



Géotextiles et végétalisation : étude et modélisation des conditions microclimatiques au voisinage du sol et de leur influence sur les espèces semées

V. Magnin

► To cite this version:

V. Magnin. Géotextiles et végétalisation : étude et modélisation des conditions microclimatiques au voisinage du sol et de leur influence sur les espèces semées. Sciences de l'environnement. Doctorat spécialité : terre univers environnement, INPG de Grenoble, 2003. Français. NNT : . tel-02581768

HAL Id: tel-02581768

<https://hal.inrae.fr/tel-02581768>

Submitted on 14 May 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.

THÈSE

Pour obtenir le grade de
DOCTEUR DE L'INPG

Spécialité : « Terre, Univers, Environnement »

Préparée au sein du Cemagref
dans le cadre de **l'École Doctorale « Mécanique des Milieux géophysiques et
environnement »**

Présentée et soutenue publiquement

par

Véronique MAGNIN

le 06 octobre 2003

GÉOTEXTILES ET VÉGÉTALISATION :
ÉTUDE ET MODÉLISATION DES CONDITIONS MICRO CLIMATIQUES AU
VOISINAGE DU SOL ET DE LEUR INFLUENCE SUR UNE ESPÈCE SEMÉE

Directeur de thèse : M. Jean-Paul Laurent

JURY

M. Pierre Foray	Président
Mme. Anne-Véronique Auzet	Rapporteur
M. Gérard Blake	Rapporteur
M. Patrick Ravanel	Rapporteur
M. Jean-Paul Laurent	Directeur de thèse
M. Alain Bédécarrats	Co-encadrant
M. Michel Vauclin	Examineur

AVANT-PROPOS

Les travaux qui ont fait l'objet de ce mémoire se sont déroulés dans le cadre initial d'un contrat CIFRE impliquant trois partenaires : la société PRODIREG qui a bénéficié d'une aide de l'Association Nationale pour la Recherche Technique (ANRT) et dont l'activité était centrée sur les géotextiles et leur application sur site ainsi que deux laboratoires : le LTHE (Laboratoire des Transferts en Hydrologie et Environnement) et le Cemagref (Recherche pour l'Ingénierie de l'Environnement). Ce dernier a aussi été mon laboratoire d'accueil. J'ai plus précisément été accueillie au sein du laboratoire « Végétalisation d'espaces érodés ». Au début de ma troisième année de thèse, la société PRODIREG a déposé son bilan. Cette thèse s'est dès lors poursuivie et achevée sans financement.

Je tiens tout d'abord à exprimer ma vive gratitude aux différents membres du jury :

M. P. FORAY, Professeur de l'INPG pour s'être intéressé à mon sujet en acceptant la présidence de ce jury.

Mme A-V AUZET, Chargé de recherche au CNRS, pour avoir accepté de "rapporter" sur ce travail ainsi que de se déplacer de Strasbourg pour participer à ce jury.

M. G. BLAKE, Professeur de l'Université de Savoie, pour avoir accepté malgré une demande tardive de faire partie de ce jury en tant que rapporteur et pour sa lecture attentive.

M. P. RAVANEL, Professeur de l'UJF, pour l'intérêt qu'il a manifesté lors de la lecture de ce manuscrit et pour les remarques dont il m'a fait bénéficier.

M. M. VAUCLIN, Directeur de recherche au CNRS, pour avoir trouvé le temps de s'intéresser à mon sujet de thèse. Qu'il sache que je lui en suis très reconnaissante.

Cette page me donne aussi l'occasion de remercier tous ceux dont je suis heureuse d'avoir fait la connaissance pendant les années de ma thèse. Je commencerai par :

M. J.P. LAURENT, Chargé de recherche au CNRS que je remercie pour avoir accepté d'être le directeur de ma thèse mais aussi pour sa parole qui est sûre, pour son professionnalisme et son efficacité qui ont facilité l'exercice de correction de mon mémoire.

M. A. BEDECARRATS, Chargé de recherche au Cemagref que je remercie d'avoir accepté la co-direction de ma thèse. Son aide et son soutien m'ont été précieux. Je me souviendrai aussi des conversations qui ont ponctuées mon travail au quotidien.

Mme F. DINGER, responsable du laboratoire « Végétalisation d'espaces érodés » au Cemagref pour avoir mis à ma disposition les moyens nécessaires à la réalisation de ma thèse et pour avoir levé les obstacles administratifs me permettant d'achever mon travail dans les meilleurs conditions au Cemagref.

Mme B. BOISSEAU, responsable de l'unité « Ecosystèmes et paysages montagnards » qui a aussi permis l'achèvement de mon travail au sein du Cemagref.

Un grand merci à :

M. J.M. TAUNIER, collaborateur technique au LTHE qui n'a pas compté ses heures pendant l'étape de construction du dispositif expérimental, pour son implication et son sérieux. Ce travail lui doit beaucoup.

M. J.J. BRUN, responsable du laboratoire « Ecologie spatiale et Fonctionnelle » au Cemagref pour sa sympathie tout d'abord et pour avoir mis à ma disposition un dispositif performant d'analyse d'image et M. B. JUVY pour son aide.

M. J.P. PELTIER, Maître de Conférence à l'UJF et M. J.M. LAPETITE, collaborateur technique au LTHE qui m'ont fort gracieusement prêté du matériel : une ampoule de Scolender et un système d'étalonnage bien utile des capteurs de pression.

Mlle I. BRAUD, Chargé de recherche au CNRS et M. E. GONZALEZ SOSA, ancien doctorant du LTHE pour leur aide déterminante quand il m'a fallu me familiariser avec les versions SiSPAT et SiSPAT_mulch.

Merci à Pascal (TARDIF), Eric (MERMIN) pour leurs nombreux coups de mains mais aussi à Marc (DUGUE) dont l'humour ne m'a pas échappé. Je rajouterais que son aide m'a été très utile pendant l'étape fastidieuse du « comptage de graines » et pour le calcul des surfaces foliaires et racinaires.

J'ai en outre eu le plaisir de travailler dans un bureau collectif. Je garderai le souvenir d'un lieu vivant. Facilitantes ou dérangeantes, certaines rencontres ont été déterminantes. Je remercie tout particulièrement Céline (LEHIR), Jean-Philippe (FALCY), Laurence (PENELON), Freddy (REY), Tobias (BOEHM), Frédéric (BERGER), Laurent (DUTRUEL), Benoît (LAUTIER).

Je pense aussi à tous ces autres, que je n'oublie pas mais dont la liste est si longue que je me résous à un bref mais sincère remerciement à tout le personnel amical et sympathique du Cemagref.

Je tiens aussi à remercier deux autres personnes :

Stéphane (LEMEN) pour m'avoir donné les éléments de compréhension nécessaires à la programmation d'une centrale d'acquisition et de ses multiplexeurs, un fameux et crucial dimanche après-midi.

Joël (KERMABON) parce qu'il est un ami présent. Je ne sais pas ce que ces années auraient été en son absence mais ce dont je suis sûre, c'est qu'elles auraient été différentes.

Enfin, je remercie mes parents pour leur soutien.

TABLE DES MATIERES

<i>Avant propos</i>	2
<i>Table des matières</i>	4
<i>Liste des symboles et leurs unités</i>	9
 <i>CHAPITRE 1 : INTRODUCTION</i>	 13
1.1 Les techniques de lutte contre l'érosion superficielle des sols	13
1.2 L'interaction RECS / végétation semée	17
1.3 Le sujet et les questions de recherche	17
1.4 Le cadre conceptuel	18
1.5 La méthodologie	19
1.6 L'organisation du mémoire	20
 <i>CHAPITRE 2 : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE</i>	 22
2.1 L'effet des RECS et des paillis sur l'érosion des sols	22
2.1.1 APPROCHE PHÉNOMÉNOLOGIQUE	23
2.1.2 LA PERFORMANCE DES RECS ET DES PAILLIS	28
2.2 L'effet des RECS et des paillis sur le microclimat dans le sol et son proche voisinage	31
2.2.1 L'EFFET SUR LA TEMPERATURE DU SOL	31
2.2.2 L'EFFET SUR LE STOCK D'EAU DANS LE SOL	34
2.2.3 L'EFFET SUR LES ÉCHANGES THERMIQUES ET HYDRIQUES AU VOISINAGE DU SOL	36
2.2.3.1 <i>L'effet sur le flux de chaleur sensible</i>	37
2.2.3.2 <i>L'effet sur le flux de chaleur latente</i>	39
2.3 La relation RECS ou paillis / Végétation semée	41
2.3.1 L'EFFET « ANTI-ÉROSIF » ET LA VÉGÉTATION	41
2.3.2 L'EFFET « MICROCLIMATIQUE » ET LA VÉGÉTATION	42
2.3.3 L'EFFET « BARRIERE PHYSIQUE » ET LA VÉGÉTATION	43
2.3.4 L'EFFET SUR LES MICROORGANISMES DU SOL OU SUR LES MICROORGANISMES FIXATEURS D'AZOTE ATMOSPHERIQUE ET LA VÉGÉTATION	44
2.3.4 L'EFFET SUR LES CHAMPIGNONS MICORHIZIENS ET LA VÉGÉTATION	48
2.3.4 L'EFFET SUR LA MACROFAUNE ET LA VÉGÉTATION	48

CHAPITRE 3 : APPROCHE DES TRANSFERTS D'EAU ET DE CHALEUR DANS LE SYSTÈME SOL-GÉOTEXTILE-ATMOSPHERE	50
3.1 Description et caractérisation des compartiments du système	50
3.1.1 LE COMPARTIMENT SOL	50
3.1.1.1 Hypothèses	51
3.1.1.2 Les variables de suivi des transferts hydriques et thermiques dans le sol	51
3.1.1.3 Propriétés du matériau « sol »	52
3.1.1.3.1 <u>Caractéristiques descriptives du sol</u>	53
3.1.1.3.2 <u>Propriétés hydrodynamiques</u>	56
3.1.1.3.3 <u>Propriétés thermiques</u>	57
3.1.1.3.4 <u>Propriétés de surface du sol</u>	58
3.1.2 LE COMPARTIMENT GÉOTEXTILE	59
3.1.2.1 Hypothèses	60
3.1.2.2 Caractéristiques descriptives du compartiment géotextile	60
3.1.2.2.1 <u>Caractéristiques globales</u>	60
3.1.2.2.2 <u>Caractéristiques propres aux brins</u>	63
3.1.2.3 Propriétés thermiques	65
3.1.2.4 Propriétés de surface	65
3.1.2.5 Suivi des conditions hygrothermiques dans le compartiment Géotextile	67
3.1.3 LE COMPARTIMENT ATMOSPHERE	69
3.1.3.1 Hypothèses	70
3.1.3.2 Mesures à effectuer dans le compartiment Atmosphère pour le suivi des conditions hygrothermiques.	70
CHAPITRE 4 : ETUDE EN LABORATOIRE	71
4.1 Principe général de conception du modèle physique	71
4.2 Instrumentation	74
4.2.1 LE SUIVI DES TRANSFERTS DANS LE SOL	74
4.2.1.1 La teneur en eau	74
4.2.1.2 La succion	77
4.2.1.3 Les transferts thermiques	80
4.2.1.4 L'implantation des capteurs	81
4.2.2 LE CONTROLE ET LE SUIVI DES CONDITIONS AUX LIMITES	83
4.2.2.1 Le suivi du microclimat dans le compartiment géotextile	83
4.2.2.2 La maîtrise et le suivi des conditions d'échange	83
4.2.2.2.1 <u>Le vent</u>	83
4.2.2.2.2 <u>Le rayonnement</u>	86

4.2.2.2.3 <u>La température et l'humidité de l'air</u>	87
4.2.3 LE SYSTEME D'ACQUISITION DES DONNEES	89
4.3 Les matériaux	92
4.3.1 LE SOL SUPPORT	92
4.3.2 LES GEOTEXTILES	93
4.3.2.1 <i>Caractéristiques globales</i>	95
4.3.2.2 <i>Caractéristiques propres aux brins</i>	96
4.4 Le protocole expérimental	99
4.4.1 LA PREPERATION DES MATERIAUX	99
4.4.2 LA PREPARATION DES CAPTEURS DE PRESSION	100
4.4.3 LE MODE D'IMPLANTATION DES CAPTEURS	100
4.4.4 LA REALISATION DE L'ETAT INITIAL	101
4.4.5 LA CONDUITE D'UNE EXPERIENCE	101
4.4.6 LES EXPERIENCES REALISEES	102
4.5 Bilan critique du dispositif expérimental	103
4.5.1 LA REPETABILITE DES EXPERIENCES	103
4.5.2 ANALYSE CRITIQUE	106
 CHAPITRE 5 : INTERPRETATION DES RESULTATS	 107
5.1 Introduction	107
5.2 Mise en évidence de l'effet du géotextile	107
5.2.1 L'EFFET DES VARIATIONS DE LA TEMPERATURE DE L'AIR ET DU RAYONNEMENT SUR LES TEMPERATURES DANS LE SOL EN L'ABSENCE DE GEOTEXTILE (SYSTEME SA)	107
5.2.2 L'EFFET D'UN GEOTEXTILE NATUREL SUR LA TEMPERATURE DANS LE SOL (SYSTEME SGA)	111
5.2.2.1 <i>La présence d'un couvert géotextile diminue le flux de chaleur latente entre le sol et l'atmosphère</i>	111
5.2.2.2 <i>Le géotextile a un « effet couvert » qui tamponne les variations des températures dans le sol</i>	113
5.2.2.3 <i>Le mode de fabrication des brins en jute (filage ou tressage) influe sur l'intensité de l'effet géotextile</i>	113
5.2.2.4 <i>La fermeture totale des géotextiles diminue la quantité de chaleur qui est fournie au sol pendant le jour</i>	113
5.2.3 L'EFFET D'UN GEOTEXTILE NATUREL SUR LE STOCK D'EAU DANS LE SOL	116
5.2.3.1 <i>Le géotextile a un effet d'écran (quel que soit son mode de fabrication et son ouverture) sur l'évaporation de l'eau du sol</i>	116
5.2.3.1.1 <u>La présence d'un couvert géotextile diminue la vitesse d'évaporation durant la phase II d'assèchement du sol</u>	117
5.2.3.1.2 <u>La présence d'un couvert géotextile allonge la durée de la</u>	

<u>phase II d'assèchement du sol</u>	117
5.2.3.1.3 <u>La présence d'un couvert géotextile n'influe pas sur la phase III d'assèchement du sol</u>	117
5.2.3.2 <i>Le mode de fabrication du jute (filé HS ou tressé HP) influe sur l'effet hydrique des géotextiles</i>	120
5.2.3.3 <i>La fermeture augmente l'effet d'écran des géotextiles naturels</i>	120
5.2.4 LE COMPORTEMENT DU COMPARTIMENT GEOTEXTILE	120
5.2.5 SYNTHESE	123
5.3 Modélisation	125
5.3.1 SIMULATION NUMERIQUE DES TRANSFERTS D'EAU ET DE CHALEUR DANS LE SYSTEME SGA ET SON TEMOIN LE SYSTEME SA	125
5.3.1.1 <i>Le module sol</i>	126
5.3.1.2 <i>Le module géotextile</i>	127
5.3.1.3 <i>Les modules d'interface</i>	129
5.3.1.4 <i>Une combinaison des deux modèles pour les géotextiles d'ouverture >0</i>	129
5.3.2 PARAMETRISATION DE SISPAT	130
5.3.2.1 <i>Le compartiment sol</i>	130
5.3.2.1.1 <u>Propriétés hydriques et hydrodynamiques</u>	130
5.3.2.1.2 <u>Propriétés thermiques</u>	131
5.3.2.1.3 <u>Propriétés de surface</u>	132
5.3.2.2 <i>Caractéristique du compartiment géotextile : propriétés des brins</i>	132
5.3.3 COMPARAISONS MESURES/MODELE	133
5.3.4 BILAN CRITIQUE	138
 CHAPITRE 6 : ARTICLE – « EFFETS DES GÉOTEXTILES SUR L'INSTALLATION DE LA VÉGÉTATION HERBACÉE SEMÉE »	 139
6.1 Introduction	139
6.2 Effet des géotextiles sur l'installation de la végétation herbacée semée	139
6.2.1 RESUME	140
6.2.2 INTRODUCTION	140
6.2.3 MATERIEL ET METHODES	141
6.2.3.1 <i>La conception de l'expérimentation</i>	141
6.2.3.1.1 <u>Le matériel végétal</u>	141
6.2.3.1.2 <u>Les traitements</u>	141
6.2.3.1.3 <u>La mise en œuvre de l'expérience</u>	142
6.2.3.2 <i>Les régimes climatiques</i>	143
6.2.3.3 <i>Les descripteurs de l'installation de la végétation</i>	144

6.2.3.4	<i>Le recueil des données</i>	147
6.2.3.5	<i>L'analyse statistique</i>	147
6.2.4	RESULTATS	147
6.2.4.1	<i>L'effet du climat sur l'installation de la végétation en l'absence de géotextile</i>	147
6.2.4.2	<i>L'effet d'un géotextile sur l'installation de la végétation</i>	149
6.2.4.2.1	<u>La présence d'un couvert améliore l'installation de la végétation soumise à des stress</u>	149
6.2.4.2.2	<u>Les propriétés des géotextiles sont différentes en fonction de la nature des fibres (synthétique ou/et naturelle) qui les composent</u>	150
6.2.4.2.3	<u>Le mode de fabrication du jute (filé, HS ou tressé, HP) a un effet sur les propriétés du géotextile</u>	151
6.2.4.2.4	<u>L'effet d'interaction « type / taille de la maille »</u>	152
6.2.5	DISCUSSION	153
6.2.6	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	156
6.2.7	TABLEAUX ET FIGURES	159
	 <i>CHAPITRE 7 : CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES</i>	 166
7.1	Rappel du contexte, des questions de recherche et de la méthodologie	166
7.2	Synthèse des principaux résultats	167
7.3	Bilan et perspectives	169
	 <i>Bibliographie</i>	 170
	<i>Annexes</i>	182

LISTE DES SYMBOLES ET LEURS UNITES

Symboles latins

C_e	Capacité électrique	[F]
C_{gh}	Capacité capillaire isotherme des brins	[m ⁻¹]
C_{gT}	Capacité calorifique des brins	[J.m ⁻³ .K ⁻¹]
C_{gwhR}	Coefficient de stockage de masse lié à la variation d'humidité dans les brins	[-]
C_{gWT}	Coefficient de stockage de masse lié à la variation de la température des brins	[K ⁻¹]
C_h	Capacité capillaire du sol	[m ⁻¹]
C_m	Capacité calorifique des minéraux	[J.m ⁻³ .K ⁻¹]
C_o	Capacité calorifique de la matière organique	[J.m ⁻³ .K ⁻¹]
C_{sec}	Capacité calorifique du sol sec	[J.m ⁻³ .K ⁻¹]
C_T	Capacité calorifique	[J.m ⁻³ .K ⁻¹]
C_w	Capacité calorifique de l'eau	[J.m ⁻³ .K ⁻¹]
d	Diamètre apparent des grains	[μm]
$\mathcal{D}$	Flux de chaleur dans le sol	[W.m ⁻²]
D_{ch}	Conductivité isotherme de la vapeur du sol	[W.m ⁻²]
D_{cT}	Conductivité thermique apparente du sol (= λ^*)	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
D_{ghHR}	Coefficient de transfert de chaleur lié au gradient d'humidité dans les brins	[W.m ⁻¹]
D_{ghT}	Coefficient de transfert de chaleur lié au gradient de température dans les brins	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
d_{grains}	Diamètre apparent médian des grains	[μm]
D_{gwhR}	Coefficient de transfert de masse lié au gradient d'humidité dans les brins	[m ² .s ⁻¹]
D_{gWT}	Coefficient de transfert de masse lié au gradient de température dans les brins	[m ² .s ⁻¹ .K ⁻¹]
D_{mh}	Diffusivité isotherme de l'eau du sol	[m ² .s ⁻¹]
D_{mT}	Diffusivité thermique de la vapeur du sol	[m ² .s ⁻¹]
DR	Résistance au détachement	[Joule.kg ⁻¹]
E	Flux d'évaporation total	[kg.m ⁻² .s ⁻¹]
e	Epaisseur	[cm] ou [m]
ER	Taux d'enrichissement de l'eau ruisselé en gravier, sable, limon ou argile	[-]
F	Quantité d'eau qui s'infiltre au-delà du profil de sol	[mm]
g	Accélération de la pesanteur	[m.s ⁻²]
G	Grammage ou masse sèche par unité de surface	[kg.m ⁻²] ou [t.ha ⁻¹]
$G(t)$	Grammage ou masse sèche par unité de surface au temps t	[Kg.m ⁻²] ou [t.ha ⁻¹]
$G_{0(t)}$	Grammage ou masse sèche initial(e) par unité de surface	[Kg.m ⁻²] ou [t.ha ⁻¹]
H	Flux de chaleur sensible	[W.m ⁻²]
h	Potentiel hydrique	[m] ou [mbar]
h_1	Potentiel hydrique à la surface du sol ou du géotextile	[m] ou [mbar]
h_d	Hauteur de déplacement du sol	[m]
h_{gd}	Hauteur de déplacement du géotextile	[m]
h_o	Potentiel hydrique de référence	[m] ou [mbar]
HR_{air}	Humidité relative de l'air	[-] ou [%]
HR_{airp}	Humidité relative de l'air dans le paillis	[-] ou [%]
HR_g	Humidité de l'air du géotextile	[-] ou [%]
H_{tot}	Hauteur de pluie totale	[mm]
h_{VG}	Facteur d'échelle de la relation de Van Genuchten (3.4)	[-]

$I_{\max}$	Intensité maximale de la pluie	[mm.h ⁻¹]
K	Conductivité hydraulique	[m.s ⁻¹]
K_{sat}	Conductivité hydraulique à saturation	[m.s ⁻¹]
L_v	Chaleur latente de vaporisation	[J.kg ⁻¹]
$L_v E$	Flux de chaleur latente	[W.m ⁻²]
M	Masse	[kg]
M_{grains}	Masse des grains	[kg]
M_h	Masse des brins humides	[kg]
M_s	Masse des brins secs	[kg]
m_{VG}	Paramètre de la relation de Van Genuchten (3.4)	[-]
n	Porosité	[-]
n_g	Porosité du géotextile	[-]
n_{VG}	Paramètre de la relation de Van Genuchten (3.4)	[-]
P	Cumul des précipitations	[mm] ou [Kg.m ⁻²]
P	Pression capillaire de l'eau	[Pa]
p_a	Pression de l'air	[Pa]
pF	Logarithme décimal de la succion matricielle	[-]
P_1	Intensité des précipitations	[m.s ⁻¹]
P_p	Fraction de la pluie non interceptée	[-]
p_v	Pression partielle de la vapeur d'eau	[Pa]
p_{vs}	Pression partielle de la vapeur d'eau saturante	[Pa]
p_w	Pression de l'eau	[Pa]
Q	Capacité de stockage ou de rétention	[mm]
q	Masse d'eau stockée par unité de surface	[kg.m ⁻²]
R	Ruissellement	[mm]
r	Résistance à la traction	[KN.m ⁻¹]
RA	Rayonnement atmosphérique incident de grande longueur d'onde	[W.m ⁻²]
RG	Rayonnement solaire incident de courte longueur d'onde	[W.m ⁻²]
Rn	Rayonnement net	[W.m ⁻²]
RO	Efficacité en terme de réduction du ruissellement	[%]
ROC	Coefficient de ruissellement	[%]
S	Concentration en substrat dans la solution	[kg.l ⁻¹]
S_0	Concentration initiale en substrat dans la solution	[kg.l ⁻¹]
SY	Efficacité en terme de perte de sédiments	[%]
T	Température	[K] ou [°C]
t	Temps	[s] ou [jour]
T_0	Température de référence	[K] ou [°C]
T_1	Température à la surface du sol ou du géotextile	[K] ou [°C]
T_g	Température du géotextile	[K] ou [°C]
T_{gair}	Température de l'air du géotextile	[K] ou [°C]
T_s	Température de la surface	[K] ou [°C]
U_{air}	Vitesse du vent	[m.s ⁻¹]
$V_{\text{dép}}$	Volume de ruissellement	[m ³]
V_{max}	Vitesse maximale de décomposition du substrat	[Kg.jour ⁻¹]
V_t	Volume total	[m ³]
V_v	Volume de l'espace inter-granulaire	[m ³]
V_w	Volume de l'eau	[m ³]
w	Teneur en eau massique	[kg.kg ⁻¹]

w_g	Teneur en eau massique du géotextile	[kg.kg ⁻¹]
w_p	Teneur en eau massique du paillis	[kg.kg ⁻¹]
w_{sat}	Teneur en eau massique à saturation	[kg.kg ⁻¹]
X_0	Concentration initiale en population microbienne dans la solution	[kg.l ⁻¹]
z	Côte ou coordonnée verticale	[m]
z_{goh}	Longueur de rugosité du géotextile relative aux transferts de chaleur	[m]
z_{gom}	Longueur de rugosité du géotextile relative aux transferts de masse	[m]
z_l	Côte ou coordonnée à la limite	[m]
z_{lame}	Hauteur de la lame d'eau	[m]
z_{oh}	Longueur de rugosité du sol relative au transferts de chaleur	[m]
z_{om}	Longueur de rugosité du sol relative au transferts de masse	[m]
z_{sg}	Côte ou coordonnée à l'interface geotextile-sol	[m]

Symboles grecs

α	Albedo du sol	[-]
α_g	Albedo des brins	[-]
δ	Densité	[-]
δ_g	Densité du géotextile	[-]
δ_{grains}	Densité des grains	[-]
ΔS	Variation du stock d'eau dans le sol	[mm]
δ_{sec}	Densité apparente sèche	[-]
ε	Emissivité du sol	[-]
ε_e	Permittivité	[-]
ε_g	Emissivité des brins	[-]
η_{BC}	Paramètre de forme de la relation de Brooks et Corey (3.14)	[-]
θ	Teneur volumique en eau	[m ³ .m ⁻³]
θ_f	Teneur en eau volumique au point de flétrissement	[m ³ .m ⁻³]
θ_g	Teneur en eau volumique du géotextile	[m ³ .m ⁻³]
θ_{go}	Teneur en matière organique du géotextile	[m ³ .m ⁻³]
θ_k	Teneur en eau volumique à partir de laquelle la phase liquide n'est plus continue	[m ³ .m ⁻³]
θ_m	Teneur volumique en minéraux	[m ³ .m ⁻³]
θ_{max}	Teneur en eau volumique maximale	[m ³ .m ⁻³]
θ_o	Teneur volumique en matière organique	[m ³ .m ⁻³]
θ_{res}	Teneur en eau volumique résiduelle	[m ³ .m ⁻³]
θ_{sat}	Teneur en eau volumique à saturation	[m ³ .m ⁻³]
λ	Conductivité thermique	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
λ^*	Conductivité thermique apparente	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
λ^*_g	Conductivité thermique apparente du géotextile	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
λ_{air}	Conductivité thermique de l'air	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
λ_{eau}	Conductivité thermique de l'eau	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
Λ_s	Inertie thermique à saturation	[J.m ⁻² .K ⁻¹ .s ^{-1/2}]
ρ_a	Masse volumique apparente	[kg.m ⁻³]
ρ_{air}	Masse volumique de l'air	[kg.m ⁻³]
ρ_{fibres}	Masse volumique des fibres	[kg.m ⁻³]
ρ_g	Masse volumique du géotextile	[kg.m ⁻³]

ρ_{grains}	Masse volumique des grains	[kg.m ⁻³]
ρ_{sec}	Masse volumique apparente sèche	[kg.m ⁻³]
ρ_{sol}	Masse volumique apparente du sol	[kg.m ⁻³]
ρ_w	Masse volumique de l'eau	[kg.m ⁻³]
Σ	Surface des électrodes	[m ²]
τ	Tortuosité	[-]
ν	Période	[msec]
ν_g	Transmissivité des brins	[-]
Ψ_0	Potentiel hydrique de référence	[m]
Ψ	Succion matricielle	[m]

Autres symboles

Υ	Conductivité électrique	[dS.m ⁻¹]
ϑ	Taux de couverture au sol	[m ² .m ⁻²]
Ξ	Cumul de l'évaporation	[mm]
ϑ	Distance séparant les électrodes	[m]

Constantes

σ	Constante de Stefan Boltzman	5,67.10 ⁻⁸ W.m ⁻² .K ⁻⁴
----------	------------------------------	--

Abréviations et sigles

SDP	Semis Direct avec Paillis
RECS	Rolled Erosion Control System
SA	(Système) Sol-Atmosphère
SGA	(Système) Sol-Géotextile-Atmosphère
SPA	(Système) Sol-Plante-Atmosphère
SGPA	(Système) Sol-Geotextile-Plante-Atmosphère
SiSPAT	Simple Soil Plant Atmosphere Transfer (Model)
SiSPAT_mulch	Simple Soil Plant Atmosphere Transfer_mulch (Model)
P	Polypropylène
HP	Hessian Plaited (géotextile en jute tressé)
HP/P	Composition mixte : moitié jute tressé et moitié polypropylène
HS	Hessian Spun (géotextile en jute filé)
HS/P	Composition mixte : moitié jute filé et moitié polypropylène
Ouv 0	Ouverture de maille nulle
Ouv 1	Ouverture de maille : 1 cm ²
Ouv 2	Ouverture de maille : 1,5 cm ²
Ouv 3	Ouverture de maille : 2 cm ²

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

Face à l'ampleur de la dégradation des surfaces continentales, l'érosion superficielle des sols est devenue un problème politique dans nos sociétés et des subventions importantes ont été distribuées dès les années 1980 pour financer la recherche afin de rendre possible une lutte efficace au moyen de techniques adaptées. Un rapport de l'UNEP/GRID¹ estimait en 1992 à 47% la superficie des continents concernée par l'érosion superficielle des sols dont près de 70% étaient dégradés de manière irréversible. De vastes superficies de sol sont dénudées lors de l'utilisation intensive des terres agricoles ou pastorales, dans le cas d'une surexploitation des ressources naturelles comme la forêt et dans le cadre des aménagements d'envergure (routes, autoroutes, voies ferrées, carrières, pistes de ski etc.). Certaines surfaces sont plus sensibles que d'autres à l'érosion du fait de la pente, de la forte érodabilité du sol, de l'agressivité des agents érosifs etc. C'est souvent le cas en montagne : voir Figure 1.1.



Source Cemagref

Figure 1.1. Deux exemples de sites sensibles à l'érosion : une piste de ski nouvellement terrassée et une carrière désaffectée

1.1 Les techniques de lutte contre l'érosion superficielle des sols

Plusieurs techniques permettent de lutter contre l'érosion superficielle des sols :

¹ United Nations Environment Programme, Global Resource Information Database

- Dans le contexte agricole - et particulièrement en région tropicale où les pluies peuvent être diluviennes - la technique du Semis Direct avec Paillis (SDP) de résidus est par exemple largement utilisée. Ces paillis (ou mulch en anglais) sont composés de résidus libres de tiges, de feuilles ou de morceaux d'écorce etc. que l'on épand tel quel sur le sol. Ils permettent de contrer l'effet des agents érosifs à chaque alternance entre deux cultures. On trouve dans la littérature - qui sera analysée en détail dans le chapitre suivant - de nombreux articles portant sur l'utilisation de cette technique, son influence sur l'érosion, le microclimat, la vie à la surface du sol etc.
- Dans le cadre des aménagements nouvellement créés et qu'il s'agit de pérenniser ou pour corriger des dommages, le choix des aménageurs est souvent dirigé vers des interventions qui consistent à forcer l'installation d'une couverture végétale dense et pérenne sur les surfaces de sol mises à nu.

La végétation s'oppose efficacement à l'érosion selon deux modalités principales : par protection « active » en empêchant l'érosion de se produire et par protection « passive » ou à distance en retenant les sédiments éventuellement érodés à l'amont (Viles, 1990).

La protection « active » de la végétation contre l'érosion hydrique des sols² repose sur des effets multiples : le feuillage réduit l'action ou l'intensité des facteurs érosifs au voisinage du sol comme l'effet « splash » des gouttes de pluie [i.e. (Woo et al., 1997) et (Geddes et Dunkerley, 1999)]. Les plants constituent autant d'obstacles au ruissellement qui contribuent à en ralentir la vitesse [i.e. (Gonzalez-Hidalgo et al., 1997)]. La végétation favorise aussi l'infiltration de l'eau dans le sol en augmentant sa porosité [i.e. (Cerde, 1998a)] et le pompage de l'eau par les végétaux contribue à désengorger le sol [i.e. (Poncet, 1995)]. La végétation peut atténuer les écarts thermiques journaliers, réduisant ainsi le risque de désagrégation des roches (Rovéra et al., 1999). Enfin, l'ancrage des racines dans le sol génère une armature interne de plus en plus serrée maintenant efficacement le substrat (Handel et al., 1997).

Pour forcer l'installation de la végétation, les aménageurs forestiers utilisent fréquemment les techniques des cordons, fascines ou clayonnages qui reposent sur le bouturage de saules le plus souvent (Rey et al., 2001). Des haies végétales espacées les unes des autres d'environ 3 m sont disposées horizontalement le long des pentes (Figure 1.2) et permettent souvent de lutter avec succès contre l'érosion (Poudel et al., 1999).

² Dans la suite, on parlera simplement d'érosion pour faire référence à l'« érosion hydrique »



Source Cemagref

Figure 1.2. Fascines sur un talus de bord de route

Quand la couverture végétale recherchée est un tapis ras d'herbacées et que les agents érosifs agissent à moyen terme, le *semis direct* est une intervention simple et efficace et de faible coût relatif. Le semis est le plus couramment réalisé par voie hydraulique (Figure 1.3).



Source Cemagref

Figure 1.3. Semis par hydroseeding depuis la route

Si, au contraire, on craint un effet à court terme de l'érosion, on doit dérouler sur le sol une protection désignée par le terme générique de RECS³ ou on doit épandre un paillis, associés à un semis d'espèces herbacées. Le RECS comme le paillis a une fonction de fixation mécanique du sol et on conforte cet effet par l'installation d'un couvert végétal issu du semis qui se développe au travers des ouvertures du revêtement : voir exemples de la Figure 1.4 ci-après.

³ pour « Rolled Erosion Control System », acronyme introduit par Sutherland en 1998.



Source Cemagref

Figure 1.4. Pose d'un RECS sur un talus de montagne et talus équipé d'un RECS puis végétalisé

Les *paillis* utilisés sont composés comme en agriculture de résidus libres de tiges, de feuilles ou de morceaux d'écorce (Figure 1.5 « gauche »). Ils sont épandus tels quels sur le sol.

On distingue usuellement deux grandes familles de RECS :

- les *matelas* de nature organique ou synthétique qui sont faits d'une seule masse de résidus maintenus dans un treillis généralement synthétique pouvant être dégradable à la lumière (Figure 1.5 « centre »). On les fixe sur le sol à l'aide d'agrafes métalliques.
- les *géotextiles* qui sont des produits tissés caractérisés par la nature de leurs fibres (en matière synthétique - Polypropylène, Polyéthylène, Nylon - ou biodégradable – essentiellement jute et coco) et l'ouverture de leur maille (Figure 1.5 « droite »). Ils sont aussi fixés sur le sol à l'aide d'agrafes métalliques. Les géotextiles possèdent une bonne résistance à la traction qui permet leur utilisation sur des pentes inclinées de 15° à 25° (Rickson, 1995).



Figures 1.5. De gauche à droite : un paillis, un matelas en coco et un géotextile en jute

1.2 L'interaction RECS / végétation semée

Il est communément admis que les RECS créent un microclimat dans le sol et son proche voisinage qui se traduirait globalement par une modération des écarts de température journaliers et par une variation moins rapide du stock d'eau dans le sol. Ces conditions microclimatiques ont donc des répercussions potentiellement favorables sur la végétation car elles déterminent la qualité du *safe-site*⁴ (Harper, 1977) lors de l'installation de la végétation semée. L'amélioration de ce *safe-site* est d'autant plus déterminante lorsque se font sentir les effets d'une forte pente (talus), de mouvements du sol liés aux cycles du gel-dégel (altitude), d'éventuelles fluctuations extrêmes des températures à la surface du sol (versants sud en montagne), etc. (Urbanska et Schütz, 1986).

Les études qui traitent de l'influence des revêtements – RECS et paillis – (voir Chapitre 2) sur le microclimat et leur impact sur la végétation concernent essentiellement des paillis qui sont aussi utilisés en agriculture. Globalement, ces études ont montré que ces revêtements ont effectivement un effet généralement positif sur la végétation. Néanmoins, elles ne fournissent que peu d'informations sur l'étape critique d'installation de la végétation semée.

Pour une meilleure maîtrise de la technique qui consiste à associer un RECS avec un semis d'espèces herbacées, on s'est donc proposé d'approfondir nos connaissances sur l'interaction entre une famille importante de RECS, les géotextiles et l'installation⁵ de la végétation herbacée semée.

1.3 Le sujet et les questions de recherche

Dans le cadre de cette thèse, on s'est plus précisément fixé comme double objectif : l'analyse des modifications microclimatiques induites par la présence d'un géotextile à la surface du sol d'une part et, d'autre part, l'étude de l'effet de ces modifications sur l'étape d'installation de la végétation herbacée semée. On a plus précisément cherché à répondre aux questions suivantes :

ASPECTS MICROCLIMATIQUES :

- Quelle est la dynamique des transferts d'eau et de chaleur au sein du système Sol nu-Atmosphère dans une phase d'assèchement du sol ?

⁴ La notion de *safe-site* fait référence à l'ensemble des conditions de l'environnement immédiat d'une semence qui détermine la réussite de sa germination et la survie de la plantule

⁵ Phase de la levée des semences (germination et début de la croissance des plantules)

- Quel est l'effet d'un géotextile sur la dynamique des transferts d'eau et de chaleur dans les mêmes conditions ?
- Comment le mode de fabrication et l'ouverture du géotextile influent-ils sur cette dynamique ?

ASPECTS BIOLOGIQUES :

- Quels sont les effets d'un stress hydrique et d'un stress thermique sur la levée des semences en l'absence de géotextile ?
- Quel est l'effet de la présence d'un géotextile sur la levée des semences ?
- Comment la nature et le mode de fabrication du géotextile peuvent-ils influencer sur les caractéristiques de la levée de la végétation ?

1.4 Le cadre conceptuel

Cette étude a été réalisée à l'échelle où ont lieu les phénomènes auxquels nous nous intéressons : on a donc limité nos investigations à l'espace colonisable par la végétation herbacée dans ses premiers stades de développement soit, approximativement, les vingt premiers centimètres de la couche superficielle du sol et 20 cm au-dessus. On a distingué trois compartiments : le Sol, le Géotextile et l'Atmosphère dont l'ensemble constitue le système *Sol-Géotextile-Atmosphère* (SGA) : voir Figure 1.6.

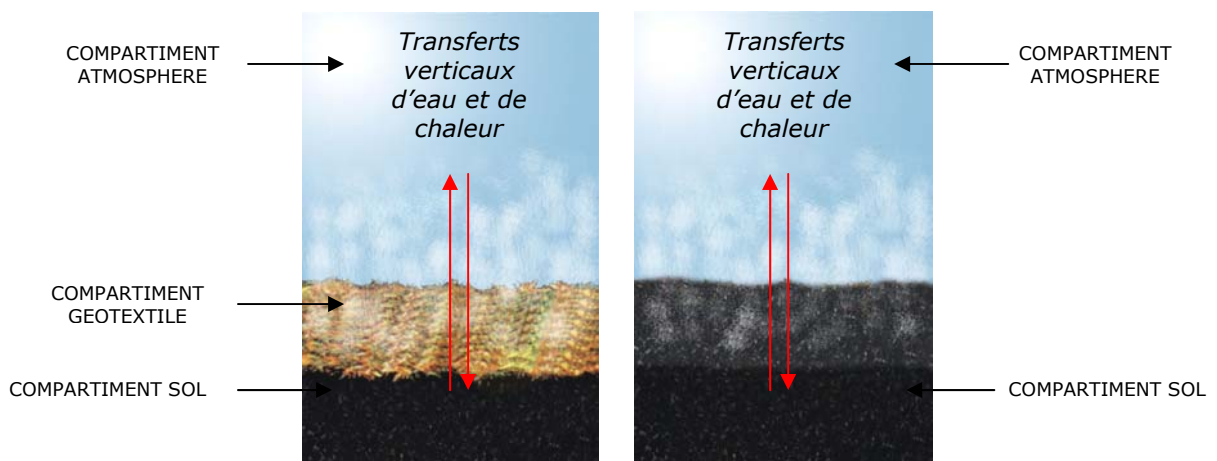


Figure 1.6. Schématisation d'un système SGA à gauche et d'un système SA témoin à droite

Les seuls échanges entre compartiments considérés dans notre étude, sont les transferts (ou flux) verticaux d'eau et de chaleur.

Ces échanges ont lieu dès lors qu'un déséquilibre survient au sein du système ou entre celui-ci et l'extérieur. Ce dernier cas correspond, par exemple, à un apport

d'énergie sous l'effet d'un rayonnement solaire ou artificiel, à un apport d'eau par la pluie ou, au contraire, à un séchage sous l'effet du vent etc.

Comme il est impossible de mesurer directement ces flux internes ou externes, pour suivre un tel système, on est amené à mesurer des variables caractérisant l'état hydrique et thermique de chaque compartiment : pour le sol, il peut s'agir de la *température*, de la *teneur en eau* ou du *potentiel matriciel* ; pour l'atmosphère, de l'*humidité relative* et de la *température* de l'air. Il convient également de contrôler et/ou de mesurer les variables déterminant les conditions aux limites du système. Ces dernières, dites *variables de forçage*, sont, par exemple, l'apport d'énergie par *rayonnement*, la *vitesse du vent*, les *précipitations* etc. Toutes ces variables, leurs dépendances par rapport au milieu et la façon dont elles interviennent dans les phénomènes de transport seront définies dans le Chapitre 3.

Enfin, la végétation est insérée dans le système SA ou SGA où elle occupe un nouveau compartiment créant ainsi deux nouveaux systèmes : le système *Sol-Géotextile-Plante-Atmosphère* (SGPA) ou le système *Sol-Plante-Atmosphère* (SPA) (Figure 1.7). Le compartiment plante est composé par la population des végétaux semés.

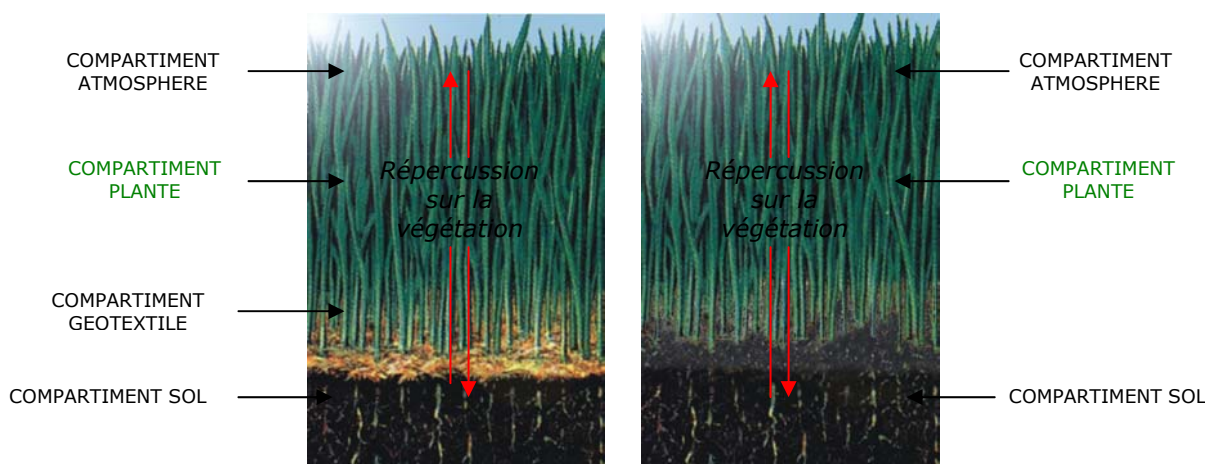


Figure 1.7. Schématisation d'un système SGPA à gauche et SPA témoin à droite

Pour suivre l'installation de la végétation, on a été amené à mesurer des caractéristiques de la levée des populations de semences exprimées en terme de temps de latence, de vitesse d'étalement des processus de germination et de croissance dans la population, de surface foliaire et racinaire etc.

1.5 La méthodologie

Expérimentalement, nous avons systématiquement étudié l'effet du géotextile sur le microclimat par rapport au système *témoin* sans géotextile (système SA) fonctionnant

dans les mêmes conditions : Figure 1.6. De même, nous avons étudié l'effet du géotextile sur la levée des populations de semences par rapport au système témoin avec des plantes mais sans géotextile (système SPA) fonctionnant dans les mêmes conditions : Figure 1.7.

Dans le temps, notre étude s'est restreinte à la période correspondant à la phase de la levée de la végétation c'est à dire aux étapes de la germination et du début de la croissance des plantules soit environ 35 jours.

Pour effectuer les comparaisons entre systèmes, nous avons créé une expérimentation en conditions parfaitement contrôlées : travail en chambre de culture à température, humidité de l'air et alternances jour/nuit contrôlées. De plus, pour ne pas rajouter de facteurs supplémentaires, nous avons choisi une pente nulle et un sol homogène : sable de l'Isère (chapitre 4, §4.3.1).

Dans un souci de clarté, nous avons séparé l'acquisition des données microclimatiques et biologiques en prenant soin d'imposer des conditions d'expérience identiques : même sol, géotextiles identiques et même forçage atmosphérique.

Sur la base de nos mesures, deux types d'analyse ont été effectués :

- 1) Une comparaison directe des conditions micro-environnementales entre les systèmes SGA et SA reconstitués en chambre de culture (modèle physique). De plus, pour valider notre interprétation de l'influence d'un géotextile, nous avons utilisé deux versions d'un modèle mécaniste de simulation des transferts couplés d'eau et de chaleur : les versions SiSPAT (Braud, 1995,97,2000) et SiSPAT_mulch (Gonzalez Sosa, 1999).
- 2) Une approche de type statistique (plan expérimental en bloc) a permis de tester et de caractériser l'existence d'un effet « géotextile » sur le processus de la levée de la végétation dans des conditions climatiques non limitantes et des conditions de stress thermique et hydrique.

1.6 L'organisation du mémoire

Le Chapitre 2 est consacré à la bibliographie sur les RECS et les paillis. On a abordé les thèmes suivants : la fixation mécanique des sols, le micro climat dans le sol et son proche voisinage ainsi que le réarrangement biologique des sols.

Le Chapitre 3 a pour objectif la présentation des hypothèses, variables, caractéristiques descriptives des différents compartiments: Sol, Geotextile et

Atmosphère.

Le Chapitre 4 est consacré à la présentation du dispositif expérimental mis au point pour la comparaison directe des conditions micro-environnementales entre les systèmes SGA et SA.

Les Chapitres 5 et 6 présentent l'analyse des résultats expérimentaux sous un angle physique dans le Chapitre 5 - caractérisation de l'« effet géotextile » et modélisation à l'aide des outils de simulation : SiSPAT et SiSPAT_mulch -, puis sous un angle biologique dans le Chapitre 6. Ce dernier est sous forme d'article.

CHAPITRE 2
REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

La présence d'un RECS ou d'un paillis dans le milieu a des effets à plusieurs niveaux : sur l'érosion, le microclimat, la vie à la surface du sol. Leur étude peut être appréhendée sous l'angle de la physique (incidence directe sur l'érosion et le microclimat) ou de la biologie (effets induits sur la végétation semée).

2.1 L'effet des RECS et des paillis sur l'érosion des sols

Bien que les premières publications sur les propriétés mécaniques des RECS et des paillis remontent aux années 1960 [i.e. (Disiker et Richardson, 1961), (Barrett et al. 1967) et (Meyer et al., 1972)], c'est dans les années 90 que la recherche se développe [i.e. (Awadhwai et Thiersein, 1985), (Lopes et al., 1987), (Israelsen et Urroz, 1992a,b), (Rustom et Weggel, 1993a,b,c), (Krenitsky et Carroll, 1994), (Urroz, 1995), (Dinger et al., 1995), (Holdridge, 1996), (Homoky, 1996), (Sutherland et Ziegler, 1996,97), (Sutherland et al., 1998a,b) et (Crosaz et Dinger, 1999)]. Davantage de RECS et paillis sont comparés en conditions de plus en plus contrôlées. Les expériences en champ sous pluie naturelle [i.e. (Awadhwai et Thiersein, 1985), (Krenitsky et Carroll, 1994), (Sutherland et al., 1998a) et (Crosaz et Dinger, 1999)] sont complétées par des études en laboratoire avec des simulateurs de pluie [i.e. (Israelsen et Urroz, 1992a,b) et (Urroz, 1995)] ou in situ sous pluie artificielle [i.e. (Sutherland et Ziegler, 1996,97)].

En champ, la majeure partie des expériences sont réalisées sur des parcelles de pente moyenne (4° à 25°), d'une dizaine de m^2 . Seules quelques unes sont réalisées à l'échelle de la centaine de m^2 [i.e. (Holdridge, 1996) et (Crosaz et Dinger, 1999)]. En laboratoire, la surface des parcelles test est moindre, inférieure à $10 m^2$ et la pente est souvent de l'ordre d'une vingtaine de degrés. Dans chaque test une des parcelles fait office de témoin et généralement de 5 à 13 RECS ou/et paillis sont comparés par étude. La durée des pluies lorsqu'elles sont simulées est de l'ordre de 40 minutes avec une intensité qui peut varier de $50 mm.h^{-1}$ (pluie moyenne) à $200 mm.h^{-1}$ (très gros orage).

La quantification de l'incidence des RECS ou des paillis sur l'érosion superficielle des sols peut être issue directement des mesures comme la perte en particules du sol [$kg.ha^{-1}an^{-1}$ ou $kg.m^{-2}h^{-1}$].

Elle peut aussi être exprimée sous forme de coefficients dont les principaux cités dans la littérature sont :

- L'efficacité en terme de perte de sédiments SY en % :

$$SY = \left(\frac{\text{Sortie sédiments parcelle témoin} - \text{Sortie sédiments parcelle avec RECS}}{\text{Sortie de sédiments de la parcelle témoin}} \right) * 100 \quad (2.1)$$

- Le coefficient de ruissellement ROC en % :

$$ROC = \left(\frac{\text{Volume ruisselé (m}^3\text{)}}{\text{Volume de pluie appliquée (m}^3\text{)}} \right) * 100 \quad (2.2)$$

- L'efficacité en terme de réduction du ruissellement RO en % :

$$RO = \left(\frac{ROC \text{ de la parcelle témoin} - ROC \text{ de la parcelle avec RECS}}{ROC \text{ de la parcelle témoin}} \right) * 100 \quad (2.3)$$

- Le taux d'enrichissement de l'eau ruisselé en gravier, sable, limon ou argile ER :

$$ER = \frac{\text{Fraction de la taille des sédiments du sol de la parcelle avec RECS (\%)}}{\text{Fraction de la taille des sédiments du sol in situ (\%)}} \quad (2.4)$$

- La résistance au détachement DR exprimée en joule.kg^{-1} qui rend compte de la force de l'impact des gouttes de pluie sur une surface de sol donnée.

Le volume de ruissellement $V_{\text{dép}}$ peut être estimé à l'échelle événementielle en m^3 en utilisant l'équation :

$$V_{\text{dép}} = a \times H_{\text{tot}}^b \times I_{\text{max}}^c \quad (2.5)$$

avec a , b et c des coefficients d'ajustement [-] ; H_{tot} [mm], la hauteur de pluie totale tombée et I_{max} [mm.h^{-1}], l'intensité maximale avec laquelle la pluie tombe pour une période de 1 minute (Borges, 1993).

Notons qu'il existe une variabilité inhérente aux études sur l'érosion des sols qu'il est difficile, voir impossible d'éliminer (Bryan et Luk, 1981) et les comparaisons entre tests doivent être considérées avec précaution. Il persiste la difficulté de débiter chaque test avec une teneur en eau du sol identique (Sutherland et al., 1998b).

2.1.1 APPROCHE PHÉNOMÉNOLOGIQUE

Quand il pleut, l'eau est dans un premier temps totalement absorbée par le sol : c'est la « phase d'imbibition » (I) : voir Figure 2.1. L'érosion s'opère alors essentiellement par le détachement des grains du sol sous l'impact direct des gouttes de pluie. A partir de la deuxième phase appelée « régime transitoire » (II), il y a ruissellement, l'érosion s'effectue alors aussi par le déplacement des grains à la surface du sol - roulement, glissement, saltation, suspension etc. - sous les actions de

l'écoulement. Dès lors que le ruissellement atteint un débit constant, on entre dans la troisième phase, le « régime d'écoulement permanent » (III). Il s'achève à l'arrêt de la pluie. Une quatrième et dernière phase est la phase de vidange (IV) qui se termine quand cesse le ruissellement.

La vitesse à partir de laquelle les grains du fond sont enlevés par l'écoulement dépendent de la dimension des grains (Hjulstrom, 1935) : voir Figure 2.2.

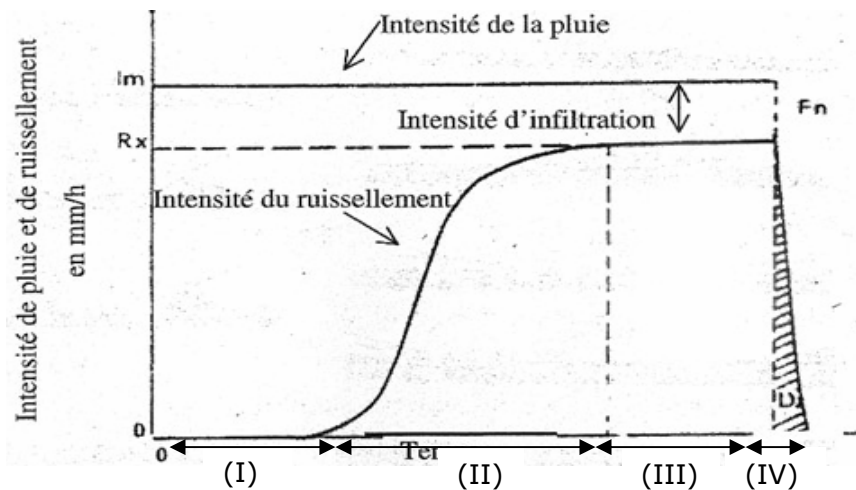


Figure 2.1. Hydrogramme théorique de ruissellement (Laforge, 1977) citée par Warlouzel (1999)

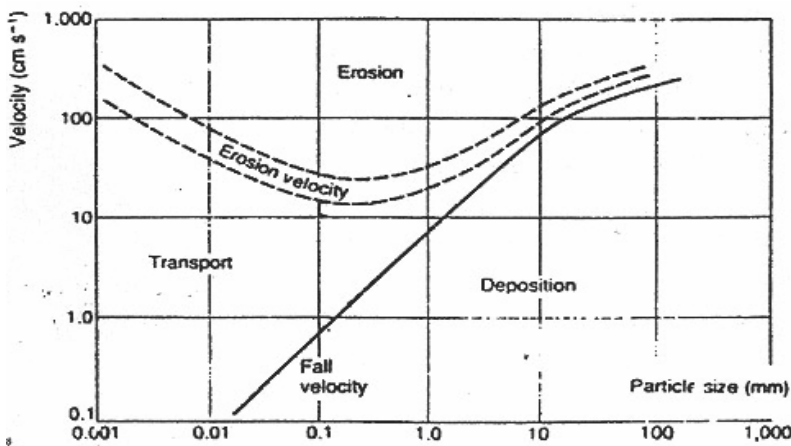


Figure 2.2. Vitesse critique de l'eau pour l'érosion, le transport et le dépôt (Hjulstrom, 1935) citée par Warlouzel (1999)

Quels que soient les auteurs, tous ont remarqué que les RECS et les paillis réduisent significativement l'érosion – soit la perte en matériaux (ou éléments) du sol – par rapport au sol nu.

Cette réduction de l'érosion est associée à :

- *la diminution du détachement des particules du sol.* Pour réduire la perte de sol, éliminer l'impact des gouttes de pluie est plus efficace que diminuer la vitesse de ruissellement (Borst et Woodburn, 1942) par exemple. En effet, l'effet splash apparaît comme le moyen le plus efficace de détachement du sol (Morgan, 1982,86). Une réduction de 89% de l'énergie du splash peut entraîner une réduction de 90% de l'érosion du sol (Young et Wiersma, 1973). Sur 13 RECS testés, tous ont significativement réduit l'effet splash par rapport au sol nu (Sutherland et Ziegler, 1996) (Figure 2.3). Il existe en outre une forte relation non linéaire entre la réduction du détachement des matériaux du sol et la capacité de rétention des RECS (Sutherland et Ziegler, 1997).

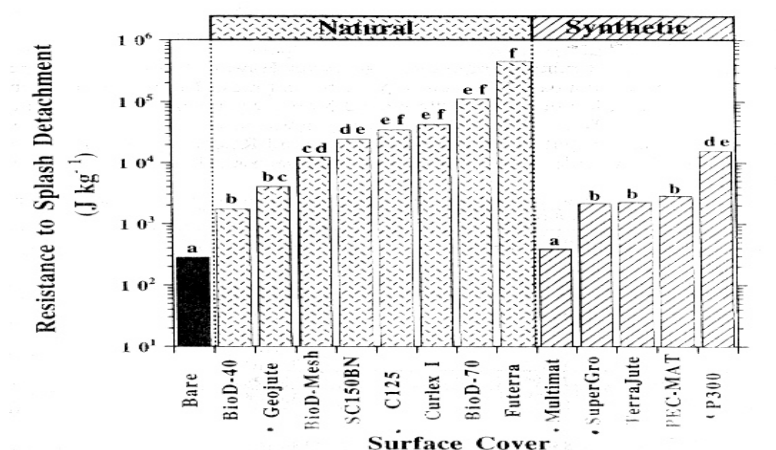


Figure 2.3. Variation de la résistance au détachement par effet splash des gouttes de pluie de 8 RECS en fibres naturelles, 5 RECS synthétiques et du sol nu (Sutherland et Ziegler, 1996)

- *la diminution du volume d'eau ruisselé* (Tableaux 2.1 et 2.2)⁶. La corrélation entre la perte en éléments du sol et le ruissellement est positive. Elle est souvent calculée dans les études (par exemple $r=0,63$ pour $p=0,011$ (Urroz et Israelsen, 1993)). La diminution du volume d'eau ruisselé est accompagné en conséquence d'une augmentation de l'infiltration (Sutherland et Ziegler, 1996). L'explication tient en partie au fait que sous le couvert d'un paillis par exemple, les micro-reliefs, la rugosité du sol sont davantage préservés et sa matrice poreuse ne subit pas de déformation importante [i.e. (Abrahams et al., 1994) et (Crovetto Lamarca, 1996)]. Les paillis limitent ainsi la formation d'une croûte de battance (Crovetto Lamarca, 1996), véritable barrière de refus à l'infiltration (Vandervaere et al., 1998).

⁶ Pour faciliter la lecture des Tableaux et Figures du §2.1.1 et §2.1.2, un Tableau en Annexe 1 donne la composition et le type des RECS référencés

Les RECS fabriqués à partir de fibres naturelles et les paillis sont souvent plus performants pour diminuer le volume d'eau ruisselé que ceux fabriqués à partir de fibres synthétiques (par exemple Tableau 2.2 et Figure 2.1). Cette efficacité globalement plus élevée est associée à leur capacité de rétention en eau. A titre d'exemple, un paillis en résidus de maïs de 4,5 t.ha⁻¹ peut stocker jusqu'à 1,7 kg d'eau par m² (Arreola Tostado, 1996).

RECS	Perte de sédiments [Kg.m ⁻² .h ⁻¹]	ROC [%]
SC150BN	0,0010±0,0002	0,9±0,2
S150BN	0,0017±0,0009	1,8±0,7
S2	0,021±0,012	5,4±1,8
S1	0,32±0,16	14,9±5,0
Curlex III	0,12±0,053	7,9±1,2
Futerra	0,0056±0,0016	13,8±2,1
Geojute	1,36±0,76	38,5±2,9
DeKoWe 400	2,67±0,17	61,3±2,1

Tableau 2.1. Comparaison des pertes moyennes en sédiments et des coefficients moyens de ruissellement de 8 RECS [modifié de (Urroz et Israelsen, 1995)]

RECS	ROC [%]	RO [%]	SY [%]
Sol nu	40,9	0,00	0,00
PEC MAT	27,0	33,99	75,73
Terrajute	16,9	58,68	89,06
C125	3,1	92,42	99,90
P300	1,4	96,58	99,96
Curlex I	1,1	97,31	99,94
TB 1000	0,8	98,04	99,91
Geojute	0,7	98,29	98,34
SC 150 BN	0,4	99,02	99,98

Tableau 2.2. Comparaison des coefficients moyens de ruissellement et de perte de sédiments de 8 RECS [modifié de (Sutherland et Ziegler, 1996)]

- *la diminution de la vitesse du ruissellement.* L'eau qui ruisselle au travers d'un RECS ou d'un paillis rencontre des forces de résistance importantes qui diminuent la vitesse de son écoulement et sa trajectoire est plus tortueuse (Abrahams et al., 1994). Dans les mêmes conditions expérimentales, la vitesse du ruissellement qui atteint 2,5 cm.s⁻¹ sur une parcelle test, n'est plus que de 1,3 cm.s⁻¹ et 0,8 cm.s⁻¹ sur deux parcelles recouvertes d'un paillis de blé épandu à 0,5 t.ha⁻¹ et 2 t.ha⁻¹ respectivement (Lattanzi et al., 1974).

Dans (Findeling, 2001), l'auteur passe en revue les principaux travaux relatifs à l'incidence d'une couverture – de paillis, gravier, végétation etc. – sur l'écoulement de l'eau lors de son ruissellement sur le sol. Certaines des études se dégagent du formalisme empirique en utilisant un formalisme physique qui s'appuie sur une simplification des équations de Barré de Saint-Venant décrivant les écoulements à surface libre monodimensionnels [i.e. (Munoz-Carpena et al., 1993)].

Les RECS et les paillis génèrent par contre une ségrégation granulométrique des matériaux arrachés au sol puis transportés par les eaux de ruissellement [i.e. (Awadhwai et Thierstein, 1985), (Lopes et al., 1987), (Rustom et Weggel, 1993a,b,c), (Holdridge, 1996), (Sutherland et Ziegler, 1996)]. Ils augmentent la masse relative des éléments fins transportés : voir Figure 2.4. Or les petites fractions du sol (diamètre apparent <63 μm) sont d'importants vecteurs de transport des nutriments (Hart, 1982). Les RECS représenteraient donc un problème significatif en terme de lessivage et d'appauvrissement du sol si parallèlement ils ne réduisaient pas fortement l'érosion (Sutherland et al., 1998b).

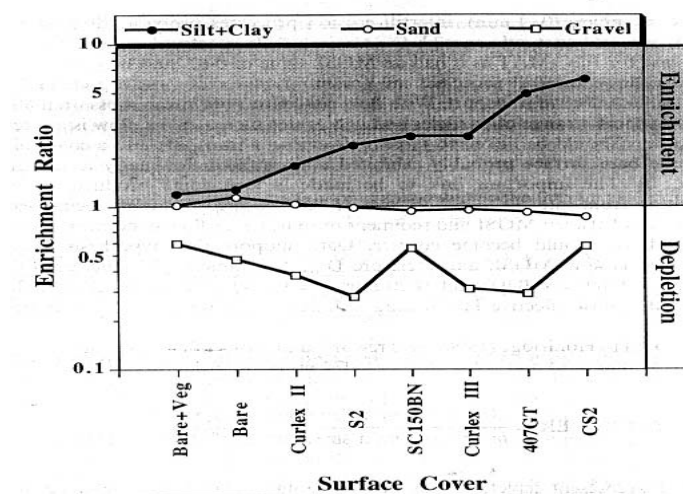


Figure 2.4. Comparaisons des taux d'enrichissement en gravier, sable et « limon/argile » des eaux de ruissellement (calculés par rapport au sol *in situ*) de 8 parcelles : une parcelle nu, une végétalisée et 6 recouvertes chacune par un RECS différent (Holdridge, 1996)

A titre indicatif, la ségrégation granulométrique ne reste pas constante au cours d'un événement pluvieux : la taille moyenne des éléments transportés s'accroît car l'infiltration diminue, le ruissellement augmente et avec lui la force d'arrachement des agrégats du sol (Sutherland et al., 1998b).

L'augmentation relative des éléments fins transportés quand il pleut et que le sol est recouvert par un RECS ou un paillis, a un autre effet négatif sur le sol. A la fin de la pluie, les sédiments fins en suspension se déposent dans les micro dépressions du sol. Au

fil des événements pluvieux, il se forme progressivement une croûte de sédimentation de texture et structure très différente de celle du sol en profondeur et surtout de conductivité hydraulique faible [i.e. (Awadhwai et Tiersen, 1985), (Dunne et al., 1991) et (Valentin et Bresson, 1992)].

2.1.2 LA PERFORMANCE DES RECS ET DES PAILLIS

Jusqu'ici, on a pu identifier que l'efficacité des RECS pour la lutte contre l'érosion superficielle des sols est liée à :

- *la nature et la taille de leurs fibres ou résidus.* Pour un même épandage, par exemple un paillis en résidus de tiges de maïs est plus efficace contre l'érosion superficielle du sol qu'un paillis en feuilles de maïs (Okwach et al., 1984). Un paillis en tiges d'avoine, dont le taux de couverture au sol est de 40%, a réduit significativement l'érosion par rapport au sol nu. Pour obtenir le même résultat avec une litière d'écorce de bois rouge ou un paillis en feuilles d'avoine, il a fallu amener le taux de couverture à 75% et 70% respectivement (Singer et Blackard, 1978). A ouverture de maille identique, les géotextiles en fibres de jute sont plus performants que les géotextiles en fibres de coco. En phase d'assèchement, les tresses en fibres de coco se dilatant, provoquent un décollement et donc une perte de contact du géotextile avec le sol (Rustom et Weggel, 1993c). Concernant la capacité de stockage qui participe à diminuer l'érosion (voir §2.1.1 p26), à biomasse égale, les paillis de maïs et de soja ont une recharge potentielle en eau (ou capacité de stockage) similaire. Cette capacité est par contre inférieure à celle d'un paillis de blé mis en œuvre dans les mêmes conditions (Savabi et Stott, 1994).
- *au mode de fabrication.* En effet, deux matelas de même composition (30% de coco et 70% de paille) et d'aspect structural proche se sont comportés différemment : une réduction de l'érosion de 99,9% avec CS2 et de 70% avec SC150 BN (Figure 2.5) (Holdridge, 1996). Ces différences pourraient être liées soit à leur mode de fabrication (modification de la rugosité de surface etc.) ou à la largeur des rouleaux (2,29 m pour CS2 et 1,83 m pour SC150BN).

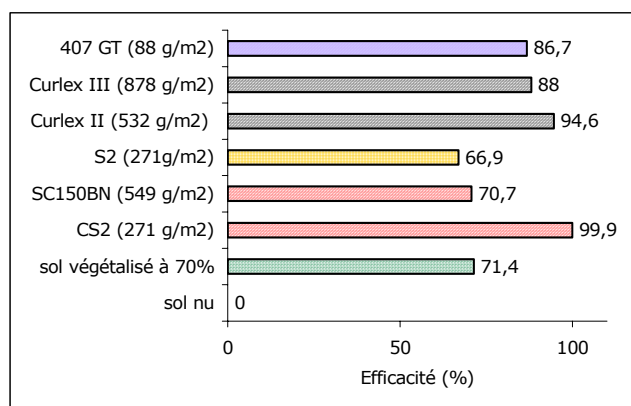


Figure 2.5. Efficacités (SY) de 6 RECS que l'on peut comparer aux SY du sol nu et d'un sol recouvert à 70% par de la végétation – les parcelles de pente 25° ont subi 3 événements pluvieux (Holdridge, 1996)

- *au taux de couverture au sol.* Un paillis de blé épandu à 0,5 t.ha⁻¹ (25% de couverture au sol) a réduit l'érosion de 35 à 40% par rapport au sol nu. Appliqué de manière plus dense, à 2 t.ha⁻¹ (61% de couverture au sol), les pertes en matériaux du sol ont été réduites de 75 à 80% par rapport au témoin (Lattanzi et al., 1974). Une relation exponentielle permet de relier le pourcentage de couverture au sol des paillis et le détachement des éléments sous l'impact direct des gouttes de pluie [i.e.(Laflen et Colvin,1981), (Morgan, 1982)]. Cette relation est de la forme :

$$\text{Pertes en sédiments} = D e^{\gamma \vartheta} \quad (2.6)$$

avec D , constante [m³]; γ , facteur d'échelle ; ϑ , le taux de couverture au sol du paillis [m².m⁻²]. Il existe un seuil minimal de couverture au sol en deçà duquel les paillis n'assurent plus une protection optimale. Il est estimé autour de 65-75% de recouvrement (Morgan, 1986). Concernant les géotextiles, plus la pente augmente, plus le pourcentage de couverture au sol doit être élevé pour obtenir une protection identique contre l'érosion (Thomson et Ingold, 1986).

- *au mode de répartition au sol.* Cet aspect a été étudié sur deux paillis en résidus de maïs, l'un a été épandu à 3 t.ha⁻¹, l'autre à 6 t.ha⁻¹. Trois modalités de répartition ont été testées :
 1. en bandes de 25 cm de large sur 20 cm de haut séparées les unes des autres par 1,5 m de sol nu
 2. répartition homogène sur toute la parcelle test
 3. uniquement disposé sur le tiers aval de la parcelle

Pour un même épandage, l'ordre d'efficacité en terme de réduction du ruissellement est $2 > 3 > 1$ (Sur et al., 1992).

Concernant la toile de jute (ou géotextile en jute), une protection partielle peut suffire à réduire significativement l'érosion à l'échelle de la parcelle entière (Crosaz et Dinger, 1999). Il se crée suffisamment de mini-terrasses pour freiner l'écoulement et réduire le taux d'érosion. Ainsi, sur deux ravines de pente 43% et 18 %, la toile de jute seule et judicieusement posée sur 38 % pour la ravine 1 et 45 % pour la ravine 2 (Figure 2.6), réussit à diminuer respectivement de 45 % et 65 % les quantités de matériaux érodés et récupérés à l'exutoire.



Source : (Crosaz et Dinger, 1999)

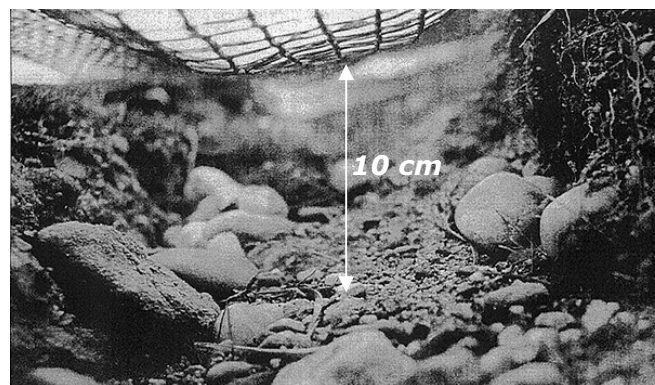
Figure 2.6. Photographie de la ravine 2 (ravine COL) recouverte à 45% par de la toile de jute – Sol : marnes noires : Site expérimental de Draix.

- *la fixation sur le sol.* Les géotextiles sont plus efficaces contre l'érosion superficielle quand ils sont ancrés et bien plaqués sur le sol. On les fixe généralement à l'aide d'agrafes métalliques au nombre de 5 à 7 par m² et on travaille les ruptures de pente par un écrêtage de manière à éviter la formation d'une casquette en leur sommet qui soulève le géotextile : voir Figure 2.7. Les paillis qui sont des revêtements non agglomérés (contr. géotextiles ou matelas de fibres enfermés dans un treillis) sont constitués de résidus indépendants qui s'écartent les uns des autres sous l'impact direct des gouttes de pluie offrant à l'érosion l'occasion de se relancer sur les zones dénudées [i.e. (Kramer et Meyer, 1969) et (Foster et al., 1982a)]. Une solution fiable consiste à les coller au sol avec de l'asphalte [(Kay, 1978) et (Pla et al., 1987)]. Mais dans un contexte agricole ou dans le cadre d'une lutte concertée alliant le paillis avec de la végétation semée, la présence

d'asphalte peut compromettre la germination des graines (Sheldon et Bradshaw, 1977).



Source : (Dinaer et Maanin, 1999)



Source : (Marlouzel, 1999)

Figure 2.7. Talus recouvert pour partie par de la toile de jute à 600 g/m² avec une casquette en son sommet et exemple de ravinement observé sous un géotextile synthétique décollé du sol

L'efficacité des géotextiles en particulier dépend du type de sol et de l'intensité de la pluie (Rickson, 1987,88) et les bénéfices de leur utilisation sont proportionnels à l'adversité de l'environnement dans lequel ils seraient appliqués.

2.2 L'effet des RECS et des paillis sur le microclimat dans le sol et son proche voisinage

2.2.1 L'EFFET SUR LA TEMPERATURE DU SOL

Il ressort de la littérature scientifique que la température du sol sous un RECS ou un paillis dépend de :

- *la nature des éléments constitutifs du RECS ou du paillis.* Des études anciennes comparaient déjà l'influence de différents revêtements sur les

températures du sol [i.e. (Waggoner et al., 1960), (Hopen, 1965), (Inada, 1973), (Unger, 1978)]. Parmi ces revêtements, on pouvait trouver divers paillis, des films de polyéthylène ou d'aluminium, etc. Les résultats ont montré par exemple que les films de polyéthylène transparents augmentent le plus efficacement la température du sol car ils éliminent l'évaporation et produisent un effet de serre. De fait, ils sont utilisés pour contrôler le développement de certaines plantes pathogènes qui résistent mal aux fortes températures durant la saison d'été. A l'inverse, de par sa haute réflectivité et sa basse émissivité, un film d'aluminium diminue les températures dans le sol. Les paillis ont aussi un effet modérateur sur la température du sol (bien que cette baisse soit moindre que dans le cas de l'aluminium). Autrement dit, ils ralentissent les transferts thermiques entre le sol et l'atmosphère (Sauer et al., 1998). Sous climat tropical et à proximité de la surface, la présence d'un paillis abaisse considérablement les températures extrêmes du sol et diminue aussi souvent les températures moyennes le long du profil (Buisnière, 1991). Pour prendre un autre exemple, l'effet de quatre sortes de revêtement a été par exemple étudié sur la température d'un sol au Kenya et leur impact sur la croissance du café (Gurnah et Mutea, 1982). L'analyse des résultats pour les températures montre qu'un paillis constitué d'herbe réduit en moyenne la température de l'ordre d'une unité mesurée par rapport au témoin. Un film de polyéthylène transparent peut augmenter la température de +10°C, le polyéthylène noir, de +7°C. Le polyéthylène de couleur blanche amortit cet effet d'augmentation de la température du sol : +4°C supérieur par rapport au sol nu. En Inde, une expérience d'une durée de 3 mois réalisée sur une plantation de cocotiers (*Coco Nucifera L.*) a permis de tester l'incidence d'un paillis d'herbe d'*Eupatorium Odorata* à 5 t.ha⁻¹ (Varadan et Rao, 1983). Les auteurs ont observé à la profondeur de 10 cm dans le sol, une réduction de la température moyenne journalière de -1°C à -6°C et une réduction des amplitudes thermiques de -3°C à -10°C sur tout le profil de température du sol. Cette diminution des températures est expliquée par la réduction diurne de l'énergie incidente à la surface du sol et par l'amortissement nocturne du flux de chaleur libéré par le sol.

- *la largeur d'épandage.* L'étude du régime des températures du sol couvert par des revêtements en polyéthylène transparent de largeur variable, a montré que la chaleur du sol diminue du centre vers les bords (Mahrer et Katan, 1981). Ainsi, un revêtement étroit fournit moins de chaleur efficace qu'un revêtement plus large. Le Tableau 2.3 montre l'effet de la largeur du

revêtement sur les températures dans le sol à différentes profondeurs en son centre.

PROFONDEUR DU SOL (CM)	LARGEUR DU COUVERT [CM]							
	10	20	40	60	80	100	150	200
5	0,54	0,69	0,84	0,89	0,92	0,98	1,0	1,0
15	0,25	0,42	0,67	0,78	0,87	0,92	0,97	1,0
30	0,19	0,31	0,45	0,62	0,75	0,81	0,94	1,0

Tableau 2.3. Efficacité relative de mulchs en polyéthylène transparent sur l'augmentation du maximum des températures du sol au centre du mulch, en fonction de sa largeur (Mahrer et Katan, 1981)

A l'inverse sous des bandes de paillis en résidus de végétaux, il existe un flux de chaleur latéral du sol nu en direction des zones paillées (Hares et Novak, 1992b). La température du sol diminue du centre vers les bords.

- *du taux de couverture.* Il ressort de la comparaison des températures du sol sous quatre paillis de riz épandus à 2 ; 4 ; 6 et 12 t.ha⁻¹ avec celles d'une parcelle témoin, une réduction moyenne du maximum des températures respectivement de -3,3 ; -4,1 ; -4,5 et -5,4°C par rapport au sol nu (Lal et al., 1980). Ainsi, le maximum des températures dans le sol est d'autant plus bas que le taux d'épandage est important. Pour prendre un autre exemple, l'efficacité sur le régime thermique du sol de 3 modalités de répartition de nattes en fibres de coco à 5,3 t.ha⁻¹ et 1,5 cm d'épaisseur a été évalué par rapport au sol nu. Ces 3 modalités étaient : en bandes de 5 cm de large, en bande de 15 cm de large et en couverture totale. La plus efficace de ces modalités est le paillage de couverture totale qui régule le mieux les températures du sol pour la germination des semences en réduisant les amplitudes thermiques (Bristow et Abrecht, 1989).
- *du mode de répartition.* En agriculture, un paillis réparti en bande sur le rang est plus efficace qu'un paillis en bande sur l'inter-rang (Lal, 1978). En effet avec un paillis sur le rang, le sol est couvert à la fois par le paillis et par l'ombrage de la culture, ces deux éléments participant ensemble à diminuer la température du sol.

Les études précédentes ont toutes été réalisées pendant la saison chaude de l'année. En hiver, sous un paillis de résidus, le front de congélation pénètre moins profondément dans le sol [i.e. (Benoît et al., 1986) et (Sharrat, 2002)]. Au printemps, l'effet d'un paillis de maïs sur la température du sol s'est manifesté par le dégel du sol couvert une à deux semaines plus tôt en comparaison du sol nu (Benoît et al., 1986).

Ces observations reflètent la modification du bilan d'énergie de surface par rapport au sol nu : $Rn - H - L_vE - \mathcal{D} = 0$ avec $Rn = (1 - \alpha) RG + \varepsilon(RA - \sigma T_s^4)$ (2.7)

où Rn [Wm^{-2}] est le rayonnement net ; H [Wm^{-2}], le flux de chaleur sensible ; L_vE [Wm^{-2}], le flux de chaleur latente ; $\mathcal{D}$ [Wm^{-2}], le flux de chaleur dans le sol ; RG [Wm^{-2}] est le rayonnement solaire incident de courte longueur d'onde ; RA [Wm^{-2}], le rayonnement atmosphérique incident de grande longueur d'onde ; α [-] l'albédo de la surface ; ε [-], l'émissivité de la surface qui se comporte comme un corps gris ; σT_s^4 [Wm^{-2}], le rayonnement de grande longueur d'onde émis par la surface à la température T_s [K] (σ est la constante de Stefan Boltzman). De par sa position intermédiaire entre le sol et l'atmosphère, le RECS ou le paillis interfère sur l'ensemble des échanges entre les deux compartiments. Le bilan d'énergie reste nul (loi de conservation de l'énergie) mais la présence du RECS ou du paillis en modifie les termes : Figure 2.8.

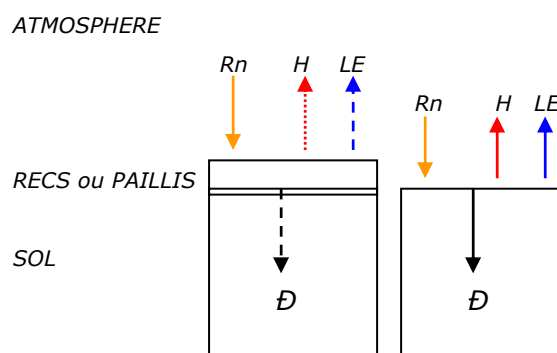


Figure 2.8. Schéma illustratif des bilans d'énergie dans les systèmes SGA et SA

2.2.2 L'EFFET SUR LE STOCK D'EAU DANS LE SOL

De multiples observations attestent d'une diminution de l'évaporation sous un paillis. Par exemple, au bout de 16 semaines, un paillis de blé épandu au taux de $11 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ a réduit l'évaporation de 300% par rapport au témoin (Unger et Parcker, 1976).

L'assèchement d'un sol nu observe trois phases (Idso et al., 1974). Le sol recouvert d'un paillis continue de suivre les trois phases d'assèchement valables pour le sol nu (Bond et Willis, 1969,70) mais la présence du paillis modifie suffisamment l'une d'entre elle pour avoir un effet certain sur le stock d'eau dans le sol :

1. Lorsque la surface est humide, l'ascension de l'eau dans le sous-système sol-paillis s'effectue entièrement en phase liquide et le taux d'évaporation à l'interface paillis / atmosphère est alors constant et égal à l'évaporation potentielle imposée par les conditions climatiques. C'est la phase I.

2. Lorsque le sous-système accuse les premiers signes d'assèchement qui se produisent dans le paillis, un processus de régulation s'installe et le taux d'évaporation en surface du paillis chute rapidement par rapport au taux potentiel. C'est la phase II.
3. Lorsque l'assèchement progresse dans le sol, on entre en phase III où le taux d'évaporation devient particulièrement faible et relativement constant. L'évaporation diminue alors bien davantage parce que le sol est très sec en surface que grâce à la présence du paillis.

C'est donc avant tout en phase II que le paillis exerce toute son efficacité à ralentir directement par un effet de résistance la remontée de l'eau liquide vers la surface du sous-système sol-paillis. La phase II dure en conséquence plus longtemps : par exemple, dans les mêmes conditions expérimentales, 5 jours pour le sol nu contre 25 jours pour un sol recouvert d'un paillis à 6,7 t.ha⁻¹ (Bond et Willis, 1969). Au terme de l'assèchement du sol, à la fin de la phase III, l'évaporation cumulée est par contre très similaire à celle du sol nu indépendamment de la quantité de paillis épandue sur le sol. En conséquence de quoi, la capacité d'un paillis à conserver le stock d'eau du sol s'exerce avant tout sur le « court terme » : il est efficace si les pluies sont peu espacées dans le temps. Dans (Brun et al., 1986), les auteurs confirment ce constat : les différences d'évaporation cumulée entre un sol nu et un sol recouvert par un paillis de blé ont été significativement affectées par la fréquence et la quantité des précipitations.

Plus la densité d'un paillis est faible, moindre est l'évaporation cumulée du sous-système sol-paillis au terme de la phase II (paradoxe de « Buckingham » ou effet « Buckingham », 1907) (Bond et Willis, 1970). En effet, pour une même demande évaporative imposée par l'atmosphère, l'augmentation de la densité d'un paillis a pour effet d'allonger la durée de la phase II et bien que le taux d'évaporation soit plus faible sous un paillis dense, au terme de la phase II, l'évaporation totale s'avère malgré tout plus élevée sous un paillis de forte densité que sous un paillis de densité plus faible. Il se forme en effet moins vite une couche de sol sec qui limite alors de manière très importante le phénomène d'évaporation inchoatif alors que le stock d'eau dans le sol est toujours conséquent. Mais si la demande évaporative de l'atmosphère augmente, il faut malgré tout augmenter la densité du paillis pour obtenir un même taux d'évaporation en phase II.

En résumé, les paillis réduisent l'évaporation totale du sol si les pluies ne sont pas trop espacées dans le temps. Dans ce contexte, pour une même demande évaporative de l'atmosphère, un paillis de faible densité est plus efficace qu'un paillis de densité plus élevé.

La réduction de l'évaporation totale du sol sous un paillis reflète la modification du bilan de masse par rapport au sol nu. D'une manière générale, son équation peut s'écrire :

(2.8)

$$\Delta S = P - R - F - \exists$$

où ΔS [mm] est la variation du stock d'eau dans le profil de sol considéré ; P [mm], les précipitations ; R [mm], la quantité d'eau ruisselé ; F [mm], la quantité d'eau qui s'infiltre au-delà du profil et $\exists$ [mm], le cumul de l'évaporation du sol. De par sa position intermédiaire entre le sol et l'atmosphère, le RECS ou le paillis interfère sur l'ensemble des échanges entre les deux compartiments. Le bilan de masse reste nul (loi de conservation de la masse) mais la présence du RECS ou du paillis en modifie les termes : Figure 2.9.

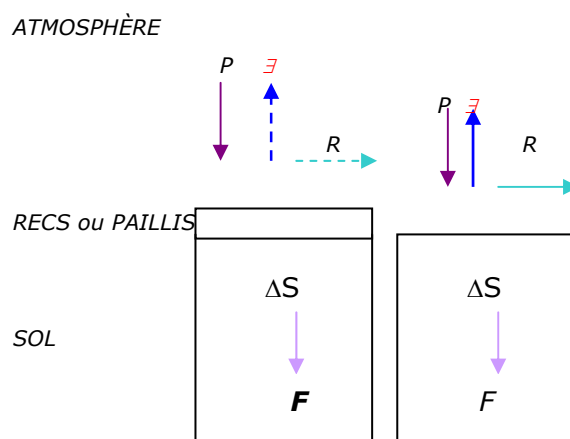


Figure 2.9. Schéma illustratif du bilan de masse des systèmes SGA et SA

2.2.3 L'EFFET SUR LES ÉCHANGES THERMIQUES ET HYDRIQUES AU VOISINAGE DU SOL

Les paillis influencent la transmission des radiations, de la chaleur et de l'eau entre la surface du sol et l'atmosphère (Bristow et al., 1986). Les échanges d'eau sous forme vapeur et d'énergie dans un paillis ne se produisent pas seulement par diffusion moléculaire comme dans le sol mais aussi par le biais de transferts turbulents [i.e. (Kimball et Lemon, 1971), (Campbell et al., 1980) et (Tanner et Shen, 1990)].

Novak et al. (2000 a,b,c) ont réalisé des mesures fines et sont les premiers à proposer une description détaillée des phénomènes physiques qui rendent compte des échanges turbulents au travers d'un paillis d'orge de 10 t.ha⁻¹ et 6,6 cm d'épaisseur au cours d'un cycle nycthémeral. Ils se sont basés sur un suivi des flux de chaleur sensible et latente mesurés à différentes cotes dans le paillis (Figure 2.14 et 2.15). Ils se sont notamment appuyés sur l'évolution journalière du profil des températures, sur des

mesures de rayonnement net et de vitesse du vent à différentes profondeurs dans le paillis (Figures 2.10, .11 et .12).

2.2.3.1 L'effet sur le flux de chaleur sensible

Pendant le jour, les radiations solaires incidentes pénètrent dans les 20% supérieurs du paillis où elles sont absorbées (Figures 2.10 et 2.11).

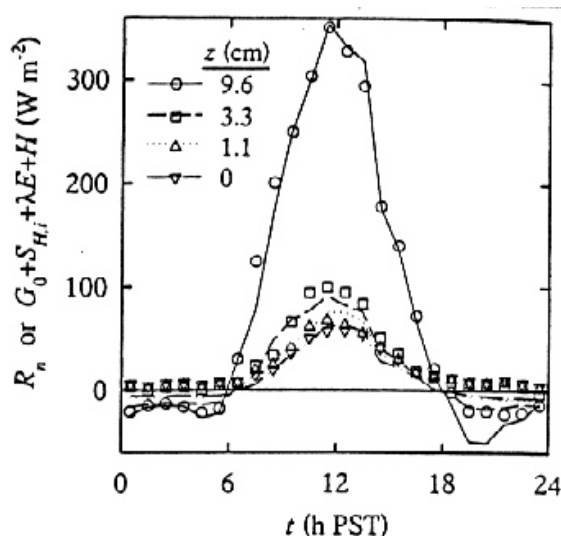


Figure 2.10. Evolution du rayonnement net à différentes hauteurs dans un mulch en paille (ou paillis) à 10 t.ha^{-1} au cours d'une journée (Novak, 2000b)

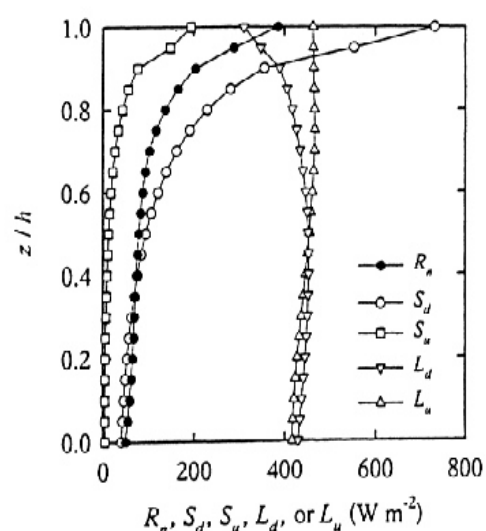


Figure 2.11. Profils verticaux modelisés des flux de densités des radiations courtes incidentes et réfléchies (S_d et S_u) ainsi que des radiations longues incidentes et réfléchies (L_d et L_u) et de la densité du flux de rayonnement net (R_n) à l'intérieur d'un paillis à 10 t.ha^{-1} durant une journée (Novak, 2000c)

En conséquence, la température du paillis augmente dans cette zone. Ce phénomène est surtout visible au bas du premier tiers supérieur du paillis car au dessus on observe un gradient négatif des températures : voir Figure 2.13. En effet, parallèlement à l'absorption du rayonnement incident, un transfert de chaleur sensible en direction de l'atmosphère dissipe la plupart du rayonnement net absorbé. Ce flux de chaleur sensible s'intensifie à mesure qu'on monte vers l'interface paillis-atmosphère car dans cette région du paillis, la vitesse du vent s'accroît rapidement le long d'un profil exponentiel : Figure 2.12. Par ailleurs, c'est au moyen d'une structure turbulente formée de Vortex d'environ 2 cm que s'effectuent l'essentiel de ces transferts de chaleur sensible.

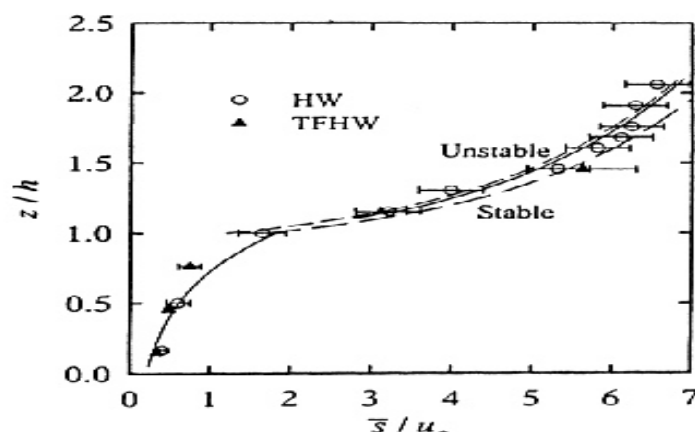


Figure 2.12. Mesures et profil vertical ajusté de la vitesse du vent normalisé par la vitesse de friction pour un paillis à 10 t.ha⁻¹ (Novak, 2000a)

Dans le tiers inférieur du paillis, qui n'a pas été directement sollicité par les radiations solaires incidentes (toutes absorbées dans les 20% supérieurs du paillis), apparaît un flux de chaleur sensible de moindre importance partant de la zone « chaude » des deux-tiers du paillis et dirigé vers le sol (Figure 2.13). La chaleur sensible circule dans cette zone essentiellement par conduction moléculaire - de fibre en fibre de paillis -.

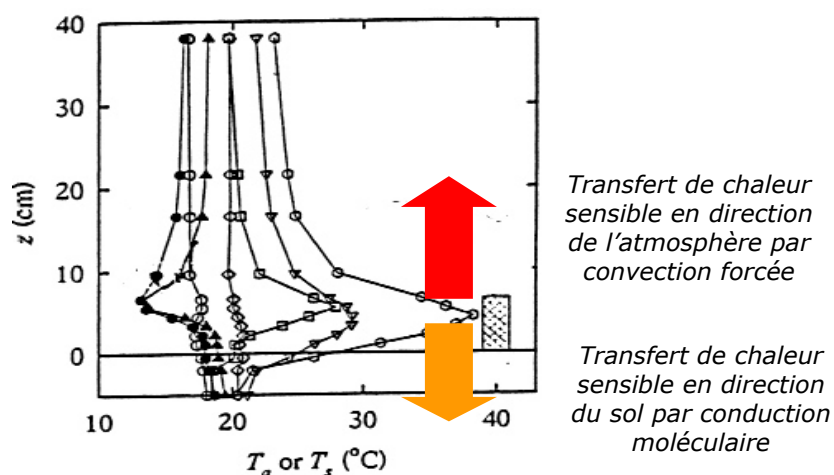


Figure 2.13. Schématisation des transferts de chaleur sensibles dans un paillis à 10 t.ha⁻¹ au cours du jour (Source du graphique : Novak et al. (2000))

Au crépuscule, le rayonnement incident devient négligeable (Figure 2.10), le flux de chaleur sensible en direction de l'atmosphère ralentit d'intensité puis s'inverse dans la nuit quand la température du paillis devient inférieure à celle de l'atmosphère (Figures 2.14 et 2.13). Les transferts s'opèrent alors dans le sens atmosphère-paillis. Avec le vent qui faiblit dans la nuit, ces flux passent sous le régime de la convection libre. Le sol maintient par conduction moléculaire les basses couches du paillis à une température supérieure aux zones plus éloignées. Car le sol sous-jacent possède une capacité de stockage de la chaleur supérieure à celle du paillis, il est en plus protégé d'une

déperdition excessive d'énergie par la couverture de paillis, la chaleur nocturne y est mieux conservée.

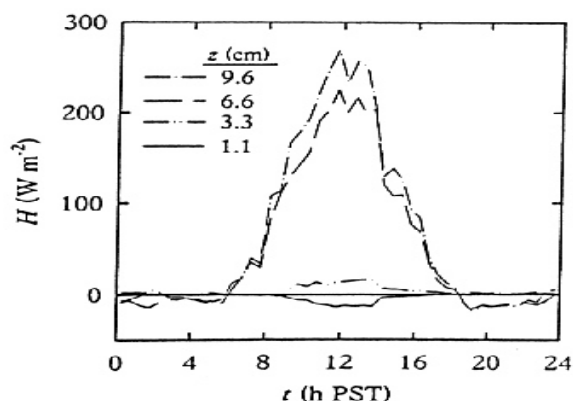


Figure 2.14. Flux de chaleur sensible à différentes hauteurs dans un paillis à 10 t.ha⁻¹ au cours d'une journée (Novak, 2000b)

2.2.3.2 L'effet sur le flux de chaleur latente

Les transferts de masse dans le paillis s'effectuent essentiellement en phase vapeur contrairement au sol sous-jacent.

Indépendamment du degré d'assèchement du paillis, le régime hydrique au-dessus de la couche de paillis ressemble d'une manière générale à celui rencontré au voisinage du sol nu en phase avancée de dessèchement. Globalement, l'évaporation atteint un pic tôt le matin pour ensuite diminuer régulièrement durant la journée : Figure 2.15.

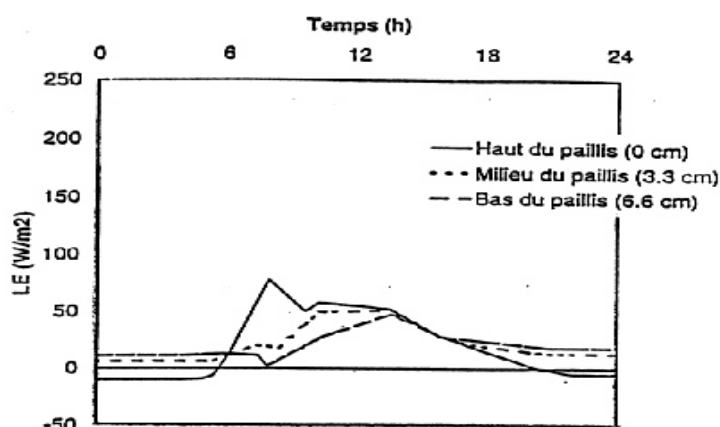


Figure 2.15. Flux de chaleur latente à différentes hauteurs dans un mulch en paille à 10 t.ha⁻¹ au cours d'une journée (Novak, 2000b)

La nuit, le paillis se charge en humidité de rosée sous l'effet de la condensation nocturne de la vapeur d'eau atmosphérique alors alourdie par la chute des températures

de l'air (LE négatif en haut du paillis) (Figure 2.15). Il se charge aussi par le bas en humidité de condensation de la vapeur qui du crépuscule à l'aube, s'évapore depuis le sol (LE positif au bas du paillis).

En début de matinée, le flux de chaleur latente augmente rapidement dans la zone supérieure du paillis alors qu'elle décline au bas du paillis. Cette phase correspond au dessèchement du paillis qui assure alors à lui seul l'intégralité du flux évaporatif à l'interface paillis/atmosphère. L'eau du sol n'est sollicitée que plus tard en cours d'après-midi alors que le paillis est sec. C'est alors qu'on observe une diminution du flux de chaleur latente dans le haut du paillis et une augmentation au bas du paillis. En effet, alors que le paillis accuse des signes certains d'assèchement, le sol est largement convoqué pour répondre à la forte demande évaporative de l'atmosphère. En fin d'après-midi, le transfert de vapeur continue de décroître en haut du paillis puis s'annule et change de signe pour atteindre un régime de nuit. Dans les zones basses du paillis la chute est moindre et le flux de chaleur latente conserve une valeur positive durant la nuit.

Pour ce qui est du sol sous-jacent, le bilan énergétique du sol sous le paillis ressemble à celui d'un sol nu humide : le flux de chaleur en direction du sol et le flux de chaleur latente sont grands devant le flux de chaleur sensible (Novak et al., 2000 b).

Dans les milieux très poreux comme certains paillis, les échanges s'opèrent essentiellement par convection libre ou forcée (Novak et al., 2000a). Ainsi, la K-théorie⁷ s'avèrerait inadaptée pour calculer les flux de masse et de chaleur entre le paillis et l'atmosphère car la couche d'air dans un paillis très poreux n'est pas stabilisée.

Le calcul du nombre de Richardson (Ri) qui est notamment fonction des écarts de température et des écarts de vitesse du vent entre deux cotes dans le paillis, détermine s'il y a convection libre ou non. Une convection libre est installée dans le paillis pour $Ri \leq -1$ [i.e. (Itier, 1981) et (Findeling, 2001)]. La convection libre se produit par vent faible sous l'action des gradients thermiques et ce phénomène tend à équilibrer les températures et teneurs en humidité des deux compartiments : le paillis et l'atmosphère. Pour la convection forcée, plus le vent est fort, moins sa pénétration dans le paillis est importante (Novak et al., 2000a).

⁷ La K-Théorie fait référence à l'hypothèse selon laquelle les flux par convection sont proportionnels aux gradients des quantités transportées.

2.3 La relation RECS ou paillis / Végétation semée

Les études sur l'incidence d'un RECS ou d'un paillis sur la végétation semée concernent essentiellement les paillis et quelques RECS de nature organique. Contrairement aux revêtements synthétiques, ils présentent l'avantage de servir au final d'amendement organique pour le sol.

Les réponses de la plante à la présence d'un RECS dans son biotope ont été étudiées sur différentes espèces essentiellement en champ et avec des paillis [i.e. (Othieno et Ahn, 1980), (Prove et Truong, 1988), (Olasantan, 1999), (Tolk et al., 1999) et (Kushwaha et al., 2000)]. Cependant certains auteurs ont aussi travaillé avec des géotextiles ou/et des matelas [i.e. (Sheldon et Bradshaw, 1977), (Bungolo et al., 1989), (Parkinson, 1989), (Scuby, 1991), (Israelsen et Urroz, 1992a,b), (Rickson, 1995), (Urroz et Israelsen, 1995), (Mapa, 1996) et (Sutherland et al., 1998a,b)].

Les études s'appuient sur des observations et mesures réalisées in situ sur des parcelles tests dont les surfaces sont d'une dizaine de m² sauf deux d'entre elles réalisées sur des surfaces plus restreintes en laboratoire sous simulateur de pluie et éclairage artificiel [(Israelsen et Urroz, 1992a,b) et (Urroz et Israelsen, 1995)] ainsi qu'une expérimentation qui s'est déroulée sous serre et avec des barquettes (Sutherland et al., 1998).

Les paramètres retenus pour quantifier l'incidence des RECS ou des paillis sur la végétation semée sont pour la plupart directement issus des mesures comme la hauteur moyenne des plants [cm], la masse sèche par unité de surface ou la biomasse totale [g.m²], les biomasses aérienne ou racinaire [g.m⁻²], la production de graines [Mg.ha⁻¹]. Certains utilisent aussi des coefficients dont les principaux cités dans la littérature sont : l'indice de germination, à savoir le pourcentage de graines germées sur le pourcentage de graines non germées et l'indice de changement de couverture végétale obtenu par le quotient : différence de couverture végétale entre la parcelle test et le témoin divisé par la couverture végétale de la parcelle témoin.

2.3.1 L'EFFET « ANTI-ÉROSIF » ET LA VÉGÉTATION

Une forte corrélation négative a été établie entre le coefficient de ruissellement – ROC – et la biomasse d'un semis d'orge ($r=-0,46$ et $p=0,032$) (Urroz et Israelsen, 1995). Plus le RECS a un coefficient ROC bas (signe d'une forte infiltration), plus le nombre de plants d'orge par unité de surface est élevé et plus la hauteur des plants est grande.

En réduisant le risque de formation d'une croûte de battance, les RECS facilitent la colonisation racinaire des jeunes pousses (Bungolo et al., 1989).

2.3.2 L'EFFET « MICROCLIMATIQUE » ET LA VÉGÉTATION

Une meilleure installation de la végétation semée est attribuée à la réduction de la perte en eau sous les RECS dont l'importance semble primordiale lors du processus critique de l'imbibition des graines [i.e. (Sheldon et Bradshaw, 1977) et (Urroz et Israelsen, 1995)].

Les principaux résultats d'une étude sur les répercussions de cinq RECS organiques⁸ sur la température, l'humidité du sol associée à la productivité de biomasse végétale sont récapitulés dans le Tableau 2.4 suivant.

TYPE DE COUVERTURE	TEMPERATURE MOYENNE A 8 CM DANS LE SOL [°C]	TEMPERATURE MINIMALE MOYENNE A 8 CM DANS LE SOL [°C]	TEMPERATURE MAXIMALE MOYENNE A 8 CM DANS LE SOL [°C]	HUMIDITE DU SOL [%]	BIOMASSE [g.m ⁻² .jour ⁻¹]
Sol nu	29,92 ^{bc}	24,29 ^a	40,61 ^g	6,3 ^a	0,000 ^a
Geojute (géotextile ; OA=60)	30,11 ^c	24,45 ^{ab}	38,89 ^f	13,1 ^b	0,014 ^a
C125 (Matelas 100% coco)	29,40 ^{ab}	24,51 ^{abc}	36,68 ^b	18,4 ^c	0,525 ^b
SC150BN (Matelas 100% paille)	29,44 ^{ab}	24,69 ^{bc}	37,06 ^{bc}	16,9 ^c	0,869 ^{bc}
Curlex I (Matelas 100% excelsior)	29,16 ^a	24,73 ^c	35,94 ^a	18,0 ^c	1,157 ^c
Futerra (Matelas 100% laine)	30,15 ^c	25,14 ^d	37,31 ^{cd}	16,0 ^c	0,485 ^b

Tableau 2.4. Analyse de la variance et comparaison multiple pour différentes températures du sol, pour l'humidité totale du sol et la production de biomasse entre cinq RECS organique et le sol nu (modifié de Sutherland et al., 1998a,b). – Pour chaque colonne, les valeurs moyennes avec la même lettre en exposant ne sont pas significativement différentes au risque 5%.

On voit que les RECS organiques garantissent une humidité plus élevée dans le sol par rapport au témoin. Des différences significatives existent cependant entre RECS. Par exemple, la toile de jute qui est ouverte à 60% est une barrière significativement moins efficace pour l'évaporation que les matelas de fibres de couverture totale. Les moyennes minimales des températures varient peu entre traitements alors que la moyenne des températures maximales sous certains RECS peut différer de 5°C avec le sol nu. Plus l'humidité du sol est élevée et la moyenne des températures maximales du sol est basse, plus la production de biomasse est importante.

La baisse conséquente des températures du sol sous un RECS ou un paillis peut dans certains cas être préjudiciable pour la végétation. Ainsi, sous un épais paillis d'herbe coupée, la croissance de jeunes plants de thé clonés a pris du retard et ce dernier n'a pas été rattrapé au terme de la période de végétation (Othieno et Ahn, 1980). Les basses

⁸ Se reporter au Tableau en Annexe I pour leur description

températures mesurées dans le sol sous des paillis affectent en particulier la hauteur des plants (Burrows et Larson, 1962). Au Queensland en Australie sous des résidus de canne à sucre, le délai observé dans la colonisation racinaire de la culture par rapport au témoin, a été attribué à la baisse des températures du sol de 2 à 4°C (Prove et Truong, 1988). Sous certains climats la combinaison entre une humidité excessive du sol et une basse évaporation sous un paillis engendre des conditions anaérobies qui perturbent la croissance des plantes (Rickson, 1995).

En diminuant l'intensité du gel-dégel dans le sol en hiver, les paillis tendent à maintenir la structure fragmentaire des sols aptes à la culture [i.e. (Benoît et al., 1986) et (Sharrat et al., 1998)] ; la stabilité des agrégats du sol déclinant généralement avec la répétition du gel et du dégel [i.e. (Edwards, 1991) et (Lehrsch et al., 1991)].

2.3.3 L'EFFET « BARRIERE PHYSIQUE » ET LA VÉGÉTATION

Les RECS et les paillis réduisent la quantité des radiations solaires qui parviennent à la surface du sol (Rickson, 1995). S'agissant de la germination, on estime que près de 70% des espèces végétales ont des semences à photosensibilité positive : leur germination est favorisée par la lumière blanche. Cependant, cette photosensibilité disparaît quasi totalement quand les semences ont été conservées au sec avant d'être semées (Côme, 1970). La lumière n'est par conséquent pas un facteur réellement limitant pour la germination des graines ainsi conditionnées. Par contre, les plantules ont besoin de lumière pour réaliser la photosynthèse et poursuivre leur croissance. La présence d'un revêtement peut à ce stade compromettre le développement de la végétation semée. Dans ce sens, on considère qu'un paillis épandu à un taux supérieur à 5 t.ha⁻¹ affecte dès lors négativement la croissance de la culture en réduisant trop la luminosité sous le paillis (Meyer et al., 1970).

Les RECS et les paillis ont le désavantage de s'opposer physiquement à l'émergence de la végétation semée (Rickson, 1995) et concernant plus précisément les géotextiles, de nombreuses observations attestent d'un étranglement possible de la végétation herbacée dont les touffes coincées dans la maille, ne peuvent plus croître en diamètre (Moiroud, 1997).

Les géotextiles en jute protègent par contre la végétation semée du piétinement (Parkinson, 1989 et Scruby, 1991).

2.3.4 L'EFFET SUR LES MICROORGANISMES DU SOL ET LA VÉGÉTATION

Source de carbone et d'azote, les paillis favorisent le développement de microorganismes spécifiques de leur dégradation parfois appelés biomasse « zymogène » [i.e. (Neel, 1996) et (Kushwaha et al., 2000)]. Les microorganismes se développent en effet rapidement en présence de matière organique (Neel, 1996). Ce sont pour l'essentiel des bactéries et des champignons cellulolytiques pourvus d'un complexe qui comprend toujours plusieurs enzymes agissant en synergie [i.e. (Crovetto Lamarca, 1996) et (Davet, 1996)]. Le non remaniage (ou travail) du sol sous les paillis tend en plus à favoriser le développement d'une vie microbienne qui est assez comparable à celle du sol des prairies ou forêts (Crovetto Lamarca, 1996). L'effet des paillis précédemment décrit §2.2 sur la température et sur la disponibilité en eau du sol tend aussi à faciliter le développement de la vie microbienne dans le sol (Sharrat et al., 2002). Par exemple, quand les résidus des récoltes sont laissés sur place, le gel pénètre moins profondément dans le profil de sol en hiver, le sol est comparativement plus chaud et maintenu plus humide [i.e. (Sharrat et al., 1998) et (Sharrat, 2002)] or les populations microbiennes du sol déclinent généralement quand le sol commence à geler et augmentent rapidement quand il dégèle au printemps (Skogland et al., 1988).

La dynamique de dégradation des paillis dépend avant tout de la nature chimique des éléments constitutifs de leur matrice solide [i.e. (Findeling, 2001) et (Bending et al., 2002)]. On considère en général 4 grandes catégories de composants organiques qui se différencient par leur vitesse de décomposition. Par ordre décroissant, on a : la matière organique facilement décomposable puis les hémi-cellulose, la cellulose et enfin la lignine. La dynamique de dégradation dépend de nombreux autres facteurs comme la température et l'humidité du sol, qui au-delà de leur rôle direct sur les liaisons chimiques, régulent comme on l'a mentionné dans le paragraphe précédent l'activité des micro-organismes. La présence dans le sol de composés phénoliques et terpénoïdes peut aussi influencer le taux de décomposition de la matière organique à cause d'un effet inhibiteur direct sur les organismes saprophytiques (Palm et Sanchez, 1991). On peut aussi citer le pH du sol qui affecte l'activité des bactéries et des communautés fongiques (Cornelissen et Thompson, 1997) et la qualité de la matière organique présente dans le sol (Bending et al., 2002). Par contre, certaines propriétés physiques et chimiques du sol comme sa texture ou sa teneur en matière organique auraient un effet mineur sur la décomposition de la matière organique ajoutée [i.e. (Gunapala et al., 1998) et (Thomsen et al., 2001)]. La surface de contact entre le paillis et le sol a aussi beaucoup d'importance (Davet, 1996).

La vitesse de décomposition d'un paillis s'apparente à celle de la matière organique fraîche du sol par opposition à la matière organique humifiée qui est davantage stabilisée (Findeling A., 2001). Les principales lois de cinétique de la dégradation d'un substrat (S) sont répertoriées Tableau 2.5.

NOM	EQUATION	k	Avec :
Cinétique d'ordre 0	$-\frac{dS}{dt} = k$	$k = v_{\max} X_0$	S: concentration en substrat à l'instant t dans la solution [kg.l ⁻¹] S ₀ : concentration en substrat initiale dans la solution [kg.l ⁻¹] X ₀ : concentration initiale en population microbienne dans la solution [kg.l ⁻¹] k: constante cinétique dont l'unité varie suivant la loi considérée k': constante [kg.l ⁻¹] k _s : constante [kg ⁻¹] V _{max} : vitesse maximale de décomposition [Kg.jour ⁻¹]
Cinétique d'ordre 1	$-\frac{dS}{dt} = kS$	$k = v_{\max} X_0 / k_s$	
Logarithmique	$-\frac{dS}{dt} = k(S_0 + X_0 - S)$	$k = v_{\max}$	
Logistique	$-\frac{dS}{dt} = kS(S_0 + X_0 - S)$	$k = v_{\max} / k_s$	
Monod sans croissance	$-\frac{dS}{dt} = k \frac{S}{k' + S}$	$k = v_{\max} X_0$	
Monod avec croissance	$-\frac{dS}{dt} = k \frac{S(S_0 + X_0 - S)}{k' + S}$	$k = v_{\max}$	

Tableau 2.5. Principales lois cinétique de dégradation d'un substrat S d'après (Neel, 1996)

Les lois d'Arrhénius ou de Van't Hoff relient la température à la constante cinétique k. Elles donnent un résultat semblable dans la gamme 0-35°C (Neel, 1996). La loi de Van't Hoff s'écrit :

$$k(T) = k_{0(T)} \exp[a_T(T-T_0)] \quad (2.9)$$

avec k(T), la constante cinétique à la température T [jour⁻¹] et k_{0(T)}, la constante cinétique à la température de référence T₀ [jour⁻¹] ; T et T₀ sont respectivement les températures courante et de référence [K] et a_T, un paramètre [K⁻¹].

La loi de Andren permet de relier pour sa part le potentiel hydrique à la constante cinétique de décomposition :

$$\begin{aligned} k(\psi) &= k_{0(\psi)} \quad \forall \psi_0 \leq \psi \leq 0 \\ k(\psi) &= k_{0(\psi)} [1 - a_\psi \log(\psi/\psi_0)] \quad \forall \psi < \psi_0 \end{aligned} \quad (2.10)$$

avec: k(ψ), la constante cinétique au potentiel ψ [jour⁻¹]; k_{0(ψ)}, la constante cinétique au potentiel ψ₀ [jour⁻¹] ; ψ et ψ₀ les potentiels hydriques respectivement courant et de référence [m], a_ψ un paramètre [-]. Selon les auteurs a_ψ est compris entre 0,16 et 0,42 et ψ₀ entre -1 et -5 m (Neel, 1996). L'effet du potentiel sur chaque processus biologique mis en jeu et en particulier sur la différenciation entre la décomposition de la matière organique humifiée et la matière organique fraîche est encore mal connu (Néel, 1996).

Une cinétique d'ordre 1 a été trouvée pour la décomposition de trois paillis de résidus de maïs déposés à la surface du sol de biomasse initiale 1,5 ; 3 et 4,5 t.ha⁻¹ (Arreola Tostado, 1996) :

$$G(t) = G_{0(t)} \exp(-kt) \quad (2.11)$$

avec : $G(t)$, masse sèche par unité de surface du paillis à l'instant t [t.ha⁻¹] ; $G_{0(t)}$, masse sèche par unité de surface du paillis initiale [t.ha⁻¹] ; t , le temps [jour] et k , la constante cinétique ajustée aux 3 paillis [jour⁻¹].

L'activité métabolique des bactéries libère dans le sol des produits de dégradation des RECS organiques ou des paillis qui sont utiles aux plantes :

- les bactéries libèrent des ions nutritifs dans la solution du sol tels que NH_4^+ , NO_3^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} (Davet, 1996). Concernant plus spécifiquement la nutrition azotée des plantes, la dégradation des paillis par les bactéries du sol ont un effet double et déphasé sur le stock d'azote de la solution du sol. Le flux net de l'azote dans le sol est généralement négatif dans un premier temps puis positif une fois le processus de dégradation bien amorcé (Mary et al., 1996). Dans l'expression du flux net de l'azote dans le sol, l'activité de la biomasse microbienne génère deux composantes : un flux brut d'immobilisation⁹ par les micro-organismes qui domine dans un premier temps et un flux brut de minéralisation qui prédomine ensuite. Le phénomène d'inversion du flux net peut se produire de façon violente, suite à une activité intense de la biomasse microbienne. Il se produit alors une libération très forte d'azote minéral dans la solution du sol qui est localisée dans le temps, on parle de pic de minéralisation [i.e. (Blondel, 1971)]. Sous un paillis de résidus de riz, l'inversion s'est produite au meilleur moment pour une culture de riz en provoquant la libération d'azote minéral dans la solution du sol à la phase de formation des grains (Kushwaha et al., 2000). A l'épuisement du substrat, il se produit une libération finale d'azote car les populations microbiennes déclinent, libérant progressivement dans la solution du sol l'azote qu'elles avaient emmagasiné (Davet, 1996).

⁹ L'immobilisation de l'azote présent dans la solution du sol par les bactéries est liée au rapport C/N des éléments constitutifs des RECS organiques ou des paillis et qui est de l'ordre de 100 (Findeling, 2001). En effet, la consommation d'un substrat contenant 20 atomes de carbone, dont 10 sont oxydés et 10 incorporés, nécessite 1 atome d'azote. Ainsi, quand le rapport C/N d'un substrat est supérieur à 20, les microorganismes prélèvent de l'azote dans la solution du sol. Pour le soufre et le phosphore, il existe aussi des rapports idéaux qui sont C/S=200 et S/P=300 (Davet, 1996).

En phase d'immobilisation, les microorganismes du sol entrent en compétition pour l'azote avec la végétation semée. Un apport d'engrais azoté peut-être un moyen d'éviter cet effet de concurrence. Ainsi, en enfouissant un engrais vert dont le rapport C/N est voisin de 15, il n'y aura pas immobilisation d'azote par les micro-organismes au détriment de la solution du sol mais libération d'azote immédiatement utilisable par les plantes (Davet, 1996).

- les bactéries libèrent d'autres déchets de la minéralisation primaire inclus dans les composés humiques. La qualité et le degré d'humification de la matière organique du sol sont ainsi modifiés par l'apport de résidus organiques (Bayer et al., 2000). Ces précurseurs solubles de l'humus sont sous forme de tanins, de résidus poly phénoliques, de lignines combinées à des protéines etc. (Davet, 1996). L'augmentation du complexe argilo humique dans un sol recouvert par un RECS organique favorise le stockage des cations nutritifs dissous dans la solution du sol, les préservant du lessivage¹⁰. Un effet de bord de l'incorporation progressive de la matière organique est de modifier la géométrie des pores et d'augmenter globalement la porosité du sol et par suite sa capacité de stockage de l'eau [(Myers et wagger, 1996) et (Sharrat, 1997)]. Notons aussi que la réduction de l'écoulement de surface sur les pentes équipées de paillis en diminuant le lessivage, favorise indirectement cette porosité liée à l'incorporation progressive de la matière organique dans l'horizon superficiel du sol [(Gilley et al., 1986a,b) et (Sur et al., 1992)].
- des bactéries avec des champignons cellulolytiques du sol produisent des liants organiques de nature essentiellement polysaccharidique (capsules bactériennes, mucus des champignons etc.), stabilisateurs avec les ciments minéraux de la structure des agrégats du sol. Le degré d'agrégation d'un sol augmente proportionnellement à la quantité de cellules bactériennes présentes (Lynch, 1981).

Des microorganismes nuisibles aux cultures peuvent aussi se développer sous des paillis de résidus (Buissonière, 1991) ; leur action sur la végétation pouvant être directe ou indirecte par la production de produits de dégradation phytotoxiques. La relation directe entre la présence d'un paillis de résidus et le développement de microorganismes nuisibles est discutée par Crovetto Lamarca (1996). Il considère que n'importe quel déséquilibre dans l'écosystème cultivé (monoculture à long terme, fertilisation trop intense etc.) peut favoriser la prolifération d'organismes nuisibles. D'autant plus que les agro-écosystèmes simplifiés par l'homme souffrent davantage des épidémies d'Arthropodes phytophages que les communautés plus riches et complexes.

¹⁰ Les anions dont font notamment partie les ions nitrates (NO_3^-) sont davantage exposés au risque du lessivage. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle ils sont les premiers polluants des nappes phréatiques.

2.3.5 L'EFFET SUR LES CHAMPIGNONS MYCORHIZIENS OU SUR LES MICROORGANISMES FIXATEURS D'AZOTE ATMOSPHERIQUE ET LA VEGETATION

Une augmentation significative du nombre des champignons mycorhiziens dans le sol a été observé sous des paillis de maïs (Crovetto Lamarca, 1996). L'association symbiotique des champignons mycorhiziens avec les racines de la plupart des végétaux (environ 95% des plantes vasculaires), augmente considérablement la capacité de la plante à absorber de l'eau et des nutriments d'où une amélioration de leur croissance d'autant plus spectaculaire que le sol est plus pauvre et moins propice à leur développement (Davet, 1996). Le bénéfice le plus direct et le mieux étudié est l'amélioration de la nutrition phosphatée, le phosphore étant un élément peu mobile : les plantes qui possèdent des endomycorhizes ont un coefficient d'utilisation des engrais phosphatés 3 à 5 fois plus élevé que les plantes témoin non mycorhizées (Blal et al., 1990). La prolifération d'*Azotobacter sp.* en particulier a été observée sous un paillis de résidus de maïs (Crovetto Lamarca, 1996). Cette espèce possède une aptitude à fixer l'azote atmosphérique quasiment comparable à *Rhizobium sp.* dont les populations abondent dans les sols au PH voisin de 7 (Davet, 1996) et infectent les légumineuses en provoquant la dédifférenciation de certaines cellules corticales qui se multipliant, forment la nodosité.

2.3.6 L'EFFET SUR LA MACROFAUNE ET LA VEGETATION

Les paillis de résidus fournissent, en climat semi-aride tropical, des conditions climatiques favorables au développement d'une macrofaune grâce à la réduction des amplitudes thermiques et la diminution de l'évaporation du sol (Scopel, 1994). Cette macrofaune est essentiellement composée de vers de terre, d'Arachnides, d'Insectes divers et autres Arthropodes (Zachmann et Linden, 1987, 1989). Les espèces recensées peuvent être nuisibles aux cultures mais la macrofaune par son activité dans le sol améliore la qualité du substrat des plantes. Dans l'horizon parcouru par les Annelides, la matière organique est mieux distribuée. Ainsi, la présence de vers de terre peut augmenter jusqu'à 30% la vitesse de dégradation des paillis (Zachmann et Linden, 1989). L'activité de la macrofaune augmente aussi la porosité du sol et par conséquent son infiltrabilité (Scopel, 1994). En passant par le conduit des galeries, l'eau est plus facilement entraînée en profondeur dans le sol et la macroporosité augmente considérablement la capacité de stockage du sol (Zachmann et Linden, 1987, 1989). De même, son aération est favorisée.

Pour faciliter l'installation d'une couverture végétale dense et pérenne sur une surface de sol mise à nu, les aspects de stabilisation mécanique du sol et d'amélioration du microclimat prédominent sur l'effet d'amendement organique des revêtements qui agit progressivement et sur le long court. L'amélioration du microclimat est en outre déterminante sur certains sites où les conditions climatiques sont défavorables au développement de la végétation semée soumise à un stress hydrique ou/et thermique. La suite de ce mémoire est ainsi entièrement consacrée à l'étude de l'incidence microclimatique à la surface du sol d'une famille importante de RECS - les géotextiles - ainsi que de ses répercussions sur la végétation semée dans la perspective d'améliorer la végétalisation des surfaces en sites sensibles où se conjuguent les effets d'une forte pente et de la rudesse du climat.

CHAPITRE 3

APPROCHE DES TRANSFERTS D'EAU ET DE CHALEUR DANS LE SYSTEME

SOL-GEOTEXTILE-ATMOSPHERE

Les objectifs de ce troisième chapitre sont de présenter les hypothèses, variables, caractéristiques descriptives et paramètres dynamiques relatifs aux compartiments Sol, Géotextile et Atmosphère qui sont nécessaires à notre étude.

Par contre, on ne rappellera pas le formalisme mathématique qui décrit les transferts thermo / hydrodynamiques responsables des variations climatiques au sein du système Sol-Géotextile-Atmosphère. Pour plus d'information sur le cadre conceptuel de ces processus couplés, on pourra se reporter à des ouvrages de référence [i.e. (Musy et Soutter, 1991), (Guyot, 1997), (Duchaufour, 1995)] ou à des documents de synthèse [i.e. De Vries, Milly, (Braud, 1995,97,98 et 2000), (Crausse et al., 1996)].

Chaque compartiment Sol, Géotextile et Atmosphère est examiné successivement. Pour décrire le compartiment Géotextile, nous avons fait l'analogie avec les paillis pour lesquels de nombreux travaux existent [i.e. (Myrold et al., 1981), (Benoît et Lindstrom, 1987), (Khan et al., 1988), (Buissière et Cellier, 1994), (Gilley et al., 1991), (Savabi et stott, 1994), (Arreola Tostado, 1996), (Sauer et al., 1998), (Chen et al., 1997b), (Gonzalez Sosa et al., 1999a,b), (Novak et al., 2000a,b,c), (Findeling, 2001)].

3.1 Description et caractérisation des compartiments du système

3.1.1 LE COMPARTIMENT SOL

De manière générique, le terme de « sol » désigne la couche la plus externe de l'écorce terrestre située entre la roche non altérée et l'atmosphère. Sa fraction minérale peut résulter d'une désagrégation de la roche sous-jacente. Elle peut aussi être d'origine sédimentaire ou éolienne. Sa fraction organique provient, elle, de la décomposition des végétaux et des animaux. Par ailleurs, dans le sol, les microorganismes vivants jouent le rôle d'incinérateurs biologiques.

Le sol est le support de la vie végétale, animale et des activités humaines. Il est soumis à l'action du climat. D'un point de vue physique, les sols sont des milieux poreux

granulaires constitués d'une matrice solide - les *grains* - et d'un espace inter granulaire - les *pores* - dans lequel peuvent circuler des fluides comme l'eau et l'air.

3.1.1.1 Hypothèses

En ce qui nous concerne, nous considérons le sol comme un milieu indéformable, homogène et isotrope. L'écoulement d'eau y est supposé laminaire et monophasique : on ne considère pas l'écoulement de la phase gazeuse. La pression de celle-ci est supposée constante et égale à la pression atmosphérique externe.

3.1.1.2 Les variables de suivi des transferts hydriques et thermiques dans le sol

La variable indépendante considérée peut être le *potentiel de pression matricielle* ou, plus simplement, *potentiel hydrique*, h . Il résulte de l'effet de la capillarité et de l'adsorption, les deux mécanismes principaux d'interaction de l'eau et de la matrice solide dans un milieu poreux. En hydrologie, il est généralement exprimé par son équivalent en terme de hauteur d'eau [m] :

$$h = \frac{p}{\rho_w g} \quad (3.1)$$

avec : ρ_w [kg.m⁻³], la masse volumique de l'eau (≈ 1000 Kg.m⁻³) ; g [m.s⁻²], l'accélération de la pesanteur ($\approx 9,8$ m.s⁻²) et p [Pa], la *pression capillaire* de l'eau qui est égale à la différence entre la pression p_a [Pa] du fluide non mouillant - ici, l'air - et la pression p_w [Pa] du fluide mouillant, ici : l'eau. h pourrait donc être aussi exprimé par une pression. Au niveau des unités, on a les équivalences suivantes : 1 bar = 10⁵ Pa $\Leftrightarrow$ 10 m ; 1 mbar = 100 Pa $\Leftrightarrow$ 1 cm. On peut aussi considérer une échelle de pF utile par rapport à la physiologie des plantes. Celui-ci est défini par :

$$pF = \log_{10}(-h) = \log_{10}(\psi) \quad (3.2)$$

avec Ψ [m], la succion matricielle.

On peut aussi utiliser comme autre variable la *teneur en eau volumique* du sol θ [m³.m⁻³] qui est, pour sa part, une grandeur descriptive. Elle rend compte directement du stock d'eau dans le sol et se définit comme le rapport du volume d'eau V_w [m³] contenu dans un volume V_t [m³], soit :

$$\theta = \frac{V_w}{V_t} \quad (3.3)$$

A l'échelle macroscopique où l'on se place, pression capillaire et teneur en eau du sol ne sont pas indépendantes et la relation $h(\theta)$ qui les lie est appelée *courbe de rétention d'eau* : voir Figure 3.1. Cette relation présente généralement un hystérésis marqué.

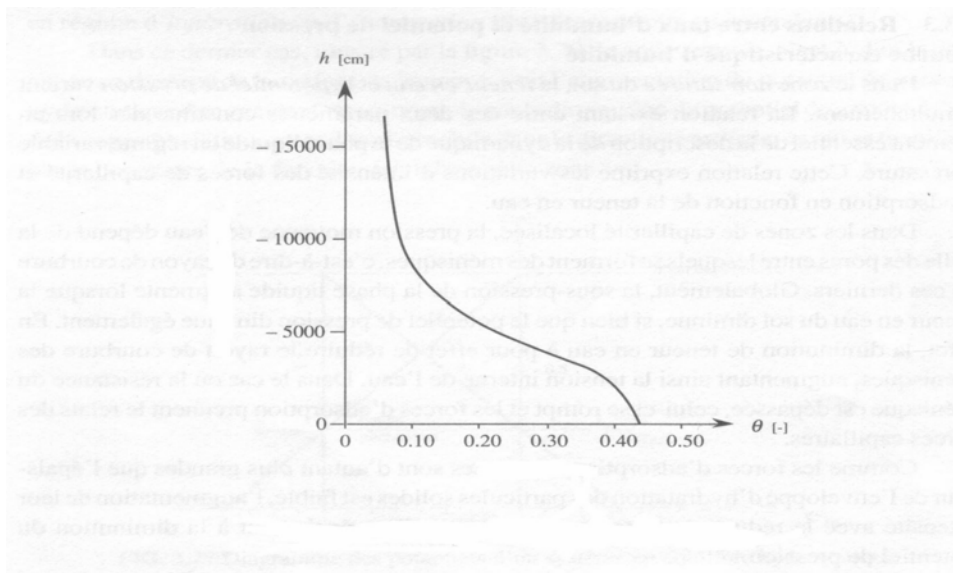


Figure 3.1. Allure générale de la courbe $h(\theta)$ du sol (Musy et Soutter, 1991)

Cette courbe peut être représentée par l'équation proposée par Van Genuchten (1980) :

$$\frac{\theta - \theta_{res}}{\theta_{sat} - \theta_{res}} = \left[1 + \left(\frac{h}{h_{VG}} \right)^{n_{VG}} \right]^{-m_{VG}} \quad (3.4)$$

avec : θ_{res} , une teneur en eau *résiduelle* ; θ_{sat} , la teneur volumique en eau à saturation ; h_{VG} [m], un facteur d'échelle; n_{VG} et m_{VG} , des paramètres de forme qui peuvent être reliés par :

$$n_{VG} = \frac{2}{1 - m_{VG}} \quad (\text{Burdine, 1953}) \quad (3.5)$$

Concernant le suivi des transferts de chaleur, la température T [°C] est la variable indépendante considérée.

3.1.1.3 Propriétés du matériau « sol »

La nature et l'intensité des transferts internes d'humidité (phase liquide et/ou gazeuse) et de chaleur qui ont lieu sous l'effet des gradients de température, d'humidité relative, de pression etc., sont liées aux propriétés du sol (Crausse et al., 1996) dont nous proposons de faire ici la liste.

3.1.1.3.1 Caractéristiques descriptives du sol

L'espace poral

La *porosité totale* n est une caractéristique fondamentale pour un poreux. C'est la proportion de celui-ci qui n'est pas occupée par le solide soit, si V_v est le volume de l'espace inter-granulaire compris dans un volume V_t :

$$n = \frac{V_v}{V_t} \quad (3.6)$$

A l'intérieur de cet espace poral de l'eau peut circuler. D'un point de vue agronomique, on distingue plusieurs taux d'humidité remarquables :

- $\theta_{\max}$, la teneur en eau *maximale* (quelquefois appelée aussi *capacité de rétention*) qui correspond à la plus grande quantité d'eau que le sol peut contenir naturellement après que l'excédent d'eau ($\theta_{\text{sat}} - \theta_{\max}$) ait été drainé et que le régime d'écoulement vers le bas soit devenu pratiquement nul. Ce taux d'humidité remarquable correspond dans sa définition à la *capacité au champ* telle qu'elle peut être mesurée in situ.
- θ_{res} , une teneur en eau *résiduelle* qui est la teneur minimale qui peut être observée après un séchage naturel. Elle est liée à l'hygroscopicité du milieu poreux et donc à la présence de minéraux argileux et/ou de sels.
- θ_k , la teneur en eau à partir de laquelle la phase liquide n'est plus continue. Elle donne une indication sur l'efficacité potentielle d'un séchage au sein du milieu poreux.

On peut aussi déterminer un *point de flétrissement* θ_f : teneur en eau pour un potentiel hydrique – ou un pF – tel que la plante considérée ne peut plus extraire d'eau du sol (Musy et Soutter, 1991). On considère souvent que lorsque pF = 4,2, la teneur en eau du sol a atteint le point de flétrissement. La capacité de rétention et le point de flétrissement sont utilisés pour quantifier la réserve utilisable par les plantes RU (Figure 3.2):

$$RU = \int_0^{z_{\max}} (\theta_{\max} - \theta_f) dz \quad (3.7)$$

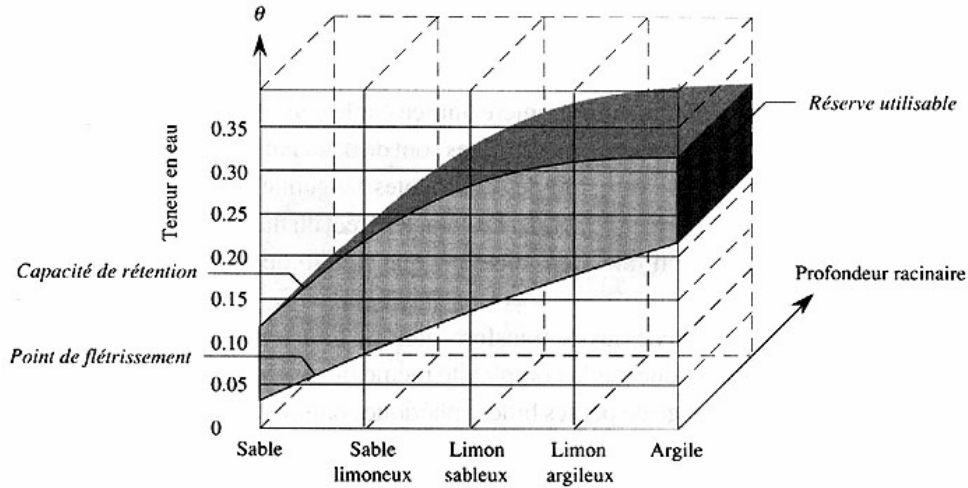


Figure 3.2. Réserve utilisable (RU) de divers types de sol (Musy et Soutter, 1991)

La matrice solide

On peut caractériser un échantillon de sol par sa masse volumique *apparente* ρ_a :

$$\rho_a = \frac{M}{V_t} \quad (3.8)$$

rapport de sa masse M sur son volume extérieur V_t et la phase solide du sol par la masse volumique *apparente sèche* ρ_{sec} :

$$\rho_{sec} = \frac{M_{grains}}{V_t} \quad (3.9)$$

avec M_{grains} [kg], la masse du solide seul : les grains. Pour caractériser le milieu, on peut aussi parler en terme de densité δ définie par le rapport :

$$\delta = \frac{\rho_{sol}}{\rho_w} \quad (3.10)$$

avec $\rho_{sol} = \rho_a$ ou ρ_{sec} selon que l'on s'intéresse à la densité apparente δ_a ou à la densité apparente sèche δ_{sec} du sol.

Notons que porosité et masse volumique - ou porosité et densité - sont reliées par la relation :

$$n = 1 - \frac{\rho_{sec}}{\rho_{grains}} = 1 - \frac{\delta_{sec}}{\delta_{grains}} \quad (3.11)$$

avec ρ_{grains} , δ_{grains} , la masse volumique et la densité des grains, respectivement.

On peut également s'intéresser à la *granulométrie* : distribution des diamètres des particules solides. Elle permet de définir un niveau textural (Duchaufour, 1995). A la suite d'une convention internationale, les fractions les plus fines (dont le diamètre apparent est inférieur à 2 mm) sont classées de la façon suivante en fonction de leur diamètre apparent :

- Sables : de 2000 μm à 50 μm
- Limons : de 50 μm à 2 μm
- Argiles : < 2 μm

En partant de la courbe granulométrique, on peut définir une fonction de distribution de la taille des particules du sol $F(d)$ de forme générale :

$$F(d) = \left\{ 1 + \left(\frac{d_{grains}}{d} \right)^N \right\}^{-M} \quad (3.12)$$

avec : d [μm], le diamètre apparent des grains ; d_{grains} [μm], le diamètre apparent médian des grains ; M et N , des paramètres. On procède par ajustement aux données discrètes de l'analyse granulométrique. On peut pour cela utiliser la technique des moindres carrés. La détermination de $F(d)$ peut servir à définir les paramètres m_{VG} et n_{VG} du sol considéré. En effet, ces derniers peuvent être reliés à M et N par l'équation :

$$m_{VG} * n_{VG} = \frac{M * N}{1 + \tau} \quad (3.13)$$

avec τ , la tortuosité que l'on définit au paragraphe suivant. La tortuosité peut quant à elle être liée à m_{VG} et n_{VG} par :

$$p = (m_{VG} * n_{VG})^{0.7} \quad (3.14)$$

Cette relation dérive de l'analyse des données (Soria et al., 2003) de la base Grizzly (Haverkamp et al., 1998a). Connaissant M et N , les relations (3.13) et (3.14) constituent un système de 2 équations non linéaires à 2 inconnues : p et n_{VG} , le 3^{ème} paramètre m_{VG} peut être déduit de l'équation (3.5). La résolution de ce jeu d'équation permet d'obtenir n_{VG} et m_{VG} pour le sol considéré. Elle nous donne en outre une approximation de sa tortuosité.

La *tortuosité* τ est une grandeur structurale qui rend compte de la longueur des trajectoires d'écoulement de l'eau qui circule dans le sol (Figure 3.3). Elle peut être définie sur un échantillon par le rapport moyen de la longueur du cheminement réel parcouru entre deux points à la distance rectiligne qui les sépare.

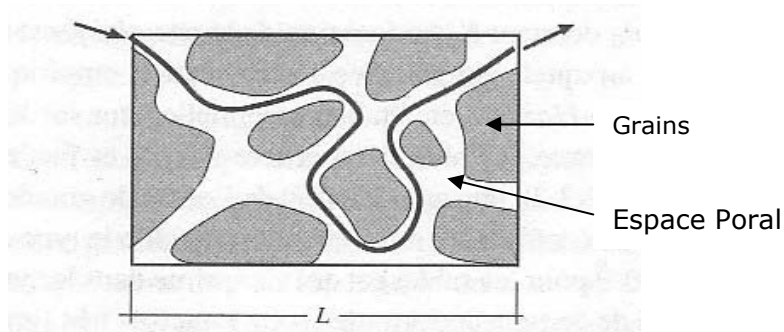


Figure 3.3. Schéma d'une portion de sol illustrant le notion de tortuosité (Musy et Soutter, 1991)

Enfin, la phase solide du sol peut aussi être caractérisée par sa composition minéralogique (minéraux primaires constitutifs de la matrice solide comme le quartz, la calcite, les feldspaths etc., minéraux secondaires contenant des éléments métalliques), sa teneur en fractions organiques (matière organique fraîche, humus et produits transitoires) etc.

3.1.1.3.2 Propriétés hydrodynamiques

Une des principales propriétés hydrodynamiques du sol est la *conductivité hydraulique* K [m.s^{-1}]. Elle traduit la proportionnalité qui existe entre un flux d'eau liquide dans le sol et le gradient de potentiel qui l'a créé : loi de Darcy. Cette conductivité dépend de la viscosité du liquide qui s'écoule, de la *perméabilité* intrinsèque du sol etc. et, en milieu non-saturé, de la teneur en eau : Figure 3.4.

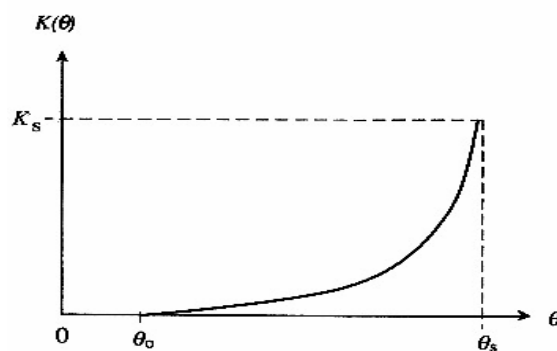


Figure 3.4. Allure générale de la courbe $K(\theta)$ du sol (Musy et Soutter, 1991)

La relation $K(\theta)$ entre la conductivité hydraulique et la teneur en eau peut être exprimée par l'expression de Brooks & Corey (1964) :

$$K(\theta) = K_{sat} \left[\frac{\theta - \theta_{res}}{\theta_{sat} - \theta_{res}} \right]^{\eta_{BC}} \quad (3.15)$$

où K_{sat} [m.s^{-1}] est la conductivité hydraulique à *saturation* et η_{BC} , un paramètre de forme qui peut être obtenu à partir des paramètres m_{VG} et n_{VG} du modèle de Van Genuchten (3.4) et de la tortuosité τ du sol en utilisant la relation (Haverkamp et al., 1998b) :

$$\eta_{\text{BC}} = \frac{2}{m_{\text{VG}} n_{\text{VG}}} + 2 + 2\tau \quad (3.16)$$

3.1.1.3.3 Propriétés thermiques

La *capacité calorifique* C_T [$\text{J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$] du sol rend compte de sa capacité à stocker la chaleur. C_T peut être estimée à partir de la somme des contributions au stockage de chacun des constituants principaux du sol : matière organique, minéraux, eau et air. Si l'on néglige la contribution de l'air car sa capacité calorifique est inférieure d'un facteur 10^3 par rapport à celle des autres constituants du sol (Tableau 3.1), on a finalement :

$$C_T = C_o\theta_o + C_m\theta_m + C_w\theta \quad (3.17)$$

avec C_o , C_m , C_w [$\text{J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$], les capacités calorifiques de la matière organique, des minéraux et de l'eau respectivement, et θ_o , θ_m , θ [$\text{m}^3.\text{m}^{-3}$], les teneurs volumiques correspondantes.

Constituants du sol	Capacités calorifiques [$\text{J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$]
Matière organique	$2.47 \cdot 10^6$
Minéraux (moy)	$2.10 \cdot 10^6$
Eau	$4.18 \cdot 10^6$
Air	$1.25 \cdot 10^3$

Tableau 3.1. : Capacités calorifiques des principaux constituants du sol (Musy et Soutter, 1991)

Enfin, la *conductivité thermique* λ [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$] du sol traduit la proportionnalité qui existe entre un flux de chaleur dans le sol et le gradient de température qui l'a créé. Cette conductivité dépend de la composition, de la texture du sol etc. et de la teneur en eau ($\lambda_{\text{eau}} \approx 0,6 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) ou inversement de la teneur en air : $\lambda_{\text{air}} \approx 0,026 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

Pour mesurer la *conductivité thermique apparente* λ^* du sol, on peut utiliser la technique dite de la *sonde à chocs thermiques monotige* (Hladik J., 1990). On peut par ce biais déterminer la relation $\lambda^*(\theta)$ entre la conductivité thermique apparente et la teneur en eau du sol.

A titre d'exemple, pour un sable de densité 1,64, elle a été estimée à $1,77 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ à l'état humide et $0,23 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ à sec (Watts et al., 1990).

En l'absence de mesures, on peut utiliser le modèle proposé par Van de Griend et O'Neill (1986) qui propose une relation pour $\lambda^*(\theta)$:

$$\lambda(\theta) = \frac{1}{C_{sec} + 4.18 * 10^6 \theta} \left[\frac{1}{0.654} (\Lambda_s + 2300\theta - 1890) \right]^2 \quad (3.18)$$

avec C_{sec} et Λ_s respectivement, la capacité calorifique du sol sec et l'inertie thermique à saturation du sol. Cette dernière a été estimée pour différentes classes texturales de sol : Tableau 3.2 suivant.

Classe texturale	Inertie thermique à saturation Λ_s (J.m ⁻² .K ⁻¹ .s ^{-1/2})
Sable	2830
Argile limoneuse	2245
Argile	2180

Tableau 3.2. Valeurs d'inertie thermique à saturation pour trois classes texturales de sol [modifié de (Braud, 2000)]

3.1.1.3.4 Propriétés de surface du sol

La nature et l'intensité des échanges d'eau et de chaleur entre le sol et l'atmosphère qui ont lieu sous l'effet des gradients de température, d'humidité relative, de pression etc. sont liées aux propriétés de surface du sol dont :

L'*albedo* α du sol. C'est le taux de réflexion moyen du rayonnement solaire incident considéré sur tout son spectre : 0,3 à 3 μ m (Guyot, 97). Il dépend de la couleur, de la texture, de la teneur en matière organique et de la rugosité de surface du sol mais aussi de l'angle incident du rayonnement solaire (ou artificiel) et il décroît au fur et à mesure que la teneur en eau du sol augmente.

L'*émissivité* ε du sol. Elle mesure la part de l'énergie thermique qui est rayonnée en direction de l'atmosphère. Dans les conditions normales, le sol rayonne principalement dans l'infrarouge : longueurs d'onde comprises entre 3 à 30 μ m. Le Tableau 3.3 ci-dessous donne une fourchette de valeurs de α et ε pour un sable et un sol nus.

Type de surface	Autres caractéristiques	Albedo α	Emissivité ε
Sable nu	Sec	0,35-0,45	0,84-0,90
	Humide	0,20-0,30	0,91-0,95
Sol nu	Argileux sec	0,20-0,35	0,95
	Argileux humide	0,10-0,20	0,97

Tableau 3.3. Propriétés radiométriques de quelques sol [modifié de (Guyot, 1997)]

La *hauteur de déplacement* h_d [m]. Par rapport à l'écoulement du vent, elle caractérise l'épaisseur de la couche d'air à la surface du sol qui est soumise aux effets de viscosité, de rugosité de surface et de végétation éventuellement. Elle traduit une translation en hauteur du profil logarithmique de la vitesse du vent dans l'atmosphère. D'après l'atlas éolien européen (1991), la hauteur de déplacement au dessus d'une surface d'eau dégagée peut être estimée autour de 0,0002 m et pour une surface complètement dégagée avec une surface lisse comme de l'herbe fraîchement coupée, autour de 0,0024 m.

Les *longueurs de rugosité* : l'une est relative aux transferts de masse z_{om} [m] et l'autre aux transferts de chaleur z_{oh} [m]. Elles traduisent l'efficacité des transferts de quantité de mouvement (pour la masse) ou de quantité de chaleur aux points de rencontre entre un courant d'air et la surface du sol. Pour le sol nu, on estime les longueurs de rugosité entre 0,005 et 0,020 m (Guyot, 1997).

3.1.2 LE COMPARTIMENT GÉOTEXTILE

Les géotextiles utilisés pour la revégétalisation sont des tapis tissés et ajourés que l'on distingue par :

- la nature des brins. Ils peuvent être fabriqués en produits de synthèse – Polypropylène, Polyéthylène, Nylon – ou en fibres végétales issues principalement du jute (*Corchorus olitorius* et *Corchorus capsularis*) et du coco (*Cocos nucifera*).
- le mode de fabrication des brins (tressage ou filage) et l'ouverture de la maille.

On les fixe sur le sol à l'aide d'agrafes métalliques.

D'un point de vue physique, les géotextiles sont donc des milieux discontinus avec des pleins – les brins – et des vides – les ouvertures des mailles – (Figure 3.5). Cette discontinuité génère une anisotropie de leurs propriétés à l'échelle du maillage. Quant aux brins des géotextiles, ce sont eux-mêmes des milieux poreux constitués d'une matrice solide plus ou moins déformable – les fibres – et d'un espace inter fibre dans lequel peuvent circuler des fluides comme l'eau et l'air.

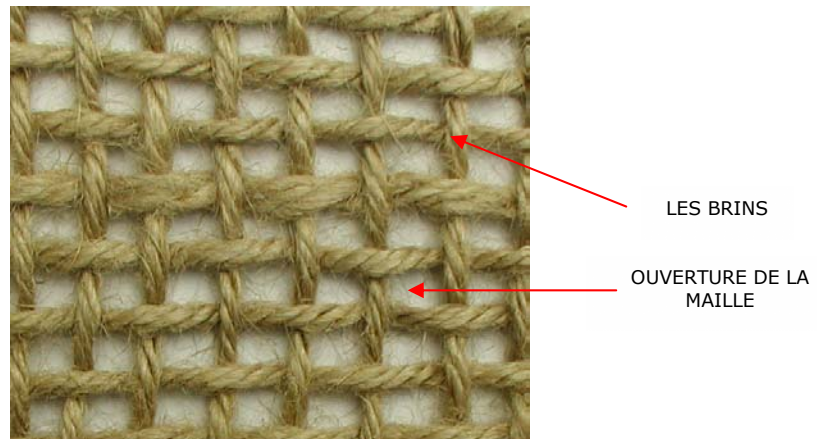


Figure 3.5. Géotextile en jute tressé (« HP » : Hessian Plait) – Ouverture 1 cm²

3.1.2.1 Hypothèses

Dans le compartiment géotextile, nous considérerons que l'eau circule uniquement en phase vapeur. La pression est supposée constante, égale à la pression atmosphérique. A l'échelle du textile entier, le motif du maillage étant régulier, on considère que les propriétés des géotextiles sont une moyenne pondérée des propriétés des brins et de l'air piégé dans l'ouverture des mailles.

Nous faisons aussi l'hypothèse que les brins forment un milieu indéformable, homogène et isotrope. Cette hypothèse fortement simplificatrice peut paraître excessive mais elle s'est avérée parfaitement compatible avec nos conditions expérimentales : voir Chapitre 4 §4.4.

3.1.2.2 Caractéristiques descriptives du compartiment géotextile

3.1.2.2.1 Caractéristiques globales

D'une manière générale, on peut caractériser un géotextile par son *taux de couverture au sol* [m².m⁻²] ϑ (ou à l'inverse par son *ratio d'espace ouvert* [m².m⁻²]), son *grammage* G ou masse sèche par unité de surface [kg.m⁻²], sa *capacité de stockage* ou *capacité de rétention* en eau Q exprimée sous forme d'une lame d'eau en mm. On peut relier le grammage au taux de couverture au sol.

Pour les paillis, une relation du type :

$$\vartheta = 1 - \exp(-a.G) \quad (3.19)$$

a été proposée où G est exprimé en tonne par hectare [$t \cdot ha^{-1}$]. a est un coefficient dont les valeurs pour différents paillis sont répertoriées dans le Tableau 3.4 ci-après.

Publications	nature des résidus	Coefficient a	Intervalle de validité [$t \cdot ha^{-1}$]	R^2
(Khan et al., 1988)	Paille de blé	0,670	0-5	(-)
(Gilley et al., 1991)	Paille de blé	1.100	0,25-4	0,997
	Paille de coton	0,0676	2-10	0,984
	Paille d'arachide	0,180	2-10	0,979
	Paille d'aiguille de pin	0,370	0,75-8	0,978
	Paille de Sorgho	0,184	2-10	0,920
	Paille de Soja	0,243	2-10	0,963
	Paille de Tournesol	0,102	2-10	0,986
	Paille de maïs	0,155	2-10	0,978
	Paille de maïs frais	0,367	0-20	(-)
(Arreola Tostado, 1996)	Paille de maïs frais avec seulement les tiges	0,092	0-20	(-)
	Paille de maïs en décomposition	0,271	0-20	(-)

Tableau 3.4. Coefficients « a » de la relation entre taux de couverture et grammage pour différents paillis.

On peut aussi établir une relation entre le grammage G et la capacité de stockage Q appelée *loi d'interception* (Savabi et Stott, 1994). Pour un paillis, elle est de la forme :

$$Q = a_1 G + a_2 G^2 \quad (3.20)$$

où a_1 [$mm \cdot ha \cdot t^{-1}$] et a_2 [$mm \cdot ha^2 \cdot t^{-2}$] sont deux coefficients. Ils ont été estimés pour trois paillis par ajustement statistique sur des jeux de données obtenus en laboratoire en utilisant un simulateur de pluie : Tableau 3.5 ci-après.

nature du paillis	a_1 [$mm \cdot ha \cdot t^{-1}$]	a_2 [$mm \cdot ha^2 \cdot t^{-2}$]
Maïs (<i>Zea mays</i>)	0,346	$-1.05 \cdot 10^{-2}$
Soja (<i>Glycine max</i> L.)	0,370	$-1.10 \cdot 10^{-2}$
Blé (<i>Triticum aestivum</i> L.)	0,627	$-3.73 \cdot 10^{-2}$

Tableau 3.5. Coefficients d'ajustement à la loi d'interception pour trois types de paillis (Savabi et Stott, 1994)

La capacité de stockage dépend de la nature des résidus mais aussi :

- *du type de composant élémentaire*. Un paillis frais composé d'un mélange de tiges, de feuilles et de spathes de maïs stocke environ 16%

d'eau supplémentaire par rapport à un paillis frais composé uniquement de tiges de maïs (Arreola Tostado, 1996) : voir Tableau 3.6.

- *du degré de décomposition.* Un paillis de maïs en décomposition perd environ 42% de sa capacité de stockage par rapport au paillis frais (Arreola Tostado, 1996) : Tableau 3.6.

Type du paillis	BIOMASSE Q_p [t.ha ⁻¹]	LAME D'EAU STOCKABLE [kg.m ⁻²]
Paillis frais	1.5	0,57
(mélange de tiges, de feuilles et de spathes)	3	1.14
	4.5	1.71
Paillis frais	1.5	0,49
(uniquement composé de tiges)	3	0,99
	4.5	1.50
Paillis en décomposition (mélange de tiges, de feuilles et de spathes)	1.5	0,33
	3	0,67
	4.5	1

Tableau 3.6. Recharges potentielles de paillis de maïs (Arreola Tostado, 1996)

Quand il pleut, l'absorption d'eau par un paillis est progressive. Une *équation dynamique d'interception* de l'eau de pluie préalablement établie pour des canopées (Rutter et al., 1971) a été appliquée au cas des paillis [i.e. (Buissière et Cellier, 1994), (Gonzalez-Sosa et al., 1999a)]. Elle s'écrit alors :

$$\frac{\partial q}{\partial t} = (1 - P_p) \frac{\partial P}{\partial t} - a_3 \exp(a_4 q) \quad (3.21)$$

avec q [kg.m⁻²], la masse d'eau stockée dans la canopée par unité de surface ; P [kg.m⁻²], la quantité de pluie ; P_p [-], la fraction de la pluie traversant la canopée jusqu'au sol sans interception ; a_3 [Kg.m⁻².s⁻¹] le coefficient de drainage et a_4 , [m².Kg⁻¹] le coefficient de percolation. Cette équation néglige le flux évaporatif mais prend en compte le phénomène de percolation. Le Tableau 3.7 donne des valeurs des coefficients a_1 et a_2 pour deux types de paillis.

PUBLICATIONS	Type de paillis	a_3 [Kg.m ⁻² .s ⁻¹]	a_4 [m ² .Kg ⁻¹]
(Buissière et Cellier, 1994)	Paillis de canne à sucre (10t/ha et 10 cm d'épaisseur)	0,004±0,005	2.3±0,9
(Gonzalez-Sosa et al., 1999a)	Paillis de végétation morte sur pied	4 10 ⁻⁶	4 10 ⁻⁶

Tableau 3.7. Valeurs des coefficients d'interception et de drainage retenus pour deux types de paillis

Enfin, sur le plan mécanique, les géotextiles sont caractérisés par leur *résistance à la traction* r [kN.m^{-1}] qui est liée à la nature des fibres (synthétiques ou naturelles), au mode de fabrication (par exemple, le filage ou le tressage des fibres naturelles pour former les brins) et à la présence d'eau notamment pour les géotextiles naturels en jute qui ont une forte capacité de stockage : voir §4.3.2.2. Nous avons effectué des essais mécaniques à sec et à l'état saturé, pour mesurer la résistance à la traction des différents géotextiles naturels en jute que nous avons utilisés dans nos expérimentations. On trouvera en Annexe 2 un descriptif du protocole suivi et une synthèse des principaux résultats obtenus.

3.1.2.2.2 Caractéristiques propres aux brins

On peut caractériser les brins par leur *épaisseur* e [cm] qu'on assimile à un diamètre, leur *masse volumique* ρ_g [Kg.m^{-3}] ou leur *densité* δ_g , par leur *porosité* n_g et aussi par la nature de leurs fibres. Les géotextiles actuellement utilisés pour la végétalisation des sites sont essentiellement fabriqués avec du jute (fibre naturelle) ou du polypropylène (fibre synthétique).

La fibre de polypropylène – PP – a pour formule chimique $-(\text{CH}_2-\text{CHCH}_3)_n-$ et fait partie des fibres à hautes performances mécaniques : Figure 3.6. Issue d'une polymérisation par voie chimique, sa longueur est adaptable.

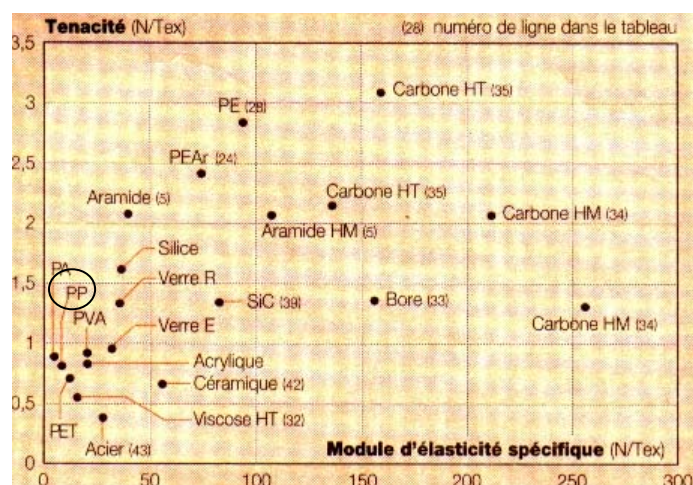


Figure 3.6. Classification des fibres à haute performance mécanique en fonction de leur Ténacité (N.Tex^{-1}) et de leur module d'élasticité spécifique (N.Tex^{-1}) (Les Editions de L'Industrie Textile, 1987)

La fibre de jute peut être extraite des tiges de deux espèces végétales de la famille des Tilliacées : *Chorchorus olitorius* et *Chorchorus capsularis*. Ces arbustes poussent dans les pays de la mousson comme le Bengale et l'Inde (principaux pays producteurs et exportateurs de jute dans le monde). A base de cellulose de formule $-(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n-$ à hauteur de 80 à 87 %, elle est pour le reste composée de 11 à 13 % de

lignine. De couleur jaune d'or, la fibre de jute se caractérise par une longueur de 1 à 5 mm et un diamètre de 20 à 25 μm . Elle résulte de l'assemblage d'une dizaine ou plus de fibres élémentaires à section polygonale et ouverture centrale : voir Figure 3.7. Ces fibres sont ensuite tressées ou filées pour former les brins.



Figure 3.7. Portion d'une section verticale de fibre de jute (Editions de l'Industrie Textile, 1987), amas de fibre et brins tressé et filé (de gauche à droite)

Le Tableau 3.8 donne les principales caractéristiques physiques et mécaniques des fibres de jute et de polypropylène. On peut en outre se reporter à l'Annexe 3 pour la définition des caractéristiques marquées par un astérisque (*).

CARACTERISTIQUES	JUTE	POLYPROPYLENE
Longueur de la fibre [mm]	2.5	variable
Masse volumique [g.cm^{-3}] (*)	1.48 – 1.50	0,91 – 0,95
Reprise en humidité (20°C – 65% HR) [%] (*)	16 – 18	0,05 – 0,50
Taux de sorption d'eau [%] (*)	25.4	0
Ténacité à sec [N.Tex^{-1}] (*)	0,3 – 0,6	0,54 – 0,72
Perte de Ténacité au mouillé (%)	Gain de 15 - 25	0
Capacité calorifique [$\text{J.Kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$]	-	1800-1900
Conductivité thermique [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$]	-	0,117
Résistance aux UV et aux intempéries	moyen	faible
Résistance aux micro-organismes	moyen	bon
Propriétés Tinctoriales	Soufres – Directs – Cuve – Réactifs Indigosol - Naphtols	-

Tableau 3.8. Principales caractéristiques physiques des fibres de jute et de polypropylène (d'après les Editions de l'Industrie Textile, 1987)

3.1.2.3 Propriétés thermiques

La *conductivité thermique apparente des brins* λ_g^* [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$] n'est pas mesurable directement in-situ. Il nous a donc fallu l'estimer.

A sec, nous nous sommes inspirés des paillis pour lesquels on admet une conductivité thermique à sec de l'ordre de celle d'un bois équivalent soit environ $0,1 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ (Findeling, 2001).

Par ailleurs, nous avons admis une relation linéaire entre la conductivité thermique apparente et la teneur en eau massique w_g [kg.kg^{-1}], soit :

$$\lambda_g^* = A.w_g + B \quad (3.22)$$

Pour un paillis en résidus de canne à sucre non haché (Buissière et Cellier, 1994) et de la végétation morte sur pied (Gonzalez-Sosa, 1999), les auteurs ont retenu les valeurs $A = 0,03$ et $B = 0,1$. Pour un paillis de maïs (Findeling, 2001), les coefficients retenus ont été $A = 0,032$ et $B = 0,262$.

Enfin, la *capacité calorifique des brins* C_{gT} [$\text{J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$] peut être estimée par une relation du type de (3.17) :

$$C_{gT} = C_o\theta_{go} + C_w\theta_g \quad (3.23)$$

où ne figurent plus, cette fois, que la matière organique et l'eau avec θ_{go} et θ_g leur teneur volumique respective.

3.1.2.4 Propriétés de surface

La nature et l'intensité des échanges d'eau et de chaleur entre le sol et l'atmosphère sont modifiées par la présence d'un géotextile.

Concernant l'*albédo* d'un géotextile, il faut distinguer l'albédo des brins α_g , de l'albédo du géotextile entier qui possède des ouvertures laissant apparaître le sol sous-jacent. On peut estimer l'albédo d'un géotextile quel que soit son ouverture en considérant la moyenne pondérée de l'albédo des brins et de celui du sol sous-jacent non recouvert. Quand aux brins des géotextiles, ils sont composés d'éléments grossiers, les fibres dont l'agencement engendre une structure hétérogène. Le rayonnement incident subit les effets de cette structure. Cependant, les fibres étant bien imbriquées les unes dans les autres, on peut considérer que l'albédo des brins est très similaire à celui des fibres. Notons que ce n'est plus le cas pour les paillis de couverture totale où l'on

distingue malgré tout l'albédo du paillis de celui de ses éléments constitutifs [i.e. (Buissière, 1991) et (Novak et al., 2000c)]. En effet, la structure souvent éparse des résidus permet des réflexions multiples qui aboutissent au piégeage d'une partie du rayonnement incident qui autrement aurait pu être réfléchi. A titre d'exemple, des mesures d'albédo ont donné 0,46 pour un résidu d'orge et 0,27 pour le paillis entier de couverture totale (Novak et al., 2000c). Concernant les géotextiles en jute, on trouve dans la littérature une valeur de 0,134 (Sutherland et al., 1998b).

La *transmissivité* ν_g des brins est la part du rayonnement incident qui les traverse. Notons que lorsque l'on parle de transmissivité, on peut très bien ne considérer qu'une part du rayonnement comme par exemple le rayonnement PAR¹¹ intéressant du point de vue de la physiologie des plantes. Des paillis de maïs ont été opaques au rayonnement PAR ou autrement dit ont montré une transmissivité négligeable (Arreola tostado, 1996). D'autres travaux (Novak et al, 2000c) font référence pour des résidus de maïs à des transmissivités de 0,005 dans le visible et de 0,02 dans le proche infrarouge. Concernant les géotextiles, il n'existe pas de travaux dans la littérature relatifs à leur transmissivité.

L'*émissivité* ε_g des brins n'a pas non plus fait l'objet de mesures précises. C'est aussi le cas pour les paillis. Les seules références disponibles sont des estimations. Ainsi, les émissivités d'un paillis en feuilles de canne à sucre (Buissière et cellier, 1994) et d'un paillis en feuilles d'orge (Novak et al., 2000c) ont été toutes deux estimée à 1, ce qui revient à assimiler ces paillis à un corps noir.

Les *longueurs de rugosité aérodynamique* Z_{gom} , Z_{goh} et la *hauteur de déplacement* h_{gd} peuvent être estimées simplement à partir de l'épaisseur e du paillis par :

$$\begin{aligned} Z_{gom} &= a_{zom} e \\ Z_{goh} &= a_{zoh} e \\ h_{gd} &= a_d e \end{aligned} \quad (3.24)$$

en introduisant trois nouveaux coefficients de structure a_{zom} , a_{zoh} , a_d qui dépendent a-priori de la forme des éléments couvrant le sol, de leur nombre ainsi que de leur taux de couverture [(Sauer et al., 1998), (Gonzalez-Sosa, 1999b)]. Le Tableau 3.9 répertorie les valeurs des coefficients qui ont pu être relevés dans la littérature.

¹¹ « Photosynthetic Activ Radiation »

PUBLICATIONS	Couverture au sol	a_{zom}	a_{zoh}	a_d
(Monteith, 1973)	Couvert végétal	0,130	0,026	0,77
(Sauer et al., 1996)	Paillis de maïs sur pied	0,058	0,026	0,53
(Chen et al., 1997b)	Paillis d'orge	0,1	0,026	0,87
(Novak et al., 2000a)	Paillis d'orge	0,079	0,026	0,87

Tableau 3.9. Coefficients de structure déterminés pour un couvert végétal et quelques paillis

Ces coefficients sont donnés pour un revêtement bien précis. Selon la nature du revêtement, les coefficients de structure varient plus ou moins :

- pour a_{zom} , dans les travaux suivants : (Monteith, 1973), (Sauer et al., 1998) et (Novak et al., 2000a), les auteurs ont obtenu des valeurs semblables respectivement pour des cultures et divers paillis.
- a_{dz} varie de 0,66 à 0,8 selon les couverts forestiers (Monteith, 1973). Pour les paillis, la gamme est plus étendue. Ainsi, pour un paillis très aéré, peu dense et constitué de pieds de maïs de 30 cm de hauteur, $a_d = 0,57$ (Sauer et al., 1998) alors que pour un paillis dense de résidus d'orge, de 6 cm d'épaisseur et épandu à 10 t.ha⁻¹, $a_{dz} = 0,87$ (Novak et al., 2000a).
- Concernant a_{zoh} , il peut être considéré comme constant (Monteith, 1973) alors que dans d'autres travaux (Gonzalez-Sosa et al., 1999a), ce coefficient est considéré comme proportionnel à a_{zom} et étroitement dépendant de la vitesse de frottement (Verhoef et al., 1997).

3.1.2.5 Suivi des conditions hygrothermiques dans le compartiment Géotextile

L'état hygrothermique de la phase gazeuse du compartiment géotextile peut être caractérisé par la température T_{gair} de l'air qu'il renferme et son *humidité relative* HR_g définie comme d'habitude par le rapport de la pression partielle de vapeur d'eau p_v [Pa] sur la pression de vapeur saturante p_{vs} [Pa] :

$$HR_g = \frac{p_v}{p_{vs}(T_{gair})} \quad (3.25)$$

La *teneur en eau pondérale* w_g [kg.kg⁻¹] des brins permet de prendre en compte le phénomène éventuel d'interception de l'eau par le compartiment Géotextile quand il pleut. Il n'est généralement pas possible de passer de cette teneur en eau pondérale à

une teneur en eau volumique car on a faire ici à un milieu déformable dont il est difficile d'estimer la densité.

Une *courbe de rétention* $h(w)$ empirique de type puissance a été établie (Myrold et al., 1981) pour deux paillis de blé dont la taille des résidus varie de 0,5 à 1 cm, l'un étant frais, l'autre plus âgé et partiellement décomposé :

$$h = a.w^{-b} \quad (3.26)$$

La présence de composés en solution entre les résidus introduit un terme de *potentiel osmotique* qui modifie le potentiel total. Le Tableau 3.10 donne les valeurs des coefficients a et b de (3.26) mesurés par deux méthodes : plaque de pression et psychromètre.

Paillis	technique	a [m]	b [-]	R ²
Paille coupée	Plaque de pression	-12.8	1.50	0,79
	Psychromètre	-5.27	1.32	0,64
Paille broyée	Plaque de pression	-16.90	1.82	-
	Psychromètre	-22.70	1.20	1

Tableau 3.10. Coefficients d'ajustement des courbes de rétention (Myrold et al., 1981)

Findeling a proposé une autre relation (Findeling, 2001) :

$$\frac{h}{h_0} = \left[\ln\left(\frac{w_{sat}}{w}\right) \right]^b \quad (3.27)$$

avec h [m], le potentiel hydrique du paillis ; h_0 [m], le potentiel hydrique de référence ($h_0 = w_{sat}/e^1$) ; w [Kg.Kg⁻¹], la teneur massique en eau du revêtement ; w_{sat} [Kg.Kg⁻¹], sa teneur en eau massique à saturation ; b' [-], un coefficient d'ajustement. Cette relation tend vers $+\infty$ quand w tend vers 0 et prend la valeur 0 en w_{sat} . Pour un paillis de maïs dont $w_{sat} = 7.82$ Kg.Kg⁻¹ : $b'=5.80$ [-] et $h_0=-1.83$ [m] (Findeling, 2001). La courbe de rétention d'un paillis se distingue alors nettement de la forme générale valable pour un sol. En particulier, cette courbe possède une asymptote horizontale d'équation $h = 0$: Figure 3.8.

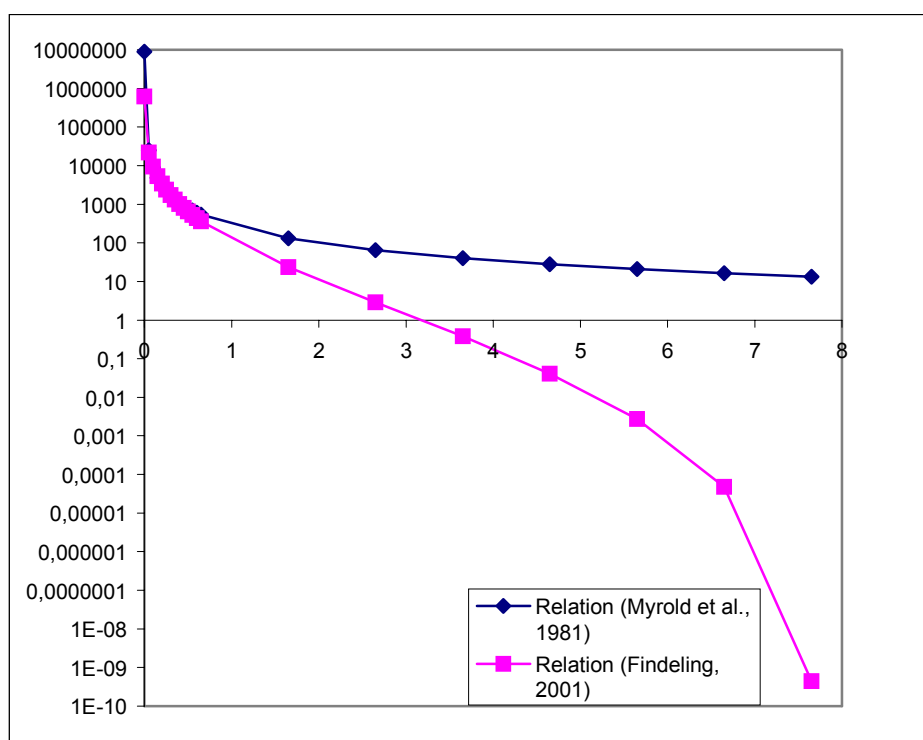


Figure 3.8. Comparaison de la forme générale des relations 3.26 et 3.27

Notons que pour un paillis, la teneur massique en eau peut être reliée à l'humidité relative par l'expression :

$$w_p = 0.064(HR_p^{-0.51} - 1)^{-0.42} \quad (3.28)$$

avec w_p [kg.kg⁻¹], la teneur massique en eau et HR_p , l'humidité relative du paillis.

Concernant le suivi des transferts de chaleur dans le compartiment Géotextile, la température T [°C] est la variable indépendante considérée.

3.1.3 LE COMPARTIMENT ATMOSPHERE

D'un point de vue général, l'atmosphère au dessus de la surface du sol est stratifiée en couches au sein desquelles - et entre lesquelles - s'opèrent les transferts de masse et de chaleur sous l'effet du vent, d'une stratification thermique, des forces de pression ou de Coriolis, etc. La couche de l'atmosphère la plus proche de la surface du sol est appelée *Couche Limite Atmosphérique (CLA)*. Les échanges de masse et de chaleur entre le sol et l'atmosphère s'effectuent dans cette couche qui est généralement subdivisée en quatre sous-couches. En partant de la surface du sol vers sa limite supérieure, on distingue usuellement les sous-couches : *interfaciale*, *dynamique*, *limite de surface* et *de transition*. En présence de vent, la sous-couche interfaciale en contact direct avec le sol est structurée par les effets de viscosité et de rugosité de surface. Dans cette sous-

couche, on calcule des *résistances aérodynamiques* pour les flux de masse et de chaleur dont l'expression dépend de la vitesse du vent mesurée à une hauteur de référence dans l'atmosphère et des propriétés de surface telles que nous les avons définies au §3.1.1.3.4 (cas du sol nu) et 3.1.2.4 (cas du sol couvert par un géotextile). On pourra trouver leur expression complète par exemple dans : (Braud, 2000).

3.1.3.1 Hypothèses

On suppose la couche d'air interfaciale homogène et stationnaire : stratification établie et stable. Les gradients horizontaux de température et d'humidité y sont négligeables devant les gradients verticaux. A l'inverse, la composante verticale de la vitesse du vent est pour sa part négligeable devant sa composante horizontale.

3.1.3.2 Mesures à effectuer dans le compartiment Atmosphère pour le suivi des conditions hygrothermiques.

C'est dans le compartiment atmosphère que l'on mesure les variables de forçage : l'intensité des précipitations P_i [m.s^{-1}], le rayonnement global R_G [W.m^{-2}], le rayonnement atmosphérique R_A [W.m^{-2}], le rayonnement net R_n [W.m^{-2}], l'humidité relative HR_{air} [-] ou [%] et la température T_{air} [$^{\circ}\text{C}$] ou [K] de l'air ainsi que la vitesse du vent U_{air} [m.s^{-1}].

CHAPITRE 4
ETUDE EN LABORATOIRE

Ce chapitre a pour objet la description des expériences réalisées. Dans une première partie nous présentons en détail le dispositif expérimental que nous avons construit dans l'objectif de reproduire en laboratoire le fonctionnement de systèmes SGA et SA en condition maîtrisée et d'accéder à des mesures fines, indispensables à la réussite de notre approche. Ce dispositif présente 3 principales caractéristiques originales :

- Le modèle physique est composé de quatre unités rapprochées. Cette construction nous a permis de suivre les transferts d'eau et de chaleur simultanément au sein de 4 systèmes SGA et/ou SA.
- L'équipe EPM – « Ecosystème et Paysage Montagnard » - du Cemagref disposait d'une chambre climatisée. C'est dans cette pièce que nous avons construit le modèle physique. On a pu ainsi contrôler le forçage atmosphérique et imposer les conditions aux limites.
- L'utilisation d'une centrale d'acquisition a permis d'automatiser la prise de mesure. Nous avons conçu un programme de pilotage avec une cadence de prise de mesure élevée, toutes les 2 minutes. Ainsi, on a pu suivre les transferts avec une bonne précision.

Nous présentons ensuite les matériaux « sol » et « géotextiles » utilisés dans le cadre de nos expériences puis nous décrivons le protocole expérimental. Enfin, nous terminons par un bilan critique du dispositif mis en place.

4.1 Principe général de conception du modèle physique

Cette toute première partie propose un survol rapide du dispositif dont nous détaillerons ensuite la description (cf. §4.2).

Globalement, le modèle physique est constitué de 4 bacs en PVC de capacité 1500 cm³, de dimensions : 15 cm de largeur, 50 cm de longueur et 20 cm de hauteur : Figure 4.1. On les a remplis d'un sol sableux (cf. §4.3.1) sur 18 cm de haut. Ils sont équipés de

presses étoupes étanches sur leurs faces avant et arrière pour permettre l'implantation de sondes à l'horizontale dans le sol.

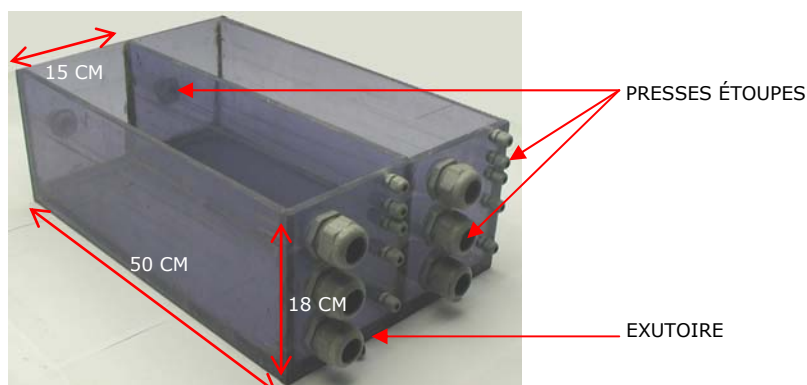


Figure 4.1 Photo des bacs groupés en binôme

La surface du sol est laissée à l'air libre quand on crée un système SA et recouverte par un géotextile (cf. §4.3.2) fixé au sol avec des agrafes métalliques quand on crée un système SGA : Figure 4.2.

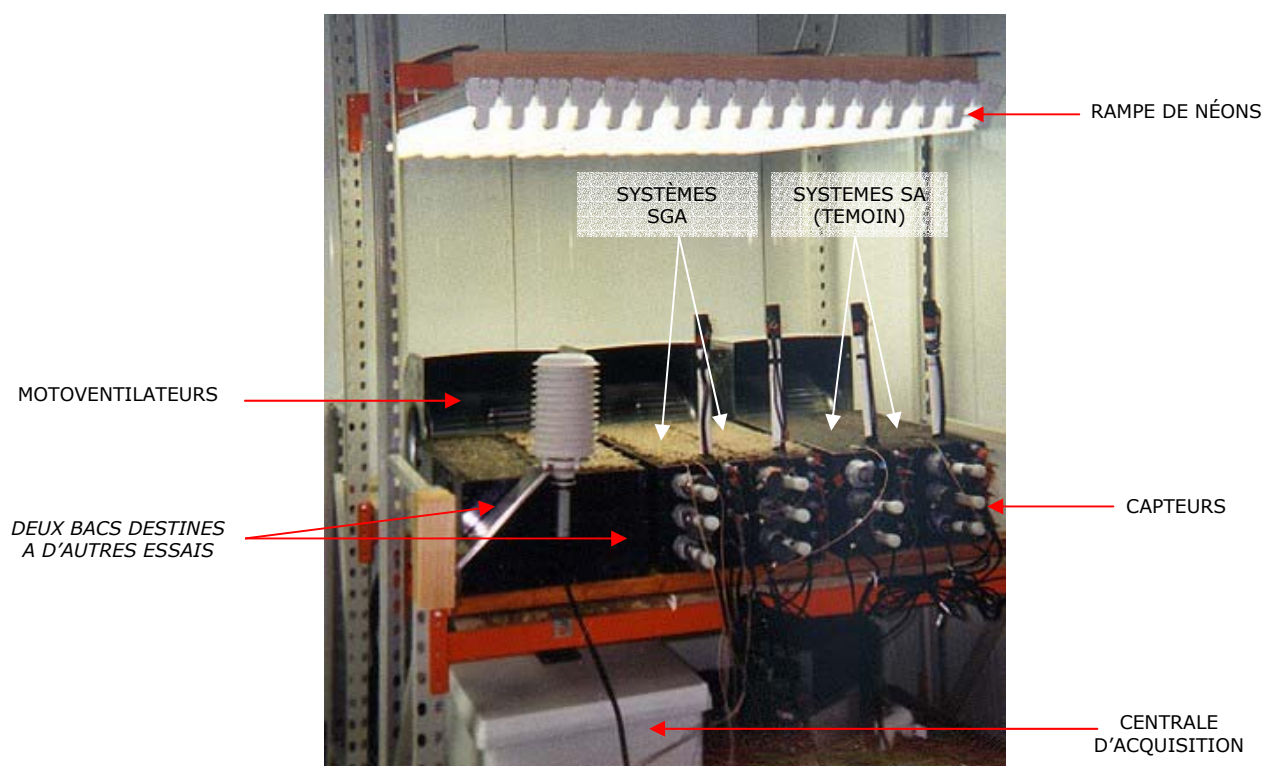


Figure 4.2 Photo du dispositif expérimental

Le compartiment « Atmosphère » est l'ambiance de la chambre climatisée qui est régulée en humidité et température. Une rampe de néons est la source d'énergie lumineuse dont la période d'éclairage est programmable et des motoventilateurs permettent de générer artificiellement du vent dont la vitesse est réglable par l'intermédiaire de variateurs de puissance : voir Figures 4.2 et 4.3. Une chaîne de mesure composée de 3 tensiomètres SKT850T (SDEC-France), 1 sonde capacitive HMS9000 (SDEC-France), 1 sonde CS615

(Campbell Scientific Inc. ou CSI) et 5 thermocouples de Type T (TCSA) répartis dans le sol, permet de suivre l'évolution temporelle de l'eau et de la température à l'intérieur de chacun des 4 bacs équipés à l'identique. A la surface du sol ou dans le compartiment géotextile – sous et au dessus des brins – on a pu mesurer l'humidité relative et la température à l'aide de 4 mini sondes HP-155C (Rotronic). La température, l'humidité de l'air (capteur HMP45C ; Vaisala) et le rayonnement net (NR-lite ; Kipp et Zonen) sont mesurés à +15 cm au-dessus de la surface du sol pour permettre le suivi des conditions d'échange. Une centrale d'acquisition CR10X (CSI) et ses deux multiplexeurs : l'AM416 et l'AM25T permettent la gestion du parc de l'ensemble des capteurs. La centrale est reliée en permanence à un PC équipé du logiciel PC208W (CSI) pour permettre son pilotage (programmation de la centrale et stockage des données collectées).

La Figure 4.3 permet de visualiser le dispositif en vue de profil et la Figure 4.4 fait l'inventaire du matériel utilisé. Et pour se faire une idée du prix de revient du dispositif, on peut consulter l'Annexe 4 où y sont précisés les coûts en matériel et où on peut aussi trouver la liste des principaux fournisseurs.

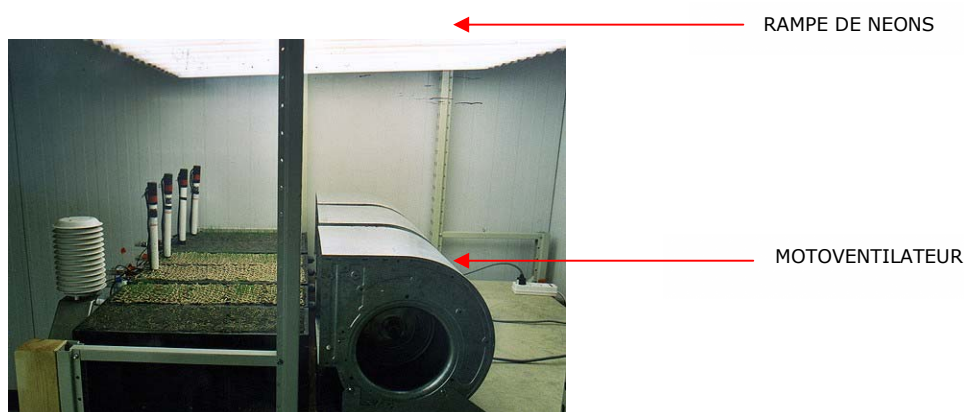


Figure 4.3. Photo en profil du dispositif

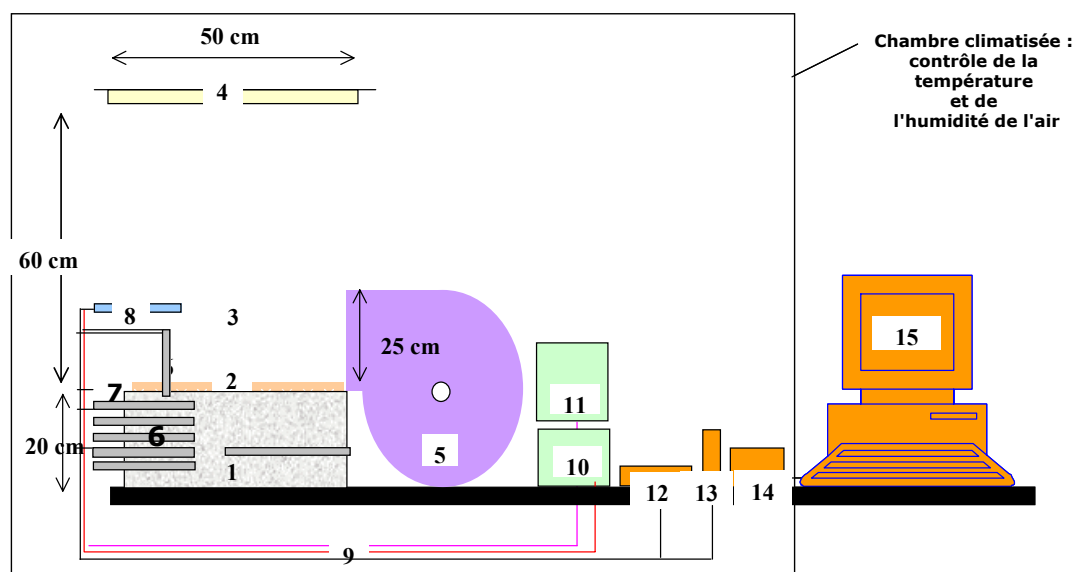


Figure 4.4. Schéma en profil de l'ensemble du dispositif expérimental

Légende

- 1 -Compartment « Sol »
- 2 -Compartment « Géotextile »
- 3 -Compartment « Atmosphère »
- 4 -Rampe de 17 néons
- 5 -Motoventilateur relié à un variateur de puissance (x3)
- 6 -Sondes du compartiment Sol (x4) :
 - thermiques : 5 thermocouples T
 - hydriques : 1 sonde CS615, 1 sonde capacitive HMS9000 et 3 tensiomètres SKT850
- 7 -Sondes de surface : 4 capteurs d'humidité et de température HP155C
- 8 -Sondes du compartiment Atmosphère :
 - thermique et hydrique : 1 sonde HMP45C
 - de rayonnement : 1 sonde NR-Lite
- 9 -Câbles des sondes reliées au centre d'acquisition
- 10-Alimentation externe (10VCC) pour les tensiomètres
- 11-Alimentation externe (12VCC) pour toutes les sondes qui nécessitent une mise sous tension avant le prise de mesure
- 12-Multiplexeur AM416
- 13-Multiplexeur AM25T spécialisé pour thermocouples
- 14-Centrale d'acquisition CR10X
- 15-Ordinateur équipé du logiciel PC208W pour la commande du dispositif d'acquisition et pour le traitement des données stockées.

4.2 Instrumentation

4.2.1 LE SUIVI DES TRANSFERTS DANS LE SOL

4.2.1.1 La Teneur en eau

On a utilisé 4 sondes CS615 (Figure 4.5) mises au point par Campbell Scientific Inc. (CSI). Le fonctionnement de ce capteur est réputé être basé sur le principe de la TDR – pour « Time Domain Reflectometry » - (Topp, 1993). Le guide d'onde est constitué par deux électrodes. Toute l'électronique est logée dans la tête plastique de la sonde qui peut fonctionner sous une tension nominale de 12V CC. On récupère un signal carré dont la période ν [msec] est fonction de la teneur en eau volumique moyenne θ du milieu : Figure 4.6. La relation qui relie ces deux grandeurs peut être représentée par un polynôme et dépend de la *conductivité électrique* γ [dS.m⁻¹] du sol exploré : Tableau 4.1. Pour plus de détail sur cette sonde, on peut consulter sa fiche technique en Annexe 5.

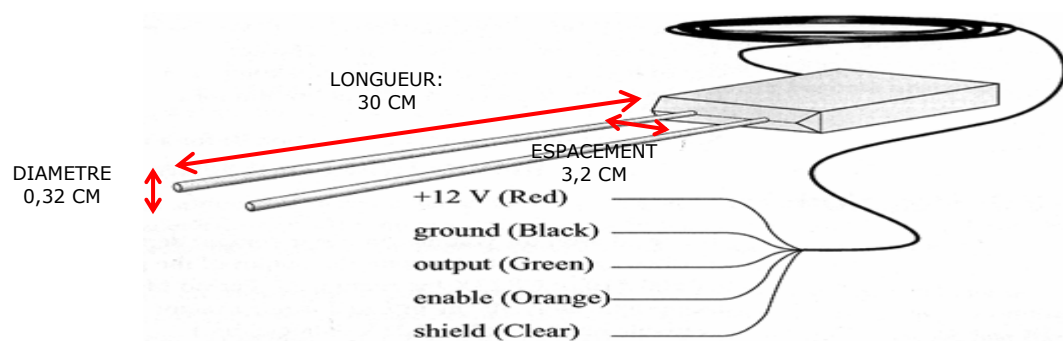


Figure 4.5. Photo de la sonde CS615 (CSI)

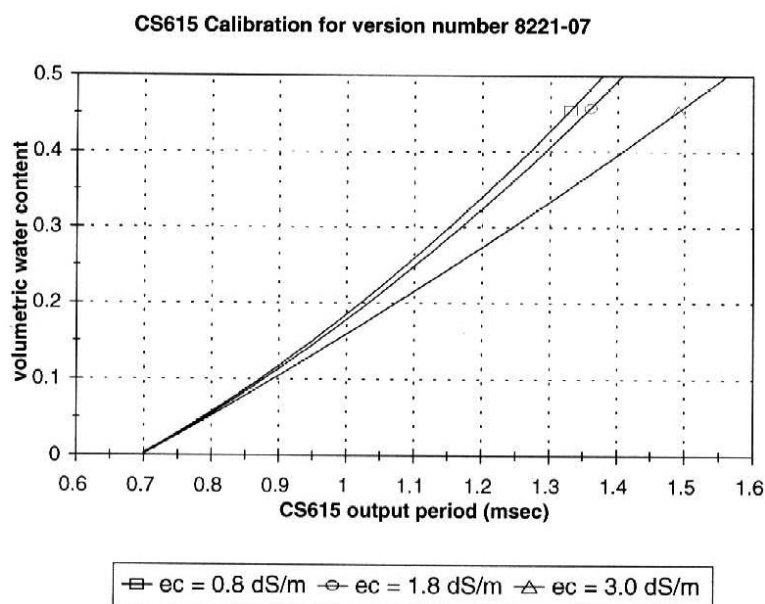


Figure 4.6. Courbes de calibration de la sonde CS615 proposées par Campbell-CSI (Campbell, 99)

Conductivité électrique γ [dS.m ⁻¹]	Calibration
≤ 1	$\theta = -0,187 + 0,037 \cdot \gamma + 0,335 \cdot \gamma^2$
1,8	$\theta = -0,207 + 0,097 \cdot \gamma + 0,288 \cdot \gamma^2$
3	$\theta = -0,298 + 0,361 \cdot \gamma + 0,096 \cdot \gamma^2$

Tableau 4.1. Relations $\theta=f(\gamma)$ en fonction de la conductivité électrique du sol (Campbell, 1999)

On disposait aussi de 4 sondes HMS9000 : voir Figure 4.7. Ce type de capteur a été conçu par SDEC-France en collaboration avec l'INRA d'Avignon. Son principe de fonctionnement repose sur la méthode diélectrique qui permet d'estimer la teneur en eau volumique à partir de la mesure de la *capacité électrique* C_e [F] du milieu qui est fonction de sa *permittivité absolue* ϵ_e [-] selon l'expression générale :

$$C_e = \epsilon_e \frac{\Sigma}{\vartheta} \times A' \quad (4.1)$$

avec Σ [m²], la surface des électrodes de la sonde, ϑ [m], la distance qui les sépare et A' , un facteur géométrique. Pour plus d'information sur ce capteur, on peut aussi consulter

sa fiche technique en Annexe 5. On a procédé à un premier étalonnage des 4 sondes en terme de permittivité. On a calé la réponse de la sonde sur 2 milieux : l'air sec et l'éthanol dont les permittivités respectives sont 1 et 24,3. Pratiquement, on a utilisé des bouteilles - l'une remplie avec du Silicagel, l'autre contenant 2 litres d'éthanol - dans lesquelles on a immergé successivement les 4 sondes. Dans le Tableau 4.2 sont comparés les résultats de l'étalonnage des sondes HMS9000. On a aussi procédé à un second étalonnage des sondes cette fois-ci par rapport au sol (Figure 4.8) pour pouvoir passer de la mesure de la permittivité ϵ_e à une estimation fidèle de la teneur volumique en eau θ . En effet, la permittivité est une grandeur très sensible à l'eau mais aussi aux minéraux présents dans le milieu, à sa densité etc. Pratiquement, on a déterminé plusieurs couples (ϵ_e, θ) . La permittivité ϵ_e a quant à elle été mesurée. Pour connaître la teneur en eau du sol θ , on a utilisé la méthode gravimétrique. On a procédé par différence de pesée d'échantillons de sol expérimental non remaniés (avant et après passage à l'étuve à 105°C jusqu'à poids constant) et on a utilisé la relation $\theta = w \cdot \delta_a$ pour passer de la teneur en eau pondérale w à la teneur en eau volumique θ . Notons que dans cette gamme de mesure, la relation entre la teneur en eau volumique et la permittivité est peu différente d'une droite mais peut être parfaitement décrite par un polynôme.

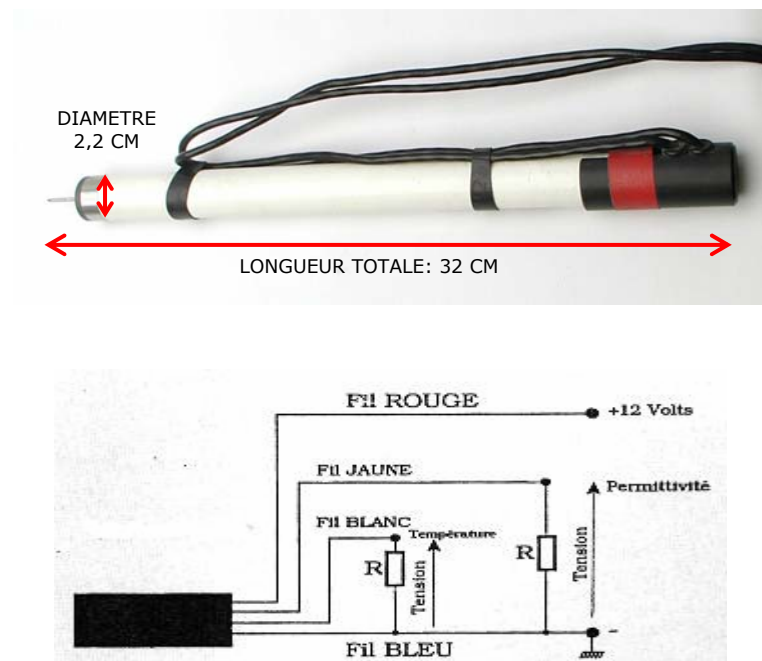


Figure 4.7. Photo de la sonde HMS9000 (SDEC) et schéma de câblage avec des résistances de $121 \Omega \pm 0.01$ pour obtenir une sortie tension.

SONDE HMS9000	Valeur moyenne de permittivité obtenue dans l'air	Valeur moyenne de permittivité obtenue dans l'éthanol
N°1	10,9	25,1
N°2	0,9	25,9
N°2	1,3	26,5
N°4	1,1	23,7

Tableau 4.2. Valeurs de permittivité obtenues en sortie de sonde dans les deux milieux de référence l'air et l'éthanol

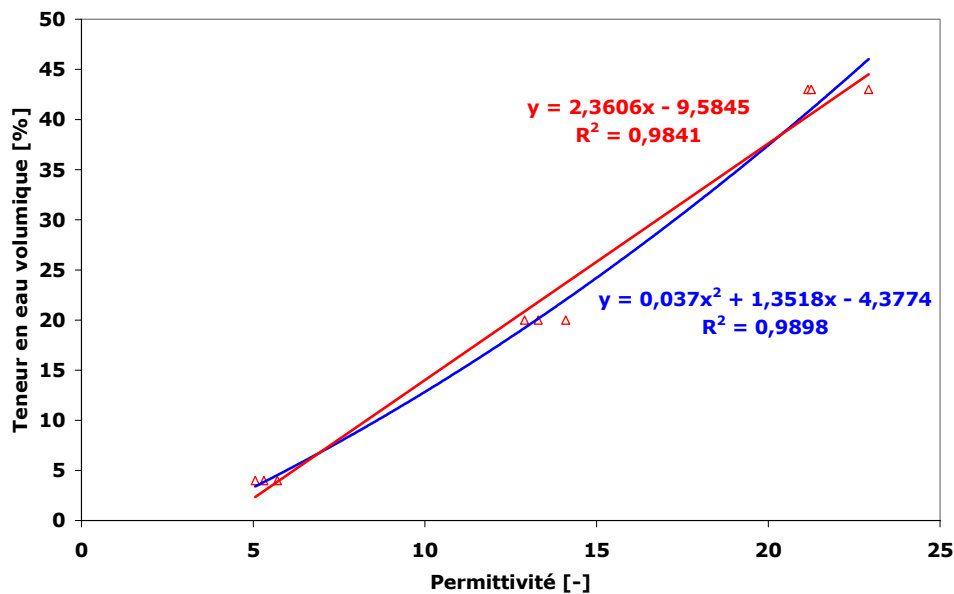


Figure 4.8 Exemple d'étalonnage d'une sonde HMS9000 par rapport au sol expérimental et les deux courbes de tendance, linéaire et polynomiales

On a déterminé pour chacun des 4 capteurs, la droite d'étalonnage qui lui correspond.

4.2.1.2 La succion

Pour mesurer la succion, on a utilisé deux types de micro-tensiomètres : SMS 2030 « S1 » ou « S3 » (SDEC-France) qui se différencient par le diamètre externe de leur céramique poreuse : 6 mm et 12 mm respectivement. Ces micro-tensiomètres sont connectés à une canne tensiométrique reliée à un dispositif manométrique : le capteur SKT 850T (SDEC-France) : Figure 4.9.



Figure 4.9. Photo d'un capteur SKT850T fixé sur une canne tensiométrique

Le tensiomètre est rempli d'eau propre et dégazée et la céramique poreuse permet le contact entre l'eau du sol et du tensiomètre. Le dispositif manométrique est quant à lui un capteur de pression différentielle à membrane qui prend comme référence la pression atmosphérique PA . Il est électronique et son alimentation doit être parfaitement stabilisée. Pour plus de précision sur ce capteur, on peut se reporter à sa fiche technique en Annexe 5. Ce capteur doit être étalonné. Le dispositif d'étalonnage que nous avons utilisé, a été schématisé Figure 4.10. Il se compose d'une bouteille pour partie remplie d'eau et pour le reste : par de l'air. De cette bouteille hermétiquement fermée partent deux tubes de plastique creux, l'un relié au capteur de pression à étalonner, l'autre à un baromètre à colonne de mercure. Enfin, une pompe est utilisée pour faire le vide dans la bouteille.

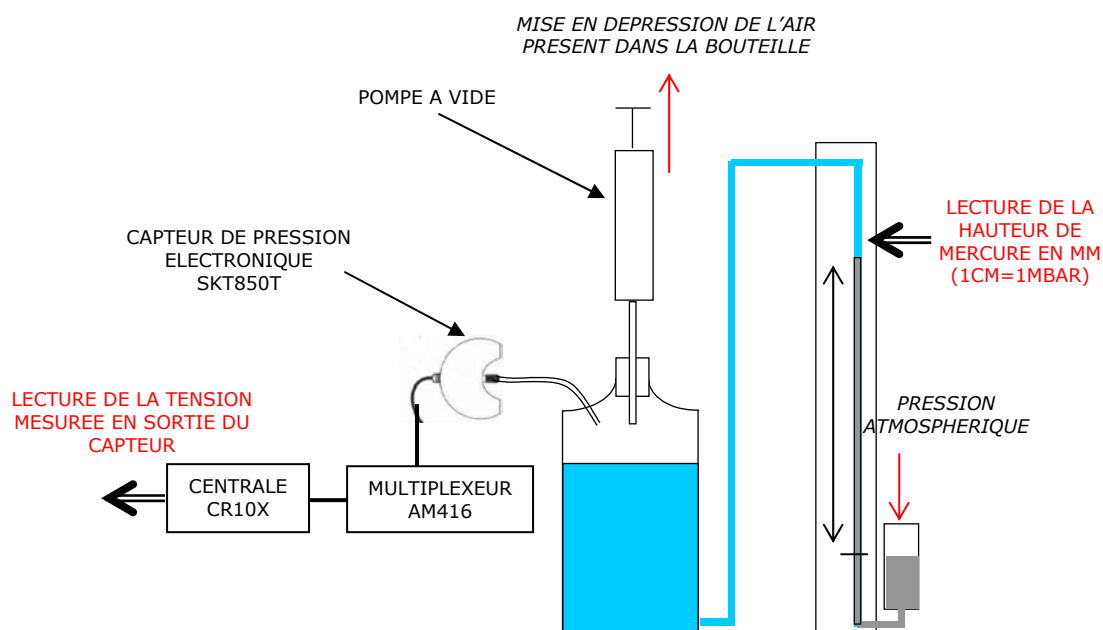


Figure 4.10. Schéma du dispositif d'étalonnage des capteurs SKT

Ce mode d'étalonnage ne peut exclure une erreur possible de parallaxe dans la lecture de la valeur correspondante. La relation entre le potentiel de pression dont la valeur a été lue sur l'étalon et la tension mesurée aux bornes des capteurs a été obtenue à partir de 7 points de mesure par capteur. Cette relation est linéaire : exemple Figure 4.11.

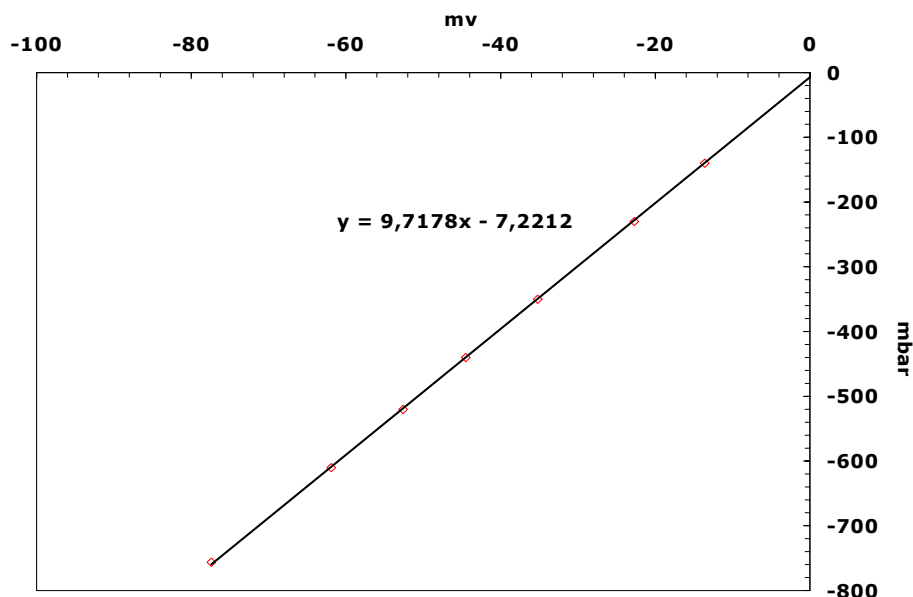


Figure 4.11. Exemple de courbe d'étalonnage d'un capteur SKT850T

Enfin, le graphique de la Figure 4.12 montre que suite au changement de température de la chambre climatisée – augmentation ou diminution brutale de 10°C en moins d'1 heure – il se produit une variation du potentiel matriciel de l'ensemble des capteurs SKT d'environ 7 mbar. La température pourrait être un facteur d'influence mal contrôlé qui conduit à une erreur systématique de mesure. Cependant, la notice technique de ces capteurs indique qu'ils sont compensés en température. Quoiqu'il en soit, ces variations doivent être prises en compte dans l'interprétation des résultats.

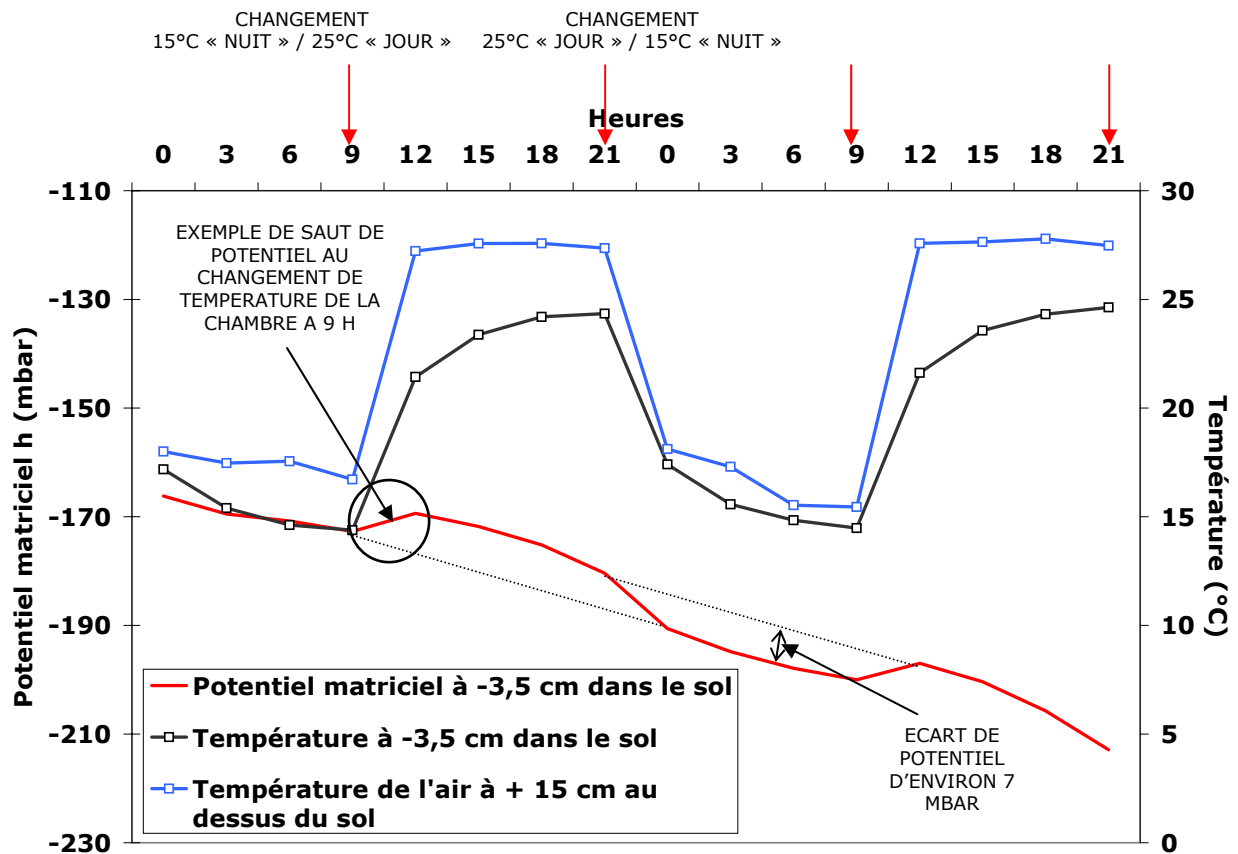


Figure 4.12. Influence de la température sur le potentiel mesuré dans la succession des jours

4.2.1.3 Les transferts thermiques

On disposait de 20 thermocouples de type T (cuivre-constantan) fabriqués par TC S.A. : Figure 4.13. Pratiquement, le thermocouple est constitué de 2 conducteurs de caractéristiques thermoélectriques différentes dont l'une de leurs 2 extrémités sont soudées ensemble en un point de jonction appelé la *soudure chaude*. A leurs autres extrémités chacun des 2 fils est connecté séparément à un multiplexeur spécialisé l'AM25T (CSI) en un point de jonction appelé *soudure froide* dont la température est contrôlée et identique pour les deux soldes. La faible différence de potentiel qui s'observe entre les deux jonctions de mesure (de l'ordre de $40 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ pour un thermocouple T (Gouet, 1993)) est amplifiée grâce à un système d'amplification associé au multiplexeur. Les thermocouples dont le fonctionnement est passif, ne nécessitent pas d'alimentation. On a en outre protégé ces derniers et notamment leur soudure chaude en les fixant dans des gaines en Inox – de diamètre externe 4 mm – avec de la colle Araldite. Les thermocouples qui ne sont plus directement en contact avec le sol présentent dès lors une certaine inertie qui malgré tout est acceptable dans notre cas car les fluctuations de la température du sol sont assez graduelles : voir Figure 4.12.



Figure 4.13. Photo d'un thermocouple dans sa gaine en inox

Ces capteurs doivent être étalonnés. On a utilisé pour cela un bain thermostaté dont la température T_b est connue. Les 20 thermocouples ont été immergés à différentes températures T_b et on a relevé pour chaque thermocouple la tension en sortie. Dans la gamme des températures testées, quel que soit le thermocouple considéré, la relation entre la tension mesurée et la température du bain T_b est sensiblement linéaire : exemple Figure 4.14.

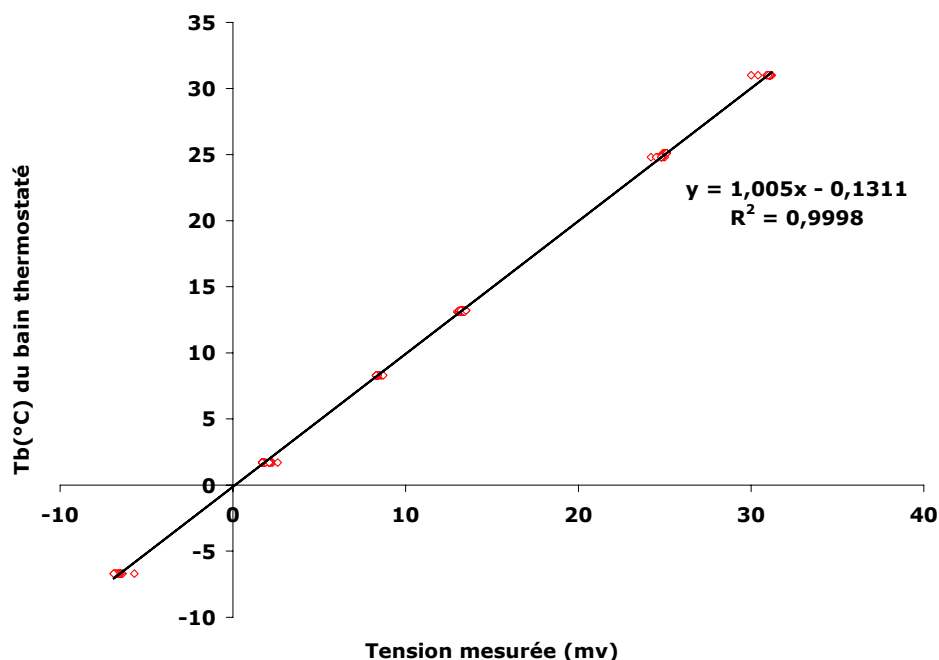


Figure 4.14. Courbe d'étalonnage moyenne de l'ensemble des thermocouples T

On constate sur cette figure que les caractéristiques de chaque thermocouple sont très proches de la droite moyenne représentée. Néanmoins par soucis de précision, on a gardé pour chaque thermocouple, la droite d'étalonnage qui lui correspond.

4.2.1.4 L'implantation des capteurs

Les capteurs ont été implantés à des cotes bien précises dans le sol de chacun des 4 bacs. La sonde HMS9000 suit les variations de la teneur volumique moyenne en eau dans les 3 premiers centimètres du sol, la sonde CS615 à -12 cm dans le sol, les 5 thermocouple T et les 3 capteurs SKT850T ont été disposés suivant deux profils verticaux aux coordonnées indiquées Figures 4.15 et 4.16. Pour éviter d'encombrer de capteurs la

surface du sol, ce qui perturberait les échanges thermique et hydrique avec l'atmosphère et pour limiter le problème des écoulements préférentiels de l'eau autour des sondes, on a choisi d'implanter horizontalement la plupart des capteurs. Pour ce faire, on a fixé à la colle Araldite des presses étoupes étanches IP-68 en Polyamide (Contact Connectors) sur les parois avant et arrière des bacs : Figure 4.15. Seules les sondes HMS9000 ont été insérées par le dessus car la géométrie de leurs électrodes nous l'imposait : voir leur fiche technique en Annexe 5.

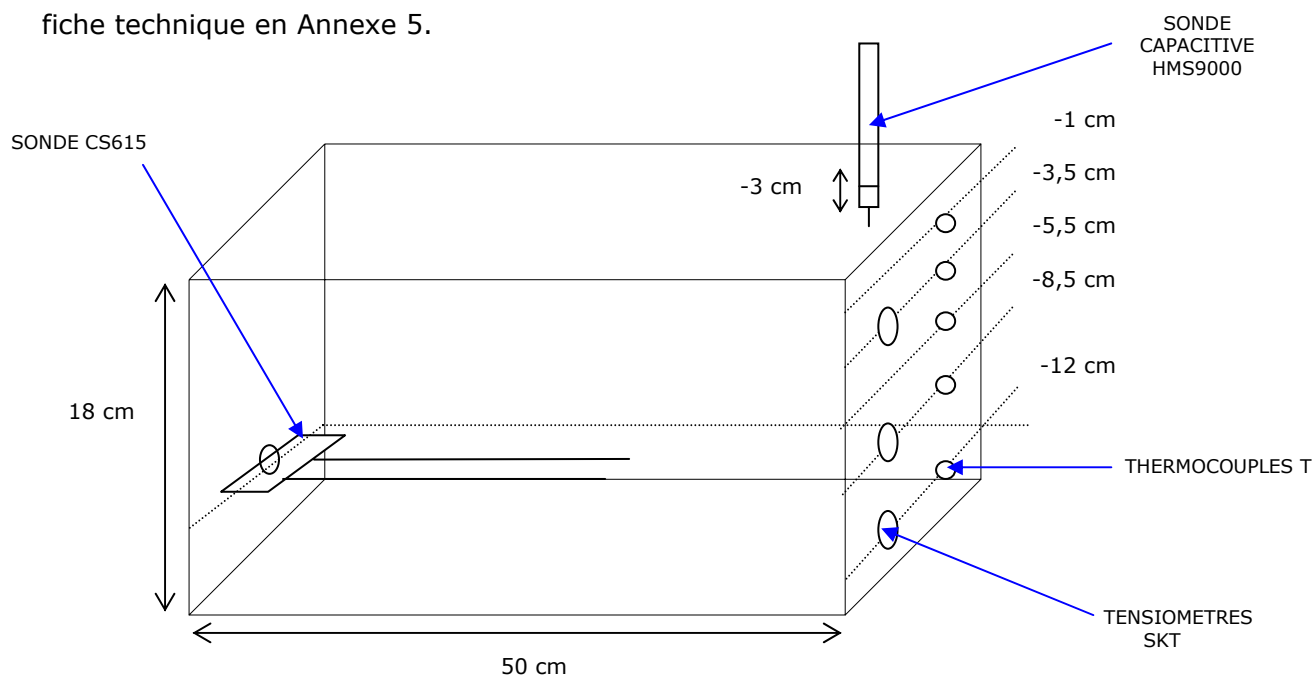


Figure 4.15. Schéma en perspective de l'implantation des capteur dans le compartiment sol

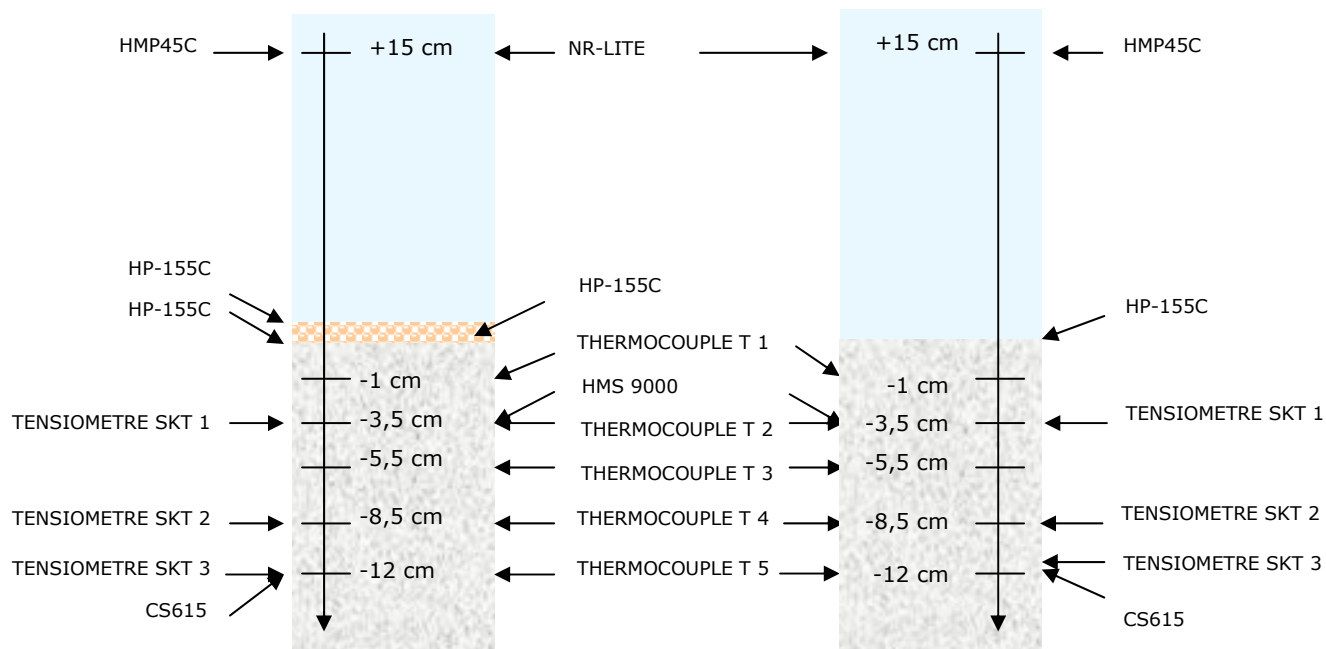


Figure 4.16. Schéma en bloc de l'implantation des sondes dans un système SGA et SA de gauche à droite respectivement

4.2.2 LE CONTROLE ET LE SUIVI DES CONDITIONS AUX LIMITES

4.2.2.1 Le suivi du microclimat dans le compartiment géotextile

4 sondes HP-155C (Rotronic) de diamètre 5 mm ont permis des prises de mesure très locales d'humidité relative et de température à la surface du sol ou du revêtement géotextile : Figure 4.17. On a en outre limité la zone d'exploration de la sonde à 1 seule de ses fentes avec du plastique thermorétractable.



Figure 4.17. Photo d'une sonde HP-155C et implantation des capteurs (fixés à l'aide d'agrafes métalliques) à la surface du sol et du géotextile

4.2.2.2 La maîtrise et le suivi des conditions d'échange

4.2.2.2.1 Le Vent

Pour accélérer la phase d'assèchement du sol, on a cherché à mettre en place une ventilation à débit d'air régulier, à écoulement le plus laminaire possible et qui soit similaire au-dessus de chacun des 4 bacs. La profondeur de la chambre climatisée qui est de 3 mètres ne permettait pas la construction d'un conduit suffisamment long qui permet « classiquement » l'installation d'un flux laminaire en utilisant des ventilateurs. On a testé plusieurs solutions avec deux types de ventilateurs – hélicoïdaux et à turbines (Figure 4.18) - et des systèmes de guidage du flux d'air comme un filtre récupéré sur une hotte laminaire pour laboratoire et divers filtres pour hotte d'aspiration ainsi qu'un système « cheminée » : Figure 4.19.

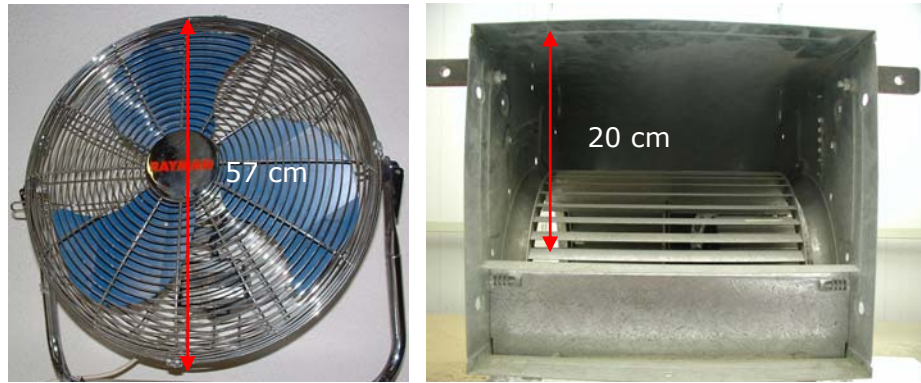


Figure 4.18. ventilateur hélicoïdal (à gauche) et à turbine (à droite)

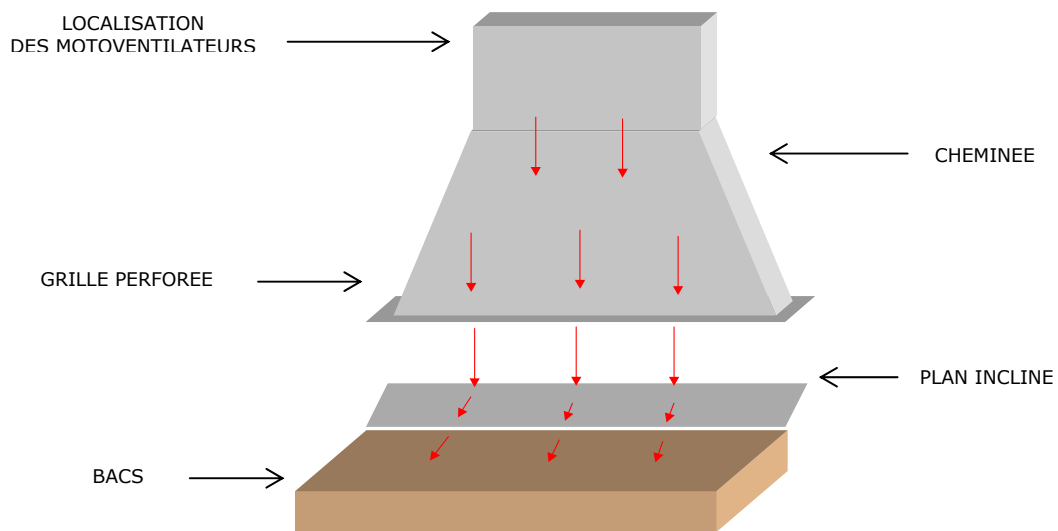


Figure 4.19. Exemple de cheminée de guidage du flux d'air testée

On s'est servi d'un anémomètre (Vector Instruments) pour cartographier la composante horizontale de la vitesse du vent au-dessus des 4 bacs suivant un quadrillage comme indiqué Figure 4.20. Notre choix s'est finalement porté sur l'utilisation simple de moto-ventilateurs à turbines reliés à des variateurs de puissance et disposés devant les bacs : voir Figure 4.20, car chaque bac est alors ventilé de manière très similaire. En sachant qu'il faut tenir compte de l'incertitude sur la prise de mesure, l'amplitude maximale des variations entre les bacs à la même cote est inférieure à 3% : exemple Figure 4.21.

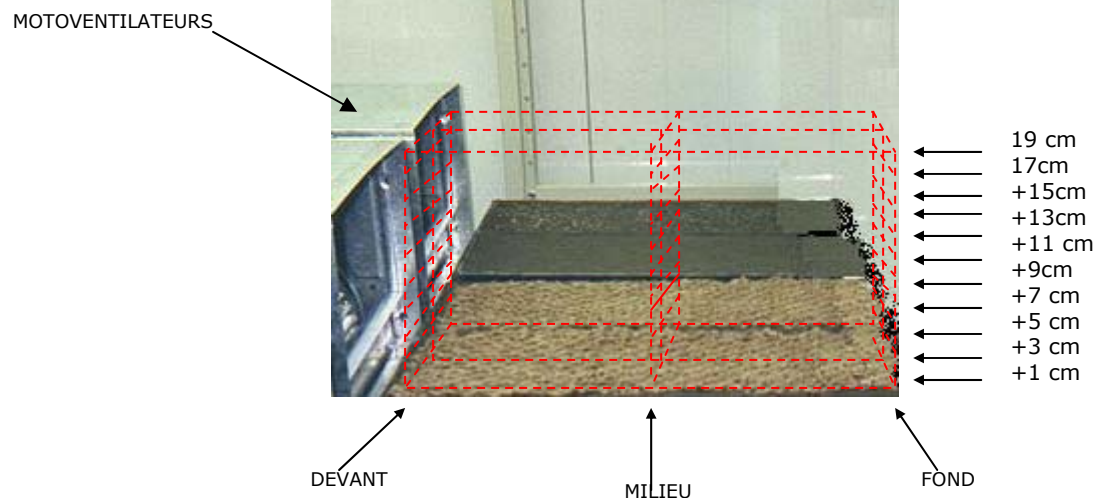


Figure 4.20. cartographie suivant un quadrillage « devant, milieu, au fond »

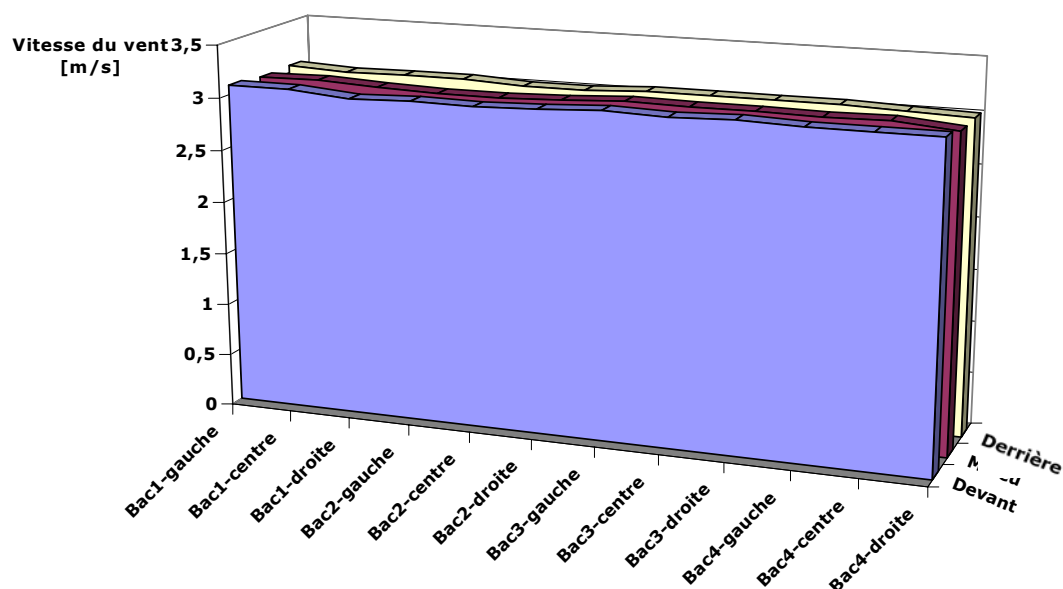


Figure 4.21. Cartographie en long à 7 cm au-dessus de la surface du sol

Si on regarde le profil vertical de la vitesse du vent, dans notre cas, on constate qu'au-delà de 15 cm, la vitesse du vent diminue car l'influence de la couche d'air non ventilée au-dessus du bord supérieur des motoventilateurs commence à se faire sentir : Figure 4.22. Ce profil est différent de celui rencontré dans les conditions naturelles au voisinage d'une surface de sol homogène horizontalement et étendue où il se développe une

couche limite turbulente au sein de laquelle le profil de la vitesse du vent est logarithmique (Guyot, 1997).

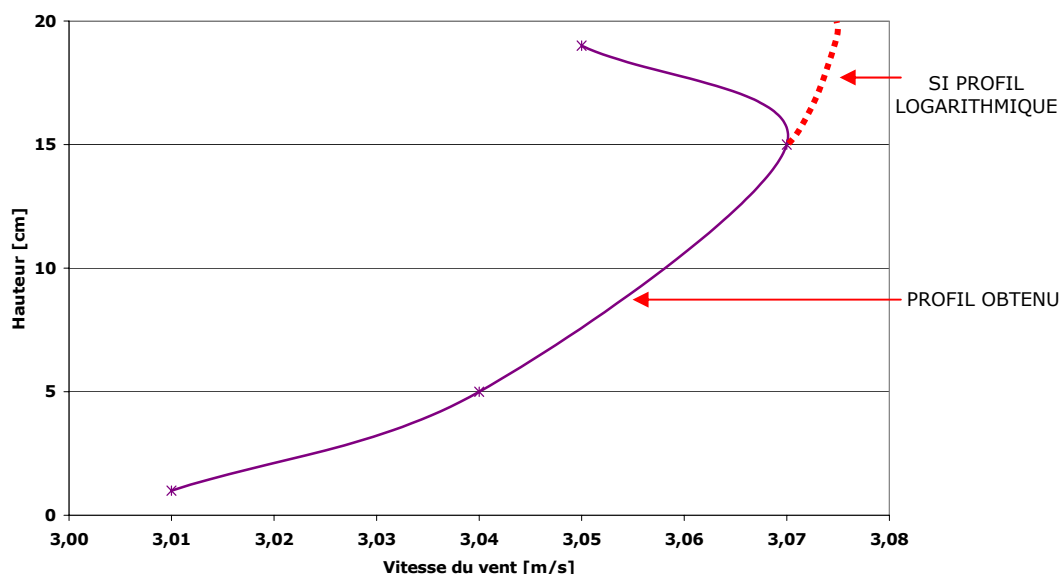


Figure 4.22. Allure du profil de vent que l'on obtient

4.2.2.2.2 Le Rayonnement

Pour l'éclairage, on a fabriqué une rampe constituée de 17 néons branchés en série. On a plus précisément disposé en alternance 2 types de néons de puissance 36 watts : Prestiflux Or Jour (TFP 36 JR 865) et Prestiflux Or Blanc chaud (TFP 36 BC 830) dont les 2 spectres (Figure 4.23) une fois superposés se confondent assez bien avec le spectre d'absorption des pigments bruts : voir Figure 4.24. Malgré tout à 660 nm, les néons ne rayonnent presque pas d'énergie alors que l'on se situe à l'un des deux pics d'absorption maximal par les pigments bruts. Cependant et bien que le rayonnement net moyen mesuré par exemple au-dessus du sol sec : 67 watts.m^{-2} soit environ 4 à 5 fois inférieur à celui qui serait obtenu sous éclairage naturel, la lumière émise permet de fournir l'énergie nécessaire à la photosynthèse des plantes qui seraient éventuellement semées : voir l'expérience sur la végétation herbacée semée au Chapitre 6.

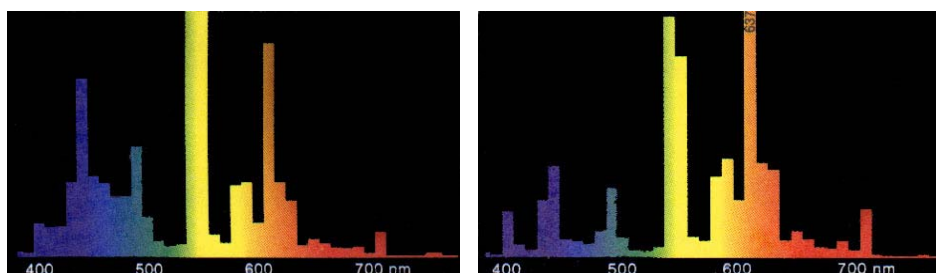


Figure 4.23. Répartitions spectrales énergétiques du rayonnement des néons « Jour » et « Blanc chaud » respectivement - Domaine du visible

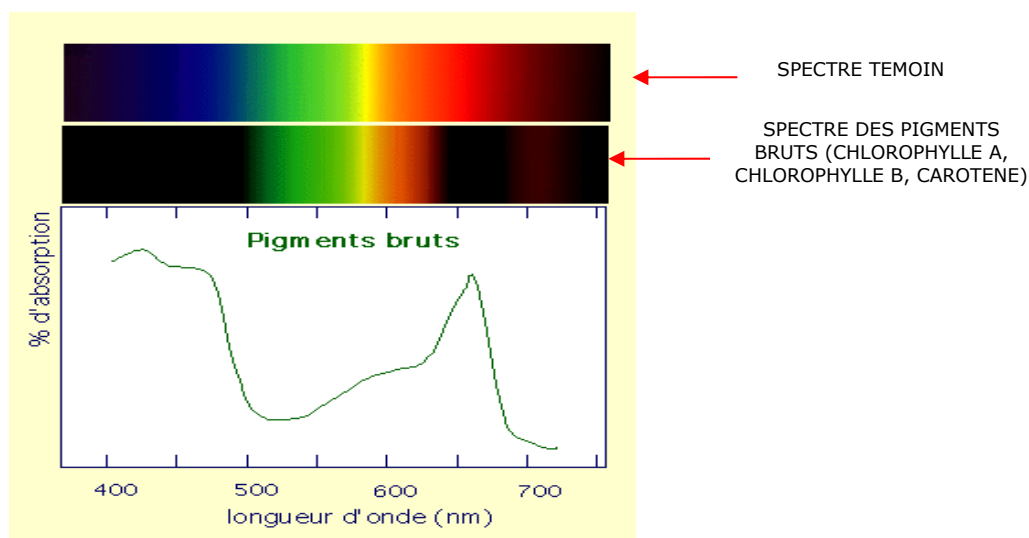


Figure 4.24 Spectre d'absorption des pigments bruts

Le rayonnement net a été mesuré à l'aide d'un radiomètre à thermopile : NR-Lite (Kipp et Zonen) (Figure 4.25) fixé à +15 cm au-dessus de la surface du sol : voir Figure 4.16 et dont on peut consulter la notice technique en Annexe 5.

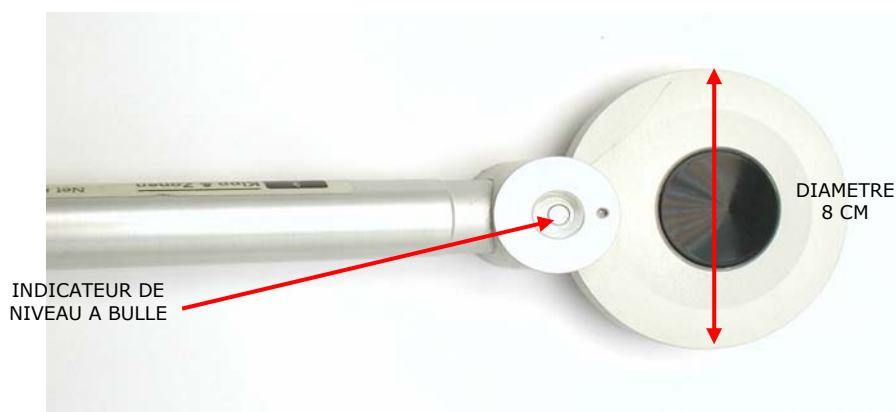


Figure 4.25. Photo du capteur NR-lite

4.2.2.2.3 La température et l'humidité de l'air

La sonde HMP45C (Vaisala) (Figure 4.26) a permis de mesurer l'humidité relative et la température de l'air dans le compartiment Atmosphère : voir aussi sa notice technique en Annexe 5. Les mesures sont réalisées à + 15 cm au-dessus de la surface du sol. On a protégé ce capteur du rayonnement direct avec un écran protecteur : Figure 4.27. On peut regarder aussi les Figures 4.2 et 4.3.

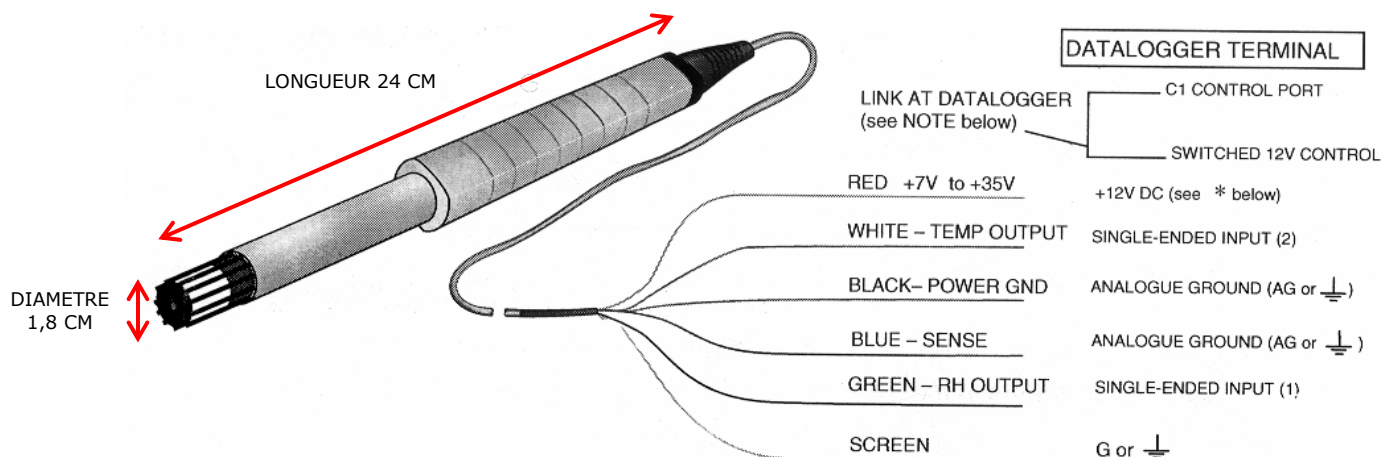


Figure 4.26. Photo du capteur HMP45C

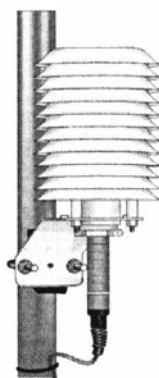


Figure 4.27. Ecran protecteur du rayonnement direct pour la sonde HMP45C

Concernant le mode de fonctionnement de la chambre climatisée qui a permis de contrôler la période d'éclairage, la température et l'humidité relative de l'air, on peut le résumer ainsi :

L'augmentation des températures s'opère par l'intermédiaire de résistances électriques et la baisse des températures par un groupe frigorifique. Le contrôle est réalisé automatiquement grâce au système de régulation. Il est schématiquement constitué par un dispositif d'affichage des températures où les valeurs peuvent être programmées dans le temps, par des capteurs de température installés dans la pièce climatisée et par des dispositifs de commande de mise en route : soit du groupe froid soit des radiateurs. Le taux d'humidité relative est maintenu autour de 70%. Du fait de l'alternance des températures dans la pièce, le contrôle de l'humidité nécessite des apports de vapeur d'eau ou des retraits. Les apports de vapeur d'eau sont réalisés par adjonction directe sous la forme d'un brouillard de fines gouttelettes d'eau à l'aide d'un vaporisateur. Ce dispositif fonctionne lors de la montée en température et lors de la phase de restauration notamment après une ouverture de la porte. L'assèchement partiel de l'air trop humide est effectué lors de la phase de descente en température. Cet assèchement s'opère par refroidissement sur les circuits contenant le frigorigène. Le système de

régulation de l'humidité comprend des capteurs en relation avec un organe de commande, soit de l'évaporateur, soit du groupe frigorifique. A noter que dans la pièce climatisée, le système d'éclairage, les apports d'eau lors de la saturation des bacs par exemple ainsi que les sources de chaleur latente et sensible propres aux structures, au sol etc., sont autant de perturbations qui influent sur la régulation de la température et de l'humidité relative de l'air. Et pour finir, signalons que le renouvellement de l'air dans la chambre climatisée est effectué en permanence grâce à un système de ventilation.

Bien que l'humidité et la température de l'air soient normalement contrôlées et fixées respectivement à 70% et 25°C « jour » / 15°C « nuit » ou 10°C « jour » / 4°C « nuit » selon les expériences, on constate cependant un écart par rapport aux consignes qui est par exemple de l'ordre de 3 à 5°C pour les températures et on observe aussi des fluctuations de la température et de l'humidité qui sont liées aux imperfections du système de régulation et aux perturbations apportées (voir ci-dessus les deux fonctions du groupe frigorifique) : voir Figure 4.28.

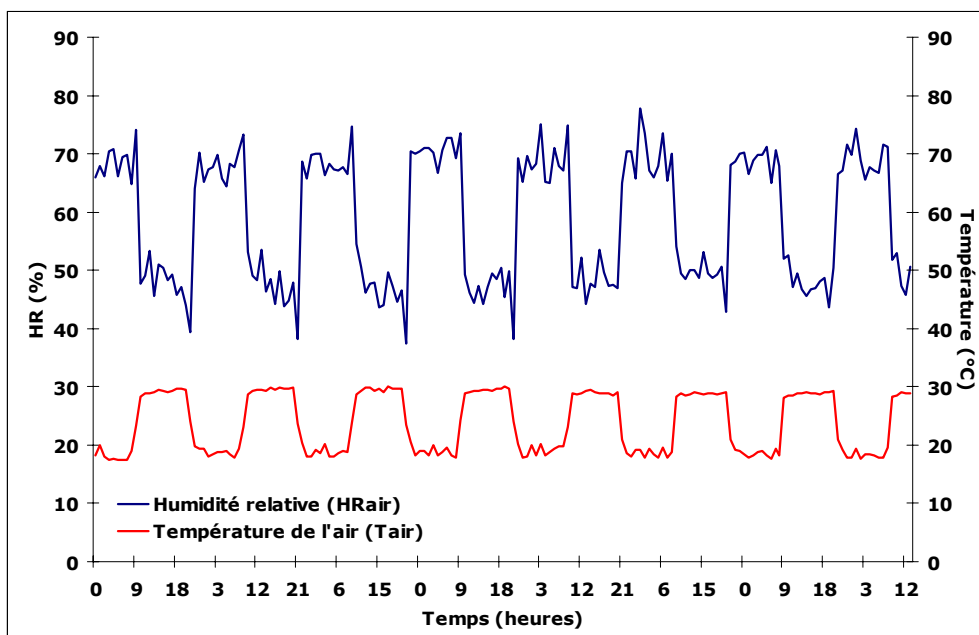


Figure 4.28. Ecart de consignes et fluctuations des températures et de l'humidité de l'air mesurées à +15 cm au-dessus de la surface des bacs avec la sonde HMP45C

4.2.3 LE SYSTEME D'ACQUISITION DES DONNEES

La station de mesure qui permet d'automatiser la collecte des données, est constituée d'une centrale d'acquisition des données CR10X (CSI) reliée à deux multiplexeurs : un multiplexeur à relais solides pour thermocouples, l'AM25T (CSI) et un multiplexeur à relais mécaniques, l'AM416 (CSI) pour toutes les sondes qui nécessitent une alimentation. On a utilisé deux types d'alimentation : l'une délivrant une tension de 10 VCC stabilisée pour les tensiomètres qui sont alimentés en permanence et pour les

autres sondes, une alimentation à relais (12 VCC) qui permet d'alimenter les capteurs juste quelques secondes avant la prise de mesure. Les sondes ont été connectées aux différents modules de la station de mesure (Figure 4.29) selon le schéma de câblage ci-contre : Figure 4.30.

On a écrit un programme de pilotage de l'alimentation des sondes, des prises de mesure, de la récupération et du stockage des données qui intègre l'étalonnage des capteurs et la conversion des tensions mesurées en valeurs interprétables de teneur en eau, potentiel, humidité, température etc. La programmation a été effectuée à l'aide du logiciel PC208W (CSI) qui est équipé d'un éditeur de programme. On a employé une seule des trois tables disponibles puisqu'on n'a pas eu besoin d'utiliser de *subroutine* et que l'on a retenu qu'un seul intervalle d'exécution. La lecture du programme est séquentielle et d'une manière générale, son exécution débute par la scrutation des sondes, puis on ouvre un tableau de sauvegarde et on sauve les données en les traitant (moyennes etc.). On peut consulter en Annexe 6, les principales séquences commentées du programme. Ce dernier est en outre disponible dans son intégralité sur simple demande.

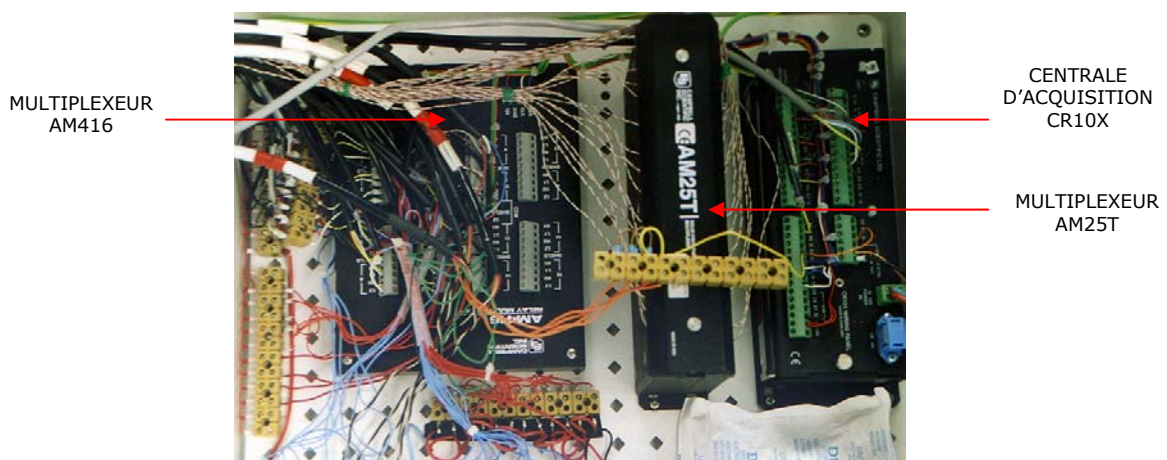


Figure 4.29 Photo de la station de mesure

91

4.3 Les matériaux

4.3.1 LE SOL SUPPORT

On voulait un matériau fin, qui soit homogène et isotrope et qui ait le moins de retrait possible. Le sol qui remplit chacun des bacs a été prélevé sur les berges de l'Isère. Il est sans cailloux ni graviers de $\varnothing > 2\text{mm}$ et il présente une répartition pondérale des diamètres apparents des particules avec un pic entre $100\ \mu\text{m}$ et $200\ \mu\text{m}$ (Figure 4.31).

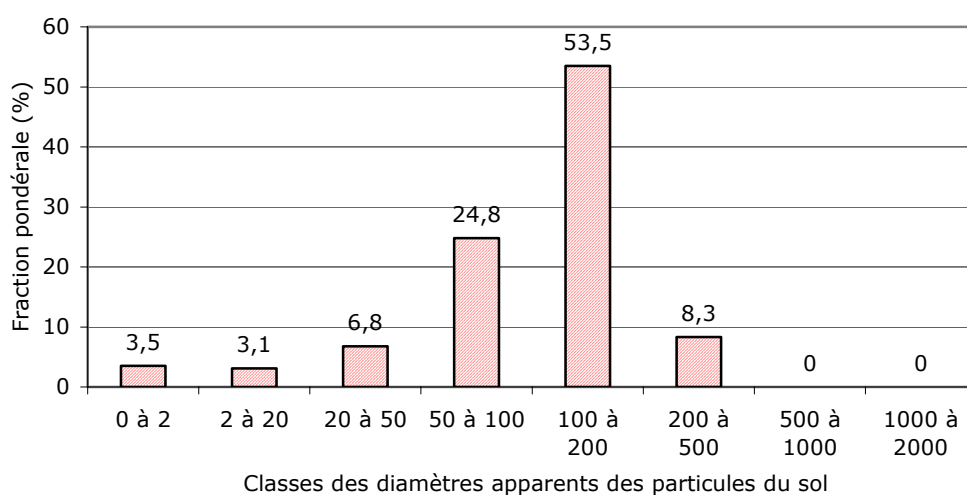


Figure 4.31. Granulométrie 8 fractions réalisée au laboratoire d'Analyse des sols de l'INRA d'Arras.

Il appartient à la catégorie des sables avec un faible pourcentage d'argiles et de limons (respectivement 3.5% et 9.9%) : Figure 4.32.

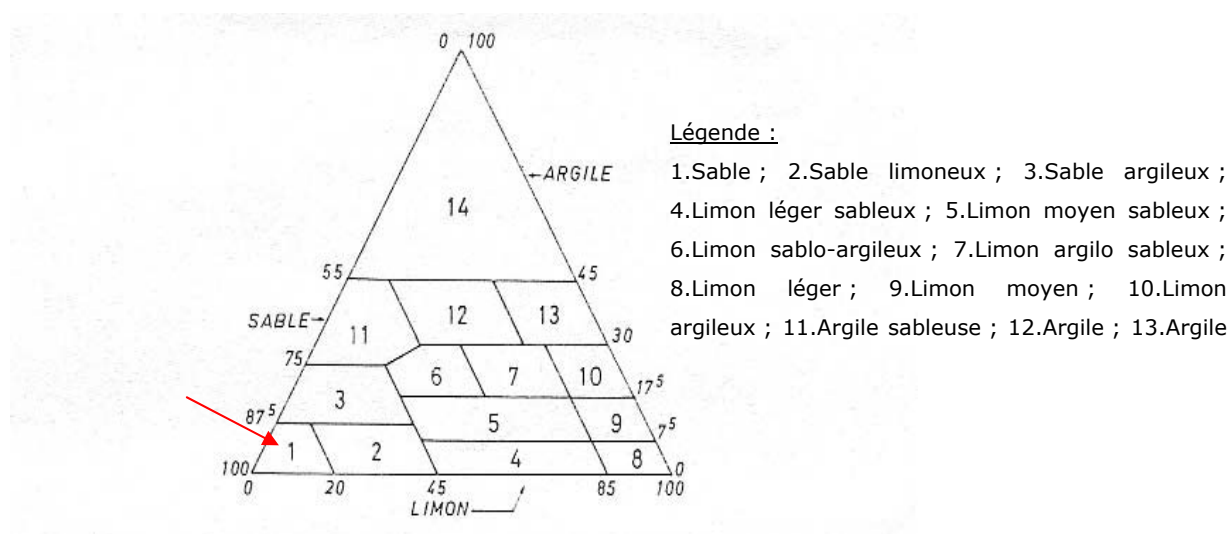


Figure 4.32. Diagrammes de texture (Duchaufour, 1995)

La fonction de distribution de la taille des particules $F(d)$ a été établie par ajustement de la forme générale de distribution (3.12) aux données discrètes issues de la granulométrie 8 fractions réalisée au laboratoire d'Analyse des sols de l'INRA d'Arras : Figure 4.33.

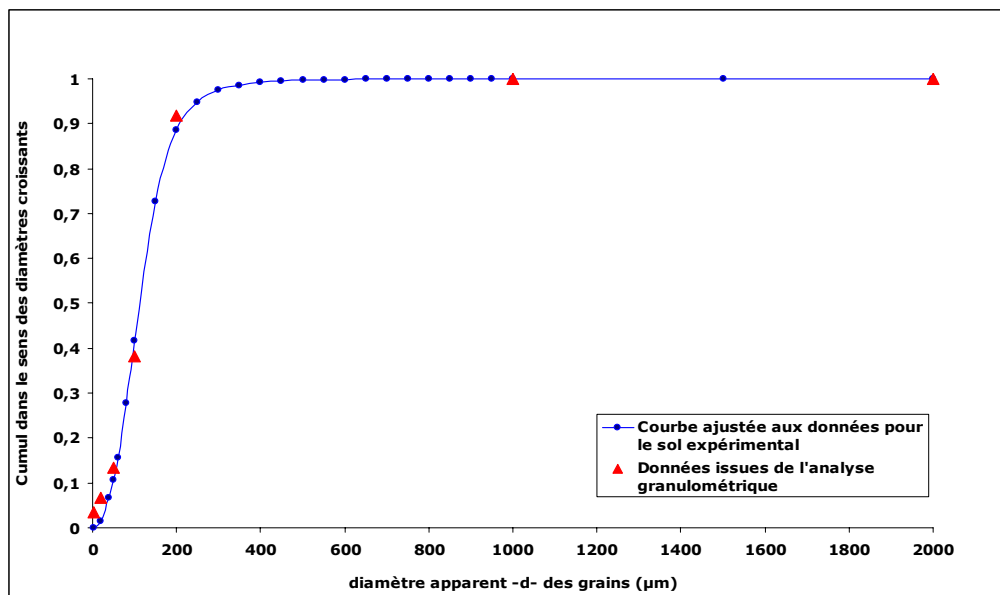


Figure 4.33. Distribution de la taille des particules du sol expérimental

On a retenu :

$$F(d) = \left\{ 1 + \left(\frac{145.84}{d} \right)^{4.08741} \right\}^{-0.51069} \quad (4.2)$$

Ce qui nous donne en utilisant la méthode décrite au Chapitre 3 §3.1.1.3.1 (partie matrice solide, paragraphe granulométrie), les paramètres de forme de la relation de Van Genuchten (3.4) suivants : $n_{VG}=3,03214$ et $m_{VG}=0,3404$ et une tortuosité τ estimée à 1,02239 [-] qui ont été utilisés par la suite pour la paramétrisation des versions SiSPAT et SiSPAT_mulch : voir Chapitre 5 §5.3.2.

La masse volumique apparente sèche ρ_{sec} et la porosité n du sol ont été déterminés à partir de prélèvements de sol non remaniés (boîte de 243 cm³). Les 8 échantillons ont été saturés par le bas ce qui a permis de chasser au maximum l'air piégé dans le sol. Nous avons alors pu considérer qu'à saturation des échantillons, l'eau avait rempli la totalité de l'espace poral. Nous les avons ensuite pesés à saturation puis après un séjour à l'étuve à 105°C jusqu'à poids constant (environ 48 h). On a trouvé des valeurs de ρ_{sec} de 1,51 à plus ou moins 5% près. En prenant la valeur moyenne de 2,65 pour la densité des grains, on a obtenu en utilisant l'équation 3.11, une porosité moyenne n de 0,43.

$\theta_{\max}$ a pour sa part été déterminée à l'aide d'une sonde capacitive HMS 9000 (voir §4.2.1.1). On a attendu que l'excédent d'eau ait été drainé et que le régime d'écoulement vers le bas soit devenu nul. $\theta_{\max} = 0,35$ en moyenne. Concernant θ_k et θ_{res} , n'ayant pas de définition physique précise et leurs valeurs dépendant beaucoup des conditions expérimentales retenues (Laurent, 2001), nous avons arbitrairement fixé θ_k à 10^{-3} et θ_{res} à 0. Quant à θ_f , il a été déterminé en utilisant la relation de Van Genuchten appliquée au sol expérimental (voir équation 5.6 au Chapitre 5 suivant) en prenant $h = -150$ m par rapport à la pression atmosphérique : $\theta_f = 2,84 \cdot 10^{-3}$.

Pour sa part, l'étude de la composition de la phase solide du sol nous a conduit à distinguer en toute première analyse, la matière organique des particules minérales puis de distinguer le silicium des autres éléments minéraux. La matière organique est présente en quantité négligeable : $10,9 \text{ g.Kg}^{-1}$, soit environ 1% du poids total. Le reste contient une part infime de silicium : $0,2 \text{ g.Kg}^{-1}$ soit 0,02% du poids total. Le carbone a été mesuré après combustion à sec (NF ISO 10694 et 13878) et le silicium par la méthode TAMM (dissolution de la phase non cristalline par le réactif de TAMM - acide oxalique + oxalate d'ammonium - à $\text{PH}=3,2$ et à l'obscurité). Cette analyse a été réalisée par le Laboratoire d'Analyse des Sols de l'INRA d'ARRAS.

4.3.2 LES GEOTEXTILES

Pour obtenir des comparaisons fiables entre géotextiles de même ratio d'espace ouvert mais qui varient par leur type, il nous fallait contrôler l'ouverture des mailles (ou motif du maillage). J'ai ainsi tissé des géotextiles en fibre de jute filée ou tressée sur un cadre en bois à partir d'une sélection de bobines de tissage dont le diamètre des brins était comparable : voir Figure 4.34.

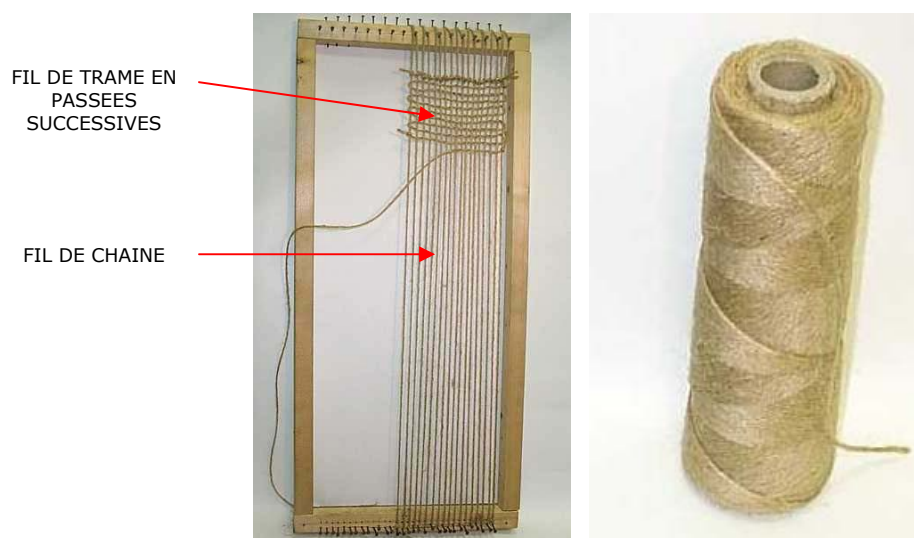


Figure 4.34. Cadre de tissage (à gauche) et bobine de jute tressée (à droite)

On observe cependant à même ouverture, l'existence d'une certaine variabilité des ratios et taux de couverture au sol entre géotextiles (Tableau 4.3). Elle reste incontrôlable car les diamètres des brins, bien que comparables, ne sont pas parfaitement identiques d'un tissé à l'autre.

4.3.2.1 Caractéristiques globales

On a exploité des logiciels d'analyse d'image : Imaq Vision explorer – Version 1-21 ; Imaq vision builder – Version 1, pour déterminer avec précision les taux de couverture au sol [$\text{m}^2.\text{m}^{-2}$] ϑ (ou à l'inverse le ratio d'espace ouvert [$\text{m}^2.\text{m}^{-2}$] des géotextiles utilisés dans nos expériences (Tableau 4.3). Deux types de géotextiles ont été fabriqués l'un avec des brins en jute manufacturé - à peine torsadé - : le jute filé, l'autre avec des brins conditionnés comme une ficelle à 4 fils : le jute tressé (Figure 3.4). On a retenu 3 ouvertures de mailles : ouverture nulle (0), petite (1) et moyenne (2).

NATURE DES TRESSSES	JUTE FILEE			JUTE TRESSEE		
OUVERTURE	0	1	2	0	1	2
Taux de couverture au sol (ϑ)	0,999	0,49	0,32	0,998	0,51	0,34
Ratio d'espace ouvert (1- ϑ)	0,001	0,51	0,68	0,002	0,49	0,66
Grammage (G) [$\text{g}.\text{m}^{-2}$]	1254.80	440.97	129.86	1383.99	489.98	204.80

Tableau 4.3. Taux de couverture au sol, ratios d'espace ouvert et grammage moyens des géotextiles utilisés.

Comme pour les paillis, j'ai voulu tester la relation entre ϑ et G. Je me suis basée sur les résultats obtenus avec 9 échantillons par type de géotextile répartis au nombre de 3 par ouverture (ouvertures 0 ; 1 et 2) : voir Figure 4.35. La taille de ces échantillons était de 50 cm de longueur et 15 cm de largeur soit 750 cm^2 . Ils ont été pesés à sec après un séjour de 3 jours en étuve à une température peu élevée de 50°C de manière à ne pas dénaturer la fibre de jute qui est organique.

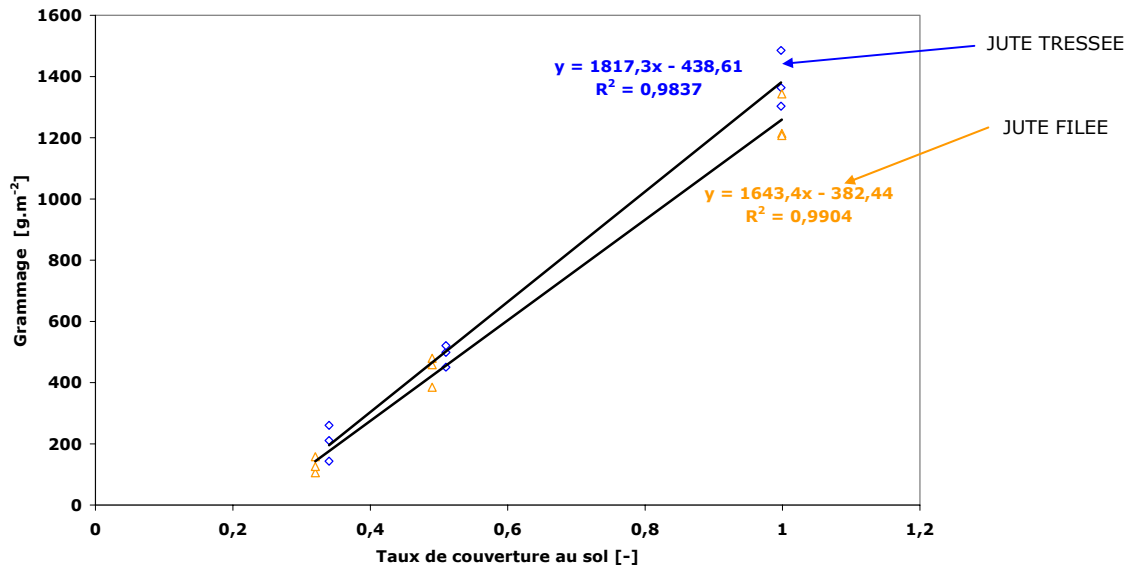


Figure 4.35. Relation taux de couverture au sol / grammage des deux types de géotextiles expérimentaux à base de jute filé et de jute tressé

Comme on pouvait s'y attendre on constate une relation linéaire simple entre ϑ et G qui est du type :

$$\vartheta = aG - b \quad (4.3)$$

Pour respecter les unités réglementaires appliquées aux géotextiles, le taux de couverture au sol est exprimé en $\text{m}^2.\text{m}^{-2}$ et son grammage G en $\text{g}.\text{m}^{-2}$.

Pour les paillis, la relation est de type exponentielle (équation 3.19) car la technique de l'épandage engendre une évolution de la distribution des résidus sur le sol qui est fonction de la quantité de matière épandue. On ne retrouve pas cette évolution pour les géotextiles car les fibres - qui sont les équivalents des résidus du paillis - sont organisées en tresses de densité similaire et les écarts entre les tresses sont maintenus constants par le mode de tissage: voir Figure 3.5.

4.3.2.2 Caractéristiques propres aux brins

L'épaisseur e [cm] des brins qu'on a assimilée à leur diamètre moyen est de 0,4 cm quel que soit le géotextile expérimental.

Telle que définie au §3.1.2.2.1, on a aussi cherché à estimer la *capacité de stockage* ou *capacité de rétention* en eau des brins et sous-brins en jute tressé ainsi que des brins en jute filé : Figure 4.36 ci-dessous.

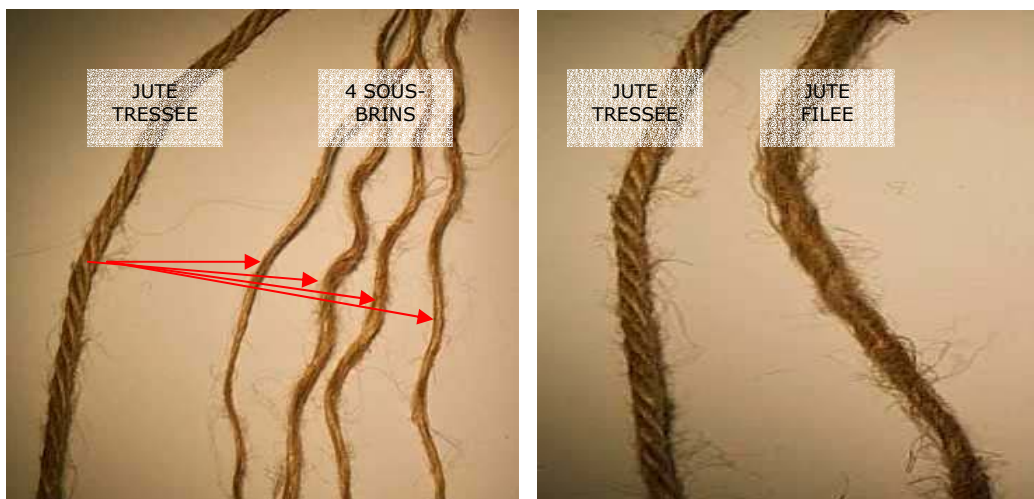


Figure 4.36. Brin de jute tressé et ses 4 sous-brins (à gauche) et juxtaposé à un brin de jute tressé, un brin de jute filé (à droite)

Pour cela, on a procédé par immersion des brins et des sous-brins dans des barquettes remplies d'eau. Chaque expérience a été répétée 7 fois sur des échantillons de 20 cm de longueur chacun. Nous avons retenu les temps d'immersion suivants : 1 minute, 5 minutes, 10 minutes, 15 minutes, 30 minutes, 1 heure, 5 heures, 24 heures et 1 semaine. Au terme de leur immersion, les échantillons ont été ressuyés puis pesés une première fois. Nous avons aussi mesuré leur diamètre. Et nous avons effectué une seconde pesée après leur passage à l'étuve à 105°C jusqu'à un poids constant (environ 48h). Pour chaque échantillon, nous avons défini une teneur en eau correspondant à la différence de pesée rapportée au poids sec de l'échantillon. Quelque soit le type de brin, la cinétique d'absorption de l'eau peut être représentée par une loi de type logarithmique : voir les points de la Figure 4.37.

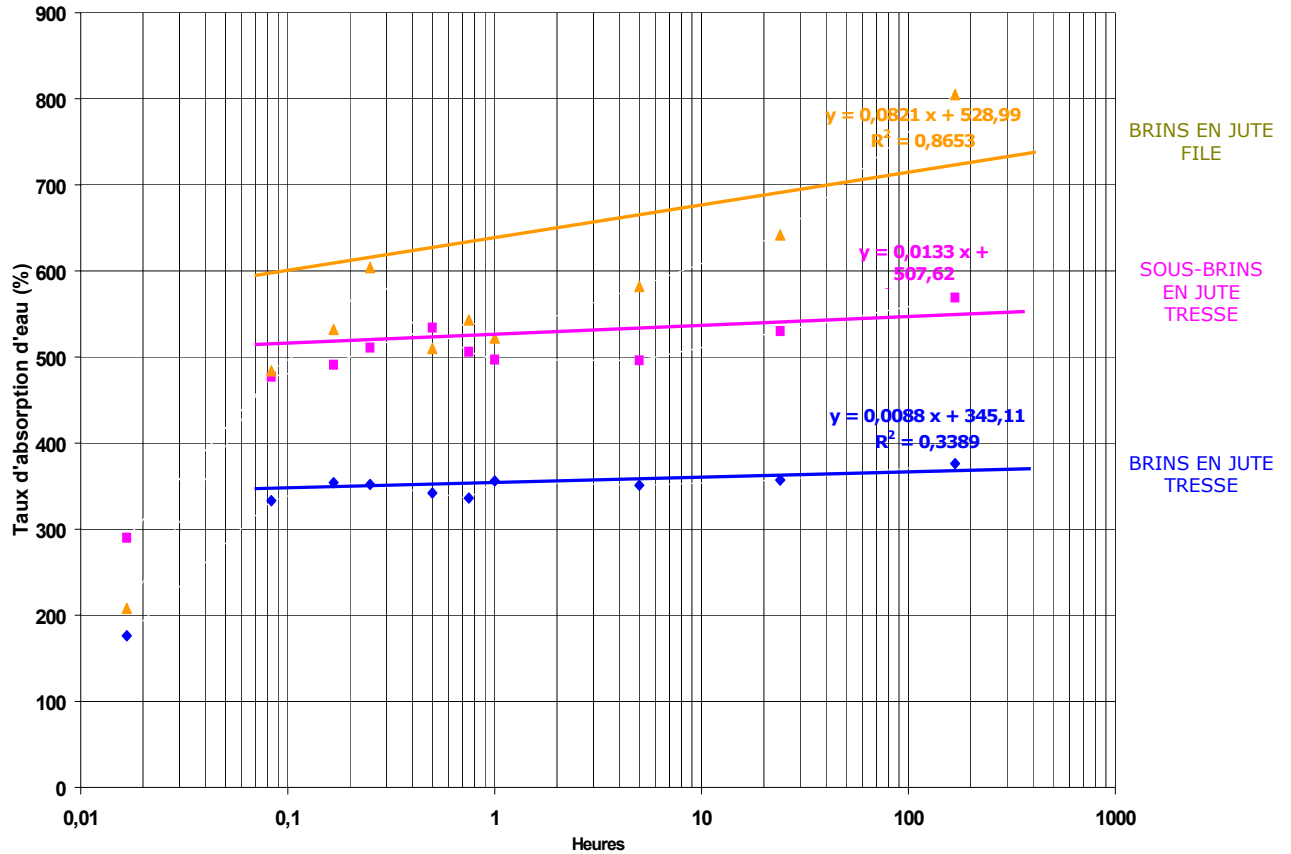


Figure 4.37. Cinétiques d'absorption de l'eau par les brins filés, tressés et par les sous-brins du jute tressé

On s'est fixé une norme, on a considéré qu'au bout de 24 heures environ d'immersion, la capacité de stockage était atteinte bien que cela soit discutable notamment pour le jute filé qui continue d'absorber sensiblement de l'eau au-delà d'une journée. On constate que les brins filés absorbent en moyenne deux fois plus d'eau que les brins tressés (jusqu'à 800% contre 400%). Alors que les fibres sont moins serrées dans les brins filés que dans les brins tressés, l'espace inter-fibre y est plus important et peut par conséquent accueillir davantage d'eau. Contrairement aux brins tressés, les brins filés changent de diamètre en cours d'immersion. Ils ont une tendance au gonflement qui contribue à augmenter leur capacité de stockage. Leur diamètre moyen passe de 0,4 cm à sec à 0,6 cm en moyenne à la capacité de stockage. Lorsque l'on sépare les sous-brins du jute tressé, les fibres y sont déjà moins serrées, la capacité de stockage est immédiatement plus importante (environ 550%). Le mode de fabrication par tressage de la jute diminue donc la capacité de stockage des brins et par suite du géotextile.

Pour estimer le volume de vide V_{gv} des brins mais surtout leur porosité n_g et leur masse volumique sèche ρ_{gsec} , nous disposons des données suivantes : $L = 20$ cm, la longueur des tresses ; $\varnothing = 0,4$ cm, le diamètre des tresses à sec, d'où $V_t = \pi r^2 L = 2,51$ cm³ ; M_H [g], la masse humide des tresses à la capacité de stockage ; M_s [g], leur masse

sèche ; ρ_{eau} , ρ_{air} , ρ_{fibres} , les masses volumiques respectivement de l'eau, de l'air et des fibres : $\rho_{\text{eau}} \approx 1 \text{ g/cm}^3$ à 20°C, $\rho_{\text{air}} = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ g.cm}^{-3}$ à 20°C et 101,3 kpa, $\rho_{\text{fibres}} = 1,48-1,50 \text{ g.cm}^{-3}$ (Tableau 3.8). Si on considère que l'eau remplit la totalité des vides à la capacité de stockage, il est facile de montrer que le volume des vides V_{gv} et la porosité n_g des brins peuvent être déterminés au moyen des expressions suivantes :

$$V_{gv} = \frac{\rho_{\text{fibres}} V_t}{\left(\frac{M_s}{M_H - M_s} \right) - \rho_{\text{air}} + \rho_{\text{fibres}}} \quad (4.6)$$

$$n_g = \frac{1}{1 + \frac{\rho_{\text{eau}} M_s}{\rho_{\text{fibres}} (M_H - M_s)}} \quad (4.7)$$

Les valeurs obtenues pour le volume des vides V_v sont plus imprécises pour les brins filés que pour les brins tressés, du fait de la propriété gonflante de la jute filée. Le Tableau 4.4 regroupe les résultats des estimations du volume moyen des vides pour 20 cm de longueur de brin, de la porosité et de la masse volumique des brins.

	TRESSES TRESSEES	TRESSES FILEES
$V_{gv} [\text{cm}^3]$ pour L=20 cm	2,12-2,15	2,26-2,29
$n_g [-]$	0,84-0,85	0,90-0,91
$\rho_{g\text{sec}} [\text{g.cm}^{-3}]$	346	313,5
$[\text{Kg.m}^{-3}]$	$3,46 \cdot 10^5$	$3,13 \cdot 10^5$

Tableau 4.4. Estimation du volume moyen des vides (V_{gv}), de la porosité moyenne (n_g) et de la masse volumique sèche moyenne ($\rho_{g\text{sec}}$) des brins des géotextiles expérimentaux.

4.4 Le protocole expérimental

4.4.1 LA PREPARATION DES MATERIAUX

On a préalablement mélangé le sable à de l'eau pour qu'il soit malléable puis on l'a déposé par couches successives dans chacun des 4 bacs en le tassant par étape afin de constituer 4 blocs de sable monolithique. Le fond des bacs qui est légèrement incliné de manière à faciliter l'évacuation de l'eau de drainage par un exutoire ménagé à l'avant de chacun des bacs (voir Figure 4.1), a été recouvert d'une mince couche de gravier surmontée d'une géomembrane d'épaisseur fine. Quant aux géotextiles expérimentaux, on les fixe sur le sol à l'aide d'agrafes métalliques pour constituer des systèmes SGA : Figure 4.38.



Figure 4.38. Photo vue de près d'un géotextile fixé sur le sol support.

4.4.2 LA PREPARATION DES CAPTEURS DE PRESSION

L'ensemble des capteurs ayant été préalablement étalonnés, il reste à remplir le circuit hydraulique des tensiomètres. Cette opération est délicate car elle conditionne le temps de réponse du capteur. La présence de bulles d'air dans le circuit accroît ce temps de réponse. La première étape consiste à saturer la bougie poreuse qui est immergée plusieurs heures dans l'eau : Figure 4.39, étape A. On remplit ensuite la canne tensiométrique avec de l'eau (étape B) et on la dégaze à l'aide d'une pompe à vide placée sur la canne tensiométrique dont la céramique poreuse trempe entièrement dans un récipient d'eau (étape C). Cette opération prend quelques minutes pour chaque capteur. Il s'agit ensuite de fermer le circuit hydraulique avec un bouchon (étape D).

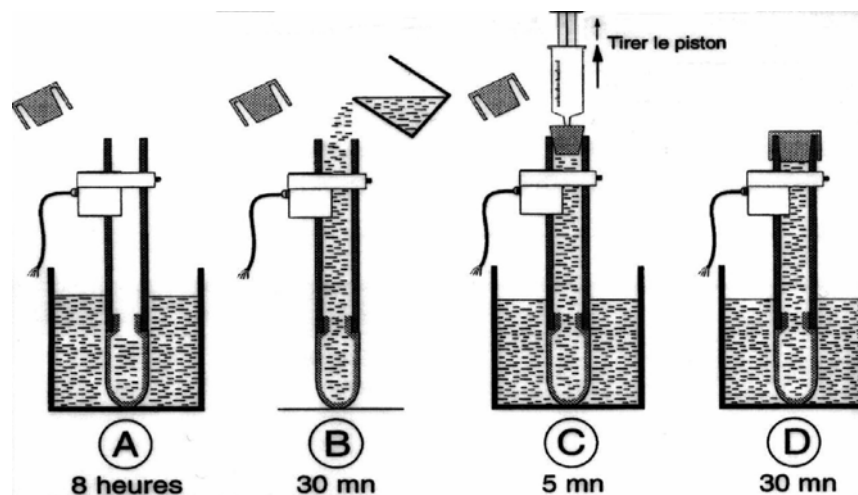


Figure 4.39. Les étapes de préparation de la canne tensiométrique

4.4.3 LE MODE D'IMPLANTATION DES CAPTEURS DANS LE SOL

Concernant les sondes CS615, elles sont enterrées dans le sol à l'horizontale pendant le remplissage des bacs (étape de préparation du matériau sol : §4.4.1) à -12 cm de profondeur. L'implantation des autres capteurs se fait après la préparation du sol. Elle est facilitée quand le sable est humide. On peut alors réaliser des pré-trous par

lesquels on entre dans le sol les sondes préalablement enduites de barbotine (mélange très fluide d'eau et de sable de l'Isère. Pour réaliser les pré-trous, on a utilisé des tuyaux métalliques creux dont le diamètre correspond à celui des sondes. Quant aux capteurs HMS9000, il nous a fallu tailler un trou cylindrique du diamètre de la sonde et de 1,5 cm de profondeur à la surface du sol et on a forcé l'enfoncement de sa pointe : Figure 4.40.

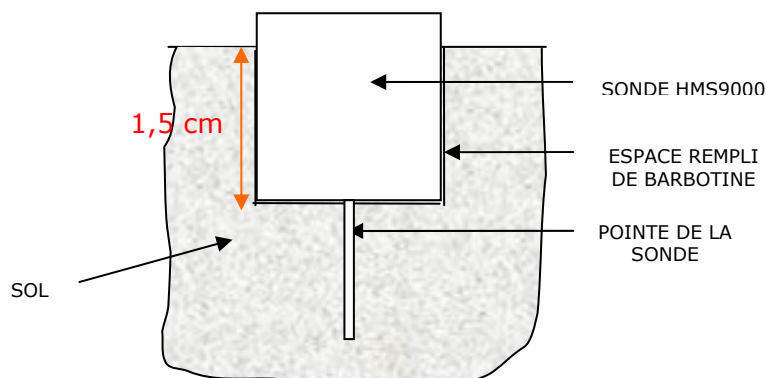


Figure 4.40. Implantation d'une sonde HMS9000 dans le sol

4.4.4 LA REALISATION DE L'ETAT INITIAL

On n'a pas réalisé d'apport d'eau pendant les essais. Notre choix a été de suivre l'évolution de l'assèchement du sol en partant de sa saturation. On a retenu un mode de saturation des bacs par le bas de manière à chasser un maximum l'air piégé dans le sol. Pour ce faire, on a utilisé un jerrican équipé de tuyaux que l'on a connecté aux exutoires des bacs. En position surélevée par rapport aux bacs, l'eau du jerrican s'est naturellement infiltrée dans les monolithes de sol. Les géotextiles ont quant à eux été préalablement saturés en eau puis fixés sur le sol support.

On a tout de même fait quelques essais en vue de simuler la pluie mais le montage d'un système d'aspersion sous pression a soulevé un certain nombre de problèmes dont l'hétérogénéité spatiale de la pluie artificielle produite.

4.4.5 LA CONDUITE D'UNE EXPERIENCE

Les capteurs ayant été étalonnés, préparés puis implantés aux différentes cotes (voir §4.2.1.4), on a ensuite paramétré la chambre climatisée de manière à définir le cycle jour/nuit, les alternances de la température de l'air et son humidité : voir Tableau 4.5 page suivante. Ce paramétrage comprend aussi le réglage du vent dont la vitesse maximum compatible avec l'érosion éolienne est de 3 m.s^{-1} . Une fois l'état initial réalisé, on peut lancer l'acquisition des données : voir le détail du lancement en Annexe 7. Les capteurs de pression SKT décrochant autour de -600 -700 mbar, nous avons retenu ce

critère pour arrêter les expériences d'une durée moyenne de 35 jours. Il convient ensuite de vérifier la position exacte des micro tensiomètres et des thermocouples dans le sol. Cette mesure est nécessaire car elle affecte de façon sensible le calcul des gradients de potentiel et de température. Il nous a fallu préalablement dégager minutieusement les capteurs avec une spatule. La Figure 4.41 résume les principales étapes du protocole expérimental.

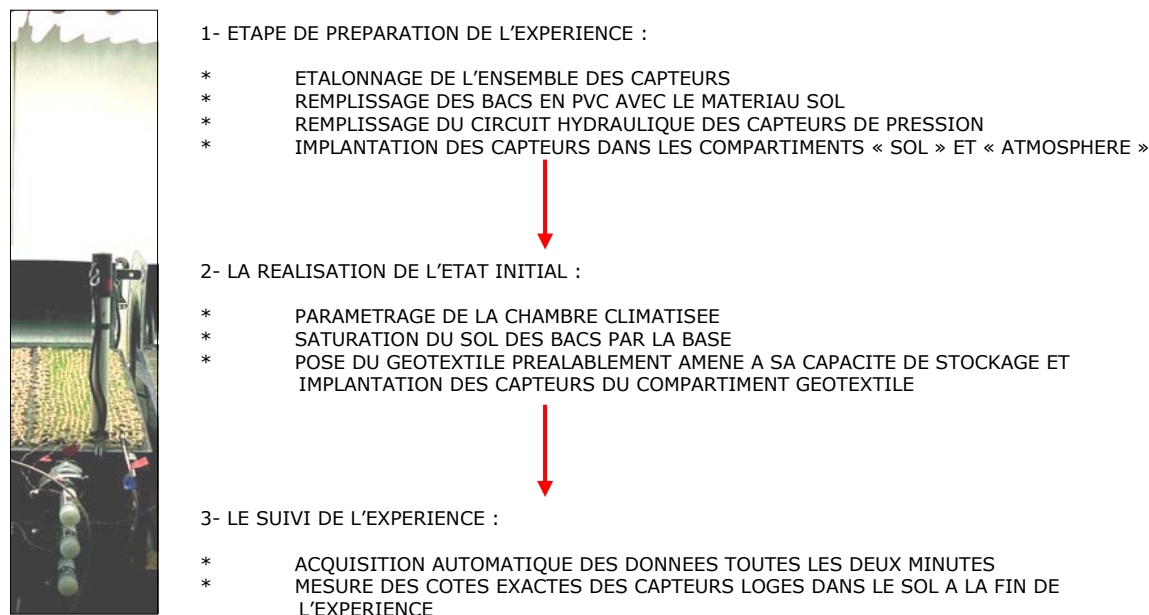


Figure 4.41. Résumé du protocole expérimental

4.4.6 LES EXPERIENCES REALISEES

On a réalisé 6 expériences différentes, pour certaines répétées plusieurs fois : voir tableau 4.5. Une seule expérience a été réalisée à basse température (expérience 4) car la chambre climatisée atteignait alors sa limite de fonctionnement. Pour toutes les autres expériences, la consigne pour la température de l'air était 15°C « nuit »/25°C « jour ». On a réalisé des expériences sans ou avec ventilation. Les expériences ont servi à tester la répétabilité des expériences, à comparer la dynamique d'un système SGA par rapport à son témoin SA et à comparer entre eux différents systèmes SGA (les expériences N°4 et N°5 notamment) : voir Chapitre 5 §5.2. Les expériences ont aussi permis de collecter les données nécessaires pour valider notre interprétation de l'influence d'un géotextile : voir Chapitre 5 §5.3.

Tableau 4.5. Résumé des expériences réalisées

N° exp.	Nb rép.	Forçage atmosphérique			Bacs			
		T _{air}	HR _{air}	U _{air}	1	2	3	4
1	X1	15°C « nuit » / 25°C « jour »	70%	0 m.s ⁻¹	Sol nu	Sol nu	Sol nu	Sol nu
2	X3	15°C « nuit » / 25°C « jour »	70%	3 m.s ⁻¹	HP1	HP1	Sol nu	Sol nu
3	X1	15°C « nuit » / 25°C « jour »	70%	0 m.s ⁻¹	HP1	Sol nu	HP1	Sol nu
4	X1	4°C « nuit » / 10°C « jour »	70%	3 m.s ⁻¹	HP0	HP1	Sol nu	HP1
5	X3	15°C « nuit » / 25°C « jour »	70%	3 m.s ⁻¹	HP1	HS1	Sol nu	HS0
6	X1	15°C « nuit » / 25°C « jour »	70%	0 m.s ⁻¹	HP1	Sol nu	HP1	Sol nu

Légende : HP0, géotextile en jute tressé d'ouverture nulle ; HP1, géotextile en jute tressé d'ouverture 1 ; HS0, géotextile en jute filé d'ouverture nulle ; HS1, géotextile en jute filé d'ouverture 1.

4.5 Bilan critique du dispositif expérimental

4.5.1 LA REPETABILITE DES EXPERIENCES

On a tout d'abord vérifié que quel que soit le voisin, on avait des conditions très similaires d'un bac à l'autre. Pour ce faire, on a calculé à l'intérieur d'une même expérience, les écarts de température, de potentiel et de teneur en eau à chaque cote dans le sol entre systèmes identiques et on a choisi de retenir l'écart maximal entre bacs pour chaque variable : voir Tableaux 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 et Figures 4.42, 4.43

	Bac 1	Bac 2	Bac 3	Bac 4
Bac 1	0			
Bac 2	0,2°C	0		
Bac 3	0,3°C	0,3°C	0	
Bac 4	0,5°C	0,5°C	0,4°C	0

Tableau 4.6. Ecart moyen maximum des températures dans le sol entre bacs lors d'une même expérience

	Bac 1	Bac 2	Bac 3	Bac 4
Bac 1	0			
Bac 2	40 mbar	0		
Bac 3	40 mbar	40 mbar	0	
Bac 4	40 mbar	40 mbar	40 mbar	0

Tableau 4.7. Ecart moyen maximum des potentiels matriciels dans le sol entre bacs lors d'une même expérience.

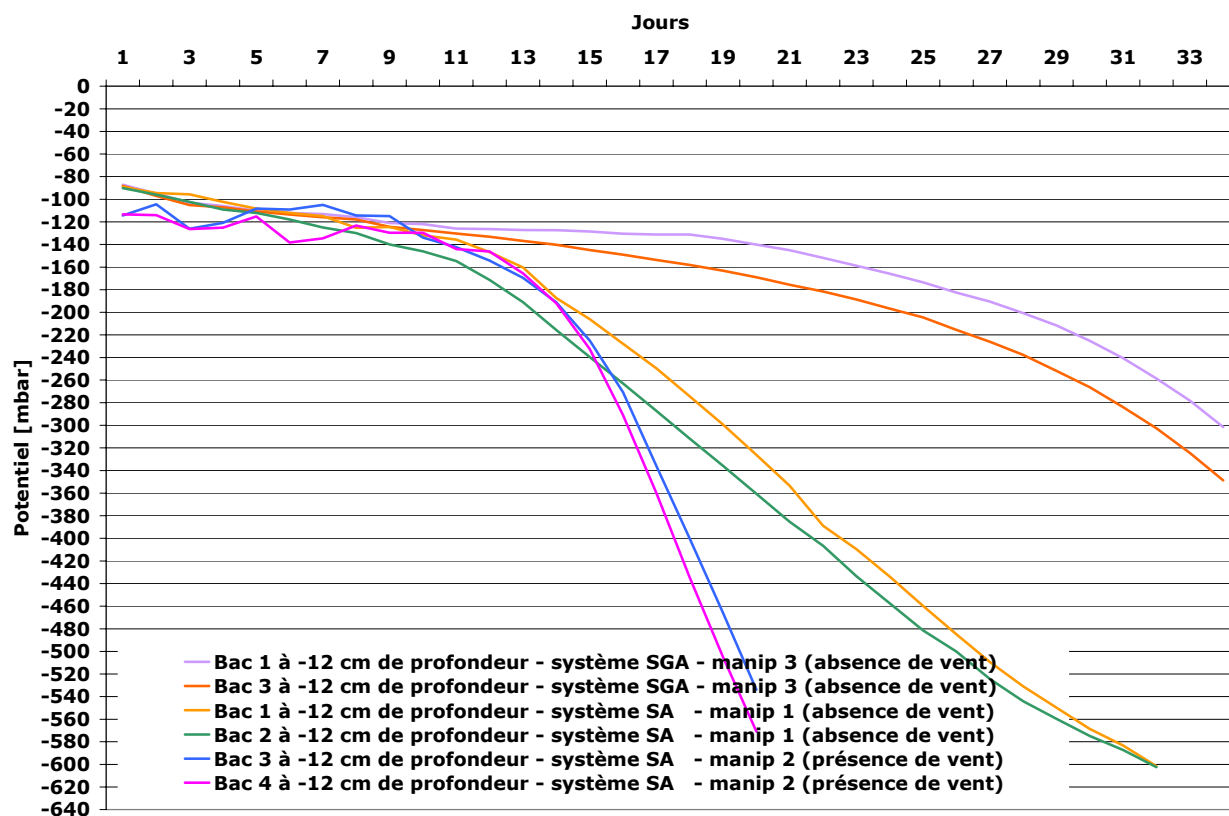


Figure 4.42. Exemples de comparaison de l'évolution du potentiel à -12 cm de profondeur entre systèmes identiques lors d'une même expérience

	Bac 1	Bac 2	Bac 3	Bac 4
Bac 1	0			
Bac 2	1%	0		
Bac 3	1%	1%	0	
Bac 4	1%	1%	1%	0

Tableau 4.8. Ecart maximum des teneurs en eau dans le sol entre bacs mesurées avec les sondes HMS9000 lors d'une même expérience.

	Bac 1	Bac 2	Bac 3	Bac 4
Bac 1	0			
Bac 2	1%	0		
Bac 3	1%	1%	0	
Bac 4	2%	2%	2%	0

Tableau 4.9. Ecart maximum des températures dans le sol entre bacs mesurées avec les sondes CS615 lors d'une même expérience.

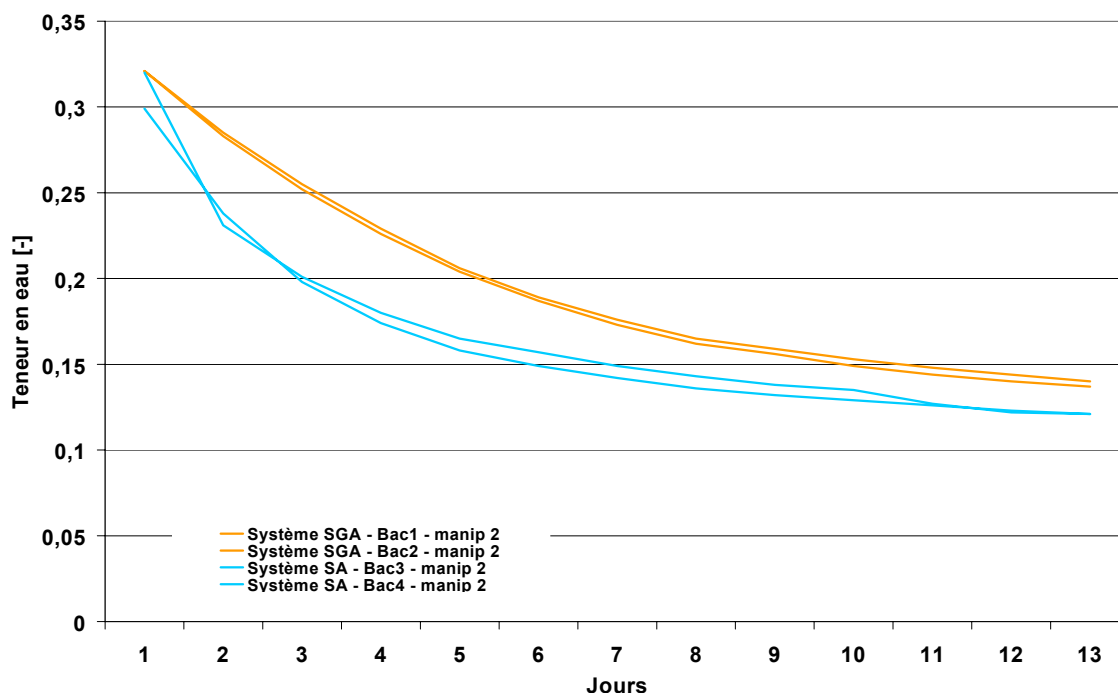


Figure 4.43. Exemple de comparaison de l'évolution de la teneur en eau à -12 cm de profondeur (sondes CS615) entre systèmes identiques lors d'une même expérience – Exp. N°2.

Pour tous les bacs, on a aussi vérifié l'étroitesse de l'accord entre les résultats de mesurages successifs d'une même grandeur comme la température ou le potentiel matriciel etc., effectués avec les mêmes instruments de mesure, dans le même bac, lors d'expériences identiques (même forçage atmosphérique) : exemple expérience N°2 et N°5, bac 1 ou 3. On constate globalement une bonne répétabilité. La Figure 4.44 est un exemple de mesure de température à une même cote lors d'expériences successives. Il s'agit ici de l'expérience N°2 qui a été répétée 3 fois, bac 2.

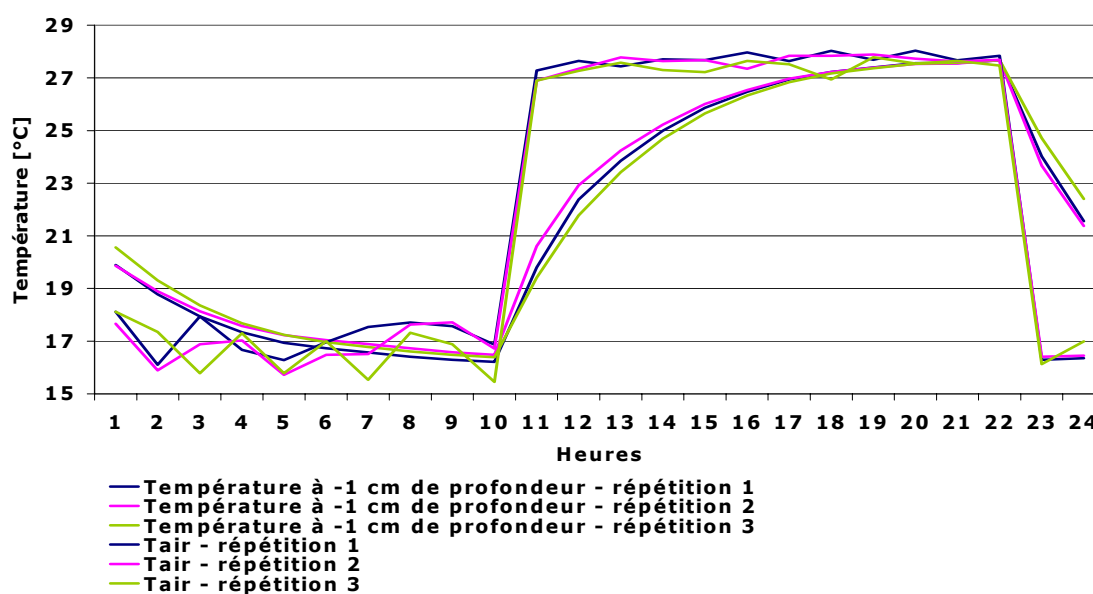


Figure 4.44. Evolution journalière des températures de l'air à +15 cm et du sol à -1 cm de profondeur dans le bac 2 lors de trois répétitions – Exp. N°2.

4.5.2 ANALYSE CRITIQUE

Concernant les aspects positifs, on peut citer la répétabilité des expériences et des conditions similaires d'un bac à l'autre. Concernant les aspects négatifs, on peut répertorier une gamme de succion limitée, un profil de vent non logarithmique, une absence de mesure de la température, comme de l'humidité à l'intérieur même des brins des géotextiles, quelques artéfacts liés aux effets de la température et des conditions de forçage limitées. On avait notamment des alternances Jour/Nuit un peu brutales et on n'a pas pu tester par exemple l'incidence du gel sur un sol couvert par un géotextile (hors gamme de fonctionnement de la chambre climatisée) ainsi que l'effet de la pluie.

Cependant les expériences réalisées ont notamment permis de suivre la dynamique des transferts d'eau et de chaleur au sein de systèmes SA et SGA dans une phase d'assèchement du sol et de montrer quel effet un géotextile naturel avait sur la dynamique des transferts d'eau et de chaleur dans ces conditions : voir Chapitre 5.

5.1 introduction

Ce chapitre est divisé en deux parties. La première est consacrée à l'interprétation des principaux résultats obtenus à partir des expériences réalisées sur le modèle physique et qui ont permis de quantifier l'effet de géotextiles naturels en fibres de jute sur les conditions micro climatiques dans le sol et son proche voisinage. On a plus précisément testé l'effet du mode de fabrication et de l'ouverture des géotextiles en jute sur la température et l'eau dans le sol. La deuxième partie est consacrée à la modélisation où nous testons l'hypothèse selon laquelle un géotextile naturel se comporte comme un paillis.

5.2 Mise en évidence de l'effet du géotextile

Pour illustrer nos propos dans cette première partie, nous nous sommes basés principalement sur les résultats des expériences N°2 et N°5 (voir le Tableau 4.5 au chapitre précédent) qui ont été répétées 3 fois chacune. Les moyennes des températures, des teneurs en eau etc. ont été calculées à partir des répétitions. Avant de chiffrer les différences entre systèmes, on a préalablement vérifié qu'elles étaient significativement supérieures à l'imprécision intrinsèque au modèle physique que l'on a précédemment évaluée sur chacune de nos variables : voir §4.5.1.

5.2.1 L'EFFET DES VARIATIONS DE LA TEMPERATURE DE L'AIR ET DU RAYONNEMENT SUR LES TEMPERATURES DANS LE SOL EN L'ABSENCE DE GEOTEXTILE (SYSTEME SA)

Lorsque la température de l'air est maintenue constante plus de 8h dans la chambre climatisée, le compartiment sol des systèmes SA est en équilibre thermique avec l'atmosphère : le profil des températures dans le sol est quasi-vertical (Figures 5.2 a [à 8h] et b [à 20h]). A chaque changement brutal des conditions de température et de rayonnement dans la chambre climatisée toutes les 12h : voir Figure 5.1, le profil des températures du sol adopte une forme caractéristique en « S » : Figures 5.2 a [à 11h] et b [à 23h].

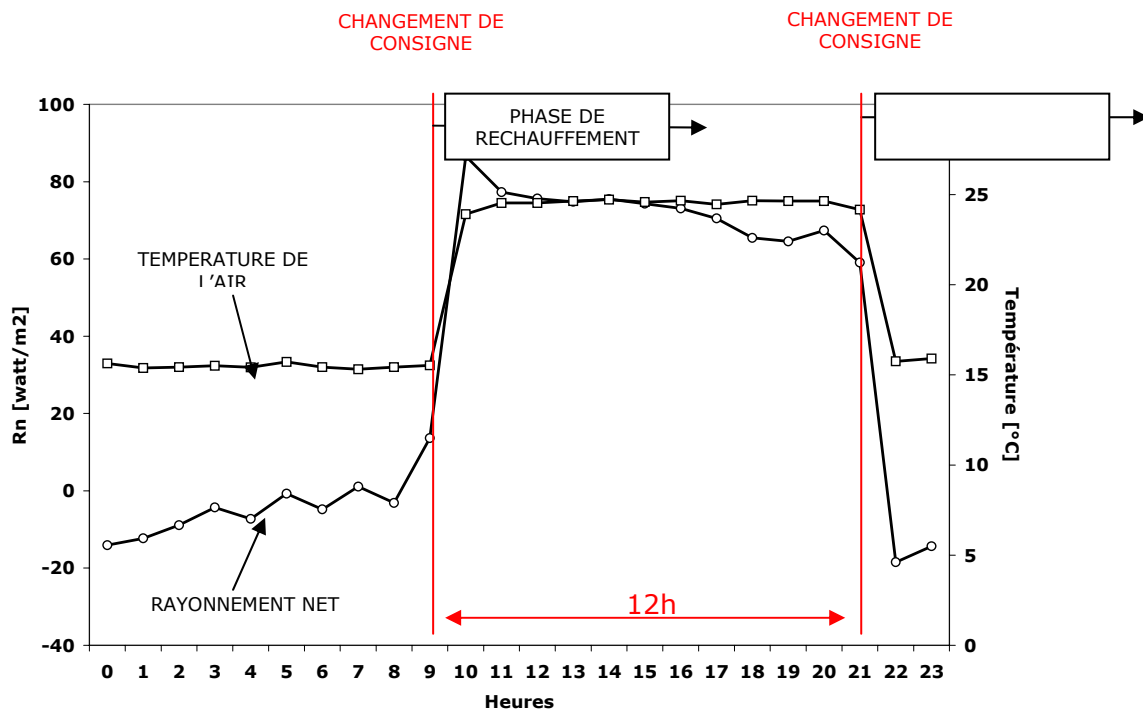


Figure 5.1. Variations nyctémérales du rayonnement net moyen ainsi que de la température de l'air mesurés à + 15 cm au-dessus du sol nu - Manip N°2 : Jour 24 : bac 4

D'un point de vue thermique, on peut alors distinguer trois zones dans le sol :

- Une tranche de sol qui correspond aux tout premiers centimètres du sol. On peut considérer que les deux premiers thermocouples sont dans cette zone : l'un est situé à la cote -1 cm, l'autre à -3,5 cm de profondeur (voir les Figures 4.15 et 4.16 du chapitre précédent pour la disposition des sondes dans les bacs). Cette tranche de sol est directement en contact avec l'atmosphère. Nous l'appelons Z1.
- Une zone intermédiaire de transition entre Z1 et Z3 (voir définition ci-après) dont l'existence est révélée par le gradient des températures entre -3,5 cm et -5,5 cm. Elle est séparée de l'atmosphère par la tranche de sol Z1. Nous l'appelons Z2.
- Une tranche de sol en dessous de -5,5 cm. On peut considérer qu'il y a trois thermocouples dans cette zone : à -5,5 cm (limite supérieure), à -8,5 cm et -12 cm de profondeur. Elle est surmontée par Z1 et Z2. Nous l'appelons Z3.

Les trois zones se comportent différemment lors des changements brusques de la température de l'air et du rayonnement dans le compartiment Atmosphère (Figure 5.1) et leur réponse est différente selon qu'on est en phase de réchauffement ou de refroidissement :

- Dans la zone Z1, on observe toujours des gradients positifs en phase de réchauffement et des gradients négatifs en phase de refroidissement

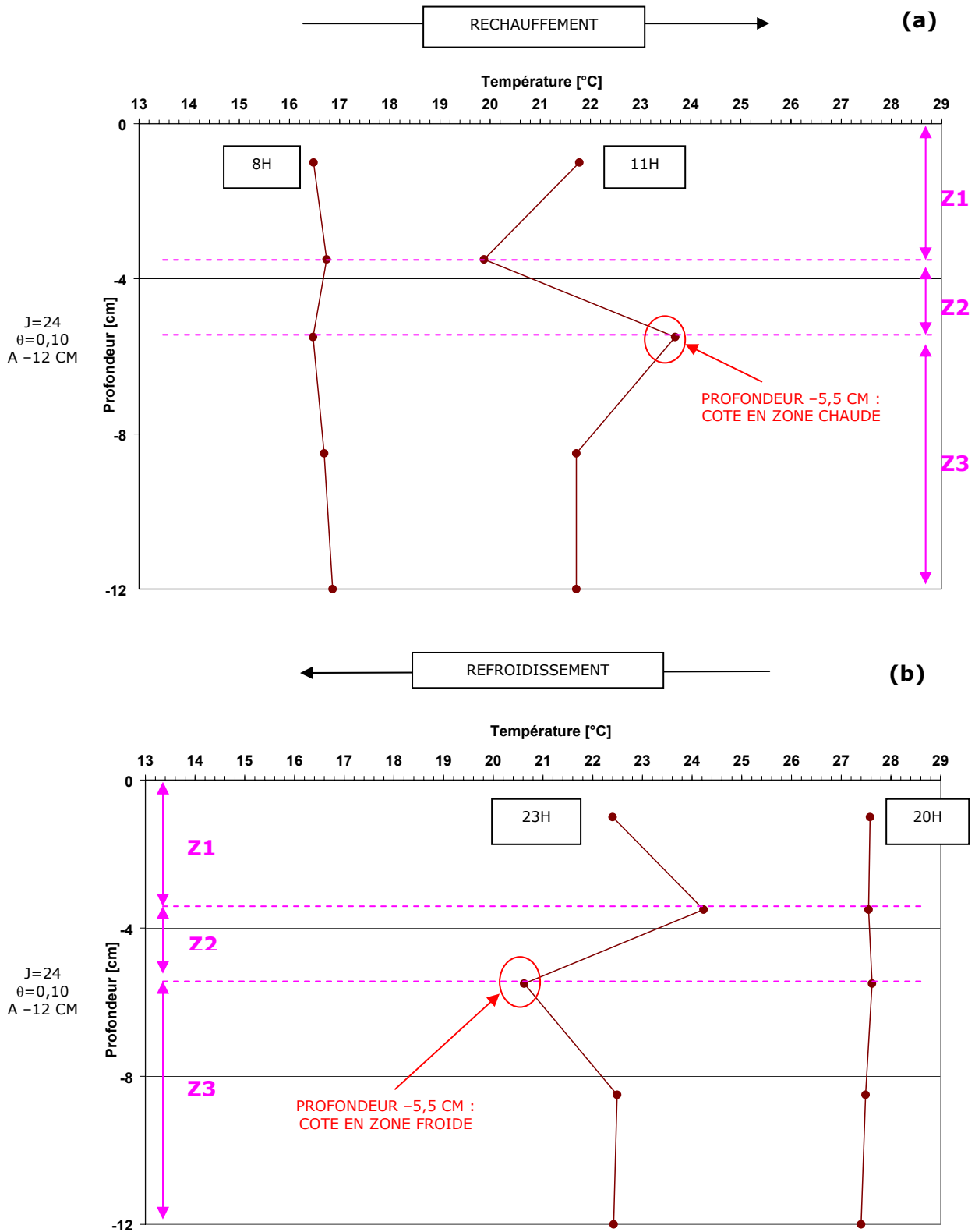


Figure 5.2. Profils des températures moyennes dans le sol nu en phase de réchauffement (a) et de refroidissement (b), 1h avant et 2h après le changement de consigne – Manip N°2 : Jour 24 : Bac 4

(Figures 5.2 : zone Z1 : profils à 11h et 23h). Autrement dit, quand l'atmosphère se réchauffe, la température de l'air devient brutalement supérieure à celle du sol (voir Figure 5.1, phase de réchauffement), les apports de chaleur au sol sont prépondérants par rapport aux pertes. Dans l'expérience N°2, bac 3 et 4 (voir aussi Tableau 4.5 pour les caractéristiques du forçage atmosphérique), 2 heures après le changement de consigne, le gradient moyen des températures est de $+2^{\circ}\text{C}$ entre -1 cm et $-3,5\text{ cm}$ dans le sol. Inversement, lorsque la température de l'atmosphère devient inférieure à celle du sol et le rayonnement net négatif (voir Figure 5.1, phase de refroidissement), ce sont les pertes qui deviennent prépondérantes.

- Deux phénomènes sont en compétition dans les premiers centimètres du sol : les flux de chaleur latente et sensible. On constate dans la tranche de sol Z2 que le flux de chaleur latente devient supérieur au flux de chaleur sensible. Les gradients des températures sont négatifs en phase de réchauffement, signe d'une forte perte de chaleur par évaporation de l'eau dans le sol (Figure 5.2a : profil à 11h – tranche Z2) et positifs en phase de refroidissement : l'apport de chaleur est prépondérant sous l'effet de la condensation de l'eau dans le sol (Figure 5.2b : profil à 23h – tranche Z2). C'est dans la zone Z2 du sol que les gradients des températures sont en outre les plus élevés en valeur absolue. Par exemple dans l'expérience N°2, en phase de réchauffement, 2h après le changement de consigne, à 11h, on a observé un gradient moyen des températures de $-3,5^{\circ}\text{C}$ entre $-3,5\text{ cm}$ et $-5,5\text{ cm}$ de profondeur dans le sol.
- En Z3, le sol subit indirectement l'effet des variations du rayonnement et de la température dans l'atmosphère : la tranche de sol Z3 ne suit pas aussi rapidement les fluctuations de la température de l'air que les tranches Z1 et Z2 du sol (Figures 5.2a et b : tranche Z3). En outre, en phase de réchauffement, on observe un flux de chaleur sensible depuis la partie inférieure de Z2 vers le sol en profondeur. En phase de refroidissement, les gradients sont négatifs, la chaleur remonte depuis le sol en profondeur vers la surface. On constate aussi que les gradients sont moins grands au fur et à mesure que l'on s'enfonce dans le sol.

Dans nos expériences, on n'a pas observé dans le sol le phénomène de battement du front d'évaporation et de condensation de l'eau. Peut-être que le nombre de nos capteurs de température le long du profil de sol était insuffisant.

5.2.2 L'EFFET D'UN GEOTEXTILE NATUREL SUR LA TEMPERATURE DANS LE SOL (SYSTEME SGA)

Lorsque la température de l'air est maintenue constante plus de 8h dans la chambre climatisée, le compartiment Sol des systèmes SGA est aussi en équilibre thermique avec l'atmosphère : le profil des températures est proche de la verticale : voir Figures 5.3 a [8h] et b [20h]. Il n'y a en outre pas de différence thermique entre un système SGA et son témoin SA : leurs profils sont quasiment confondus.

L'« effet géotextile » se manifeste à chaque changement de consigne. Tout le long du profil, les températures sont alors sensiblement affectées par la présence du géotextile. Globalement, on peut dire que la forme du profil est moins marquée : voir Figures 5.3 a et b. Plus précisément, le contrôle de l'effet géotextile qui comprend 5 modalités : témoins sans géotextiles, géotextiles en jute tressée d'ouverture 1 cm² (HP-ouv1), géotextiles en jute filée d'ouverture 1 cm² (HS-ouv1), géotextiles en jute tressée d'ouverture nulle (HP-ouv0), géotextiles en jute filée d'ouverture nulle (HS-ouv0), a permis d'identifier les points suivants :

5.2.2.1 *La présence d'un couvert géotextile diminue le flux de chaleur latente entre le sol et l'atmosphère*

On s'attendrait à un effet de masque du géotextile qui limiterait l'apport énergétique en phase de réchauffement avec des températures du sol couvert qui seraient inférieures au sol nu à la même heure et qui en phase de refroidissement, limiterait la perte énergétique avec des températures du sol couvert supérieures au sol nu. En fait, on observe l'inverse en Z1 et Z2 car le géotextile a un effet prépondérant sur le flux de chaleur latente qui est efficacement réduit par la présence du couvert. Ainsi, en phase de réchauffement, moins de chaleur est perdue par évaporation de l'eau et en phase de refroidissement moins de chaleur est libérée par condensation de l'eau dans le sol. Par exemple dans l'expérience N°2, à 11h, 2h après le changement de régime climatique dans la chambre, sous HP-ouv1, la température du sol est ainsi plus élevée en moyenne de +1°C et +2°C respectivement à -1 cm et -3,5 cm de profondeur par rapport à la température du sol nu aux mêmes cotes (voir Figure 5.3a : zone Z1). Inversement, à 23h, sous HP-ouv1, la température du sol est moins élevée en moyenne de -1°C et -2°C respectivement à -1 cm et -3,5 cm de profondeur par rapport à la température du sol nu aux mêmes cotes : voir Figure 5.3b.

Si on regarde les gradients, on observe dans les premiers centimètres du sol recouvert par un géotextile, que les gradients de températures sont moindres, signe de la réduction des flux entre le sol et l'atmosphère. Par exemple, dans l'expérience N°2, 2 heures après le changement de consigne en phase de réchauffement, la différence des températures dans le sol sous HP-ouv1 (bac1) est réduite de -1°C en moyenne entre -1

cm et $-3,5$ cm et de -2°C en moyenne entre $-3,5$ cm et $-5,5$ cm par rapport à celle du témoin (bac3).

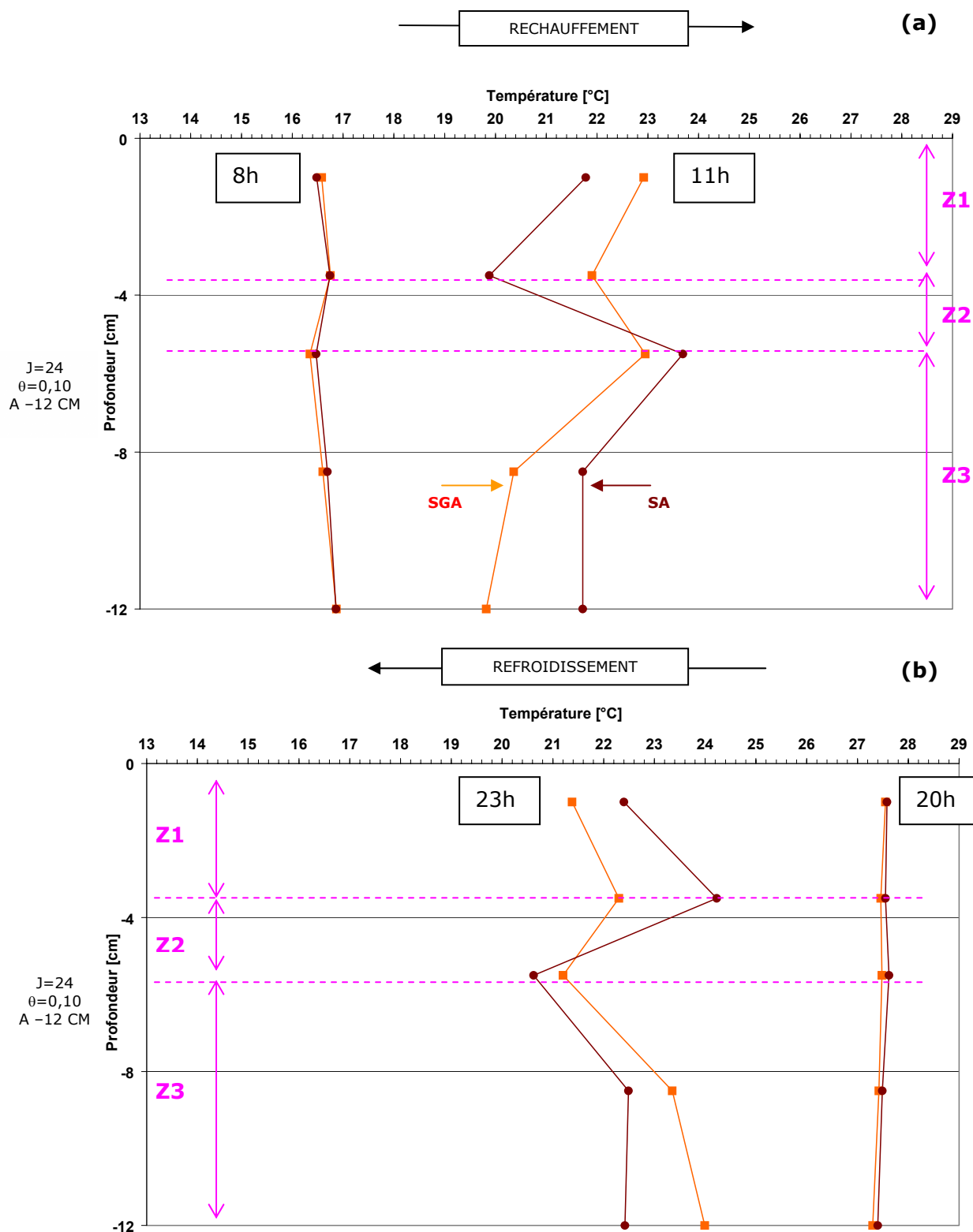


Figure 5.3. Comparaison des profils des températures moyennes entre 1 système SGA et son témoin SA en phase de réchauffement (a) et de refroidissement (b), 1h avant et 2h après le changement de consigne – Manip N°2 : Jour 24 : Bac 2 (système SGA) et Bac 4 (système SA)

5.2.2.2 *Le géotextile a un « effet couvert » qui tamponne les variations des températures dans le sol*

Cet effet est visible dans la tranche Z3 du sol. Quand il est recouvert par un géotextile, le sol se réchauffe et se refroidit moins vite que le sol nu. Cet effet est visible à partir de -5,5 cm de profondeur. Pour reprendre l'expérience N°2, en phase de réchauffement et à 11h, la température du sol sous toile est en moyenne inférieure de -2°C à -12 cm ; -1,5°C à -8 cm et -1°C à -5,5 cm par rapport au sol nu : voir Figure 5.3 a [11h]. En conséquence de quoi, le sol nu arrive plus vite à l'équilibre thermique avec l'atmosphère : en moyenne 2h avant, à la cote -5,5 cm par exemple.

5.2.2.3 *Le mode de fabrication des brins en jute (filage ou tressage) influe sur l'intensité de l'effet géotextile*

Pour un même taux de couverture au sol, les géotextiles en jute filé (HS) diminuent davantage le flux de chaleur latente dans le sol que les géotextiles en jute tressé (HP). Cela se manifeste visiblement après chaque changement de consigne où sous HS-ouv1 par exemple, en phase de réchauffement et 2 h après le changement de consigne, on observe une quasi-absence de flux net dans le sol en Z2 (différence de températures quasi nulle entre -3,5 cm et -5,5 cm de profondeur) et une température supérieure de +1°C en moyenne à -1 cm de profondeur par rapport au sol couvert par HP-ouv1 : voir comparaison entre HS-ouv1 et HP-ouv1 Figure 5.4 a [11h]. Inversement en phase de refroidissement, comme le phénomène de condensation est moins intense quand le sol est recouvert par HS-ouv1, les températures chutent plus rapidement en Z1 et Z2 sous HS-ouv1 que sous HP-ouv1 : Figure 5.4b [23h].

Globalement, l'effet tampon est aussi supérieur sous HS-ouv1 que dans le sol couvert par HP-ouv1. On observe ainsi par exemple en Z3, une diminution de la température à -5,5 cm de -0,5°C en moyenne par rapport à HP-ouv1 à 11h (Figure 5.4a : tranche de sol Z3). Autre conséquence d'un effet tampon supérieur de HS-ouv1 par rapport à HP-ouv1 : le sol parvient moins rapidement à l'équilibre thermique avec l'atmosphère, environ 1 h après HP-ouv1 (Expérience N°5).

5.2.2.4 *La fermeture totale des géotextiles diminue la quantité de chaleur qui est fournie au sol pendant le jour*

Par exemple manip N°4 (voir le Tableau 4.5 au chapitre précédent pour le forçage atmosphérique), sous HP-ouv0, en fin de phase de réchauffement (8 heures après le changement de consigne), la température du sol est globalement inférieure en moyenne de -0,5 °C par rapport à celle du sol recouvert par HS-ouv1 : voir Figure 5.5 a [20h].

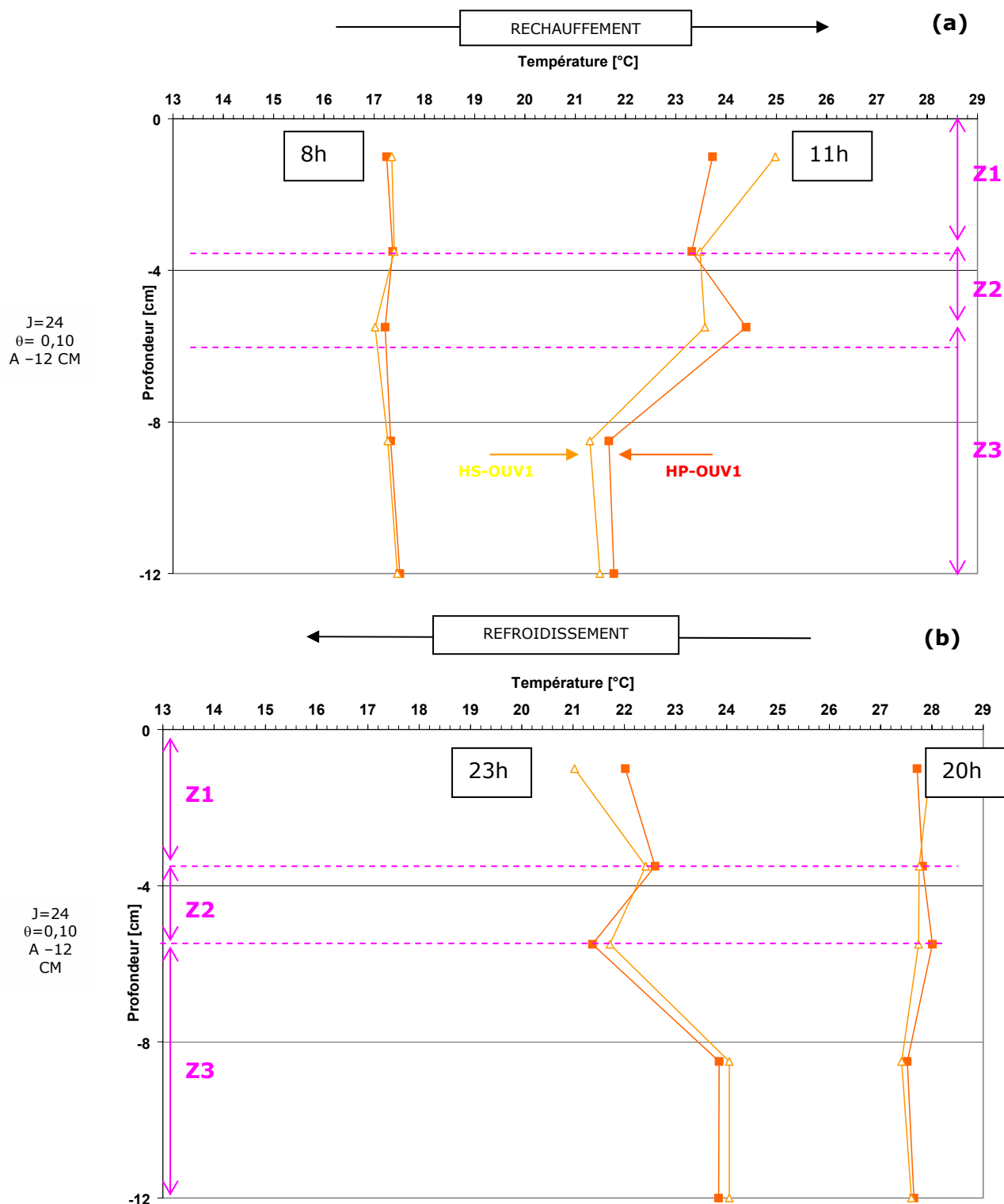


Figure 5.4. Comparaison des profils des températures moyennes entre systèmes SGA (comparaison jute filée HS-ouv1 et jute tressée HP-ouv1) en phase de réchauffement (a) et de refroidissement (b), 1h avant et 2h après le changement de consigne – Manip N°5 : Jour 24 : Bac 1 (HP-ouv1) et Bac 2 (HS-ouv1)

Notons cependant que les deux géotextiles HP-ouv0 et HP-ouv1 qui se différencient uniquement par l'ouverture de leur maille, ont un comportement thermique similaire : leur profil des températures dans le sol a la même forme.

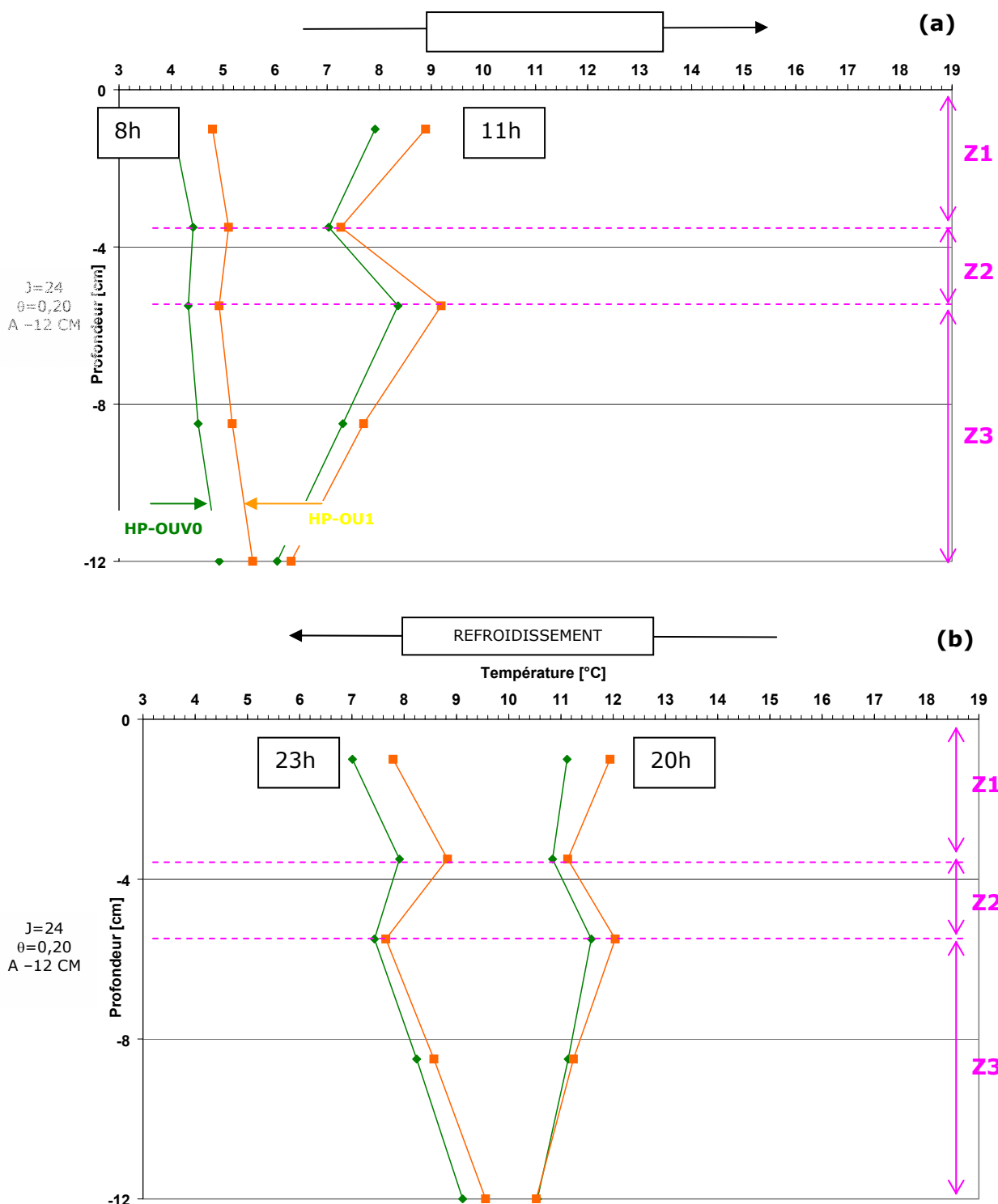


Figure 5.5. Comparaison des profils des températures moyennes entre systèmes SGA dont le géotextile (HP) varie par l'ouverture de sa maille (ouv0 ou ouv1) en phase de réchauffement (a) et de refroidissement (b), 1h avant et 2h après le changement de consigne – Manip N°4 : Jour 24 : Bac 1 (HP-ouv0) et Bac 2 (HP-ouv1)

Ainsi, lors du refroidissement du sol, le défaut d'apport énergétique est conservé : voir Figure 5.5 b [8h]. En conclusion, la fermeture totale du géotextile a pour effet de diminuer davantage les apports que les pertes de chaleur en direction de l'atmosphère. Ce résultat est peut-être dû à l'albédo plus élevé des géotextiles sans ouverture par

rapport au géotextile d'ouverture non nulle qui laisse apparaître le sol sous-jacent de couleur plus foncée.

5.2.3 L'EFFET D'UN GEOTEXTILE NATUREL SUR LE STOCK D'EAU DANS LE SOL

Nous avons plusieurs instruments de contrôle de l'état hydrique du sol : des tensiomètres et des sondes de teneur en eau à différentes cotes dans le sol : voir les Figures 4.15 et 4.16 au chapitre précédent pour la disposition des sondes dans les bacs. Comme on a débuté chaque expérience après que l'eau de drainage se soit entièrement écoulée (exutoire des bacs sec - $\theta_{\max} \approx 0,35$), on a pu considérer que la diminution du potentiel comme de la teneur en eau mesurés était attribuable au seul phénomène d'évaporation. Du fait de la présence de vent en surface, l'évaporation dans le sol est particulièrement rapide tout le long des 18 cm du profil dans les expériences N°2, 4 et 5. Par exemple, pour une même alternance des températures, le sol nu sans vent met 12 jours pour atteindre 15 % de teneur en eau à -12 cm de profondeur (manip N°3 – bac2) et 5 jours en présence de vent (manip N°5 – bac3).

5.2.3.1 *Le géotextile a un effet d'écran (quel que soit son mode de fabrication et son ouverture) sur l'évaporation de l'eau du sol*

On constate que comme sous un paillis, le sol recouvert par un géotextile suit les 3 phases d'assèchement valables pour le sol nu (au sens de Idso et al., 1974) : voir Figure 5.6.

Signalons que nous n'avons pas pu séparer les phases I et II d'assèchement du sol dans nos expériences car nous n'avons pas mesuré corrélativement l'évaporation potentielle d'une surface d'eau libre dans les mêmes conditions climatiques. On a préféré ne pas introduire une surface d'eau libre dans le dispositif expérimental pour conserver le plus possible une homogénéité des conditions hygrométrique au-dessus de tous les bacs.

Dans le sol des systèmes SA comme des systèmes SGA, le point de flétrissement (potentiel matriciel aux alentours de -150 m soit $-1,5 \cdot 10^4$ mbar par rapport à la pression atmosphérique; teneur en eau de $2,84 \cdot 10^{-3}$ pour le sol expérimental) est loin d'être atteint au terme de la phase II. Ainsi, le phénomène de régulation de la perte en eau par le géotextile surtout sensible en phase II, a lieu bien avant que le manque d'eau ait des conséquences irréparables pour les plantes éventuellement semées.

On a pour notre part considéré qu'on entrait en phase III d'assèchement du sol dès lors que la teneur en eau dans ses 3 premiers centimètres atteignait la valeur seuil de 15 % : voir Figure 5.6, sondes HMS9000. Le sol est alors déjà très sec en surface.

5.2.3.1.1 La présence d'un couvert géotextile diminue la vitesse d'évaporation durant la phase II d'assèchement du sol (voir leur définition Chapitre 2 §2.2.2)

Lorsqu'on compare l'ensemble des parcelles recouvertes par un géotextile (quelque soit le géotextile) aux parcelles témoins, on constate que l'effet « couvert » ou effet d'écran diminue significativement la vitesse d'évaporation du sol (ou taux d'évaporation) lors des phases I et II d'assèchement à -12 cm (sonde CS615) : voir illustration Figure 5.6. Par exemple, dans l'expérience N°5, durant la phase II, l'évaporation qui est de 5% pour le sol nu chute à un taux inférieur à 3% quel que soit le géotextile-test considéré. La vitesse d'évaporation est de 2,9% ; 2,7% et 1,9% respectivement sous HP-ouv1, HS-ouv1 et HS-ouv0.

En conséquence de quoi, à un temps donné, le potentiel de l'eau et la teneur en eau dans le sol recouvert par un géotextile restent plus élevés : voir Figures 5.7 et 5.8. Ainsi par exemple Figure 5.7, à -5,5 cm de profondeur, le potentiel qui atteint -300 mbar au bout de 5 jours dans le cas du sol nu, est inférieur à -150 mbar dans le sol recouvert par un géotextile en jute (quel que soit le géotextile considéré). Figure 5.8, à -12 cm de profondeur, la teneur en eau dans le sol nu est de 15% au bout de 5 jours, elle est supérieure à 25% quand le sol est recouvert par un géotextile en jute (quel que soit le géotextile-test considéré).

5.2.3.1.2 La présence d'un couvert géotextile allonge la durée de la phase II d'assèchement du sol

Corrélativement à la diminution de la vitesse d'évaporation du sol, on constate que la durée de la phase II augmente. Le sol reste plus humide plus longtemps. Ainsi par exemple expérience N°5, quand le sol nu met environ 5 jours pour atteindre une teneur de 15% d'eau à -12 cm de profondeur, le sol couvert par un géotextile met quant à lui plus de 9 jours : voir Figure 5.6.

5.2.3.1.3 La présence d'un couvert géotextile n'influe pas sur la phase III d'assèchement du sol

En phase III, le sol est très sec en surface et résiste fortement à l'évaporation de l'eau qui est stockée plus en profondeur dans le sol. C'est alors la couche de sol sec en surface qui contrôle les échanges de vapeur avec l'atmosphère. Recouvert ou non par un géotextile on constate que le taux d'évaporation du sol est semblable en phase III à -12 cm de profondeur. Pour reprendre l'expérience N°5, le taux d'évaporation chute à 1,2% en moyenne quel que soit le système considéré SA ou SGA.

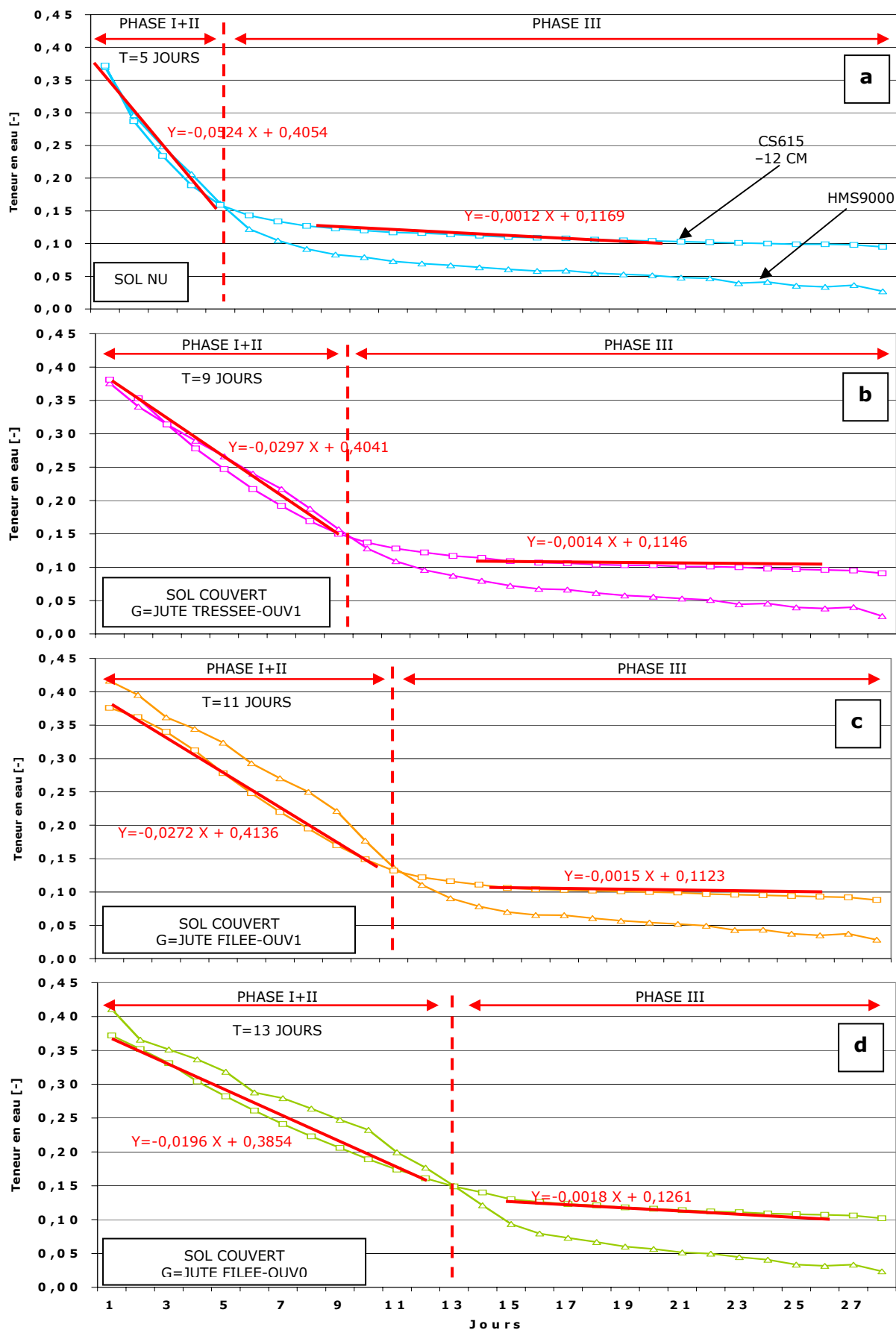


Figure 5.6. Evolution de la teneur en eau moyenne respectivement dans les 3 premiers centimètres du sol (sondes HMS9000) et à -12 cm de profondeur (sondes CS615)– Manip N°5

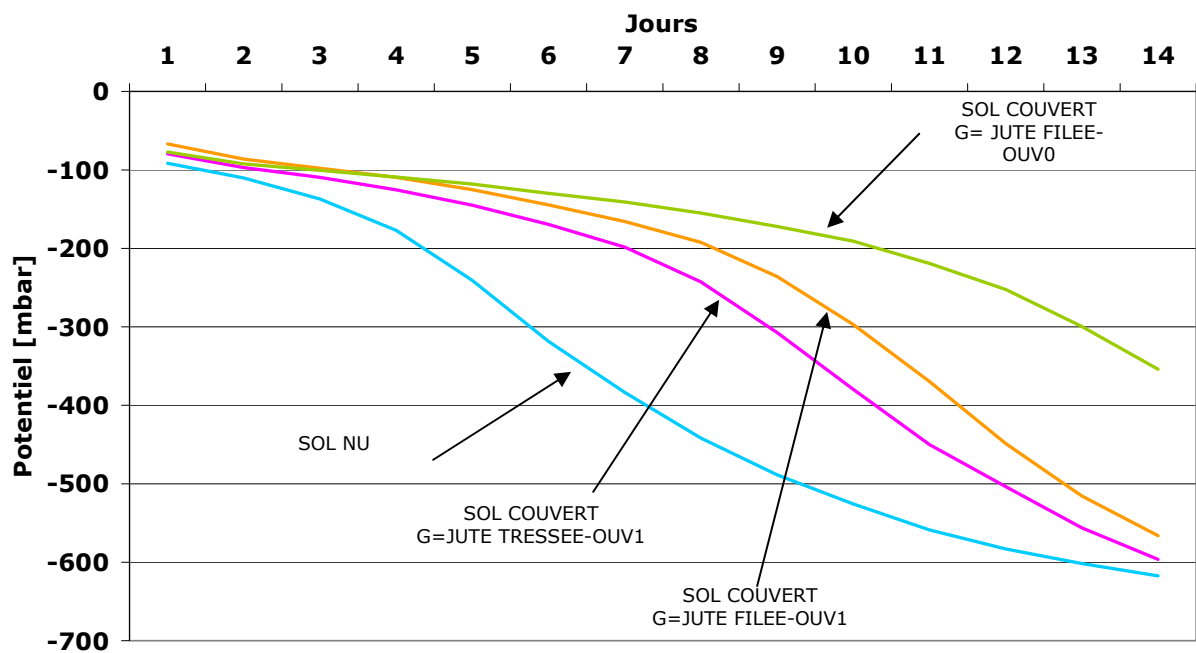


Figure 5.7. Evolution du potentiel matriciel moyen à -5,5 cm de profondeur dans les différents bacs sur 14 jours - Manip. N°5

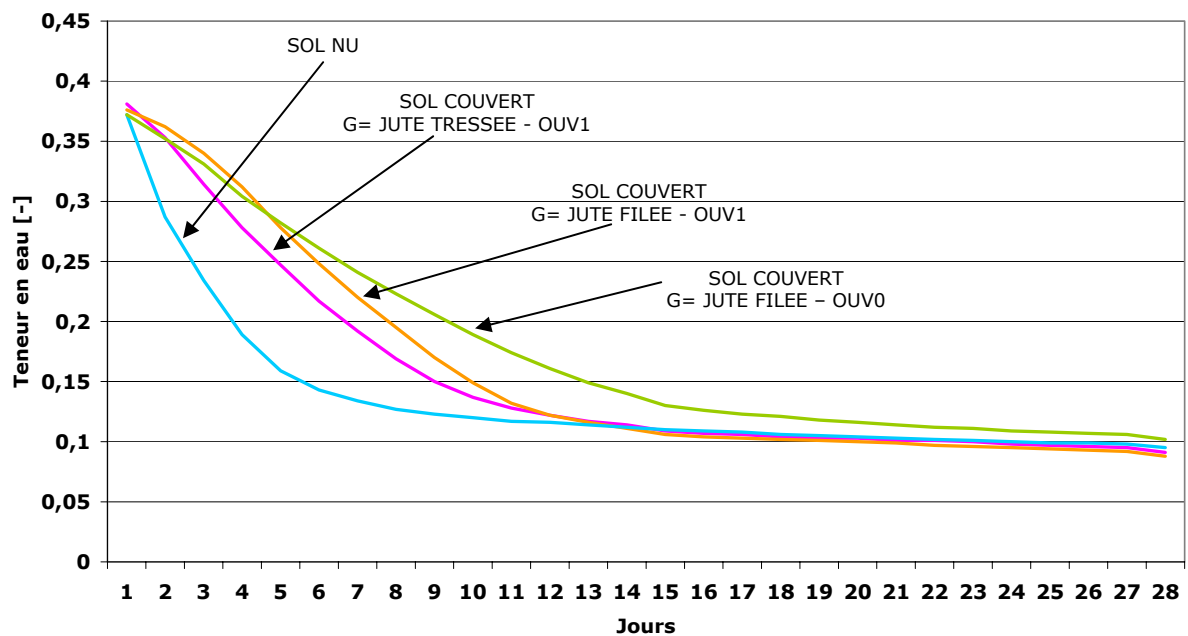


Figure 5.8. Evolution de la teneur en eau moyenne à -12 cm de profondeur dans les différents bacs sur 28 jours - Manip N°5

5.2.3.2 *Le mode de fabrication du jute (filé, HS ou tressé, HP) influe sur l'effet hydrique des géotextiles*

Le sol couvert par un géotextile en jute filé parvient moins rapidement en phase III. Le jute filé allonge significativement la durée de la phase II du sol par rapport au jute tressé. Dans l'expérience N°5, cette rallonge est en moyenne de 2 jours : voir Figure 5.6 b et c.

5.2.3.3 *La fermeture augmente l'effet d'écran des géotextiles naturels*

Pour un même mode de fabrication, la réduction de l'ouverture réduit comme on pouvait s'y attendre, le taux d'évaporation dans le sol et rallonge par conséquent la durée de la phase II. Pour reprendre l'expérience N°5, la fermeture de la toile de jute filée (HS-ouv0) augmente la durée de la phase II de 2 jours par rapport à la jute filée d'ouverture 1 (HS-ouv1) : voir Figure 5.6 c et d.

5.2.4 LE COMPORTEMENT DU COMPARTIMENT GEOTEXTILE

D'une manière générale et quel que soit le système considéré (SA ou SGA), l'humidité relative moyenne de l'air au voisinage du sol suit globalement les fluctuations de l'humidité relative de l'air mesurée à +15 cm au-dessus de la surface du sol : voir Figures 5.9 et 5.10.

La valeur de l'humidité relative au voisinage du sol dépend de l'humidité relative de l'air dans l'atmosphère mais aussi de l'état hydrique du sol sous-jacent. Ainsi, au début des expériences alors que le sol est à la teneur en eau moyenne $\theta_{\max}$ (= 0,35), l'humidité relative moyenne à proximité du sol est plus élevée que l'humidité relative à +15 cm (par exemple de +15% environ par rapport à la référence dans l'atmosphère pour le système SA, manip. N°5), elle chute ensuite tout le long de la phase II d'assèchement du sol (elle atteint 50% au terme de la phase II dans le cas de notre exemple), pour ensuite se stabiliser dans la phase III (écart constant avec l'humidité relative de l'air à +15 cm) : voir Figure 5.9.

Au cours de l'expérience (voir Figure 5.9), lorsque le sol est recouvert par un géotextile (système SGA), l'humidité relative au voisinage du sol chute moins rapidement par rapport au sol nu car la durée de la phase II est rallongée.

Selon que les sondes HP-155C (voir §4.2.2.1) ont été placées sous un brin du géotextile, à l'intérieur de la maille ou sur le brin, la valeur de l'humidité relative moyenne mesurée varie. Elle est la plus élevée sous les brins et la plus basse sur les brins. A l'intérieur de la maille, l'air est comme soustrait au régime de l'atmosphère juste

au-dessus du géotextile : la valeur de l'humidité relative est intermédiaire (Figures 5.9 et 5.10).

Concernant la température moyenne de l'air à proximité du sol, quel que soit le système considéré (SA ou SGA), elle suit les fluctuations de la température de l'air mesurée à +15 cm au-dessus du sol. La corrélation est négative durant le jour : la température à proximité du sol est inférieure à celle de l'air à +15 cm : voir Figure 5.11.

La valeur de la température au voisinage du sol dépend aussi de l'état hydrique du sol sous-jacent. Ainsi comme le montre la Figure 5.11, au début des expériences ($j=1$, $\theta = \theta_{\max}$), la température de l'air à proximité du sol est plus basse par rapport à celle de l'atmosphère qu'elle ne l'est au bout de 7 jours où la teneur en eau du sol en surface est déjà faible (voir Figure 5.6, sondes HMS9000). La température est en effet couplée à l'eau qui pour s'évaporer a besoin de chaleur : la chaleur latente de vaporisation.

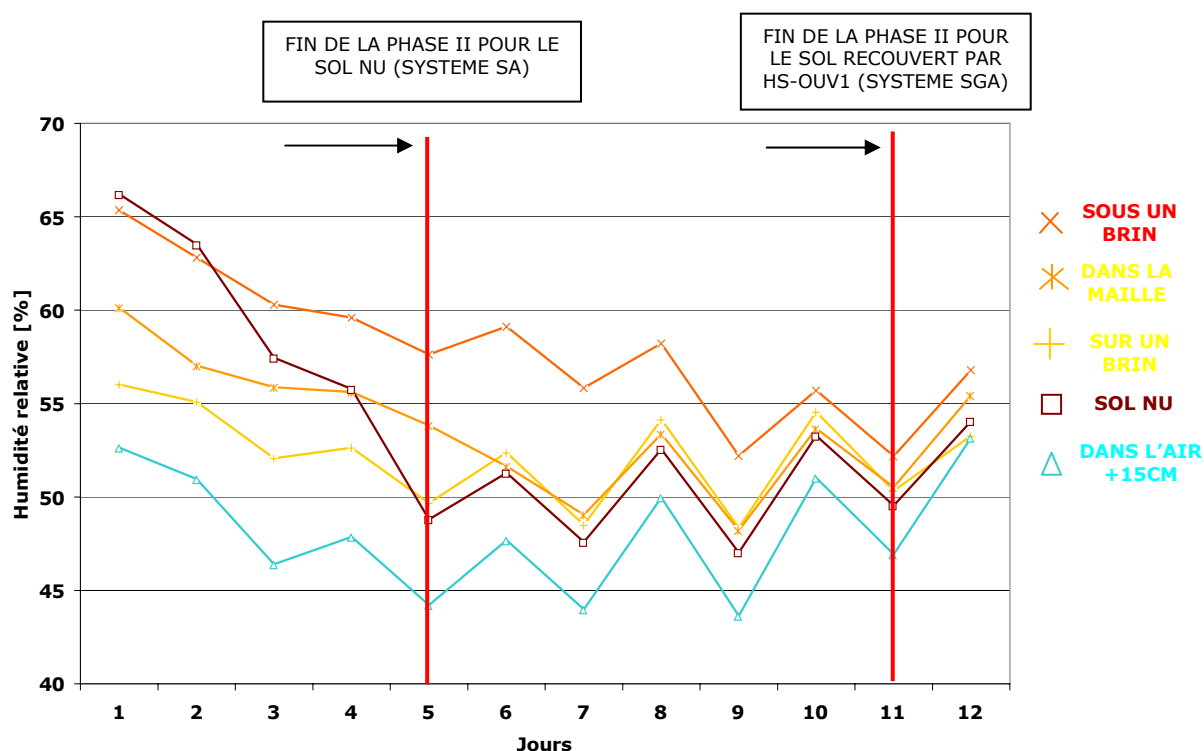


Figure 5.9. Evolution journalière de l'humidité relative moyenne au voisinage du sol : suivi de l'humidité relative sous un brin, sur un brin et dans la maille d'un géotextile(HS-ouv1) en comparaison du sol nu – Manip. N°5

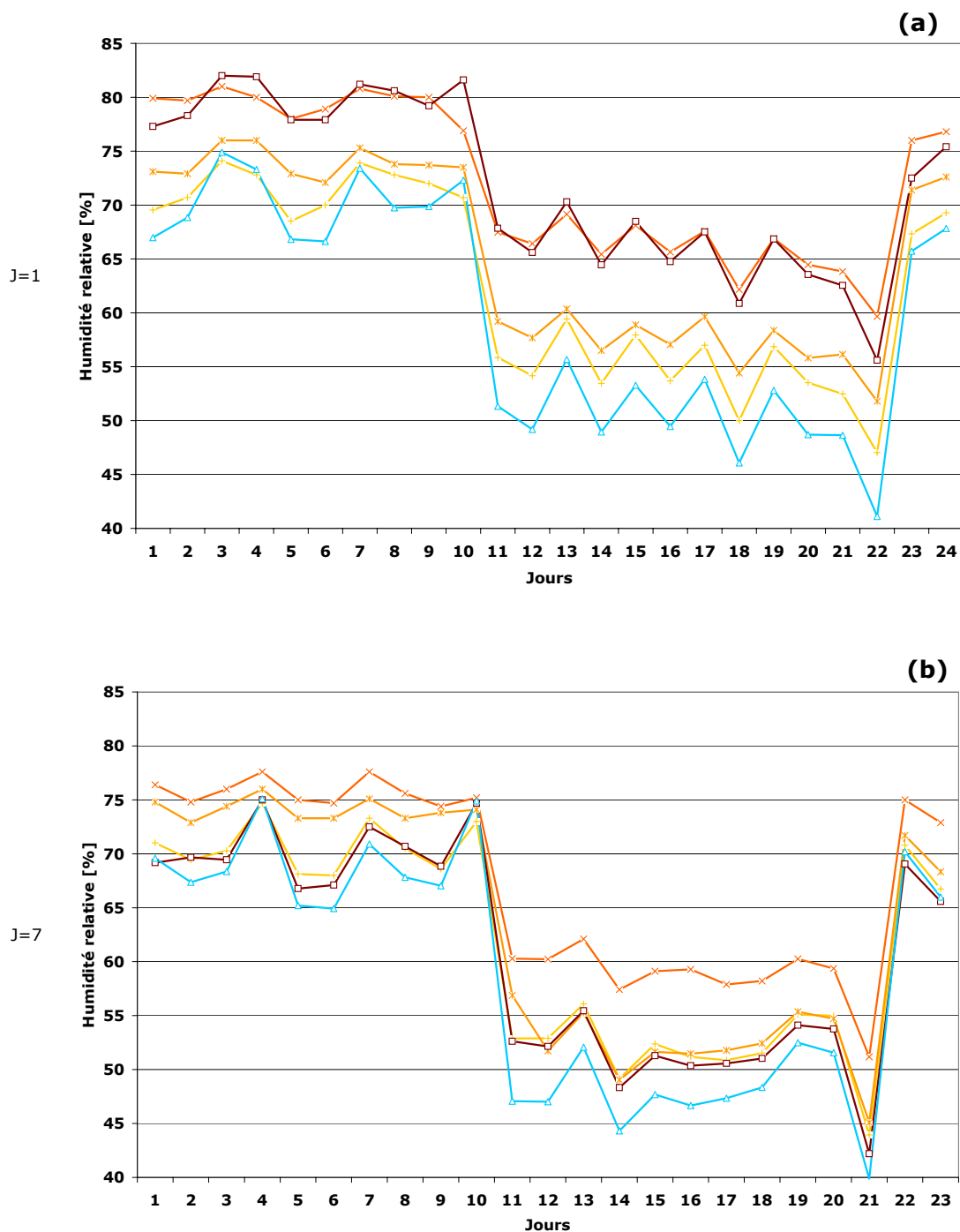


Figure 5.10. Variations nycthémérales de l'humidité relative moyenne au voisinage du sol : suivi de l'humidité relative sous un brin, sur un brin et dans la maille d'un géotextile en comparaison du sol nu – Manip. N°5 : jour1 (a) et jour 7 (b)

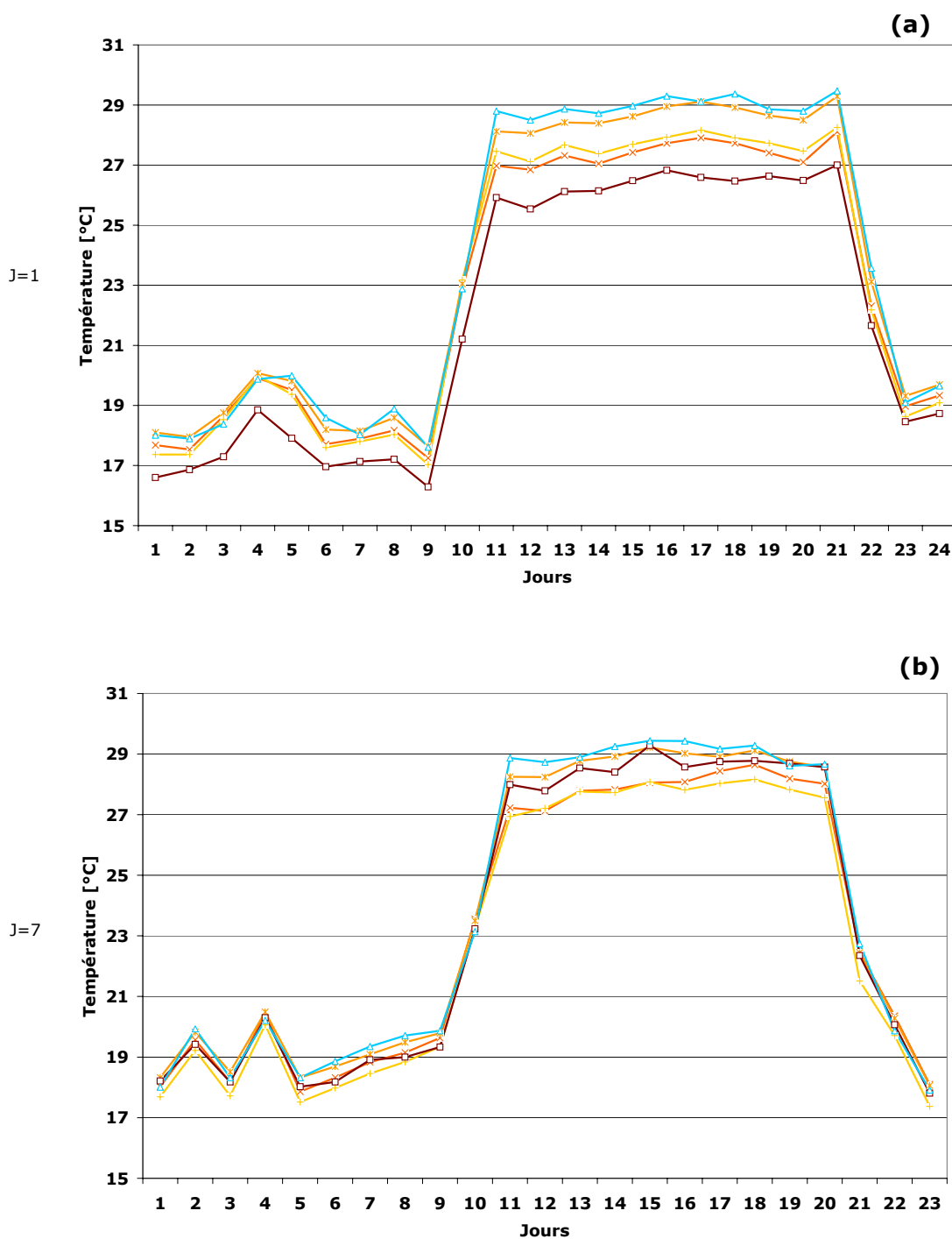


Figure 5.11. Variations nycthémérales de la température moyenne : suivi de la température sous un brin, sur un brin et dans la maille d'un géotextile en comparaison du sol nu – Manip. N°5 : jour1 (a) et jour 7 (b)

5.2.5 SYNTHÈSE

Parce qu'ils sont de nature organique, et par conséquent de faible conductivité thermique - dans la littérature on trouve par exemple $0,05 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pour la matière organique sèche (Bonan, 1989) et $0,1 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pour le bois (Findeling, 2001) - mais aussi d'albédo moyen - $0,134$ à sec pour la toile de jute (Sutherland, 1998b) -, les

géotextiles en jute ont un effet modérateur sur la température du sol. Ce résultat est en accord avec la littérature scientifique et notamment avec les nombreuses études réalisées sur les paillis de résidus qui sont autant de produits apparentés aux géotextiles naturels [i.e. (Sauer et al., 1998), (Gurnah et Mutea, 1982), (Varadan et Rao, 1983), (Buisnière, 1991)].

On a cependant clairement montré que l'effet tampon sur les variations intra et inter journalières des températures ne se ressent qu'au delà d'une certaine profondeur. Pour nous il s'est agit de la profondeur -5,5 cm. Au dessus, bien au contraire, les températures fluctuent plus rapidement dans un sol recouvert par un géotextile en jute que dans le sol nu.

Les géotextiles en jute constituent un écran qui limite efficacement l'évaporation de l'eau dans le sol. Ce résultat est cohérent avec les multiples observations effectuées avec des paillis : l'évaporation du stock d'eau dans le sol est ralentie par la présence d'un couvert [i.e. (Unger et Parker, 1976), (Brun et al., 1986), (Bond et Willis, 1969,70), (Gonzalez Sosa et al., 1999a)]. Comme pour les paillis : voir (Bond et Willis, 1969,70), c'est pendant la phase II d'assèchement du sol (au sens de Idso et al., 1974) que le géotextile est efficace : il diminue le taux d'évaporation du sol et rallonge la durée de la phase II. La prépondérance de l'« effet hydrique » sur l'« effet thermique » des géotextiles naturels explique le réchauffement ou le refroidissement plus rapide du sol dans les premiers centimètres par rapport au sol nu : moins de chaleur est perdue lors de l'évaporation en phase de réchauffement et moins de chaleur est libérée par condensation de l'eau en phase de refroidissement.

Nos résultats montrent que les géotextiles filés tamponnent davantage les variations des températures que les géotextiles tressés.

Or, le mode de fabrication influe fortement sur la porosité des brins qui est plus faible quand les géotextiles sont tressés : voir §4.3.2.2. Les brins des géotextile filés qui contiennent plus d'air, sont de fait plus isolant.

Nos résultats montrent aussi que plus le taux de couverture est élevé plus la réduction des températures moyennes est importante. Ces résultats sont conformes à ceux obtenus par exemple avec des paillis de riz : le maximum des températures dans le sol s'est en effet avéré d'autant plus bas que le taux d'épandage était important (Lal. et al., 1980). D'autres ont constaté que le paillage de couverture totale régule le mieux les températures du sol en réduisant les amplitudes thermiques [i.e. (Bristow et Abrecht, 1989)].

Tout comme pour les fluctuations des températures dans le sol, à ouverture égale, les géotextiles filés sont plus performants que les géotextiles tressés. Le filage améliorant

la porosité des brins, les géotextiles filés peuvent contenir davantage d'eau de condensation, d'origine atmosphérique pendant la nuit ou en provenance du sol sous-jacent pendant le jour (évaporation). Ainsi, lorsque la demande évaporative de l'atmosphère se manifeste en début de journée, l'eau condensée dans l'espace intermatriciel s'évapore en premier. Cette phase pourrait durer plus longtemps avec des géotextiles filés que des géotextiles tressés. L'eau stockée dans le sol serait pendant ce temps préservée. Notons que de telles observations ont été réalisées à l'intérieur d'un paillis d'orge : voir (Novak et al., 2000b).

Il existe aussi un effet d'ouverture manifeste sur l'effet hydrique des géotextiles. Comme on pouvait s'y attendre, les résultats ont bien montré qu'un géotextile d'ouverture nulle préserve plus longtemps le stock d'eau dans le sol qu'un géotextile d'ouverture 1 (1cm²). Ce résultat est logique, la fermeture du géotextile supprime la surface du sol en contact direct avec l'atmosphère et par conséquent la zone d'évaporation préférentielle à l'intérieur de la maille.

La comparaison du comportement des géotextiles avec celui des paillis a ses limites parce que certaines de leurs caractéristiques comme la densité ne recouvrent pas la même réalité pour les géotextiles que pour les paillis. Pour les géotextiles la densité s'applique aux brins et elle est indépendante du taux de couverture. Pour les paillis faits de résidus épandus sans organisation sur le sol, la densité du paillis et le taux de couverture ne sont pas indépendants. Il devient de fait difficile de comparer l'effet sur le microclimat de la densité des brins des géotextiles avec celui de la densité d'un paillis : voir paradoxe de « Buckingham » (Bond et Willis, 1970) au Chapitre 2 §2.2.2.

5.3 Modélisation

5.3.1 SIMULATION NUMERIQUE DES TRANSFERTS D'EAU ET DE CHALEUR DANS LE SYSTEME SGA ET SON TEMOIN LE SYSTEME SA

Nous avons utilisé les versions SiSPAT (Braud, 1996) et SiSPAT_mulch (Gonzalez Sosa, 1999) d'un modèle numérique des flux d'eau et de chaleur respectivement dans le continuum Sol-Plante-Atmosphère et Sol-Plante-Mulch-Atmosphère dont nous présentons ici succinctement les différents modules. Pour plus de précision sur ces deux modèles on peut se référer aux publications et documents de synthèses suivants : (Braud et al., 1995), (Braud et al., 1997), (Gonzalez Sosa, 1999) (Gonzalez Sosa et al., 1999) et (Braud, 2000).

Dans notre cas, nous n'avons pas utilisé le module plante.

5.3.1.1 Le module sol

Il décrit la dynamique des transferts couplés verticaux de masse et de chaleur dans une portion de sol assimilée à un milieu poreux indéformable aux caractéristiques descriptives et aux propriétés hydrodynamiques et thermiques uniformes horizontalement et qui peut être stratifié en plusieurs couches.

On peut se représenter le sol comme un parallélépipède composé de n plans horizontaux superposés, délimité en haut par l'interface sol-atmosphère et en bas par un plan horizontal passant par la côte z_l dont la valeur absolue donne la profondeur de la portion de sol considérée. Comme les caractéristiques descriptives et les propriétés hydriques et thermiques du sol sont considérées comme uniformes horizontalement, à chaque instant t , en tous les points d'un plan donné, les variables de suivi des transferts h et T prennent la même valeur. Il suffit donc de suivre ces variables en un point par plan le long d'une seule verticale pour rendre compte de la dynamique des transferts verticaux d'eau et de chaleur à l'échelle du parallélépipède entier. Mathématiquement, le compartiment sol se réduit donc à un segment de droite vertical borné par les côtes $z=0$ et $z=z_l$.

Les équations qui rendent compte des transferts verticaux de masse de chaleur sont issues du formalisme proposé par Milly. Ce sont des équations différentielles non linéaires (les coefficients en facteur des opérations de dérivation peuvent varier avec la variable dérivée). Les coefficients en facteur expriment les caractéristiques et propriétés du sol qui exercent leurs contraintes sur les transferts décrits à l'aide des variables indépendantes h et T . Ces équations peuvent s'écrire :

$$C_h \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{mh} \frac{\partial h}{\partial z} + D_{mT} \frac{\partial T}{\partial z} - K \right) \quad (5.1)$$

$$C_T \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{ch} \frac{\partial h}{\partial z} + D_{cT} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (5.2)$$

où C_h est une *capacité capillaire* introduite par analogie avec la capacité calorifique C_T . Elle se déduit simplement de la courbe de rétention (3.1) présentée au §3.1.1.2 par :

$$C_h = \left(\frac{\partial \theta}{\partial h} \right)_T \quad (5.3)$$

et où D_{mh} [$m^2.s^{-1}$], D_{mT} [$m^2.s^{-1}$], D_{ch} [$W.m^{-2}$], D_{cT} [$W.m^{-1}.K^{-1}$] sont 4 coefficients de *diffusion*, respectivement liés, d'une part à la migration de l'eau sous l'effet d'un gradient de pression ou de température et, d'autre part, au transfert de chaleur sous l'effet d'un

transport d'eau ou d'un gradient de température. On trouvera développées dans (Braud, 2000) les expressions de ces différents coefficients.

Le système d'équations - (5.1) et (5.2) - est construit sur le principe de conservation de la masse et de l'énergie. Chaque terme de gauche est donc un terme de stockage qui doit être égal par construction au terme équivalent de droite qui représente un transfert.

La résolution de ces équations non linéaires passe par une discrétisation par nœuds¹² (les points de la verticale) et par la linéarisation des coefficients en facteur des opérations de dérivation. Pour ce faire, dans SiSPAT, on a recours à la technique d'approximation numérique des différences finies. D'autre part, cette résolution nécessite la spécification de conditions initiales et de conditions aux limites à la frontière du domaine d'écoulement des flux.

Les conditions initiales sont les valeurs de h et de T en chaque nœud de la verticale au temps $t=0$ de la simulation.

Les conditions aux limites regroupent les conditions à la limite supérieure du parallélépipède de sol soit à la côte $z=0$ et les conditions à sa limite inférieure en $z=z_l$.

En $z=0$:

- S'il n'y a pas formation d'une lame d'eau à la surface du sol au cours d'une pluie, ce qui est notre cas, les valeurs de potentiel et de température à la surface du sol (h_1 et T_1) sont fournies au système sol. Elles résultent de la résolution d'un système à 5 équations de l'interface sol-atmosphère. C'est une condition dite de Neumann.
- Autrement, s'il y a formation d'une lame d'eau de hauteur z_{lame} [m] à la surface du sol sous l'effet d'une forte pluie, on impose le potentiel hydrique à la surface du sol égal à la hauteur de la lame d'eau et on considère que la température au sol est identique à celle de l'atmosphère.

En $z=z_l$, la solution la plus réaliste est d'imposer les mesures si elles existent des valeurs de h et T en z_l . C'est donc une condition de Dirichlet.

5.3.1.2 Le module géotextile

Ce module est décrit en détail dans (Gonzalez Sosa, 1999). Il nous sert à traduire la dynamique des transferts couplés d'eau et de chaleur au travers des brins des

¹² Le nombre de nœud et l'épaisseur entre les nœuds sont déterminés en utilisant un utilitaire annexe : *maillage.exe*

géotextiles expérimentaux. Il n'intègre pas les transferts radiatifs éventuels qui auraient lieu au travers des brins des géotextiles qui sont supposés opaques. La modélisation s'appuie sur les équations de conservation de la masse d'eau liquide et vapeur et de conservation de l'énergie. La formulation est proche de celle des équations utilisées pour le compartiment Sol. Ainsi, on a accès au sens des flux et aux contributions des gradients associés aux deux variables indépendantes considérées, l'humidité relative HR_g et la température T_g . Ce qui varie par rapport au compartiment Sol se résume en deux principaux points :

- Les transferts d'eau sont supposés avoir lieu uniquement en phase vapeur cependant un réservoir d'interception de l'eau de pluie ou de rosée, de capacité fixe (la capacité de rétention Q), est introduit.
- Les transferts de chaleur ont lieu sous deux formes, par conduction - de fibre en fibre - et par convection libre ou forcée car on suppose que le vent peut pénétrer à l'intérieur des brins.

Concernant les transferts d'eau et de chaleur par convection, la modélisation reste « classique ». Elle suppose que les flux par convection sont proportionnels aux gradients des quantités transportées (K-théorie). Cette hypothèse est discutée. En effet, de récents résultats expérimentaux ont montré que contrairement à une canopée, un paillis de quelques centimètres n'est pas assez épais pour que la stabilité des couches d'air puisse s'y installer. Le vent pénètre fortement dans le paillis et est responsable de l'essentiel de la turbulence (Novak et al., 2000a). Pour tenir compte de ces résultats, on peut introduire un coefficient d'échange turbulent suivant une décroissance exponentielle dans le paillis en fonction de la profondeur : voir (Findeling, 2001).

Les équations pour le compartiment géotextile sont :

$$C_{gh} \frac{\partial T_g}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D_{ghT} \frac{\partial T_g}{\partial z} + D_{ghHR} \frac{\partial HR_g}{\partial z} \right] \quad (5.4)$$

$$C_{gwhR} \frac{\partial HR_g}{\partial t} + C_{gWT} \frac{\partial T_g}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D_{gwhR} \frac{\partial HR_g}{\partial z} + D_{gWT} \frac{\partial T_g}{\partial z} \right] \quad (5.5)$$

C_{gh} [m^{-1}], capacité capillaire isotherme des brins ; D_{ghT} [$W.m^{-1}.K^{-1}$], coefficient de transfert de chaleur associé au gradient de température à l'intérieur des brins ; D_{ghHR} [$W.m^{-1}$] coefficient de transfert de chaleur associé au gradient d'humidité relative à l'intérieur des brins ; C_{gwhR} [-], coefficient de stockage de masse associé à la variation d'humidité relative dans les brins ; C_{gWT} [K^{-1}], coefficient de stockage de masse associé à

la variation de la température dans les brins ; $D_{g_{wHR}}$ [$m^2.s^{-1}$], coefficient de transfert de masse associé au gradient d'humidité relative à l'intérieur des brins ; $D_{g_{wT}}$ [$m^2.s^{-1}.K^{-1}$] coefficient de transfert de masse associé au gradient de température à l'intérieur des brins.

Les conditions aux limites regroupent les conditions à la limite supérieure du brin soit à la côte $z=0$ et les conditions à sa limite inférieure en $z=z_{sg}$.

En $z=0$:

- S'il n'y a pas formation d'une lame d'eau à la surface du géotextile, ce qui est notre cas, au cours d'une pluie, les valeurs de potentiel et de température à la surface des brins (h_1 et T_1) sont fournies au système sol. Elles résultent de la résolution du système à 5 équations de l'interface géotextile-atmosphère : voir (Gonzalez Sosa, 1999).
- Autrement, s'il y a formation d'une lame d'eau de hauteur z_{lame} (m) à la surface du sol sous l'effet d'une forte pluie, on impose le potentiel hydrique à la surface du sol égal à la hauteur de la lame d'eau et on considère que la température au sol est identique à celle de l'atmosphère.

En $z=z_{sg}$, on considère qu'il y a continuité des flux de chaleur et de masse à l'interface géotextile-sol.

5.3.1.3 Les modules d'interface

Il s'agit des modules sol-atmosphère de la version SiSPAT et géotextile-atmosphère de la version SiSPAT_mulch. Ils assurent le couplage dynamique entre les compartiments Sol et Atmosphère ou Géotextile et Atmosphère respectivement. Ils sont basés sur les équations de conservation de la masse et de l'énergie (2.7) et (2.8). L'expression des flux repose sur une approche résistive : voir par exemple (Braud, 2000).

5.3.1.4 Une combinaison des deux modèles pour les géotextiles d'ouverture >0

Pour simuler des humidités, des températures, des flux d'eau dans le sol recouvert par un géotextile d'ouverture non nulle, on a procédé comme (Findeling, 2001) en composant linéairement les résultats des simulations avec la version SiSPAT pour la partie « sol nu » et SiSPAT_mulch pour la partie recouverte par les brins du géotextile.

5.3.2 PARAMETRISATION DE SISPAT ET SISPAT_MULCH

5.3.2.1 Le Compartiment sol

Les caractéristiques descriptives nécessaires au fonctionnement du modèle ont déjà été définies : voir au Chapitre 4 le §4.3.1 consacré à la description du matériau sol utilisé. Les valeurs retenues pour le sol expérimental sont en outre récapitulées dans le Tableau 5.1 ci-après.

PARAMETRES DU SOL	SYMBOLE	UNITES	VALEURS
Caractéristiques descriptives			
Densité apparente sèche	$\delta\rho_{\text{sec}}$	g.cm^{-3}	1,51
Porosité	n	-	0,43
Teneur en eau à partir de laquelle la phase liquide n'est plus continue	θ_k	-	10^{-3}
Teneur en eau résiduelle	θ_{res}	-	0
Teneur en eau au point de flétrissement	θ_f	-	$2,84.10^{-3}$
Teneur en matière organique	θ_o	-	0,01
Teneur en quartz	θ_q	-	2.10^{-4}
Teneur en autres minéraux	θ_m	-	0.989

Tableau 5.1. Valeurs retenues pour les différentes caractéristiques descriptives du sol expérimental

5.3.2.1.1 Propriétés hydriques et hydrodynamiques

Concernant la courbe de rétention d'eau, on a retenu pour θ_{sat} la valeur de la porosité, m_{VG} et n_{VG} ont été calculés en utilisant la méthode décrite à la fin du §3.1.1.3.1 qui part de la fonction de distribution de la taille des particules définie pour le sol expérimental : voir Figure 4.33. Quant à h_g , il a été déterminé à partir de plusieurs couples (h, θ) tirés de nos expériences. On a retenu une valeur moyenne de $-1,16$ m.

$$\frac{\theta}{0.43} = \left[1 + \left(\frac{h}{-1.16} \right)^{3.03214} \right]^{-0.3404} \quad (5.6)$$

Pour décrire la relation $K(\theta)$ nous avons choisi la formulation de Brooks & Corey (1964) : voir équation (3.15). Le paramètre de forme η_{BC} a été calculé en utilisant la relation (3.16). On a obtenu $\eta_{\text{BC}} = 5,9825$. En ce qui concerne la conductivité hydraulique à saturation K_{sat} , nous avons préféré la caler. On a finalement retenu la valeur $K_{\text{sat}} = 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$ que l'on peut qualifier de « moyenne à faible » si l'on se réfère aux classes de perméabilité : voir (CTGREF, 1979) cité par (Mathieu et Pieltain, 1998). Ainsi, la relation $K(\theta)$ retenue pour le sol expérimental s'écrit :

$$\frac{K}{1.5 * 10^{-6}} = \left(\frac{\theta}{0.43} \right)^{5.9825} \quad (5.7)$$

5.3.2.1.2 Propriétés thermiques

On a estimé la relation $C_T(\theta)$ en utilisant l'équation (3.17). On obtient dans notre cas où on peut négliger la teneur en matière organique qui est < à 1% :

$$C_T = 2.10 * 10^6 + 4.18 * 10^6 \theta \quad (5.8)$$

soit une capacité calorifique à sec de $2,10.10^6 \text{ J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$.

Pour décrire la relation $\lambda^*(\theta)$, on a retenu un modèle de type « Van de Griend et O'Neill » : voir équation (3.18). Par contre, nous avons ajusté la valeur de l'inertie thermique à saturation et la pente de cette relation pour que cette dernière donne des résultats compatibles avec les deux mesures de conductivité thermique que nous avons effectuées par la méthode des sondes à choc thermique sur le sol expérimental et qui sont : $\lambda_{\text{sat}} = 1,715 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et $\lambda_{\text{sec}} = 0,23 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Suivant le modèle retenu, la relation $\lambda^*(\theta)$ pour notre sol expérimental s'écrit :

$$\lambda(\theta) = \frac{1}{2.10 * 10^6 + 4.18 * 10^6 \theta} \left[\frac{1}{0.654} (2344.51 + 2875.13\theta - 1890) \right]^2 \quad (5.9)$$

Notons que la valeur de l'inertie thermique à saturation que l'on a prise : $\lambda_s = 2344,51 \text{ J.m}^{-2}.\text{K}^{-1}.\text{s}^{-1/2}$ est réaliste au regard de la gamme des valeurs données dans (Van de Griend et O'Neill, 1986) : voir Tableau 3.2.

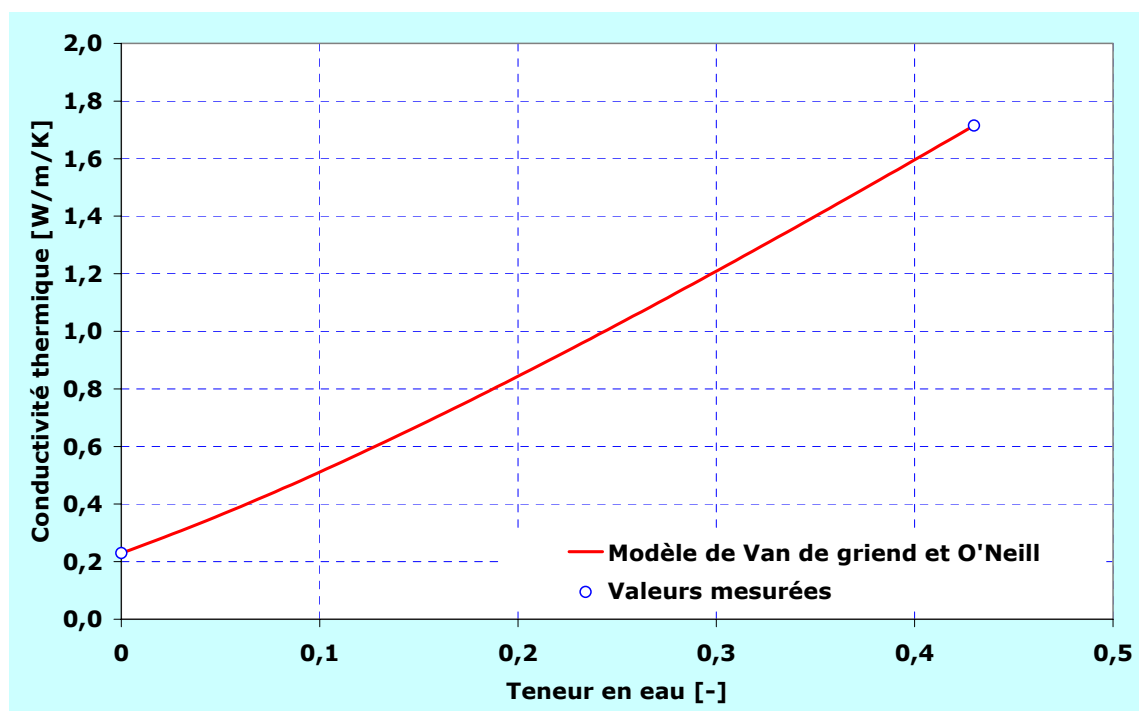


Figure 5.12. Valeurs de la conductivité thermique mesurées sur le sol expérimental à saturation et à sec et relation de Van de Griend et O'Neill retenue pour le sol expérimental

5.3.2.1.3 Propriétés de surface

Concernant les propriétés de surface, on a pris des valeurs trouvées pour un sable dans la littérature : voir le Tableau récapitulatif 5.2 ci-après.

PARAMETRES DU SOL	SYMBOLE	UNITES	VALEURS
Propriétés hydriques et hydrodynamiques			
Facteur d'échelle de la relation de Van Genuchten	h_g	m	-1,16
Paramètre de forme de la relation de Van Genuchten	n_{VG}	-	3,03214
Conductivité hydraulique à saturation	K_{sat}	m.s-1	$1,5 \cdot 10^{-6}$
Paramètre de forme de la relation de Brooks et Corey	η_{BC}	-	5,9825
Propriétés thermiques			
Capacité calorifique à sec	C_T	J.m ⁻³ .K ⁻¹	$2,10 \cdot 10^6$
Inertie thermique à saturation	Λ_s	J.m ⁻² .K ⁻¹ .s ^{-1/2}	2470
Propriétés de surface			
Albedo [source : (Guyot,1997)]	a	-	0,30
Emissivité [source : (Guyot, 1997)]	ε	-	0,87
Hauteur de déplacement [source : (atlas éolien européen, 1991)]	h	m	0,0002
Longueur de rugosité pour le transfert d'eau [source : (atlas éolien européen, 1991)]	Z_{om}	m	0,01

Tableau 5.2. Valeurs retenues des différents paramètres du sol expérimental

5.3.2.2 *Caractéristique du compartiment « Géotextile » : propriétés des brins*

Les caractéristiques descriptives des géotextiles expérimentaux qui sont nécessaires au fonctionnement de la version SiSPAT_mulch ont déjà été définies au §4.3.2.2 et sont répertoriées dans le Tableau récapitulatif 5.3 ci-après.

Concernant les propriétés de surface des géotextiles naturels, on a retenu des valeurs trouvées dans la littérature pour les paillis ou les géotextiles en jute et dont on peut consulter les valeurs dans le Tableau 5.3. On a cependant calé la longueur de rugosité qui est inférieure d'un facteur 10 à celle retenue pour un mulch d'herbe morte sur pied dans : (Gonzalez-Sosa, 1999).

Pour ce qui est du facteur d'atténuation de la diffusivité dans le géotextile, on est aussi partie de la valeur valable pour un mulch constitué par de l'herbe morte sur pied : $\chi = 1,5$ (Gonzalez-Sosa, 1999), puis on a ajusté manuellement ce paramètre en minimisant les écarts entre les potentiels observés à -3,5 ; -8,5 et -12 cm de profondeur et les potentiels simulés. On obtient $\chi_g = 2$.

PARAMETRES DES GEOTEXTILES EXPERIMENTAUX	SYMBOLE	UNITE	VALEURS
Caractéristiques descriptives			
JUTE TRESSE			
Masse volumique apparente sèche	ρ_{gsec}	Kg.m ⁻³	3,46.10 ⁵
Porosité	n_g	-	0,84
Epaisseur	e_g	m	0,004
JUTE FILE			
Masse volumique apparente sèche	ρ_{gsec}	Kg.m ⁻³	3,13.10 ⁵
Porosité	n_g	-	0,90
Epaisseur	e_g	m	0,004
Atténuation de la diffusivité			
Facteur d'atténuation de la diffusivité	χ_g	-	2
Propriétés de surface			
Albedo [source : (Sutherland et al., 1998b)]	α_g	-	0,134
Emissivité [source : (Novak et al., 2000c)]	ε_g	-	1
Hauteur de déplacement [source : (atlas éolien européen, 1991)]	h_g	m	0,0002
Longueur de rugosité pour le transfert d'eau	Z_{gom}	m	0,0001

Tableau 5.3. Valeurs retenues des différents paramètres des deux types de géotextiles expérimentaux

5.3.3 COMPARAISONS MESURES/MODELE

Une fois tous les paramètres fixés, nous avons effectué un certain nombre de simulations. Les profils initiaux de température et de potentiel hydrique sont issus des mesures de température et tensiométriques effectuées entre 0 et -12 cm de profondeur. Les conditions à la limite inférieure ont été définies en imposant les valeurs de température et de potentiel hydrique mesurées à -12 cm de profondeur au pas de temps horaire. Les valeurs sont ensuite interpolées par une subroutine. Le forçage atmosphérique est pour sa part issu des mesures de rayonnement net, d'humidité relative, de température, de vitesse du vent mesurées à + 15 cm au dessus de la surface du sol. Le pas de temps des mesures atmosphériques est de 2 minutes.

Pour discuter des résultats, on a choisi ici de se servir des simulations effectuées pour l'expérience N°5. Les résultats simulés sont comparés aux mesures expérimentales.

On constate que durant toute la phase d'assèchement du sol, les évolutions temporelles de dessèchement sont bien reproduites : voir Figures 5.13 et 5.14. L'écart maximum entre les mesures et les simulations est de l'ordre de 0,01 m³.m⁻³ pour la teneur en eau et de 40 mbar pour le potentiel matriciel. Cet écart correspond peu ou

prou à l'ordre de grandeur de la précision des mesures. Ainsi, les mesures obtenues sur le dispositif expérimental qui ont permis de mettre en évidence - toutes expériences confondues - une meilleure conservation de l'humidité dans le sol lorsqu'il est recouvert par un géotextile, sont confirmées par le modèle.

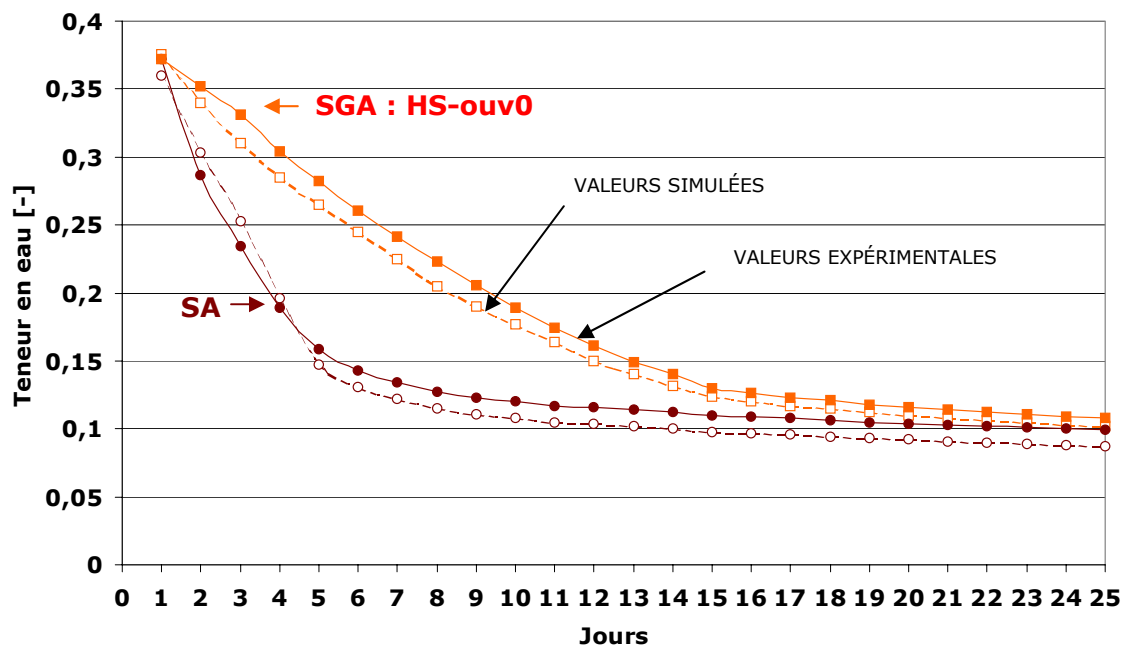


Figure 5.13. Evolution journalière des teneurs en eau volumiques simulées après calage à -12 cm de profondeur dans le cas d'un système SA (-o-) et d'un système SGA (-□-) et comparaison avec les données expérimentales

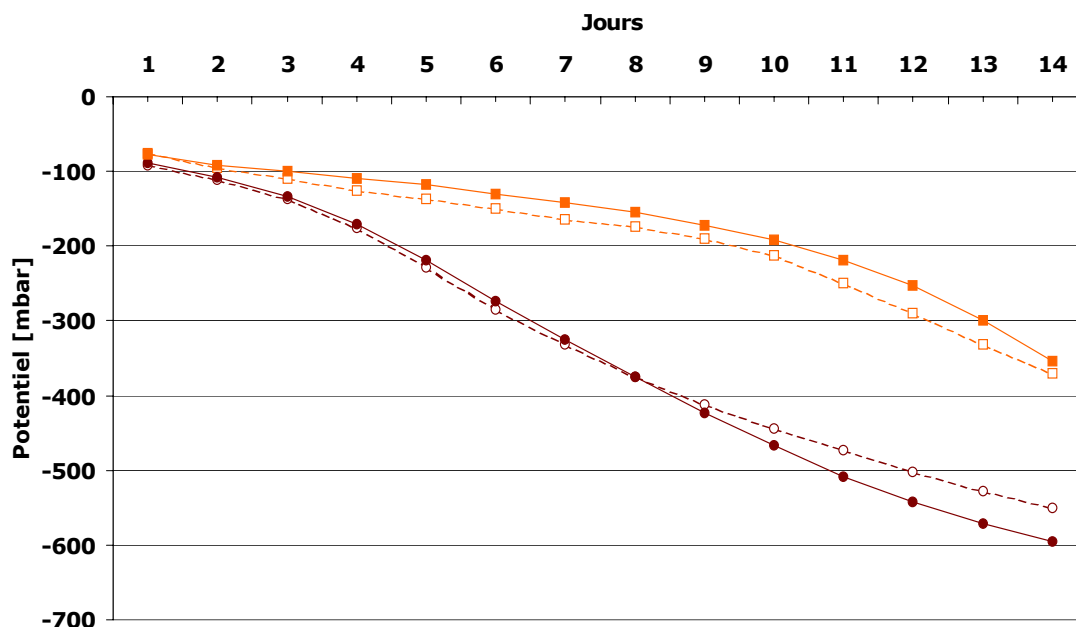


Figure 5.14. Evolution journalière des potentiels matriciels simulés après calage à -5.5 cm de profondeur dans le cas d'un système SA (-o-) et d'un système SGA (-□-) et comparaison avec les données expérimentales

Quand le taux de recouvrement du géotextile est inférieur à 1 - qu'il présente donc des ouvertures - on a combiné linéairement la version SiSPAT pour la partie sol nu avec la version SiSPAT_mulch pour la partie recouverte par les brins. Les résultats des simulations montrent une différence importante entre les valeurs expérimentales et simulées : voir exemple Figure 5.15. Le sol à l'intérieur de la maille - qui n'est pas recouvert par les brins des géotextiles - ne se comporte pas comme le sol nu. Les brins influent sur la fine couche d'air qui est piégée dans la maille. En diminuant le paramètre de rugosité de surface dans la version SiSPAT, on est parvenu à de meilleurs résultats : voir Figure 5.15, la courbe en pointillé. La résistance aux transferts d'eau et de chaleur est alors plus élevée.

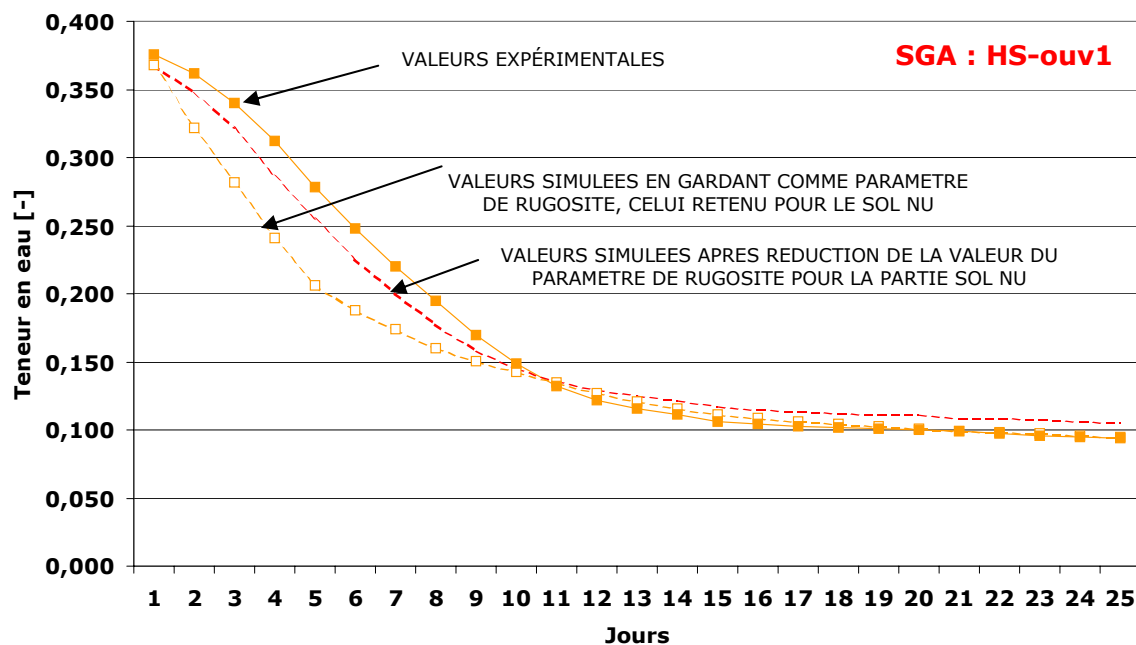


Figure 5.15. Evolution journalière de la teneur en eau à -12 cm de profondeur dans le cas d'un sol recouvert par du jute filé d'ouv 1 obtenue par combinaison linéaire des résultats des versions SiSPAT et SiSPAT_mulch avant et après diminution du paramètre de rugosité et comparaison avec les données expérimentales

L'analyse des températures simulées dans le cas du sol nu (système SA) comme dans le cas d'un sol recouvert par un géotextile montre que les cycles nycthéméraux sont bien reproduits : voir exemple Figure 5.16. L'écart entre les deux courbes qui est de l'ordre de 0,5°C pourrait être dû à l'approximation faite sur la relation $\lambda^*(\theta)$ au moment de la paramétrisation du modèle.

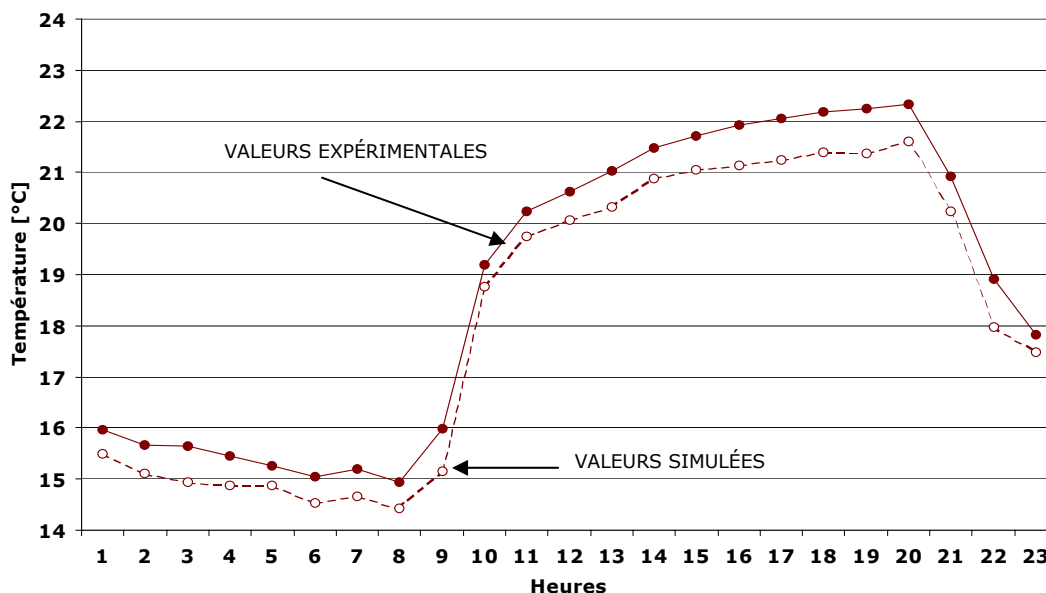


Figure 5.16. Variations nycthémérales de la température du sol simulée à -8.5 cm de profondeur et comparaison avec les données expérimentales

Par contre, l'allure des profils des températures simulés est en désaccord avec les résultats des mesures : voir exemple Figure 5.17. Les valeurs simulées montrent une continuité du profil des températures dans le sol. Ainsi, contrairement à ce qui a été observé, on constate une absence de variations brusques lorsqu'un déséquilibre apparaît entre le sol et l'atmosphère à chaque changement de consigne de la chambre climatisée : en phase de réchauffement comme de refroidissement.

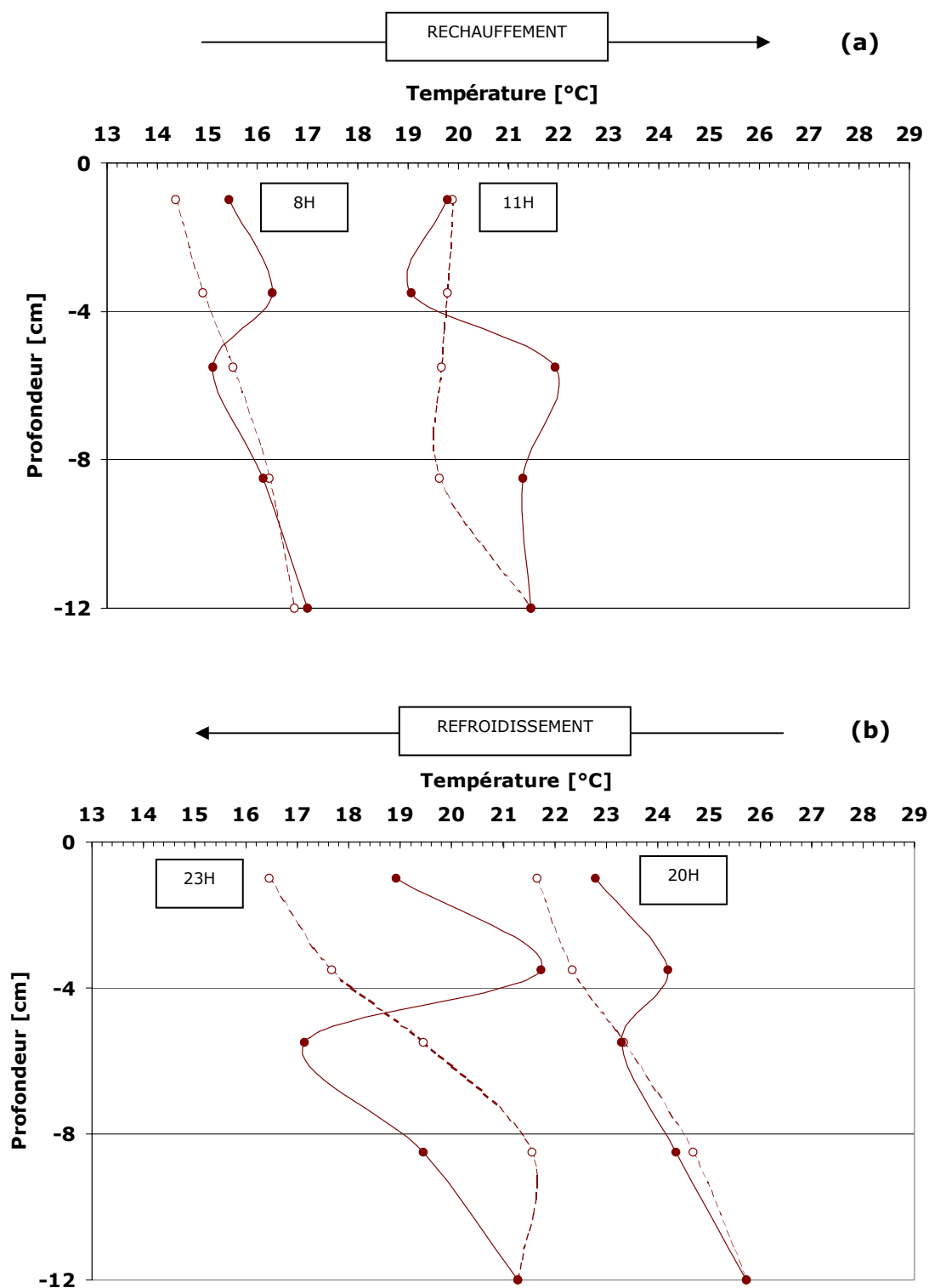


Figure 5.17. Profils des températures moyennes simulées dans le sol nu en phase de réchauffement (a) et de refroidissement (b), 1h avant et 2h après le changement de consigne et comparaison avec les données expérimentales

5.3.4 BILAN CRITIQUE

Les simulations numériques que nous avons réalisées montrent que l'outil numérique utilisé (les versions Sispat et Sispat_mulch) rend effectivement bien compte des évolutions temporelles de la teneur en eau dans les différents systèmes que nous avons pu tester. Conceptuellement, le modèle physique de transfert d'eau qu'il contient semble donc approprié même si nous avons été conduit à ajuster des paramètres aussi prépondérants que la conductivité hydraulique à saturation. Pour les profils de température par contre, il n'a pas été possible de reproduire le « comportement en zones » que nous avons observé expérimentalement.

Pour expliquer ce désaccord, on peut avancer une hypothèse :

Dans des milieux semi-transparentes et/ou peu denses, le transfert convectif peut jouer un rôle significatif qui n'est pas pris en compte dans l'outil numérique. Ce problème pourrait être accentué par un effet d'aspiration lié à la ventilation mécanique intense.

Nous aurions pu faire évoluer l'outil numérique utilisé pour qu'il rende mieux compte de nos expériences mais cela nous aurait emmené trop loin. Néanmoins, dans ses versions actuelles, cet outil donne des résultats suffisamment réalistes pour que l'on puisse envisager de l'utiliser pour évaluer les performances des produits de recouvrement tels que les géotextiles.

CHAPITRE 6

ARTICLE

« EFFETS DES GÉOTEXTILES SUR L'INSTALLATION DE LA VÉGÉTATION HERBACÉE SEMÉE »

6.1 Introduction

La pose d'un géotextile sur le sol améliore l'installation d'une végétation herbacée semée en agissant notamment sur les conditions de l'environnement proche des semences et des plantules.

Ce chapitre sous la forme d'un article est consacré à la présentation d'une expérimentation conduite afin de préciser l'effet des géotextiles sur l'installation d'une graminée pérenne : *Dactylis glomerata* var. *glomerata*. L'étude a été limitée à la phase de la germination des semences et du début de la croissance des plantules (35 jours après le semis) et a été réalisée en conditions contrôlées sous trois régimes climatiques différents : optimal, stress hydrique et stress thermique. On a plus précisément testé par une approche de type statistique (plan expérimental en bloc), l'effet de la nature, du mode de fabrication et de l'ouverture des géotextiles sur les descripteurs de l'installation de *Dactylis glomerata* var. *glomerata*.

6.2 Effet des géotextiles sur l'installation de la végétation herbacée semée

Manuscrit soumis à «Ecological Engineering» et assigné Réf. : 2003-023

Magnin V., Bedécarrats A., Laurent J.P.

Cemagref Grenoble

Unité de recherche Ecosystèmes et Paysages Montagnards –

2, rue de la papeterie – BP 76 – 38402 St-Martin-d'Hères - FRANCE

Laboratoire d'étude des Transferts en hydrologie et environnement (LTHE)

BP53 - 38041 Grenoble-Cedex 9 - FRANCE

6.2.1 RESUME

Une expérimentation a été conduite afin de préciser les caractéristiques de l'effet de géotextiles sur l'installation d'une graminée pérenne - *Dactylis glomerata* var. *glomerata* - en fonction de trois conditions climatiques : optimales, stress hydrique et stress thermique. Un plan d'expérience en bloc a été utilisé dans les trois cas : 3 types homogènes (polypropylène [P], jute filée [HS], jute tressée [HP]) et 2 types mixtes (jute filée / polypropylène [HP/P] et jute tressée / polypropylène [HS/P]) combinés avec 3 ouvertures de maille : 1 cm², 1,5 cm² et 2 cm² ont été testés. Chaque traitement a été répété 4 fois sur 50 individus occupant une surface de 84 cm². Des analyses de la variance ont permis de comparer des critères relatifs à la germination des semences, à la croissance et à l'occupation de l'espace par les plantules 35 jours après le semis. Les résultats montrent que les fibres synthétiques sont particulièrement efficaces en condition de stress thermique et les fibres naturelles ont un effet positif en condition de stress hydrique. Les géotextiles mixtes cumulent les effets positifs des fibres synthétiques et naturelles. Le mode de fabrication du géotextile naturel influe aussi sur sa performance.

Mots clés : Geotextile ; *Dactylis glomerata* ; Stresss thermique ; Stress hydrique ; Germination ; Croissance ; « safe-site » ; érosion

6.2.2 INTRODUCTION

Les géotextiles sont des tapis tissés et ajourés dont les brins sont des produits de synthèse – Polypropylène, Polyéthylène, Nylon – ou des fibres végétales issues principalement du jute (*Corchorus olitorius* et *Corchorus capsularis*) et du coco (*Cocos nucifera*). La nature et le mode de fabrication (tressage ou filage et la taille des mailles) permettent de distinguer les géotextiles. Ils sont souvent utilisés pour stabiliser les substrats en vue de leur engazonnement sur des pentes dont l'inclinaison varie entre 15° et 25° parce qu'ils présentent une bonne résistance à la traction [(Rickson, 1987,88,92b,95) et (Sutherland, 96,97)].

De plus, la hauteur de la canopée végétale, la masse sèche par unité de surface, les biomasses de l'appareil aérien et des racines de la végétation semée sont accrues en présence d'un géotextile. [i.e. (Israelsen et Urroz, 1992 b), (Dinger et al., 1995), (Rickson, 1995), (Urroz et Israelsen, 1995), (Mapa, 1996) et (Sutherland et al., 1998 a,b)].

Or, le comportement de la végétation pendant la phase critique de la germination des semences et du début de la croissance des plantules détermine souvent la réussite

ou l'échec de la végétalisation, particulièrement lorsque les contraintes thermiques et hydriques sont fortes.

C'est pourquoi il importe de savoir si la présence d'un tapis tissé améliore l'installation de la végétation pendant le laps de temps qui s'écoule entre le semis et la levée des plantes, et de déterminer de quelle façon le type de géotextile utilisé affecte les performances des végétaux.

Nous nous proposons d'approfondir cette question par un travail expérimental.

Il s'agit plus précisément de savoir :

- Quels sont les effets d'un stress hydrique et d'un stress climatique sur la levée des semences en l'absence d'un géotextile ?
- Quel est l'effet de la présence d'un géotextile sur la levée des semences ?
- Comment la nature et le mode de fabrication du géotextile peut influencer sur les caractéristiques de la levée de la végétation ?

On a réalisé dans cet objectif une série d'expérimentations en condition de stress thermique, hydrique et en condition climatique optimale afin d'évaluer l'effet des géotextiles sur la germination et la croissance initiale de *Dactylis glomerata* var. *glomerata*.

6.2.3 MATERIEL ET METHODES

6.2.3.1 La conception de l'expérimentation

6.2.3.1.1 Le matériel végétal

Nous avons utilisé la variété «prairial» de *Dactylis glomerata* var. *glomerata*. C'est une graminée vivace qui est couramment utilisée pour l'engazonnement sous des climats tempérés et montagnards européens parce qu'elle peut se développer sur un sol pauvre, tolère une basse luminosité ainsi que la sécheresse, la chaleur et le froid (Duke, 1978). La variété de dactyle choisie possède en outre des caryopses non dormants de taille suffisante pour un comptage visuel et un limbe foliaire large et long qui facilite la réalisation de mesures de surface.

6.2.3.1.2 Les traitements

On a choisi une fibre synthétique, le polypropylène (P) et une fibre végétale naturelle le jute (H), parce qu'elles sont largement utilisées pour la fabrication des géotextiles destinés au marché de la lutte contre l'érosion superficielle des sols.

Alors que les fibres synthétiques sont uniquement tressées, les fibres naturelles peuvent être soit filées (HS) soit tressée (HP).

A partir de ces deux sortes de fibres et en combinant les deux modes de fabrication (tressage ou filage) cinq types de géotextiles ont été utilisés en laboratoire : en polypropylène (P), en jute tressée (HP), en jute filée (HS) et les deux mélanges suivants : moitié polypropylène, moitié jute filée (HS/P) et moitié polypropylène, moitié jute tressée (HP/P) (Figure 6.1)

Pour chaque type de géotextile, on a tissé trois tapis qui diffèrent par la dimension des mailles. On a retenu les trois tailles les plus communes : 1, 1,5 et 2 cm² que l'on a respectivement nommées open 1, 2 et 3 ou bien ouv 1, 2 et 3.

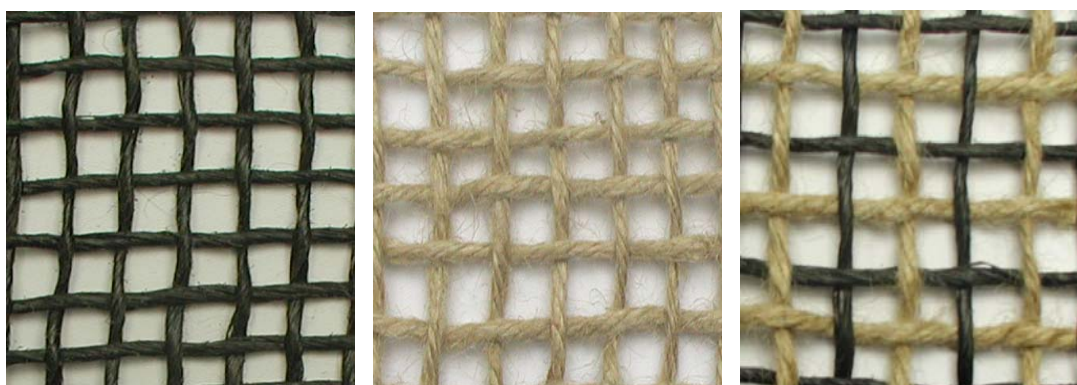


Figure 6.1. Géotextiles en polypropylène, en jute et de composition mixte d'open 1 de gauche à droite respectivement

Ainsi, le facteur géotextile présente 15 combinaisons dans cette expérimentation [(5 niveaux pour le type) x (3 niveaux pour la taille de la maille)].

6.2.3.1.3 La mise en œuvre de l'expérience

Le dimensionnement de la parcelle

La surface de la parcelle unitaire est de 84 cm².

Elle prend en compte l'échelle spatiale à laquelle les traitements (ou facteurs étudiés) agissent. Les effets attendus se situent à l'échelle du centimètre parce qu'ils affectent le micro environnement des semences et des plantules.

Cette surface est suffisamment petite pour limiter la variabilité liée à l'hétérogénéité des conditions du milieu. Elle est néanmoins suffisante pour prendre en compte l'hétérogénéité du tapis tissé à l'échelle de la maille. Elle contient un échantillon représentatif de la population de Dactyle. Ainsi 50 graines distantes les unes des autres

de 1 cm ont été semées sur chaque parcelle. La largeur de la parcelle correspond à celle de quatre mailles du géotextile le plus ouvert (type open 3).

Les répétitions

Pour des raisons pratiques, les 4 répétitions qui reçoivent le même niveau de traitement géotextile (Type et Taille de la maille), ont été regroupées dans le même bac. Chaque bac couvre ainsi une surface totale de 336 cm². Les bacs sont découpés en quatre avec des compartiments amovibles de façon à éviter les transferts latéraux entre les parcelles unitaires : voir Figure 6.2. L'absence de biais lié à l'emplacement de la parcelle dans le bac (bord, versus, centre) a été vérifié.

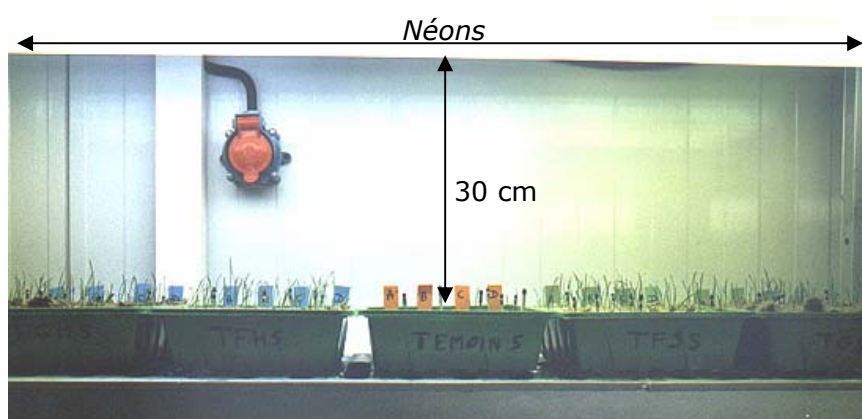


Figure 6.2. Exemple de barquettes expérimentales compartimentées en quatre parcelles unitaires

Une expérimentation pour un régime climatique comprend 17 bacs (2 témoins sans géotextile et 15 bacs correspondant aux différents niveaux des traitements).

Ces bacs ont été remplis sur 5 cm de hauteur avec un sable limoneux sableux (voir §4.3.1) dont la granulométrie assez homogène (les diamètres apparents des particules sont tous inférieurs à 500 µm avec un pic entre 100 et 200 µm) permet de considérer que toutes les graines semées sont exposées à des conditions de sol identiques. Chaque traitement est affecté de façon aléatoire à l'un des 17 bacs. Le Tableau 6.1 présente de manière synthétique le plan expérimental.

6.2.3.2 Les régimes climatiques

L'expérimentation a été reproduite trois fois, c'est à dire une fois par régime climatique. Les régimes ont été simulés de la façon suivante en chambre climatisée où l'éclairage, la température et l'humidité relative de l'air sont contrôlés :

- Pour le régime qui détermine des conditions de végétation optimale : températures 15°C «nuit»/25°C «jour» , absence de stress hydrique
- Pour le régime climatique froid : températures 4°C «nuit»/10°C «jour», absence de stress hydrique
- Pour le régime climatique qui simule un stress hydrique : températures 15°C «nuit»/25°C «jour», présence de stress hydrique

En condition de stress hydrique, les bacs étaient juste ressaturés par le fond pendant 10 minutes tous les trois jours. Ce cycle de réhumectation a été choisi après plusieurs essais et permet de maintenir *Dactylis glomerata* var. *glomerata* à la limite de sa tolérance au stress hydrique.

En l'absence de stress hydrique, tous les bacs avaient leur fond en contact permanent avec une fine lame d'eau.

Les expériences ont été menées de front pour les deux traitements avec l'alternance des températures 15°C «nuit»/25°C «jour». Le traitement à 4°C «nuit»/10°C «jour» a été réalisé séparément puisqu'il nécessite un paramétrage différent de la chambre climatisée.

Tout au long des expériences d'une durée de 35 jours chacune, les différentes populations de dactyle ont été exposées à une photopériode de 12h toutes les 24h. L'éclairage des bacs de culture a été réalisé au moyen de 5 tubes fluorescents (3 tubes LUMILUX PLUS «Lumière du jour» et 2 tubes LUMILUX PLUS «Blanc chaud») disposés à 30 cm au-dessus des bacs : voir Figure 6.2. Chacun de ces tubes délivre une puissance de 36 watts dont 25% sont transformés en lumière. Les bacs ont ainsi été exposés à environ 45 watts de puissance lumineuse durant le «jour». L'humidité relative de l'atmosphère a été réglée pour atteindre en moyenne 70% au milieu de la photopériode.

6.2.3.3 Les descripteurs de l'installation de la végétation

L'installation d'une population de semences correspond à la phase de leur germination et au début de la phase de croissance des plantules. La germination «vraie» est une notion pertinente à l'échelle de l'organisme. Elle correspond en effet à la reprise des processus physiologiques qui déterminent le «réveil» de l'embryon végétal et le début de la croissance correspond à l'allongement des cellules des organes embryonnaires.

Dans des analyses démographiques non destructives on n'a pas accès à ces phénomènes. On constate simplement que la germination a eu lieu lorsqu'on observe

l'émergence de la plantule à l'œil nu. A partir de comptages quotidiens de ces émergences de plantules, on construit une courbe caractéristique de germination pour chaque population (Figure 6.3).

Nous avons retenu trois critères pour décrire le comportement germinatif d'une population de semences (Côme, 1970) à partir de la courbe caractéristique de germination :

- Nous définissons la performance germinative de la population comme le pourcentage de graines semées pour lesquelles on a constaté une germination au bout de 35 jours. Nous l'appelons %G [%]
- Nous définissons le temps de latence à la germination comme le temps qui s'écoule entre le semis et la germination des 10% de l'effectif des semences aptes à germer. Le seuil des 10% est un choix arbitraire. On considère qu'il représente le temps minimal nécessaire à la germination des graines les plus adaptées aux conditions de l'expérience. Nous l'appelons TG [jour]
- Nous définissons la vitesse de germination comme la pente moyenne de la partie de la courbe de germination bornée par les déciles inférieur et supérieur. Ce critère est représentatif de l'étalement de la germination des graines dans la population. Nous l'appelons VG [nombre de graines germées / jour]

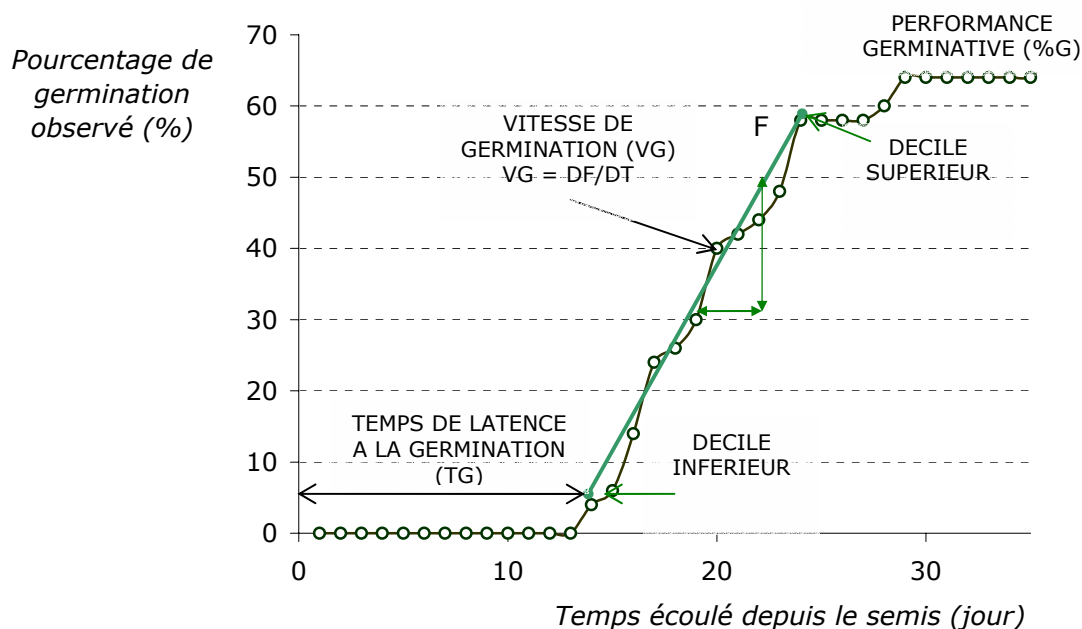


Figure 6.3. Courbe caractéristique de la germination (-o-) et paramètres de la germination

Par analogie nous avons défini deux critères démographiques de la croissance des plantules à partir de la courbe de passage au stade 2 feuilles dans la population des plantules (Figure 6.4).

Il s'agit :

- Du temps écoulé depuis le semis jusqu'à l'apparition de la deuxième feuille pour 10% de l'effectif des plantules. Nous l'appelons TL_1 [jour]
- De la vitesse moyenne de passage au stade 2 feuilles. Il s'agit de la pente moyenne de la partie de la courbe de passage bornée par le décile inférieur. Ce critère est représentatif de l'étalement de la croissance dans la population. Nous l'appelons VL_2 [nombre de plantules à 2 feuilles / jour]

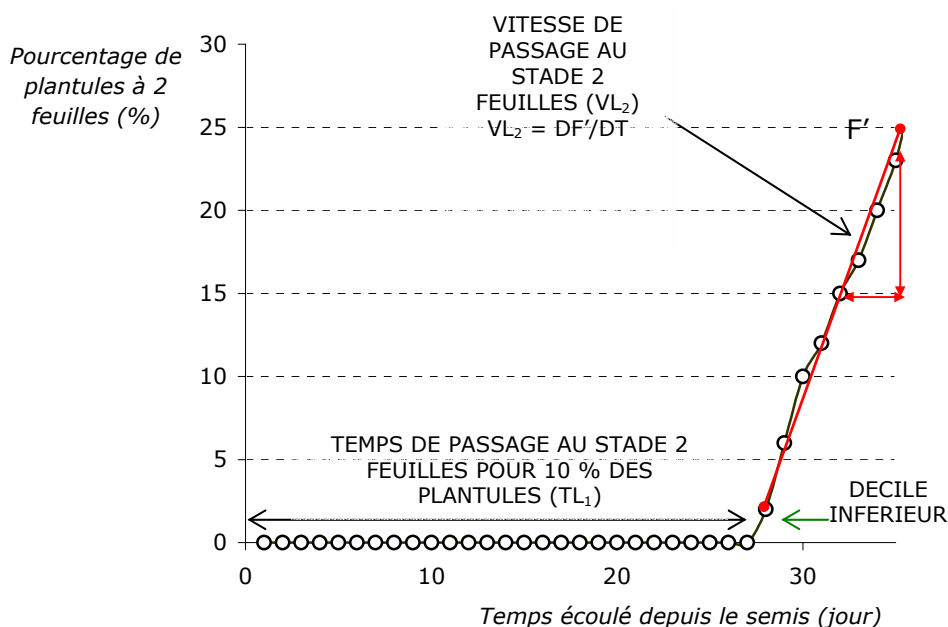


Figure 6.4. Paramètres descriptifs de la courbe de passage au stade 2 feuilles (-o-)

Enfin, deux critères rendent compte de l'occupation de l'espace aérien et souterrain par la végétation au bout de 35 jours. Il s'agit des surfaces foliaire (Fe) et racinaire (Re) estimées pour chaque parcelle élémentaire en mm^2 . A cet effet, sur chaque parcelle, des mesures précises ont été effectuées sur 20 plantules sélectionnées aléatoirement dans la population. Les valeurs obtenues ont été divisées par 20 et multipliées par la moitié de la valeur de performance germinative de la population de la parcelle.

6.2.3.4 *Le recueil des données*

Les comptages ont été réalisés quotidiennement et à la même heure pendant la durée de chaque expérimentation. Ils ont permis de collecter les données nécessaires à la mesure des critères de germination et des critères morphologiques de la levée.

Au terme des 35 jours, 20 plantules ont été récoltées aléatoirement dans chaque parcelle élémentaire. Leurs racines ont été rapidement colorées avec de l'encre de chine noire. Les parties aériennes des plantules ont immédiatement été immergées une demi-heure dans de l'eau afin de les rendre turgescentes puis elles ont été rapidement essuyées. Les appareils racinaire et aérien ont été inclus dans de la colle liquide sur des supports transparents. L'ensemble a été numérisé et traité avec le logiciel Imaq afin de calculer les surfaces foliaire et racinaire.

6.2.3.5 *L'analyse statistique*

Les données ont été traitées avec le module ANOVA sous STATISTICA. On a utilisé le test de Fisher et les moyennes ont été comparées deux à deux avec le test de Tuckey. Le logiciel utilisé pour réaliser ces analyses est STATISTICA version 6.0.

6.2.4 RESULTATS

La robustesse des analyses de la variance est garantie si les résidus sont dispersés de façon homogène. On a constaté qu'aucun résidu normalisé ne sort de l'intervalle $[-0,6; +0,6]$ quel que soit le paramètre considéré et quel que soit la contrainte climatique. Les graphiques représentant les observations en fonction des résidus n'accusent en outre aucun régularité évidente dans la suite des valeurs des résidus. On n'observe pas non plus d'hétéroscédasticité dans la dispersion des résidus et cette dispersion est très similaire d'un géotextile à l'autre.

Pour faciliter la lecture de cette partie, on a regroupé dans un Tableau Annexe 8 §8.1, la définition des différents paramètres. On peut aussi si on le souhaite consulter §8.2, un Tableau récapitulatif des moyennes et écarts-types des paramètres mesurés sur les différentes populations de Dactyle.

6.2.4.1 *L'effet du climat sur l'installation de la végétation en l'absence de géotextile*

Les résultats de l'analyse de la variance réalisée sur les données des parcelles témoins montre qu'il y a un effet climat sur tous les paramètres (Tableau 6.2).

L'analyse de la matrice des corrélations révèle des relations significatives (Tableau 6.3) qui permettent d'identifier une structure démographique en relation avec les performances d'installation du semis :

- Un premier ensemble regroupe les paramètres fortement corrélés qui rendent compte de la vitalité de la population. Il s'agit de la performance germinative (%G), de la capacité à occuper l'espace au bout de 35 jours (Re et Fe) ainsi que de l'étalement dans le temps de la germination et du passage au stade 2 feuilles (VG et VL₂).
- Un deuxième ensemble indépendant du premier regroupe les paramètres de type seuil qui sont fortement corrélés. Il s'agit du temps nécessaire à la germination (TG) et au passage au stade 2 feuilles (TL₁) pour les 10% des individus les plus performants de la population.

Les deux ensembles de paramètres se comportent de façon différente sous l'effet des contraintes climatiques (Tableau 6.4) et la réponse de la végétation semée en cours d'installation est différente selon le type de stress imposé (Tableau 6.4c) :

- Le stress thermique affecte particulièrement le comportement germinatif et la croissance des individus les plus performants parce qu'il rallonge de façon importante la valeur des paramètres de seuil TG et TL₁ (Figure 6.5a, 6.6a et Tableau 6.4a).

En effet, à l'optimum climatique TG₁₅₋₂₅=8 jours, TL₁₁₅₋₂₅=14, 5 jours ; par contre, en condition de stress thermique, TG₄₋₁₀=14 jours et TL₁₄₋₁₀=32,5 jours.

Par comparaison, en condition de stress hydrique, TGS₁₅₋₂₅=11 jours et le TL_{1S15-25}=10,5 jours

- Le stress hydrique affecte fortement les paramètres d'étalement et de vitalité : VG, VL₁, %G, Fe et Re (Figures 6.5b,c ; Figures 6.6b,c,d et Tableau 6.4).

Ainsi, à l'optimum climatique VG₁₅₋₂₅= 4,4 graines/jour ; %G₁₅₋₂₅ = 47,5 % ; VL₂₁₅₋₂₅= 1,61 plantules /jour ; Fe₁₅₋₂₅=2118 mm² et Re₁₅₋₂₅ = 1541 mm².

En condition de stress hydrique la valeur de ces paramètres chute approximativement d'un facteur 10 :

La performance germinative des graines est très fortement réduite %GS₁₅₋₂₅=5,65%, la germination est très étalée dans le temps VGS₁₅₋₂₅=0,31 graine/jour, il n'y a pas d'apparition de 2nd feuille pour 90% de la population des plantules, VL_{2S15-25}=0. La surface foliaire FeS₁₅₋₂₅=158 mm² et la surface racinaire ReS₁₅₋₂₅=237 mm² sont très faibles.

Par comparaison, en condition de stress thermique, la valeur de ces paramètres varie peu. $VG_{4-10}=2,78$ graines/jour, $\%G_{4-10}= 54,2\%$, $VL_{24-10}=1,40$ plantule / jour, $Fe_{4-10}=960$ mm² , et Re_{4-10} non significativement différente avec Re_{15-25} à l'optimum climatique.

Ces résultats montrent que la ressource hydrique a un impact beaucoup plus important que les conditions de température sur l'installation d'une population de Dactyle.

6.2.4.2 L'effet d'un géotextile sur l'installation de la végétation¹³

17 paramètres sur 21 sont significativement sensibles à l'effet « géotextile » (Tableau 6.5). Les réponses non significatives concernent 3 paramètres à l'optimum climatique (VG_{15-25} , $\%G_{15-25}$ et VL_{215-25}) et 1 paramètre en condition de stress hydrique (TL_1S_{15-25}) .

Le contrôle de l'effet « géotextile » qui comprend 8 modalités (témoins sans géotextile, géotextiles en polypropylène (P), en jute tressée (HP), en jute filée (HS) et les deux mélanges suivants : moitié polypropylène, moitié jute Filée (HS/P) et moitié polypropylène, moitié jute tressée (HP/P)) permet de mettre en évidence les points suivants :

Il ressort des comparaisons des moyennes 2 à 2 trois informations importantes.

6.2.4.2.1 La présence d'un couvert améliore l'installation de la végétation soumise à des stress (Tableau 6.6)

Lorsqu'on compare l'ensemble des parcelles recouvertes par un géotextile (quelque soit le géotextile) aux parcelles témoins, on constate que l'effet « couvert » (Figure 6.5a) raccourcit significativement le temps de latence à la germination en condition de stress hydrique (11 jours sans couverture, 6 jours avec couverture) et à l'optimum climatique (différence de 1,5 jour).

La présence d'un couvert en géotextile diminue aussi la vitesse de passage au stade 2 feuilles des plantules en condition de stress thermique (témoins : 1,4 plantules / jours, avec une couverture en géotextile : 2,3 plantules / jour) et de stress hydrique (témoins : 0 plantules / jour ; avec une couverture en géotextile : 0,58 plantule /jour).

¹³ On peut trouver Annexe 8 §8.3, les résultats de l'analyse de la variance à deux facteurs réalisée sur les données collectées en l'absence des témoins

L'effet couverture augmente significativement l'occupation de l'espace par la végétation (Re et Fe) en condition de stress thermique (surface foliaire multipliée par 1,5 ; surface racinaire multipliée par 2,5) et très significativement en condition de stress hydrique (surface foliaire multipliée par 10,5 ; surface racinaire multipliée par 10,9).

De plus, la surface racinaire de la végétation sous couvert dans les conditions de stress est supérieure à la surface racinaire de la végétation non couverte à l'optimum climatique.

6.2.4.2.2 Les propriétés des géotextiles sont différentes en fonction de la nature des fibres (synthétique ou/et naturelle) qui les composent (Tableau 6.7)

L'effet du polypropylène est particulièrement favorable à la végétation semée en condition de stress thermique (Tableau 6.7a) :

En effet, 6 paramètres sur 7 ont des moyennes significativement différentes du lot des témoins : les paramètres de seuil TG et TL₁ particulièrement sensibles au stress thermique (plus courts en moyenne de 2,5 jours et 4 jours respectivement), et trois paramètres de vitalité : VG, VL₂, Fe et Re (supérieures d'un facteur 1.5 en moyenne) (Tableau 6.7a, Figure 6.5a, 6.6abc,d).

Par contre, le polypropylène est moins efficace en condition de stress hydrique. En effet, seuls les paramètres TG, VL₂, Fe et Re sont affectés.

La fibre de jute améliore plutôt l'installation de la végétation soumise à un stress hydrique (Tableau 6.7c) :

En effet, 6 paramètres sur 7 ont des moyennes significativement différentes du lot des témoins. Il s'agit du temps de latence à la germination (5,5 jours plus court en moyenne pour le type HS), des paramètres d'étalement VG et VL₂ (au moins 6 fois plus élevées) et de vitalité %G (plus élevé d'un facteur 5,5 en moyenne pour le type HS), Fe et Re (plus élevées d'un facteur 13 en moyenne pour le type HS) (Tableau 6.7c, Figures 6.5a,b,c et 6.6b,c,d).

Par contre, en condition de stress thermique, la jute est moins efficace. En effet, les deux paramètres de seuil ne sont pas significativement sensibles à son effet. Les géotextiles en polypropylène (P) réduisent TG et TL₁ respectivement de 2,5 et 4 jours en moyenne par rapport aux témoins contre respectivement 1 et 2 jours pour les géotextiles en jute de type (HS) (Figures 6.5a et 6.6a).

Notons cependant qu'en condition de stress thermique les géotextiles en jute de type HS augmentent en particulier la surface racinaire d'un facteur 1,8 par rapport aux géotextiles en polypropylène P (Tableau 6.8a et Figure 6.7d)

Les géotextiles de composition mixte conjuguent les propriétés de la jute et du polypropylène (Tableau 6.7b) :

Ils sont ainsi efficace aussi bien en condition de stress hydrique que thermique.

En outre, HS/P montre deux particularismes :

- Un pourcentage de germination supérieur à HS et P (en moyenne : 67,3% pour HS, 62,6% pour P contre 71,8% pour HS/P) en condition de stress thermique (Tableau 6.8b et Figure 6.6c)
- Une surface racinaire elle aussi supérieure à HS et P (en moyenne 3473,2 mm² pour HS, 907,3 mm² pour P contre 4105,86 mm² pour HS/P) en condition de stress hydrique (Tableau 6.8b et Figure 6.6d).

6.2.4.2.3 **Le mode de fabrication du jute (filé, HS ou tressé, HP) a un effet sur les propriétés du géotextile. (Tableau 6.9).**

Les géotextiles en jute filé de type HS sont supérieurs aux géotextiles en jute tressé de type HP

Les 8 différences significatives entre HS et HP sont en faveur de HS (Tableau 6.9a). Il s'agit du paramètre de seuil, TL₁ sous stress thermique et des 3 paramètres de vitalité : %G à l'optimum climatique, et Fe et Re pour toute condition climatique.

HS réduit TL₁ de 3 jours en moyenne par rapport à HP en condition de stress thermique.

La performance germinative sous jute filée (HS) est supérieure de 10% par rapport à la performance germinative des populations de graines sous un tapis de jute tressée (HP) à l'optimum climatique.

Les surfaces foliaires des populations sous un tapis de jute filée (HS) sont supérieures à celles des populations sous un tapis de jute tressée (HP) de 90 mm² sous stress thermique, de 815 mm² sous stress hydrique et de 966,1 mm² en moyenne à l'optimum climatique.

D'autre part, les surfaces racinaires des populations sous HS sont supérieures à celles des populations sous HP de 654,4, 1134,8 et 1362,1 mm² en moyenne en condition de stress thermique, hydrique et à l'optimum climatique respectivement.

Les géotextiles de composition mixte en jute filé HS/P sont majoritairement supérieurs aux géotextiles de composition mixte en jute tressé HP/P

Les différences significatives entre HS/P et HP/P sont au nombre de 7 (Tableau 6.9b). Elles sont pour la plupart en faveur de HS/P sauf deux d'entre elles : la différence entre les surfaces foliaires (Fe) en condition de stress thermique et la différence des temps de latence à la germination (TG) à l'optimum climatique.

En outre, les différences entre les géotextiles mixtes HS/P et HP/P sont les plus nombreuses en condition de stress thermique où 4 paramètres sur 7 sont concernés. Il s'agit des deux paramètres de seuils : TG et TL₁ et des deux paramètres d'occupation de l'espace : Fe et Re.

En condition de stress thermique, TG est plus court sous HS/P de 1 jour en moyenne et TL₁ de 2 jours. Re est plus élevé sous HS/P de 587,3 mm² en moyenne. Par contre, Fe est plus faible sous HS/P de 239 mm² en moyenne.

Seule la surface racinaire (Re) accuse une différence significative entre HS/P et HP/P condition de stress hydrique. Cette différence est très marquée (la différence entre HS/P et HP/P est de 1969 mm² en moyenne).

6.2.4.2.4 L'effet d'interaction « type / taille de la maille »

L'effet d'ouverture entre les bornes 1 et 2 cm² est globalement peu marqué (23 différences significatives sur 105 au total) (Tableau 6.10).

Il affecte en particulier les surfaces racinaires (12 différences significatives sur 23 au total). Plus l'ouverture est faible, plus la surface racinaire est élevée. Cette différence varie de 500 mm² (par exemple HP/P open 1-3 sous stress hydrique) à 1000 mm² en moyenne (par exemple HS open 1-3 sous stress thermique) (Figure 6.6d).

De la même manière pour les autres paramètres, plus l'ouverture est faible, plus le géotextile est performant.

Pour plus de détail sur l'analyse statistique de cet effet d'interaction, on peut consulter en Annexe 8 §8.3, le résultat de l'analyse de la variance à 2 facteurs (nature/ouverture) réalisée sur les données collectées.

La qualité de l'installation des végétaux est déterminante pour la réussite des enherbements, particulièrement sur des sites où les conditions climatiques sont défavorables (faible pluviosité, période végétative courte, fluctuations extrêmes des températures à la surface du sol etc.).

Des études ont déjà mis en évidence l'effet positif des géotextiles sur la productivité végétale [i.e. (Dinger et al., 1995) et (Sutherland, 1998b)]. Cependant, leur effet sur les performances de la germination et du début de la croissance d'un semis n'a pas encore été analysée en détail. L'objectif de notre travail a été de quantifier par une approche expérimentale l'effet des géotextiles sur l'installation de la végétation semée (phase de la germination et du début de la croissance des plantules) exposée à des conditions de stress climatique. On a plus précisément testé en conditions contrôlées l'effet global d'un géotextile ainsi que sa composition et son mode de fabrication, sur les paramètres de la germination et de la croissance de *Dactylis glomerata* var. *glomerata* en fonction des trois régimes climatiques : stress thermique, stress hydrique, optimum climatique. Ces effets ont pu être quantifiés parce que *Dactylis glomerata* var. *glomerata* répond de manière importante aux variations climatiques et microclimatiques.

On a constaté que le stress hydrique a un effet négatif plus important sur l'installation de la végétation que le stress thermique. Ce résultat est cohérent avec le fait que la disponibilité en eau du sol est le principal critère limitant de la production végétale (Gillet, 1980).

Les géotextiles qui constituent un compartiment intermédiaire entre le sol et l'atmosphère ont un impact sur le microclimat à la surface du sol. En effet d'une manière générale, un revêtement posé sur le sol oppose une résistance aux échanges thermiques et hydriques entre les compartiments Sol et Atmosphère (Gonzalez-Sosa, 1999). L'amplitude des températures dans le sol est amortie [i.e. (Gurnah et Mutea, 1982), (Varadan et Rao, 1983), (Hares et Novak, 1992a,b), (Buissière, 1994) et (Sauer et al., 1998)] et l'évaporation du stock d'eau dans le sol est ralentie [i.e. (Unger et Parker, 1976), (Bond et Willis, 1969,70) et (Gonzalez Sosa et al., 1999)]. Ceci a pour effet de tamponner les variations intra et inter journalières des températures et du stock d'eau.

On a clairement montré que cet effet sur le microclimat a des répercussions importantes sur l'installation de la végétation dans des conditions difficiles. En effet la végétation s'installe plus vite et plus densément en condition de stress hydrique et thermique en présence d'un géotextile.

Les produits synthétiques (en polypropylène) et naturels (en jute) n'affectent pas de la même manière la germination et la croissance de *Dactylis glomerata var. glomerata*.

Nos résultats montrent que l'effet des géotextiles synthétiques en polypropylène est particulièrement positif sur les descripteurs dont la valeur est déterminée par la vitesse des processus biologiques, c'est à dire le temps nécessaire à la germination (TG) et le temps écoulé depuis le semis jusqu'à l'apparition de la deuxième feuille sur les plantules (TL1).

Un géotextile en polypropylène noir augmente la température du substrat sur lequel il est posé. Il a tendance à capter la chaleur reçue (température de l'air, rayonnement solaire incident et diffus etc.) qu'il transmet ensuite au sol [i.e. (Gurnah et mutea, 1982)] à cause de certaines de ses propriétés physiques dont une conductivité thermique relativement élevée 0,117 W/m/K (Institut Textile Français, 1987) et un albédo faible 0,088 (Sutherland, 1998 b).

Or, la vitesse des processus biologiques est essentiellement déterminée par la température (Gillet, 1980).

En effet, l'optimum de germination varie en fonction du végétal considéré (Côme, 1970) mais il se situe généralement au voisinage de 20°C pour les espèces des milieux tempérés. La température optimale de croissance est un peu plus élevée : elle se situe aux alentours de 25°C (Gillet, 1980).

C'est la raison pour laquelle, en condition de stress thermique, le polypropylène améliore la qualité du site en favorisant l'augmentation de la température à la surface du sol.

En revanche, la présence des géotextiles naturels améliorent de façon importante la vitalité des populations végétales étudiées, c'est à dire la performance germinative (%G) des semences, l'étalement dans le temps de la germination et de la croissance des plantes (VG, VL₂), le volume occupé par les appareils aériens et les racines (Re et Fe) 35 jours après le semis.

La vitalité des populations de Dactyle est particulièrement sensible à la limitation de la ressource en eau (Gillet, 1980).

Or, un géotextile en fibre naturelle posé sur le sol favorise le mieux la conservation du stock d'eau dans le sol par une double action.

Il a tendance d'une part à diminuer la température du sol (conductivité thermique relativement faible autour de 0,05 pour la matière organique sèche (Bonan, 1989) – et un albédo relativement élevé de 0,134 à sec pour la toile de jute (Sutherland, 1998b). Cet effet est positif sur la végétation parce que le taux de couverture au sol et la densité du géotextile est relativement faible. En effet, il a été montré qu'un épais paillis d'herbe coupée a fait chuter la température du sol au détriment de la croissance de jeunes plants de thé clonés ; ce retard dans le développement des plantes n'a pas été rattrapé au terme de la période de végétation (Othieno et Ahn, 1980). Au Queensland en Australie, un délai dans la colonisation racinaire de la culture a aussi été observé sous des résidus de canne à sucre par rapport au témoin qui a été attribué à la baisse des températures moyennes du sol de 2 à 4°C (Prove et Truong, 1988).

D'autre part, les géotextiles naturels sont constitués par des fibres végétales qui sont tissées ou filées pour constituer des brins. D'un point de vue physique, ces brins sont des milieux poreux, constitués d'une matrice solide déformable et d'un espace inter fibre dans lequel peut circuler des fluides comme l'eau et l'air. L'effet des revêtements organique a été précisément mesuré à l'intérieur d'un paillis d'orge (Novak et al. 2000b). Ainsi, la vapeur d'eau se condense dans l'espace inter matriciel (l'espace inter fibres). Cette eau peut être d'origine atmosphérique quand la température de l'air chute (passage de la période « jour » à la période « nuit ») ou il peut s'agir de l'humidité qui provient de la condensation de la vapeur qui durant le « jour » s'évapore depuis le sol. Ceci a pour conséquence que lorsque la demande évaporative de l'atmosphère se manifeste en début de journée, l'eau condensée dans l'espace inter fibres s'évapore en premier. Pendant ce temps, le sol conserve son humidité. L'eau du sol s'évaporerait que plus tard dans la journée lorsque le géotextile s'est asséché. C'est ainsi qu'en condition de stress hydrique, ce type de géotextile préserve davantage le stock d'eau disponible pour les plantes qu'un géotextile synthétique.

A cet égard, la valeur de la porosité (c'est à dire le rapport entre le volume des espaces vides et le volume total des brins) revêt une grande importance. Elle dépend en grande partie du mode de fabrication (tressage ou filage) du produit.

Nos résultats montrent en effet que les géotextiles naturels tressés qui ont une porosité plus faible que les géotextiles filés, ont aussi globalement un effet moindre sur l'installation de *Dactylis glomerata* var. *glomerata*.

Les géotextiles de composition mixte (polypropylène et jute) cumulent les effets positifs de la jute et du polypropylène de sorte que leur efficacité est très large (stress hydrique comme stress thermique). De plus, l'association des fibres de jute et de polypropylène crée une synergie qui optimise la survie des plantules (%G) en condition

de stress thermique et l'occupation du sol par le chevelu racinaire (Re) en condition de stress hydrique.

On n'a pas mis en évidence un effet en fonction des tailles des mailles que nous avons testé. Elles correspondent aux tailles standard du marché qui sont de petite dimension (1 cm², 1.5 cm² et 2 cm²). Pour rechercher la taille optimale de la maille, il faudrait expérimenter sur des parcelles tests de plus grande dimension.

Les géotextiles ont un effet à long terme sur la végétation. Ils améliorent notamment la productivité végétale. L'analyse fine des mécanismes de leur action au-delà du stade critique de l'installation pose des difficultés liées à la complexité des processus du dynamisme végétal. En effet, la végétation issue d'un semis acquiert progressivement une autonomie fonctionnelle. Elle évolue spontanément en fonction des facteurs abiotiques, de l'action des végétaux sur les ressources et sur le climat (Tilman, 1990), du comportement compétitif des espèces semées et des espèces qui colonisent progressivement la communauté (Rameau, 1991).

Les résultats de cette étude sont intéressants du point de vue du praticien de l'ingénierie écologique car ils précisent les critères du choix d'un géotextile pour l'engazonnement en fonction du climat des sites. Il apparaît très nettement que la caractéristique à prendre principalement en compte est la nature (produit synthétique, naturel ou mixte) et s'agissant des géotextiles naturels, de leur mode de fabrication.

6.2.6 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BONAN G.B. « Environmental factors and ecological processes controlling vegetation patterns in boreal forests ». *Landscape Ecology*, 1989, **3**, pp 111-130.
- BONAN G.B. « A computer model of the solar radiation, soil moisture, and soil thermal regimes in boreal forests ». *Ecological modelling*, 1989, **45**, pp 275-306.
- BOND J., Willis W. « Soil water evaporation : surface residue rate and placement effects ». *Soil Science Society of America Journal*, 1969, 33, pp 445-448.
- BOND J., Willis W. « Soil water evaporation : first stage drying as influenced by surface residue and evaporation potential ». *Soil Science Society of America Journal*, 1970, 34, 924-928.
- BUISSIERE F., Cellier P. « Modification of the soil temperature and water content regimes by a crop residue mulch : experiment and modelling ». *Agricultural and Forest Meteorology*, 1994, 68, pp 1-28.
- CÔME D. « Les obstacles à la germination ». Collection Monographie de physiologie végétale, Paris, Masson et Cie, 1970, 162 p.

- DINGER F., Crosaz Y., Niel J.F. « Protection de Talus et Fossés de forte pente par toile de jute avant végétalisation ». *Geotextiles-géomembranes rencontres 95* (Session Lutte contre l'érosion), 1995, pp 43-49.
- DUKE J.A. « The quest for tolerant germplasm ». ASA Special Symposium 32, Crop tolerance to suboptimal land conditions. Am. Soc. Agron. Madison, 1978, pp1-61.
- GILLET M. « Les Graminées Fourragères : Description, fonctionnement, applications à la culture de l'herbe ». Paris, Bordas, 1980, p 299.
- GONZALEZ-SOSA E., Braud I., Thony J., Vauclin M., Bessemoulin P. et J.C., 1999a. « Modelling Heat and water exchanges of fallow land covered with plant-residue mulch ». *Agricultural and Forest Meteorology*, 97, 151-169.
- GURNAH A. et Mutea J., 1982. « Effects of mulches on soil temperature under arabica coffee at Kabete, Kenya ». *Agricultural Meteorology*, 25, 237-244.
- HARES M. et Novak M., 1992a. « Simulation of surface energy balance and soil temperature under strip tillage I. Model description ». *Soil Science of America Journal*, 56, 22-29.
- HARES M. et Novak M., 1992b. « Simulation of surface energy balance and soil temperature under strip tillage II. Field test ». *Soil Science of America Journal*, 56, 29-36.
- HARPER J.L. « Population Biology of Plants ». Oxford (Grande Bretagne), Academic Press, 1977, 892p.
- INSTITUT TEXTILE FRANCAIS. « Characteristics of fibres ». Editions de l'industrie textile, Spirale S.A. (Paris), 1987.
- ISRAELSEN C.E. et Urroz G, 1992 b. « Product Performance Testing Under Simulated Rain and Sunlight (A supplemental Study) – American Excelsior Compagny » Utah Water Research Laboratory, Utah State University, Logan, UT.
- MAPA R., 1996. « Variability of soil properties in a tropical Alfisol used for shifting cultivation ». *Soil Technology*, 9, 187-197.
- NOVAK M., Chen W., Orchansky A. et Kelter R. , 2000b. « Turbulent exchange processes within and above a straw mulch. Part II : Thermal and moisture regimes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 102, 155-171.
- OTHIENO C.O., Ahn P.M. « Effects of soil temperature and growth of tea plants in Kenya ». *Exper. Agric.*, 1980, **16**, pp 287-94.
- PROVE B.G., Truong P.N.V. « Research into soil erosion control practices on sugarcane lands in Queensland (Australia) ». Dans *Land Conservation for Future generations*, S.Rimwanich, 1988 , Department of land development, Ministry of Agriculture and Cooperatives, Bangkok, Thailand, pp 669-680

- RAMEAU C., Gouyon P.-H. « Resource allocation to growth, reproduction and survival in *Gladiolus* : the cost of male function ». *Journal of Evolutionary Biology*, 1991, **4**, pp 291-307
- RICKSON R.J., 1987. « Geotextile applications in steepland agriculture ». *Steepland Agriculture in the Humid Tropics*, Eds T.H. Tay, A.M. Mocktaruddin and A.B. Zahari. MARDI press, Ministry of Agriculture, Selangor, Malaysia, 352-76.
- RICKSON R.J., 1988. « The use of geotextiles in soil erosion control : comparison of performance on two soils ». *Land Conservation for future generations*, Ed. S. Rimwanich. Department of Land development, Ministry of Agriculture and Cooperatives, Bangkok, Thailand, 961-70.
- RICKSON R.J., 1992b. « Control of sediment production using geotextiles : Results of experimental testing using simulated rainfall and runoff ». *Environment is Our Future*. Proceedings of the XXIII IECA Annual Conference, Reno, Nevada. International Erosion control Assocn, steamboat Springs, CO, 353p.
- RICKSON R.J. « Simulated vegetation and geotextiles ». Dans : *Slope stabilization and Erosion Control – A Bioengineering approach*, Morgan R.P.C. et Rickson R.J., E&FN SPON, 1995, pp 95-125.
- SAUER T., Hatfield J., Prueger J. et Norman J., 1998. « Surface energy balance of a corn residue-covered field. » *Agricultural and Forest Meteorology*, 89, 155-168.
- SUTHERLAND R.A. et Ziegler, A.D. 1996. « Geotextile effectiveness in reducing interrill runoff and sediment flux », *Erosion Control Technology : bringing it home*, Proceeding of Conference XXVII, International Erosion Control Association, 27 février-1mars, Seattle, WA, 393-405.
- SUTHERLAND R.A. et Ziegler, A.D. 1997. « A field examination of rolled erosion control systems and their influence on runoff and sediment transport », *Working in Harmony*, Proceedings of Conference XXVIII, International Erosion Control Association, 25-28 février, Nashville, TN, 301-315.
- SUTHERLAND R.A., Ziegler, A.D. et Tran L.T., 1997. *Rolled erosion control systems and their effect on sediment redistribution by rainsplash : a laboratory investigation* », *Working in Harmony*, Proceedings of Conference XXVIII, International Erosion Control Association, 25-28 février, Nashville, TN, 427-443.
- SUTHERLAND R.A., Menart T. et Perry J.L. 1998a. « The influence of rolled erosion control systems on soil moisture content and biomass production : Part II. A Greenhouse experiment », *Land Degradation and development*, 9, 217-231.
- SUTHERLAND R.A., Menart T., Perry J.L. et Penn D. 1998b. « The influence of rolled erosion control systems on soil temperature and surface albedo : Part I. A Greenhouse experiment ». *Land Degradation and development*, 9, 159-178.

- TILMAN D. « Constraints and tradeoffs: toward a predictive theory of competition and succession », *Oikos*, 1990, **58**, pp 3-15.
- UNGER P. et Parcker J., 1976. « Evaporation reduction from soil with wheat, sorghum and cotton residue ». *Soil Science Society of America journal*, 40, p. 938
- URROZ G.E. et Israelsen C.E., 1995. « Effectiveness of Selected Erosion Control Materials Under Simulated Rain and Sunlight ». Utah Water Research Laboratory, Utah State University, Logan, UT.
- VARADAN K. et Rao A., 1983. « Effect of mulch on soil temperature in humid tropical latosols under coconut (cocos nucifera linn) and banana (musa paradisiaca) ». *Agricultural Meteorology*, **28**, 375-386.

6.2.7 TABLEAUX ET FIGURES

Tableau 6.1. Plan expérimental avec deux traitements (Type du géotextile , taille de la maille) et une référence à un lot de parcelles unitaires témoins

Traitement:	Traitement :	Nombre de
Nature du géotextile	Taille de la maille	répétitions
Polypropylène (P)	Open1	4
	Open2	4
	Open3	4
Jute spun (HS) = Jute filé	Open1	4
	Open2	4
	Open3	4
Jute plaited (HP) = Jute tressé	Open1	4
	Open2	4
	Open3	4
Composition mixte : Jute filé et polypropylène (HS/P)	Open1	4
	Open2	4
	Open3	4
Composition mixte : Jute tressé et polypropylène (HP/P)	Open1	4
	Open2	4
	Open3	4
Témoin	-	8

Tableau 6.2. Effet du régime climatique (facteur contrôlé) sur les caractéristiques d'installation de la végétation en l'absence de géotextile

Parametres	Degré de liberté Effet	Degré de liberté Erreur	Valeur F	Niveau de significativité
TG	2	21	15.4718	*
%G	2	21	100.6203	*
VG	2	21	44.1989	*
TL1	2	21	28.6253	*
VL2	2	21	35.0678	*
Fe	2	21	172.1841	*
Re	2	21	78.2435	*

* représente les effets significatifs au risque 0.05 et dans le cas contraire on donne la valeur du niveau de significativité

Tableau 6.3. Corrélations entre les paramètres caractéristiques de l'installation de la végétation semée en l'absence de géotextile

Paramètres	TG	VG	%G	TL1	VL2	Fe	Re
TG	1						
VG	-0.02	1					
%G	-0.35	0.80*	1				
TL1	0.68*	0.57	0.21	1			
VL2	-0.13	0.81*	0.80*	0.45	1		
Fe	-0.52	0.73*	0.93*	0.04	0.75*	1	
Re	-0.18	0.97*	0.90*	0.43	0.82*	0.85*	1

* corrélations significatives

Tableau 6.4. Sensibilité des paramètres étudiés au changement de contrainte climatique établie avec le lot des témoins

Paramètres	Comparaison entre les expériences 4°C/10°C avec stress thermique et "optimum climatique"	Comparaison entre les expériences 15°C/25°C avec stress hydrique et "optimum climatique"	Comparaison entre les expériences 4°C/10°C avec stress thermique et 15°C/25°C avec stress hydrique
	(a)	(b)	(c)
TG	**	*	-
%G	-	**	**
VG	**	**	**
TL ₁	**	*	**
VL ₂	-	**	**
Fe	**	**	**
Re	-	**	**

**, * et - représentent les différences significatives entre traitements au risque 0.01, 0.05 et pas de différence significative respectivement.

Tableau 6.5. Effet de la présence d'un géotextile sur les caractéristiques d'installation de la végétation

Paramètres	Degré de liberté Effet	Degré de liberté Erreur	Valeur F	Niveau de significativité
TG ₄₋₁₀	15	52	4.0627	*
VG ₄₋₁₀	15	52	3.1017	*
%G ₄₋₁₀	15	52	3.2126	*
TL ₁₄₋₁₀	15	52	9.1635	*
VL ₂₄₋₁₀	15	52	3.6482	*
TG _{S15-25}	15	52	4.2592	*
VG _{S15-25}	15	52	4.8715	*
%G _{S15-25}	15	52	17.2734	*
TL _{1S15-25}	15	52	1.1211	0.362061
VL _{2S15-25}	15	52	21.5822	*
TG ₁₅₋₂₅	15	52	4.8225	*
VG ₁₅₋₂₅	15	52	0.9328	0.535311
%G ₁₅₋₂₅	15	52	1.2020	0.300124
TL ₁₁₅₋₂₅	15	52	4.2048	*
VL ₂₁₅₋₂₅	15	52	1.1049	0.375460
Fe ₄₋₁₀	15	52	10.4603	*
Fe _{S15-25}	15	52	44.6658	*
Fe ₁₅₋₂₅	15	52	5.0624	*
Re ₄₋₁₀	15	52	51.2799	*
Re _{S15-25}	15	52	822.9901	*
Re ₁₅₋₂₅	15	52	8.3520	*

* représente les effets significatifs au risque 0.05 et dans le cas contraire on a donné la valeur du niveau de significativité

Tableau 6.6. Sensibilité des paramètres à la présence d'un revêtement géotextile (établie par comparaison avec le lot des témoins)

Source de variation	TG	%G	VG	TL ₁	VL ₂	Fe.	Re.
<i>Réponse de la végétation à la présence d'un géotextile quel qu'il soit</i>							
Régime Climat. 4°C/10°C stress therm.	-	-	-	-	*	**	**
Régime Climat. 15°C/25°C stress hydr.	**	-	-	-	*	**	**
Régime climat. Optim. Climat.	**	-	-	-	-	-	*

**, * et - représentent les différences significatives entre le groupe des témoins et des géotextiles au risque 0.01, 0.05 et pas de différence significative respectivement.

Tableau 6.7. Sensibilité des paramètres à la présence des géotextiles en fonction de leur type (établie par comparaison avec les lots des témoins)

Source de variation	TG	VG	%G	TL ₁	VL ₂	Fe.	Re.
<i>Réponse de la végétation à la présence d'un géotextile en polypropylène (P) (a)</i>							
Régime Climat. 4°C/10°C stress therm.	**	**	-	**	*	**	**
Régime Climat. 15°C/25°C stress hydr.	**	-	-	-	*	**	**
Régime Climat. Optim. Climat.	**	-	-	-	-	-	**
<i>Réponse de la végétation à la présence d'un géotextile de composition mixte (HS/P et HP/P) (b)</i>							
Régime Climat. 4°C/10°C stress therm.	**	*	**	*	**	**	**
Régime Climat. 15°C/25°C stress hydr.	**	**	**	-	**	**	**
Régime Climat. Optim. Climat.	**	-	-	**	-	-	*
<i>Réponse de la végétation à la présence d'un géotextile en jute (HS et HP) (c)</i>							
Régime Climat. 4°C/10°C stress therm.	-	-	*	-	**	**	**
Régime Climat. 15°C/25°C stress hydr.	**	**	**	-	**	**	**
Régime Climat. Optim. Climat.	**	-	-	*	-	-	*

**, * et - représentent les différences significatives entre le groupe des témoins et des géotextiles au risque 0.01, 0.05 et pas de différence significative respectivement.

Tableau 6.8. Comparaison des performances des géotextiles en polypropylène (P), en jute filée (HS) et de composition mixte (jute filée et polypropylène ; HS/P) sur les paramètres de la levée des plantules

	TG	VG	%G	TL ₁	VL ₂	Fe	Re
<i>Différences significat. entre le polypropylène (P) et la jute filée (HS) et performance de P par rapport à HS (a)</i>							
Rég. Climat. 4°C/10°C stress therm.	>HS **	-	-	>HS **	<HS *	-	<HS **
Rég. Climat. 15°C/25°C stress hydr.	-	-	<HS **	<HS **	<HS **	<HS **	<HS **
Rég. Climat. Optim. Climat.	-	-	-	-	-	-	-
<i>Différences significat. entre HS/P, P et HS et performance de HS/P par rapport à P et HS (b)</i>							
Rég. Climat. 4°C/10°C stress therm.	≅P **	-	>HS et P *	≅P **	-	-	≅HS **
Rég. Climat. 15°C/25°C stress hydr.	-	-	≅HS **	≅HS **	≅HS **	≅P **	>HS et P **
Rég. Climat. Optim. Climat.	-	-	-	-	-	-	-

**, * et - représentent les différences significatives entre le groupe des témoins et des géotextiles au risque 0.01, 0.05 et pas de différence significative respectivement.

Supériorité de la fibre de polypropylène

Supériorité de la fibre de jute

Supériorité lié à l'effet conjugué du polypropylène et de la jute

Tableau 6.9. Sensibilité des paramètres au mode de fabrication de la jute, filée (HS et HS/P) ou tressée (HP et HP/P)

Source de variation	TG	VG	%G	TL ₁	VL ₂	Fe	Re
<i>Différences significatives entre HS et HP et performance de HS par rapport à HP (a)</i>							
Régime Climat. 4°C/10°C stress therm.	-	-	-	>HP **	-	>HP **	>HP *
Régime Climat. 15°C/25°C stress hydr.	-	-	-	-	-	>HP	>HP
Régime Climat. Optim. Climat.	-	-	>HP **	-	-	** >HP **	** >HP *
<i>Différences significatives entre HS/P et HP/P et performance de HS/P par rapport à HP/P (b)</i>							
Régime Climat. 4°C/10°C stress therm.	>HP/P **	-	-	>HP/P **	-	<HP/P **	>HP/P **
Régime Climat. 15°C/25°C stress hydr.	-	-	-	-	-	-	>HP/P **
Régime Climat. Optim. Climat.	<HP/P **	-	-	-	-	>HP/P **	-

**, * et - représentent les différences significatives entre le groupe des témoins et des géotextiles au risque 0.01, 0.05 et pas de différence significative respectivement.

Tableau 6.10. Sensibilité des paramètres à l'ouverture des géotextiles (Open 1,2 et 3 : 1 cm², 1.5 cm² et 2 cm²) (Test de Tukey)

Source de variation	TG	VG	%G	TL ₁	VL ₂	Fe	Re
<i>Les géotextiles en polypropylène (P)</i>							
Régime Climat. 4°C/10°C stress therm.	-	-	-	-	-	2-3	2-3
Régime Climat. 15°C/25°C stress hydr.	-	1-3	-	-	1-2;1-3	-	-
Régime Climat. Optim. Climat.	-	-	-	1-2	-	-	1-3
<i>Les géotextiles en Jute tressée (HP)</i>							
Régime Climat. 4°C/10°C stress therm.	-	-	-	-	-	-	1-3
Régime Climat. 15°C/25°C stress hydr.	-	-	1-3	1-3	1-3	-	-
Régime Climat. Optim. Climat.	-	-	-	-	-	-	2-3
<i>Les géotextiles en Jute filée (HS)</i>							
Régime Climat. 4°C/10°C stress therm.	-	-	-	1-3;2-3	-	-	1-3;2-3
Régime Climat. 15°C/25°C stress hydr.	-	-	-	-	1-3	-	1-2;1-3;2-3
Régime Climat. Optim. Climat.	-	-	-	-	-	-	-
<i>Les géotextiles de composition mixte (HP/P)</i>							
Régime Climat. 4°C/10°C stress therm.	-	-	-	-	-	-	-
Régime Climat. 15°C/25°C stress hydr.	-	-	-	-	-	-	1-2;1-3
Régime Climat. Optim. Climat.	-	-	-	-	-	-	-
<i>Les géotextiles de composition mixte (HS/P)</i>							
Régime Climat. 4°C/10°C stress therm.	-	-	-	-	-	-	1-2
Régime Climat. 15°C/25°C stress hydr.	-	-	-	-	-	-	-
Régime Climat. Optim. Climat.	-	-	-	-	-	-	-

1-2, 1-3, 2-3 et - représentent les effets d'interaction positifs au risque 0.05 entre l'ouverture de maille open1 et open2 , open1 et open3 , open2 et open3 et pas de différence significative respectivement

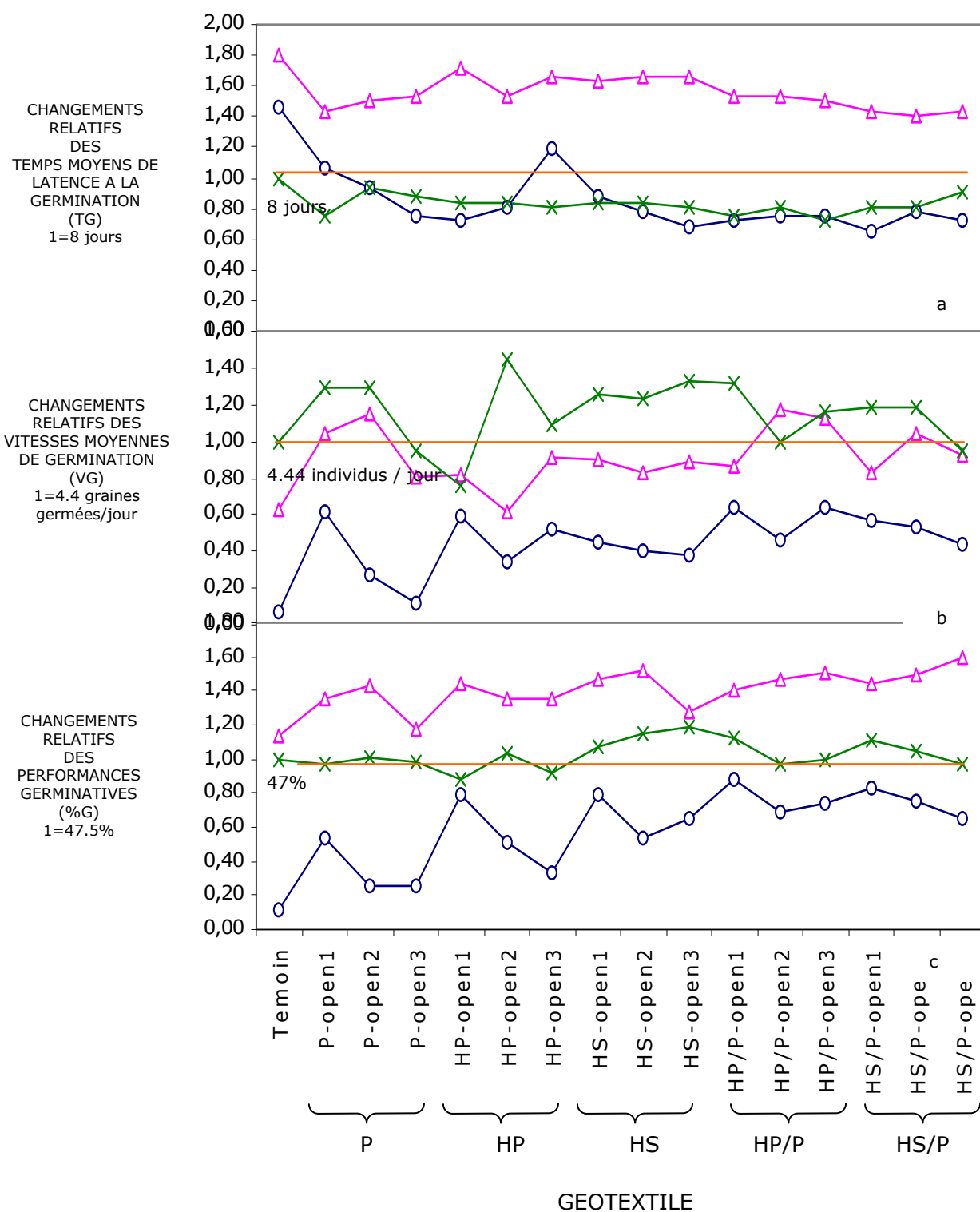


Figure 6.5. Changements relatifs des paramètres de la germination (TG, VG et %G) pour chaque régime climatique en prenant comme référence le groupe des témoins à l'optimum climatique. -△- régime climatique avec stress thermique ; -○- régime climatique avec stress hydrique ; -x- optimum climatique



Figure 6.6. Changements relatifs des paramètres du début de la croissance des plantules (TL_1 , VL_2 , Fe et Re) pour chaque régime climatique en prenant comme référence le groupe des témoins à l'optimum climatique.

-△- régime climatique avec stress thermique ; -○- régime climatique avec stress hydrique ; -x- optimum climatique

CHAPITRE 7
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

7.1 Rappel du contexte, des questions de recherche et de la méthodologie

L'utilisation des géotextiles comme promoteurs de la végétation sur des sites qui nécessitent une restauration écologique est une des techniques efficaces lorsque les contraintes du milieu sont très fortes (pente, altitude, versant sud en montagne etc.).

A ce jour, les informations relatives aux interactions entre les géotextiles et la végétation semée qui sont indispensables pour optimiser en connaissance de cause l'action de ces produits sur l'installation et la croissance de la végétation, sont insuffisantes.

Ce travail de thèse se rapporte aux questions suivantes : en quoi la présence d'un géotextile modifie-t-elle le microclimat dans le sol et quelles sont les conséquences de ces modifications sur l'installation de la végétation.

En effet jusqu'ici, si quelques tentatives de corrélation entre le microclimat du sol couvert par un géotextile et les traits de développement de la végétation ont été menées, il n'y a pas d'étude qui ait été réalisée à une échelle fine.

On a donc étudié précisément d'une part le microclimat dans un sol de granulométrie fine et à pente nulle recouvert par des géotextiles-tests (tissés par nos soins pour mieux contrôler leur caractéristiques) et d'autre part, on a suivi le développement de la végétation herbacée semée pendant la phase de son installation. Pour représenter cette dernière, on a choisi l'espèce *Dactylis glomerata* var. *glomerata*.

Ce travail a visé deux objectifs principaux : le premier est de comprendre les effets majeurs des géotextiles sur les évolutions de la température et de l'eau dans le sol et son proche voisinage au cours de son dessèchement.

Le second est d'examiner le comportement moyen de la végétation semée pendant qu'elle s'installe dans un biotope modifié par la présence d'un géotextile et de le relier au microclimat observé.

Pour atteindre le premier objectif, nous avons construit un dispositif expérimental complet qui permet de suivre simultanément l'évolution de l'eau et de la température à

l'intérieur de quatre systèmes Sol-Géotextile-Atmosphère (SGA) ou/et Sol-Atmosphère (SA). Celui-ci a été développé et mis au point pendant la première moitié de la thèse. En son état final, le dispositif comportait 4 bacs juxtaposés que l'on remplit de sol, une rampe de néons, 3 moto-ventilateurs, un parc de 46 capteurs (sondes thermiques, hydriques et de rayonnement), un système d'acquisition des données et une plate forme de suivi et de traitement des données collectées. Pour contrôler les conditions aux limites, le dispositif a été placé à l'intérieur d'une chambre climatisée.

Pour rendre compte des résultats du modèle, on a réalisé des simulations numériques des transferts verticaux d'eau et de chaleur au sein des systèmes SGA et SA. On a utilisé deux versions d'un modèle numérique développé au LTHE par I. Braud basé sur le formalisme de De Vries et Milly appliqué aux systèmes Sol-Plante-Atmosphère : la version SiSPAT et Sol-Plante-Mulch-Atmosphère : la version SiSPAT_mulch. Dans les deux cas on peut très bien ne pas utiliser le module plante. Les deux modèles sont en outre assez similaires mais le modèle SiSPAT_mulch possède un module supplémentaire : un compartiment mulch intermédiaire entre le sol et l'atmosphère. Ce nouveau module est supposé opaque. Les transferts d'eau y ont lieu uniquement en phase vapeur quand il ne pleut pas. En outre, les transferts de chaleur s'effectuent par conduction et convection libre ou forcée et les flux d'eau ou de chaleur par convection sont supposés proportionnels aux gradients des quantités transportées.

En parallèle, on a réalisé une expérimentation en bloc afin de caractériser et de quantifier par une approche statistique la réaction de la végétation semée en réponse à l'action des géotextiles sur le microclimat dans le sol et son proche voisinage. On a restreint l'étude biologique à la phase critique d'installation de la végétation herbacée semée soit les 35 premiers jours suivant le semis.

7.2 Synthèse des principaux résultats

Concernant l'étude micro climatique réalisée avec des géotextiles-test en jute, nous avons tout d'abord identifié 3 zones dans le sol grâce à la structure des profils verticaux des températures : une zone Z1, les tous premiers centimètres du sol, une zone intermédiaire Z2 et le sol plus en profondeur : zone Z3. On a montré que soumises aux fluctuations de la température de l'air, ces zones ont une dynamique thermique très différente :

Si le géotextile a un effet modérateur certain sur la température du sol, celui-ci n'est sensible qu'à partir de Z3. Au-dessus, on observe au contraire une augmentation (en phase de réchauffement) ou une diminution (en phase de refroidissement) plus rapide des températures par rapport au sol nu. On a aussi montré que le mode de fabrication influe fortement sur la thermique dans le sol. Le filage du jute accentue l'effet géotextile

par rapport au tressage du jute. Ce résultat indique qu'il faut se concentrer sur la caractéristique de porosité qui constitue l'essentiel de la différence entre les deux modes de fabrication des brins des géotextiles naturels.

L'étude hydrique a permis d'identifier clairement le mécanisme clé à l'origine de l'effet des géotextiles en jute. Il s'agit de son rôle d'écran : par sa présence, le géotextile s'oppose efficacement à l'évaporation de l'eau du sol. Cet effet d'écran permet d'expliquer qu'en phase de réchauffement, la température augmente plus rapidement dans les premiers centimètres du sol quand celui-ci est couvert par un géotextile car moins de chaleur se perd dans le changement de phase de l'eau. Et inversement, en phase de refroidissement, la température diminue plus rapidement quand le sol est couvert par un géotextile car dans les premiers centimètres du sol, il y a moins d'eau en phase vapeur susceptible de se condenser. Nous avons aussi montré que la durée de la phase II d'assèchement du sol (au sens de Idso et al., 1974) est rallongée de plusieurs jours si le sol est couvert par un géotextile. Ce résultat est très important du point de vue de la végétation puisqu'il signifie que l'eau est plus longtemps disponible pour les plantes.

Compte tenu du faible nombre de ratios d'espaces ouverts testés (deux), il est délicat d'évaluer l'incidence de l'ouverture des géotextiles sur le microclimat à la surface du sol. On a cependant montré que la fermeture des géotextiles en jute optimisait l'effet d'écran et réduisait la quantité de chaleur accumulée au cours de la journée.

Les résultats des simulations ont montré que l'on pouvait reproduire le comportement hydrique des systèmes étudiés avec l'outil numérique utilisé. Par contre ce dernier dans sa version actuelle ne permet pas de reproduire parfaitement le comportement thermique du sol tel que nous l'avons observé c'est à dire caractérisé par un zonage marqué des profils de température.

Concernant les résultats de l'étude du comportement de la végétation en phase d'installation, on a clairement montré que dans les conditions de l'expérimentation, la végétation s'installe significativement plus vite et plus densément dans un environnement climatique difficile en présence d'un géotextile.

Les résultats montrent que la présence d'un géotextile accélère la germination des semences et le début de la croissance des plantules. Les géotextiles synthétiques fabriqués avec du polypropylène noir produisent l'effet accélérateur le plus important. Ainsi, la graine qui va germer, germera plus vite et la plantule qui se développera, formera plus rapidement une seconde feuille.

Par contre, les valeurs des indicateurs de la vitalité (taux de germination du semis, surfaces foliaire et racinaire etc.) de la végétation sont significativement plus élevés avec les géotextiles naturels en jute parce qu'ils ont une action limitative forte sur l'évaporation de l'eau du sol. De plus, l'effet dû au mode de fabrication des brins des géotextiles en jute (filage ou tressage) sur le micro climat est suffisamment important pour engendrer une différence significative sur les critères de vitalité de la végétation lors de son installation. On a observé un gain de vitalité quand le géotextile est fabriqué avec des brins filés qui sont plus poreux.

7.3 Bilan et perspectives

Le suivi en conditions contrôlées sur un modèle physique de la dynamique des transferts d'eau et de chaleur à l'intérieur de systèmes SGA ou/et SA est un moyen efficace pour identifier les spécificités d'action micro climatiques de produits de recouvrement des sols comme les géotextiles. L'étude biologique menée en parallèle permet de quantifier facilement les effets de ces produits sur l'installation d'une végétation semée.

Dans une perspective de développement industriel ce travail ouvre la voie à une prochaine étape qui serait de considérer une collection de géotextiles de même nature avec plusieurs ouvertures de maille ou de même nature et même ouverture mais de porosité variable ou d'épaisseur variable etc. et d'utiliser le modèle physique pour effectuer des comparaisons entre produits tout en couplant ce travail avec une étude biologique sur la végétation.

Il sera par ailleurs intéressant de mieux prendre en compte la complexité inhérente à la réalité de terrain. Parmi les problèmes à examiner, il y a ceux liés à l'effet de la pente sur le microclimat, à l'effet de la végétation qui intégrée au système SGA en modifie les caractéristiques thermo-hydrodynamiques, à l'hétérogénéité du sol qui est aussi une réalité de terrain. Ceci en vue d'une modélisation des flux verticaux d'eau et de chaleur à micro-échelle qui soit plus pertinente et réaliste c'est à dire rendant mieux compte de l'interaction entre les objets « Géotextile » et « végétation semée » in situ.

BIBLIOGRAPHIE

- Abrahams A., Parson A. et Wainwright J.** « Resistance to overland flow on semiarid grassland and shrubland hillslopes, Walnut Gulch, Southern Arizona ». *Journal of hydrology*, 1994, **156**, 431-446.
- Adams J.** « Influence of mulches on runoff, erosion, and soil moisture depletion ». *Soil Science Society of America Journal*, 1966, **30**, 110-114.
- Arreola Tostado J.** « Etude et modélisation de l'effet des paillis sur le bilan hydrique – Le cas du semis direct sous paillis au Mexique ». 82p., *DEA report*, CIRAD, Montpellier, 1996
- Awadhwai N. et Thierstein G..** « Soil Crust and its impact on crop establishment : a review ». *Soil Tillage research*, 1985, **5**, 289-302.
- Barrett A.P., Diseker E.G. et Richardson E.C.** « Evaluation of mulching methods for erosion control on newly prepared and seeded highway backslopes ». *Agronomy Journal*, 1967, **59**, 83-85.
- Bayer C., Martin-Neto L., Mielniczuk J. et Ceretta C.** « Effect of no-till cropping systems on soil organic matter in a sandy clay loam Acrisol from southern Brazil monitored by electron spin resonance and nuclear magnetic resonance ». *Soil & Tillage research*, 2000, **53**, 95-104
- Bear J.**, 1972. « Dynamic of fluids in porous media ». *Am. Elsevierl.*, New York.
- Bending G.D., Turner M.K., Jones J.E.** « Interactions between crop residue and soil organic matter quality and functional diversity of soil microbial communities ». *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, **34**, 1073-1082.
- Benoît G.R. et Lindstrom M.J.** « Interpretation of tillage residue management effects ». *J. Soil and water conservation*, 1986, **42**(2), 87-90
- Benoît G.R., Mostaghimi S., Young R.A., Lindstrom M.J.** « Tillage-residue effects on snow cover, soil water, temperature and frost ». *Trans. ASAE*, 1986, **29**, 473-479.
- Blal B., Morel C., Gianinazzi -Pearson V., Fardeau J.C et Gianinazzi S.** « Influence of vesicular-arbuscular mycorrhizae on phosphate fertilizer efficiency in two tropical acid soils planted with micropropagated oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) ». *Biol. Fertil. Soils*, 1990, **9**, 43-48.
- Blondel D.** « Contribution à la connaissance de la dynamique de l'azote minéral en sol sableux du Sénégal ». *Agronomie Tropicale*, 1971, **26**, 1303-1333
- Bonan G.B.** « A computer model of the solar radiation, soil moisture, and soil thermal regimes in boreal forests ». *Ecological modelling*, 1989, **45**, 275-306.
- Bonan G.B.** « Environmental factors and ecological processes controlling vegetation patterns in boreal forests ». *Landscape Ecology*, 1989, **3**, 111-130.
- Bond J. et Willis W.** « Soil water evaporation : surface residue rate and placement effects ». *Soil Science Society of America Journal*, 1969, **33**, 445-448.
- Bond J. et Willis W.** « Soil water evaporation : first stage drying as influenced by surface residue and evaporation potential ». *Soil Science Society of America Journal*, 1970, **34**, 924-928.
- Borges A.** « Modélisation de l'érosion sur deux bassins versants expérimentaux dans les Alpes du sud ». 205p., Thèse de l'Université Joseph Fourier Grenoble I, 1993

- Borst, Woodburn.** « The effect of mulching and methods of cultivation on runoff and erosion from Muskingum silt loam » *Agricultural Engineering*, 1942, **23**, 19-22
- Braud I.** « SiSPAT version 6.0, User's manual », 83p, available from LTHE, BP53, 38041 Grenoble Cedex 9, France, 2000.
- Braud I.** « Spatial variability of surface properties and estimation of surfaces fluxes of a savannah ». *Agric. For. Meteorol.*, 1998, **89**, 1, 15-44.
- Braud I., Bessemoulin P., Monteny B., Sicot M., Vandervaere J.P., Vauclin M.** « Unidimensional modelling of a fallow savannah during the Hapex-Sahel experiment using the SiSPAT model ». *Journal of Hydrology*, 1997, **188-189**, 912-945
- Braud I., Dantas-Antonino A.C., Vauclin MP., Thony J.L., Ruelle P.** « A simple soil-Plant-Atmosphere Transfer model (SiSPAT) : development and field verification ». *J. Hydrol.*, 1995, **166**, 213-250
- Bristow K. et Abrecht D.G.** « The physical environment of two semi-arid tropical soils with partial surface mulch cover ». *Australian Journal of Soil Research*, 1989, **27**, 3, 577-587.
- Bristow K., Campbell G., Papendick R. et Elliot L.** « Simulation of heat and moisture transfert through a surface residue-soil system ». *Agricultural and Forest Meteorology*, 1986, **36**, 193-214.
- Bristow K.L., Campbell G.S., Papendick R.I., Elliott L.F.**, 1986. « Simulation of heat and moisture transfer through a surface residue-soil system ». *Agric. For. Meteorol.*, 1986, **36**, 193-214.
- Brooks R. et Corey A.** « Hydraulic properties of porous media ». *Hydrology paper Nr3*, 1964
- Brun L.J., Enz J.W., Larsen J.K. and Fanniny C.** « Springtime evaporation from bare and stubble covered soil ». *J. Soil and water conservation*, 1986, **41**, 2, 120-122
- Bryan R.B.** « The development, use and efficiency of indices of soil erodability ». *Geoderma*, 1968, **2**, 5-26.
- Bryan R.B. et Luk S.H.** « Laboratory experiments on the variation of soil erosion under simulated rainfall », *Geoderma*, 1981, **26**, 245-265.
- Buckingham E.** « Studies on the movement of soil moisture ». *American Proceedings*, 1907, **33**, 445-448.
- Buissière F.** « Transferts thermiques et hydriques dans le continuum sol-mulch végétal-atmosphère : modélisation et première validation expérimentale ». 60p., *Thèse de doctorat, Institut National Agronomique Paris-Grignon et INRA*, Paris, 1991.
- Buissière F. et Cellier P.** « Modification of the soil temperature and water content regimes by a crop residue mulch : experiment and modelling ». *Agricultural and Forest Meteorology*, 1994, **68**, 1-28.
- Bungolo A.M., Lenvain J.S. and Lungu O.I.** « Soil erosion in zambia with particular emphasis on the benefits of minimum tilage and mulching ». Paper presented to the 6th International Soil conservation conference, Addis Ababa, Ethiopia, November 1989
- Burdine N.T.** « relative permeability calculation from size distribution data ». *Trans. AIME*, 1953, **198**, 71-78
- Burrows W.C. et larson W.E.** « Effect of amount of mulch on soil temperature and early growth of corn ». *Agron. J.*, 1962, **54**, 19-23.

- Campbell G.S., McArthur A.J., Montheith J.L.** « Windspeed dependence of heat and mass transfert through coats and clothing ». *Boundary-Layer Meteorology*, 1980, **18**, 485-493.
- Campbell Scientific Inc.** « CS615 Water content reflectometer » *User Manual*, 1999, 17p.
- Cerda A.** « Parent material and vegetation affect soil erosion in eastern Spain ». *Soil science Society of America Journal*, 1999, 63, pp 362-368
- Chen W., Novak M.D., Black A. Lee X.** « Coherent eddies and temperature structure functions for three contrasting surfaces. Part I: ramp model with finite microfront time ». *Bound. Layer Meteorolo.*, 1997a, **84**, 99-123
- Chen W., Novak M.D., Black A. Lee X.** « Coherent eddies and temperature structure functions for three contrasting surfaces. Part II: reviewal model for sensible heat flux ». *Bound. Layer Meteorolo.*, 1997b, **84**, 99-123
- Chopart J.L.**, 1989. « Effects of Tillage on a Corne-Cotton Sequence in Côte d'Ivoire ». *Water Management Systems for Rainfed Agriculture in the Soudano-Sahelian Zone*, 325-331, Niamey-Niger.
- Côme D.** « Les obstacles à la germination ». Collection Monographie de physiologie végétale, Paris, Masson & Cie, 1970, 162 p.
- Cornelissen J.H.C., Thompson K.** « Fonctional attributes predict litter decomposition rate in herbaceous plants ». *New phytologist*, 1997, **135**, 109-114.
- Crausse P., Laurent J.P., et Perrin B.** « Influence des phénomènes d'hystérérési sur les propriétés hydriques de matériaux poreux. Comparaison de deux modèles de simulation du comportement thermohydrigue de parois de bâtiment », *Revue générale de thermique*, 1996, **35**, 95-106
- Crosaz Y. et Dinger F.**, 1999. « Mesure de l'érosion sur ravines élémentaires et essais de végétalisation. Bassin versant expérimental de Draix ». *Actes du Colloque : Les bassins versants expérimentaux de Draix, Laboratoire d'étude de l'érosion en montagne. Draix, Le Brusquet, Digne, 22-24 oct 1997*, 103-118.
- Crovetto Lamarca.** « Stubble over the soil : the vital role of plant residue in soil management to improve soil quality ». *American Society of Agronomy*, 1996, Inc 245 p.
- CTGREF.** « Evaluation des quantités d'eau nécessaires aux irrigations ». Coll. Techniques rurales en Afrique, Min. de la coopération et Min. de l'Agriculture, Paris, 1979, 204 p.
- Davet P.** « Vie microbienne du sol et production végétale ». INRA Editions, 1996, 369p.
- De Louvigny N.** « Conséquences de l'apport de verre pile à la surface du champ et de son incorporation dans la couche travaillée ». 204p., *Thèse de Doctorat, Université Montpellier II*, 204p.
- De Vries D.**, 1963. « Thermal properties of soils ». *Physics of plant environment*, Van Wijk, Amsterdam, North Holland, 210-235.
- De Vries D.**, 1975. « Heat transfers in soil ». *Heat and mass transfer in the biosphere*, De Vries, D.A. and N.H. Afgan (Eds.),., Scripta Book Compagny, Washington, D.C., 5-28
- Dinger F.** « Végétalisation des espaces dégradés en altitude ». Cemagref Editions, 1997, 144p.
- Dinger F.,Crosaz Y., Niel J.F.**, 1995. « Protection de Talus et Fossés de forte pente par toile de jute avant végétalisation ». *Geotextiles-géomembranes rencontres 95* (Session Lutte contre l'érosion), p. 43-49.

- Diseker E.G. et Richardson E.C.** « Roadside sediment production and control », *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1961, **4**, 62-64 et 68.
- Duchaufour Ph.** « Pédologie: sol, végétation, environnement ». Série des Abrégés, 4^{ème} édition revue et augmentée, Paris, Masson, 1995, 319p
- Duke J.A.** « The quest for tolerant germplasm ». ASA Special Symposium 32, Crop tolerance to suboptimal land conditions. *Am. Soc. Agron. Madison*, 1978, pp1-61.
- Dunne T., Zhang W. et Aubry B.** « Effects of rainfall, vegetation and microtopography on infiltration and runoff ». *Water Resources Research*, 1991, **27**, 9, 2271-2285.
- Edwards L.M.** « The effect of alternate freezing and thawing on aggregate stability and aggregate size distribution of some Prince Edward Island soils ». *J. Soil Sci*, 1991, **42**, 193-204.
- Findeling A.** « Etude et Modélisation de certains effets du semis direct avec paillis de résidus sur le bilan hydrique, thermique et azoté d'une culture de maïs pluvial au Mexique » 325 p., *Thèse de l'ENGREF*, France, 2001.
- Foster G.R., Meyer L.D. et Moldenhauer W.C.** « Hydraulics of failure of unanchored cornstalks and wheat straw mulches for erosion control ». *Trans. Am ; Soc. Agric. Engrs.*, 1982a, **25**, 940-947.
- Geddes N., Dunkerley D.** « The influence of organic litter on the erosive effects of raindrops and of gravity drops released from desert shrubs ». *Catena*, 1999, **36**, 303-313
- Gillet M.** « Les Graminées Fourragères : Description, fonctionnement, applications à la culture de l'herbe ». Paris, Bordas, 1980, 299p.
- Gilley J.E., Finkner S., Spomer R., Mielke L.** « Runoff and erosion as affected by corn residue: I. Total losses » *ASAE*, 1986a, **85-2540**, 157-164
- Gilley J.E., Finkner S.C., Spomer R.G. et Mielke L.N.** « Runoff and erosion as affected by corn residue: II. Rill and interrill components ». *Transaction of the ASAE American Society of Agricultural Engineers*, 1986b, 161-164.
- Gilley J.E., Kottwitz E.R. et Wieman G.A.**, 1991. « Roughness coefficients for selected residue materials ». *Journal of irrigation and drainage engineering*, 1991, **117**, 4, 503-514.
- Gonzalez-Hidalgo J.C., Raventos J., Echevarria M.T.** « Comparison of sediment ratio curves for plants with different architectures ». *Catena*, 1997, **29**, 333-340
- Gonzalez-Sosa E.** « Mesure et Modélisation à Long Terme du Bilan de Masse et d'Energie d'une Jachère du sud-ouest de la France ». 227p., *Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique De Grenoble*, 1999.
- Gonzalez-Sosa E., Braud I., Thony J., Vauclin M., Bessemoulin P. et J.C.** « Modelling Heat and water exchanges of fallow land covered with plant-residue mulch ». *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999, **97**, 151-169.
- Gouet M.**, 1993. Thermocouples dans « Mesure et contrôle sur PC : Guide pratique de l'utilisateur au laboratoire et dans l'industrie », Paris, Masson, 1993, 59-66
- Gunapal N., Venette R.C., Ferris H., Scow K.M.**, 1998. « Effects of soil management history on the rate of organic matter decomposition ». *Soil Biology and Biochemistry*, 30, 1917-1927.
- Gurnah A. et Mutea J.** « Effects of mulches on soil temperature under arabica coffee at Kabete, Kenya ». *Agricultural Meteorology*, 1982, **25**, 237-244.
- Guyot G.** « Climatologie de l'environnement : de la plante aux écosystèmes ». Paris : Masson, 1997, 497p

- Handel R.D., Robinson G.R., Parsons W.F.J., Mattei J.H.** « Restoration of woody plants to capped landfills : root dynamics in an engineered soil ». *Restoration Ecology*, 1997, **5**, 178-186.
- Hares M. et Novak M.** « Simulation of surface energy balance and soil temperature under strip tillage I. Model description ». *Soil Science of America Journal*, 1992a, **56**, 22-29.
- Hares M. et Novak M.** « Simulation of surface energy balance and soil temperature under strip tillage II. Field test ». *Soil Science of America Journal*, 1992b, **56**, 29-36.
- Harper J.L.** « Population Biology of Plants ». Oxford (Grande Bretagne), Academic Press, 1977, 892p.
- Hart B.T.** « Uptake of trace metals by sediments and suspended particulates : A review », *Hydrobiologia*, 1982, **91**, 299-313.
- Haverkamp, R., Bouraoui, F., Angulo-Jaramillo, R., Zammit, C. & Delleur, J.W.** « Soil properties and moisture movement in the unsaturated zone, invited chapter in the book "CRC Groundwater Engineering Handbook », 1998b, J.W. Delleur (Ed.), 120 pp.
- Haverkamp, R., C. Zammit, F. Bouraoui, and J.L. Arúe**, « GRIZZLY », Grenoble catalogue of soils: Survey of soil field data and description of particle size, soil water retention and hydraulic conductivity functions, Laboratoire d'Etude des Transferts en Hydrologie et Environnement (LTHE), Grenoble, France, 1998a.
- Hillel D., Van Babel C. et Talpaz H.** « Dynamics simulation of water in fallow land soil as affected by mulch of hydrophobic aggregates ». *Soil Science Society of America Proc.*, 1975, **39**, 826-833.
- Hladik J.** « Métrologie des propriétés thermophysiques des matériaux ». Masson, Paris, 1990.
- Holdridge N.H.**, 1996. « An Examination of Alternative Control Materials for Prevention of Soil Erosion on Graded Slopes », Unpublished M.Sc. Project, California State University, Department of Environmental Studies, Fullerton, CA.
- Homoky, S.G.J.** 1996. « Trials of Erosion Control Netting for Improved Stability of Forest Roadside Slopes », Research Branch, British Columbia Ministry of Forests, Working Paper 14/1996, Victoria, BC.
- Hopen H.J.** « Effects of black and transparent polyethylene mulches on soil temperature, sweet corn growth and maturity in a cool growing season ». *Proc. Am. Soc. Hortic. Sci.*, 1965, **86**, 415-420.
- Idso S., Reginato R., Jackson R., Kimball B et Nakayama F.** « The three stages of drying of field soil ». *Soil Science Society of America Journal*, 1974, **38**, 831-836.
- Inada K.** « Photo-selective plastic film for mulch ». *Jpn. Agric. Res. Q.*, 1973, **7**, 253-256.
- Ingold T.S. et Thomson J.C.** 1990. « A design approach for preformed erosion control systems », G.Den Hoedt (ed.), Géotextiles, geomembranes and related products, Actes de la 4^{ème} Conférence Internationale, **1**, 28 mai-1^{er} juin, Balkema, La Hague.
- INSTITUT TEXTILE FRANÇAIS.** « Characteristics of fibres ». Editions de l'industrie textile, Spirale S.A. (Paris), 1987.
- Israelsen C.E. et Urroz G.** 1992 b. « Product Performance Testing Under Simulated Rain and Sunlight (A supplemental Study) – American Excelsior Compagny » Utah Water Research Laboratory, Utah State University, Logan, UT.

- Israelsen C.E. et Urroz G.**, 1992 a. « Product Performance Testing Under Simulated Rain and Sunlight – American Excelsior Compagny », Utah Water Research Laboratory, Utah State University, Logan, UT.
- Itier B.** « Une méthode simple pour la mesure de l'évapotranspiration réelle à l'échelle de la parcelle ». *Agronomie*, 1981, **1**, 10, 869-876.
- Jackobs J.A.**, Andrews Jnr, O.N., Murdoch C.L., Foote L.E., 1967. « Turf establishment on highway right of way slopes – a review ». *Highway Res. Rec. No. 161, Highway Res. Bd. Publ. 1439*, Washington, DC, 71-103.
- Kay B.L.**, 1978. « Mulches for erosion control and plant establishment on disturbed site ». *Reclamation of Drastically Disturbed lands*, Eds F.W. Shaller and P. Sutton, ASA-SCSA-SSSA, Madison, WI, 182-204.
- Khan M., Monke E. et Foster G.**, 1988. « Mulch cover and canopy effect on soil loss ». *Transactions of the ASAE, American Society of Agricultural Engineers*, 1988, **31**, 3, 706-711.
- Kimball B.A. et Lemon E.R.** « Air turbulence effects upon soil gas exchange ». *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 1971, **35**, 16-21.
- Kramer L.A. et Meyer L.D.** « Small amounts of surface mulch residue reduce soil erosion and runoff velocity ». *Trans Am. Soc. Agr. Engrs.*, 1969, **12**, 638-41, 645.
- Krenitsky E.C. et Caroll M.J.**, 1994. « Use of erosion control materials to establish turf », *Sustaining Environmental Quality : the erosion control challenge*, Proceedings of Conference XXV, International Erosion Control Association, 15-18 Février, Reno, NV., 79-90.
- Kushwaha C., Tripathi S. et Singh K.** « Variations in soil microbial biomass and N availability due to residue and tillage management in a dryland rice agroecosystem ». *Soil & Tillage research*, 2000, **56**, 153-166.
- Laflen J.M. et Colvin T.S.** « Effect of crop residue on soil loss from continuous row cropping ». *Trans Am. Soc. Agric. Engrs.*, 1981, **24**, 605-609.
- Lal R.** « Mulching effects on runoff, soil erosion, and crop response on alfisols in western Nigeria ». *Journal of sustainable agriculture*, 1978, 135-154.
- Lal R., DeVleeschauwer D., and Malafa Nanje R.** « Changes in properties of a newly cleared tropical alfisol as affected by mulching ». *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1980, **44**, 827-833.
- Lattanzi A.R., Meyer L.D. et Baumgardner M.F.** « Influence of mulch rate and slope steepness on interrill erosion ». *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 1974, **27**, 1, 84-86
- Laurent J.P.** « Physique des transferts d'eau dans la pierre" dans "Géomécanique Environnementale, Vol.II: Risques naturels et conservation du patrimoine » B.Schrefler, P.Delage, Ed., Hermès, 2001, 237-265
- Lehrsh G.A., Sojka R.E., Carter D.L., Jolley P.M.** « Freezing effects on aggregate stability affected by texture, mineralogy, and organic matter ». *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1991, **55**, 1401-1406.
- Lopes P.R.C., Cogo N.P. et Cassol E.A.** « Influence of crop residue mulch on runoff velocity and size distribution of eroded soil sediments ». *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, 1987, **11**, 2, 193-197.
- Lynch J.M.** « Promotion and inhibition of soil aggregate stabilization by micro-organisms ». *J. Gen. Microbiol.*, 1981, **126**, 371-375.

- Mahrer Y. et Katan J.** « Spatial temperature regime under transparent polyethylene mulch : numerical and axperimental study ». *Soil Science*, 1981, **131**, 2, 82-87.
- Mapa R.** « Variability of soil properties in a tropical Alfisol used for shifting cultivation ». *Soil Technology*, 1996, **9**, 187-197.
- Mary B., Recous S., Darwis D. et Robin D.** « Interactions between decomposition of plant residues and nitrogen cycling in soil ». *Plant and Soil*, 1996, **181**, 71-82
- Mathieu C. et Pieltain F.** « Analyse physique des sols : méthodes choisies ». Collection Technique & Documentation, Paris, Lavoisier, 1998, 275 p.
- Meyer L.D., Johnson C.B. et Foster G.R.** « Stone and woodchip mulches for erosion control on construction sites », *Journal of soil and water Conservation*, 1972, **27**, 264-269.
- Milly P.C.D.** « Moisture and heat transport in hysteretic, inhomogeneous porous media: a matrix head-based formulation and a numerical model ». *Water Resources Research*, 1982, **18**, 489-498.
- Moiroud C.** « Amenagement des berges des cours d'eau et des voies navigables : végétalisation par semences d'Helophytes ». 180 p, Thèse de doctorat, Biologie et biochimie appliquées, Université de savoie, 1997
- Monteith J.** « Principle of environmental physics ». Edw. Arnold, 1973, 241p.
- Morgan R.P.C.** « Soil Erosion and Conservation ». *Longman*, London, 1986.
- Morgan R.P.C.** « Splash detachment under plant covers : results and implications of a field study ». *Trans Am. Soc. Agric. Engrs.*, 1982, **25**, 987-91.
- Munoz-Carpena R., Parsons J. et Gilliam J.** « Numerical approach to the overland flow process in vegetative filter strips ». *American Socity of Agricultural Engineers*, 1993, **36**, 3, 761-770.
- Musy A. et Soutter M.**, 1991. « Physique du sol ». Presses Plytechniques et universitaires romandes, Col. Gérer l'environnement, 331p.
- Myers J. et Waggoner M.** « Runoff and sediment loss from three tillage systems under simulated rainfall ». *Soil and Tillage Research*, 1996, **39**, 115-129.
- Myrold D.D., Elliott L.F., Papendick R.I., Campbell G.S.** « Water potential-water content characteristics of wheat straw ». *Soil Science Society of America journal*, 1981, **45**, 329-333.
- Neel C.** « Modélisation du transfert et des transformations de l'azote : paramétrisation et évaluation d'un modèle en sol nu ». 254p., *Thèse de doctorat, université Paris VI, Paris-Avignon*, 1996.
- Northcutt P.E.** 1995. « Performance Testing of Selected Erosion Control Products at the TxDOT/TTI Hydraulics and Erosion Control Laboratory – final performance analysis through the 1994 test cycle. Class 1 'Slope Protection' », Texas Department of Transportation, Construction and Maintenance Division, TX.
- Northcutt P.E.** 1996. « TxDOT/TTI Hydraulics and Erosion Control Laboratory Field Performance Testing of Selected Erosion Control Products : final performance analysis - 1995 test evaluation cycle. Class 1 'Slope protection'. Class 2 'Flexible Channel Liners' », Texas Department of Transportation, Construction and Maintenance Division, Austin, TX.
- Northcutt P.E.** 1997. « TxDOT/TTI Hydraulics and Erosion Control Laboratory Field Performance Testing of Selected Erosion Control Products : Final performance analysis through 1996 test evaluation cycle. Class 1 'Slope protection'. Class 2 'Flexible Channel Liners', Hydraulic

- Mulches' », Texas Department of Transportation, Construction and Maintenance Division, Austin, TX.
- Novak M., Chen W. et Hares M.** « Simulating the radiation distribution within a barley-straw mulch ». *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000c, **102**, 173-186.
- Novak M., Chen W., Orchansky A. et Kelter R.** « Turbulent exchange processes within and above a straw mulch. Part II :Thermal and moisture regimes ». *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000b, **102**, 155-171.
- Novak M., Chen W., Orchansky A. et Kelter R.** « Turbulent exchange processes within and above a straw mulch. Part I : Mean wind speed and turbulent statistics ». *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000a, **102**, 139-154.
- Okwack G.E., Palis R.G. et Rose C.W.**, 1992. « Sediment concentration and characteristics as affected by surface mulch, land slope and erosion mechanisms ». *Erosion, Conservation and Small-Scale Farming*, Eds H. Hurni and Kabede Tato, Geographica Bernensia, Bern, 91-105.
- Olasantan F.O.** « Effect of time of mulching on soil temperature and moisture regime and emergence, growth and yield of white yam in western Nigeria ». *Soil & Tillage Research*, 1999, **50**, 215-221
- Othieno C.O. et Ahn P.M.** « Effects of soil temperature and growth of tea plants in Kenya ». *Exper. Agric.*, 1980, **16**, 287-94.
- Palm C.A. et Sanchez P.A.** « Nitrogen release from the leaves of some tropical legumes as affected by their lignin and polyphenolic contents ». *Soil Biology and Biochemistry*, 1991, **23**, 83-88.
- Philip J.R. et De Vries D.A.** « Moisture movement in porous materials under temperature gradients ». *Transactions of american Geophysical Union*, 1957, **38**, 2, 222-232.
- Pla I, Florentino A. et Lobo D.**, 1987. « Soil and water conservation in Venezuela Through asphalt mulching ». *Soil Conservation and Productivity*, Eds I. Pla Sentis, Sociedad Venezolana de la Ciencia del Suelo, Maracay, Venezuela, 481-95.
- Poesen J. et Lavee H.** « Effects of size and incorporation of synthetic mulch on runoff and sediment yield from interills in a laboratory study with simulated rainfall ». *Soil and Tillage Research*, 1991, **48**, 51-59.
- Poncet A.** « Restauration et conservation des terrains en montagne ». *Office national des forêts*, Paris, 1995, 1000p.
- Poudel D.D., Midmore D.J., West L.T.** « Erosion and productivity of vegetable systems on sloping volcanic ash-derived Philippine soils ». *Soil science Society of America journal*, 1999, **63**, 1366-1376
- Prove B.G., Truong P.N.V.**, 1988. « Research into soil erosion control practices on sugarcane lands in Queensland (Australia) ». Dans *Land Conservation for Future generations*, S.Rimwanich, Department of land development, Ministry of Agriculture and Cooperatives, Bangkok, Thaïland, pp 669-680
- Rameau C., Gouyon P.-H.** « Resource allocation to growth, reproduction and survival in *Gladiolus* : the cost of male function ». *Journal of Evolutionary Biology*, 1991, **4**, 291-307
- Rey F., Vallauri D., Chauvin C.** « Génie écologique contre l'érosion des marnes dans les Alpes du Sud ». *Ingenieries EAT*, 2001, **25**, 41-55.

- Reynolds K.C.** « Synthétic meshes for soil conservation use on black earths ». *Soil Conserv. J. N.S.W.*, 1976, **34**, 145-60.
- Rickson R.J.**, 1987. « Geotextile applications in steepland agriculture ». *Steepland Agriculture in the Humid Tropics*, Eds T.H. Tay, A.M. Mocktaruddin and A.B. Zahari. MARDI press, Ministry of Agriculture, Selangor, Malaysia, 352-376.
- Rickson R.J.**, 1988. « The use of geotextiles in soil erosion control : comparison of performance on two soils ». *Land Conservation for future generations*, Ed. S. Rimwanich. Department of Land development, Ministry of Agriculture and Cooperatives, Bangkok, Thailand, 961-970.
- Rickson R.J.**, 1992b. « Control of sediment production using geotextiles : Results of experimental testing using simulated rainfall and runoff ». *Environment is Our Future*. Proceedings of the XXIII IECA Annual Conference, Reno, Nevada. International Erosion control Assocn, steamboat Springs, CO, 353p.
- Rickson R.J.**, 1995. « Similated vegetation and geotextiles ». Dans : Slope stabilization and Erosion Control – A Bioengineering approach, Morgan R.P.C. et Rickson R.J., E&FN SPON, pp 95-125.
- Rovera G, Robert Y., Coubat M.** « L'action des processus périglaciaires dans les bad-lands marneux des Alpes du sud: l'exemple du bassin du Saignon ». *Environnements périglaciaires*, 1999, Bulletin de l'association frnaçaise du périglaciaire, 6, pp 41-52
- Rustom R.N. et Weggel J.R.**, 1993b. « A study of erosion control systems : Experimental apparatus », Preserving our Environment : the race is on, Proceedings of Conference XXIV, International Erosion control Association, 23-26 Février, Indianapolis, IN, 239-251.
- Rustom R.N. et Weggel J.R.**, 1993c. « A study of erosion control systems : Experimental results », Preserving our Environment : the race is on, Proceedings of Conference XXIV, International Erosion control Association, 23-26 Février, Indianapolis, IN, 253-226.
- Rustom R.N. et Weggel, J.R.** «A laboratory investigation of the role of geosynthetics interrill soil erosion and sediment control », *Geotechnical Fabrics Report*, 1993a, **12**, 16-33.
- Rutter A., Kershaw K., Robins P. et Morton A.** « A predictive model of rainfall interception in forests. I. derivation of the model from observations in a plantation of corsican pines » *Agricultural Meteorology*, 1971, **9**, 367-384.
- Sauer T., Hatfield J. et Prueger J.** « Aerodynamic characteristics of standing corn stubble ». *Agronomy journal*, 1996, **88**, 733-739.
- Sauer T., Hatfield J., Prueger J. et Norman J.** « Surface energy balance of a corn residue-covered field ». *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, **89**, 155-168.
- Sauer T.J., Hatfield J.L., Prueger J.H., Norman J.M.** « Surface energy balance of a corn residue-covered field ». *Agricultural and forest Meteorology*, 1998, **89**, 155-168.
- Savabi M. et Stott D.** « Plant residue impact on rainfall interception ». *ASAE*, 1994, **37**, 4, 1093-1098.
- Scopel E.** « Le semis direct avec paillis de résidus dans la région de V. Carranza au Mexique : Intérêt de cette technique pour améliorer l'alimentation hydrique du maïs pluvial en zones à pluviométrie irrégulière ». 334p., Thèse de doctorat, Institut National Agronomique Paris-Grignon, Montpellier, 1994.
- Sharrat B.S.** « Thermal conductivity and water retention of a black spruce forest floor ». *Soil science*, 1997, **162**, 8, 576-582

- Sharrat B.S.** « Corn Stubble height and residue placement in the northern US Corn Belt. Part I. Soil physical environment during winter ». *Soil and Tillage research*, 2002, **64**, 243-252.
- Sharrat B.S.** « Corn Stubble height and residue placement in the northern US Corn Belt. Part II. Spring microclimate and wheat development ». *Soil Tillage research*, 2002, **64**, 253-261
- Sharrat B.S., Benoît G.R., Voorhees W.B.** « Winter soil microclimate altered by corn residue management in the northern Corn Belt of the USA ». *Soil Tillage research*, 1998, **49**, 243-248
- Sharrat B.S., Lindstrom M.J., Benoît G.R., Young R.A., Wilts A.** « Runoff and soil erosion during spring thaw in the northern US Corn Belt ». *Soil water conservation*, 2000, **55**, 487-494
- Sheldon J.C. et Bradshaw A.D.** « The development of a hydraulic seeding technique for unstable sand slopes. I. Effects of fertilisers, mulches and stabilisers ». *Applied Ecol.*, 1977, **14**, 905-18.
- Singer M.J. et Blackard J.** « Effect of mulching on sediment in runoff from simulated rainfall ». *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1978, **42**, 481-6.
- Skogland T., Lomeland S., Goksoyr J.** « Respiratory burst after freezing and thawing of soil: experiments with soil bacteria ». *Soil Biol. Biochem.*, 1988, **20**, 851-856.
- Soria, J.M., Leij, F.J., Angulo-Jaramillo, R., Fuentes, C., Haverkamp, R. and Parlange, J.Y.** « Aggregation scenarios to model water fluxes in watersheds with spatial changes in soil texture », AGU Hydrology Days, February 2003.
- Sui H., Zeng D et Chen F.** « A numerical model for simulating the temperature and moisture regimes of soil under various mulches ». *Agricultural and Forest Meteorology*, 1992, **61**, 281-289.
- Sur H.S., Mastana P.S. et Hadda M.S.** « Effect of rates and modes of mulch application on runoff, sediment and nitrogen loss on cropped and uncropped fields ». *Tropical Agriculture*, 1992, 319-322.
- Sutherland R.A.** « Rolled Erosion Control Systems for Hillslope Surface Protection : A Critical Review, Synthesis and Analysis of Available Data. I Background and formative Years », *Land Degradation and Development*, 1998a, **9**, 465-486.
- Sutherland R.A.** « Rolled Erosion Control Systems for Hillslope Surface Protection : A Critical Review, Synthesis and Analysis of Available Data. II The Post-1990 Period », *Land Degradation and Development*, 1998b, **9**, 487-511.
- Sutherland R.A. et Ziegler A.D.**, 1996. « Geotextile effectiveness in reducing interrill runoff and sediment flux », *Erosion Control Technology : bringing it home*, Proceeding of Conference XXVII, International Erosion Control Association, 27 février-1mars, Seattle, WA, 393-405.
- Sutherland R.A. et Ziegler A.D.**, 1997. « A field examination of rolled erosion control systems and their influence on runoff and sediment transport », *Working in Harmony*, Proceedings of Conference XXVIII, International Erosion Control Association, 25-28 février, Nashville, TN, 301-315.
- Sutherland R.A., Menart T. et Perry J.L.** « The influence of rolled erosion control systems on soil moisture content and biomass production : Part II. A Greenhouse experiment », *Land Degradation and development*, 1998a, **9**, 217-231.

- Sutherland R.A., Menart T., Perry J.L. et Penn D.** « The influence of rolled erosion control systems on soil temperature and surface albedo : Part I. A Greenhouse experiment ». *Land Degradation and development*, 1998b, **9**, 159-178.
- Sutherland R.A., Wan Y., Ziegler, A.D., Lee C-T et El-Swaify S.A.** « Splash and wash dynamics : An experimental investigation using an Oxisol », *Geoderma*, 1996, **69**, 85-103.
- Sutherland R.A., Ziegler, A.D. et Tran L.T.,** 1997. « Rolled erosion control systems and their effect on sediment redistribution by rainsplash : a laboratory investigation », Working in Harmony, Proceedings of Conference XXVIII, International Erosion Control Association, 25-28 février, Nashville, TN, 427-443.
- Tanner C. et Shen Y.** « Water vapor transport through a flail-chopped corn residue ». *Soil Science Society of America journal*, 1990, **54**, 945-951.
- Thomsen I.K., Oleson J.E., Schjonning P., Jensen B.T., Christensen B.T.** « Net mineralization of soil N and 15N-ryegrass residues in differently textured soils of similar mineralogical composition ». *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, **33**, 277-285.
- Thomson J.C.** and Ingold T.S., 1986. « Use of jute fabrics in erosion control ». *Report to the jute Market Promotion (Western Europe) Project*, International jute Organisation (IJO), International Trade Center, UNCTAD/GATT. Project No. RAS/77/04.
- Tilman D.** « Constraints and tradeoffs: toward a predictive theory of competition and succession », *Oikos*, 1990, **58**, 3-15.
- Tolk J.A., Howell T.A., Evett S.R.** « Effect of mulch, irrigation and soil type on water use and yield of maize ». *Soil & Tillage Research*, 1999, **50**, 137-147
- Topp, G.C.** « Chap. 51 : Soil water content" dans "C.M. R (Editor), Soil sampling and methods of analysis ». Lewis Publisher, Boca Raton, 1993, 541-557.
- Troen Ib. et Lundtang Petersen E.** « Atlas Éolien Européen ». Risoe National Laboratory, Risoe, Denmark, 1991.
- Unger P. et Parcker J.** « Evaporation reduction from soil with wheat, sorghum and cotton residue ». *Soil Science Society of America journal*, 1976, **40**, 938
- Unger P.W.** « Straw mulch effects on soil temperature and sorghum germination and growth ». *Agron. J.*, 1978, **70**, 858-864.
- Urbanska K.M. et Schütz M.** « Reproduction by seed in alpine plants and revegetation research above timberline ». *Bot. Helv.*, 1986, **96**, 43-60.
- Urroz G.E. et Israelsen C.E.,** 1993. « Evaluation of Selected Erosion Control products using Three Different Slopes and Various Rates and Durations of Simulated Rainfall – North American Green » Utah Water Research Laboratory, Utah State University, Logan, UT.
- Urroz G.E. et Israelsen C.E.,** 1995. « Effectiveness of Selected Erosion Control Materials Under Simulated Rain and Sunlight ». Utah Water Research Laboratory, Utah State University, Logan, UT.
- Valentin C. et Bresson L.** « Morphology, genesis and classification of surface crusts in loamy and sandy soils ». *Geoderma*, 1992, **55**, 225-245.
- Van de griend A. et O'Neil P.,** 1986. « Discrimination of soil hydraulic properties by combined thermal infrared and microwave remote sensing ». Dans IGARSS'86 Symposium, pp. 839-845, ESA SP-254, Zurich

- Van Genuchten M.T.** « A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils ». *Soil Science Society American Journal*, 1980, **14**, 892-898.
- Vandervaer J., Vauclin M., Haverkamp R., Peugeot C., Thony J et Gilfedder M.** « Prediction of crust-induced surface runoff with disc infiltrometer data ». *Soil Science*, 1998, **163**, 1, 9-21.
- Varadan K. et Rao A.** « Effect of mulch on soil temperature in humid tropical latosols under coconut (*cocos nucifera* linn) and banana (*musa paradisiaca*) ». *Agricultural Meteorology*, 1983, **28**, 375-386.
- Verhoef A., De Bruin H.A.R. et Van den Hurk B.J.M.** « Some practical notes on the parameter kB-1 for sparse vegetation ». *J. Appl. Meteorolo.*, 1997, **36**, 560-572
- Viles H.A.** « The agency of organic beings': a selctive review of recent work in biomorphology ». *Vegetation and erosion: processes and environments*. Ed. J.B. Thornes. Chichester, John Wiley & Sons Ltd, pp 5-24
- Waggoner P, Miller M. et N.C. De-Roo**, 1960. « Plastic mulching principles and benefits ». *Conn. Agric. Exp. Stn. Bull.*, 634.
- Warloulzel K.** « Caractérisation et comportement des géotextiles pour la lutte contre l'érosion pluviale des sols : étude des mécanismes de protection et compatibilité avec la végétation ». 210p., Thèse de doctorat : Géomécanique, Géophysique, Géochimie, UJF, 1999
- Watts D.B., Kanemasu E.T., Tanner C.B.** « Modified heat-meter method for determining soil heat flux ». *Agric. Forest Meteor.*, 1990, **49**, 311-330
- Woo M., Fang G., DiCenzo P.D.** « The role of vegetation in the retardation of rill erosion ». *Catena*, 1997, **29**, 145-159
- Young et Wiersma.** « The role of rainfall impact in soil detachment and transport ». *Water resources research*, 1973, **9**, 6, 1629-1636
- Zachmann J. et Linden D.** « Earthworm effects on corn residue breakdown and infiltration ». *Soil Science Society of America Journal*, 1989, **53**, 1846-1849.
- Zachmann J. et Linden D.** « Macroporous infiltration and redistribution as affected by earthworms, tillage and residues ». *Soil Science of America Journal*, 1987, **51**, 1580-1586.

ANNEXE 1

COMPOSITION ET ASPECT DES DIFFERENTS RECS DES FIGURES 2.3, 2.4, 2.5 AINSI QUE DES TABLEAUX 2.1, 2.2 ET 2.4

TYPE	COMPOSITION	ASPECT	ISRAESEN ET URROZ (1993, 1995)	KRENITSKY ET CARROLL (1994)	HOLDRIDGE (1996)	SUTHERLAND ET ZIEGLER (1996)
Staw	Paille	"Epanchage"		x		
S75	100% paille	Matelas	x			
S150	100% paille	Matelas	x			
S150BN	100% paille	Matelas	x			
SC150BN	100% paille	Matelas	x		x	x
S1	100% paille	Matelas (OA=10)	x			
S2	100% paille	Matelas (OA=10)	x		x	
CS2	70% paille, 30%coco	Matelas			x	
SC150	70% paille, 30% coco	Matelas	x			
C125	100% coco	Matelas		x		x
BioD-40	100% coco	Matelas				x
BioD-70	100% coco	Matelas				x
BioD-Mesh	100% coco	Matelas				x
De KoWe 400	100% coco	Géotextile (OA=65)	x			
DeKoWe700	100%coco	Géotextile (OA=50)		x		
Curlex I	100% excelsior	Matelas		x		x
Curlex II	100% excelsior	Matelas			x	
Curlex III	100% excelsior	Matelas	x		x	
Geojute	100% jute	Géotextile (OA=60)	x	x		x
Futerra	100% laine	Matelas	x			x
PEC MAT	100% PVC	Matelas				x
TB1000	100% Polyolefin	Géotextile				x
P300	100% Polypropylène	Matelas				x
Multimat	100% Polypropylène	Strusture 3D				x
SuperGro	100% Polypropylène	Geocomposite				x
407 GT	100% Polypropylène	Géotextile			x	
Terrajute	100% Polypropylène	Géotextile				x

OA pour « Open Area », le ratio d'espace ouvert [%]

ANNEXE 2

ESSAIS DE TRACTION SUR DES GEOTEXTILES EN JUTE

(Juillet 2001)

La résistance des géotextiles naturels est parfois insuffisante pour faire face aux contraintes du milieu. Le géotextile peut notamment se déchirer sous l'effet d'une forte pente ou de la neige qui le recouvre (reptation). Il nous a paru intéressant de comparer les résistances à la traction de deux types de géotextile en jute qui se différencient par le mode de fabrication de leurs brins : par filage ou tressage. Pratiquement, on a réalisé des essais de traction sur les brins eux-mêmes et sur des échantillons de toiles tissées à partir de ces brins.

1 Principe du dispositif de mesure

Les essais de traction peuvent être réalisés avec une presse à traction : Figure 1.

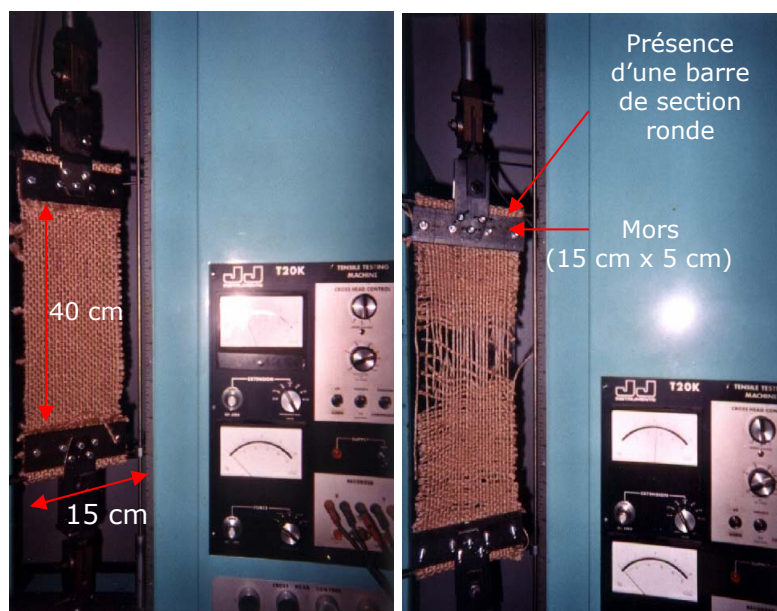


Figure 1. Presse à traction (IUT de Génie Civil - Université Joseph Fourier-Grenoble) avec un échantillon de géotextile en jute tressée d'ouverture 0 avant le démarrage de l'essai (à gauche) et à la rupture (à droite)

On a utilisé une presse de traction de type TK20 (J.J.Lloyds Instruments). Cette machine est équipée d'un capteur de force qui peut mesurer un effort de traction allant

jusqu'à 20 kN. Le capteur transmet à une table de traçage (Figure 2) une tension proportionnelle à la force (2 Volts correspond à la pleine échelle soit 20 kN pour un signal non amplifié).

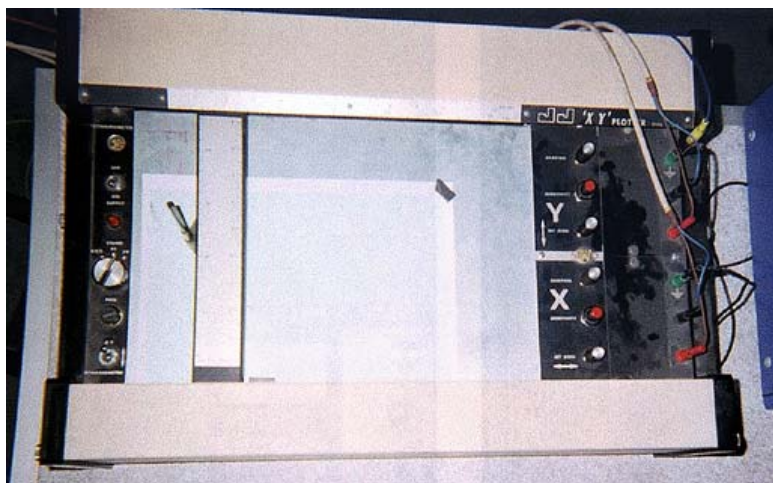


Figure 2. Table de traçage (IUT de Génie Civil - Université Joseph Fourier - Grenoble)

2 La préparation des échantillons

Les brins ont été prélevés directement sur les toiles correspondantes.

Les échantillons de toile ont été quant à eux découpés dans la toile par morceaux de 15 cm de large et 60 cm de long. A chaque extrémité, 15 cm de tissé a été réservé à la fixation des échantillons sur les mors : voir Figure 1. Les 15 cm ont été préalablement repliés en deux puis collés avec de la colle Araldite. Le temps de pose est de 48 heures. Des trous de 6 mm de diamètre ont ensuite été percés pour fixer les échantillons sur les mors avec des vis. Deux barres de section ronde ont ensuite été placées à l'intérieur des bourrelets aux deux extrémités de l'échantillon, pour éviter le glissement de la toile sous l'effet de la traction.

Pour les essais à saturation, on a procédé par immersion des brins ou des échantillons de toile avec un temps de mouillage de 24 heures : voir au §4.3.2.2 la partie relative à la *capacité de rétention* en eau des géotextiles en jute.

3 La conduite d'une expérience

On commence par paramétrer la table de traçage : un bouton pour chaque axe (abscisse et ordonnée) permet de régler l'échelle papier, une pression sur ces boutons envoie une tension de 1 volt soit la moitié de la pleine échelle. Un bouton de sensibilité permet alors d'affiner le réglage.

Ensuite, l'échantillon est fixé sur la presse à traction puis on débute l'essai. Dans notre cas, la vitesse de traction a été maintenue constante à 10 mm.min^{-1} .

4 Les essais réalisés et le traitement des résultats

On a réalisé des essais à sec et à saturation sur les brins et sur les échantillons de toile des deux types de jute - le jute filé et le jute tressé - : voir Tableau récapitulatif 1.

Mode de fabrication	Type d'échantillon	Ouverture	Etat hydrique	Nb Rép.	Grandeurs mesurées
Jute filé	Brin	-	Sec	10	- Longueur initiale [cm] - Tension maximale [N] - Résistance à la traction $[\text{N.m}^{-1}]$ (par mètre linéaire)
		-	saturation	10	
	Echantillon de toile	0	Sec	10	
		1	Saturation	10	
Jute tressé	Brin	-	Sec	5	
		-	saturation	10	
	Echantillon de toile	0	Sec	5	
		1	Saturation	10	

Tableau 1. Récapitulatif des essais réalisés

Le nombre de répétition a été décidé suite à l'analyse des premiers résultats en regardant les écarts-types obtenus.

Concernant le traitement des données, on a considéré la valeur moyenne de la résistance à la traction $[\text{N.m}^{-1}]$ et l'écart-type.

5 Exemples de résultats

Les Tableaux 2 et 3 récapitulent les essais réalisés sur les brins tressés et filés, à sec et à saturation et les Figures 3 et 4 sont des exemples de graphiques obtenus sur ces mêmes brins à sec et à saturation.

N° essai	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Brins filés secs										
Longueur initiale [cm]	33	34.5	34.5	41	29.5	31	33	31	38	40.7
Tension maximale [N]	433	353	388	355	358	252	355	428	345	369
Résistance à la traction [N.m ⁻¹]	1312	1023	1125	866	1214	813	1076	1381	908	907
Moyenne [N.m ⁻¹]	1062									
Ecart type	195									
Brins tressés secs										
Longueur initiale [cm]	42.5	44	50.8	44	46.2					
Tension maximale [N]	300	373	383	340	328					
Résistance à la traction [N.m ⁻¹]	706	848	754	773	710					
Moyenne [N.m ⁻¹]	758									
Ecart type	58									

Tableau 2. Essais de traction sur brins secs

N° essai	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Brins filés saturés										
Longueur initiale [cm]	29.2	31.5	40.6	34	33.3	41.4	34.4	31.6	28.2	38.5
Tension maximale [N]	235	177	150	290	98	133	130	73	55	46
Résistance à la traction [N.m ⁻¹]	805	562	369	853	294	321	378	231	195	119
Moyenne [N.m ⁻¹]	413									
Ecart type	250									
Brins tressés saturés										
Longueur initiale [cm]	36.9	42.7	42.6	43.4	43.5	26.6	25.6	33.7	24	22.1
Tension maximale [N]	303	375	290	298	335	253	293	358	355	318
Résistance à la traction [N.m ⁻¹]	821	878	681	687	770	951	1145	1062	1479	1439
Moyenne [N.m ⁻¹]	991									
Ecart type	288									

Tableau 3. essais de traction sur brins saturés

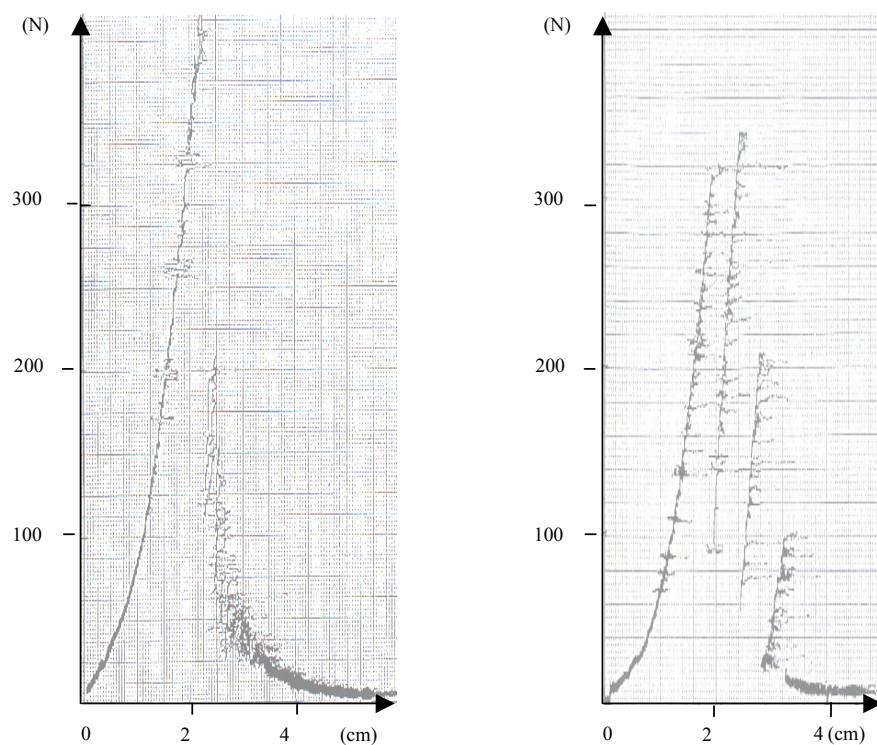


Figure 3. Exemples de courbe force / déplacement en traction unidirectionnelle d'un brin filé (à gauche) et tressé (à droite) à sec

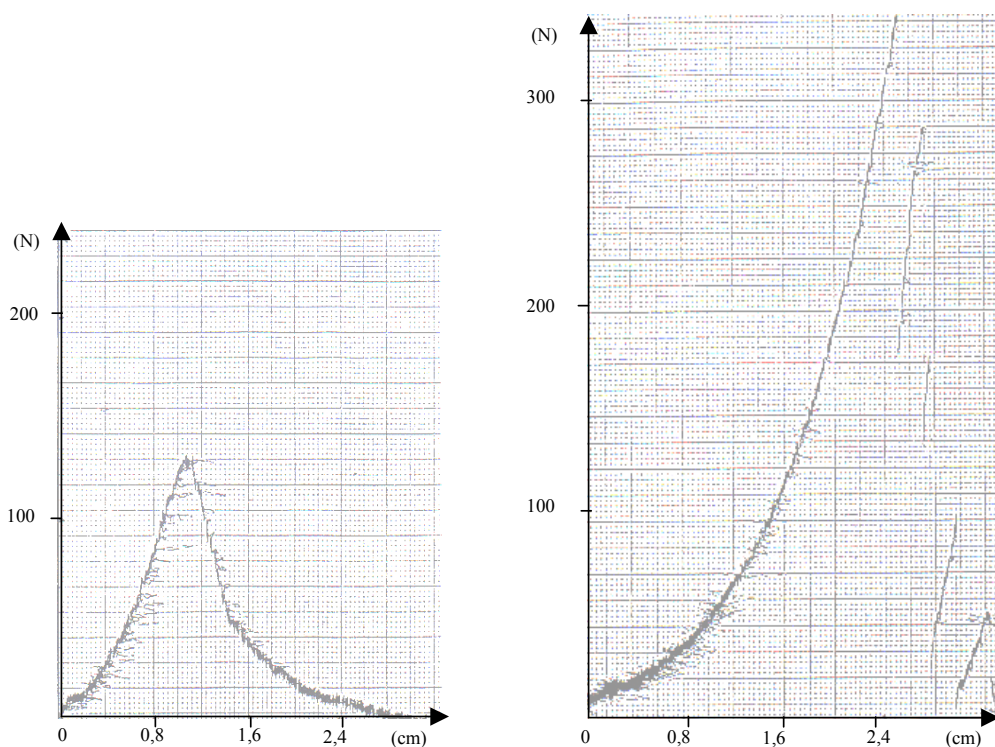


Figure 4. Exemples de courbe force / déplacement en traction unidirectionnelle d'un brin filé (à gauche) et tressé (à droite) à saturation

6 Interprétation des principaux résultats : aperçu synthétique

On a constaté que les géotextiles aux brins filés sont à sec plus résistants que les géotextiles aux brins tressés.

Filés, les brins cèdent en une ou deux fois puis les fibres glissent les unes sur les autres, la tension diminue alors régulièrement en fonction du temps : voir Figure 3 gauche. Tressés, les brins sont composés de 4 fils entrelacés et chaque fils va rompre à son tour jusqu'à la rupture complète du brin : voir Figure 3 droite.

L'eau intervient comme un élément perturbateur. Ainsi, avec 10 essais, l'écart type est 4 fois plus élevé pour les échantillons saturés en eau par rapport aux échantillons secs.

L'eau détruit complètement les propriétés mécaniques des brins filés (Figure 4 gauche), ce qui pourrait expliquer des échecs constatés de la végétalisation avec géotextile en milieu naturel par déchirement des produits. En effet, les pluies se succèdent in situ. De l'eau peut aussi être fournie en abondance au géotextile par la fonte des neiges au printemps. La résistance à la traction des brins filés devient en moyenne 2,5 fois plus faible lorsque l'échantillon est saturé en eau. On peut remarquer que la rupture des brins n'est plus classique (montée en tension puis rupture et chute de tension) mais que la déformation devient continue.

Concernant les brins tressés, leur résistance à la traction est beaucoup moins sensible à la présence d'eau : voir Figure 4 droite.

Concernant les échantillons de toile, l'ouverture a de toute évidence une grande importance. Le passage de l'ouverture 0 ($ouv0 = 0 \text{ cm}^2$) à l'ouverture 1 ($ouv1 = 1 \text{ cm}^2$) conduit à une baisse de résistance de 45% en moyenne à l'échelle de la toile.

ANNEXE 3
CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES FIBRES DE JUTE ET DE POLYPROPYLENE :
QUELQUES DEFINITIONS

- La *masse volumique* [g.cm⁻³] est ici reliée à la section et au titre du fil (masse par unité de longueur) suivant la relation :

$$\text{Masse volumique (g / cm}^3\text{)} = \frac{\text{Titre (Tex)}}{\text{Section (cm}^2\text{)} \times 10^5}$$

- La *reprise en humidité* [%] correspond à la masse d'eau que le textile reprend après conditionnement préalable, lorsqu'il atteint l'équilibre avec l'atmosphère normale (20°C – 65% HR).
- Le *taux de sorption d'eau* [%] correspond à la quantité d'eau sorbée par le textile rapportée à 100g du textile déshydraté après conditionnement à l'équilibre à 95% HR.

La sorption d'eau d'un produit textile est la moyenne arithmétique entre :

- La masse d'eau [g] retenue par une certaine quantité d'un produit textile en équilibre hygrométrique avec une atmosphère déterminée. Cette masse d'eau rapportée à 100 g de ce produit textile à l'état déshydraté représente le *taux d'absorption* [-].
 - La masse d'eau [g] retenue par la même quantité du même produit textile en équilibre hygrométrique avec la même atmosphère, l'équilibre étant obtenu à partir du produit textile amené préalablement dans un plus grand état d'humidité que celui correspondant à l'équilibre. Cette masse d'eau rapportée à 100 g de ce produit textile à l'état déshydraté représente le *taux de désorption* [-].
- La *ténacité* est la force de rupture rapportée à la masse linéique du fil avant l'essai de traction. Elle s'exprime en N.Tex⁻¹.

ANNEXE 4

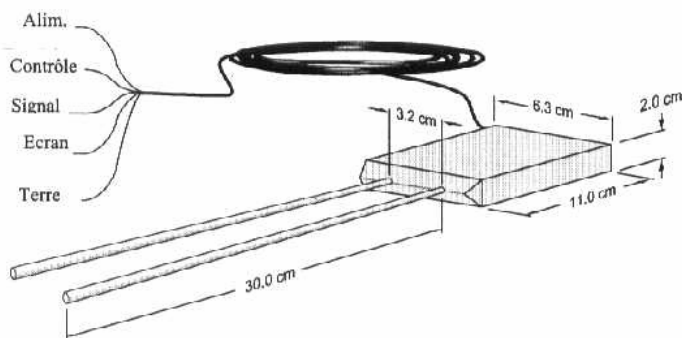
COUT DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL : LISTE DU MATERIEL, TARIFS DES APPAREILS DE MESURE ET PRINCIPAUX FOURNISSEURS

TYPE DE MATERIEL	PRIX UNITAIRE (HT) En franc	QTE	FOURNISSEUR
Capteur de température et d'humidité de l'air Vaisala (HMP45C)	2821.00	1	Campbell
Capteur de rayonnement net (NR-LITE)	5779.00	1	Campbell
Anémomètre (A 100R)	3306.00	1	Campbell
Sonde Rotronic (HP-155C)	5160.00	4	PB Mesures
Lot de 10 Thermocouples T Classe 1	1912.00	2	TC S.A.
Sonde capacitive HMS9000	2950.00	4	SDEC
Tensiomètre SKT850	780.00	12	SDEC
Cannes tensiométriques SMS 2030S3	241.50	12	SDEC
Sonde TDR (CS615)	1615.00	4	Campbell
Station d'acquisition des données CR10X-2M	9374.00	1	Campbell
Coffret de protection de la station	1410.00	1	Campbell
Multiplexeur AM 25T	5791.00	1	Campbell
Multiplexeur AM416	3791.00	1	Campbell
Connecteur RS232	925.00	1	Campbell
Câble ruban SC25AT	98.00	1	Campbell
Logiciel PC 208W	2040.00	1	Campbell
Ventilateur	≈800.00	3	AED
Bac en plexiglas	720.00	3	CGD Plastique
Néon fluora (L= 1.20m ;36W)	64.80	19	Isnard
Tables et supports	1995.00	1	Ettax
TOTAL	98103.20 francs (14955.73 euros)		

ANNEXE 5

FICHES TECHNIQUES DES PRINCIPALES SONDES DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Réfectomètre de teneur en eau CS615



Mesures de précision de teneur en eau du sol à faible coût

Description

Le réfectomètre de teneur en eau CS615 mesure la teneur volumique en eau des milieux poreux en utilisant les méthodes de mesures temporelles. Un testeur de câble du type Tektronix 1502B n'est pas nécessaire.

La sonde est constituée de deux tiges d'acier inoxydable connectées à un PCB. Un câble blindé quatre conducteurs est connecté au circuit pour alimenter et activer la sonde, et surveiller la sortie impulsion. Le circuit est enveloppé dans un bloc d'époxy.

Installation

Les tiges peuvent être enfoncées depuis la surface. La sonde complète peut être enterrée sous n'importe quel angle.

Le réfectomètre se connecte à une entrée unipolaire de la centrale d'acquisition CR10/10X ou CR500 et est mesuré par l'instruction mesure de période. (L'entrée impulsion des centrales d'acquisition CR10/10X, 21X ou CR7 peut être utilisée dans certaines applications. Voir la note sur l'interférence électromagnétique au dos).

Mesures

La réponse du CS615 dépend de la constante diélectrique du milieu entourant les tiges. L'eau est le principal agent affectant la conductivité diélectrique, cependant certains constituants solides tels que le quartz, l'argile et la matière organique affectent également la conductivité diélectrique. Ainsi la même courbe de calibrage peut ne pas être applicable à tous types de sols. Cependant la précision peut être optimisée en utilisant une courbe de calibrage spécifique au sol.

Un premier calibrage fourni avec la commande du CS615 offre une précision jusqu'à $\pm 4\%$, selon le type de sol. Le calibrage sur un sol donné améliore la précision de façon significative.

Fonctionnalités clés

Ne nécessite pas de testeur de câble onéreux

Sondes robustes, non sujettes à détérioration par le gel

Faible coût

Connexion directe à la centrale

Calibrage stable

Longs câbles disponibles

Simple d'utilisation

Applications typiques

Recherche agronomique

Recherche forestière et écologique

Génie civil

Etudes de prévision d'avalanche

Mode de fonctionnement

Des composants électroniques à vitesse rapide du circuit électronique sont configurés comme un multivibrateur bistable. La sortie de ce multivibrateur est connectée aux tiges qui deviennent alors un support de propagation d'ondes.

Lorsque le multivibrateur change d'état, la transition voyage le long des tiges et est réfléchiée à l'extrémité de la tige. Cette réflexion fournit une réaction qui commute l'état du multivibrateur et initie une nouvelle propagation dans les tiges. Le temps de trajet aller et retour jusqu'à la fin des tiges dépend de la conductivité diélectrique du milieu entourant les tiges qui elle-même dépend principalement de la teneur en eau.

Un circuit numérise la sortie du multivibrateur à une fréquence appropriée à la centrale d'acquisition. La mesure de la période ou de la fréquence par la centrale est alors convertie en teneur volumique en eau à l'aide des courbes de calibrage.

Autres produits

La CS615 offre plusieurs avantages par rapport aux autres méthodes de mesure de teneur en eau. Elle est plus robuste, plus précise et possède un calibrage plus stable que les *blocs d'humidité du sol* (blocs de gypse et sondes Watermark).

Le système TDR de mesure de la teneur en eau des sols de Campbell Scientific vous permet de voir la courbe complète de réflectométrie. Ceci peut être utile pour détecter des problèmes. Il permet aussi de déterminer la conductivité totale du sol et offre une précision supérieure dans les sols salins. Cependant son coût est sensiblement plus élevé que la CS615 (lorsque peu de sondes sont nécessaires) et a une consommation en courant élevée.

Bien que le TDR offre une plus grande flexibilité en longueur de sondes et dans leurs configurations, la CS615 est simple d'utilisation et fournit une mesure similaire pour la plupart des types de sols.

Calibrage

Effet de la Température

L'effet de la température sur la mesure a été évalué sur la plage de +10°C à +30°C sur des échantillons de sols à teneur en eau constante et une simple correction dérivée de la température. L'application de ces champs de correction produit une différence maximale entre la teneur en eau volumique corrigée et non-corrigée d'approximativement 1,6%. En considérant la précision de la mesure et la variabilité spatiale potentielle de la température du sol tout au long des tiges du capteur, la correction n'est pas nécessaire dans la plupart des cas.

Sols sableux

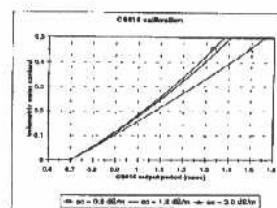
Comme pour les autres mesures TDR, l'utilisation de la sonde CS615 dans les sols avec des teneurs atypiques en matière organique ou des fractions en quartz atypique nécessite un ajustement du calibrage. Ceci est lié à la valeur de la conductivité électrique qui est intrinsèquement élevée lorsque le sol est sec. La dérive du résultat peut être compensée par un ajustement d'ordre zéro de la courbe de calibrage.

Sols argileux

Comme pour les autres mesures TDR, un calibrage spécifique peut être nécessaire pour les sols à haute teneur en argile. Le calibrage porte sur la teneur en eau et l'effet de la température.

Sols salins

Les mesures sur sols salins (conductivité électrique de la solution du sol >1dSm⁻¹) montre une dérive de la pente de la courbe de la teneur en eau en fonction de la période du signal de la sonde CS615. Alors qu'une seule courbe de calibrage suffit pour les sols minéraux non salins, un calibrage spécifique est nécessaire pour optimiser la mesure dans un sol salin. Le signal de sortie de la sonde devient instable à des salinités supérieures à 5dSm⁻¹.



Courbes de calibrage du CS615

Caractéristiques

Précision

±2% à partir d'une courbe de calibrage spécifique à un sol non gelé (la précision obtenue avec un calibrage général dépend de la texture et composition minérale du sol; typiquement <±3 pour une teneur en eau >12%).

Résolution

Avec l'instruction de mesure de période (CR10/10X ou CR500): ±0,0001% de teneur en eau volumique (vvc) 10⁻⁶m³m⁻³

Avec l'instruction comptage d'impulsion (Instruction 3): ±0,01% vvc (10⁻⁴m³m⁻³) avec un intervalle d'exécution de 1s, ±1v.n.c. (10⁻²m³m⁻³) avec un intervalle d'exécution de 0,1s.

Sortie

Train d'impulsions d'ondes carrées d'amplitude ± 2,5V CC par rapport à la masse de l'alimentation.

Besoins en alimentation:

70mA à 12VCC pendant la mesure

Longueur de câble

La longueur maximale disponible est de 100m. La longueur est limitée par la sensibilité à la destruction par la foudre. Des distances plus importantes peuvent être atteintes en utilisant un boîtier de jonction entre la centrale et la sonde CS615. Le boîtier de jonction assure une terre.

Dimensions

Tiges: longueur 300mm; diamètre 3,2mm; espacement 32mm

Tête: 110 x 63 x 20mm

Poids:

Sonde: 280g / Câble: environ 35gm⁻¹

Compatibilité Electromagnétique (CEM)

La CS615 satisfait aux exigences générales de protection de la directive de l'UE sur la CEM, en ce qui concerne les émissions. Quand elle est utilisée selon les indications du manuel d'instruction, et avec une CR10/10X, la sonde CS615 répond aux normes de l'UE suivantes:

IEC 801-2: Décharge Electrostatique

IEC 801-3: Energie électromagnétique radiée

IEC 801-4: Transitoires rapides

Pour toute assistance en mesure d'humidité des sols, veuillez nous contacter.

Caractéristiques - Performances - Connexions.

Page 17.0

PERFORMANCES

Profondeur de mesure : de 25 mm à plusieurs mètres.
Type de mesure : permittivité diélectrique du sol (excellente corrélation avec la teneur en eau du sol).
Résolution : 0,025 point de permittivité (0,1% d'humidité volumique).
Précision : typique après étalonnage, meilleure que $0,02 \text{ m}^3/\text{m}^3$.
Zone d'influence : ≈ 25 à 30 mm.
Gamme de mesure : de 0 % à la valeur de saturation en eau du sol (Humidité volumique du sol : Hv).
Mesure de la température : (A l'endroit exact de la mesure de permittivité) de -10°C à $+54^\circ\text{C}$, sur sortie indépendante (4-20 mA). Dispositif de réjection de l'influence de la salinité.
Conductivité maxl. admise : $\approx 5 \text{ mS/cm}$.

CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES

Alimentation électrique : de 0 V à 24 Volts Continu.

Nombre de sorties : trois (3).

* S1 : 4-20 mA : permittivité diélectrique du sol.

* S2 : 4-20 mA : température du sol.

* S3 : RS 232 / 5 Volts. Connection MICROTERM 4800

Gestion : par micro-contrôleur (microprocesseur).

Géométrie de mesure : par couple d'électrodes

- Electrode 1: annulaire.
- Electrode 2: pointe (2 Longueurs au choix)

Diamètre du corps de sonde : 22 mm.

Poids : 150 grammes (sonde HMS 9000).

Longueur des câbles de sortie :

* Choix utilisateur (1 à 300 mètres) (pour 2 x 4-20mA)

* 2,5 mètres pour la sortie RS 232 (Longueur maxl. possible pour cette connexion : 5,00 mètres).

(le câble 2 x 4-20mA est livré nu à son extrémité. Le câble RS 232 est livré monté avec une micro-prise étanche IP 65).

Lecture sur sortie RS 232 : pour une connection sur un micro-boîtier livrable en option avec l'équipement. (boîtier MICROTERM 4800).

Boîtier MICROTERM 4800 : boîtier connectable sur la prise RS 232 de HMS 9000. Ce boîtier permet la lecture instantanée de l'humidité Volumique du sol, de la permittivité diélectrique du sol, de la température du sol, des paramètres d'étalonnage de sols, des paramètres d'étalonnage de la sonde, de la tension de batterie du MICROTERM 4800.

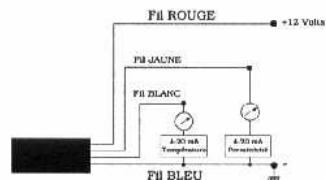
Alimentation du Boîtier MICROTERM 4800 : par pile alcaline type 9 volts (type PP3) ou accumulateurs Ni/Cd. (Voir page 21.0)

Le boîtier MICROTERM 4800 possède un afficheur de type rétro-éclairé, qui lui permet de pouvoir être lu en nuit noire. **ATTENTION** cependant, lorsque l'écran est en position rétro-éclairée, la consommation électrique est multipliée par 6 ! (Voir caractéristiques détaillées du MICROTERM 4800 en page 21.0.)

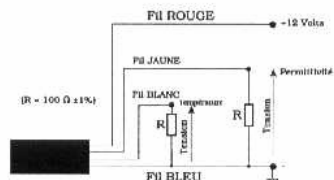
Rallonge : par longueur de 25 cm, 50 cm, 1 ou 2 mètres.

BRANCHEMENTS/CONNECTIONS

BRANCHEMENT DE LA SONDE "HMS 9000" AVEC SORTIES EN COURANT



BRANCHEMENT DE LA SONDE "HMS 9000" AVEC SORTIES EN TENSION



La sonde HMS 9000 peut être alimentée de 8,00 Volts à 24,00 Volts continus.

Equations de passage sur les sorties 4-20 mA :

$$E = (I_p - 4) \times 2,5$$

$$T(^{\circ}\text{C}) = (I_t - 4) \times 10$$

(*) I_p & I_t sont ici exprimés en mA.

ATTENTION : le blindage du câble n'est relié à aucun point électrique dans la sonde. Ce blindage sert à une éventuelle protection électromagnétique en cas de parasites électriques extérieurs. Ce blindage sera alors relié à la masse mécanique de la centrale d'acquisition afin de garantir une bonne efficacité.

CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES (suite)

Étanchéité : étanche sous 2 mètres d'eau. (IP68) Cette caractéristique concerne la sonde HMS 9000 mais en aucun cas le boîtier MICROTERM 4800.

Étalonnage : de type programmable.

- Pré-étalonnage en usine pour la sonde (comme permittivimètre).

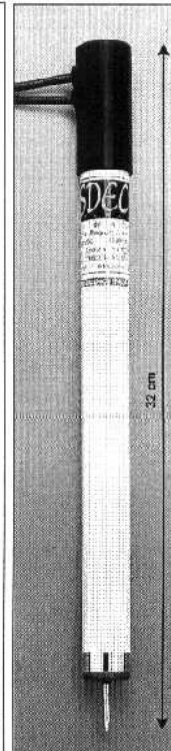
- Etalonnage type "gravimétrique" pour les sols explorés (voir page 22.0)

Température d'utilisation : de -10°C à $+54^\circ\text{C}$ Celsius.

Température de stockage : de -25°C à $+70^\circ\text{C}$ Celsius.

ATTENTION :

Ne jamais exposer la sonde à un rayonnement solaire direct au travers d'une paroi en verre et dans un environnement totalement clos. (plage arrière d'un véhicule automobile). Le risque est ici d'atteindre la température limite supérieure du PVC (matière enveloppante extérieure de la sonde) et de déformer le boîtier de la sonde. Cette déformation entraînerait une perte définitive de l'étanchéité de la sonde.



Caractéristiques - Performances - Connexions.

"HMS 9000" - étalonnage de la sonde

La sonde HMS 9000 est étalonnée en usine en fin de fabrication. Cet étalonnage concerne la partie "PERMITTIVIMÈTRE".

PERMITTIVIMÈTRE : issu d'une méthode proposée par l'INRA, l'étalonnage de la sonde est basé sur des permittivités "étalons" mesurées dans des alcools spécifiques.

Par exemple, dans un volume d'alcool suffisant (2 litres) et une température ambiante égale à 25°C, votre permittivimètre doit donner 24,3 dans un alcool "ETHANOL" et 32,6 dans un alcool "METHANOL" (ces valeurs théoriques sont données par la littérature et servent d'étalon pour le permittivimètre-humidimètre HMS 9000). Nous rappelons que la permittivité de l'air sec est de 1,00 dans les conditions de mesures précisées plus haut.

SDEC France réalise l'étalonnage des "HMS 9000" grâce à la méthode des alcools. Cette méthode peut être appliquée par l'utilisateur n'importe quand, en plongeant le permittivimètre dans un alcool de référence. Cet étalonnage est réalisable très facilement grâce à MICROTERM 4800. Nous contacter pour caractéristiques des étalons.

THERMOMÈTRE : l'étalonnage est ici classique et réalisé grâce à un étalon de température (PT100). La sonde de température est en contact intime avec l'électrode pointe du HMS 9000 mais du fait de la mauvaise conductivité de l'acier INOX, il est préférable d'effectuer une mesure de température après une mise en équilibre de 30 minutes de la sonde "HMS 9000" dans le sol. (pour une première installation de la sonde). Ce temps d'attente n'existera bien sûr plus dès lors que la sonde sera en place dans le sol et en parfait équilibre thermique avec le milieu.

"HMS 9000", mise en fonctionnement.

HMS 9000 est livré étalonné et prêt à fonctionner. Si vous avez acheté le module MICROTERM 4800 en même temps que la (ou les) sonde(s) HMS 9000, il vous suffit de brancher celui-ci sur la sonde (voir fig. 1 ci-contre). Pousser l'interrupteur du MICROTERM sur "Marche". L'afficheur présente automatiquement deux lignes, soit :

Permittivité : 1,00 (par exemple)
Température : 25°C (par exemple)

La permittivité affichée ici est celle réglée en usine et correspond à la permittivité mesurée dans l'air. Vous pouvez ajuster cette valeur (voir plus bas) si celle-ci présente un écart > 0,1 pt de E. La température affichée ici est celle mesurée par l'électrode "pointe" en acier INOX située en bas de la sonde. Dans l'air, cette mesure représente la température ambiante.

Presser alors une fois sur le bouton poussoir "MENU" pour accéder aux deux lignes suivantes :

Humidité volumique : 21,5 % (dépend des coeff. "A" et "B")

Tension batteries : 8,75 V (par exemple)

La tension batteries mesure le niveau de la pile (9,00 Volts) qui alimente le MICROTERM 4800. Le boîtier MICROTERM 4800 est un boîtier de contrôle qu'il faut éviter de laisser brancher sur la sonde HMS 9000 plus de quelques minutes, au risque de décharger la pile de 9V.

ATTENTION : voir page 21.00. MICROTERM 4800 et son alimentation électrique.

La sonde HMS 9000 utilisée sur le terrain sera connectée à une centrale d'acquisition qui apportera en régime continu, l'alimentation en énergie électrique de cette sonde.

L'humidité volumique affichée par l'appareil est obtenue grâce à un étalonnage de terrain (type gravimétrique) que l'utilisateur aura pris soin de réaliser au préalable. Pour l'exemple ici, la valeur d'Hv (humidité volumique) donnée par MICROTERM 4800 correspond à des coefficients arbitraires rentrés en usine (coeff. "A" & coeff. "B") mais ne correspondant pas forcément à votre type de sol. Il ne faut donc pas se fier à ces coefficients qui n'ont ici que valeur d'exemple. (voir § Coefficients Hv - "A" & "B". ETALONNAGE des sols).

L'accès au réglage des paramètres d'étalonnage (sonde et sol) se fait en appuyant pendant 2 secondes (minimum) sur le bouton poussoir "MENU".

L'étalon 1 (typique "AIR") peut être ajusté par pas de 0,1 point en réglant grâce aux boutons poussoirs "+" ou "-" Le pas s'incrémente toutes les 0,5 sec. environ. Au bout de 3 sec., le pas s'accélère (0,1pt/0,16sec). (la plage de réglage va de 1 à 25,5 points).

Après avoir obtenu la valeur étalon recherchée, il sera nécessaire d'appuyer pendant 2 sec. (minimum) pour valider ce choix (enregistrement de la valeur dans la mémoire d'HMS 9000).

Même PROCÉDURE pour étalonner dans l'ETHANOL (si nécessaire)

ATTENTION : il n'est pas nécessaire de ré-étalonner systématiquement la sonde (coeff.1 & coeff.2). Cet étalonnage (fait en usine) ne doit, en fait, pratiquement jamais varier.

Coefficients d'Hv (humidité volumique) :

Après l'étalonnage gravimétrique de terrain et l'utilisation de l'équation d'humidité de type :

$$C = A \cdot Hv + B$$

Réglage du coeff. A : en appuyant sur la touche "+" ou "-" (plage de réglage réelle : de 20 à 71) - Coefficients affichables : 0,2 à 51,00

Réglage du coeff. B : en appuyant sur la touche "+" ou "-" (plage de réglage réelle : de -10 à +15,5). Coefficients affichables : 0,05 à 25,5

Pour plus de détails concernant l'étalonnage précis de la sonde HMS9000 vis à vis des sols (il s'agit en fait d'étalonner la sonde pour que celle-ci calcule automatiquement le taux d'humidité du sol. Il s'agit donc d'étalonner le sol vis à vis de la sonde), voir le chapitre qui concerne l'étalonnage des sols & HMS 9000 en page 22.0.

ATTENTION : des coefficients "A" et "B" issus d'une courbe générale (mélange de plusieurs sols et calcul des coefficients) ont été placés dans la sonde afin que vous puissiez utiliser l'humidimètre tout de suite.

"A" = 50,20

"B" = 6,12

Cependant, il faut savoir que ces coefficients approchés ne vous permettent pas d'obtenir une grande précision dans la valeur calculée de l'humidité. Pour plus de précision il vous faudra pratiquer un étalonnage dit "gravimétrique" qui lui vous permettra de connaître les coefficients exacts à placer dans les mémoires de la sonde HMS9000. (Cf. voir plus bas; étalonnage gravimétrique).

En sortie 4-20mA (câble 5 fils et blindage) :

L'équation en courant de la permittivité est : $E = (I_p - 4) \times 2,5$ (plage : 0 à 40 points).

L'équation en courant de la température est : $T(^{\circ}C) = (I_t - 4) \cdot 4 - 10^{\circ}C$

La sortie courant ne transite pas par le microprocesseur (sortie linéaire directe).

(*) I_p & I_t sont ici exprimés en mA (Milliampère).

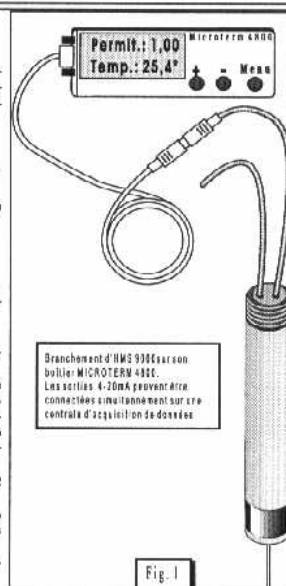


Fig. 1

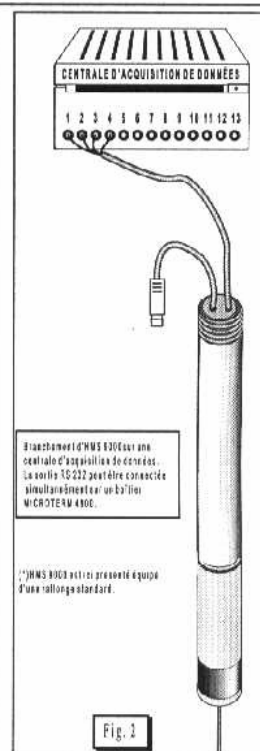


Fig. 2

CONSUMMATIONS ELECTRIQUES en RÉGIME de FONCTIONNEMENT

HMS 9000 s'alimente en tension de 6,00 à 24,00 Volts. La sonde ne fonctionne plus sous 7,2 Volts.

La consommation moyenne de la sonde HMS 9000 est de 35 mA (régime permanent d'émission).

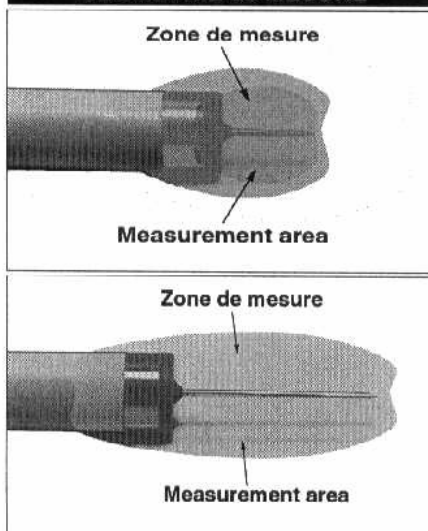
La consommation moyenne du boîtier MICROTERM 4800 est de 9 mA. Celle-ci atteint 55 mA si le rétro-éclairage est commandé. Il est vivement conseillé de n'utiliser le rétro-éclairage que lorsqu'HMS 9000 est connectée sur une centrale d'acquisition ou si MICROTERM 4800 est équipé d'accumulateurs NiCd en lieu et place de la pile de 9 Volts.

Édition de 7/04/1995

Caractéristiques - Performances - Connexions.

Page 19.0

GEOMETRIE de MESURE



HMS 9000 présente une géométrie d'électrodes testées et certifiées par l'INRA. La zone d'influence de la sonde est représentée sur les figures ci-contre, le point "barycentre" est situé sur l'électrode en pointe. L'électrode pointe est en acier INOX et interchangeable par dévissage. Il faut, pour des raisons de respect de la géométrie de mesure, s'assurer que l'électrode "pointe" est bien rectiligne et dans le même plan que l'axe de la sonde.

HMS 9000 peut être livrée avec deux types d'électrode différents.

a) Electrode courte pour des appareils qui seront installés à demeure dans le sol et dont les mesures attendues sont plus situées vers les interfaces ou couches de sols différentes. Le volume de mesure est ramassé et assez dense autour de l'aiguille. La résolution est maximum dans ce volume.

b) Electrode longue pour des appareils qui vont être utilisés à la main et où l'on "piquera" le sol ou le substrat dont on veut mesurer la teneur en eau. Ici la pointe sera complètement enfoncée jusqu'au néplait, il n'est pas nécessaire de faire pénétrer l'électrode annulaire (qui ne participe que peu à la mesure globale. Cette configuration permet des mesures très rapides (de l'ordre de 2 secondes par mesure) et présente une zone d'influence très étirée, ce qui augmente d'autant le volume de mesure et la représentativité de cette mesure.

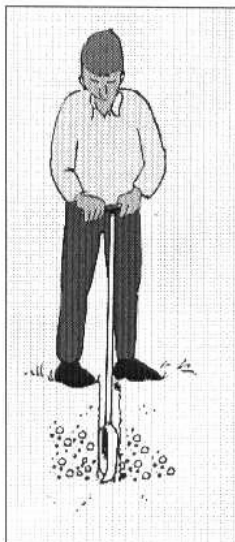
ATTENTION : il est tout à fait possible de travailler avec la même sonde en interchangeant les électrodes, mais si c'est le cas un étalonnage dans l'AIR et dans l'alcool seront IMPÉRATIF. En effet, l'étalonnage de la sonde (AIR&ALCOOL) se fait avec une électrode et cet étalonnage n'est valable que pour cette électrode. En résumé donc, les électrodes pointes ne sont interchangeables qu'à la condition IMPÉRATIVE de refaire un étalonnage AIR/ALCOOL.

Pour dévisser l'électrode centrale, se munir d'une pince "Monseigneur", pincer fermement l'électrode à la base de celle-ci et commencer à dévisser (sans inverse des aiguilles d'une montre) doucement. Éviter de tordre l'électrode en la dévissant. Après un ou deux tours, il est possible de continuer avec les doigts. Refaire de même pour le remontage, en prenant soin de ne pas serrer trop violemment lorsque l'électrode est presque complètement vissée. Vérifier le bon montage de celle-ci en constatant une variation de permittivité sur le MICROTERM, en touchant l'électrode avec le bout du doigt.

Consignes d'installation de l'humidimètre "HMS 9000" dans un sol

Un pré-trou doit être fait dans le sol au moyen d'une tarière d'un diamètre adapté (22 mm). Faire pénétrer la sonde avec douceur mais fermeté dans le sol. Si le forage est fait dans un diamètre plus large que celui de la sonde, nous conseillons de déposer de la boue liquide (faite avec la terre retirée par la tarière) au fond du trou fait dans le sol. La sonde ainsi placée ne doit plus être manipulée afin de préserver un contact parfait entre les électrodes et le sol.

Du fait de ses exceptionnelles capacités d'étanchéité, la sonde HMS 9000 peut être installée horizontalement dans le sol et/ou totalement enfouie dans le sol.



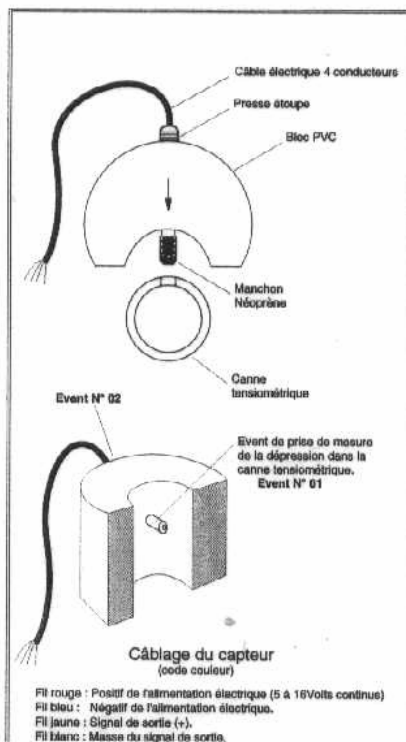
HMS 9000 est un humidimètre destiné à effectuer des mesures dans les sols à vocation AGRONOMIQUE, AGRICOLE ou GÉNIE CIVIL. Cet appareil (équipé de l'électrode aiguille courte) est généralement utilisé en implantation de type "fixe", dans les sols. C'est-à-dire que l'appareil sera installé dans le sol (après avoir préalablement fait un trou avec une tarière de diamètre égal à 22 mm) et l'utilisateur commencera à effectuer des mesures après 4 ou 5 heures (temps de mise en équilibre minimum de l'appareil avec le sol). Cette façon de faire permet de réaliser des mesures avec la plus grande exactitude possible. **ATTENTION** en présence d'un sol léger (sabloux ou sablo-limoneux peu dense), il peut être tentant de pratiquer de simples "enfouissements" de la sonde dans le sol. Cette pratique peut entraîner des erreurs sensibles sur le résultat final (Humidité volumique) si l'enfoncement n'est pas fait de façon franche et que l'électrode n'est pas complètement "serrée" par le sol. HMS 9000 contient toute son électronique de détection, de traitement des données et paramètres propres à son fonctionnement. Les technologies en présence dans cet appareil sont issues des plus récentes évolutions en matière d'électronique. Vous disposez donc d'un équipement de très haute technologie dont il faudra prendre soin. L'entretien de cet appareil est quasi-inexistant, excepté l'électrode pointe en acier INOX qu'il faudra remplacer dès que celle-ci sera tordue ou endommagée. Il suffit alors de la dévisser normalement (sans force excessive) avec une pince. La partie supérieure du module de base de la sonde HMS 9000 présente deux câbles de sortie (sorties électriques de la sonde) qu'il conviendra de vérifier de façon régulière afin de contrôler qu'il n'existe aucune coupure ou dégradation sur ce câble. Le tube en PVC blanc (traité anti-UV) qui constitue l'enveloppe extérieure de l'appareil est particulièrement adapté à une utilisation sur le terrain. **ATTENTION** cependant aux températures extrêmes (de type plage arrière de voiture ou tout endroit non ventilé et chauffé) que le PVC ne peut pas supporter. Au-delà de 70°C, le PVC commence à ramollir et la sonde HMS 9000 à être endommagée (perte d'étanchéité de la sonde). **ATTENTION**, dans les conditions d'utilisation (température) précisées ci-dessus, la sonde HMS 9000 est étanche IP 68, soit et d'après les normes DIN40050, IEC529 ET BS 5490: totalement protégée contre les poussières et contre les effets de l'immersion prolongée. Cette caractéristique est très importante car celle-ci vous permettra d'utiliser l'appareil dans tous les sols et toutes les situations, sans presque aucune exclusive. En revanche si cette sonde est parfaitement étanche, celle-ci ne supportera pas de mesures sur bandes transporteuses (sables, agrégats, etc...). L'enveloppe extérieure de HMS9000 est en PVC et ne supportera donc aucun frottement répétitif en milieu corrosif (Sable ou tous matériaux susceptibles d'user prématurément le tube PVC extérieur qui protège la sonde).

NOTICE D'UTILISATION SIMPLIFIÉE

Capteur électronique tensiométrique SKT 850T

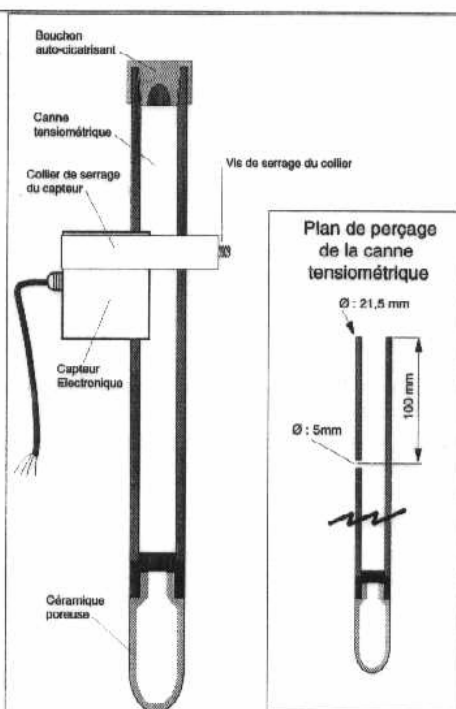
PRINCIPE du SYSTEME

Un capteur électronique de pression est placé sur une canne tensiométrique à céramique poreuse grâce à laquelle on mesure les variations de potentiel hydrique détectées dans le sol.



Capteur SKT 850T

Pour la mise en place du capteur sur la canne, il importe de bien respecter les instructions de mise en place comme développées sur la présente notice.



Capteur SKT 850T monté sur sa canne tensiométrique

GENERALITÉS

Le capteur SKT 850T est un capteur tensiométrique électronique standard compensé en température. Sa conception ainsi que sa fabrication sont le fruit d'une longue série d'essais en laboratoire et sur le terrain. Ce capteur est prévu pour fonctionner sous toutes conditions climatiques en général. Celui-ci ne devra en aucun cas être immergé car un évent est prévu sur la face arrière du boîtier (évent N°02) afin de préserver la mise à l'air de la chambre interne qui doit être "maintenue" à la pression atmosphérique (P.A). La gamme de mesure de ce tensiomètre va de 0 Hpa (mBar) jusqu'à -950 Hpa.

* P.A. : pression atmosphérique.

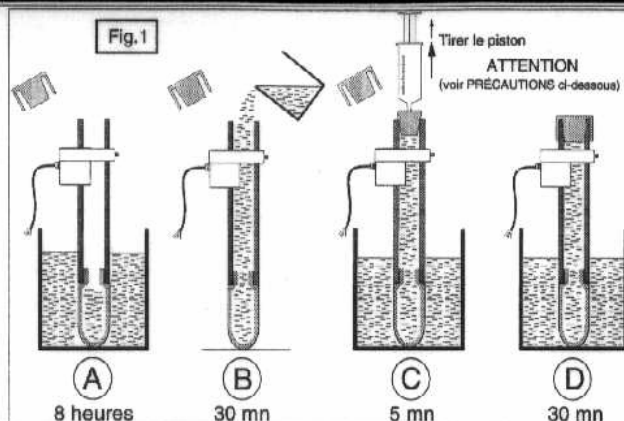
Le système SKT 850T vous a été livré vide de tout liquide. Voir au verso pour la préparation du système tensiométrique. La figure ci-dessus vous montre les configurations schématiques du tensiomètre électronique. Si le capteur SKT 850T vous a été livré sans canne tensiométrique et que vous comptez monter celui-ci sur vos propres cannes, vous devrez percer celles-ci comme indiqué sur la figure ci-dessus. Ce perçage doit être propre et net. Le montage du capteur sur la canne se fait en plaçant l'évent N°01 (Il est essentiel de s'assurer de la présence du manchon en néoprène sur cet évent) face à l'orifice de 5 mm fait dans la canne. Il est conseillé de placer une fine couche de graisse Si 4 (graisse silicone) autour du manchon néoprène. **ATTENTION**, afin d'établir la meilleure étanchéité autour de cet évent, la bonne façon est de retirer le manchon de quelques millimètres (voir fig.ci-dessus) et de pousser doucement mais fermement l'évent ainsi manchonné dans l'orifice de 5 mm. Pousser le capteur jusqu'au fond de la gorge et engager maintenant le collier INOX autour du capteur. Ce collier se placera comme indiqué sur la figure ci-dessus. Le serrage de celui-ci se fera de façon modérée sans qu'il soit nécessaire de le bloquer à fond. L'étanchéité est ici garantie à 99%. La partie arrière du collier -partie opposée à la vis de serrage- recouvre l'évent N° 02 qu'il est vivement conseillé de ne pas boucher. Cet évent doit être maintenu à la pression atmosphérique. Le collier de serrage INOX permet cette mise à la P.A. si et seulement si celui-ci est placé comme montré sur la fig. ci-dessus. Si le capteur a été livré déjà monté sur une canne tensiométrique, ce montage n'est pas nécessaire et le capteur exploitable directement.

ENTRETIEN du SKT 850T

Ajouter du produit anti-algues et anti-gel dans la canne du SKT 850T au moins une fois par an. **Eviter absolument de stocker le SKT 850T plein d'eau, en plein hiver.** Le gel brise instantanément la céramique poreuse et/ou le SKT850. Eviter tout choc sur la céramique poreuse ou le manomètre.

SDEC France 19, rue Edouard Vaillant 37 000 **TOURS** (France) ☎Tél:(16) 47.92.22.00 Fax:(16) 47.92.86.16

PRÉPARATION de la canne tensiométrique (recommandations)



Remplir la canne tensiométrique avec de l'eau propre et dégazée. De l'eau dégazée s'obtient après ébullition pendant 15 minutes. Faire alors refroidir celle-ci et remplir doucement la canne tensiométrique avec cette eau. Vous pouvez également dégazer l'eau de votre tensiomètre alors que celle-ci est déjà dans la canne. Cela se fait à l'aide d'une pompe à vide que l'on placera sur la canne tensiométrique remplie d'eau et dont la céramique poreuse trempera entièrement dans un récipient plein d'eau. Une dépression appliquée alors à l'intérieur de la canne aura pour effet immédiat de faire "buller" l'eau contenue dans la canne tensiométrique. Après quelques minutes, l'eau contenue dans la canne aura atteint un taux de dégazage tout à fait acceptable pour son utilisation tensiométrique. La pompe à vide (seringue) vous permettra de remplir les cannes tensiométriques avec de l'eau dégazée. La phase "C" de la figure ci-contre sera faite soigneusement et l'on fera monter l'eau ainsi aspirée, tout le long de la canne (**ATTENTION : VOIR PRÉCAUTIONS PHASE "C" CI-DESSOUS "ATTENTION ... IMPORTANT"**). Soumise à une dépression proche de -1 Bar (-1000 Hpa), vous constaterez que l'eau bulle avec force dans la canne.

Ce phénomène est tout à fait normal. Ainsi toutes les cannes tensiométriques peuvent être préparées en laboratoire pour ensuite être transportées vers le site d'expérimentation. En phase "D" vous constaterez une certaine difficulté à faire pénétrer le bouchon dans la canne. Cela est dû au fait que l'eau de la canne est mise en pression et repousse donc le bouchon qui comprime le volume intérieur. Une astuce simple consiste à laisser passer la petite partie d'air qui reste en haut de la canne en pinçant le bouchon entre le pouce et l'index. De cette façon le petit volume d'air en pression va pouvoir s'évacuer et le bouchon prendra parfaitement sa place sans vouloir ressortir de son logement. Bien retourner la jupe du bouchon sur la canne afin de fixer celui-ci. (Il est conseillé de graisser la partie portante du bouchon à intervalles réguliers -6 mois- avec de la graisse Si4 -silicone uniquement-). Après quelques minutes, vous pourrez constater que la pression à l'intérieur de la canne est située entre 0 et -100 Hpa (position "D"). Cela est parfaitement normal et correspond à la charge hydraulique de votre tensiomètre, soit : pour un tensiomètre de 1 mètre de long, la pression se situera à -100 Hpa (en configuration "D"), pour un tensiomètre de 2 mètres de long, la pression sera de -200 Hpa.

PRENDRE très GRAND SOIN de la CÉRAMIQUE POREUSE lors de la préparation des systèmes ainsi qu'à la mise en place de ceux-ci dans le sol. **NE JAMAIS** laisser une CÉRAMIQUE poreuse saturée d'eau en température ambiante inférieure à 0°C. Humectée et soumise à des températures négatives, la céramique poreuse se brise instantanément.

Consignes d'installation du tensiomètre dans le sol :

Un pré-trou doit être fait dans le sol au moyen d'une tarière d'un diamètre adapté (22 mm). Faire pénétrer la canne tensiométrique avec douceur mais fermeté dans le sol. Si le forage est fait dans un diamètre plus large que celui de la céramique, nous conseillons de déposer de la boue liquide (faite avec la terre retirée par la tarière) au fond du trou fait dans le sol. Le tensiomètre ainsi placé ne doit plus être manipulé afin de préserver un contact parfait entre la céramique poreuse et le sol.

Le SKT 850 C2 monté sur sa canne tensiométrique peut fonctionner sous des températures inférieures à 0°C (jusqu'à la limite de 10°C sous zéro) si et seulement si le liquide contenu dans le tensiomètre contient de l'anti-gel (proportion d'anti-gel conseillée : 20%).

CARACTÉRISTIQUES ÉLECTRIQUES du capteur SKT850T

Alimentation électrique :

Tension continue : de 5 à 16 Volts. (Il est possible d'alimenter le capteur avec une tension électrique comprise entre 5 et 16 Volts). Cela signifie qu'une tension d'alimentation doit être choisie et maintenue de façon stable. Par ex., Si la tension choisie est de 12,00 Volts celle-ci devra être maintenue à $\pm 0,01$ Volts. Cela est en général facilement obtenu sur n'importe quelle centrale d'acquisition. (voir tensions de sortie en fonction de la tension d'alimentation à P= constante - tableau ci-contre).

Vcc = tension d'alimentation (5 à 16 volts).

P = pression dans la canne tensiométrique.

Vs = tension de sortie du capteur.

Caractéristiques générales.

Consommation en courant : 2 mA.

Résistance d'entrée : 7,5 K Ω

Résistance de sortie : 2,5 K Ω

Réponse du capteur : du type tension non amplifiée.

Temps de réponse : 1 msec.

Tension de sortie du signal : en mV.

Null Offset : 0 $\pm$ 1mV (à Vcc = 10,00 Volts continus).

Hystérésis : $\pm 0,2\%$ de la pleine échelle.

Sensibilité : 6,67 mV/psi.

Pression max admissible sur capteur : +1 bar (+1000 Hpa).

Tests aux chocs : qualifié à 150g.

Compensé en température : de -10°C à +50°C.

Température de stockage : -40° à +70°C (vide d'eau).

Température d'utilisation : -10° à +60°C (chargé en eau avec anti-gel).

Gamme de mesure du tensiomètre :

De 0 Hpa à -950 Hpa (limite d'utilisation de la céramique poreuse). Céramique poreuse de type "indéchirable".

ATTENTION ... IMPORTANT

Le capteur utilisé dans la famille des produits SKT fonctionne sur un principe dit "piezzo-résistif" ou micro-jauge de contrainte. De ce fait ce capteur nécessite un certain nombre de précautions d'emploi dont une essentielle qui est d'éviter à tout prix toute surpression accidentelle. **ATTENTION** car l'emploi de la seringue (ou pompe de préparation) peut générer des surpressions locales et transitoires de plusieurs bars et détruire ainsi la cellule du capteur de façon irrémédiable. Il suffira, pour éviter cela, de ne jamais pousser sur le piston (voir fig.1, étape C) mais de simplement le laisser revenir seul et en douceur à sa place d'origine. **ATTENTION** car la moindre fausse manœuvre dans cette étape entraînera un risque très important de destruction de votre capteur. La technologie des capteurs piezzo-résistif est d'une très grande précision mais ne supporte aucune surpression accidentelle (ici : +1 Bar).

ÉTALONNAGE : Une fiche d'étalonnage propre à chaque capteur est délivrée au client et jointe aux matériels.

SDEC France 19, rue Edouard Vaillant 37 000 TOURS(France) • Tél:(16) 47.92.22.00 Fax:(16) 47.92.86.16

Model HMP45C Temperature and Relative Humidity Probe

1. General Description

The HMP45C Temperature and Relative Humidity probe contains a Platinum Resistance Temperature detector (PRT) and a Vaisala HUMICAP[®] 180 capacitive relative humidity sensor.

The -L option on the model HMP45C Temperature and Relative Humidity probe (HMP45C-L) indicates that the cable length is user specified. This manual refers to the sensor as the HMP45C.

2. Specifications

Operating Temperature: -40°C to +60°C

Storage Temperature: -40°C to +80°C

Probe Length: 25.4 cm (10 in.)

Probe Body Diameter: 2.5 cm (1 in.)

Filter: 0.2 µm Teflon membrane

Filter Diameter: 1.9 cm (0.75 in.)

Power Consumption: <4 mA

Supply Voltage (via CSI switching circuit): 7 to 35 VDC

Settling Time: 0.15 seconds

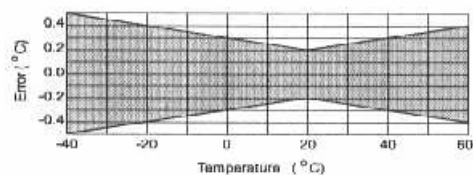
2.1 Temperature Sensor

Sensor: 1000 Ω PRT, IEC 751 1/3 Class B

Temperature Measurement Range: -40°C to +60°C

Temperature Output Signal range: 0.008 to 1.0 V

Temperature Accuracy:



2.2 Relative Humidity Sensor

Sensor: HUMICAP® 180

Relative Humidity Measurement Range: 0 to 100% non-condensing

RH Output Signal Range: 0.008 to 1 VDC

Accuracy at 20°C

±2% RH (0 to 90% Relative Humidity)

±3% RH (90 to 100% Relative Humidity)

Temperature Dependence of Relative Humidity Measurement: ±0.05% RH/°C

Typical Long Term Stability: Better than 1% RH per year

Response Time (at 20°C, 90% response): 15 seconds with membrane filter

3. Installation

The HMP45C must be housed inside a radiation shield when used in the field. The 41002 Radiation Shield (Figure 1) mounts to a CM6/CM10 tripod or UT10 tower. The UT018 mounting arm and UT12VA Radiation Shield mount to a UT30 tower (Figure 2).

A lead length of 6 feet allows the HMP45C to be mounted at a 2 meter height on a CM6/CM10 tripod. Use a lead length of 9 feet for the UT10 tower or a UT30 tower respectively.

NOTE

The black outer jacket of the cable is Santoprene® rubber. This compound was chosen for its resistance to temperature extremes, moisture, and UV degradation. However, this jacket will support combustion in air. It is rated as slow burning when tested according to U.L. 94 H.B. and will pass FMVSS302. Local fire codes may preclude its use inside buildings.

ANNEXE 6
STRUCTURE DU PROGRAMME DE LA CR10X

Table de programme 1

On donne l'intervalle d'exécution qui est de 10 secondes

01: 10 Execution Interval (seconds)

LA SCRUTATION DES SONDES

ON COMMENCE PAR LA SCRUTATION DE LA SONDE BRANCHEE DIRECTEMENT A LA CR10X : LE RADIOMETRE (NR-Lite)

Mesure du rayonnement net

2: Volt (SE) (P1)
1: 1 Reps
2: 3 25 mV Slow Range
3: 8 SE Channel
4: 4 Loc [NR_zerow]
5: 63.29 Mult
6: 0.0 Offset

L'instruction P1 permet une lecture unipolaire. Le terme *Reps* sert à éventuellement répéter l'instruction sur un nombre séquentiel de voies d'entrée. Les *25 mV Slow Range* correspondent au choix de la gamme de mesure. La lecture unipolaire de la tension s'effectue ici entre la voie 8 et la masse. L'adresse de la mémoire d'entrée pour le stockage de la valeur de la tension mesurée est 4. Un facteur multiplicatif a été ajouté de 63.29 donné par le constructeur de la sonde.

Le radiomètre est sensible à la présence de vent. On a utilisé les instructions simples P37 et P34 pour corriger la valeur brute mesurée en suivant les indications du fournisseur du capteur NR-lite.

6: Z=X*F (P37)
1: 3 X Loc [Corr_fact]
2: 0.0082 F
3: 3 Z Loc [Corr_fact]

L'instruction P37 permet de multiplier une valeur

7: Z=X+F (P34)
1: 3 X Loc [Corr_fact]
2: 1 F
3: 3 Z Loc [Corr_fact]

L'instruction P34 permet d'additionner un nombre

ON POURSUIT AVEC LES SONDAS DE L'AM25T : SCRUTATION DES THERMOCOUPLES

Configuration des ports de contrôle

11: Set Port(s) (P20)

- 1: 9993 C8..C5 = nc/nc/nc/1ms
- 2: 3999 C4..C1 = 1ms/nc/nc/nc

L'instruction P20 permet ici la configuration des ports de contrôle 4 et 5 de l'AM25T qui peuvent délivrer un signal toutes les 1 ms

Mise en marche de l'AM25T par l'activation du multiplexeur par le port de contrôle 5

12: Do (P86)

- 1: 45 Set Port 5 High

L'instruction P86 permet ici le passage d'un signal de la CR10X à l'AM25T toutes les 1ms par le port 5

Mesure de la température de référence de l'AM25T

13: Full Bridge (P6)

- 1: 1 Reps
- 2: 31 2.5 mV 50 Hz Rejection Range
- 3: 3 DIFF Channel
- 4: 1 Excite all reps w/Exchan 1
- 5: 250 mV Excitation
- 6: 8 Loc [Vs_250]
- 7: 1 Mult
- 8: 0 Offset

Le capteur de température qui est intégré à l'intérieur de l'AM25T est un détecteur résistif ou RTD – pour « resistance temperature detectors » (fabriqué à partir d'un fil ou film de platine). Il a la particularité d'être très précis, son exactitude pouvant atteindre 0,001°C. Il est aussi stable dans le temps. Un « pont de Wheatstone » est utilisé pour conditionner le signal. La détermination de la température de référence à partir de la mesure de la tension aux bornes du pont complet (instruction P6) passe par une série de calculs faisant intervenir les instructions : P34 et P37 (voir page précédente) mais aussi P38 (division), P59 (instruction de transformation de pont) et P16 (qui utilise le résultat de la précédente mesure de pont RTD pour calculer la température).

Remise à zéro de l'AM25T

21: Do (P86)

- 1: 75 Pulse Port 5

Passage au deuxième locus de l'AM25T soit aux bornes du premier thermocouple

22: Do (P86)

- 1: 74 Pulse Port 4

23: Do (P86)

- 1: 74 Pulse Port 4

Deux impulsions de l'horloge, d'où deux fronts d'excitation.

Mesure du premier thermocouple

24: Thermocouple Temp (DIFF) (P14)

```
1: 1      Repts
2: 31      2.5 mV 50 Hz Rejection Range
3: 3      DIFF Channel
4: 1      Type T (Copper-Constantan)
5: 10      Ref Temp (Deg. C) Loc [ RefTemp_C ]
6: 11      Loc [ TC_1_      ]
7: 0.998    Mult
8: -0.033    Offset
```

L'instruction P14 calcule la température pour le type de thermocouple sélectionné (il s'agit dans notre cas de thermocouples T). L'instruction effectue une mesure de tension différentielle du thermocouple, ajoute la compensation de soudure froide à partir de la température de référence précédemment mesurée et convertit la tension combinée en température. Les termes Mult et Offset permettent d'intégrer directement l'étalonnage.

Passage au deuxième thermocouple

25: Do (P86)

```
1: 74      Pulse Port 4
```

26: Do (P86)

```
1: 74      Pulse Port 4
```

Etc..... jusqu'à ce que tous les thermocouples connectés à l'AM25T aient été scrutés

Fermeture de l'AM25T

97: Do (P86)

```
1: 55      Set Port 5 Low
```

INSTRUCTIONS CONCERNANT LE MODE DE SCRUTATION DES SONDAS DE L'AM416

Choix pris de parcourir l'AM416 que toutes les 2 minutes

Début de l'instruction if

98: If time is (P92)

```
1: 0      Minutes (Seconds --) into a
2: 2      Interval (same units as above)
3: 30      Then Do
```

Déclenchement de l'alimentation à relais 12V CC par le ports 8

99: Do (P86)

```
1: 48      Set Port 8 High
```

Délai de préchauffage des sondes de manière à stabiliser leur alimentation : 30 secondes

100: Excitation with Delay (P22)

```
1: 1      Ex Channel
2: 0      Delay W/Ex (units = 0.01 sec)
3: 3000    Delay After Ex (units = 0.01 sec)
4: 0      mV Excitation
```

Cette instruction a été utilisée juste pour sa fonction de délai. On a désactivé sa fonction d'excitation en la fixant à 0 mV.

SCRUTATION DES SONDES DE L'AM416

Activation du multiplexeur par le port de contrôle 7

101: Do (P86)
1: 47 Set Port 7 High

Impulsion de l'horloge par le port de contrôle 6, d'où, avancement au premier groupe du multiplexeur

102: Do (P86)
1: 76 Pulse Port 6

Remarque : chaque groupe est appelé block et chaque block est composé des bornes H1L1 H2L2 séparés par une masse

L'AM416 est un multiplexeur a relais mécaniques. Pour que le relais ait le temps de bien basculer, on lui accorde un délai de 0,01 sec (Instruction P22)

103: Excitation with Delay (P22)
1: 1 Ex Channel
2: 0 Delay W/Ex (units = 0.01 sec)
3: 1 Delay After Ex (units = 0.01 sec)
4: 0 mV Excitation

On a commencé par la scrutation des sondes HMS9000

104: Volt (SE) (P1)
1: 1 Reps
2: 35 2500 mV 50 Hz Rejection Range
3: 1 SE Channel
4: 36 Loc [HMS1prt]
5: 1.0 Mult
6: 0.0 Offset

Utilisation de l'instruction P1 pour la prise de tension entre les bornes H1 et la masse.

Puis, étapes successives de conversion du signal mesuré entre les bornes H1 et la masse en valeur de permittivité. Utilisation des instructions de traitement dont P37 et P34 précédemment explicitées pour parvenir à la mesure de l'humidité volumique – Prise en compte de l'étalonnage.

Avancement au deuxième groupe du multiplexeur (block 2)

158: Do (P86)
1: 76 Pulse Port 6

159: Excitation with Delay (P22)
1: 1 Ex Channel
2: 0 Delay W/Ex (units = 0.01 sec)
3: 1 Delay After Ex (units = 0.01 sec)
4: 0 mV Excitation

Etc... jusqu'à ce que toutes les sondes de l'AM416 aient été scrutées

Fermeture du multiplexeur (AM416)

240: Do (P86)

1: 57 Set Port 7 Low

Désactivation du port de contrôle 8, point d'arrêt pour l'alimentation des sondes

241: Do (P86)

1: 58 Set Port 8 Low

Fin de l'instruction if

242: End (P95)

LE STOCKAGE DES DONNEES

INSTRUCTIONS SUR LEUR MODE DE STOCKAGE

On a choisi de stocker les données toutes les 2 minutes

Début de l'instruction if

243: If time is (P92)

1: 0 Minutes (Seconds --) into a

2: 2 Interval (same units as above)

3: 10 Set Output Flag High (Flag 0)

Adresse pour le stockage mémoire

244: Set Active Storage Area (P80)

1: 1 Final Storage Area 1

2: 111 Array ID

L'instruction 80 sert à rediriger les données de sauvegarde vers une des mémoires finales (dans notre cas, il s'agit de la mémoire finale 1).

Avant d'arriver en mémoire finale, les signaux des sondes ont été collectés et dirigés vers les mémoires d'entrée et intermédiaire de la mémoire statique logée dans la centrale appelée SRAM. Ces deux mémoires se partagent la collecte et la traduction de l'ensemble des signaux en grandeurs numériques interprétables. A intervalle de stockage régulier (ici toutes les 2 minutes), les valeurs finales traitées sont sauvegardées dans la mémoire finale de la SRAM, en vue de leur transfert ultérieur sur le disque dur d'un PC. En ce qui nous concerne, la CR10X étant reliée en permanence à un PC, le transfert des données est continu.

Repérage du temps dans le fichier de stockage

245: Real Time (P77)

1: 1111 Year,Day,Hour/Minute,Seconds (midnight = 0000)

Cette instruction met en mémoire finale le temps réel sous la forme que l'on choisit.

TYPE DE VALEURS STOCKEES

246: Sample (P70)

1: 1 Reps

2: 2 Loc [Net_rad]

L'instruction P70 stocke la valeur provenant de chaque mémoire d'entrée spécifiée (ici il s'agit de la mémoire d'entrée 2)

247: Average (P71)

1: 1 Repts

2: 2 Loc [Net_rad]

Cette instruction stocke la valeur moyenne, à chaque intervalle de sauvegarde donné pour chaque mémoire d'entrée spécifiée.

Etc....

FIN DU PROGRAMME

Fin de l'instruction if et instruction pour l'arrêt du programme

End Program

Localisation mémoire

-Input Locations-

1 Wind_Spd 1 1 1

2 Net_rad 1 2 2

3 Corr_fact 1 5 5

4 NR_zerow 1 1 1

5 NRzerows 1 0 0

6 RG 1 2 1

7 RR 1 2 1

8 Vs_250 1 1 1

9 Vx_250 1 1 1

10 RefTemp_C 1 29 5

11 TC_1_ 1 2 1

Etc.....

-Program Security-

0000

0000

0000

-Mode 4-

-Final Storage Area 2-

0

-CR10X ID-

0

-CR10X Power Up-

3

ANNEXE 7

LANCEMENT D'UNE EXPERIENCE

Pour lancer l'acquisition des données, on a paramétré préalablement la liaison via le câble CS 32 A entre la centrale CR10X et le PC. Pour ce faire, il faut aller dans le menu *Setup* du logiciel PC208W installé sur l'ordinateur. On y déclare le port du PC sur lequel on a branché la centrale, le type de centrale connectée (pour nous la CR10X) et dans quel *fichier.dat* seront sauvegardées les données brutes par la suite collectées. Dans le menu *Connect*, une fois la connexion lancée, on envoie le programme préalablement rédigé (voir §4.2.3 et Annexe 6) à la CR10X. Les données collectées sont alors automatiquement transférées dans le *fichier.dat* du PC. On peut en outre contrôler en direct dans ce menu les données collectées par la centrale en cliquant sur *Numeric*.

ANNEXE 8

COMPLEMENTS DU CHAPITRE 6

Annexe 8.1. Définition des paramètres

Paramètres	Définition	Régime climatique
TG4-10	Temps de latence à la germination	4°C « nuit » / 10°C « jour »
VG4-10	Vitesse de germination	4°C « nuit » / 10°C « jour »
%G4-10	Performance germinative	4°C « nuit » / 10°C « jour »
TL ₁ 4-10	Temps écoulé depuis le semis jusqu'à l'apparition de la deuxième feuille sur 10% de l'effectif	4°C « nuit » / 10°C « jour »
VL ₂ 4-10	Vitesse moyenne de passage au stade 2 feuilles	4°C « nuit » / 10°C « jour »
TGS15-25	Temps de latence à la germination	15°C « nuit » / 25°C « jour » avec stress hydrique
VGS15-25	Vitesse de germination	15°C « nuit » / 25°C « jour » avec stress hydrique
%GS15-25	Performance germinative	15°C « nuit » / 25°C « jour » avec stress hydrique
TL ₁ S15-25	Temps écoulé depuis le semis jusqu'à l'apparition de la deuxième feuille sur 10% de l'effectif	15°C « nuit » / 25°C « jour » avec stress hydrique
VL ₂ S15-25	Vitesse moyenne de passage au stade 2 feuilles	15°C « nuit » / 25°C « jour » avec stress hydrique
TG15-25	Temps de latence à la germination	Optimum climatique
VG15-25	Vitesse de germination	Optimum climatique
%G15-25	Performance germinative	Optimum climatique
TL ₁ 15-25	Temps écoulé depuis le semis jusqu'à l'apparition de la deuxième feuille sur 10% de l'effectif	Optimum climatique
VL ₂ 15-25	Vitesse moyenne de passage au stade 2 feuilles	Optimum climatique
Fe4-10	Surface foliaire estimée pour la parcelle élémentaire	4°C « nuit » / 10°C « jour »
FeS15-25	Surface foliaire estimée pour la parcelle élémentaire	15°C « nuit » / 25°C « jour » avec stress hydrique
Fe15-25	Surface foliaire estimée pour la parcelle élémentaire	
Re4-10	Surface racinaire estimée pour la parcelle élémentaire	4°C « nuit » / 10°C « jour »
ReS15-25	Surface racinaire estimée pour la parcelle élémentaire	15°C « nuit » / 25°C « jour » avec stress hydrique
Re15-25	Surface racinaire estimée pour la parcelle élémentaire	

Annexe 8.2 Tableau récapitulatif des moyennes et écarts-types des paramètres mesurés sur l'ensemble des populations de Dactylis glomerata var. glomerata de l'expérimentation

Source de variation	TG		VG		%G		TL ₁		VL ₂		Fe		Re	
	Moy	Ec-Type	Moy	Ec-Type	Moy	Ec-Type	Moy	Ec-Type	Moy	Ec-Type	Moy	Ec-Type	Moy	Ec-Type
<i>Régime Climat. 4°C/10°C avec stress thermique</i>														
T	14.3	1.99	2.78	0.60	54.2	11.7	32.5	3.77	1.40	0.68	959.9	209.4	1431.3	309.2
P-open1	11.5	0.57	4.63	1.45	64.0	14.2	27.0	0.00	2.06	0.51	1565.7	348.2	2478.6	551.3
P-open2	12.0	0.00	5.12	0.70	68.0	4.32	27.2	0.50	2.38	0.16	1725.8	109.6	2798.7	177.8
P-open3	12.2	0.50	3.57	0.51	56.0	5.88	27.7	0.95	1.77	0.25	1179.7	124.0	1852.8	194.8
HP-open1	13.7	0.95	3.64	1.07	68.5	4.12	34.0	0.00	2.41	0.46	1347.3	81.09	3041.3	183.0
HP-open2	12.2	0.50	2.71	0.42	64.0	5.65	33.2	1.50	2.62	0.39	1618.3	143.0	3621.6	320.1
HP-open3	13.2	0.95	4.05	0.96	64.0	2.30	33.2	1.50	2.60	0.65	1524.7	55.01	4242.5	153.0
HS-open1	13.0	0.81	3.99	0.52	69.5	7.00	29.2	1.25	2.34	0.17	1773.8	178.6	4560.2	459.3
HS-open2	13.2	0.50	3.69	0.98	72.0	4.00	29.2	1.25	2.62	0.37	1678.2	93.23	4753.4	264.0
HS-open3	13.2	1.50	3.93	0.88	60.5	8.85	32.7	2.06	2.80	0.80	1616.9	236.5	3555.3	520.1
HP/P-open1	12.2	0.95	3.83	0.25	67.0	5.03	28.7	0.50	1.98	0.45	1699.9	127.7	4034.5	303.0
HP/P-open2	12.2	0.50	5.22	0.59	70.0	2.82	31.2	2.06	2.47	0.17	1502.0	60.69	3675.0	148.4
HP/P-open3	12.0	0.81	5.00	1.55	71.5	7.72	28.5	1.91	2.27	0.29	1596.2	172.4	4119.2	445.0
HS/P-open1	11.5	0.57	3.67	0.98	68.5	2.51	27.2	0.50	1.86	0.34	1191.1	43.76	5077.5	186.5
HS/P-open2	11.2	0.50	4.61	1.34	71.0	3.82	26.0	1.15	2.26	0.20	1395.4	75.27	3844.7	207.3
HS/P-open3	11.5	0.57	4.13	0.93	76.0	7.11	28.2	0.50	2.60	0.23	1493.7	139.9	4668.6	437.2
Ts Grpes	12.5	1.31	3.96	1.10	65.8	9.01	29.9	3.03	2.23	0.57	1460.5	285.9	3481.6	1155
<i>Régime Climat. 15°C/25°C avec stress hydrique</i>														
T	11.7	3.45	0.31	0.19	5.65	1.27	10.5	10.0	0.00	0.00	158.84	22.83	237.71	34.95
P-open1	8.50	3.00	2.71	1.50	25.5	3.41	17.0	2.16	0.57	0.09	1606.0	324.7	1002.9	24.44
P-open2	7.50	3.69	1.21	0.72	12.0	4.61	16.7	3.09	0.19	0.22	1473.9	72.13	809.2	303.3
P-open3	6.00	0.00	0.53	0.31	12.0	5.41	15.5	3.87	0.18	0.12	1539.9	112.9	909.8	70.4
HP-open1	5.75	0.50	2.64	1.20	37.5	6.60	12.7	0.50	0.74	0.21	1308.4	92.85	2424.2	82.17
HP-open2	6.50	1.73	1.53	0.83	24.5	6.60	15.2	2.87	0.43	0.11	1347.3	161.3	2251.4	16.04
HP-open3	9.50	3.51	2.32	1.30	16.0	5.88	18.5	3.10	0.20	0.09	1136.0	44.16	2339.6	52.62
HS-open1	7.00	1.82	2.01	0.07	37.5	9.29	14.0	0.81	0.89	0.19	2294.2	158.0	3813.7	16.35
HS-open2	6.25	0.95	1.80	0.18	25.5	3.41	14.0	0.81	0.67	0.04	2031.3	27.90	3462.2	40.74
HS-open3	5.50	0.57	1.68	0.79	31.0	10.3	13.5	0.57	0.43	0.20	1914.0	146.4	3143.7	45.32
HP/P-open1	5.75	0.50	2.85	0.77	42.0	5.41	13.5	0.57	0.79	0.15	1790.5	37.77	2456.7	47.72
HP/P-open2	6.00	0.00	2.06	0.51	33.0	2.58	14.2	0.95	0.67	0.13	1712.7	414.0	2019.7	29.64
HP/P-open3	6.00	0.00	2.84	0.36	35.0	3.46	14.2	0.50	0.62	0.05	1884.3	255.2	1933.9	25.82
HS/P-open1	5.25	0.50	2.52	0.57	39.5	4.43	12.5	0.57	0.96	0.08	1889.3	25.16	4069.7	198.2
HS/P-open2	6.25	1.25	2.34	1.00	35.5	8.06	13.7	0.95	0.79	0.12	1446.4	286.0	4226.5	63.26
HS/P-open3	5.75	0.50	1.94	0.95	31.0	9.30	13.7	0.50	0.60	0.15	1870.6	189.2	4021.4	14.36
Ts Grpes	7.11	2.69	1.86	1.07	26.4	12.8	14.1	4.11	0.51	0.32	1503.7	592.5	2315.3	1313
<i>Cond. Climat. Optim. de végétation</i>														
T	8.00	0.00	4.44	1.40	47.5	4.98	14.5	0.75	1.61	0.23	2118.4	301.4	1541.4	251.9
P-open1	6.00	0.09	5.74	1.68	46.0	7.48	12.5	0.57	1.82	0.49	1971.8	320.7	2214.2	360.2
P-open2	7.50	0.22	5.76	2.23	48.0	10.8	14.5	0.57	2.13	0.51	2270.9	512.4	3171.9	715.8
P-open3	7.00	0.12	4.19	0.66	46.5	5.50	13.7	1.25	1.33	0.35	2559.1	303.1	3414.3	404.4
HP-open1	6.75	0.21	3.36	2.16	42.0	6.92	12.7	0.50	1.93	1.42	1504.2	248.1	2347.8	387.2
HP-open2	6.75	0.11	6.44	1.60	49.0	4.76	13.5	1.00	1.49	0.64	1936.3	188.1	336.3	324.1
HP-open3	6.50	0.09	4.82	0.03	43.5	9.57	13.5	0.57	1.45	0.69	1450.7	319.3	2188.8	481.7
HS-open1	6.75	0.19	5.56	1.41	51.0	8.24	12.7	0.95	2.45	0.93	2864.6	463.1	2864.6	463.1
HS-open2	6.75	0.04	5.48	0.88	54.5	5.25	14.0	0.81	1.52	0.39	2361.5	227.9	2869.1	276.9
HS-open3	6.50	0.20	5.87	2.49	56.5	1.91	12.7	0.50	2.45	0.69	2563.6	86.88	3225.6	109.3
HP/P-open1	6.00	0.15	5.84	3.19	53.5	8.38	12.5	0.57	2.28	0.90	2196.6	344.3	2492.2	390.6
HP/P-open2	6.50	0.13	4.42	0.70	46.0	6.32	13.2	0.50	1.69	0.89	1985.1	272.9	1946.5	267.6
HP/P-open3	5.75	0.05	5.17	2.22	47.5	4.43	12.5	0.57	2.13	0.82	2195.4	204.9	2671.8	249.4
HS/P-open1	6.50	0.08	5.26	0.96	53.0	6.00	12.7	0.50	1.77	0.14	2512.6	284.4	2965.9	335.7
HS/P-open2	6.50	0.12	5.27	0.69	50.0	14.0	12.7	0.95	2.02	0.45	2722.3	764.8	2845.7	799.5
HS/P-open3	7.25	0.15	4.19	2.13	46.0	7.83	13.5	0.57	1.58	0.74	2558.9	435.6	2462.1	419.1
Ts Grpes	6.76	0.32	5.07	1.69	48.7	7.56	13.3	0.96	1.84	0.69	2228.9	496.0	2594.1	672.0

Annexe 8.3. Analyse de la variance à deux facteurs (la nature et l'ouverture) réalisée sur les données récoltées en l'absence des témoins avec 4 degrés de liberté pour la nature, 2 degrés de liberté pour l'ouverture, 8 degrés de liberté pour l'effet d'interaction et 45 pour le calcul de l'erreur (Test de Fisher)

Paramètres	Effets	F	P
TG4-10	Nature	12.04	*
	Opening	0.61	0.546903
	Nature*Opening	1.23	0.303718
VG4-10	Nature	3.001	*
	Opening	0.558	0.576070
	Nature*Opening	1.962	0.073697
%G4-10	Nature	3.644	*
	Opening	1.409	0.255052
	Nature*Opening	2.086	0.057263
TL ₁ 4-10	Nature	52.53	*
	Opening	2.68	0.079847
	Nature*Opening	4.53	*
VL ₂ 4-10	Nature	3.453	*
	Opening	3.932	*
	Nature*Opening	1.165	0.340906
TGS15-25	Nature	2.2140	0.082525
	Opening	0.0166	0.983538
	Nature*Opening	2.1061	0.054942
VGS15-25	Nature	2.9883	*
	Opening	4.8609	*
	Nature*Opening	1.4341	0.208835
%GS15-25	Nature	19.888	*
	Opening	19.458	*
	Nature*Opening	1.397	0.223905
TL ₁ S15-25	Nature	5.755	*
	Opening	2.050	0.140639
	Nature*Opening	2.296	*
VL ₂ S15-25	Nature	20.8883	*
	Opening	35.6652	*
	Nature*Opening	1.3099	0.263174
TG15-25	Nature	2.574	0.050304
	Opening	1.946	0.154687
	Nature*Opening	1.845	0.093424
VG15-25	Nature	0.3688	0.829609
	Opening	0.6278	0.538355
	Nature*Opening	1.1733	0.336011
%G15-25	Nature	2.397	0.064159
	Opening	0.203	0.816721
	Nature*Opening	0.800	0.605463
TL ₁ 15-25	Nature	2.12	0.094088
	Opening	8.44	*
	Nature*Opening	1.79	0.103444
VL ₂ 15-25	Nature	0.9791	0.428469
	Opening	0.8910	0.417354
	Nature*Opening	0.9996	0.449619
Fe4-10	Nature	7.897	*
	Opening	2.290	0.112920
	Nature*Opening	5.289	*
FeS15-25	Nature	29.474	*
	Opening	4.170	*
	Nature*Opening	2.286	*
Fe15-25	Nature	14.263	*
	Opening	0.130	0.878621
	Nature*Opening	1.810	*
Re4-10	Nature	76.650	*
	Opening	1.059	0.355347
	Nature*Opening	12.851	*
ReS15-25	Nature	1752.28	*
	Opening	40.16	*
	Nature*Opening	10.69	*
Re15-25	Nature	3.979	*
	Opening	2.032	0.142939
	Nature*Opening	5.065	*

* représente les effets significatifs au risque 0.05 et dans le cas contraire on a donné la valeur du niveau de significativité