles à l'heure actuelle ne peuvent être considérés comme prévisionnels : la prévision ne semble envisageable que pour un site expérimental particulier et physiquement très bien caractérisé.

## II. Modélisation de la germination, de la levée et de l'enracinement précoce du blé en conditions sèches

### 1. Imbibition et germination des semences

Un modèle d'imbibition des semences mis au point antérieurement dans le cas du Maïs en conditions sèches (BRUCKLER, 1983) a été adapté au cas du Blé. Ce modèle prévoit la cinétique d'imbibition de la semence -et donc, la date de germination- à partir des caractéristiques physiques du sol et de la semence.

La modélisation physique et mathématique de l'imbibition des semences de blé se révèle être très satisfaisante puisqu'elle permet de prévoir simultanément la possibilité de germination d'une part, la cinétique d'imbibition de la semence d'autre part. Cette modélisation repose sur trois concepts principaux :

- l'imbibition de la semence en phase liquide,
- l'imbibition de la semence en phase gazeuse,
- l'existence d'un potentiel critique de la semence au-dessous duquel la germination est impossible.

Ces différents phénomènes ont pu être mis en évidence expérimentalement et on montre ainsi que l'imbibition en phase gazeuse est beaucoup plus lente qu'en phase liquide, et que le potentiel critique pour la germination du blé est situé à -20 bar environ.

La connaissance préliminaire des caractéristiques hydrodynamiques (relation pression effective de l'eau/teneur en eau volumique) et structurales (analyse du système de porosité) du sol permet donc de faire un pronostic sur la vitesse et le taux final de germination attendus. Cette phase est tout à fait essentielle puisque la réussite de la levée passe nécessairement par la réussite de la germination. ...

## 2. Croissance aérienne et racinaire précoce

La croissance racinaire et ses relations avec l'état physique du milieu joue un rôle déterminant sur la vitesse de la levée et sur son homogénéité. Différents travaux ont été entrepris pour décrire les relations entre croissance racinaire et état physique du milieu.

Pour la croissance racinaire, le potentiel hydrique de l'eau du sol pour des valeurs inférieures à -15 à -20 bar, ainsi que les conditions d'aération et d'oxygénation des racines (valeurs limites de la porosité structurale libre à l'air et/ou de l'indice des vides structuraux) constituent les principaux facteurs limitants de la croissance racinaire.

Pour la croissance aérienne, ce sont surtout les obstacles mécaniques superficiels (mottes, croûtes superficielles) en relation étroite avec la position des semences dans le profil qui conditionnent la réussite de l'émergence.

En ce qui concerne l'analyse précise en laboratoire de ces différents facteurs limitants, les principaux résultats obtenus sont les suivants :

- a) On a pu montrer qu'au cours du phénomène de croissance du coléoptile aboutissant à l'émergence, les réserves de la graine ne pouvaient pas jouer un rôle limitant vis-à-vis de la croissance. Au cours des opérations de semis, il n'y a donc pas à privilégier en premier lieu des critères tels que le poids moyen de la semence.
- b) On a obtenu des lois générales de croissance aérienne et racinaire en fonction du temps, du potentiel hydrique de l'eau du sol, et de la température. Ces lois sont obtenues sur la base de mesures expérimentales dans des situations contrastées et par utilisation de méthodes d'estimations non linéaires des paramètres. De plus, on a sélectionné pour chaque type de racine générée au cours du temps par une plantule de blé après germination une loi de croissance caractéristique.

c) En ce qui concerne l'analyse des obstacles mécaniques à l'émergence, il apparaît que le coléoptile du blé après germination est capable d'exercer des forces verticales de l'ordre de 30 gf, mais avec une grande variabilité d'une semence à l'autre (10 à 50 gf). La comparaison de ces forces maximales exercées avec la distribution de la taille et du poids des mottes en surface permet alors de faire un pronostic sur la possibilité d'émergence des semences. On voit donc apparaître ici la mise en relation directe d'une caractéristique physiologique de la plantule avec un état structural de surface qui dépend directement des techniques de semis choisies et du climat.

En ce qui concerne les expérimentations "in situ", des essais comparatifs de levée et de croissance précoce ont été réalisés in situ, en France et au Maroc, dans des conditions proches de la pratique agricole. L'analyse statistique multivariée permet de sélectionner des groupes d'états physiques qui correspondent bien aux résultats obtenus en laboratoire. Dans l'ensemble, les gammes de densité rencontrées ne sont pas limitantes et la teneur en eau du sol joue un rôle déterminant sur la cinétique de levée et sur son homogénéité.

### 3. Modélisation de la levée.

L'ensemble de ces résultats analytiques étant obtenus indépendamment les uns des autres, nous avons cherché à regrouper l'ensemble de ces informations dans un modèle prévisionnel de levée, à partir du semis. En combinant ainsi les lois analytiques obtenues, nous avons proposé un montage prenant en compte l'évolution hydrique et thermique du profil, la position des semences dans le lit de semences, la croissance aérienne et racinaire et les obstacles à l'émergence.

La modélisation de la levée, devant déboucher sur la prévision, correspond ainsi à une approximation physique et mathématique du système biologique considéré. En entrée du modèle sont fournies :

- des informations sur l'état hydrique (potentiel hydrique, teneur en eau), thermique (température de l'air) et structural du lit de semence (distribution de la taille des mottes en surface),
- des informations sur la position des graines dans le lit de semences, résultant du mode technique de semis choisi (semoir ou semis à la volée),
- des lois générales relatives à l'imbibition des semences et à la croissance aérienne et racinaire définies plus haut.

Le modèle choisi est un modèle dynamique dans lequel le temps est discrétisé en pas de temps successifs. A chaque pas de temps sont calculés les différentes caractéristiques des plantules : germination, croissance des différents types de racines, enfoncement du front racinaire, longueur totale des racines générée, croissance aérienne, cinétiques finales de germination et d'émergence.

La validation porte sur deux expérimentations "in situ" réalisées au Maroc. Les résultats obtenus sont dans l'ensemble très satisfaisants puisque les taux finaux, les temps de début et de fin de levée sont bien estimés. La forme générale de la cinétique de levée est bien reconstituée, bien que le modèle surestime légèrement la cinétique de levée en fin de période de levée. Ceci peut être aussi bien lié aux caractéristiques physiologiques des plantules qui émergent les dernières (faible vigueur) qu'à une prise en compte insuffisante des obstacles à l'émergence qui sont en général très complexes à analyser finement.

De même, les profondeurs maximales d'enracinement sont conformes aux mesures effectuées "in situ".

En partant de ces résultats acquis, une typologie a été simulée sur modèle afin de prendre en compte les effets interactifs "climat/état structural/technique de semis" sur les taux et les cinétiques de levée finaux. Entre les situations les plus favorables et les plus défavorables, les décalages de levée peuvent atteindre 15 à 20 jours d'une situation à l'autre et les taux de levée s'étalent entre 40 % et 100 %. Ceci confirme bien le poids crucial de la réussite de la levée en conditions sèches sur l'implantation du peuplement et l'élaboration du rendement de la culture.

### Conclusion

Dans l'ensemble, le bilan de cette action apparaît largement positif dans la mesure où des progrès significatifs ont été obtenus tant en ce qui concerne le domaine de la physique du sol que de l'agronomie.

- i/ Dans le domaine de la physique du sol, deux types de progrès significatifs ont été obtenus : d'une part, le problème crucial de la détermination des coefficients de transfert dans le sol a été abordé et des progrès méthodologiques importants ont été obtenus en laboratoire ou in situ pour l'estimation de la conductivité thermique, du coefficient de diffusion en phase gazeuse et de la conductivité hydraulique en milieu non saturé. Ces progrès ont été obtenus en combinant des techniques de laboratoires précises (traceurs radioactifs par exemple) et des techniques de calcul numérique performantes. D'autre part, le couplage des transferts d'eau et de chaleur a été réalisé et



validé au cours d'une expérimentation réalisée dans des conditions proches de la pratique agricole. L'utilisation d'un tel modèle ouvre ainsi une voie quantitative à l'analyse des relations complexes sol/climat.

- ii/ Dans le domaine de l'agronomie, l'approche expérimentale et modélisée de la prévision de la levée s'est révélée constructive : les paramètres physiques déterminant les différentes étapes de la levée sont clairement établis aussi bien en laboratoire qu'in situ, dans une large gamme de conditions climatiques de type méditerranéen où l'eau est le premier facteur limitant.

L'analyse physique du processus biologique de la levée s'avère importante et fructueuse à plusieurs égards :

- Elle permet de s'affranchir, relativement, d'une conception classiquement purement physiologique qui s'intéresse plus aux mécanismes d'actions qu'à l'analyse des facteurs mis en jeu pour obtenir tel ou tel résultat agronomique.
- Elle permet d'utiliser et d'appliquer des concepts classiques en physique du sol à des systèmes biologiques particuliers (semences, racines).
- Par la modélisation, elle permet de prévoir et d'optimiser les résultats et les conséquences de telle ou telle action technique. On peut ainsi, par exemple, simuler sur modèle l'impact des techniques de préparation du lit de semence et des techniques de semis (araire et semis à la volée au Maroc), sur la réussite de la levée, son homogénéité dans l'espace et dans le temps, finalement, ses conséquences prévisibles sur le rendement.