

CONVENTION FIRST

REGION WALLONNE

FONDATION UNIVERSITAIRE LUXEMBOURGEOISE

SA BUREAU TECHNIQUE WINTGENS

CONCEPTION DE CAPTEURS INTELLIGENTS POUR
LA MESURE
DE LA QUALITE DE L'EAU ET DU SOL

Référence: FIRST 1545

RAPPORT FINAL

Février 1994

V. MARTIN
A. HANSON
E. WETZEL
J. NICOLAS

TABLE DES MATIERES

1. OBJET	2
2. PRINCIPE	2
3. RELATION ENTRE TENSION MATRICIELLE ET TENEUR EN.....	3
EAU DANS LE SOL.....	3
4. THEORIE ET PRINCIPE DE MESURE.....	5
5. AVANTAGES DE CETTE APPROCHE.....	6
6. ETAT DE L'ART ET SPECIFICITES DU DEVELOPPEMENT.....	6
7. APPLICATIONS.....	7
8. CONTRAINTES ET SOLUTIONS.....	8
9. OBJECTIFS PRECIS DANS LE CADRE DU CONTRAT FIRST.....	8
10. RÔLE DES PARTENAIRES	10
11. DESCRIPTION DU CAPTEUR.....	10
12. LE MATERIAU POREUX.....	11
12.1 Choix du matériau.....	11
12.2 La cellule en céramique.....	12
12.3. Caractérisation de la céramique.....	14
13. LA RESISTANCE CHAUFFANTE	18
13. 1. Temps et puissance de chauffe.....	18
13. 2. Choix de la résistance électrique.....	20
13. 3. Source de courant.....	21
14. LA SONDE DE TEMPERATURE.....	22
14. 1. Choix de la sonde.....	22
14. 2. Mesure de la résistance.....	24
14. 3. Calibration de la mesure en température.....	24
15. L'ASSEMBLAGE RESISTANCE / SONDE DE TEMPERATURE.....	24
16. ANALYSE DES CAPTEURS DEFECTUEUX.....	27
17. VARIABLE REPRESENTATIVE DE L'ETAT D'HUMIDITE DU SOL.....	28
18. TEST ET CALIBRATION.....	31
18.1. Durée de la mesure.....	31
18.2. Dépendance avec la température absolue	32
18.3. Temps de réponse.....	33
18. 4. Lessivage.....	34
18. 5. Calibration.....	34
19. PROCEDURE DE MESURE.....	39
20. INTERFAÇAGE AVEC L'ACQUISITEUR DE DONNEES.....	41
20. 1. Présentation de l'acquisiteur de données ENVILOG.....	41
20. 2. Interfaçage hardware.....	42

20. 3. Interfaçage software.....	42
21. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES D'AVENIR.....	44
22. CONCLUSIONS SUR LE DÉROULEMENT DU CONTRAT FIRST.....	45
22. 1. Avis de l'entreprise.....	45
22. 2. Avis de l'université.....	46
22. 3. Avis du chercheur.....	47
22. 3. Bilan.....	47
BIBLIOGRAPHIE.....	49

1. OBJET

Les trois années de convention FIRST ont servi à développer un ensemble fiable, et peu coûteux de mesure de la qualité du sol dans la zone insaturée.

Cet ensemble comprend:

- un capteur original,
- son électronique de commande,
- un acquiiseur de données de terrain,
- un logiciel spécifique de gestion du signal.

2. PRINCIPE

Dans un corps poreux en équilibre avec le sol, la teneur en eau est proportionnelle au potentiel matriciel du sol, dont la connaissance permet de déterminer d'une part la quantité d'eau disponible pour les cultures et d'autre part la teneur en eau volumique du sol lui-même.

Le principe est donc d'enfouir dans le sol une petite cellule en matériau poreux (gypse, céramique, nylon, fibre de verre, ...), qui entre en équilibre avec le sol, et sur laquelle on mesure une caractéristique physique, dont la valeur dépend de l'humidité.

En général, on mesure, sur la cellule poreuse, une des deux caractéristiques suivantes:

- la tension (pression de succion), au moyen d'un petit tuyau souple, rempli d'eau et relié en surface à un manomètre à mercure en U. Au départ, l'eau contenue dans le tensiomètre est généralement à la pression atmosphérique. L'eau du sol, étant à une pression normalement inférieure, exerce une succion qui draine une certaine quantité d'eau hors du tensiomètre rigide et étanche, ce qui entraîne une chute de la pression hydrostatique. Cette pression sera d'autant plus grande que le sol est sec.

A cause de la résistance hydraulique de la cellule ou de la zone de contact entre la cellule et le sol, la réponse du tensiomètre subit un retard par rapport aux variations dans le sol.

En outre, les mesures de succion par tensiométrie sont limitées à des valeurs de potentiel matriciel inférieures à une atmosphère. Ceci est dû au fait que le manomètre mesure un vide partiel par rapport à la pression atmosphérique extérieure et aussi au fait que, dans les systèmes macroscopiques, une colonne d'eau ne peut être maintenue à des tensions supérieures à 1 atm.

Les tensiomètres sont donc limités au contrôle de sols où les pratiques culturales visent à maintenir des conditions de faible succion, qui sont les plus favorables à la croissance de la plante.

- la conductivité électrique entre deux électrodes, mesurée par un courant alternatif afin d'éviter un effet d'électrolyse dans le milieu poreux.

La conductivité électrique d'une cellule poreuse en équilibre avec le sol dépend de l'humidité du sol, mais également des électrolytes présents dans le fluide. Les blocs constitués en matériaux inertes telle la fibre de verre, par exemple, sont très sensibles aux variations, même minimales de la salinité de la solution du sol.

Les blocs en gypse sont meilleurs à cet égard, car ils saturent l'eau en électrolyte, mais ils sont solubles dans l'eau et donc se dégradent rapidement.

La résistance de contact entre la cellule et le sol peut également nuire à la précision de la mesure, en ralentissant les échanges d'eau.

Enfin, il existe un hystérésis: à égalité de teneur en eau réelle, la résistance électrique lue est différente selon que le sol est en phase d'assèchement ou en phase d'humidification.

Dans le capteur proposé pour ce contrat, l'idée est de mesurer un paramètre thermique lié à la vitesse de dissipation de la chaleur.

Fondamentalement, celle-ci est conditionnée par le fait que l'air est un excellent isolant thermique par rapport à l'eau. En conséquence, si l'eau est remplacée par l'air dans les pores de la cellule, la longueur du parcours de conduction thermique augmente et il faut un gradient de température plus important pour dissiper une même quantité de chaleur.

Le contenu en eau du média poreux peut donc être mesuré en fournissant de la chaleur par une source au centre du bloc et en mesurant l'élévation de température en ce point.

3. RELATION ENTRE TENSION MATRICIELLE ET TENEUR EN EAU DANS LE SOL

Dans un sol saturé, par exemple, en équilibre avec une nappe d'eau libre, la tension est nulle.

Si on applique à l'eau une faible pression au-dessus de la pression atmosphérique, aucun écoulement ne se produit pendant que la succion croît, jusqu'à ce que l'on dépasse une certaine valeur critique pour laquelle le pore le plus grand commence à se vider. Cette succion critique est appelée la "succion d'entrée d'air".

Au fur et à mesure que la succion augmente ensuite, la quantité d'eau drainée devient de plus en plus grande et un nombre supplémentaire de pores relativement grands se vident du fait qu'ils ne peuvent retenir l'eau contre la succion appliquée.

Une augmentation ultérieure amènera le drainage de pores de plus en plus petits jusqu'à des valeurs élevées de la succion. Seuls les pores très fins retiennent encore de l'eau et il faudra une succion très grande pour l'extraire.

Une augmentation de la succion est donc associée à une réduction de l'humidité du sol. Cette relation peut être mesurée expérimentalement et est représentée graphiquement par une courbe appelée "courbe de rétention de l'humidité du sol", qui est caractéristique d'un sol donné. (voir figure 1)

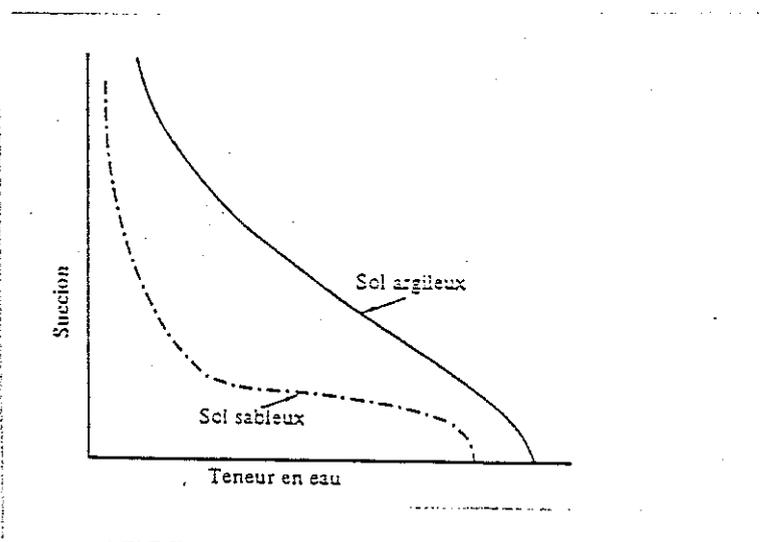


Figure 1: Courbes typiques de rétention de l'humidité du sol

La succion dans un sol peut varier de quelques centimètres de colonne d'eau (quelques mbars ou hectoPascals) à plus de 100 mètres de colonne d'eau (10 bars ou 1 MégaPascal). Pour traiter une telle gamme de valeurs, on utilise, à l'instar de l'échelle d'acidité de pH, le pF, qui est défini comme le logarithme de la charge de pression négative (succion) exprimée en centimètres d'eau. La teneur en eau étant souvent symbolisée par θ , les courbes de la figure 1 sont en général connues sous le nom de courbes pF/θ (voir aussi l'annexe I)

4. THEORIE ET PRINCIPE DE MESURE

La vitesse de dissipation de la chaleur dans un milieu poreux dépend de la chaleur spécifique, c_p , de la conductivité, λ , et de la densité, ρ , du matériau.

Pour un matériau homogène et isotrope dont la conductivité thermique ne dépend pas de la température, une combinaison utile de ces variables est connue sous le nom de diffusité thermique, κ , définie comme:

$$\kappa = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad (1)$$

Elle est une mesure de la vitesse de déplacement d'un front thermique.

Dans le milieu poreux, la conductivité thermique λ augmente exponentiellement avec la teneur en eau et la chaleur spécifique c_p augmente à peu près linéairement. Le résultat net sur la diffusité reste très sensible: pour le gypse, le rapport $\kappa_{\text{saturé}}$ sur κ_{sec} se situe aux environs de 5 et il peut valoir 3...4 pour certaines céramiques.

La méthode proposée tentera davantage de déterminer le produit de λ et de κ (voir plus loin).

La distribution de la taille des pores du milieu est également un paramètre important: plus le volume des pores par rapport au volume total (porosité) est grand, plus la conductivité thermique à l'état sec sera faible et plus sensible sera le capteur, c'est le cas du gypse qui possède une porosité de 45% environ.

Cependant, pour le gypse, la plupart des pores sont de grande taille et se vident rapidement lorsque le milieu s'assèche. La taille de pores idéale, si on veut mesurer jusqu'à un potentiel matriciel élevé (sol très sec), devrait être telle que le bloc ne soit pas complètement désaturé dans ces conditions de travail.

Par ailleurs, il est souhaitable de maintenir le bloc aussi petit que possible pour ne pas perturber l'état du sol dont on veut mesurer les caractéristiques.

Cependant, il doit être suffisamment grand pour contenir l'impulsion thermique, sinon la température au centre du bloc ne dépendra pas uniquement du potentiel matriciel de celui-ci, mais également des caractéristiques thermiques du sol avoisinant.

5. AVANTAGES DE CETTE APPROCHE

Par rapport aux techniques classiques de la tension ou de la conductivité électrique, les avantages de l'approche thermique sont les suivants:

- large étendue de mesure du potentiel (0 à - 3 bars), bien au-delà du seuil de décrochage des tensiomètres (-0.8... - 1 bars);
- non affecté par la texture du sol, tant qu'on s'intéresse au potentiel matriciel et non directement à la teneur en eau;
- non affecté par la salinité du sol, comme les mesures électriques;
- non affecté par la température du sol, puisque la variation diurne de température ne peut pas influencer la mesure qui est effectuée en 1 minute.
- peu de dérive du signal car aucun élément n'est soumis au climat extérieur;
- pas de maintenance (pas de manomètre à mercure par exemple);
- bien adapté aux mesures automatiques et au contrôle, puisqu'on a un signal électrique en sortie;
- permet de mesurer, en outre, la température du sol;
- ne nécessite pas une grande puissance électrique;
- la résistance de contact entre la cellule et le sol reste un problème, que l'on peut résoudre en tassant la terre autour du capteur.

6. ETAT DE L'ART ET SPECIFICITES DU DEVELOPPEMENT

Plusieurs études ont déjà montré que la dissipation thermique dans un milieu poreux peut être utilisée comme indice de la quantité d'eau présente.

En particulier, notre projet se base sur les travaux de C. J. PHENE, de l'USDA Agricultural Research Service, en Californie (voir annexe II), qui a développé un capteur appliquant le principe décrit plus haut et qui l'a même commercialisé sous le nom d'AGWA-II.

Le but principal de son capteur est de travailler dans la zone de potentiel matriciel optimale pour l'irrigation, c'est-à-dire de l'ordre de -1000 à - 6000 mbar. En effet, il destine l'AGWA-II au contrôle de l'irrigation, notamment en zones arides.

Notre objectif est d'en faire un capteur environnemental, c'est-à-dire:

- de mesurer le potentiel matriciel, mais si possible d'en déduire également la teneur en eau par des courbes pF/θ appropriées;
- de mesurer les tensions dans des gammes plus courantes, et pas uniquement dans la gamme optimale pour l'irrigation;
- d'en faire réellement un capteur de qualité du sol, c'est-à-dire, à terme, d'ajouter à la mesure de la tension matricielle et à la mesure de température, celle de la conductivité électrique, ce qui permettrait également d'obtenir une estimation de la concentration en sels (utile par exemple pour la surveillance du sol autour des décharges d'ordures);
- dans la mesure du possible, de réaliser des capteurs interchangeables, c'est-à-dire au moins de trouver une ou plusieurs variables caractéristiques de la qualité du sol qui soient indépendantes du capteur spécifique.

7. APPLICATIONS

Les applications de ce type de capteur sont nombreuses:

- prévention du manque d'eau pour les plantes,
- contrôle du potentiel matriciel idéal pour la croissance des plantes,
- conservation des ressources en eau lors de l'irrigation, en ne fournissant que la quantité d'eau idéale,
- complément d'une station météorologique,
- suivi de la décomposition de litière dans les écosystèmes forestiers;
- surveillance des abords d'une décharge.
- ...

8. CONTRAINTES ET SOLUTIONS

Les spécifications du capteur à développer, tel que décrit au 6e point, imposent notamment deux contraintes spécifiques très importantes.

La première est la nécessité de s'orienter vers un contrôle et un traitement locaux intelligents de manière à satisfaire les exigences suivantes:

- Mise en oeuvre de la mesure elle-même, qui doit respecter une séquence précise: chauffage et mesure de la température durant une période courte (1 minute par exemple), puis relaxation (1/4 heure environ);
- Utilisation de courbes de calibration, de modèles et de régressions pour en extraire une ou plusieurs variables caractéristiques de la qualité du sol;
- Prise en compte de tables et de courbes pF/θ propres à certains types de sol;
- Concaténation de 3 variables-température, diffusivité thermique (et donc potentiel matriciel), conductivité électrique (et donc teneur en eau et en sels dissous) - pour en retirer une information de qualité globale.

La seconde est liée à l'interchangeabilité du capteur, qui est une contrainte nécessaire si on veut réellement le rendre commercialisable, c'est-à-dire facile d'emploi et peu coûteux.

Cette seconde contrainte impose le passage par des variables universelles, les plus indépendantes possibles du capteur et également une rigueur et une reproductibilité au niveau du choix des matériaux et de la fabrication.

9. OBJECTIFS PRECIS DANS LE CADRE DU CONTRAT FIRST

Le docteur Phene, aux Etats-Unis, s'est basé sur des travaux datant de 1939. Il a publié ses premiers résultats en 1971, et a réalisé la sonde AGWA-II, commercialisée par AGWATRONICS Inc., aux environs de 1986-1987. Il dispose d'une solide équipe de recherche et développement au sein d'une fameuse institution: l'USDA Agricultural Research Service.

Malgré ce temps passé et ces atouts nombreux, le capteur AGWA-II présente encore certains défauts, mis en évidence par des chercheurs de l'université d'Uppsala en Suède et par nous-mêmes:

- gamme de potentiel matriciel limité à la zone favorable à l'irrigation,
- céramique fragile: plusieurs capteurs se brisent facilement,
- courant de mesure instable,
- mauvais contacts électriques et thermiques,
- logiciel d'utilisation assez complexe,
- grandes variabilités des résultats d'un capteur à l'autre,
- ...

Les spécifications visées par le présent travail sont plus exigeantes encore que celles du capteur du Dr. Phene, alors que notre potentiel de recherche et développement est loin d'atteindre celui de son institution.

Les objectifs à atteindre dans le cadre des trois années "FIRST" se sont donc limités à faire un test de faisabilité de la méthode, puis un développement de maquette fonctionnelle, pour arriver au terme du contrat à réaliser un prototype commercialisable de capteur au moins aussi performant que l'AGWA-II, mais mieux adapté aux contraintes de notre cahier des charges.

Cela signifie qu'il fallait détecter les causes des défauts du capteur AGWATRONICS, qu'il fallait trouver des matériaux et des techniques de fabrication fiables et reproductibles pour arriver, au minimum, à réaliser un prototype de capteur de succion matricielle et de température. Les autres aspects (mesure de la conductivité électrique, interchangeabilité parfaite, ...) n'étant envisagés qu'en cas de réussite de cette première phase.

L'aspect intelligent du capteur serait, dans un premier temps, confié à un système d'acquisition de données portable et programmable, même si l'objectif à plus long terme est de développer une électronique intégrée et spécifique (voir annexe III: définition d'un capteur intelligent).

Ce faisant, il ne fallait pas oublier le but du programme FIRST qui est la réalisation de produits commercialisables: il fallait donc tester le capteur dans des conditions réelles, satisfaire les exigences de la mesure sur le terrain, et utiliser un matériel d'acquisition commercial.

Au terme des trois années de travail, cet objectif est atteint: un prototype performant est réalisé, il peut être commercialisé tel quel ou être amélioré pour tendre vers le capteur environnemental prescrit initialement.

10. RÔLE DES PARTENAIRES

L'institution universitaire, la FUL, est spécialisée en mesure de caractéristiques environnementales: elle pouvait donc développer la cellule poreuse et tout le dispositif de la mesure proprement dite; elle pouvait également se charger des tests et de la calibration.

Le partenaire privé, BTW sa, possède une longue expérience en appareils de mesures météorologiques et environnementales: il se chargerait des aspects plus concrets liés à l'interfaçage avec un acquisateur de données (ENVILOG en l'occurrence) et également de l'orientation de la maquette vers un prototype répondant aux exigences des clients potentiels.

11. DESCRIPTION DU CAPTEUR

Le capteur est un cylindre en céramique, parfaitement dimensionné par un tournage précis (20 mm de diamètre et 30 mm de hauteur).

La partie électronique comprend un ensemble résistance chauffante/sonde de température logé dans un trou de 4 mm de diamètre foré au centre du bloc. Un bon contact thermique doit être assuré entre cet ensemble et la matrice en céramique.

Il faut également veiller à bien isoler électriquement les fils d'injection de courant et les fils de mesure.

La partie supérieure du capteur est protégée par un capuchon en PVC et une gaine de caoutchouc qui fixent le câble à 4 fils, évitent l'arrivée d'eau par les connexions dans la matrice de céramique et constituent une protection mécanique lors de l'introduction du capteur dans le sol (figure 2).

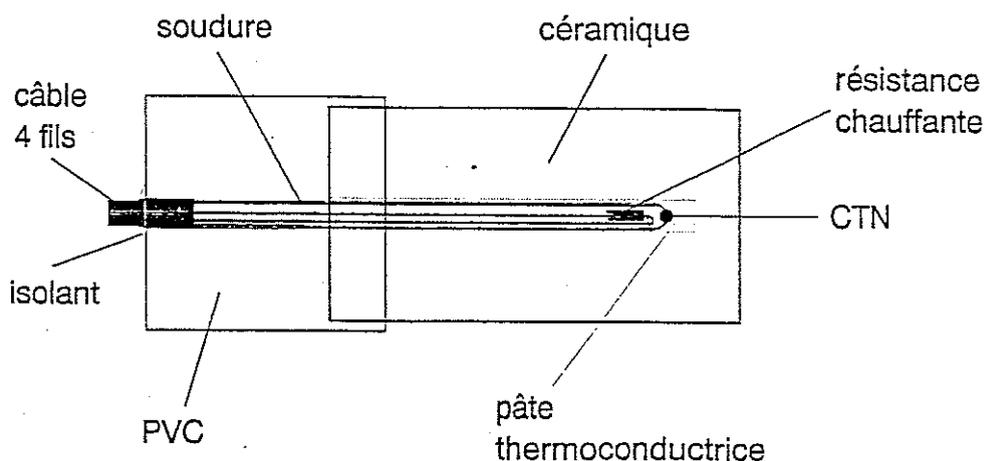


Figure 2: Schéma de la sonde telle qu'elle se présente dans sa version définitive
a. Configuration

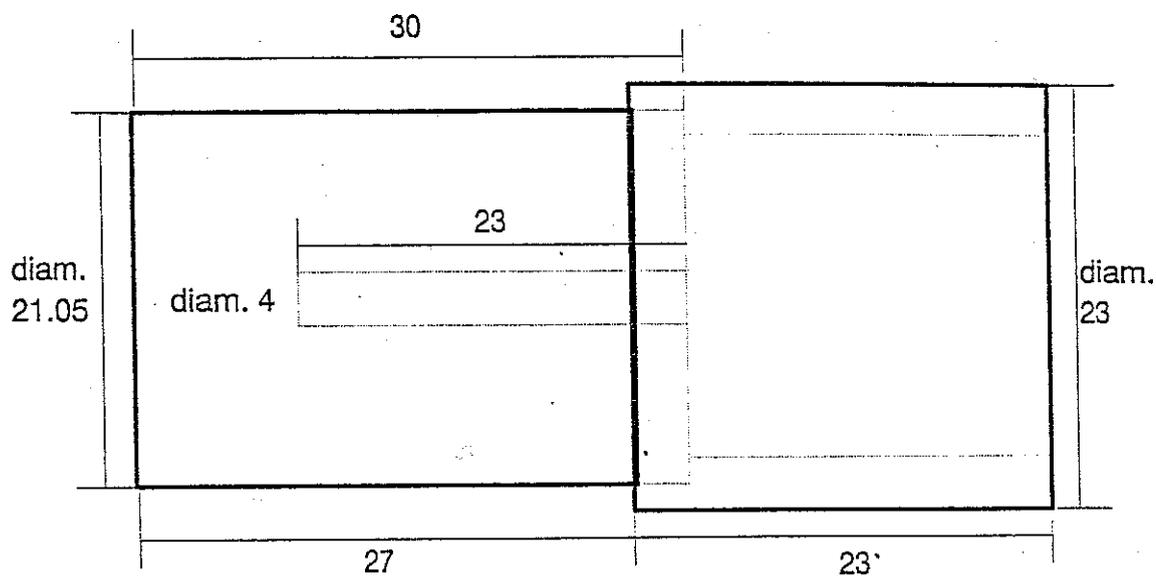


Figure 2: Schéma de la sonde telle qu'elle se présente dans sa version définitive
b. Dimensions en mm

12. LE MATERIAU POREUX

12.1 Choix du matériau

Le corps poreux idéal doit présenter une grande stabilité dans le sol, une grande porosité et une distribution assez large des diamètres de pores, avec notamment, suffisamment de pores de petite taille.

Plus la porosité est grande, plus la différence de conductivité thermique entre les états hydraté et sec est importante et meilleure est la précision de la mesure.

Le critère de sélection veut que le matériau possède une porosité supérieure à 25%. Le milieu poreux constituant le capteur sera donc une céramique de grande porosité, mais conservant néanmoins de bonnes propriétés de stabilité dans le sol, d'usinabilité et de résistance mécanique.

12.2 La cellule en céramique

12.2.1. Spécifications

Une partie importante du temps d'étude a été consacrée à définir une méthodologie fiable et reproductible de la fabrication de la céramique.

Les spécifications devraient porter sur:

- la composition idéale du mélange de base,
- le procédé de coulage: fabrication du moule et coulage proprement dit,
- le "timing" de séchage et de cuisson de l'éprouvette.

12.2.2. Mélange

Après beaucoup de tests et de tâtonnements, on est arrivé à trouver un mélange satisfaisant composé de:

- terre de coulage ou barbotine commerciale où sont déjà incorporés des additifs défloculants et complexants (Na_3SiO_4 , TiO_2 , ...);
- carbonate de magnésium (MgCO_3), de manière à augmenter la teneur en magnésie (MgO), qui améliore les propriétés de retrait de cuisson, de dilatation thermique ultérieure, et en général, de résistance mécanique de l'éprouvette cuite;
- sciure de bois qui, incorporée au mélange de composés secs, permet d'atteindre une porosité élevée, par combustion des particules.

12.2.3. Préparation

La façon de préparer le mélange résulte, elle aussi, de l'expérience acquise au cours d'une procédure par essais et erreurs.

La barbotine est d'abord préparée sous forme d'une pâte assez liquide. Le carbonate de magnésium, préalablement mouillé, est ensuite incorporé, et en dernier lieu, la sciure de bois tamisée et également imbibée d'eau afin d'éviter la formation de grumeaux.

12.2.4. Coulage

Le coulage est réalisé dans un moule cylindrique en plâtre, qui permet, par sa granulométrie proche de celle de la céramique, une absorption continue et régulière de l'humidité de l'éprouvette.

Si le moule absorbe trop rapidement l'humidité du mélange, celui-ci peut sécher trop rapidement, ce qui crée des fissures dans l'éprouvette. En fonction du pourcentage d'eau du mélange, il faut donc parfois humidifier légèrement le moule en plâtre.

Le cylindre de céramique est conservé dans le moule jusqu'au moment où sa consistance autorise la séparation du moule, qui s'ouvre longitudinalement en son milieu.

Comme alternative au procédé de coulage, certains essais d'extrusion semblent prometteurs et mériteraient éventuellement un intérêt particulier lors de l'industrialisation de la fabrication.

Les éprouvettes sont alors laissées sécher à l'air libre pendant au moins 48 heures. Avant cuisson, elles sont encore séchées à l'étuve à 110°C pendant 15 heures, ce qui d'une part évacue le reste de l'eau passée sous forme de vapeur et d'autre part, favorise la porosité par la création de petites bulles. Sans ce palier indispensable, les bulles de vapeur se créeraient plus rapidement, puis par expansion brusque feraient éclater la céramique.

12.2.5. Cuisson

Dernière opération de la mise en oeuvre de la céramique, la cuisson en est une étape particulièrement importante et délicate: elle conditionne notamment la porosité et la résistance mécanique de l'éprouvette.

Les contraintes, parfois contradictoires, de cette opération sont les suivantes:

- Une montée infiniment lente de température jusqu'à environ 1050° C est idéale. Elle favorise à la fois la cohérence de la matrice et son homogénéité en conservant une porosité satisfaisante. On atteint dans ce cas un état quasi complètement cristallin. En phase de production, le temps de cuisson doit cependant rester limité puisqu'il conditionne la consommation d'énergie électrique et le délai de fabrication.
- A l'inverse, une montée très rapide de la température, surtout au-delà de 1050° C, favorise la création d'une phase vitreuse par la fusion de la silice contenue dans le mélange. Pratiquement aucun noyau de cristallisation n'est formé: la céramique formée n'est pas du tout poreuse et présente une moins bonne résistance mécanique que la phase cristalline.
- L'apparition d'une phase vitreuse est aussi favorisée par un refroidissement trop brusque. Le maintien d'un long palier à la température maximum est indispensable pour assurer un temps suffisant de croissance des cristaux sur les germes formés pendant le chauffage.

- Par ailleurs, si la cuisson est limitée en dessous d'un seuil de température (850°C...900°C), les cristaux obtenus seront sans cohérence, la matrice sera hétérogène et non reproductible. On obtient en fait un frittage, c'est-à-dire un matériau poreux, mais incohérent.
- Il faut assurer la combustion rapide des particules de sciure de bois, afin de créer la porosité voulue.
- Enfin, le four possède ses propres limites, liées à la puissance électrique disponible, à son isolation thermique et à la température maximum admissible.

En résumé, la cuisson ne doit être ni trop lente, ni trop rapide. On doit atteindre un minimum de 900°C pour éviter le frittage et un maximum de 1050°C pour éviter une trop grande vitrification. Dans cette gamme, une température basse favorisera une plus grande porosité.

On doit assurer ensuite la croissance des cristaux pendant un palier suffisamment long. On obtient alors de gros cristaux imbriqués dans la phase vitreuse.

Enfin, la descente en température doit être assez lente.

Une partie importante du travail a été consacrée à mettre au point une cuisson optimisée. Grâce à une étude de la cinétique thermique du four et des céramiques, ainsi qu'à l'utilisation d'une régulation intelligente basée sur un contrôleur PID programmable, on est arrivé à une procédure fiable. Le matériau obtenu répond aux critères de porosité et de tenue mécanique, sans exiger une fabrication longue et fastidieuse.

Après l'étape de séchage à 110°C, on élève la température linéairement jusqu'à 925°C à raison d'environ 410°C par heure (le chauffage dure donc environ deux heures). Ensuite, on maintient la température à 925°C pendant huit heures, puis on laisse refroidir naturellement, sans ouvrir la porte du four et ceci dure environ 24 heures.

12.3. Caractérisation de la céramique

12.3.1. Porosité et densité apparente

On mesure ces propriétés par imprégnation d'eau après l'application d'un vide durant deux heures.

On avait auparavant mesuré le poids sec P_1 de l'éprouvette, on mesure ensuite le poids humide P_2 et également le poids sous eau P_3 (mesure de déplacement d'eau provoqué par l'échantillon saturé), de manière à déterminer le volume V de l'échantillon.

Si on tient compte du fait que la densité de l'eau vaut l'unité:

- la porosité en poids est définie par:
$$p = \frac{P_2 - P_1}{P_1} \times 100;$$

- la porosité en volume, par:
$$f = \frac{P_2 - P_1}{V} \times 100;$$

- la masse spécifique apparente, par:
$$\rho = \frac{P_1}{V}$$

Dans notre cas, on calcule:

	céramique "rouge"	céramique "blanche"
p (%)	37	54
f (%)	46	57
ρ (kg/m ³)	1.24	1.06

Les deux céramiques "rouge" et "blanche" correspondent à deux barbotines différentes, avec la même technique de fabrication. Les deux ont été testées dans la suite.

12.3.2. Courbe de distribution porosimétrique

Ces mesures sont effectuées au porosimètre à mercure.

Il n'existe en fait aucun moyen simple ou direct de déterminer ou de caractériser cette distribution en elle-même. C'est pourquoi, on détermine des paramètres qui dépendent indirectement de la distribution des diamètres des pores.

Notamment, la pression capillaire durant la sorption ou la désorption dépend du diamètre des pores. On utilise donc un liquide non mouillant, du mercure, que l'on force à des pressions croissantes dans l'éprouvette.

Si on mesure, en parallèle, le volume de mercure introduit, on peut déterminer le taux de contribution volumique, c'est-à-dire le rapport entre le volume de pores de diamètres inférieurs ou égaux à un diamètre donné et leur volume total.

La figure 3 montre la distribution cumulée de la taille des pores. En abscisses, on a le diamètre effectif en micro-mètres (en échelle logarithmique) et en ordonnées, on a le pourcentage de pores qui possèdent un diamètre inférieur au diamètre fixé par l'abscisse.

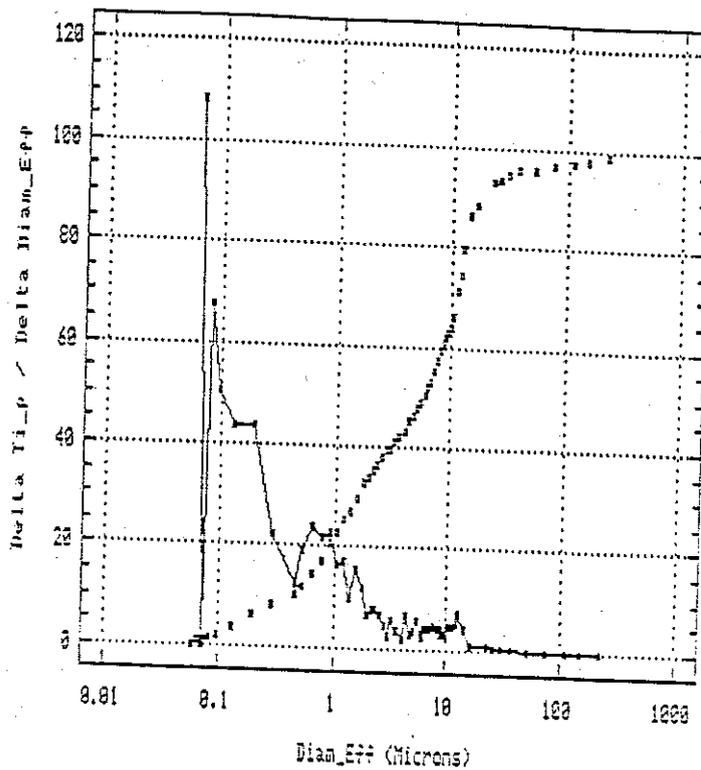


Figure 3: Distribution de la taille des pores pour la céramique "rouge".

En traits pleins, on a également représenté la dérivée de cette courbe, c'est-à-dire la distribution réelle, non cumulée. On remarque que 65 % des pores possèdent un diamètre inférieur à 10 μm , donc des pores suffisamment petits pour ne pas être vidés à faible tension matricielle.

Parmi ces pores, un tiers environ sont de petite taille (0.1 - 1 μm) et le reste est distribué entre les diamètres 1-10 μm . Cette distribution correspond assez bien à nos spécifications de départ.

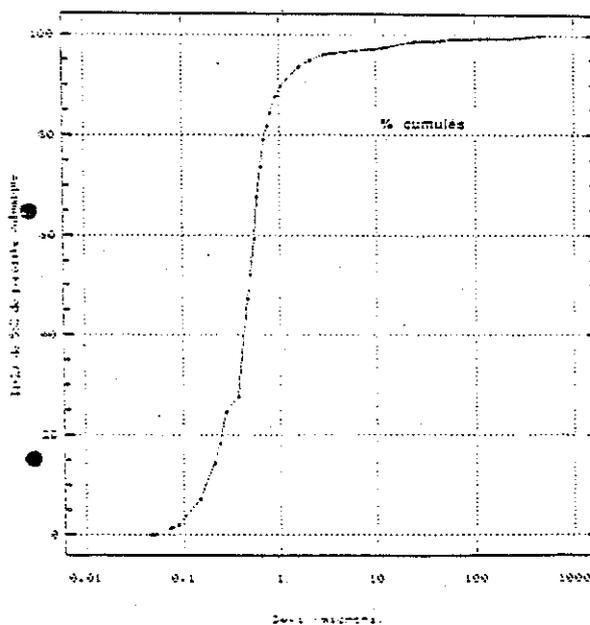


Figure 4: Distribution de la taille des pores pour la céramique "blanche".

12. 3. 3. Autres caractéristiques

La conductivité thermique λ de l'éprouvette peut être estimée grossièrement à partir du principe même de la mesure décrite au chapitre 4.

En effet, la théorie nous apprend (voir annexe IV, relation (AIV, 3)) que la température au milieu du bloc de céramique chauffé évolue quasi linéairement en fonction de l'inverse de la racine carrée du temps. L'intersection de cette droite avec l'axe des ordonnées (qui est donc aussi la température asymptotique, atteinte en régime permanent) est:

$$B = \frac{Q}{4 \pi \lambda a} \quad (2)$$

où Q est la puissance thermique injectée,
 a est le rayon équivalent de la partie chauffante centrale, considérée comme une sphère.

En estimant Q et a , on a donc une idée de la conductivité thermique λ .

On trouve: λ_{sec} (c'est-à-dire de l'éprouvette à l'air libre) = 0.6 W/mK

$\lambda_{\text{saturé}}$ (c'est-à-dire de l'éprouvette plongée dans l'eau) = 1.3 W/mK

Ces valeurs ne sont que des estimations, (elles dépendent fort des valeurs adoptées pour Q et a et du fait que l'on néglige la résistance de contact), mais elles donnent une idée de l'ordre de grandeur de la conductivité thermique, qui d'ailleurs est assez proche de celui obtenu par Phene sur son capteur (de 0.4 à 0.8 W/mK).

Remarquons que, selon ces estimations, le rapport $\lambda_{\text{saturé}}/\lambda_{\text{sec}}$ vaut un peu plus de 2, ce qui permet d'espérer une bonne sensibilité de cette variable au degré d'humidité de la céramique.

Connaissant λ , on peut estimer la diffusivité thermique κ à partir de la pente A de la droite (T vs $t^{-1/2}$), qui est fonction de Q , λ et κ :

$$A = - \frac{Q}{4\pi^{3/2} \lambda \kappa^{1/2}} \quad (3)$$

On obtient:

$$\kappa_{\text{sec}} = 1.5 \times 10^{-6} \text{ J/kg K}$$

$$\kappa_{\text{humide}} = 2.1 \times 10^{-6} \text{ J/kg K}$$

$$\kappa_{\text{saturé}} = 1.8 \times 10^{-6} \text{ J/kg K}$$

avec un rapport $\kappa_{\text{saturé}} / \kappa_{\text{sec}}$ assez faible: 1.2 environ et une valeur de κ_{humide} supérieure à celle de $\kappa_{\text{saturé}}$, ce qui montre, si nos essais sont fiables, qu'il ne s'agit pas d'une bonne variable pour déterminer la teneur en eau.

Enfin, il eut été souhaitable de mesurer également sur notre éprouvette:

- des caractéristiques de tenue mécanique: tension de rupture, module d'élasticité, résistance au choc;
- des caractéristiques de tenue thermique: coefficient de dilatation thermique, rétraction à la cuisson.

Ces caractéristiques, si elles n'ont pas été mesurées au moyen des techniques appropriées, ont en tout cas été estimées visuellement ou par des tests simples et ont été optimisées lors de la recherche d'une technique de fabrication adéquate.

13. LA RESISTANCE CHAUFFANTE

13. 1. Temps et puissance de chauffe

La résistance chauffante doit être d'une taille la plus réduite possible et posséder des caractéristiques de bonne tenue mécanique et de faible dérive dans le temps.

Le choix de la valeur de la résistance est liée à ceux des valeurs du courant injecté et du temps de chauffage.

Les valeurs limites sont fixées par la nécessité de conserver le front thermique à l'intérieur de la cellule poreuse.

L'annexe IV présente les relations mathématiques permettant de modéliser l'évolution de la température à l'intérieur d'une sphère chauffante qui diffuse dans un milieu infini. Une loi où T évolue comme $t^{-1/2}$ (relation AIV, 2) est valable pour $\beta_a = \frac{\kappa t}{a^2} > 0.02$ où a est le rayon équivalent de la sphère centrale, κ , la diffusité thermique du milieu infini et t le temps.

En considérant, $a=2\text{mm}$ et $\kappa = 1.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, cette condition est valable pour $t > 0.05$ secondes. Même en tenant compte des incertitudes sur la valeur de a , on peut donc considérer que cette loi est valable déjà avant la fin de la première seconde.

Il faut par contre que β_a soit au moins de l'ordre de 40...50 pour négliger les termes d'ordres supérieurs à $t^{-1/2}$, c'est-à-dire pour $t > 100$ secondes environ.

Enfin, la relation

$$\beta = \frac{\kappa t}{r^2} = 0.2 \quad (4)$$

permet d'évaluer le temps que met le front thermique pour atteindre le rayon r . Plutôt que d'introduire des valeurs κ calculées avec une grande marge d'erreur, il est possible de réécrire la condition (4) en fonction des coefficients A et B définis en (2) et en (3) et du rapport $\left(\frac{r}{a}\right)$:

$$t = 0.2\pi \left(\frac{r}{a}\right)^2 \left(\frac{A}{B}\right)^2 \quad (5)$$

Dans notre cas, on trouve $t=68$ secondes pour le sol saturé et $t=81$ secondes pour le sol sec en considérant un rapport $\frac{r}{a} = 5$.

Nous choisisons donc 60 secondes comme temps de mesure. L'augmentation de température au-delà de la minute devient d'ailleurs très petite par rapport à la variation de départ.

La cinétique du front thermique ne dépend pas de la puissance de chauffe Q . Celle-ci conditionne par contre le niveau de température atteint dans la sphère après 60 secondes.

Dans notre cas, il faut nous imposer un niveau suffisant pour pouvoir le mesurer avec une bonne résolution.

Il existe également une limite supérieure:

- si le capteur est placé sur le terrain, il est alimenté par une batterie, qui s'épuise proportionnellement à la puissance délivrée;
- un chauffage trop important limite la durée de vie du capteur et perturbe son équilibre avec l'environnement (déshydratation, vaporisation, migration).

Fixons par exemple à 1°C l'écart que devrait atteindre la température par rapport à la température initiale dans un sol saturé.

En première approximation, on peut considérer la loi linéaire (AIV, 3) en s'imposant $T=1$. On trouve que Q doit être supérieure à 0.04 W environ. Comme les hypothèses du modèle employé ne sont pas toutes remplies, fixons-nous le seuil de sécurité: $Q = 0.1$ W.

13.2. Choix de la résistance électrique

La puissance sera créée par le passage d'un courant I dans une résistance électrique R . Par effet Joule, on a:

$$Q = R I^2 \quad (6)$$

Un injecteur de courant constant est plus simple à fabriquer si I n'est ni trop petit, ni trop grand. Fixons-le à 10 mA, ce qui fixe R à 1 k Ω , puisque $Q=0.1$ W.

Le choix de la résistance chauffante doit satisfaire les exigences suivantes:

- disponible en valeur nominale de 1000 Ω ,
- faible coût,
- faible capacité calorifique,
- petites dimensions,
- température de claquage élevée,
- tolérance minimum 5%,
- puissance maximum admissible supérieure à 0.2 w,
- faible dérive.

Parmi les composants disponibles figurent les résistances métal-film, les résistances thick-film, les résistances carbone et les résistances bobinées. Les deux dernières sont éliminées pour des raisons de taille et de niveau de tolérance inadéquats.

Sur les résistances métal-film, un film d'alliage métallique homogène est déposé sur un corps de céramique très pure. Ce film est gravé hélicoïdalement et raccordé de part et d'autre à des fils de cuivre.

Cette technique permet une bonne tolérance sur la valeur de la résistance ainsi qu'une faible dérive.

Les résistances thick-film sont en général rectangulaires. Le film résistif est plus épais et est placé sur un support en alumine. A égalité de puissance, ces résistances sont plus compactes et permettent des soudures fiables. Elles sont particulièrement adaptées au montage des composants en surface (technique CMS).

Un compromis des différents critères nous a fait retenir une résistance métal-film de petite taille: la SFR16T de Philips.

Le corps de la résistance est un cylindre de diamètre 1.9 mm et de longueur 3.7 mm. La puissance maximum que l'on peut dissiper est 0.5 W. La température de claquage est 155°C, la tolérance 5%, la dérive thermique de 100 ppm par degré et la stabilité en charge est de l'ordre de 1%. Le corps de la résistance est encapsulé dans une matière servant de protection électrique, mécanique, climatique et très résistante aux solvants.

13. 3. Source de courant

Pour l'alimentation en puissance, deux versions ont été testées:

- une source de tension constante, de 10 V, qui délivre un courant de 10 mA dans la résistance de 1000 Ω ;
- une source de courant constant, de 10 mA.

Cette dernière solution a été finalement choisie: elle permet une meilleure stabilité de la puissance dissipée et également une modification facile du courant de chauffage au niveau de la carte électronique.

L'injecteur de courant fabriqué est basé sur un régulateur LM334 qui fixe le courant, et sur des transistors BC107 qui délivrent la puissance dans chacune des résistances chauffantes. La figure 5 montre le schéma de cet injecteur.

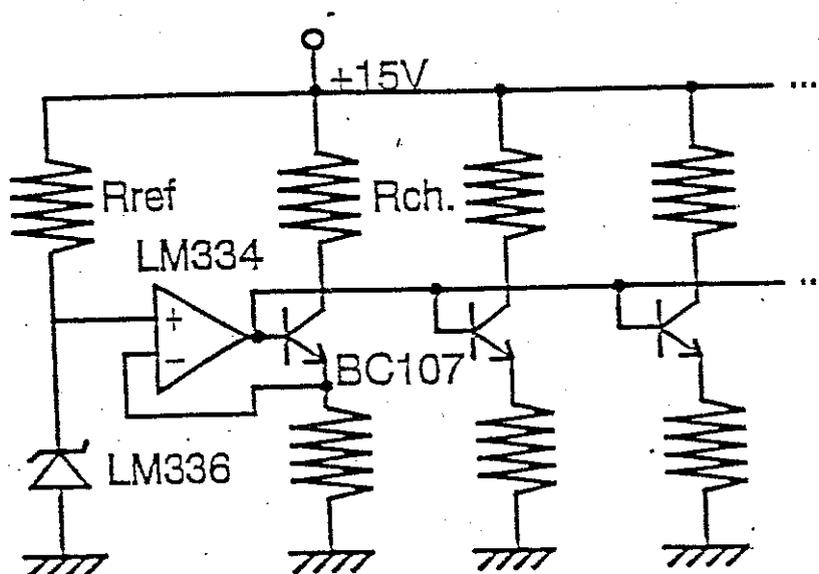


Figure 5: Schéma électronique de l'injecteur de courant constant dans les résistances chauffantes.

Pour nos essais, nous avons réalisé des modules permettant de chauffer simultanément quatre résistances.

La philosophie de mesure intelligente proposée au départ impose en outre de pouvoir commander l'injection de courant par le logger ou l'intelligence locale. Un petit relais a été utilisé à cet effet.

14. LA SONDE DE TEMPERATURE

14.1. Choix de la sonde

Le capteur américain AGWA-II utilise, pour mesurer la température, un circuit intégré AD590 d'Analog Devices. Ce circuit nécessite une alimentation en tension de 4 à 30 V et délivre un signal sous la forme d'un courant linéairement proportionnel à la température (1 μ A par degré).

Ce capteur présente également un temps de réponse assez faible, il est peu sensible aux variations de la tension d'alimentation, un signal toujours positif (0 V à 0 degré Kelvin), un échauffement négligeable et une grande impédance de sortie (1329 k Ω à 25°C), ce qui limite l'influence des pertes de courant sur de grandes distances.

La mesure du courant délivré par l'AD590 est réalisée en faisant passer le courant dans une résistance (10 k Ω) et mesurant la tension à ses bornes.

Pour notre part, nous avons préféré travailler avec une thermistance à coefficient de température négatif (CTN) de marque FENWAL, type 192.193 LET A01 dont les caractéristiques sont les suivantes:

- 10 k Ω à 25°C (32.65 k Ω à 0°C et 3.6 k Ω à 50°C);
- fortement non linéaire,
- coefficient de température négatif: la résistance diminue lorsque la température augmente;
- petite taille (perle de 2 mm de diamètre environ);
- constante de dissipation (puissance à injecter dans la sonde pour élever sa température): 1 mW par degré dans l'air et 8 mW par degré dans l'huile;
- temps de réponse: 10 secondes maximum dans l'air et 1 seconde maximum dans l'huile;
- interchangeabilité absolue: $\pm 0.2^\circ\text{C}$ dans notre gamme de mesure.

Ce choix résulte des considérations suivantes:

- la FUL travaille avec ces capteurs depuis de nombreuses années, avec satisfaction;
- la sensibilité est très grande: environ 500 Ω par degré aux alentours de 25°C, ce qui permet également de négliger l'influence de la résistance des fils de mesure;
- la bonne tolérance absolue permettrait l'interchangeabilité des capteurs sans modification des courbes d'étalonnage. Ceci est, bien entendu, particulièrement important pour la mesure de la température absolue du sol avant chauffage (ce l'est moins pour le relevé de l'évolution relative durant le chauffage). Pour atteindre la même tolérance avec le capteur AD590, il faut en choisir une version très chère et moins disponible;
- le temps de réponse reste acceptable pour notre application.

Les inconvénients par rapport au capteur d'Analog Devices ne sont pas réellement limitatifs.

- Le senseur FENWAL est non linéaire, mais puisque le principe de notre approche est de faire suivre le capteur d'un microprocesseur, ceci n'est pas une contrainte: il suffit de transformer le signal électrique V en température T par une loi adéquate. Nous avons choisi la loi suivante, qui donne d'excellents résultats:

$$\frac{1}{T} = a + b \ln V + c (\ln V)^3 \quad (7)$$

où a, b et c sont des constantes d'étalonnage.

- Puisque c'est une résistance électrique dont il faut mesurer la valeur, il faut lui injecter un courant stable et connu. La valeur lue sera évidemment très sensible aux variations de ce courant, bien plus sensible que ne l'était le capteur AD590 à la tension d'alimentation. Pour ce dernier cependant, le problème de la sensibilité aux variations des composants électroniques est reporté plus loin, lorsqu'il faut transformer le courant en tension. Dans le cas de la CTN, il faudra veiller à la stabilité de l'injecteur de courant.
- L'effet Joule induit par le courant de mesure dans la thermistance chauffe celle-ci et donc, perturbe la mesure de température. Si nous considérons une valeur de 5 mW par degré (valeur intermédiaire entre celle de l'air et celle de l'huile) pour la constante de dissipation thermique et une valeur de 10 k Ω pour la thermistance, et que nous nous fixons une élévation maximum de 0.05°C pour la température, il faudrait limiter le courant d'injection à environ 160 μ A. Nous choisirons 150 μ A.

14. 2. Mesure de la résistance

Le courant de 150 μA est injecté dans les CTN grâce à des sources de courant qui ont été conçues selon le même principe que celles de la figure 5. La linéarité de la réponse en tension en fonction de la résistance a été testée: elle est une preuve de l'insensibilité de la source de courant à une variation de charge. Les différents injecteurs ont également été testés l'un par rapport à l'autre: on peut considérer comme identiques les valeurs des courants.

A l'instar des injecteurs de la puissance de chauffage, ces injecteurs de courant de mesure ont été groupés par quatre et ont été montés sur la même carte électronique que les premiers, de manière à réaliser un ensemble compact.

14. 3. Calibration de la mesure en température

En phase de fabrication, la tolérance atteinte sur le senseur de température et sur le courant de mesure permettra sans doute d'éviter un étalonnage spécifique à chaque capteur. En phase de développement, une calibration de la chaîne complète a été réalisée: il s'agissait donc d'ajuster les trois coefficients de la relation (7) pour la CTN munie de son injecteur propre et placée dans la céramique.

Un système d'étalonnage automatique des sondes de température a été développé à la FUL, il est décrit dans l'annexe V. Ce système est basé sur un bain d'eau glycolée thermostatisé dont la température est régulée précisément et mesurée au moyen d'une sonde de référence.

Le capteur en céramique est trempé jusqu'à saturation dans le bain. On considère qu'après 48 heures, la saturation est atteinte. On élève ensuite la température du bain par paliers (de degré en degré ou par 5°C). A chaque palier, on attend 20 minutes pour assurer la stabilité de l'équilibre thermique du capteur avec le bain, puis on relève la température du bain et la tension aux bornes de la CTN. Le tableau de valeurs sert ensuite à ajuster les paramètres de la relation (7) au moyen d'un logiciel d'ajustement adapté.

15. L'ASSEMBLAGE RESISTANCE / SONDE DE TEMPERATURE

L'éprouvette de céramique est parfaitement dimensionnée par le tournage précis de la pièce. Le logement de la partie électronique est préparé par le forage du centre du bloc (4 mm de diamètre).

L'ensemble résistance / thermistance doit être conditionné de façon à former une unité électronique compacte, d'encombrement défini, qui pourrait grossièrement être assimilée à une sphère.

Les dimensions des deux éléments étant connues, on peut tester différentes manières de les disposer l'un par rapport à l'autre.

Trois configurations ont été testées, elles sont référées par les lettres A, B et C sur la figure 6. L'ensemble est placé, tel qu'il est vu sur la figure, dans le sens de la hauteur de la cellule cylindrique en céramique.

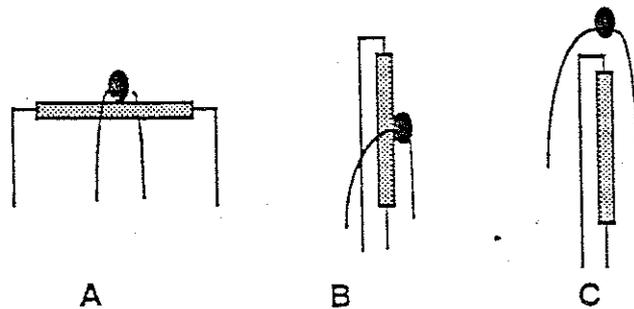


Figure 6: Trois configurations retenues pour l'ensemble résistance / thermistance

Pour ces trois configurations, la température durant chauffage a été mesurée. La sensibilité de la mesure est nettement moins grande pour la configuration A, qui n'est d'ailleurs pas très pratique, puisque les quatre fils ne peuvent être rassemblés en un seul câble.

La configuration B est probablement celle qui se rapproche le plus du principe théorique de la méthode qui consiste à mesurer la température dans une sphère chauffante. Cependant la courbe d'évolution de la température dans ce cas est rigoureusement identique à celle résultant de la configuration C, qui est plus facile à mettre en oeuvre. C'est cette dernière qui a été choisie.

Les quatre fils électriques sont isolés par de fines gaines thermorétractables. L'ensemble résistance chauffante / thermistance est alors solidarisé au moyen d'un adhésif époxy à deux composants: l'ECCOBOND 286 de Grace n. v. (Westerlo - Belgique).

Les caractéristiques de ce composant sont les suivantes:

- conductivité thermique: 1.0 W/mK,
- résistivité électrique: supérieure à 10^{14} Ω .cm,
- excellente résistance chimique et aux solvants,
- temps de séchage: 4 heures,
- temps avant utilisation: 24 heures.

Il s'agit donc d'une résine isolante électrique, mais bonne conductrice thermique. Un câble à 4 conducteurs est alors soudé aux extrémités des quatre fils et les soudures sont protégées par des gaines thermorétractables.

L'ensemble est alors glissé dans le trou de la cellule en céramique, où l'on a préalablement déposé une goutte d'adhésif époxy. Le contact thermique entre la partie électronique et le milieu poreux est encore amélioré en remplissant les vides dans le trou avec cet adhésif.

La partie supérieure du capteur est protégée par un capuchon en PVC rigide et une gaine en caoutchouc (passe-fil) qui assujettissent le câble et évitent l'arrivée d'eau par les connexions. Le capuchon et la gaine sont intimement reliés par de l'ECCOBOND.

On a veillé particulièrement à minimiser la conduction thermique ou hydrique le long des fils de mesure et d'injection.

Toutes les composantes du capteur possèdent des dimensions parfaitement connues, les différentes étapes de fabrication sont réalisées selon une procédure rigoureuse, les fils sont toujours pliés ou coudés selon les mêmes techniques et par conséquent, la fabrication est parfaitement reproductible.

Les photographies 1 et 2 représentent respectivement l'ensemble résistance chauffante / thermistance enrobé de résine époxy et le capteur terminé.

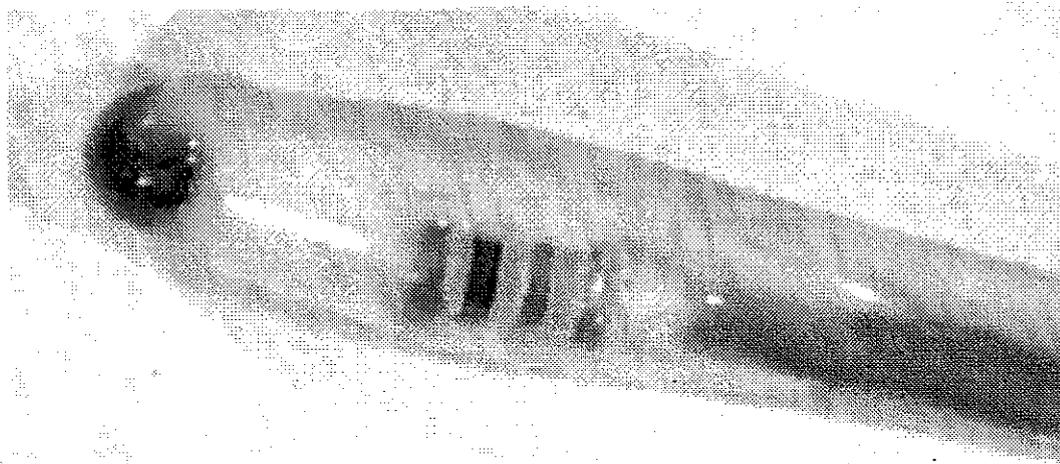


Photo 1: Ensemble résistance chauffante / thermistance.

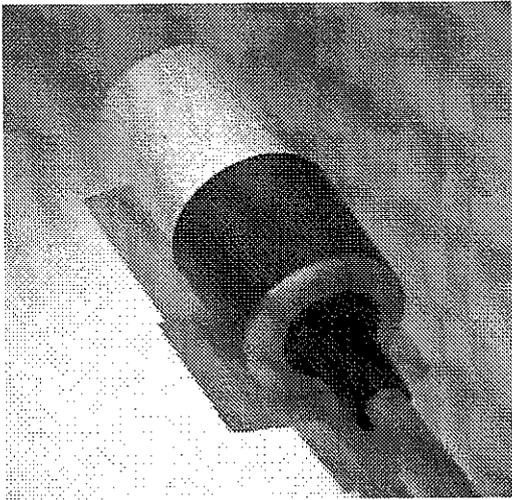


Photo 2: Capteur terminé.

16. ANALYSE DES CAPTEURS DEFECTUEUX

La procédure rigoureuse de fabrication du capteur qui a été décrite dans les chapitres précédents a pu être définie grâce à une méthode d'essais et erreurs et à l'analyse objective des défauts.

Et même actuellement, la méthode mise au point n'est pas encore parfaite: certains défauts surviennent, dont il faut identifier l'origine.

Par exemple, après un certain nombre de cycles, un des capteurs s'est avéré défectueux. La thermistance affichait une résistance anormalement inférieure à la valeur prévue. La résistance chauffante, elle, présentait toujours 1 k Ω .

L'ensemble résistance chauffante / thermistance a été délogé de la céramique. L'anomalie persistait, même directement aux bornes de la CTN. L'ensemble fut alors analysé au microscope.

En apparence, rien n'a altéré la thermistance, ni d'ailleurs la résistance chauffante. Et la céramique est intacte. On peut suspecter soit une erreur de manipulation (injection d'un courant trop important), soit un peu d'humidité qui aurait court-circuité les bornes de la thermistance de façon interne et irréversible.

Cet exemple (et il y en a eu d'autres) illustre la façon de travailler: la présence de ce défaut nous a incité à améliorer l'isolation électrique des éléments et les sécurités au niveau de leur raccordement à l'électronique de mesure.

L'examen visuel des céramiques nous a également permis d'améliorer la technique d'homogénéisation du mélange de départ.

L'analyse des résultats nous a enfin montré qu'il fallait encore améliorer la reproductibilité de fabrication des capteurs.

17. VARIABLE REPRESENTATIVE DE L'ETAT D'HUMIDITE DU SOL

La méthode de mesure est basée sur la variation de dissipation thermique dans la cellule poreuse en fonction de son état d'humidité.

Si l'on désire réaliser un capteur de mesure, il faut qu'il délivre en sortie une variable qui soit caractéristique de l'état d'humidité du sol, de façon univoque et reproductible.

Un premier test a donc été effectué sur quatre capteurs issus de la même fabrication (il s'agit cependant d'une version qui a encore fait l'objet d'améliorations par la suite).

Les quatre capteurs ont été testés dans deux situations connues et reproductibles: l'état "sec", c'est-à-dire à l'air libre, et l'état "saturé", c'est-à-dire les capteurs plongés dans l'eau. A ces deux situations, on en a ajouté une troisième, intermédiaire, qui correspond à l'utilisation réelle du capteur: celle d'un sol "humide", sans précision de la teneur en eau correspondante, mais qui peut être considéré comme un milieu-test homogène et identique pour les quatre capteurs.

Dans chaque cas, on a relevé l'évolution en température durant un chauffage de 60 secondes.

Sur base de ces enregistrements, on a tenté d'identifier une variable qui discrimine le mieux possible l'état d'humidité du sol, et qui soit la moins spécifique possible du capteur considéré.

Les variables suivantes ont été considérées:

1. l'écart de température entre le temps "zéro" et 10 secondes,
2. l'écart de température entre le temps "zéro" et 60 secondes,
3. l'écart de température entre 10 et 60 secondes,
4. la pente moyenne de la fin de la courbe Température versus temps,
5. la pente moyenne de la fin de la courbe $\log T$ versus temps,
6. la pente moyenne de la fin de la courbe T versus $\log t$,
7. la pente moyenne de la courbe T versus $t^{-\frac{1}{2}}$, entre 8 et 60 secondes,
8. l'intersection de la même courbe, prolongée, avec l'axe vertical,
9. le rapport de ces deux dernières variables,
10. le produit des deux mêmes variables.

Tous les résultats sont consignés dans l'annexe VI.

En voici les principales conclusions:

- Les **différences** de température restent faibles, 2.3°C dans le meilleur des cas entre 0 et 60 secondes, mais elles varient en fonction de l'état du milieu;
- De plus, les **formes** des courbes semblent également varier selon cet état;
- Il vaut mieux éviter de travailler sur la première partie de la courbe, plus caractéristique de la période transitoire, notamment dûe au chauffage du volume correspondant à la résistance électrique et au corps de la thermistance, ainsi qu'à la résistance de contact entre cet ensemble et la matrice poreuse;
- Il semble qu'après 7 secondes, la forme des courbes se stabilise et qu'on puisse estimer qu'après ce temps, la période transitoire est passée;
- La résolution exigée sur la mesure de température (de l'ordre du centième de degré), ainsi que les perturbations, inévitables, dues au transport du signal, nous incitent à préférer des variables issues de **régressions** sur une cinquantaine de points, plutôt que des différences de température entre deux points.
- Dans cet esprit, **une période d'échantillonnage de 1 seconde** semble bien adaptée en fonction de l'objectif poursuivi.
- Plutôt que de travailler avec des artifices qui dilatent artificiellement les courbes (logarithmes de la température ou du temps), on préfère se baser sur le modèle déjà décrit précédemment (voir aussi annexe IV) et qui suggère une variation linéaire de la température en fonction de l'inverse de la racine carrée du temps.
- Rappelons que la pente A de cette droite est inversement proportionnelle à $\lambda\kappa^{1/2}$ et que le terme indépendant B (intercept), qui est également la valeur asymptotique de l'évolution en température, dépend de l'inverse de la conductivité thermique λ .
- Si c'est la diffusivité κ qui nous intéresse, c'est plutôt le rapport $\frac{B}{A}$ qu'il faut examiner. Mais, nous l'avons déjà mis en évidence au point 12.3.3., la diffusivité n'est peut-être pas la variable qui discrimine le mieux l'état d'humidité du milieu dans lequel le capteur est placé. Les résultats obtenus en utilisant le rapport $\frac{B}{A}$ confirment cette tendance.

- Si c'est la conductivité thermique λ qui nous intéresse, on peut choisir soit la pente A, proportionnelle à $\lambda^{-1} \kappa^{-1/2}$ (et donc à $\lambda^{-3/2}$, puisque $\kappa = \frac{\lambda}{\rho c_p}$), soit

l'intercept B, proportionnel à λ^{-1} . Les deux variables s'avèrent bien discriminantes par rapport à l'état d'humidité du milieu, bien que, dans tous les cas, il soit difficile de discerner le sol "humide" de l'état "saturé". Nous retiendrons l'une ou l'autre de ces variables, dans la suite. La pente sera préférée car elle vaut théoriquement $A = -\frac{Q}{4\pi\lambda(\pi\kappa)^{1/2}}$, et est indépendante du rayon a de la sphère chauffante.

- Les étendues des valeurs, tous capteurs et tous cycles confondus, se chevauchent pour le cas "humide" et le cas "saturé" et une analyse de la variance sur les pentes montre que les différences entre les quatre capteurs sont très marquées.

Pour arriver à minimiser cette dépendance du capteur spécifique (de sa géométrie exacte, du rayon équivalent de la sphère chauffante, ...) c'est-à-dire pour s'approcher de l'objectif qui est de réaliser des capteurs interchangeables, plusieurs solutions sont proposées:

- la référence à la saturation:

On peut imaginer que l'on établisse, par étalonnage, une échelle fixe de variation de la variable choisie (pente ou intercept) en fonction du rapport d'humidité entre le sol testé et le même sol à saturation. Il s'agit là d'une idée qui se cadre parfaitement dans le contexte du capteur intelligent: durant une phase de calibration où l'on sature le capteur, celui-ci auto-apprend sa propre référence. Pour la suite, il calcule la tension matricielle du sol dans lequel il est placé grâce à une échelle de rapports connus, relativement à cette référence. Comme, de toutes façons, le capteur doit être saturé avant d'être placé dans le sol, il s'agit là d'une méthode séduisante.

- la référence à l'asymptote:

La procédure choisie consiste à laisser tomber systématiquement les sept premières secondes de la mesure, considérées comme faisant partie d'une période transitoire non caractéristique du phénomène mesuré. On néglige aussi les termes d'ordres supérieures à celui en $t^{-1/2}$. Il s'agit là d'hypothèses simplificatrices.

Une démarche plus rigoureuse serait de calculer l'asymptote, c'est-à-dire la température atteinte en régime permanent, sans faire de régression sur le modèle, puisque celui-ci n'est pas connu avec certitude.

L'asymptote, que nous appelons T_{∞} , possède, elle, par contre, une valeur fiable (bien qu'elle dépende encore du rayon a , de la puissance Q et de la résistance de contact $1/h$ qu'il est malaisé d'évaluer avec précision).

Dans d'autres domaines, certaines tentatives ont été effectuées pour rechercher une asymptote par voie empirique lorsque les données expérimentales sont proches d'un modèle connu, sans toutefois l'ajuster parfaitement (voir par exemple DAVIS, 1962 ou ISAACS et GAUDY, 1968).

Si cette asymptote pouvait être déterminée, elle pourrait être utilisée, soit telle quelle comme variable d'humidité du sol, soit comme référence (axe horizontal) pour les températures, à la place de l'axe $T=0$.

On pourrait alors, à reculons, évaluer la pente de façon plus précise sur les méthodes empiriques.

- une meilleure rigueur de fabrication:

Il est certain que tout effort vers la reproductibilité parfaite des différentes opérations de fabrication, ainsi qu'un choix de composants à meilleure tolérance permettent de s'approcher de l'indépendance de la mesure par rapport au capteur.

18. TEST ET CALIBRATION

18.1. Durée de la mesure

Sur base de considérations théoriques, une durée de mesure de 60 secondes a été choisie: elle est suffisante pour stocker assez de points et permettre une régression, sans excéder toutefois le temps durant lequel le front thermique reste confiné dans la cellule en céramique.

On pourrait s'interroger sur la validité des points de mesure au-delà de la minute. La figure 7 montre l'évolution de la température en fonction de $t^{-1/2}$ pour un temps de chauffage de 10 minutes.

Sur base de ce graphique, on ne peut pas conclure que le modèle perd sa validité au-delà de 60 secondes: la courbe devient linéaire après une dizaine de secondes et reste bien linéaire jusqu'au bout, sans inflexion, ni discontinuité.

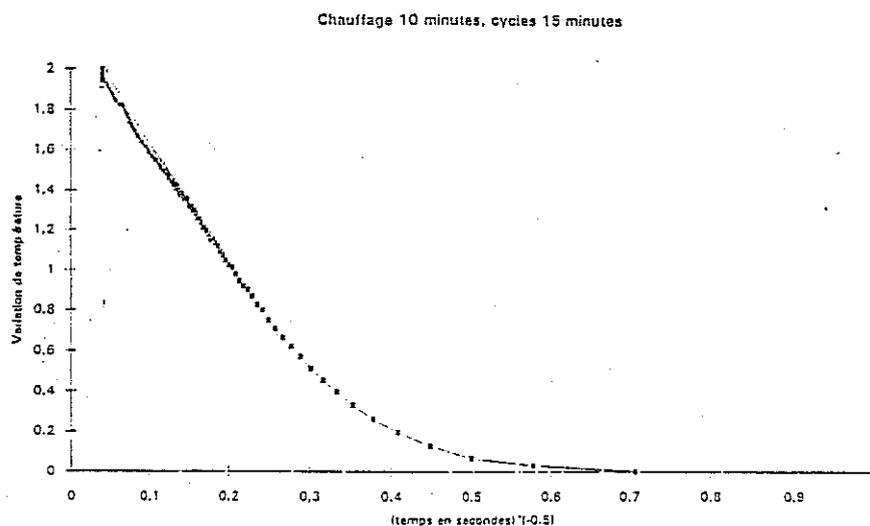


Figure 7: Evolution de la température en fonction de $t^{-1/2}$ pour un temps de chauffage de 10 minutes:

Ce cas est cependant idéal: il s'agit d'un essai en laboratoire, sur une argile de texture très proche de celle du corps en céramique, lui-même en parfait équilibre avec le sol. Le milieu pouvait donc être considéré comme infini, homogène et isotrope. Dans d'autres conditions et notamment sur le terrain, il n'en serait peut-être plus de même, aussi conserverons-nous 60 secondes comme durée de mesure.

18.2. Dépendance avec la température absolue

La théorie suppose que pour $t < 0$, le milieu se trouve à une température uniforme connue. Par facilité, on considère que cette température initiale est nulle.

En ce qui concerne notre mesure, cela revient en fait à enregistrer les écarts de température, relativement à la température initiale T_0 .

Existe-t-il cependant une variation de la valeur de succion matricielle mesurée par cette méthode en fonction de la température initiale du milieu?

Le potentiel matriciel lui-même est fonction de la température: on estime à environ 10 mbar par degré la décroissance de la pression de succion.

Cette variation est une caractéristique du sol; elle doit être mesurée.

Il faut cependant éviter une erreur de finesse de la mesure, c'est-à-dire une imprécision engendrée par la présence-même du capteur dans le milieu.

En effet, le sol est chauffé par la résistance chauffante du capteur et sa température s'élevant, son potentiel matriciel va diminuer.

L'écart de température maximum reste cependant très faible: 2 à 3°C au niveau de la sphère chauffante. La relaxation à ce niveau est rapide: en 3 minutes environ, on peut considérer que la sphère est revenue à sa température de départ.

Par ailleurs, chacun de nos essais en phase de calibration consistait en 4 cycles minimum de chauffage / relaxation, chaque cycle durant 15 minutes. Au cours de ces 4 cycles, la température du milieu évoluait, soit naturellement, soit par influence du capteur. Cependant, les 4 courbes de variation relative de température se superposaient parfaitement.

Une autre perturbation peut se présenter: il s'agit de mesurer une élévation de température qui n'est pas due à la source de chaleur du capteur, mais bien à une source extérieure. Bien entendu, la courbe de variation de température en sera affectée, comme la valeur de la pression matricielle qui en est déduite.

Cette perturbation peut être négligée pour les raisons suivantes:

- La variation naturelle de la température dans le sol possède une périodicité journalière, or la mesure ne dure qu'une minute. On peut donc considérer que la température du milieu reste stable pendant la durée de la mesure.
- Le sol joue, pour l'onde thermique extérieure, le rôle d'un filtre passe-bas. Cela signifie que l'amplitude de variation sera atténuée dès les premiers centimètres de profondeur pour s'annuler pratiquement au-delà de 5 mètres.
- La température du sol est de toutes façons mesurée au début du cycle. Si c'est nécessaire, une correction peut toujours être réalisée.
- Si des mesures de grande précision devaient être effectuées, une méthode différentielle pourrait être mise en oeuvre: une seconde thermistance pourrait être encapsulée dans un autre corps en céramique, identique au premier, mais non chauffé et placé dans le même sol. Uniquement les évolutions relatives d'un senseur par rapport à l'autre seraient enregistrées.

18.3. Temps de réponse

Le temps de réponse de la mesure de la température au centre du cylindre en céramique a été évalué dans l'eau lors du passage brusque de 35°C à 23°C et inversement.

L'évolution de la température possède effectivement une allure exponentielle avec une constante de temps de l'ordre de 40 secondes environ.

L'attente de la stabilité en température lors de l'introduction du capteur dans un sol nouveau ou après un évènement soudain induisant une variation brusque de température, devra tenir compte de ce temps de réponse.

18. 4. Lessivage

La possibilité de déminéralisation de la céramique a été étudiée en appliquant la procédure suivante.

Un échantillon de céramique est plongé dans l'eau déminéralisée durant deux heures; cette opération permet d'enlever la surcharge en ion, c'est-à-dire l'éventuelle salinité piégée dans la céramique sous formes d'ions non liés. Le suivi de la conductivité électrique permet d'évaluer grossièrement l'ampleur de cette surcharge.

Celle-ci atteint environ 1500 μ Siemens par cm après deux heures, ce qui montre qu'il reste effectivement des ions non liés dans la céramique.

L'échantillon est ensuite plongé dans l'acide nitrique durant deux heures, rincé vivement à l'eau pour éliminer l'acide, puis plongé à nouveau dans un bain d'eau déminéralisée durant deux heures. On constate que la conductivité électrique de ce dernier bain a encore augmenté de 500 μ Siemens par cm, ce qui prouve que l'acide nitrique a permis d'extraire un nombre supplémentaire d'ions libres non dégagés par la première opération.

La conséquence de cette observation ne se manifeste que si l'on désire ultérieurement mesurer également la conductivité électrique de la cellule poreuse, comme il est effectivement prévu dans les projets futurs. Dans ce cas, pour que la variable mesurée ne soit pas influencée par les ions issus de la fabrication de la céramique, mais uniquement par ceux amenés par la solution de sol, un lavage préalable des cellules poreuses à l'acide nitrique sera indispensable.

18. 5. Calibration

18. 5. 1. Méthodes

Deux méthodes de calibration du capteur sont envisagées.

La première consiste en un échantillon de terre préalablement saturé que l'on laisse sécher naturellement en laboratoire en permettant à l'eau de s'évacuer par le bas à travers une grille. Un tensiomètre à mercure placé à proximité du capteur permet de déterminer la tension matricielle à l'instant où la mesure thermique est réalisée. Cette méthode permet de s'approcher des conditions réelles du terrain. Etant donnée la limite du tensiomètre (-0.8 bar environ), on ne saura étalonner par cette méthode que dans une gamme de succions très proches de la saturation.

La seconde méthode consiste à utiliser un appareil d'extraction à plaques poreuses ("casserole à pression") dans lequel est placé l'échantillon de terre où est situé le capteur de mesure. Sur l'échantillon préalablement saturé, on impose des pressions croissantes et connues, en même temps que l'on effectue les mesures par le capteur thermique.

Des courbes d'évolution en température dans le capteur, on extrait la valeur de la pente en fonction de $t^{-1/2}$ que l'on fait correspondre aux valeurs mesurées de la pression.

18. 5. 2. Prélèvement des échantillons de sol

Dans les deux cas, un échantillon de sol doit être prélevé. Le site choisi est celui de Vance, à proximité d'Arlon, sur lequel une étude avait déjà été menée auparavant, qui avait permis de rassembler un certain nombre d'informations sur la nature du sol (et notamment les courbes pF/θ). L'échantillon est un limon-sableux.

Une excavation à fond bien plat et horizontal a d'abord été creusée à la bêche dans le sol jusqu'à une profondeur de 20 cm.

Un anneau de PVC de 20 cm de diamètre intérieur et de 20 cm de hauteur est déposé sur la surface ainsi préparée.

En martelant une planchette posée sur l'anneau, celui-ci s'enfonce verticalement dans le sol. La terre est ensuite dégagée autour des anneaux et coupée dans sa partie inférieure, de façon à extraire l'échantillon.

Les inhomogénéités de terrain sont évitées (racines, cailloux), leur présence n'étant pas représentative du sol considéré.

18. 5. 3. Comparaison avec un tensiomètre

Pour la première méthode de calibration, la bougie poreuse du tensiomètre a été placée au même niveau que le capteur thermique, dans les mêmes conditions et dans le même échantillon de terre.

La succion matricielle était lue sur un manomètre à mercure en même temps qu'une mesure était réalisée sur 3 ou 4 cycles de chauffage/relaxation.

On a laissé sécher le sol environ un mois dans le laboratoire dont la température évoluait peu autour de 19°C.

Un rythme d'une mesure journalière a été respecté au départ, puis les mesures se sont espacées. La figure 8 montre les 18 points ainsi obtenus.

Calibration par tensiomètre dans un limon-sableux de Vance

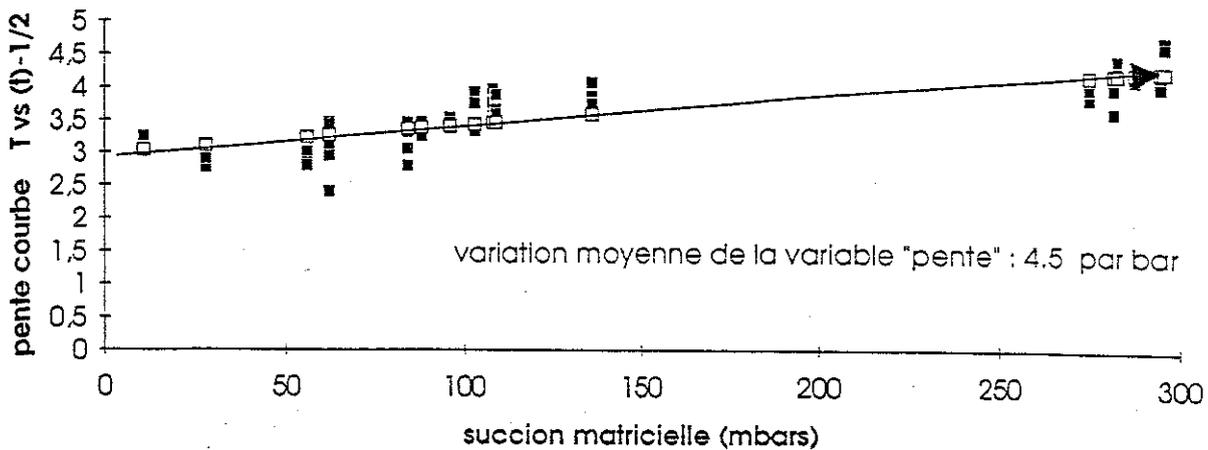


Figure 8: Calibration par tensiomètre dans un sol de type limon-sableux.

Malgré une assez forte dispersion des points, on constate une évolution croissante de la valeur absolue de la pente T versus $t^{-1/2}$ pour les pressions allant de 0 à 0.3 bar. Le taux moyen de cette évolution est de 4.5 unités de pente par bar. (N.B. l'unité de pente est: $^{\circ}\text{C} \times \text{sec}^{-1/2}$).

La dispersion des points peut être diminuée en améliorant le contact entre le module en céramique et le sol, aussi bien pour le capteur thermique que pour le tensiomètre, en augmentant le temps de relaxation entre chaque cycle de chauffage, en disposant plusieurs tensiomètres autour du capteur thermique et en calculant une valeur moyenne de la suction.

Quoi qu'il en soit, la calibration ne donne pas de trop mauvais résultats dans cette plage de pression, que le Dr. Phene considérait comme une plage où la mesure était impossible.

Idéalement, le capteur doit être étalonné pour tous les types de sols, dont les courbes pF/θ seraient bien connues.

18. 5. 4. Appareil d'extraction à plaques poreuses

Le principe est le suivant.

Une enceinte en acier inoxydable épais est séparée en deux parties par une plaque poreuse en céramique. Au-dessus de celle-ci, on place l'échantillon de terre dans lequel se trouve le capteur thermique. L'échantillon et la membrane poreuse sont saturés d'eau et l'enceinte est fermée. Des passages électriques étanches permettent le passage des signaux d'injection et de mesure vers le capteur.

Une pression d'air ou d'azote est alors appliquée, via un tube à travers le couvercle, dans le volume supérieur de l'enceinte. Le volume inférieur, lui est mis en contact avec la pression atmosphérique.

Puisque la pression d'air dans l'extracteur est supérieure à la pression atmosphérique, l'eau contenue dans l'échantillon est poussée vers le bas et passe à travers la membrane poreuse. L'eau s'écoule et est purgée hors de l'enceinte jusqu'au moment où un équilibre est atteint pour la valeur de la pression imposée.

En augmentant ainsi la pression, par paliers, on extrait l'eau des pores de plus en plus petits de l'échantillon et on reconstitue ainsi artificiellement la succion matricielle jusqu'à des pressions importantes.

Remarquons qu'à l'inverse de la succion naturelle, où il s'agit d'une pression négative qui s'applique par rapport au milieu, ici, il s'agit d'une pression positive qui est appliquée sur le milieu, par rapport à l'atmosphère. Les essais ont été effectués jusqu'à 15 bars, par paliers d'environ 1 bar, avec, à chaque étape, après attente de l'équilibre, une mesure exacte de la pression imposée et 3 ou 4 cycles de chauffage/relaxation dans le capteur thermique.

La figure 9 montre les résultats obtenus pour le même échantillon que celui qui avait servi à l'étalonnage par tensiomètre.

Pente en fonction de la pression

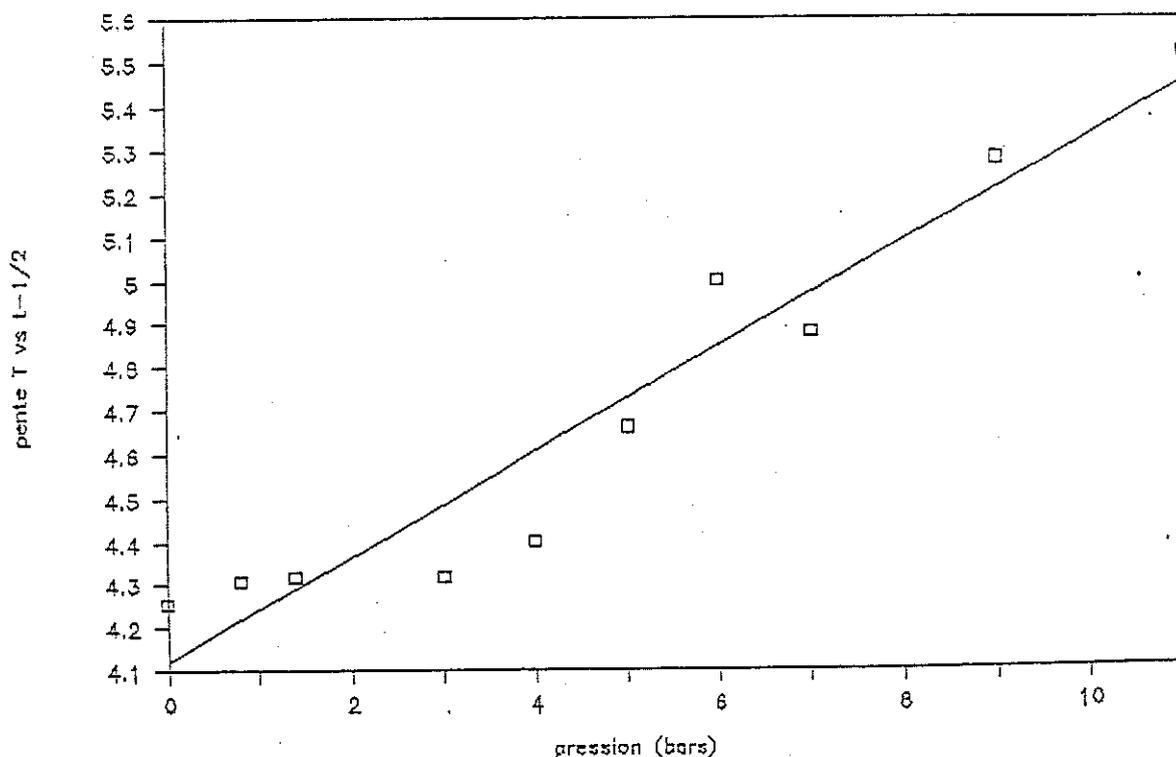


Figure 9: Calibration par appareil d'extraction à plaques poreuses dans un sol de type limon-sableux

A nouveau, on constate une très nette tendance à l'augmentation de la pente avec la pression, même si on constate la même dispersion des points que précédemment.

Le taux moyen de l'évolution est cette fois beaucoup plus faible que dans le premier essai: environ 0.12 unité de pente par bar.

18. 5. 5. Teneur en eau

Cette différence de taux d'évolution entre les faibles et les grandes valeurs de pression suggère de s'intéresser à la courbe pF/θ (voir figure 1) qui, elle aussi, présente des pentes fort variables selon la zone d'humidité.

La courbe pF/θ a été mesurée expérimentalement pour le sol de Vance: elle permet de transformer la variable "pression" en variable "teneur en eau" et donc d'évaluer la dépendance entre la pente (T vs $t^{-1/2}$) et la teneur en eau.

La figure 10 montre cette dépendance pour toute la gamme envisagée (essais tensiomètre + appareil à plaques poreuses). La courbe pF/θ utilisée était très approximative et probablement peu fiable.

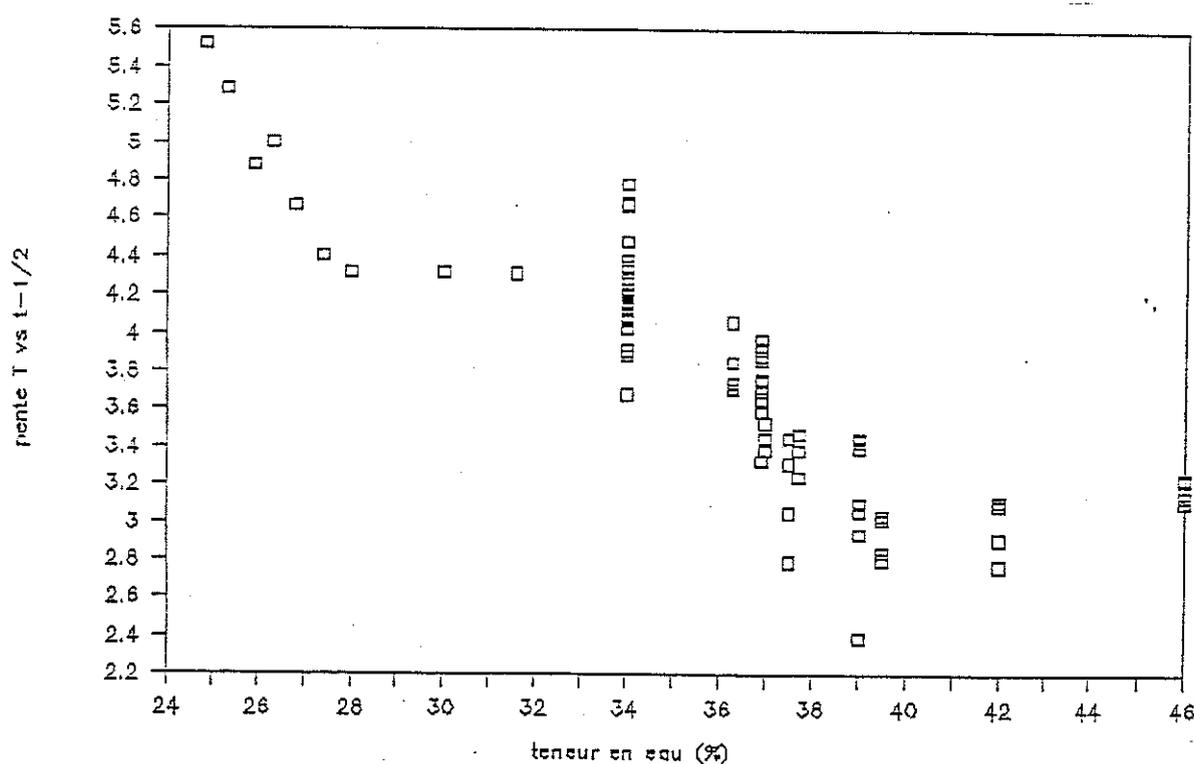


Figure 10: Variation de la pente en fonction de la teneur en eau pour le sol limono-sableux utilisé pour la calibration.

Néanmoins le résultat est assez clair: la dépendance de la variable thermique est "relativement" linéaire en fonction de la teneur en eau.

Elle est en tout cas plus linéaire qu'en fonction de la succion matricielle, ce qui suggère que notre capteur serait davantage un capteur de teneur en eau qu'un capteur de succion matricielle.

Ce résultat fondamental est intéressant, car il permettrait d'envisager un capteur de teneur en eau, valable sur une gamme très large et indépendant de la salinité de la solution du sol.

Ces résultats devraient être confirmés par des mesures fiables et systématiques de la teneur en eau, mises en parallèle avec les valeurs correspondantes de la variable thermique. Cela n'étant pas prévu au départ dans le cadre du développement du capteur, nous n'avons pas mis en oeuvre cet étalonnage précis durant la période du contrat FIRST, mais cette étape pourrait être envisagée dès le départ de la phase de pré-commercialisation.

Quoi qu'il en soit, les résultats de l'étalonnage sont aussi bons que ceux obtenus par le Dr. Phene, et même meilleurs à certains points de vue. Or le capteur américain a été commercialisé tel quel sous le nom de AGWA-II: il est donc envisageable d'inclure un tel capteur dans un programme de vente d'instruments de surveillance de l'environnement.

19. PROCEDURE DE MESURE

Le capteur étant réalisé et opérationnel, connaissant les contraintes qu'il impose, on peut à présent définir le "cahier des charges" de la procédure de mesure qui devra être implantée, sous forme logicielle, dans l'acquisiteur de données.

- On peut opérer par cycles, avec une périodicité de l'ordre de l'heure par exemple, ou par une commande venant de l'extérieur qui déclenche une mesure. Dans les deux cas, il faudra être capable de mesurer le temps réel, à la fois pour respecter le timing des opérations, et pour stocker ou transmettre la date et l'heure de la mesure.
- La température est mesurée en permanence. Un algorithme simple doit permettre de vérifier si le milieu est stable thermiquement avant de commencer un cycle de chauffage.
- Au temps zéro, on enclenche simultanément le chauffage et la mise en mémoire des données de température.
- Le chauffage est assuré par l'injecteur de courant décrit précédemment, mais l'ordre doit lui être transmis par le "data logger" par l'intermédiaire d'un relais ou d'un contact libre de potentiel.

- La mesure de température, elle, doit être réalisée avec le minimum de bruit et le maximum de résolution.
Des filtres "hardware" et "software" peuvent être efficaces pour atténuer les effets parasites. La température doit être mesurée, si possible, au centième de degré centigrade, sur une gamme pouvant aller de -5°C à 35°C environ, soit une résolution de l'ordre de 4000 points sur toute la gamme: un convertisseur analogique-numérique de 12 bits convient donc.
- La fréquence d'échantillonnage sera idéalement de une mesure par seconde.
- L'acquisiteur de données convertit la tension lue en température au moyen d'une relation de calibration, par exemple: $T=1/(A+B \ln V+C \ln^3 V)$.
- Après 60 secondes de chauffage, on coupe l'alimentation de la résistance chauffante et on arrête de stocker les données.
- Sur les 60 températures mesurées, on abandonne les 10 premières (de 0 à 9) et on effectue une régression linéaire sur les 50 dernières.
- La régression se limite en fait au calcul de la pente de la courbe T en fonction de $t^{-1/2}$, pour des intervalles de temps connus, puisqu'il s'agit dans tous les cas de 10, 11, 12, 13, ... 59 secondes.

Le coefficient de pente d'une régression linéaire $y= mx+b$ vaut:

$$m = \frac{\frac{\sum x_i y_i}{N} - \bar{x} \bar{y}}{\frac{\sum x_i^2}{N} - \bar{x}^2} \quad (8)$$

Dans cette expression, les x_i valent $\sqrt{10}, \sqrt{11}, \dots, \sqrt{59}$, N vaut 50, et donc \bar{x} vaut $\frac{\sum \sqrt{t_i}}{50} = 5.72914$.

Il suffit donc d'évaluer les produits $x_i y_i$ à partir des 50 valeurs tabulées des $\sqrt{t_i}$, ainsi que la valeur moyenne \bar{y} des températures.

- La pente ainsi calculée peut être fournie telle quelle ou transformée en teneur en eau et/ou tension matricielle, selon le type de sol qu'on pourrait choisir au départ de l'essai.

20. INTERFACAGE AVEC L'ACQUISITEUR DE DONNEES

20. 1. Présentation de l'acquisiteur de données ENVILOG

L'acquisiteur de données de la société BTW à Eupen est le système ENVILOG, particulièrement adapté à la mesure environnementale sur le terrain. Il s'agit d'un appareil qui permet la mesure de 22 signaux d'entrée, à choisir entre:

- 16 canaux analogiques avec une résolution de 12 bits et une impédance supérieure à $1M\Omega$:
 - configurables dans n'importe quelle combinaison entre 16 entrées référencées à une masse commune et 8 entrées différentielles;
 - à gains variables entre ± 10 mV fond d'échelle et 5 V fond d'échelle.
- 2 liaisons sérielles synchrones bidirectionnelles;
- 4 canaux de type "compteur" à 16 bits.

Il possède en outre une très grande souplesse, lui permettant de s'adapter à n'importe quelle situation: les entrées analogiques peuvent être programmées en basse résolution (8 bits) ou haute résolution (16 bits) et il existe des facteurs de calibration internes (éventuellement reconfigurables), qui évitent tout réglage à l'opérateur.

Il faut également fournir une puissance électrique pour des instruments externes.

La vitesse d'échantillonnage peut varier de 250 millisecondes à 15 secondes.

L'acquisiteur de données ENVILOG communique avec un ordinateur extérieur, de type PC au moyen d'une des liaisons sérielles standard RS232.

Il dispose d'un langage de programmation particulièrement souple qui permet la gestion du temps et le prétraitement des données. Ce programme peut être créé sur PC et transféré à l'appareil via la ligne série. La batterie interne assure une autonomie de l'appareil pour environ deux ans.

Les données sont stockées dans des mémoires RAM de type CMOS, à faible consommation: les capacités disponibles sont 64 K ou 128 K.

Une horloge interne pilotée par quartz fournit la référence du temps réel. Il est, de plus, particulièrement petit, robuste et son boîtier est étanche à la poussière.

20. 2. Interfaçage hardware

Le système doit mesurer une tension provenant de la thermistance, jusqu'à environ 5 V, et doit fournir le signal à la résistance de chauffage.

Il a d'abord été envisagé d'utiliser les batteries du data logger comme source de tension pour faire passer le courant de mesure dans la thermistance. Cette solution a été abandonnée car il était alors impossible de synchroniser le chauffage et la mesure.

La solution des injecteurs de courant a alors été choisie:

- 150 μ A dans la thermistance, la tension à ses bornes étant ramenée sur l'un des canaux analogiques;
- 10 mA dans la résistance de chauffage, la tension à ses bornes étant également ramenée sur un canal analogique, à des fins de contrôle de la stabilité de la puissance thermique.

Une des sorties en "collecteur ouvert" de l'ENVILOG sert à piloter un petit relais dont la sortie alimente l'injecteur de chauffage. Néanmoins, un circuit d'amplification de courant, également basé sur un transistor en collecteur ouvert, a dû être développé, de façon à fournir le courant nécessaire pour alimenter la bobine de ce relais (6 volts, résistance de 100 Ω , donc courant de commande: 60 mA).

Les problèmes liés à la connexion de plusieurs capteurs en même temps ont été analysés: impédance, interférences éventuelles entre les capteurs, ...

20. 3. Interfaçage software

Le programme proprement dit d'acquisition et de stockage des données a été écrit en langage MDL (Macro Data Logger), de façon à commander quatre capteurs, chauffés durant une minute tous les quarts d'heure.

La partie principale de ce programme consiste à gérer le temps au moyen du timer interne et de compteurs se décrémentant à chaque passage dans une boucle.

Après l'acquisition et le stockage des tensions mesurées, la pente de la droite peut être calculée.

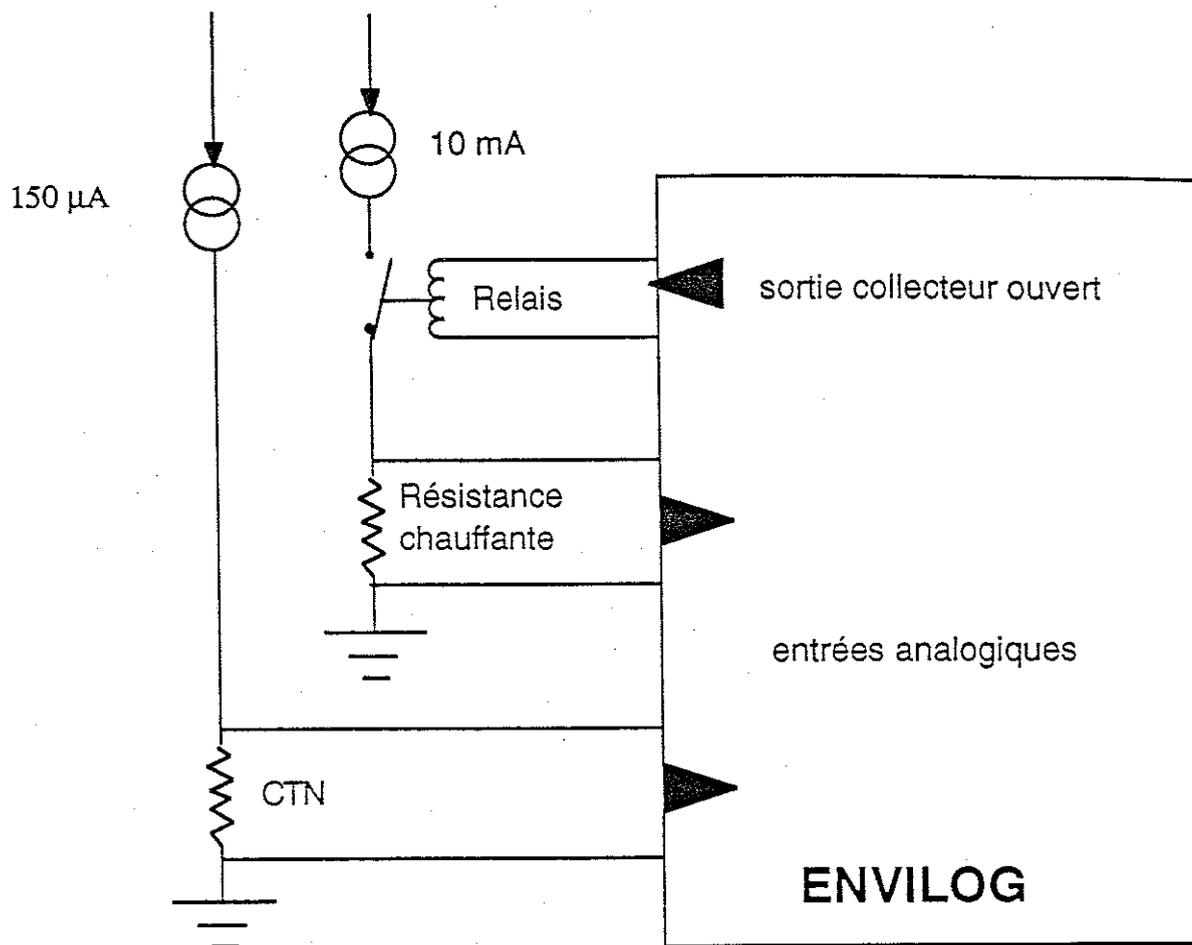


Figure 11: Schéma général de connexion pour un capteur de mesure.

L'ossature du programme étant opérationnelle, les travaux ont porté sur un certain nombre d'améliorations visant à atteindre une meilleure fiabilité du signal mesuré:

- Mise au point d'un algorithme d'atténuation des parasites de grande amplitude. Si les valeurs observées aux temps actuel et précédents sont x_i , x_{i-1} , x_{i-2} ..., alors on évalue y_i , la variable filtrée au moment de la mesure par:

$$y_i = \frac{3(B_i - B_{i-1})}{|x_{\max} - x_{\min}|} y_{i-1} + \frac{3(B_i - B_{i-1})}{|x_{\max} - x_{\min}|} B_i \quad (9)$$

où $|x_{\max} - x_{\min}|$ est la plage de mesure du capteur et les coefficients B_i sont eux-mêmes des fonctions du même type que (9), soient:

$$B_i = \frac{5(A_i - A_{i-1})}{|x_{\max} - x_{\min}|} B_{i-1} + \frac{5(A_i - A_{i-1})}{|x_{\max} - x_{\min}|} A_i \quad (10)$$

avec les coefficients A_i étant eux-mêmes:

$$A_i = \frac{2(x_i - x_{i-1})}{|x_{\max} - x_{\min}|} A_{i-1} + \frac{2(x_i - x_{i-1})}{|x_{\max} - x_{\min}|} X_i \quad (11)$$

- Synchronisation rigoureuse du chauffage et des mesures, suite à la constatation d'un léger décalage du temps, s'incrémentant, à chaque minute, lorsqu'on utilise les ressources internes de l'ENVILOG pour alimenter le chauffage.
- Test de différentes versions du logiciel de communication et de traitement des données, côté PC. Mise en évidence de quelques problèmes, notamment graphiques.
- Analyse des différentes possibilités d'implanter des fonctions mathématiques dans le logiciel de l'acquisiteur, notamment pour réaliser la conversion tension/température (usage de logarithme).
La solution des tables de conversion a été choisie plutôt que celle, plus lente et plus complexe, d'une relation à réévaluer à chaque seconde pour quatre capteurs. Néanmoins, la place prise en mémoire par ces tables doit rester modeste de façon à conserver un espace suffisant pour le programme.
- Identification des contraintes et des procédures à employer, côté ENVILOG et côté PC.

21. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES D'AVENIR

Au terme de ce contrat FIRST, un capteur de mesure de la température et de la teneur en eau du sol a été développé et interfacé avec un acquiiseur de données intelligent.

Cet ensemble s'avère au moins aussi performant que le produit proposé par la firme américaine AGWATRONICS, dont le capteur AGWA-II était surtout destiné à contrôler l'irrigation.

Dans notre cas, le capteur développé est mieux adapté au contrôle environnemental: il permet de travailler dans la gamme de succion matricielle inférieure à 1 bar et est plus sensible et plus résistant que le capteur américain.

Couplé à l'acquisiteur de données ENVILOG, il peut donc être commercialisé tel quel comme élément d'un réseau de surveillance de l'environnement, par exemple dans le but de mettre en évidence des indicateurs d'alarme autour de décharges.

Le produit peut cependant encore évoluer, au-delà du cahier des charges initialement prévu dans le cadre du contrat FIRST. Trois pistes ont été retenues:

- La calibration systématique et rigoureuse du capteur en fonction de la teneur en eau, pour plusieurs types de sol, de manière d'une part à vérifier la linéarité du signal mesuré en fonction de la teneur en eau et d'autre part à constituer une bibliothèque de réponses-types du capteur pour différentes textures de sol. L'idée finale est d'exploiter l'intelligence de l'instrument pour fournir en sortie une information beaucoup plus riche que simplement la pente de l'évolution de la température au centre du bloc poreux, notamment en y ajoutant des données de physique du sol.
- La mesure de la conductivité électrique, superposée à celles de la température instantanée et de la pente de l'évolution thermique. Cette mesure constitue en effet un complément intéressant aux deux variables déjà identifiées, puisque la conductivité électrique est non seulement sensible à l'humidité du sol, mais également à la salinité de la solution de sol au voisinage du capteur. On aurait donc là une information redondante de teneur en eau qui permettrait d'améliorer la fiabilité de la mesure, mais également une idée de la teneur en sels, qui constitue une indication intéressante de qualité environnementale du sol.

Cette idée a déjà été testée au cours du présent travail. Une mesure de résistance électrique doit être effectuée en courant alternatif entre deux électrodes insérées dans la matrice poreuse. Le circuit électrique de mesure ne semble pas poser de problème majeur, puisque de tels appareils sont déjà développés et commercialisés.

Le problème essentiel est lié au placement des électrodes dans la céramique. Il faut en effet étudier des positions idéales de celles-ci, suffisamment éloignées l'une de l'autre pour permettre une bonne sensibilité de la résistance mesurée en fonction de la teneur en eau, mais pas trop proche de la surface extérieure pour éviter les effets de bords.

Il faut en outre choisir des emplacements judicieux et des dimensions d'électrodes adéquates de façon à minimiser les interférences avec la mesure thermique: notamment, les électrodes ne doivent pas créer un court-circuit à la dissipation de la chaleur.

De manière à optimiser le contact entre l'électrode et la matrice poreuse, les fils métalliques devraient idéalement être placés dans le mélange avant la cuisson de la céramique.

Les premiers essais mettent en évidence deux problèmes: la nécessité de maintenir fermement en place les deux électrodes avant et durant la cuisson, et le risque de faire fondre le métal en même temps que la céramique. L'utilisation de fils d'or s'est avérée inefficace à ce point de vue et nous nous orientons actuellement vers celles de fils d'acier inoxydable ou de platine

- Le développement d'une intelligence locale dédiée à cette application. La première étape consistait à tester la faisabilité de la méthode au moyen d'un système d'acquisition de données intelligent.

Cette étape franchie avec succès, il serait intéressant non seulement de rendre la mesure intelligente, mais de viser à réaliser un capteur intelligent, délivrant en sortie, sur un bus de terrain, un signal intégré de qualité du sol.

Le contrat FIRST aura permis d'élaborer le cahier des charges de l'électronique à développer. Dans ce cadre, nous avons établi plusieurs contacts avec des groupes qui mettent actuellement en place des standards de mesure et de transmission de données intelligentes: réunion du groupe MESUCORA en novembre 1991 et participation au symposium "Intelligent Instrumentation" organisé par IMEKO et l'IBRA en mai 1993.

22. CONCLUSIONS SUR LE DÉROULEMENT DU CONTRAT FIRST

22. 1. Avis de l'entreprise

Après une première année avec l'entreprise "METELSYS" de Louvain-la-Neuve comme partenaire privé, la FUL s'est orientée vers la société Bureau Technique Wintgens dont les objectifs cadraient parfaitement avec ceux de l'équipe de recherche.

Au-delà du produit proprement dit qui constituait le but-même du contrat, les principaux apports de la collaboration, pour l'entreprise, sont repris dans l'annexe VII, rédigée par Edgar WETZEL, responsable du projet pour S. A. BTW. On peut le résumer ainsi:

- échange d'informations intéressantes, même en dehors du cadre du contrat: l'entreprise a su profiter des connaissances de la FUL en sciences de l'environnement;
- possibilité d'approcher rapidement un nouveau marché, en l'occurrence celui des modèles de dispersion de polluants, grâce aux conseils de la FUL;
- suivi du développement d'un capteur, depuis la phase initiale jusqu'au prototype;
- image de marque de l'entreprise confirmée par le contact avec une équipe universitaire;
- en résumé: la collaboration de BTW avec la FUL a permis de dépasser la relation fournisseur-client et d'atteindre réellement le niveau d'un transfert bidirectionnel de compétences.

22. 2. Avis de l'université

Pour le département "Surveillance de l'Environnement" de la FUL, la collaboration avec BTW représente une opportunité de concrétiser une recherche en relation étroite avec un partenaire privé qui connaît les contraintes pratiques de la mesure sur le terrain. Le principe du contrat FIRST permet néanmoins à l'équipe universitaire de conserver un esprit de recherche et d'originalité, propre à l'université, sans être trop dépendant des contraintes de production à très court terme. A ce niveau, l'interlocuteur de la FUL dans l'entreprise, M. Edgar Wetzel, a su conserver un parfait équilibre entre les objectifs commerciaux et les objectifs de recherche.

Le transfert de technologie se concrétise par du prêt de matériel: des systèmes d'acquisition de données programmables. La FUL est considérée comme un utilisateur privilégié qui reçoit régulièrement et gratuitement les mises à jour des logiciels. En outre, la firme BTW apporte son savoir-faire en matière de mesure des paramètres de l'environnement et en acquisition de données.

22.3 Avis du chercheur

Grâce à l'aide de toute une équipe, le projet a permis aux chercheurs de développer des connaissances en informatique et électronique, mais également en techniques de mesure et d'acquisition de données, spécialement par le contact avec S.A. BTW

22. 4. Bilan

Ce contrat FIRST ne s'est pas déroulé de façon tout à fait classique: la défection du premier partenaire privé a contraint la FUL à chercher un nouveau partenaire, ce qui a inévitablement entraîné un petit ralentissement dans le déroulement des travaux.

Heureusement, le nouveau partenaire, la S. A. BTW, s'est rapidement adapté aux objectifs du contrat et le développement a pu reprendre facilement, pratiquement sans discontinuité.

Au terme de la seconde année de convention FIRST, la maquette fonctionnelle du produit était opérationnelle et la FUL avait demandé une troisième année pour la concrétiser en un prototype commercialisable. Cette dernière partie de convention a été signée six mois après la fin des deux premières années, alors que le chercheur, Alain Hanson, était engagé pour d'autres tâches dans l'institution.

Un nouveau chercheur a alors été engagé (Valérie Martin) et le contrat a pu se terminer à peu près normalement, malgré la nécessité de devoir former la nouvelle personne.

Heureusement, et c'est cela qu'il faut en fin de compte retenir de l'expérience:

- le premier chercheur, Alain Hanson, a pu mettre en valeur ses compétences et être engagé par l'institution;
- Valérie Martin a elle-même acquis une expérience et des contacts valorisables dans le futur;
- le produit correspondant au cahier des charges est terminé;
- les bons contacts établis entre la FUL et BTW vont permettre de poursuivre le développement du produit au-delà des objectifs du contrat;
- la collaboration entre le centre de recherche et l'entreprise privée se poursuit actuellement dans le cadre d'autres projets.

Si, effectivement, c'est cette valorisation qui, in fine, constitue l'objectif du programme FIRST, on peut conclure que, malgré les avatars, les trois années de convention furent un succès.

Le bilan du projet permet de fournir aux initiateurs du programme quelques éléments utiles pour guider leurs réflexions dans leurs futures démarches:

- trois années de convention s'avèrent indispensables si l'on vise réellement le développement d'un prototype commercialisable;
- l'évaluation du projet en cours d'exécution pourrait être faite sur base de rapports annuels, et non semestriels, auxquels il serait plus efficace d'ajouter une ou deux réunions de travail avec les trois partenaires: l'institution de recherche, le partenaire privé et la Région Wallonne;
- le dossier de base déposé pour un projet FIRST devrait concerner un produit dont la faisabilité a déjà été démontré: il ne devrait pas initier une recherche exploratoire; cela mériterait d'être davantage précisé dans l'appel d'offre.

BIBLIOGRAPHIE

CARSLAW, H.S., JAEGER, J. C., (1960), *Conduction of Heat in Solids*, Oxford Univ. Press, London.

DAVIS, D. S., (1962), *Empirical Equations and Nomography*, 2nd Ed., Mc Graw Hill, New York.

HILLEL, D., (1974), *L'eau et le sol - Principes et processus physiques*, Vander (Leuven).

ISAACS, W.P., GAUDY, A.F., (1968), *A method for determining constants of first order reactions from experimental data*, *Biotechnology and bioengineering* - vol X, pp 69-82.

PHENE, C.J., HOFFMAN, G.J., RAWLINS, S.L., (1971) *Measuring soil matric potential in situ by sensing heat dissipation within a porous body: I. Theory and sensor construction*. *Soil Science Society of America Proceedings*, 35, pp 27-33.

PHENE, C.J., ALLEE, C.P., PIERRO, J.D., (1989), *Soil Matric potential sensor, measurements in real time irrigation scheduling*. *Agricultural Water Management*, 16, pp 173-185.

ANNEXE I

PRESSION MATRICIELLE D'UN SOL

Pression matricielle d'un sol

Deux types d'information sont généralement nécessaires dans l'étude des phénomènes sol-eau: la qualité d'eau contenue dans un sol et son état énergétique (c'est-à-dire la teneur en eau et la succion de l'eau du sol). Quoique celles-ci peuvent être mesurées indépendamment elles sont cependant fonction l'une de l'autre. Cette relation, affectée par hystérèse, est décrite par la courbe de "rétention", de "drainage", de "sorption" ou de "désorption". Quel que soit son nom, elle est d'une importance fondamentale en physique du sol car elle exprime l'influence de la structure. A leur tour, cet état et ses variations dans le profil déterminent la direction et influencent le régime du mouvement de l'humidité du sol et du prélèvement en eau des plantes.

La relation fonctionnelle entre l'humidité du sol et la succion matricielle (ou potentiel de pression, tension hydrique) peut être déterminée au moyen d'une chambre à pression à plaque en céramique en laboratoire, par les analyses granulométriques, ou au moyen de tensiomètres (tension hydrique) et de la sonde à neutron (teneur en eau) sur le terrain.

Cette relation entre la tension hydrique (ψ) dans le sol et la teneur en eau (θ) est représentée par les équations suivantes dans une gamme de tensions hydriques donnée.

$$Se = \left(\frac{\psi}{\psi_a} \right)^{-\lambda}$$

ψ_a = pression d'entrée d'air (cm de colonne d'eau = cm CE).

λ = index de distribution de taille des pores (-).

Se = indice de saturation effective ($0 < Se < 1$).

$$Se = \frac{\theta - \theta_r}{\varepsilon - \theta_r}$$

ε = porosité (%).

θ_r = teneur en eau résiduelle (%).

Au-delà de la tension hydrique de vaporisation de l'eau (ψ_x) (10 m de colonne d'eau), la relation de Brooks et Corey est remplacée par une relation log-linéaire.

$$\frac{\log\left(\frac{\psi}{\psi_x}\right)}{\log\left(\frac{\psi_{\text{wilt}}}{\psi}\right)} = \frac{\theta_x - \theta}{\theta_x - \theta_{\text{wilt}}}$$

θ_x = teneur en eau à la tension hydrique ψ_x (%).

θ_{wilt} = teneur en eau à 15 bars de tension hydrique (wilting point) (%).

La force de succion de l'eau par le sol peut s'exprimer par une pression en g/cm^2 , ou en atmosphères ou encore en cm de colonne d'eau... On l'exprime plus couramment par le logarithme décimal de cette pression, que l'on appelle pF.

Plus le sol est humide, moins la succion est élevée, donc moins l'eau est retenue par le sol. Plus le sol se dessèche, plus cette force de succion augmente.

Le taux d'humidité à la **capacité du champ** correspond, pour tous les sols, à un pF voisin de 2,7. Il peut être mesuré sur le terrain préalablement gorgé d'eau, après 48 heures de ressuyage (avec protection contre l'évaporation).

L'humidité au **point de flétrissement** correspond, pour tous les sols, à un pF de 4,2 soit une succion de 16000 g/cm^2 . Ce point est atteint lorsque la force qu'exerce le sol sur l'eau devient supérieure à la force de succion des racines de la plante.

ANNEXE II
CAPTEUR THERMIQUE DE POTENTIEL MATRICIEL
DU SOL COMPARAISON AVEC LES RESULTATS DE
C. J. PHENE

CAPTEUR THERMIQUE DE POTENTIEL MATRICIEL DU SOL.

COMPARAISON AVEC LES RÉSULTATS DE C.J. PHENE.

J. NICOLAS, 13/12/93.

1. INTRODUCTION.

Le capteur thermique de potentiel matriciel du sol est basé sur les travaux de C.J. Phene de l'USDA Agricultural Research Service, aux USA [1] [2].

L'objectif de départ de notre recherche était de tester si le principe du capteur de Phene, principalement conçu pour le contrôle de l'irrigation, était extrapolable à la mesure de qualité du sol dans un objectif environnemental.

Selon Phene, les principaux avantages du capteur, par rapport à d'autres, comme les tensiomètres, sont les suivants :

- large étendue de mesure du potentiel matriciel entre - 100 et - 3 000 mbar;
- non affecté par la texture du sol, puisqu'on mesure la tension et pas la teneur en eau (et que c'est la tension qui intéresse surtout l'agronome);
- non affecté par la salinité du sol, puisqu'on ne mesure pas la conductivité électrique;
- non affecté par la température du sol, puisque la variation diurne de température ne peut pas influencer la mesure qui est effectuée en 1 minute;
- peu de dérive du signal;
- pas de maintenance;
- bien adapté aux mesures automatiques et au contrôle, puisqu'on a un signal électrique;
- mesure la température également;
- ne nécessite pas une grande puissance électrique.

Son capteur est donc surtout destiné à travailler dans la zone de potentiel matriciel optimale pour l'irrigation, c'est-à-dire de l'ordre de - 100 à - 6 000 mbar.

Notre objectif est d'en faire un capteur environnemental, c'est-à-dire

- de mesurer la tension matricielle, mais si possible d'en déduire également la teneur en eau par des courbes pF/θ appropriées;
- de mesurer les tensions dans des gammes plus courantes, et pas uniquement dans la gamme optimale pour l'irrigation;
- d'en faire un capteur de qualité du sol, c'est-à-dire, à terme, d'ajouter à la mesure de la tension matricielle et à la mesure de température, celle de la conductivité électrique, ce qui permettrait également d'obtenir une estimation de la concentration en sels;
- d'arriver à satisfaire ces contraintes supplémentaires grâce à une intelligence locale qui permette de s'affranchir des exigences de linéarité, ... et qui permet un traitement des données plus sophistiqué et en temps réel;
- dans la mesure du possible, de réaliser des capteurs interchangeables, c'est-à-dire au moins de trouver une ou plusieurs variables caractéristiques de la qualité du sol qui soit indépendante du capteur spécifique.

2. PREMIÈRE VERSION DU CAPTEUR DE PHENE.

Dans sa version de 1971 [1] le capteur était constitué d'un cylindre de céramique de 27 mm de diamètre environ. Une céramique présentant une conductivité thermique à sec (λ_{sec}) de 0.48 W/mK, une diffusivité thermique à sec (κ_{sec}) de $0.12 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ et une porosité (p) de 17.8 % était employée. Il semble également que le "Castone", utilisé en dentisterie donnait de très bons résultats, avec $\lambda_{sec} = 0.51 \text{ W/mK}$, $\kappa_{sec} = 0.07 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ et $p = 28.4 \%$.

A l'intérieur, l'ensemble élément chauffant - sonde de température formait un cylindre d'environ 6 mm de diamètre et 10 mm de hauteur. Il était constitué d'une diode, formant l'élément sensible, autour duquel était enroulé un fil de cuivre, formant le four. Les étapes de la fabrication étaient les suivantes :

- diode (RCA 1N2326) sur laquelle est enroulée 200 cm de fil de cuivre "vernis" de Téflon (parfois, on emploie aussi du fil de Constantan);
- l'ensemble est retenu par 2 anneaux en thermo-rétractable placés en haut et en bas du cylindre;
- un spray urethane (Uralane 8267, Furane Plastics, Inc) est appliqué en 3 couches avec 24 h de séchage entre chaque couche pour maintenir le fil chauffant en place et pour le protéger de la corrosion;
- le vernis Teflon est gratté à chaque extrémité du fil chauffant et les fils y sont soudés;
- les fils de la diode et du four sont alors maintenus ensemble par un tube en plastique et protégés par un spray epoxy;
- si le Castone ou le gypse est utilisé, le module est centré dans un moule en plastique acrylique et le mélange est versé lentement en frappant le moule pour éliminer les bulles d'air;
 - l'unité est placée dans un dessiccateur et mis sous vide léger durant 5 minutes;
 - le mélange cristallise très vite et peut rapidement être retiré du moule;
- si la céramique est utilisée comme milieu poreux, le mélange est versé dans un moule en plâtre de Paris;
 - lorsque le bloc a durci dans le moule, il est extrait et peut donc sécher plus rapidement à l'air;
- le bloc de céramique est alors placé dans un four durant 8 heures entre 900° C et 950° C;
- après refroidissement, une cavité de dimensions égales aux dimensions extérieures de l'élément sensible est forée au centre du bloc cylindrique;
- de l'époxy à haute conductivité thermique (EPO-TEK 410 E, Epoxy Technology, Inc) est alors utilisé pour établir le contact entre l'élément sensible et les parois du trou;
- lorsque celui-ci est pris, la portion non remplie de la cavité est comblée avec un mélange de céramique Castone;
- les fils sont alors soudés sur un câble blindé à 4 conducteurs et les jonctions sont isolées avec du thermo-rétractable;
- la partie supérieure de l'unité est encapsulée dans de l'époxy pour fournir une rigidité à la structure et pour protéger l'endroit où les fils du senseur pénètrent dans le bloc.

Selon les chiffres fournis dans l'article, la puissance de chauffe serait seulement de l'ordre de 0.81 à 3.25 millical/sec, soit 3 ... 13 mWatt, et ce, durant 150 secondes. Le ΔT est alors très faible, de l'ordre de 1 ou 2 dixièmes de degrés, et il faut mesurer la température avec une résolution avoisinant le centième de degré.

La calibration est effectuée dans une "casserole à pression" à plaques poreuses. Afin d'assurer un bon contact entre la matrice poreuse et le sol, le senseur est placé sous la tension d'un ressort dans le sol sec, qui est ensuite saturé d'eau. La calibration est réalisée entre 0 et - 10 bars.

La céramique s'avère être une matrice solide et stable dont les caractéristiques ne changent pas avec le temps, sauf si des micro-organismes s'accumulent sur sa surface et limitent le flux d'eau.

L'autre avantage de la céramique est sa linéarité entre 0 et - 6 bars de tension matricielle. La dépendance avec la température du sol s'avère très faible. De toutes façons, durant le temps de la mesure, celle-ci peut être considérée comme constante. Eventuellement la mesure peut être réalisée de façon relative, en plaçant une autre sonde de température dans le sol. La sonde semble être reproductible, même après plusieurs mois.

3. VERSION ACTUELLE DU CAPTEUR DE PHENE.

Dans la version décrite dans un article de 1989 [2], le senseur de Phene semble un peu différent, bien que l'on fournisse beaucoup moins de détails au sujet de sa fabrication, puisqu'il a été commercialisé sous le nom d'AGWA II - SMPS.

La porosité de la céramique semble être de l'ordre de 25 % en volume. Le mélange est versé dans un moule cylindrique en plâtre, séché à l'air, puis cuit pendant 8 heures entre 900 et 950° C. L'électronique est placée après, dans une cavité forée.

La différence avec la version précédente réside essentiellement dans la partie sensible. Le capteur de température est l'AD590 d'Analog Devices, qui délivre 1 $\mu\text{A/K}$ à travers une résistance de 10 k Ω (ce qui crée donc une tension de 10 mV/K aux bornes de celle-ci).

Le four n'est plus un fil bobiné, mais une résistance chauffante de 10 k Ω .

La grande différence avec la première version est la puissance de chauffe : 1 Watt, qu'on impose durant 1 minute (on fait passer un courant de 10 mA dans la résistance chauffante).

Cette puissance, imposée durant 60 secondes provoque une variation maximale de tension de mesure d'environ 60 mV, c'est-à-dire 6° C, pour un sol "sec" (à - 3 bars) et d'environ 40 mV, c'est-à-dire 4° C, pour un sol proche de la saturation (à - 200 mbars). On a donc une sensibilité de quelques millièmes de degrés par mbar de tension.

Pour rappel, le potentiel matriciel peut s'exprimer comme une énergie de succion, en Joule par kg d'eau, avec 1 J/kg équivalant à 10 mbar de tension. Rappelons également que 1 mbar = 10 mm de colonne d'eau = 0.73 mm de colonne de Hg = 100 NT/m² \cong 100 Pa.

Phene utilise son capteur surtout entre - 100 et - 3 000 mbars (- 10 à - 300 J/kg ou - 73 à - 2 190 mm de Hg). La distribution très large des pores permet une linéarité du capteur sur toute la gamme de tension matricielle.

La calibration est réalisée dans une casserole à pression à plaques poreuses, dans un sol constitué de 75 % de terre de diatomée et 25 % de sol passé dans un tamis de 74 μm .

Ensuite, le capteur est testé dans un lysimètre à 3 profondeurs dans le sol (15,30 et 45 cm de la surface) et en plusieurs endroits. Le temps de réponse du capteur est estimé à environ 24 heures entre - 1 000 et - 1 200 mbars. Pour des pressions inférieures, on peut considérer que la réponse du capteur est instantanée, alors qu'elle peut être de plusieurs jours pour des tensions entre - 1 200 et - 1 400 mbars.

La résolution durant la mesure était de 55 mbars, limitée essentiellement par le logger.

Dans le sol, de fortes variations sont observées d'un capteur à l'autre que Phene attribue à des différences locales de sol.

4. DÉFAUTS DU CAPTEUR DE PHENE.

Les tests qui ont été effectués à l'université d'Uppsala en Suède, ainsi que nos propres tests sur la sonde, mettent en évidence les défauts suivants :

- céramique fragile : plusieurs capteurs cassent rapidement;
- courant de mesure instable ou même inexistant;
- dans certains cas, sensibilité beaucoup inférieure à celle annoncée, probablement à cause d'un mauvais contact thermique entre l'élément sensible et la matrice poreuse, entraînant donc de faibles ΔT ;

- logiciel d'utilisation assez complexe;
- capteurs non interchangeables : pour une même tension matricielle, de grandes variations sont observées entre les capteurs (? 0.7° C);
- résolution réelle : 300 mbar, mais on peut atteindre 20 mbar par quelques modifications;
- la reproductibilité est fort affectée par l'aire de contact de la matrice poreuse avec le sol.

5. AMÉLIORATIONS APPORTÉES PAR NOTRE CAPTEUR.

Les améliorations déjà apportées par notre capteur ou à étudier plus particulièrement sont les suivantes :

- reproductibilité de fabrication et solidité de la céramique;
- électronique de mesure moins sensible au bruit;
- mesure plus simple pour l'utilisateur final (capteur intelligent);
- éventuellement bloc plus petit;
- meilleure résolution;
- descendre sous le seuil des - 100 mbars.

Le temps de réponse et la conductivité thermique de notre capteur doivent encore être évalués.

Les pistes à explorer pour améliorer le capteur sont éventuellement :

- la recherche d'une variable caractéristique moins sensible aux différences entre les capteurs (travailler peut-être par rapport à l'asymptote de la montée en température);
- travailler à puissance variable pour maintenir constante la montée en température et mesurer cette puissance;
- ...

BIBLIOGRAPHIE.

- [1] PHENE, C.J., HOFFMAN, G.J., RAWLINGS, S.L.. (1971).
 "Measuring soil matric potential in situ by sensing heat dissipation within a porous body : I. Theory and sensor construction".
 Soil Science Society of America Proceedings, 35, pp. 27-33.
- [2] PHENE, C.J., ALLEE, C.P., PIERRO, J.D.. (1989).
 "Soil matric potential sensor measurements in real-time irrigation scheduling".
 Agricultural Water Management, 16, pp. 173-185.

ANNEXE III
INTELLIGENT MEASUREMENT: THE "SMART
SENSOR" CONCEPT

INTELLIGENT MEASUREMENT :

THE "SMART SENSOR" CONCEPT

Jacques NICOLAS
1993

Intelligent measurement is mainly characterized by computer control. That is, instruments or systems either have a built-in processor ("stand alone") or must be connected to a computer ("computer-based").

The chosen option in the frame of F.U.L. studies is stand alone instruments, which have all necessary components included in one casing and therefore function autonomously. It is also planned to build an interface to a host computer by which the smart sensors may run under program control.

The following concepts are particularly original for the smart sensor approach with respect to a standard computer data processing :

- *learning* : as environment is in perpetual evolution, it is not always easy to specify a priori range, noise level or time response for a given measurement. The sensor has thus to adjust itself to the specific event conditions by adapting its algorithms and models from the first gathered information.
For example the excitation signal sent to the sensor can be chosen by the sensor itself, which analyses the amount of environmental noise : the sensor is then able to provide the best accuracy compatible with the noise value;
- *concatenation* : As far as it is aimed to management purposes, an environmental variable is by definition the concatenation of some informations into a single non-ambiguous variable, well suited for a rapid decision. The local intelligence allows integration and preprocessing of that variable in order to send on the output line just the essential information.
For example, thermal comfort index or water quality index could be computed from individual measurements of some selected variables;
- *assessment* : The learning step led to creating and fitting an appropriate model based on the empirical knowledge of the phenomenon. Now, the opposite approach is allowed : by identification from that model, assessing some other parameters which were impossible to measure by a standard way.
A good example is the assessment of air temperature and of convection coefficient in a greenhouse from ground and walls temperature measurements and identification with a nodal model. Indeed, it is practically impossible to measure directly those parameters since radiation influences the temperature value;
- *action* : Since intelligence is available in the sensor head, it is now possible to consider the reverse direction for the information flow : that means allowing the transducer to react either on the medium or on the sensing element itself. Typical applications are : heating the medium, manipulating an electrode or setting the sensor in some calibration condition.
- *reliability* : By reducing the distance between the sensing element and the processing equipment, miniaturized intelligence allows also reducing noise level and data transmission problems.

Not only the local intelligence leads to new goals but also improves quality of standard measurement.

Some processing algorithms could be implemented :

- processing on-line error by statistical methods,
- including knowledge and expert appraisalment, for example to discard outliers or to fill some missing data,
- supplying not only past and present data but also forecasting variable evolution,
- compensating the influence of interference variables (e.g. : temperature compensation for pH-meter or bicarbonate elimination from nitrate measurement); compensation may operate by means of measurement of other parameters properly included in a model,
- counterbalancing the sensor deficiency by a model, allowing thus the use of cheaper sensing elements,
- filtering signal with on-line and self-adaptive filter which performs harmonic analyses at each sampling time,
- using the principle of data redundancy from multi sensors inputs : the redundant data coming from several data sources is processed in order to make it coherent amongst them and to supply a reliable estimation of the variable,
- self-testing, fault-tolerance (e.g. when transmitting the information), diagnostic, error messages, ...
- supplying not only the value of the variable, but also associated confidence interval,
- identifying the whole and exact peak shape instead of only detecting a threshold or a level,
- ...

Last but not least, local intelligence provides the sensor with digital communication. Fieldbus protocols or some other standardized digital communication systems are currently experienced over the world. Each sensor belongs to a monitoring network, it is identified by an address and it sends on the standardized line some technical data ("identity card") together with the measured and pre-processed values.

ANNEXE IV
THEORIE DE LA DISSIPATION THERMIQUE A
SYMETRIE SPHERIQUE

ANNEXE IV

Théorie de la dissipation thermique à symétrie sphérique

La théorie est extraite de l'ouvrage de Carslaw et Jaeger: Conduction of Heat in Solids, 2e édition, pages 349 et 350.

Puisqu'on s'intéresse uniquement à ce qui se passe durant le transitoire qui caractérise la dissipation thermique à l'intérieur de la cellule poreuse, on peut considérer le modèle thermique relatif à un milieu infini, homogène et isotrope.

Cette hypothèse est renforcée par le fait que la cellule possède une texture similaire à celle du sol avoisinant et qu'elle est en parfait équilibre thermique avec lui, avant le chauffage. On considère donc que le sol n'induit pas de conditions aux limites sur la conduction de la chaleur.

Le problème est le suivant:

- une quantité de chaleur est produite pour un temps $t > 0$, à puissance constante Q à l'intérieur d'une sphère de rayon a parfaitement conductrice;
- elle est diffusée dans un milieu infini dont la température est connue, par exemple zéro.

Ici donc, r est le rayon considéré et a est le rayon de la sphère à l'intérieur de laquelle est produite la chaleur.

On admet en outre qu'il peut exister une résistance de contact $\frac{1}{H}$ par unité de surface au niveau $r=a$.

La solution se trouve par la méthode de Laplace et décomposition en série de Taylor.

On trouve, pour la température de la sphère conductrice centrale:

- pour des petites valeurs de temps t :

$$T = \frac{Q}{m_c c_c} \left[t - \frac{kh\kappa t^2}{2a} + \dots \right] \quad (\text{AIV, 1})$$

où m_c et c_c sont respectivement la masse et la chaleur spécifique de la sphère centrale, et où l'on a posé:

$$k = \frac{4\pi a^3 \rho c}{m_c c_c} \quad \text{et} \quad h = \frac{H}{\lambda}$$

avec ρ , λ , c respectivement la masse spécifique, la conductivité thermique et la chaleur spécifique du milieu infini.

- pour des grandes valeurs du temps t :

$$T = \frac{Q}{4\pi\lambda a} \left[\frac{1+ah}{ah} - \frac{a}{(\pi\kappa t)^{1/2}} - \dots \right] \quad (\text{AIV, 2})$$

Ces deux expressions comportent des séries infinies de termes de degrés croissants que l'on peut limiter au 1er ou au 2e, si (κt) est grand.

Pratiquement, on peut considérer que la solution dépend de la variable adimensionnelle:

$$\beta_a = \frac{\kappa t}{a^2}$$

qui augmente avec le temps.

Pour trouver l'expression (AIV, 1), on a eu recours à la décomposition ou série asymptotique des fonctions de Bessel, valable pour β_a petit. Lorsque β_a est plus grand, cette série diverge et on préfère opter pour une solution approximative, moyennant certaines hypothèses mathématiques; on trouve alors l'expression (AIV, 2).

Pratiquement, on estime qu'on passe à la seconde solution dès que β_a atteint 0.02.

Par ailleurs, si on considère que la résistance de contact $\frac{1}{H}$ est petite, le produit ah devient très grand et le rapport $\frac{1+ah}{ah}$ de l'expression (AIV, 2) tend vers 1. En réécrivant cette expression par rapport à la variable β_a et en limitant au premier ordre, on trouve:

$$T = \frac{Q}{4\pi\lambda a} \left[1 - \frac{1}{(\pi\beta_a)^{1/2}} \right] \quad (\text{AIV, 3})$$

Comme la température doit être nécessairement positive, cette expression approximative n'est valable que si le produit $\pi\beta_a$ est supérieur à l'unité, c'est-à-dire que si $\beta_a > 0.3$ environ.

Les solutions trouvées jusqu'à présent sont valables pour le rayon $r=a$, c'est-à-dire que la température considérée est celle du bord de la sphère chauffante.

Pour un r quelconque, supérieur à a , la solution est un peu plus complexe. Une expression du même type que (AIV, 1) ou (AIV, 2) est multipliée par un facteur du type:

$$e^{-\frac{r^2}{4\kappa t}} \quad (\text{AIV, 4})$$

Par analogie avec β_a , on définit:

$$\beta = \frac{\kappa t}{r^2}$$

La variable β valant donc β_a pour $r=a$.

Lorsque β est petit, l'expression (AIV, 4) est également petite et la variation de température est proche de zéro. Par exemple, pour $\beta=0.02$, l'exponentielle vaut 3×10^{-6} .

En pratique, on peut considérer que l'influence du chauffage dans la sphère centrale ne se fait sentir au rayon r que pour des valeurs suffisamment élevées de β , soit par exemple $\beta=0.2$.

Cette condition se traduit donc simplement par l'expression:

$$\frac{\kappa t}{r^2} > 0.2 \quad (\text{AIV, 5})$$

qui peut servir soit à déterminer approximativement le temps nécessaire au front de chaleur pour atteindre le rayon r , soit à déterminer le rayon atteint par le front de chaleur après un temps t .

Dernière limite utile à connaître: pour quelle valeur de β_a l'expression (AIV, 2) peut-elle être réellement tronquée au terme $\frac{a}{(\pi \kappa t)^{1/2}}$?

La théorie nous apprend que le terme d'ordre suivant peut être considéré comme négligeable si:

- la résistance de contact est faible,
- β_a est grand, de l'ordre de 40...50,
- k est grand.

Remarquons en tout cas qu'en régime permanent, la température en $r=a$ vaut, si la résistance de contact est petite:

$$T_{\infty} = \frac{Q}{4\pi\lambda a} \quad (\text{AIV, 6})$$

Cette valeur constituera donc l'asymptote de l'évolution en température mesurée.

ANNEXE V
SYSTEME D'ETALONNAGE AUTOMATIQUE DE
SONDES DE TEMPERATURE

ANNEXE V

SYSTEME D'ETALONNAGE AUTOMATIQUE DE SONDES DE TEMPERATURE

1. OBJECTIF

Parmi toutes les caractéristiques de notre environnement, la température est certainement celle qui est la plus mesurée.

En effet, elle peut tout d'abord être mesurée pour elle-même : température de l'air extérieur, de l'air ambiant dans un bâtiment, d'un sol, de l'eau, ...

Ensuite, elle peut servir à déterminer certains paramètres, par voie indirecte : humidité relative, conductivité et diffusivité thermiques, ...

Enfin, elle doit encore être mesurée lorsque dans une mesure de pH, par exemple, il faut calculer une compensation en fonction de la température.

Précisément parce qu'on les utilise beaucoup, il existe une grande variété de capteurs de température : du thermocouple à la thermistance, en passant par la sonde de platine et les capteurs monolithiques.

Le problème qui se pose souvent pour tous ces senseurs, c'est leur interchangeabilité. En effet, les meilleurs ont une précision absolue d'environ 0.2°C. C'est la marge d'erreur que l'on est forcé d'accepter si on veut pouvoir les remplacer sans précautions particulières.

La nécessité d'étalonner ces sondes pour parvenir à une précision meilleure que le dixième de degré apparaît donc si la mesure nécessite une telle qualité, ce qui est très souvent le cas lorsqu'on étudie l'environnement.

Cependant le travail d'étalonnage est long, fastidieux et peu valorisant pour la personne qui l'effectue.

Un milieu, généralement de l'eau, est porté à une température donnée. Lorsque la stabilité est atteinte, souvent après une quinzaine de minutes, la valeur lue sur le thermomètre étalon est notée, ainsi que les signaux délivrés par les capteurs à étalonner plongés dans le milieu. On monte ainsi la température par paliers, en général de 5 en 5 degrés, dans la gamme 0-90°C.

A l'issue de ce travail, les résultats sont traités de façon à éliminer les éventuelles erreurs de mesure et enfin à évaluer la fonction d'étalonnage qui permettra la mesure de température avec une précision pouvant atteindre 0.01°C.

Même pour une seule sonde, un tel étalonnage peut prendre une journée.

L'automatisation de cette tâche apparaît donc comme essentielle à partir du moment où, comme à la FUL, une centaine de capteurs de température est en moyenne utilisée par an.

2. SOLUTION CHOISIE

Un bain d'eau glycolée de 30 litres, chauffé par une résistance électrique de 2 kW et refroidi par un petit groupe de froid ("pompe à chaleur") est thermostatisé par un régulateur extérieur qui peut être piloté par un ordinateur de type PC-IBM-compatible. Cette commande est réalisée par l'intermédiaire d'une carte de conversion digital-analogique.

Cette température est lue sur une résistance de platine de grande précision, étalonnée préalablement au moyen de thermomètres à alcool de résolution 0.01°C. Cette mesure sert à la fois pour la régulation et comme valeur de référence.

Un multimètre de haute qualité, à relais, piloté par le PC, permet d'effectuer la mesure soit de la sonde de référence, soit de l'une des sondes.

La donnée provenant de ce multimètre est alors lue par l'ordinateur par l'intermédiaire du bus IEEE 488.

Un logiciel à menu très convivial permet au technicien d'imposer le nombre et le type de capteurs à étalonner, la plage et le pas de température de l'étalonnage. Le travail de calibration proprement dit est alors intégralement effectué en mode automatique, y compris l'ajustement paramétrique final de la fonction d'étalonnage.

- Milieu utilisé pour étalonner les capteurs :

- thermostat LAUDA de 30 litres rempli d'eau glycolée,
- chauffage par résistance électrique de 2 kW, refroidissement par groupe de froid de conception FUL.

- Capteur de référence :

résistance de platine Pt 100 Ω bobinée, préalablement étalonnée par confrontation avec 10 thermomètres à alcool couvrant chacun une décade, avec une précision de 0.01°C.

- Multimètre :

- pour la mesure de la référence et des signaux des sondes à étalonner,
- type HP34SSA à 6 digits,
- mesure de tensions et de résistances,
- interface de type GPIB, norme IEEE 488.

- Ordinateur :

- type PC-XT compatible IBM.

- Logiciel :

- entrées :

- nombre de sondes à étalonner,
- type de capteurs, soit résistifs, soit délivrant une tension,
- plage de température (maximum de 0 à 90°C)
- pas de l'étalonnage (quelconque, mais de 5 en 5°C par défaut).

- sortie après étalonnage automatique :

- informations concernant le nombre et les types de capteurs,
- valeurs de la sonde de référence et de chacun des signaux des autres sondes,
- valeurs des paramètres de la fonction de calibration.

3. EXEMPLE

Le capteur utilisé dans les capteurs que nous développons et le plus utilisé à la FUL est le LET A01 de la firme Fenwal. Il s'agit d'une thermistance à coefficient de température négatif dont la résistance vaut 10 k Ω à 25°C.

L'interchangeabilité annoncée par le fournisseur est de 0.2°C.

La fonction de calibration à ajuster dans le cas des thermistances est la suivante :

$$1/T = a + b (\ln R) + c (\ln R)^3$$

où a, b et c sont les paramètres que le programme d'étalonnage ajuste en fonction des mesures,

T est la température en °C,

R est la résistance lue sur le multimètre en k Ω .

Les thermistances de ce type étant de très petit volume, elles sont en général placées dans des doigts de gant en laiton de diamètre 4 mm et plongées dans le bain thermostaté.

ANNEXE VI
CAPTEUR THERMIQUE DE POTENTIEL MATRICIEL
DU SOL
RECHERCHE D'UNE VARIABLE REPRESENTATIVE
DE L'ETAT D'HUMIDITE DU SOL

CAPTEUR THERMIQUE DE POTENTIEL MATRICIEL DU SOL.

RECHERCHE D'UNE VARIABLE REPRÉSENTATIVE DE L'ÉTAT D'HUMIDITÉ DU SOL.

J. NICOLAS, le 6.12.93.

1. OBJET.

Les traitements suivants sont relatifs à des essais effectués dans 3 états différents : sec, "humide" et saturé. L'état "sec" est l'état du capteur à l'air, l'état "saturé" est l'état du capteur plongé dans l'eau et l'état "humide" est celui d'un sol mouillé, sans précision de la teneur en eau correspondante. Dans la suite du texte, ces 3 états seront considérés comme 3 "types" ou "états" de sol différents, même si, en fait, seul le cas "humide" correspond réellement au capteur placé dans un sol.

Quatre capteurs thermiques de potentiel matriciel ont été testés sur 6 cycles (7 pour "humide" et "saturé") de 15 minutes chacun comprenant 60 secondes de chauffage et 14 minutes de relaxation. Pour rappel, les 4 capteurs sont des cylindres de 20 mm de diamètre et 30 mm de hauteur et on dissipe 100 mW dans une résistance de 1 k Ω durant les 60 secondes.

Les valeurs de tension mesurées ont été converties en température par des lois du type $\frac{1}{T} = A + B \ln R + C (\ln R)^3$ ajustées par calibration.

L'objectif du traitement de données est de déterminer, sur base de ces résultats, une variable caractéristique suffisamment représentative de l'état d'humidité du sol, c'est-à-dire qui parvient à bien discriminer les 3 états testés.

Si cette variable existe, l'étape suivante sera la calibration par comparaison avec un tensiomètre.

2. EVOLUTION DE LA TEMPÉRATURE.

Les figures 1a, 1b et 1c montrent l'évolution de la température durant le chauffage, respectivement pour le sol sec, le sol humide et le sol saturé.

Que constate-t-on ?

- que les différences de température atteintes restent faibles : 2.3° C dans le meilleur des cas;
- que la température du sol sec s'élève plus vite que celles du sol humide et du sol saturé;
- qu'il y a parfois certaines perturbations dans la mesure (cfr p. ex. sol saturé, capteur 1);
- que, si les 3 évolutions sont, en moyenne, relativement différentes, la discrimination n'est pas toujours facile à faire entre les 3 états.

Par exemple, comment distinguer le type de sol en fonction des courbes correspondant au capteur 4 dans le sol humide (et atteignant 0.9° C après 60 secondes) et au capteur 3 dans le sol saturé (et atteignant 1.1° C après 60 secondes, soit plus que dans le sol humide !)?

3. DIFFÉRENCE DE TEMPÉRATURE.

L'idée la plus simple pour trouver une variable serait l'écart de température (ΔT) entre le temps "zéro" et un temps donné.

La théorie nous apprend qu'il existe une période transitoire, notamment due au chauffage du volume correspondant à la résistance électrique et au corps de la thermistance, ainsi qu'à la résistance de contact entre cet ensemble et la matrice poreuse.

Posons a priori qu'après 10 secondes, cette période soit terminée.

Pour nous en assurer, nous pouvons par exemple considérer le ΔT après 10 sec, puis le ΔT en fin de période de chauffage, après 60 secondes. Comme le montre la figure 2 pour un sol saturé, ces deux ΔT sont liés entre eux, mais pas toujours. Les figures 3a, 3b et 3c montrent les valeurs des ΔT , respectivement entre 0 et 10 sec, entre 0 et 60 sec et entre 10 et 60 sec pour 24 essais (4 capteurs et 6 cycles de mesure) et les 3 types de sol.

Que constate-t-on ?

- qu'il y a une grande variation entre les 4 capteurs pour un même sol (les capteurs sont repérés par les labels 1, 2, 3, 4 sur les points relatifs au sol sec);
- que le ΔT après 10 secondes n'est certainement pas une bonne variable pour discriminer les 3 types de sol;
- que le ΔT après 60 secondes est à peine meilleur;
- que le ΔT entre 10 et 60 secondes (c'est-à-dire après la période transitoire) représente la meilleure variable des trois : moins de variation d'un capteur à l'autre, plus d'écart entre le sol sec et les autres;
- qu'il ne permet cependant pas de distinguer nettement le sol "humide" du sol saturé, du moins si l'on confond les 4 capteurs;
- que le ΔT provenant d'un capteur déterminé (p. ex. le capteur 2) permettrait peut-être une meilleure discrimination.

On en conclut donc

- que le ΔT n'est peut être pas la meilleure variable à choisir;
- que, de toutes façons, il faut considérer la zone comprise entre 10 et 60 secondes;
- qu'il va être difficile de trouver une variable caractéristique de la succion matricielle qui soit indépendante du capteur.

4. PENTE DE LA COURBE TEMPÉRATURE VERSUS TEMPS.

Le raisonnement précédent nous pousse à proposer éventuellement la pente de la dernière partie de la courbe Température/temps comme variable de mesure. A partir de quel moment peut-on considérer cette courbe comme "linéaire", afin d'en déterminer la pente moyenne ?

La figure 4 montre la régression linéaire effectuée sur les 60 secondes de la montée en température (droite, avec ses intervalles de confiance, ainsi que l'intercept B_0 , la pente B_1 , le coefficient de corrélation CORR et la moyenne du carré des écarts MSE) pour un essai sur le sol humide. Comme on s'y attendait, cette régression est mauvaise.

La figure 5 montre la même régression linéaire lorsqu'on a éliminé les points correspondant aux 11 premières secondes de chauffage. C'est meilleur ($r = 0.95$), mais pas encore idéal.

Comme le montrent les figures 6 et 7, ce n'est pas beaucoup meilleur lorsqu'on élimine 20 ou 31 points.

Aucune portion de la courbe T vs t ne peut réellement être considérée comme linéaire et être utilisée telle quelle pour caractériser l'humidité du sol.

5. FORME DE LA COURBE TEMPÉRATURE VERSUS TEMPS.

La figure 8 montre les évolutions normalisées des températures pour les 3 types de sol (3^e cycle, capteur 3).

Que constate-t-on ?

- que pour des ΔT normalisées à 60 secondes, les formes des courbes sont différentes : plus douce pour un sol sec, plus rapide, avec un effet de plateau pour un sol saturé;
- que les évolutions parallèles des températures pour le sol humide et pour le sol saturé entre 0 et 20 secondes, suivies d'un décrochage entre 20 et 60 secondes, confirment que c'est bien la dernière partie de la courbe qui est intéressante dans notre objectif de discrétiser les 3 types de sol.

6. PENTE DE LA COURBE LOG T / t.

L'équation de la chaleur est du type $\frac{dT}{dt} = aT + f$ (où f peut dépendre du temps), ce qui suggère une solution en exp (at).

Il est donc logique de penser à caractériser l'évolution en température par la pente de la courbe log T / t.

Comme le montre la figure 9, non seulement l'allure de cette courbe est loin d'être linéaire, mais de plus, comme on pouvait s'y attendre, les différentes courbes se "tassent" verticalement, rendant quasi impossible leur séparation.

Ce qui montre encore davantage que le modèle n'est pas exponentiel, c'est le calcul de l'asymptote.

En effet, comme le départ des courbes est probablement sans signification, puisqu'il est dû à un phénomène transitoire indépendant de la matrice en céramique, il serait peut-être intéressant de considérer comme référence de température, non pas l'origine, mais l'asymptote. Ceci pourrait constituer un moyen de rendre les calculs indépendants du capteur.

Pour un modèle exponentiel, une méthode pratique de calcul de l'asymptote est la suivante (figure 10). On considère 3 abscisses t_1, t_2, t_3 , avec t_2 au milieu de $[t_1, t_3]$. On estime une première valeur As de l'asymptote et on calcule les distances verticales D_1, D_2, D_3 par rapport à la courbe mesurée.

On corrige alors la valeur de As par

$$As = As - \delta$$

$$\text{où } \delta = \frac{D_1 D_3 - D_2^2}{D_1 + D_3 - 2 D_2}$$

Par un processus itératif (qui converge très rapidement), on arrive à une valeur finale de l'asymptote.

Or, selon le choix des 3 points t_1, t_2 et t_3 , on arrive à des valeurs assez différentes de l'asymptote.

Le tableau 1 montre, à titre d'exemple les asymptotes trouvées pour les 12 courbes de la figure 1, pour 3 choix différents des points t_1, t_2 et t_3 .

t ₁	t ₂	t ₃	t _{sec1}	t _{sec2}	t _{sec3}	t _{sec4}	t _{hum1}	t _{hum2}	t _{hum3}	t _{hum4}	t _{sat1}	t _{sat2}	t _{sat3}	t _{sat4}
10	20	30	1.44	2.21	2.09	1.90	1.15	1.20	1.37	0.94	0.57	0.89	0.93	0.58
20	30	40	1.86	2.50	2.03	2.01	1.25	1.33	1.35	0.91	0.57	0.69	0.82	0.89
30	40	50	1.68	2.36	2.39	1.96	1.48	1.51	- 28	0.97	0.72	1.00	1.08	- 37

Tableau 1.

Que constate-t-on ?

- 3 valeurs différentes pour un même essai, avec un même capteur, selon les 3 séries de points choisis;
- une asymptote parfois inférieure à la valeur de la température après 60 secondes;
- des valeurs parfois aberrantes (- 28, - 37).

On peut donc conclure que, même si certaines parties de la courbe peuvent localement être assimilées à des portions d'exponentielles, l'entièreté de la montée en température ne peut être modélisée de cette façon.

L'allure de la courbe $\log T / t$ ne peut donc convenir pour discrétiser les mesures et la valeur de l'asymptote ne peut être calculée par cette méthode simple.

7. PENTE DE LA COURBE $T / \log t$.

Nous l'avons vu, le diagramme $\log T / t$ "tasse" les courbes verticalement. On peut donc conserver linéaire l'axe des températures et rendre logarithmique l'axe du temps. Ceci nous rapproche du modèle utilisé pour la sonde à choc, qui dans ce cas, convient très bien.

La figure 11 montre les 12 courbes pour les 4 capteurs et les 3 types de sol, pour le premier cycle. L'allure générale peut effectivement être assimilée à une droite, du moins après une dizaine de secondes.

La régression linéaire de la figure 12 confirme cette hypothèse : même en considérant l'ensemble des points, le coefficient de corrélation est supérieur à 0.99 et il faudrait effectivement supprimer les 9 premières secondes pour s'approcher presque parfaitement d'une droite.

Cependant, comme le montre la figure 13, ni l'intercept, ni la pente de la droite, ni le rapport, ni le produit de ces deux coefficients ne peuvent réellement être considérés comme représentatifs de l'état du sol, indépendamment du capteur. A nouveau, on ne sait pas réellement discerner, sur cette base, le sol "humide" du sol saturé.

8. PENTE DE LA COURBE $T / t^{1/2}$.

Jusqu'à présent, on s'est contenté d'employer des artifices qui dilatent artificiellement les échelles par des changements de variables.

Si on observe d'un peu plus près la théorie, on s'aperçoit que l'on peut utiliser un modèle mieux adapté.

En effet, pour une source de chaleur de puissance Q , fournie par une sphère de rayon a , dans un milieu (considéré comme semi-infini) de conductivité thermique λ et de diffusivité κ , la solution (voir Carslaw et Jaeger [1] et Phene [2]) se rapproche de :

$$T = \frac{Q}{4\pi\lambda a} \left(\frac{1 + ah}{ah} - \frac{a}{(\pi\kappa t)^{\frac{1}{2}}} \right)$$

tout au moins pour un temps t supérieur à 120 secondes.

Dans cette équation, h est le rapport H/λ , où H^{-1} est la résistance de contact entre la sphère de rayon a produisant la chaleur et le milieu.

Puisque, en général, $ah \gg 1$, le terme $(1 + ah)$ se réduit à 1 et on peut assimiler l'allure de la température à une fonction linéaire en fonction de $t^{-1/2}$, avec un intercept $B = \frac{Q}{4\pi\lambda a}$ et une pente

$$A = - \frac{Q}{4\pi^2 \lambda \kappa^{\frac{1}{2}}}$$

Ceci nous montre que

- l'allure de la courbe $T / t^{-1/2}$ pourrait peut être mieux convenir que celle de $T / \log t$ (même si dans notre cas, on ne dépasse pas 60 sec.);
- la pente A est inversement proportionnelle à la racine carrée de la diffusivité thermique, fort sensible à l'humidité du milieu;

- le rapport B/A vaut $-\frac{1}{\pi^2} \frac{1}{\kappa^2}$, c'est-à-dire est indépendant de la puissance dissipée (toujours difficile à estimer) et de la conductivité thermique : il ne dépend plus que de κ , la variable qui nous intéresse et (malheureusement) encore de a , le rayon de la sphère intérieure, qui, lui aussi est difficile à estimer.

Phene [2], par ailleurs fournit le tableau suivant de valeurs :

Matériau	$\kappa_{\text{saturé}}/\kappa_{\text{sec}}$	$\lambda_{\text{saturé}}/\lambda_{\text{sec}}$	porosité (%)
Céramique	3.25	1.61	17.8
Céramique recuite	4.73	1.85	25.6
Céramique moulée pour dentiste	4.90	2.26	28.4
Gypse	5.05	2.53	44.5

Tableau 2.

Quel que soit le matériau employé, on constate donc que la sensibilité à l'humidité est supérieure pour la diffusivité que pour la conductivité.

On choisira donc de préférence la pente ou le rapport intercept/pente.

Comme le montre la figure 14, les courbes $T / t^{-1/2}$ présentent bien une allure linéaire entre 0 et 0.4 environ (donc au-delà de $t = 6 \dots 7$ sec.).

La régression linéaire pour l'ensemble des points n'est évidemment pas très bonne (figure 15 relative à un sol humide), mais, dès que l'on supprime 5 points (figure 16), elle devient nettement meilleure, avec un coefficient de corrélation supérieur en valeur absolue à 0.998.

Parfois, il faut supprimer davantage de points pour obtenir une bonne régression : c'est le cas par exemple pour le sol sec de la figure 17 où l'on a supprimé les 10 premières secondes.

En moyenne, il semble que l'effet transitoire indésirable ne dépasse que rarement 7 secondes. On choisira donc par la suite de supprimer les 7 premiers points. La description statistique des intercepts et des pentes ainsi calculés, ainsi que de leur rapport et de leur produit, est montrée sur les tableaux 3, 4 et 5.

Sol sec :

	intercept	pente	rapport intercept/pente	produit intercept x pente
nombre d'essais	24	24	24	24
moyenne	2.83	- 6.49	- 0.44	- 18.64
écart-type	0.35	0.74	0.019	4.25
minimum	2.21	- 7.61	- 0.47	- 25.65
maximum	3.37	- 5.06	- 0.40	- 11.19

Tableau 3.

Sol humide :

	intercept	pente	rapport intercept/pente	produit intercept x pente
nombre d'essais	28	28	28	28
moyenne	1.62	- 3.17	- 0.51	- 5.18
écart-type	0.20	0.36	0.036	1.11
minimum	1.13	- 3.69	- 0.57	- 7.14
maximum	1.94	- 2.10	- 0.44	- 2.38

Tableau 4.

Sol saturé :

	intercept	pente	rapport intercept/pente	produit intercept x pente
nombre d'essais	28	28	28	28
moyenne	1.23	- 2.56	- 0.48	- 3.24
écart-type	0.25	0.40	0.044	1.07
minimum	0.81	- 3.24	- 0.56	- 4.86
maximum	1.54	- 1.81	- 0.41	- 1.48

Tableau 5.

Sur base des moyennes, aussi bien l'intercept que la pente sont bien discriminants pour les 3 types de sol, et leur évolution est dans le bon sens. Par contre, le rapport intercept/pente n'est pas proportionnel à l'humidité. Le produit, lui, dont le sens physique est moins évident, permet par contre de bien séparer les 3 types de sol.

Les étendues des valeurs (tous capteurs et tous cycles confondus) se chevauchent pour l'échantillon humide et pour l'échantillon saturé (voir figure 18 pour les pentes), alors que l'échantillon sec est nettement séparé.

Une analyse de la variance sur les pentes montre que les différences entre les cycles sont faibles et non significatives (figure 19), alors que les différences entre capteurs sont très marquées (figure 20).

Notons cependant que cette dispersion peut n'être due qu'à un seul capteur, un peu "marginal" par rapport aux autres, comme le capteur 1 pour le sol sec.

Quoiqu'assez bien discriminante, la variable "pente de la droite ($T / t^{-1/2}$)" ne permet cependant pas de bien distinguer le sol humide du sol saturé, ni d'ailleurs l'intercept ou d'autres combinaisons pente-intercept comme le montre la figure 21 qui rassemble ces valeurs pour tous les essais.

9. INFLUENCE DU CAPTEUR.

La dispersion des mesures semble davantage due aux écarts entre les 4 capteurs qu'aux erreurs "aléatoires" des mesures. Si, sur la figure 21, on "suivait" un capteur particulier, il semble que l'on pourrait discriminer mieux les 3 types de sol.

C'est ce qui est fait sur la figure 22 pour chacun des 4 capteurs sur les 6 cycles de mesures et les 3 types de sol : chacune des 4 parties de la figure est relative à un capteur. Il y a un progrès par rapport à la situation où tous les capteurs sont confondus et, bien qu'il reste certaines valeurs qui se chevauchent, il semble qu'il s'agit d'une idée à exploiter.

10. RÉFÉRENCE À LA SATURATION.

Il faut peut-être abandonner l'idée de capteurs interchangeable : aucune céramique n'est parfaitement semblable, les résistances chauffantes diffèrent légèrement, les courants et les gains des amplificateurs ne sont peut-être pas tout à fait identiques.

Mais plutôt que d'étalonner chaque capteur individuellement, on pourrait imaginer que l'on établisse une échelle fixe de variation de la variable choisie (pente, ΔT , ...) en fonction du rapport d'humidité entre le sol testé et le même sol à saturation. Il s'agit là d'une idée qui se cadrerait parfaitement dans le contexte du capteur intelligent : durant une phase de calibration où l'on sature le capteur, celui-ci auto-apprend sa propre référence. Par la suite, il calculerait la tension matricielle du sol dans lequel il est placé grâce à une échelle de rapports connus, relativement à cette référence. Comme, de toutes façons, le capteur doit être saturé avant d'être placé dans le sol, il s'agirait-là d'une méthode séduisante.

Cette démarche a été testée sur toutes les variables envisagées et les figures 23a, b et c, 24a, b, c et d, 25a, b, c et d présentent, pour différents essais, les valeurs relatives par rapport à la saturation respectivement de la température après 10 sec, de la température après 60 sec, de l'écart de température entre 10 et 60 sec, de l'intercept, de la pente, du rapport intercept/pente et du produit intercept x pente des droites $T / \log T$ et des droites $T / t^{-1/2}$.

Les variations entre capteurs sont à peine plus réduites que précédemment, ce qui montre que, bien que la méthode ne soit pas à rejeter, il existe une erreur aléatoire provenant d'autres causes que de la géométrie du capteur. Ou du moins, on ne peut affirmer sur base de ces résultats qu'un même capteur réagisse systématiquement de la même façon (par exemple en surestimant la pente, par rapport à un autre capteur) pour tous les types de sol. Par exemple, si on examine la figure 25b relative à la pente de la courbe $T / t^{-1/2}$, on constate que le capteur 4 présente une valeur supérieure aux autres pour le sol sec, mais pas nécessairement pour le sol humide.

11. CONCLUSIONS.

Globalement ces résultats semblent peu convaincants : on n'a pas réellement pu trouver une variable qui puisse être considérée comme une caractéristique reproductible du potentiel matriciel dans le sol.

Cependant, ils sont encourageants, car ils permettent de tirer un certain nombre de conclusions positives.

Concernant la méthode :

- on confirme les études de faisabilité : la température dans la cellule poreuse s'élève davantage lorsqu'elle est placée dans un sol sec que dans un sol saturé;
- l'évolution de la température en fonction de l'inverse de la racine carrée du temps semble bien linéaire après une courte période transitoire, ce qui est réconfortant, puisqu'on se rapproche du modèle théorique;
- les formes des courbes d'évolution de la température en fonction du temps sont différentes selon les types de sol.

Concernant la variable caractéristique :

- une période transitoire d'environ 7 secondes (pour la puissance de chauffe considérée) est à éliminer;
- le ΔT entre 7 et 60 sec, ou, mieux encore, la pente de la courbe $T / t^{-1/2}$ après 7 secondes peut convenir comme variable caractéristique du potentiel matriciel du sol;
- il serait assez facilement possible de travailler relativement à la saturation et de rendre l'échelle pratiquement indépendante du capteur, ce qui éviterait de connaître le rayon intérieur a , la puissance exacte de chauffe Q et la résistance de contact, caractéristiques difficiles à évaluer.

Les principaux problèmes qui restent en suspens sont les suivants :

- faibles différences de température, ce qui nécessite une grande précision lors des mesures;
- perturbations ponctuelles pour certaines mesures (variations anormales des températures);
- reproductibilité de fabrication des capteurs.

Pour l'avenir, il faut donc conclure que la méthode et la mise en oeuvre générale sont bonnes, mais qu'il faut absolument améliorer la reproductibilité de fabrication à la fois de la céramique et de l'ensemble résistance électrique/sonde de température, en apportant plus de soin aux étapes suivantes :

- homogénéisation de la coulée dans les moules (? tassage par vibration ?);
- isolation des fils.

12. COMPARAISON AVEC D'AUTRES SENSEURS, FIABILITÉ DE LA MÉTHODE.

Selon Phene^[3] l'intérêt principal du capteur est d'aller au-delà des possibilités du tensiomètre ordinaire pour les sols particulièrement secs, lorsqu'il est nécessaire de pratiquer une irrigation.

Son capteur réagit donc très bien pour des potentiels matriciels situés aux alentours de 1 bar et au-delà. Par contre, son seuil de détection et sa résolution se situent aux alentours de 10 mbar (de l'ordre de 7 mm de Hg).

Par ailleurs, le capteur mesure la tension matricielle et non la teneur en eau. Or les courbes caractéristiques d'humidité du sol (courbes pF/θ) présentent une allure proche de celle de la figure 26, c'est-à-dire avec une partie plus plate (il s'agit parfois d'un véritable plateau) dans la zone II centrale.

S'il est vrai que la sensibilité est maximale pour la zone I (sol sec), qui intéresse la personne chargée de l'irrigation, elle diminue fortement dans la zone II. Or, le sol testé que l'on a qualifié "d'humide" se situait certainement dans cette zone plate, voire même peut-être déjà dans la zone III, c'est-à-dire proche de la saturation. Cela justifie probablement les faibles écarts mesurés entre l'état "humide" et l'état "saturé".

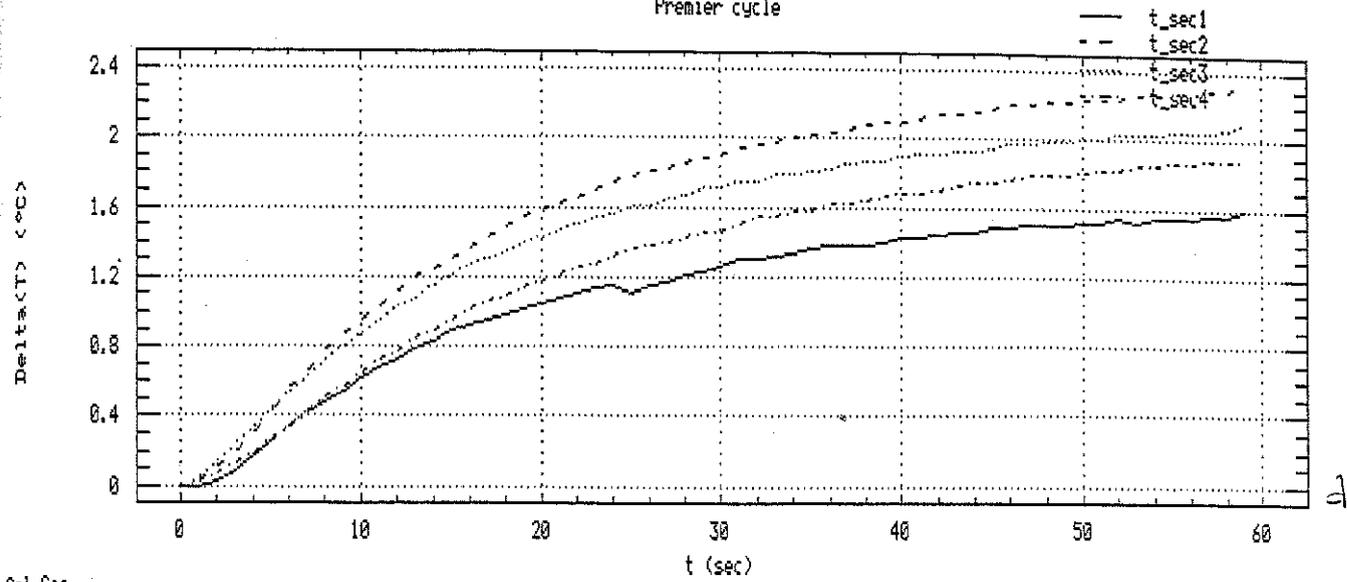
La sensibilité réelle du capteur sera appréciée par un étalonnage rigoureux, par comparaison avec un tensiomètre, essai en cours actuellement. La principale conclusion de ce rapport et les

améliorations à apporter aux capteurs portent donc davantage sur la reproductibilité que sur la sensibilité.

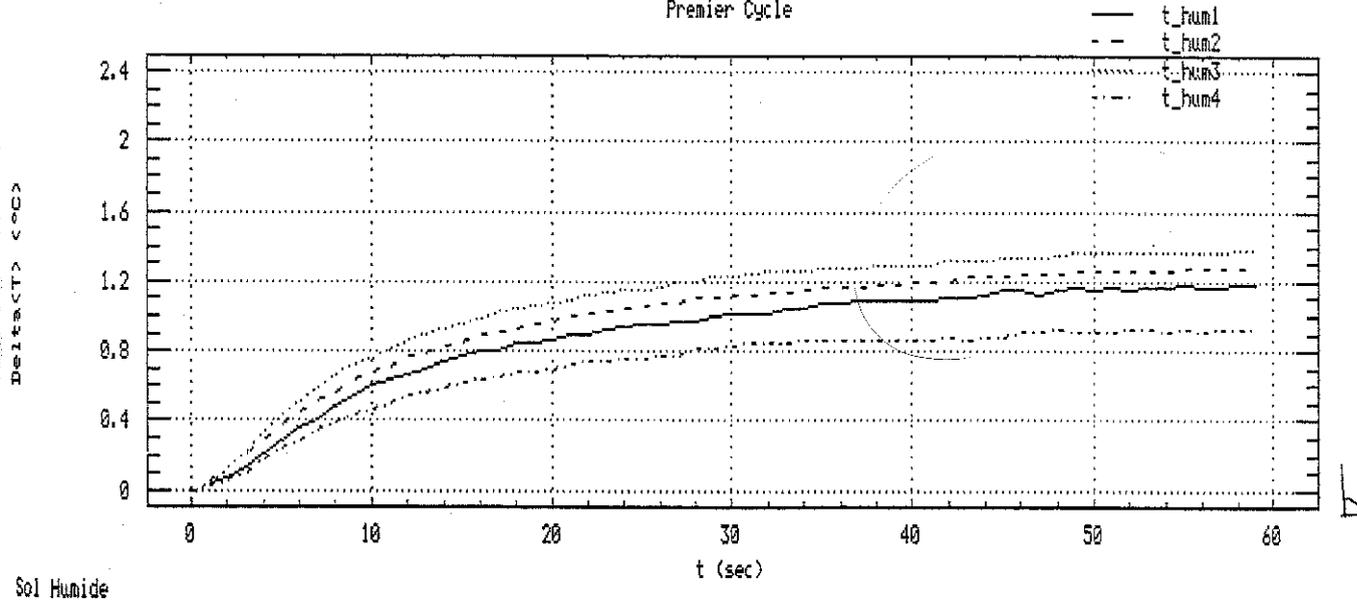
BIBLIOGRAPHIE.

- [1] CARSLAW, H.S. and JAEGER, J.C.. (1960).
"Conduction of Heat in Solids".
Oxford Univ. Press, London.
- [2] PHENE, C.J., HOFFMAN, G.J. and RAWLINS, S.L.. (1971).
"Measuring soil matric potential in situ by sensing heat dissipation within a porous body : I. Theory and Sensor Construction".
Soil Science Society of America Proceedings, 35, pp. 27-33.
- [3] PHENE, C.J., ALLEE, C.P. and PIERRO, J.D.. (1989).
"Soil matric potential sensor measurements in real-time irrigation scheduling".
Agricultural Water Management, 16, pp. 173-185.

Multiple X-Y Plot
Premier cycle



Multiple X-Y Plot
Premier Cycle



Multiple X-Y Plot
Premier Cycle

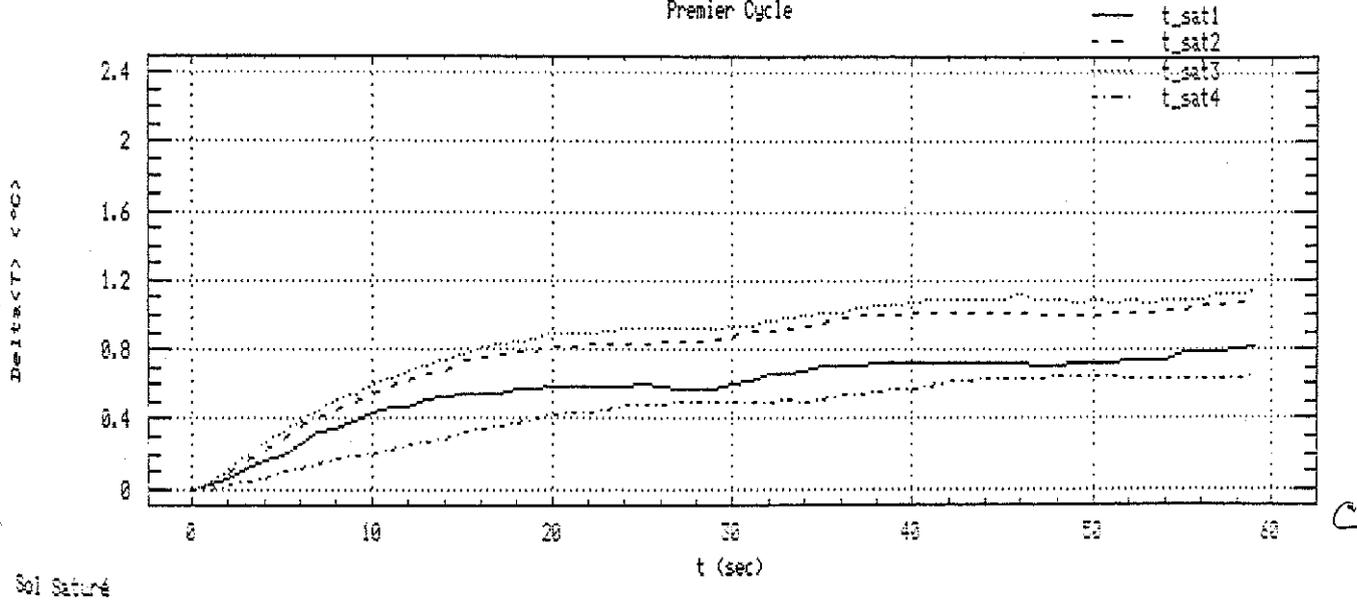


Figure 1

Regression of SATURE.t60 on SATURE.t10

(X 0.01)

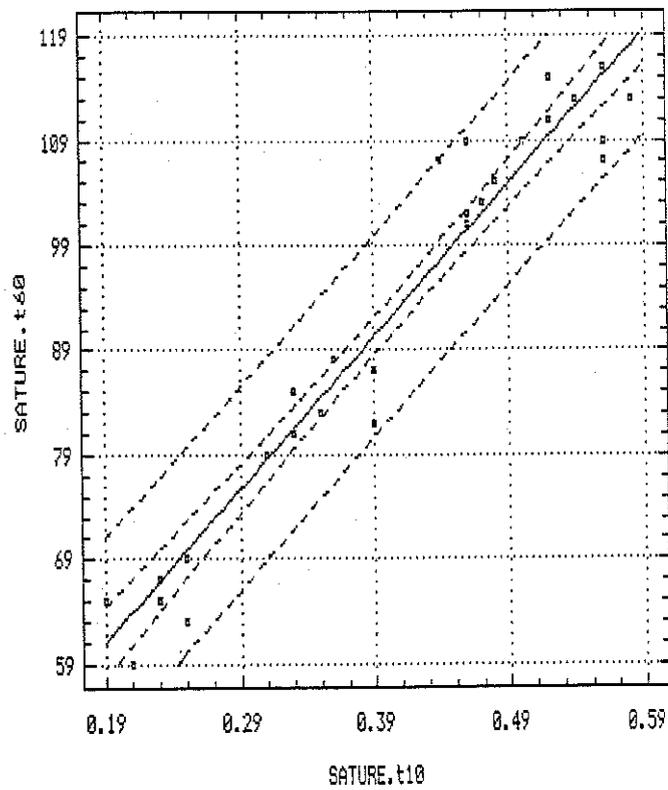
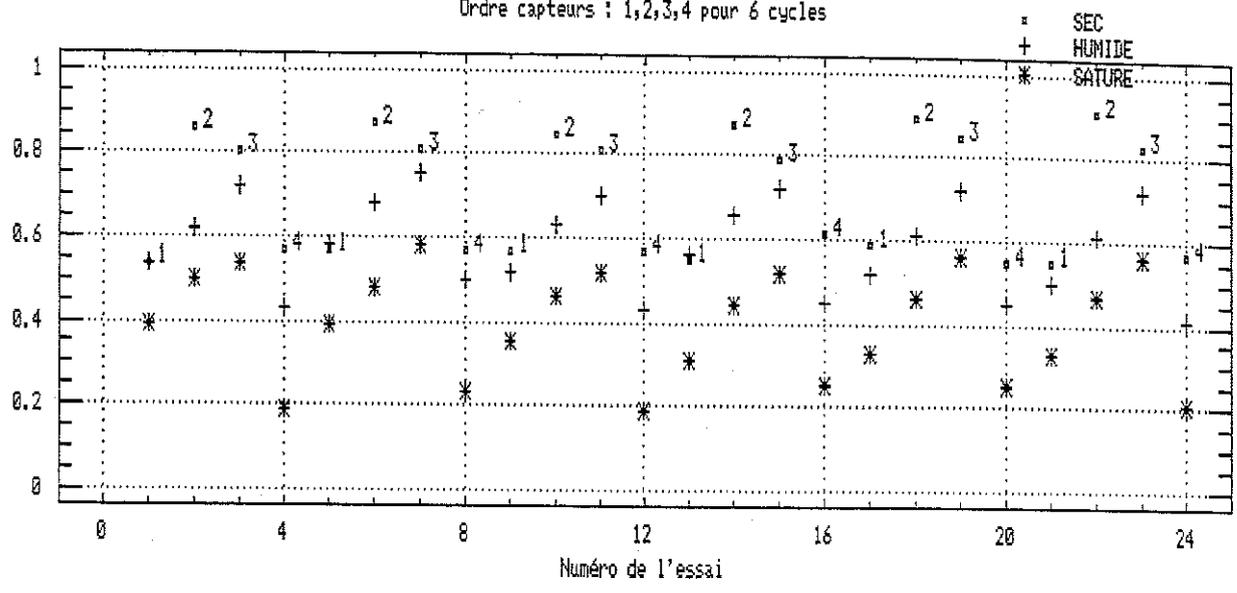


Figure 2

Valeur de la température à 10 s (°C)

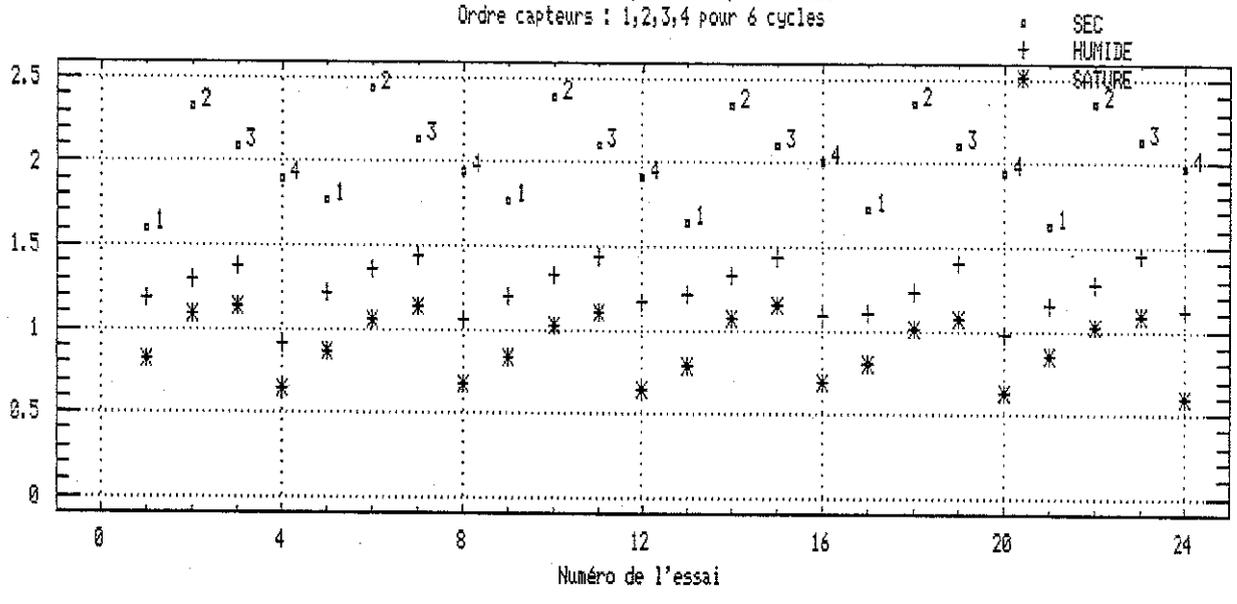
Evolution de la température après 10 sec
 Ordre capteurs : 1,2,3,4 pour 6 cycles



a

Valeur de la température à 60 s (°C)

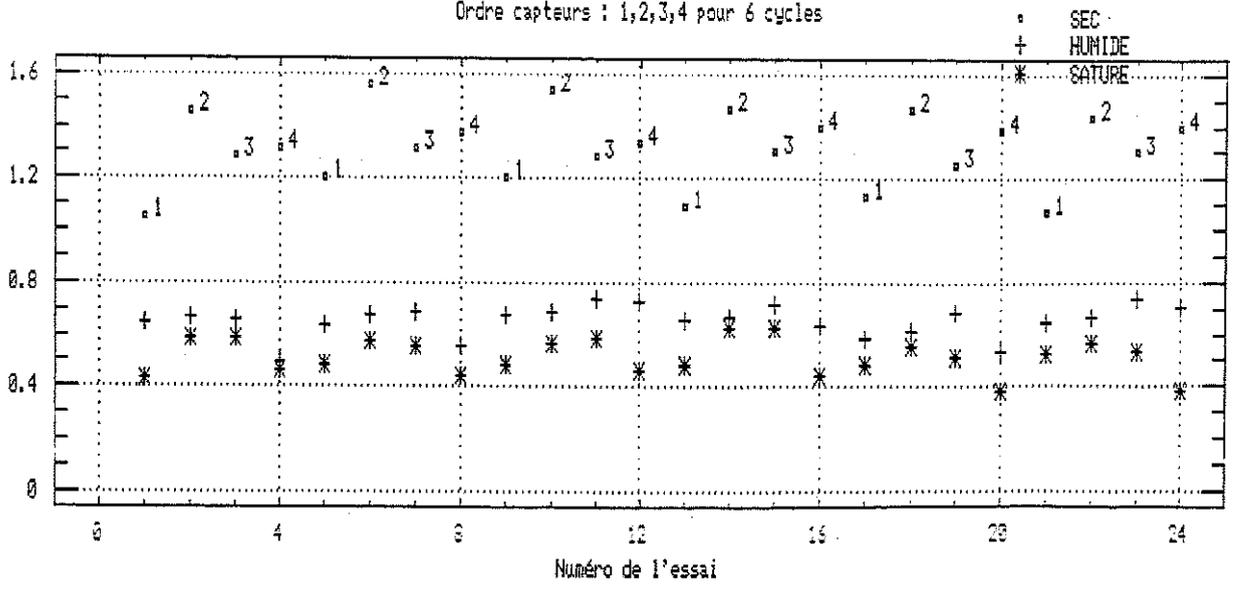
Evolution de la température après 60 sec
 Ordre capteurs : 1,2,3,4 pour 6 cycles



b

Valeur du delta T (°C)

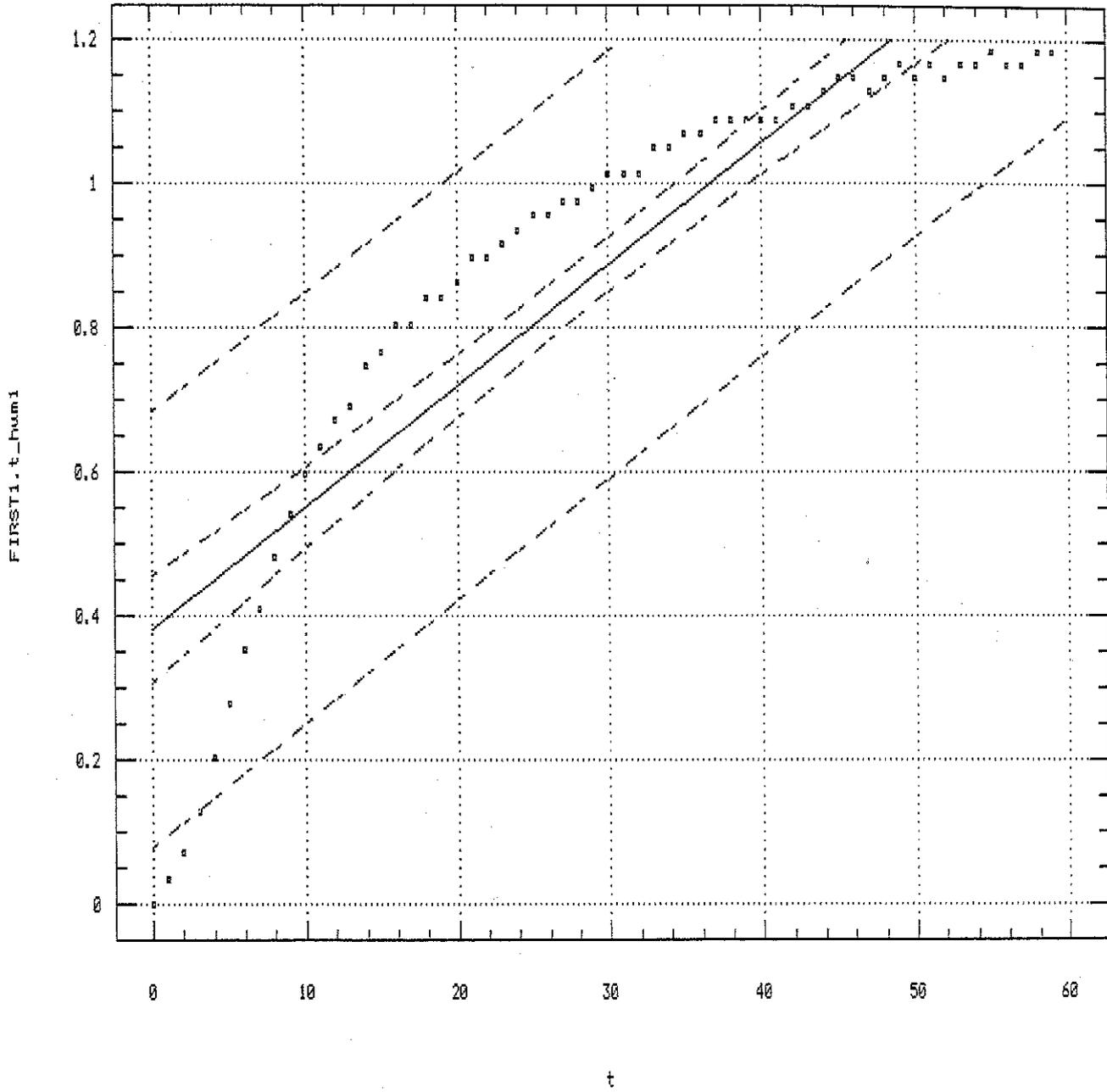
Evolution de la différence t60-t10 sec
 Ordre capteurs : 1,2,3,4 pour 6 cycles



c

Figure 3

Interactive Regression



B0: 0.38236 SE: 0.037342 T: 10.239

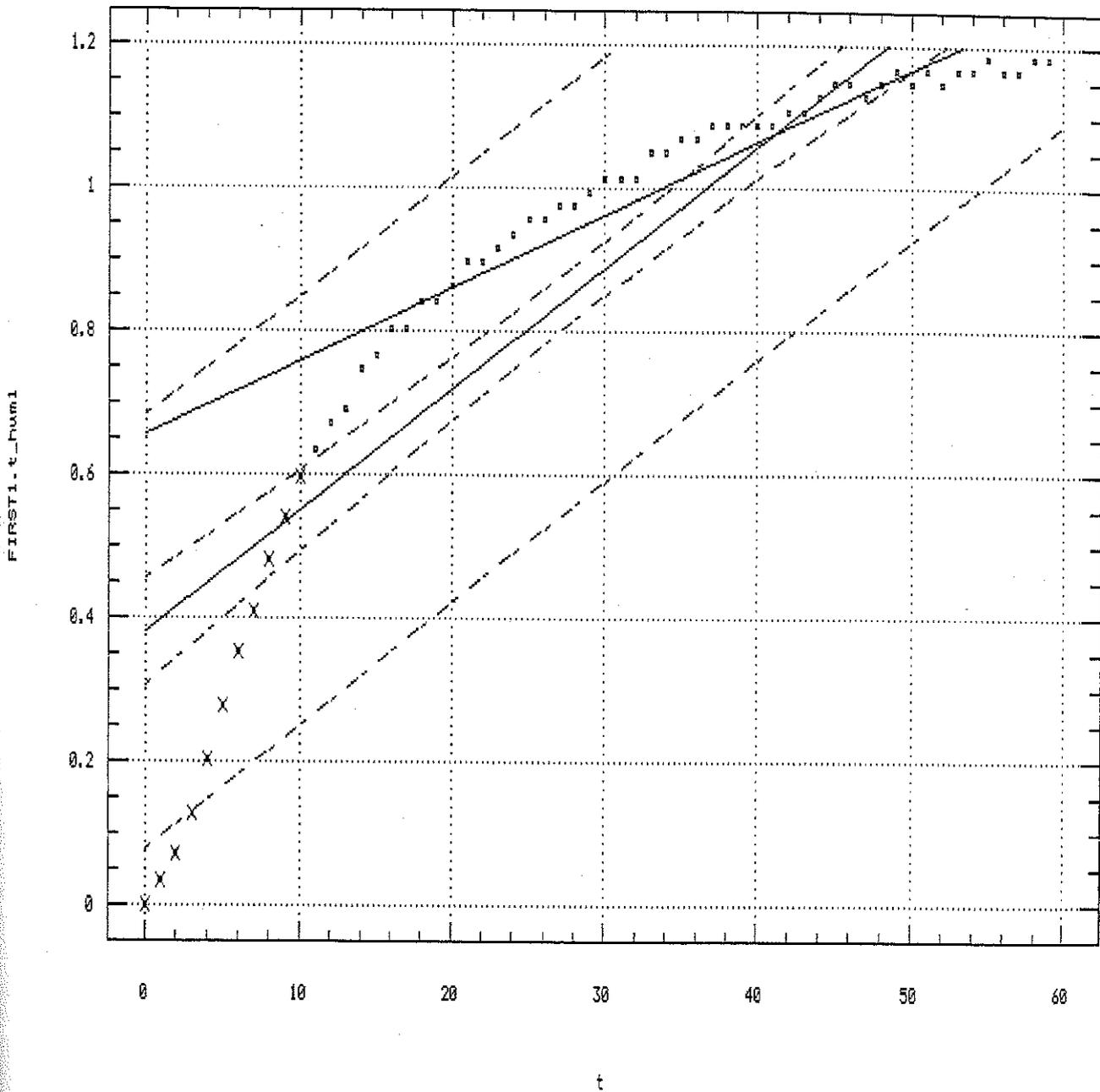
B1: 0.016865 SE: 1.0916E-3 T: 15.449

CORR: 0.89694 MSE: 0.021444 DF: 58

POINTS DELETED:

Figure 4

Interactive Regression



R: 0.45888 SE: 0.018129 T: 36.343

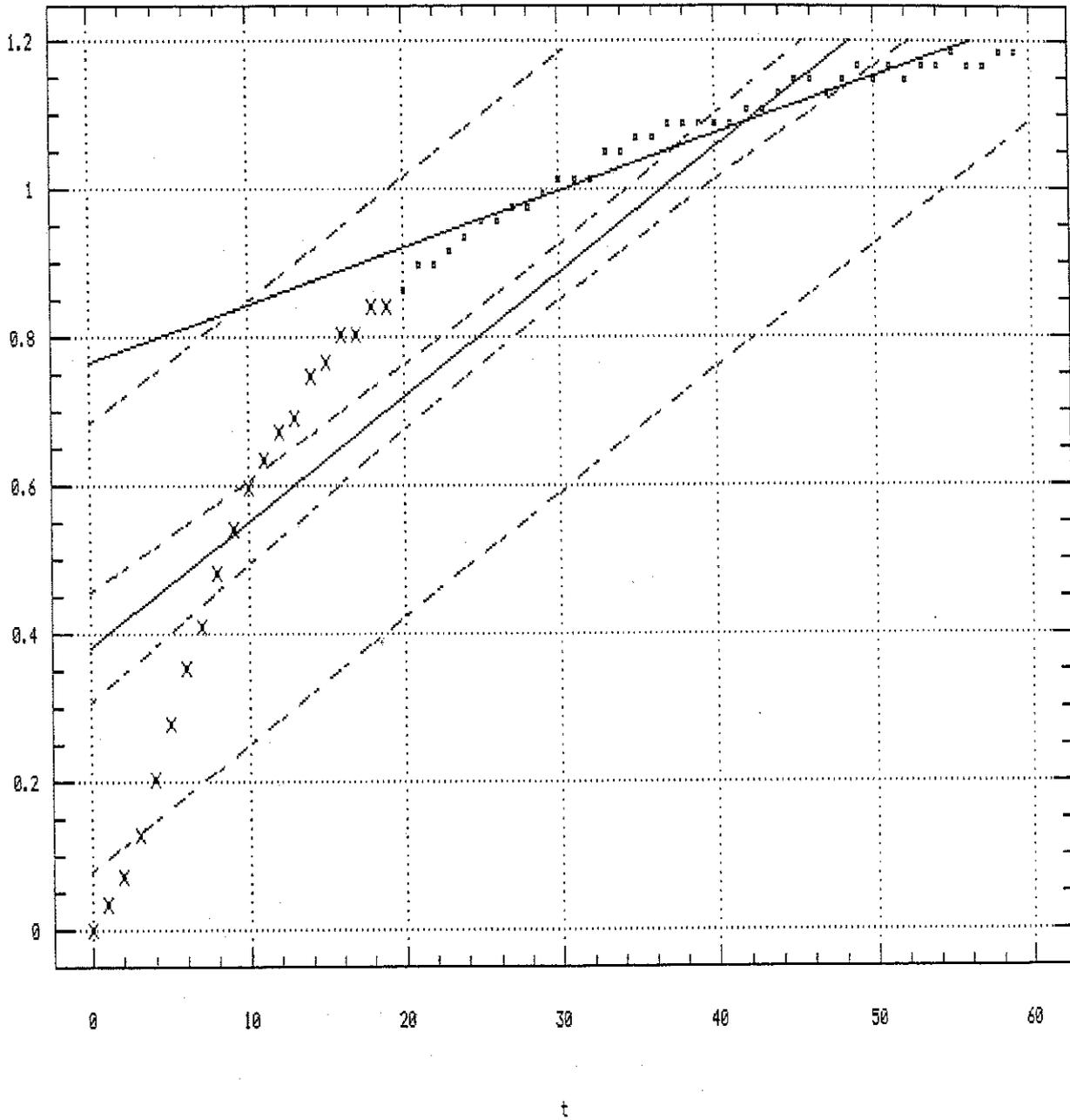
R: 0.010145 SE: 4.8026E-4 T: 21.125

R: 0.95116 MSE: 2.2683E-3 DF: 47

POINTS DELETED: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11

Figure 5

Interactive Regression

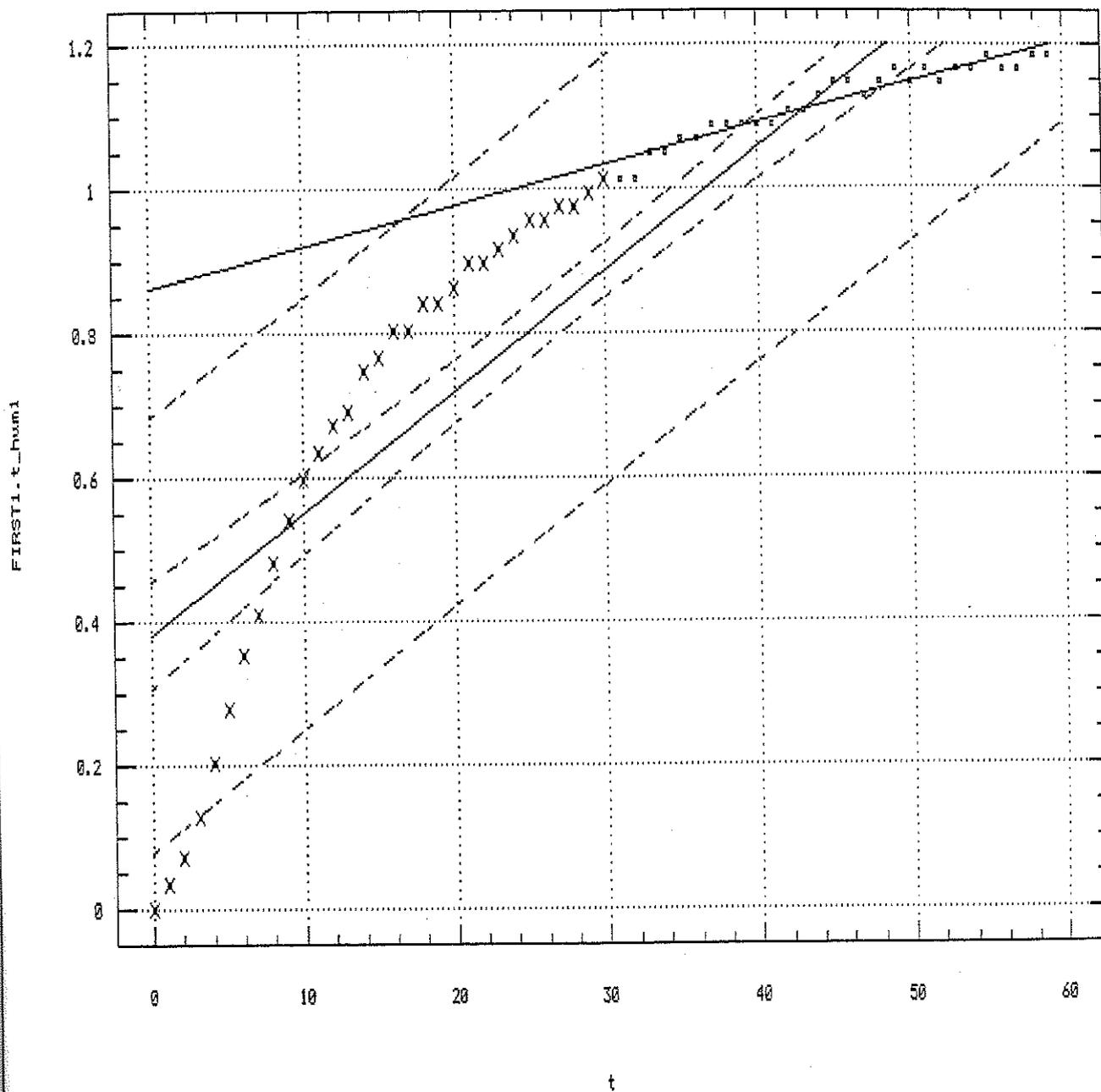


0.76791 SE: 0.013699 T: 56.056
 7.6959E-3 SE: 3.3289E-4 T: 23.119
 0.96624 MSE: 5.9064E-4 DF: 38

POINTS DELETED: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20

Figure 6

Interactive Regression



R: 0.86501 SE: 0.014983 T: 57.733

F: 5.6707E-3 SE: 3.2735E-4 T: 17.323

RFR: 0.95784 MSE: 2.1753E-4 DF: 27

POINTS DELETED: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31

Figure 7

Time Sequence Plot

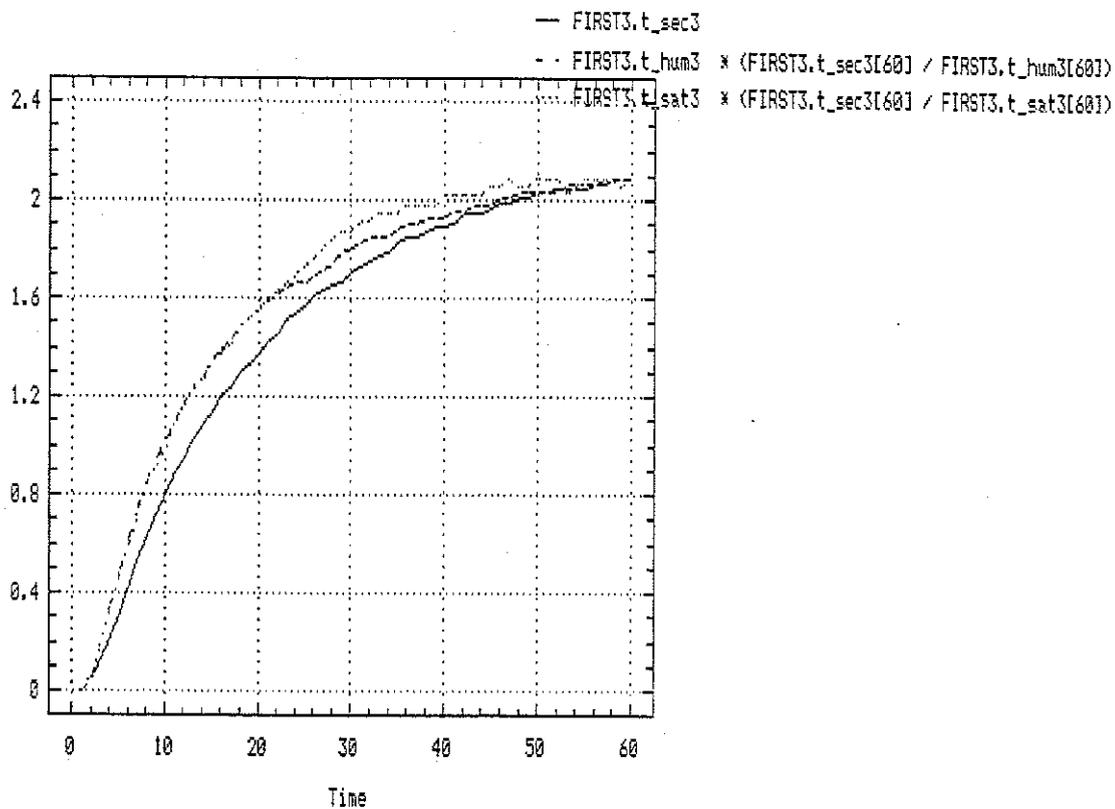


Figure 8

Evolution log T versus t
Premier cycle

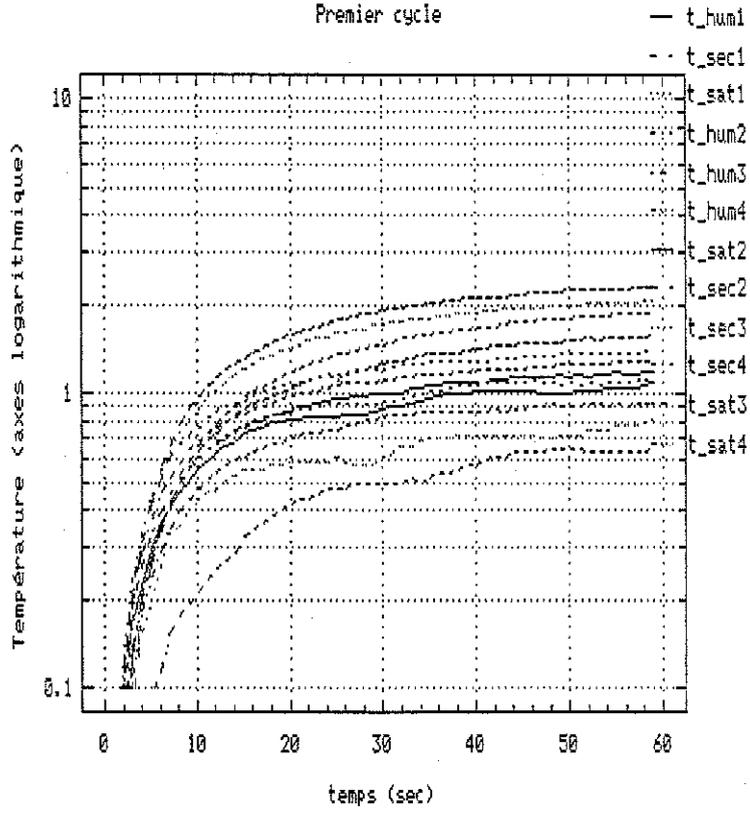


Figure 9

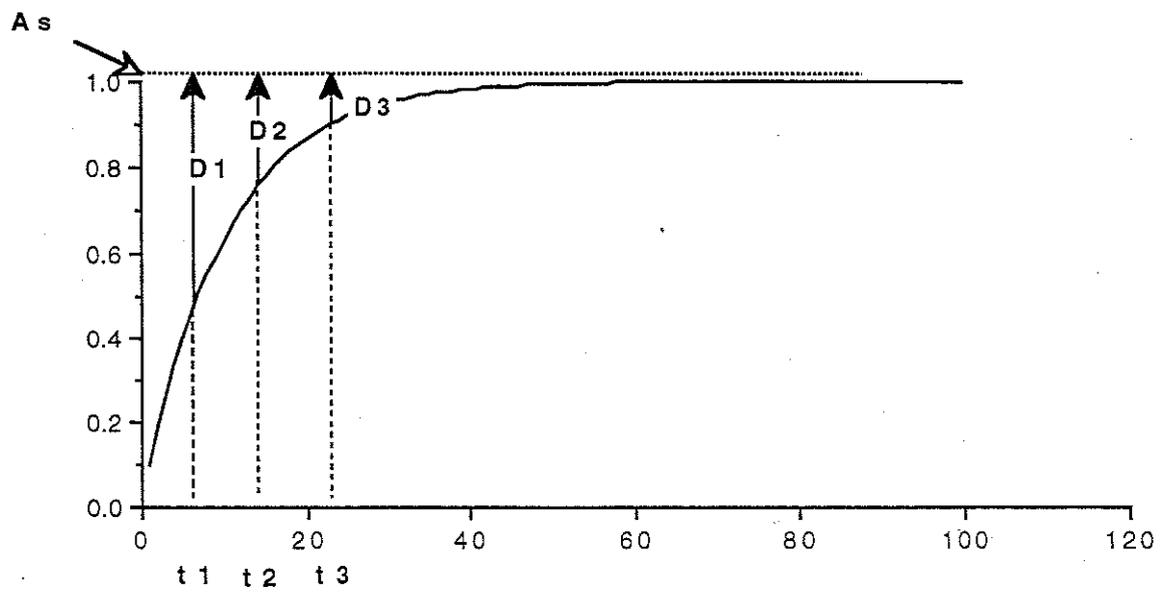
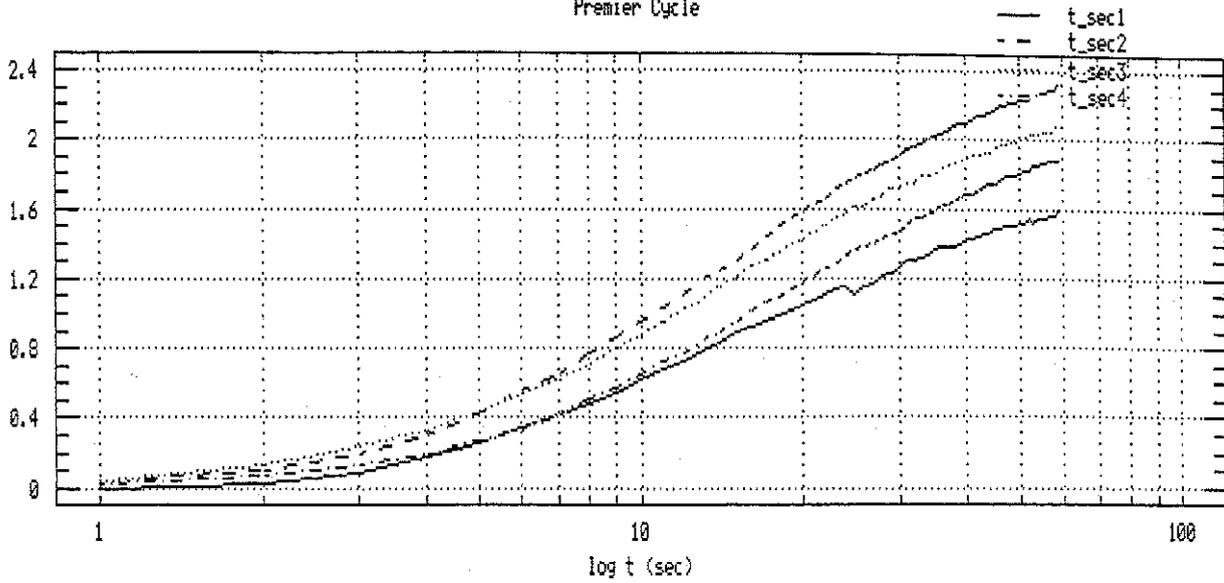


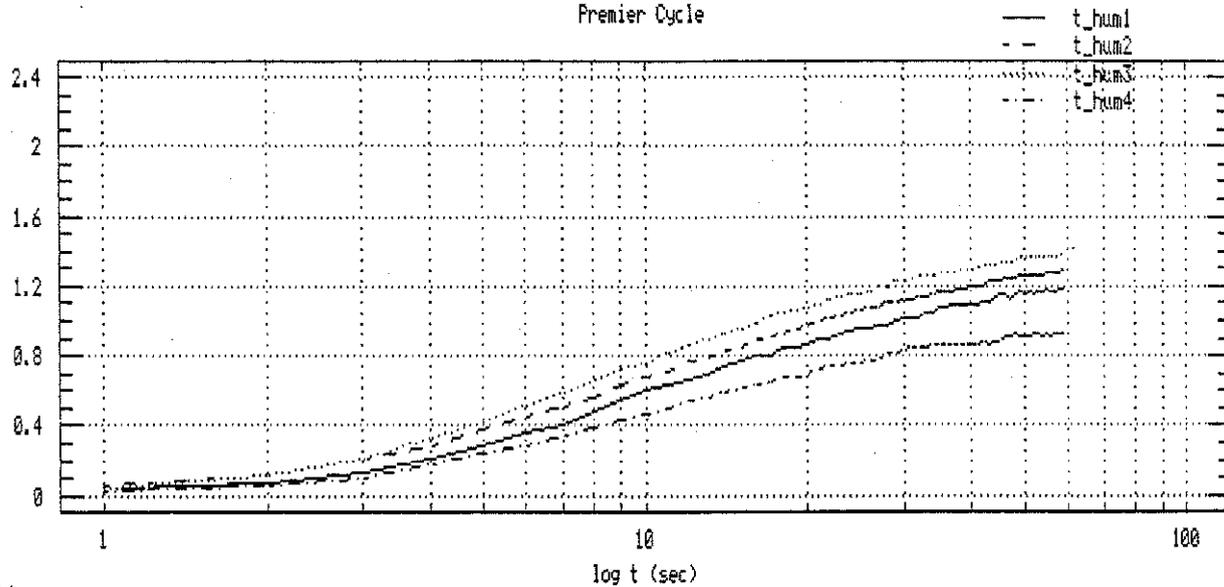
Figure 10

Multiple X-Y Plot
Premier Cycle



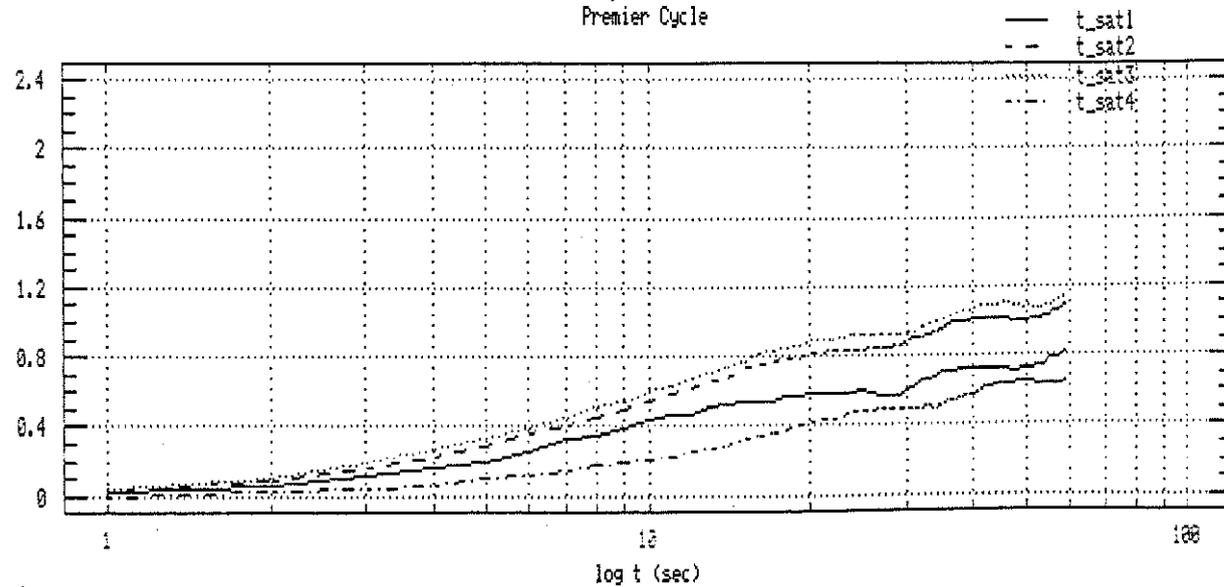
a

Multiple X-Y Plot
Premier Cycle



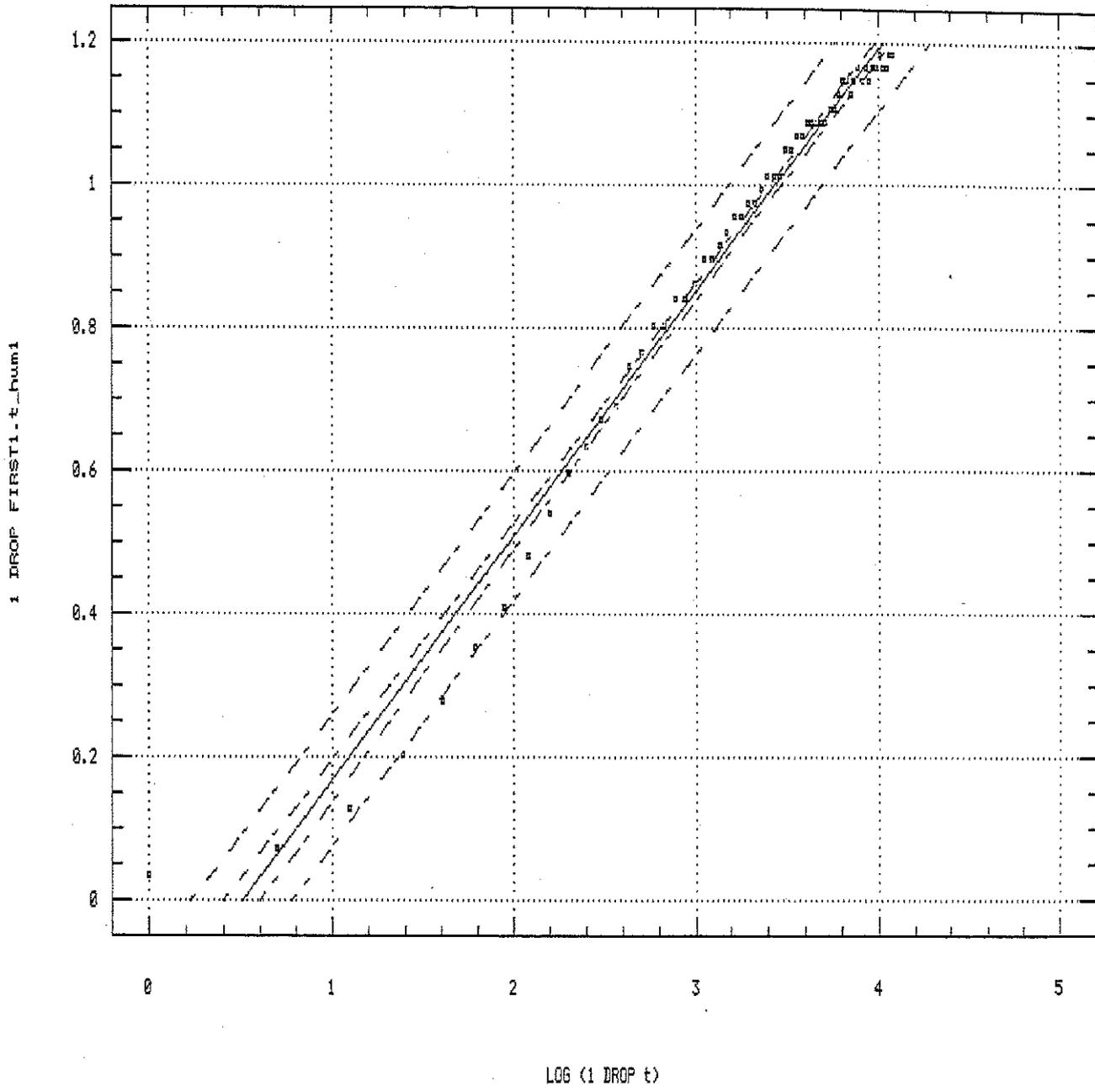
b

Multiple X-Y Plot
Premier Cycle



c

Interactive Regression



Intercept: -0.17248 SE: 0.020578 T: -8.3816

Slope: 0.34123 SE: 6.3269E-3 T: 53.933

R-squared: 0.99034 MSE: 1.8797E-3 DF: 57

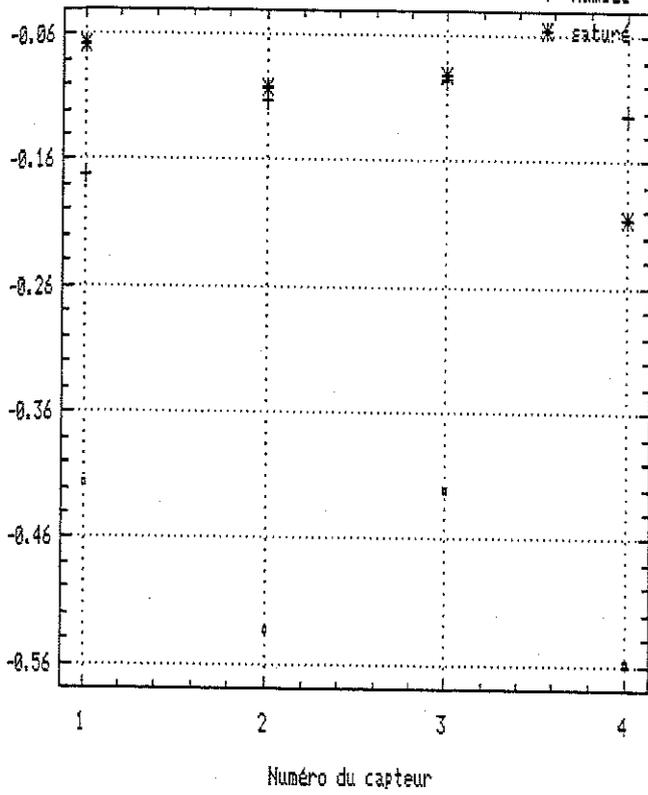
POINTS DELETED:

Figure 12

Evolution de l'intercept (log)

Premier cycle

▪ sec
+ humide
* saturé

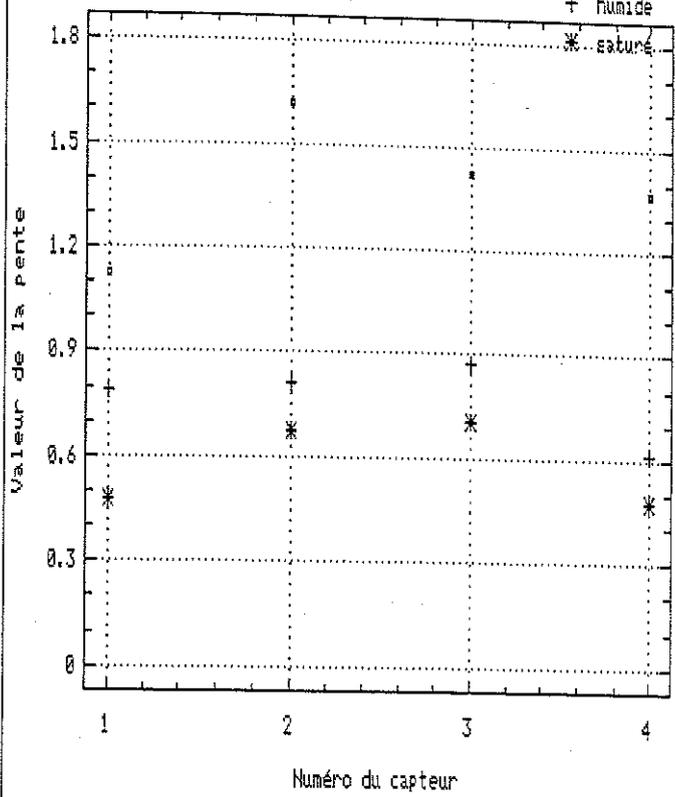


a

Evolution de la pente (log)

Premier cycle

▪ sec
+ humide
* saturé

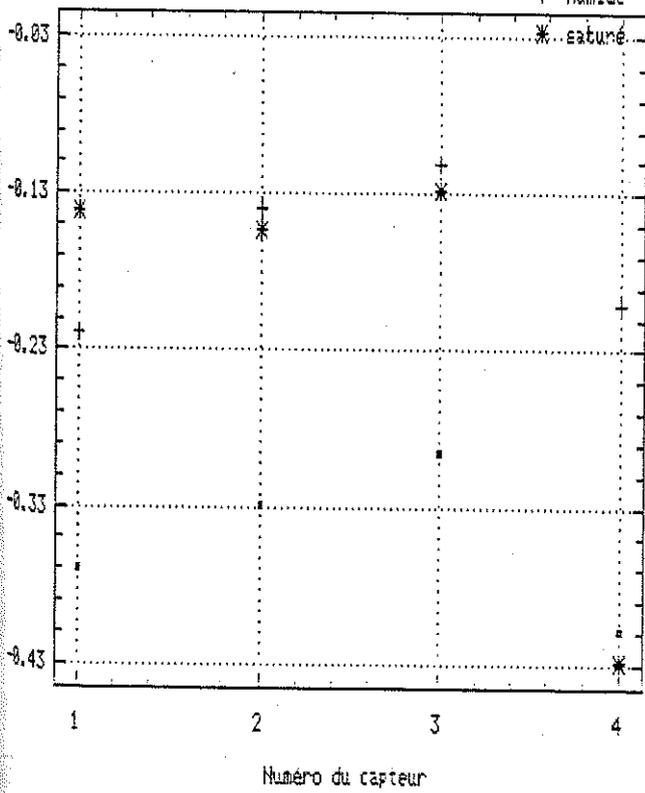


b

Evolution du rapport interc./pente (log)

Premier cycle

▪ sec
+ humide
* saturé

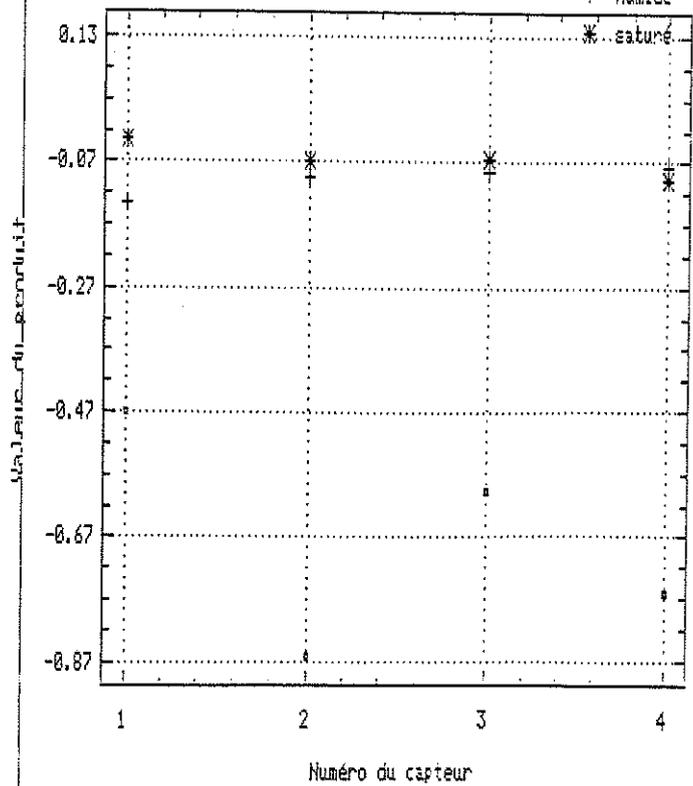


c

Evolution du produit Interc.*Pente (log)

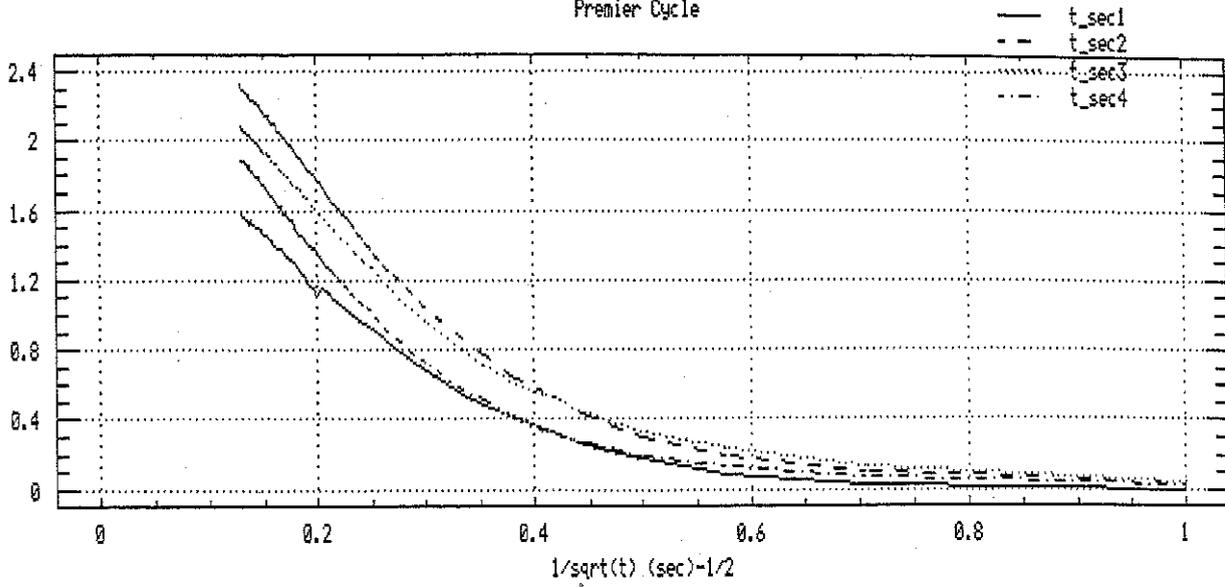
Premier cycle

▪ sec
+ humide
* saturé



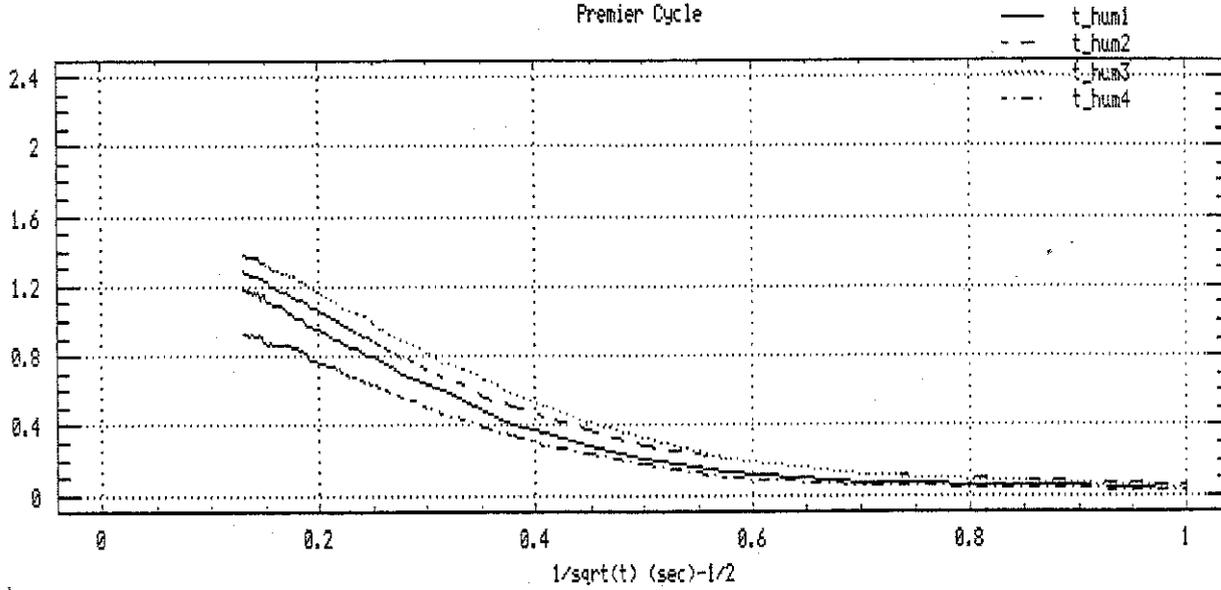
d

Multiple X-Y Plot
Premier Cycle



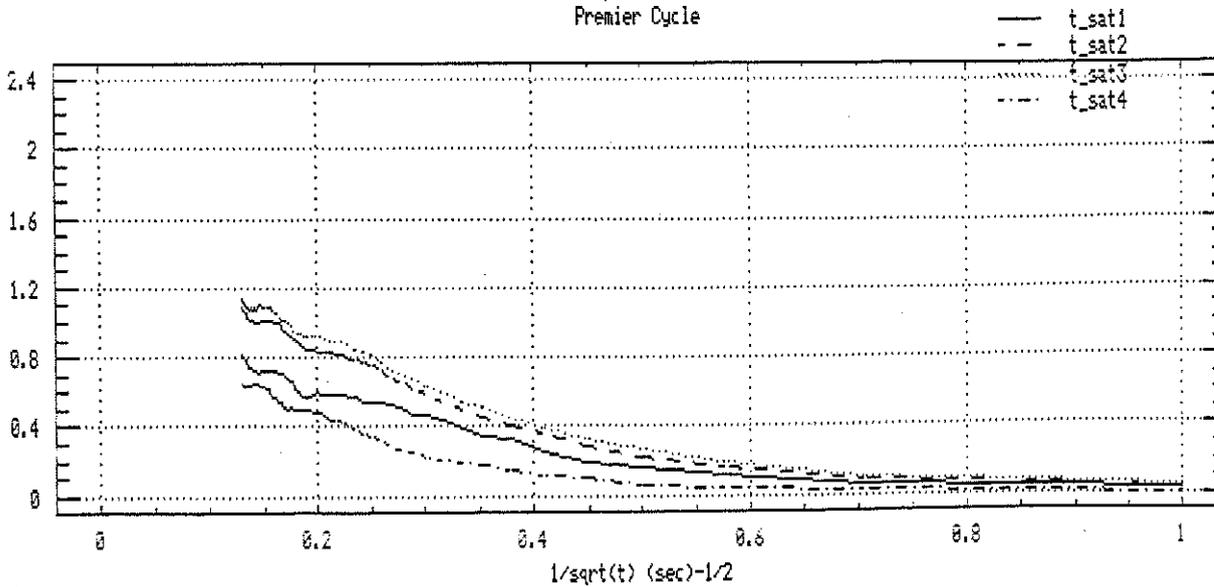
a

Multiple X-Y Plot
Premier Cycle



b

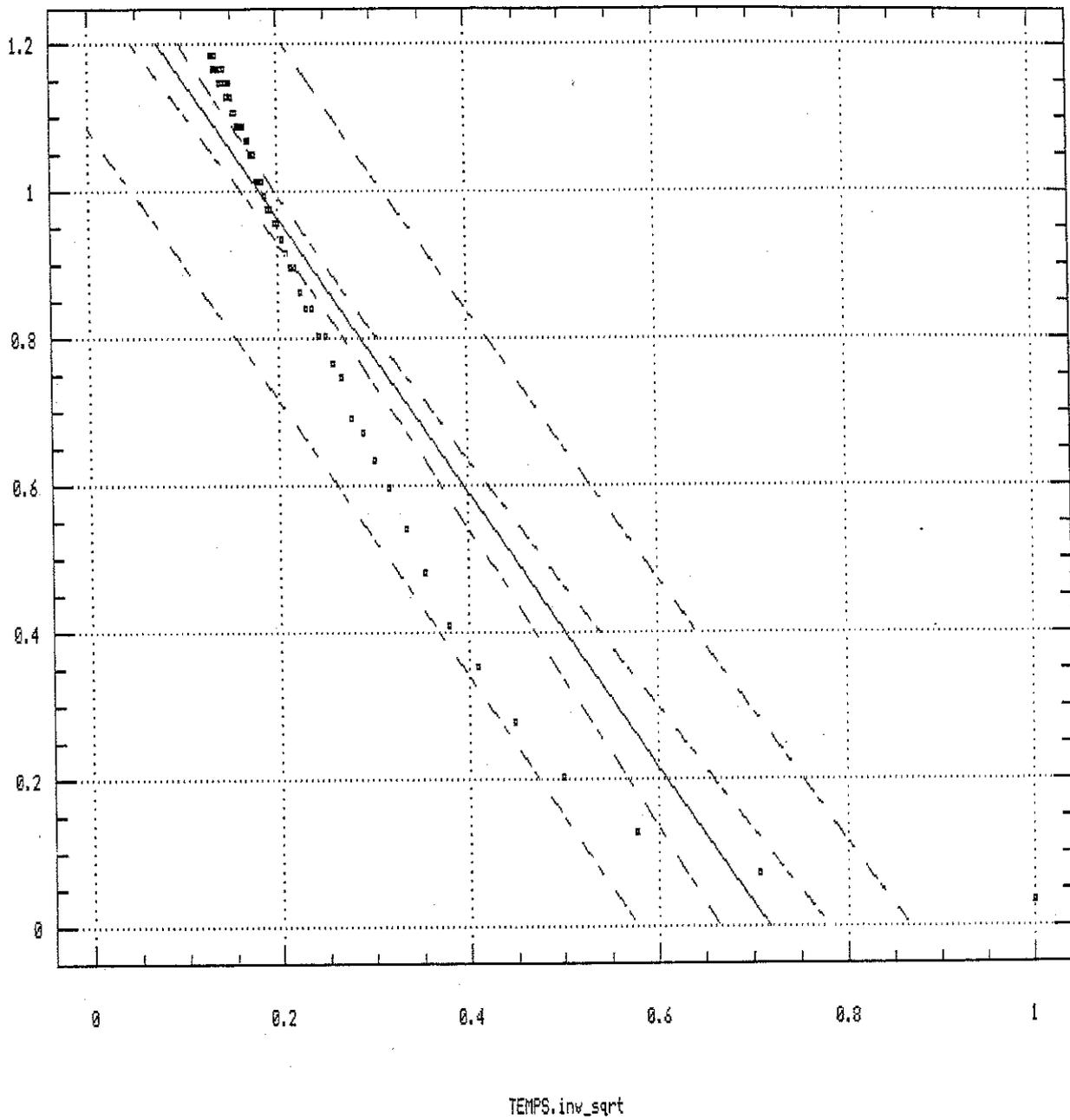
Multiple X-Y Plot
Premier Cycle



c

Figure 14

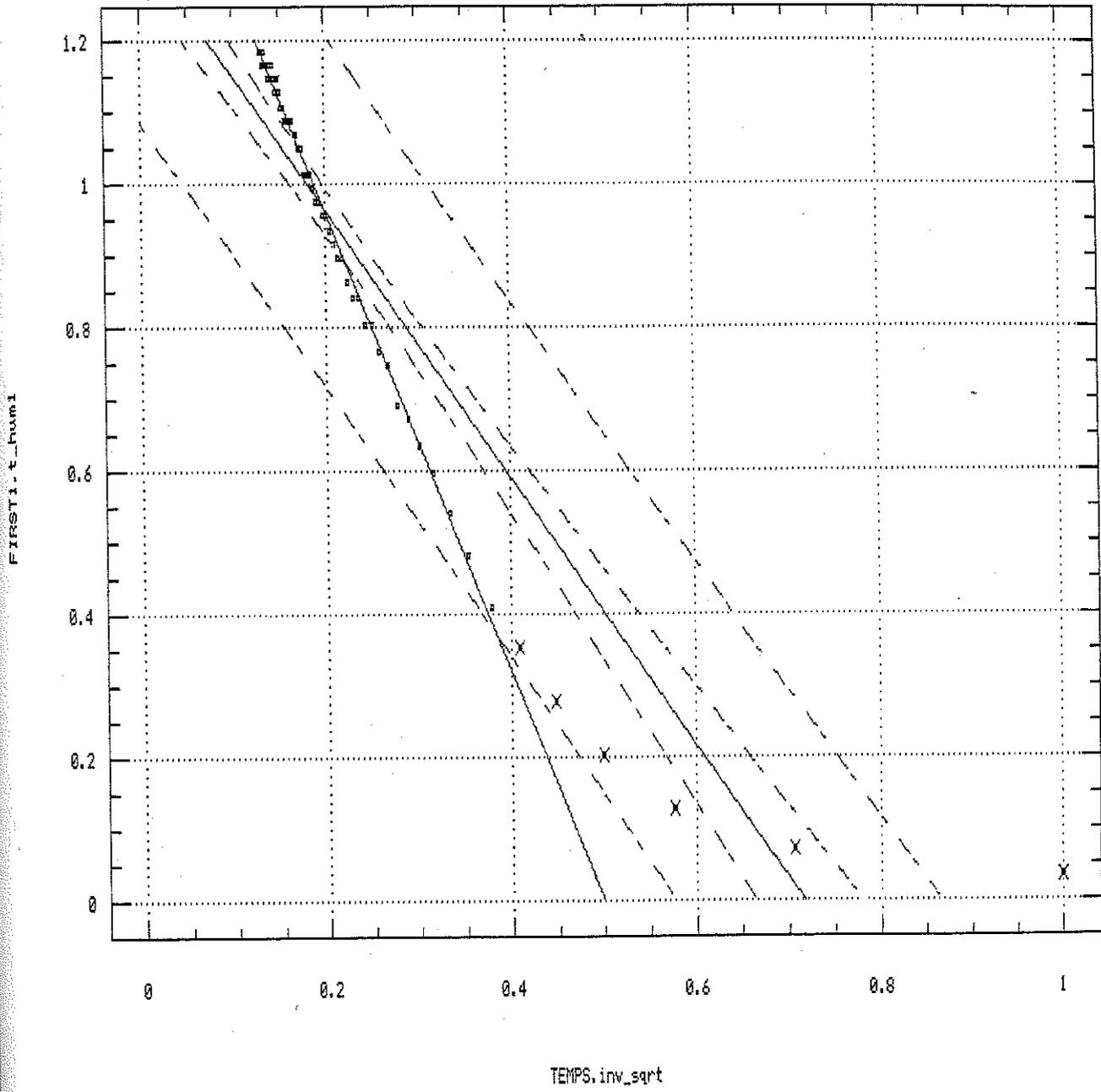
Interactive Regression



1.3365 SE: 0.029495 T: 45.312
-1.8658 SE: 0.10491 T: -17.784
-8.92049 MSE: 0.014934 DF: 57
POINTS DELETED:

Figure 15

Interactive Regression



1: 1.6015 SE: 5.6884E-3 T: 281.53

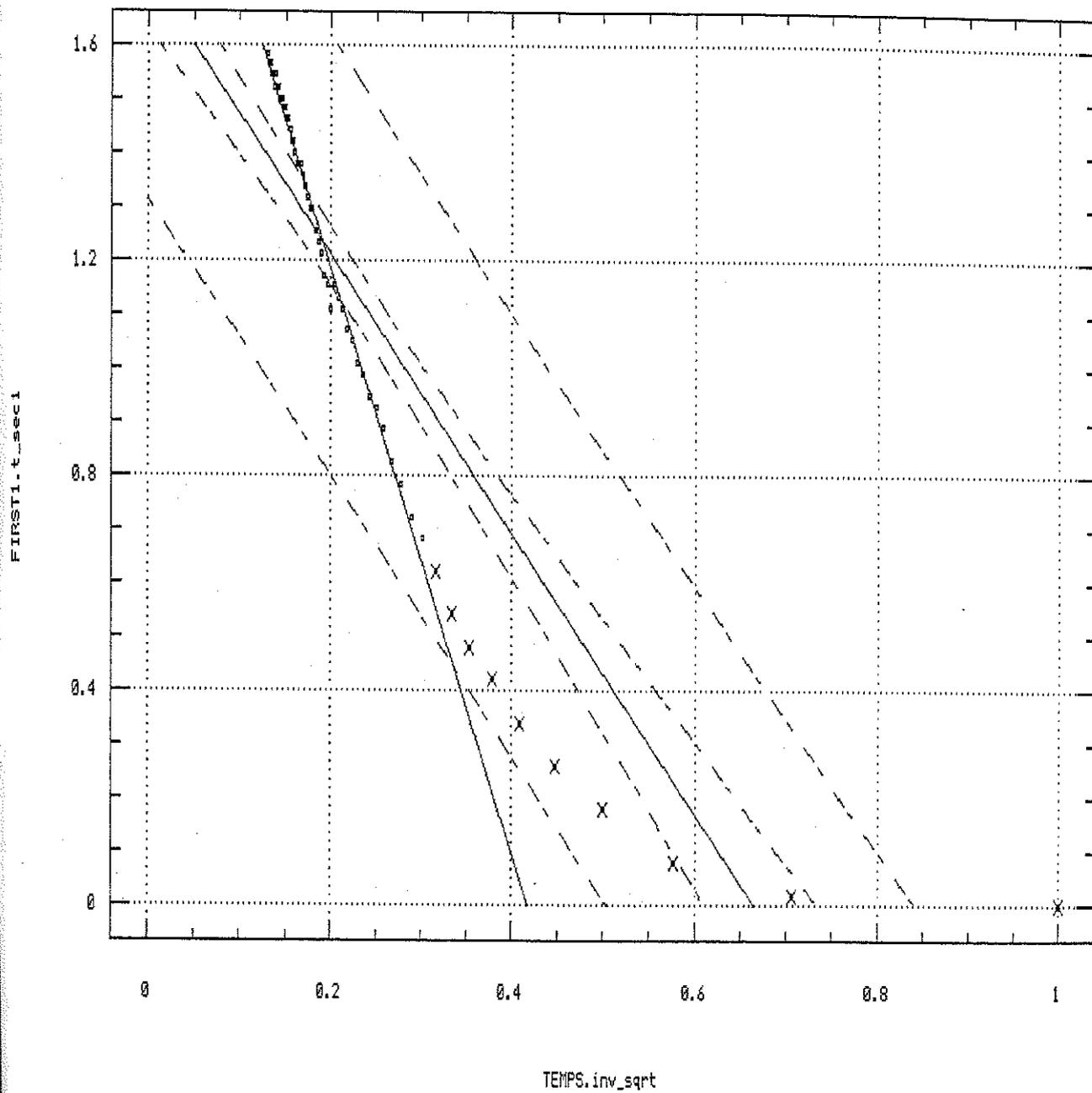
2: -3.2111 SE: 0.027836 T: -115.35

3: -0.99809 MSE: 1.5574E-4 DF: 51

POINTS DELETED: 2 3 4 5 6 7

Figure 16

Interactive Regression



2.2768 SE: 0.01304 T: 174.6

-5.4547 SE: 0.069314 T: -78.696

-0.99623 MSE: 4.8512E-4 DF: 47

POINTS DELETED: 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11

Figure 17

Box and Whisker Plots
for Factor Level Data

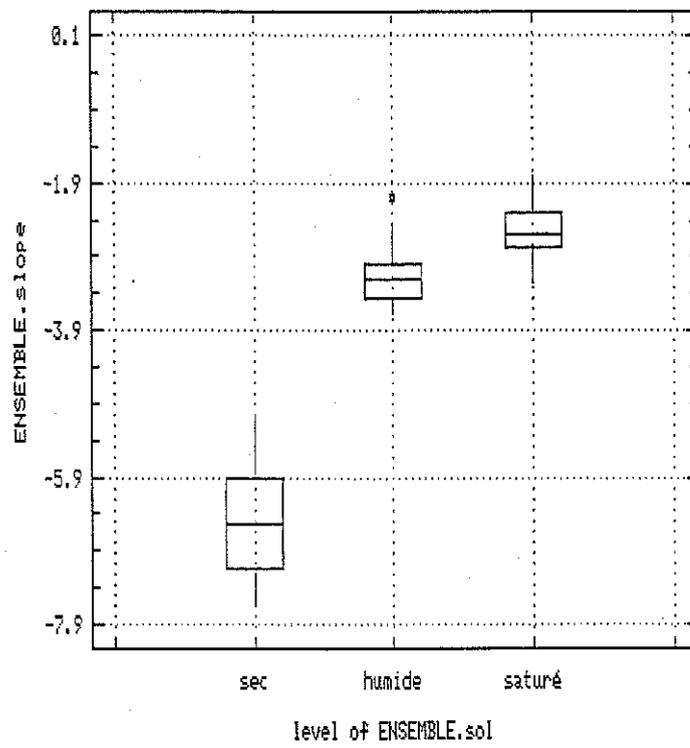
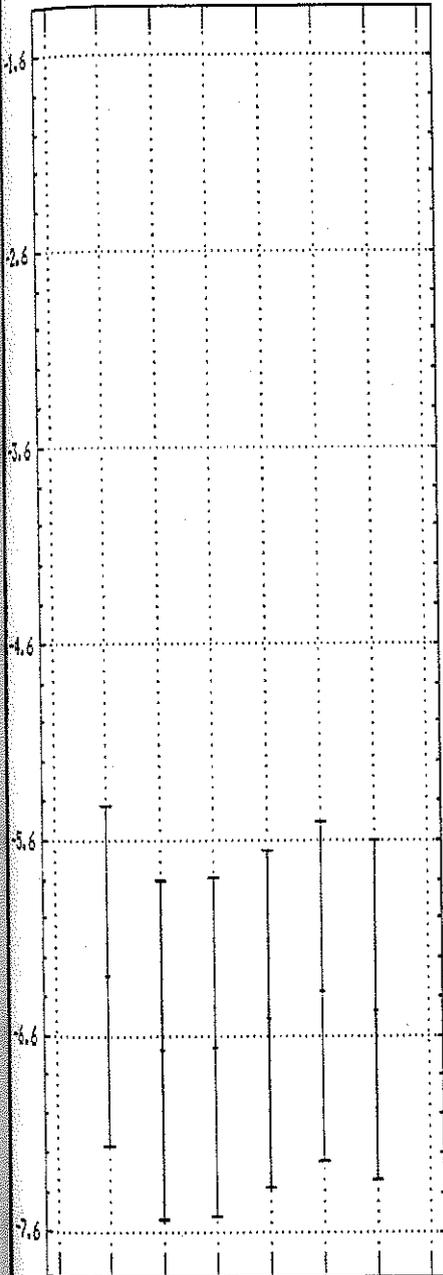


Figure 18

95 Percent Confidence

Intervals for Factor Means



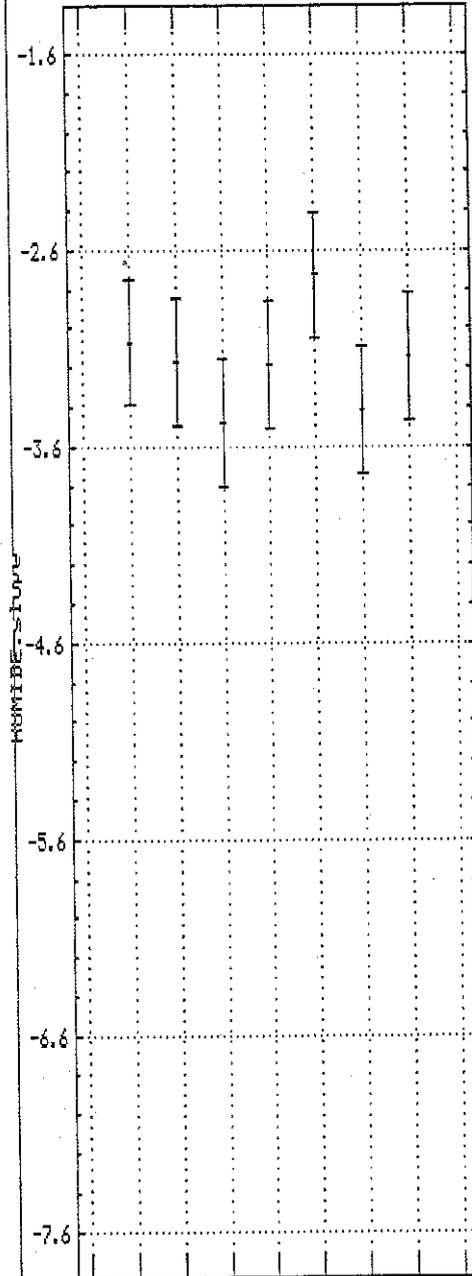
1 2 3 4 5 6

level of SEC.cycle

a

95 Percent Confidence

Intervals for Factor Means



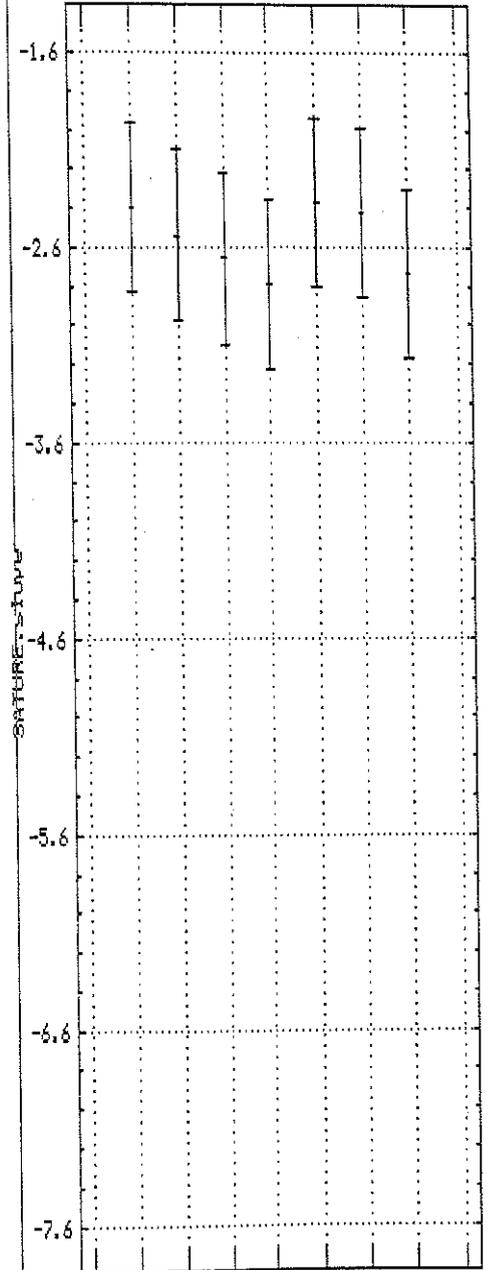
1 2 3 4 5 6 7

level of HUMIDE.cycle

b

95 Percent Confidence

Intervals for Factor Means



1 2 3 4 5 6 7

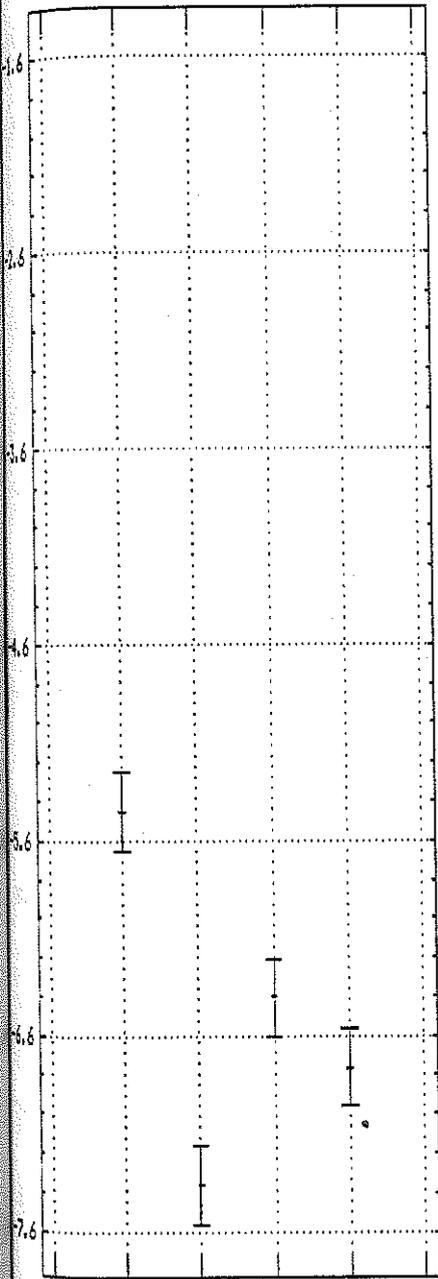
level of SATURE.cycle

c

Figure 19

95 Percent Confidence

Intervals for Factor Means

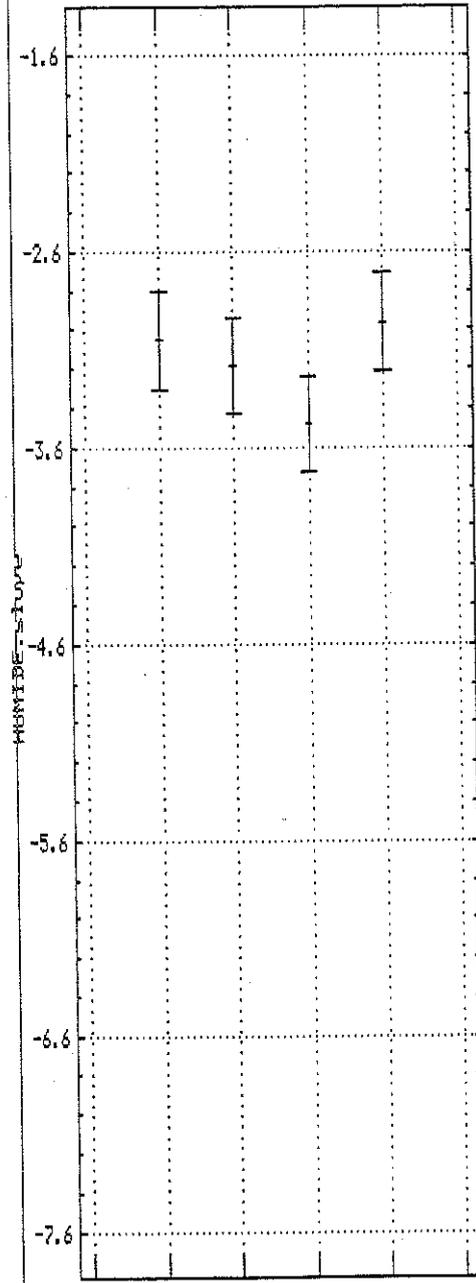


level of SEC.captur

a

95 Percent Confidence

Intervals for Factor Means

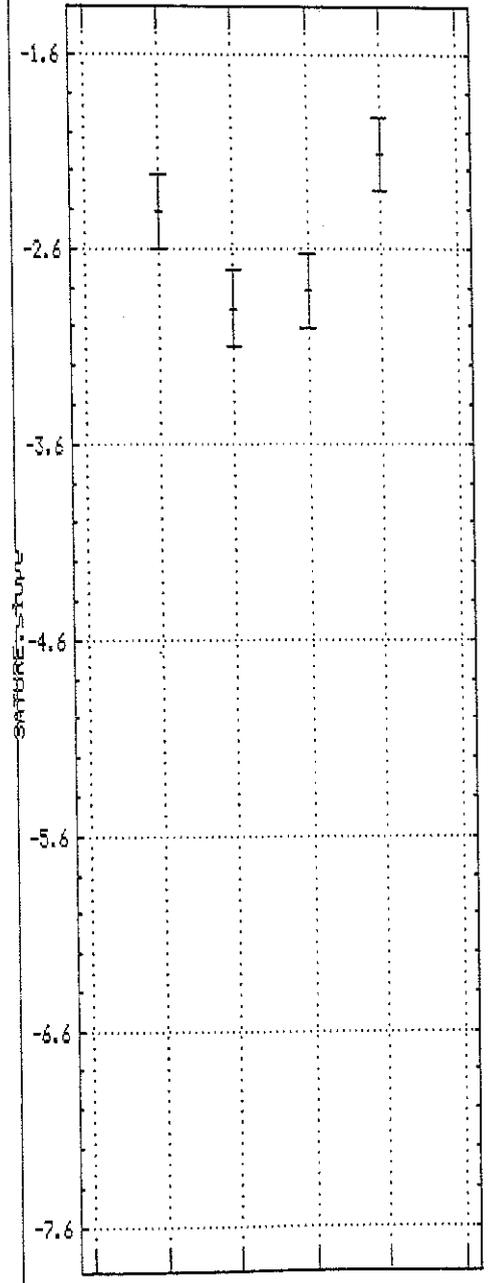


level of HUMIDE.captur

b

95 Percent Confidence

Intervals for Factor Means



level of SATURE.captur

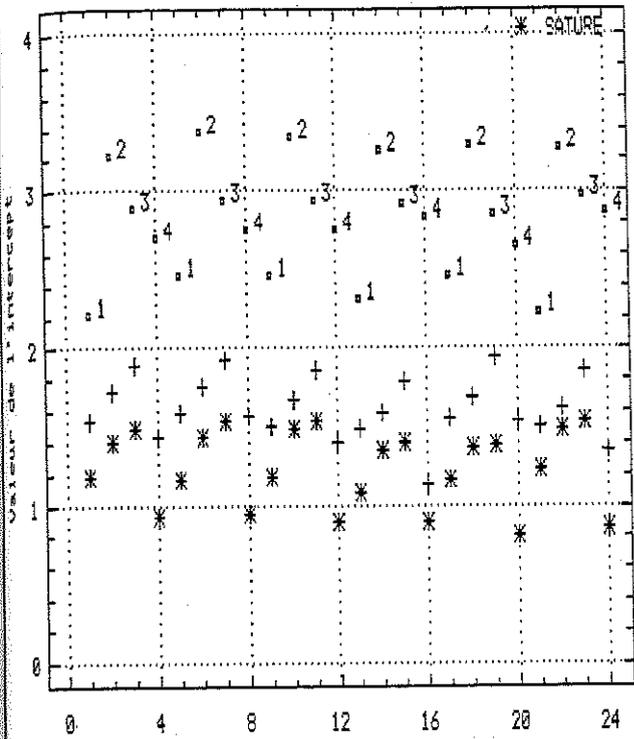
c

Figure 20

Evolution de l'intercept

Ordre capteurs : 1,2,3,4 pour 6 cycles = SEC

+ HUMIDE



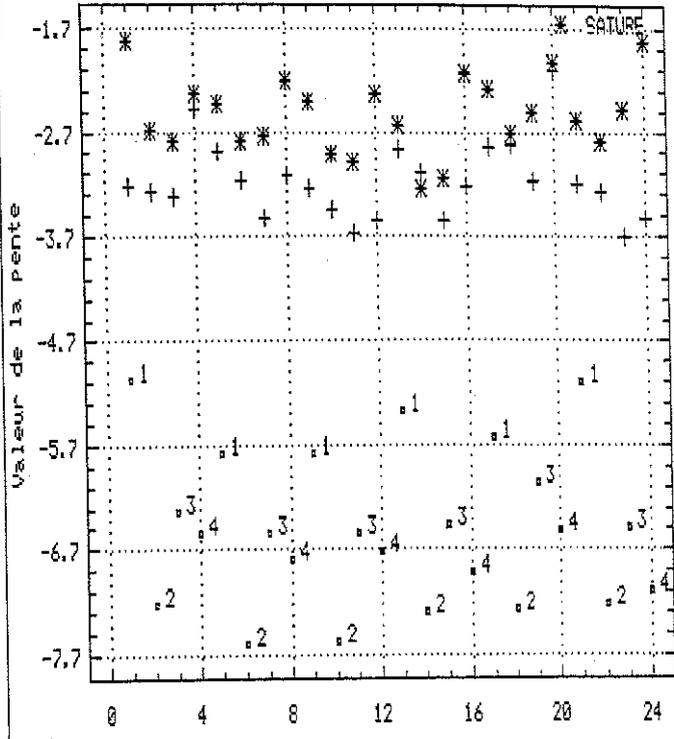
Numéro de l'essai

a

Evolution de la pente

Ordre capteurs : 1,2,3,4 pour 6 cycles = SEC

+ HUMIDE



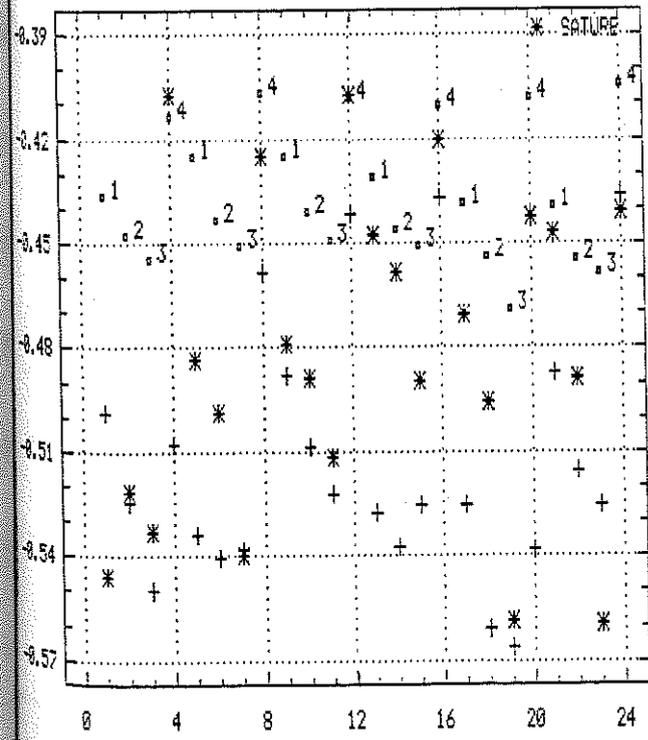
Numéro de l'essai

b

Evolution du rapport intercept/pente

Ordre capteurs : 1,2,3,4 pour 6 cycles = SEC

+ HUMIDE



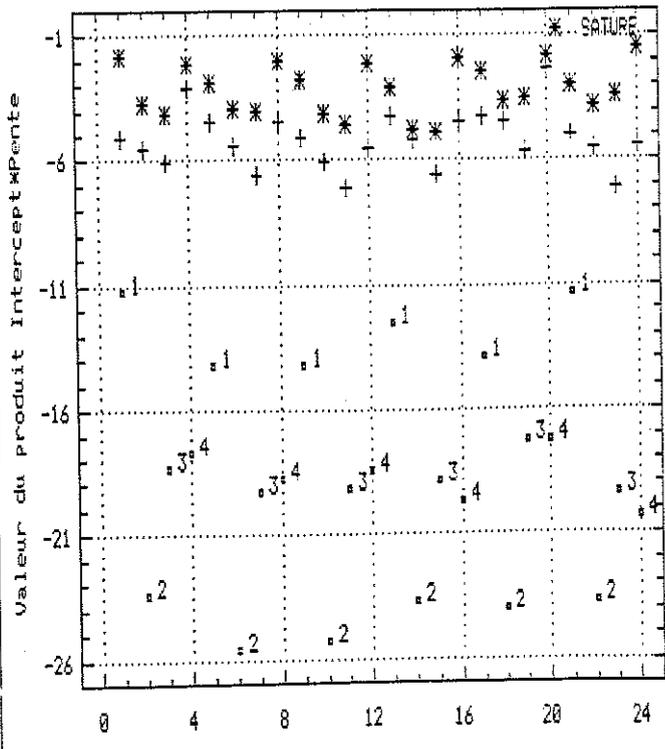
Numéro de l'essai

c

Evolution du produit Intercept*Pente

Ordre capteurs : 1,2,3,4 pour 6 cycles = SEC

+ HUMIDE



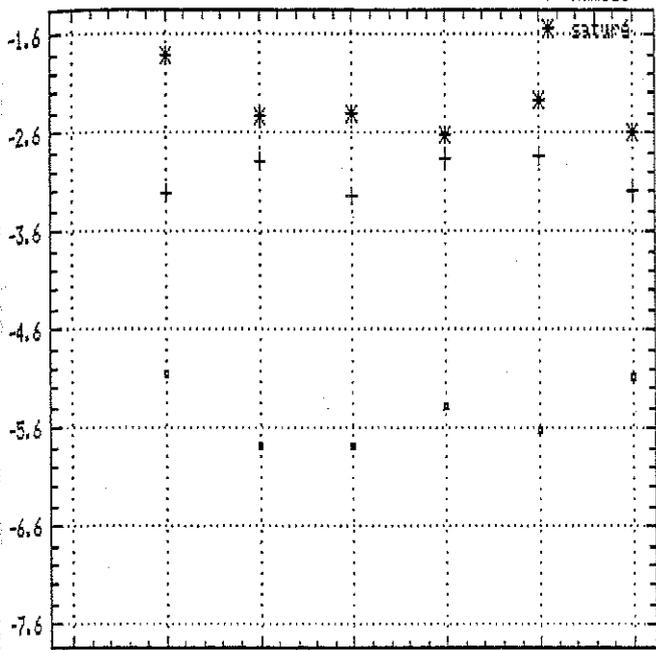
Numéro de l'essai

d

Capteur 1 : Pente T / inv(sqrt t)

6 cycles

▪ sec
+ humide



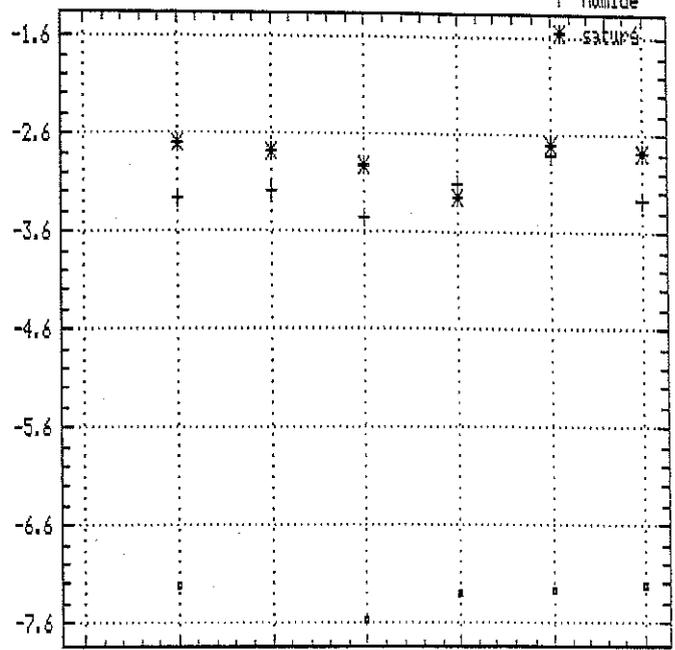
Numéro du cycle

a

Capteur 2 : Pente T / inv(sqrt t)

6 cycles

▪ sec
+ humide



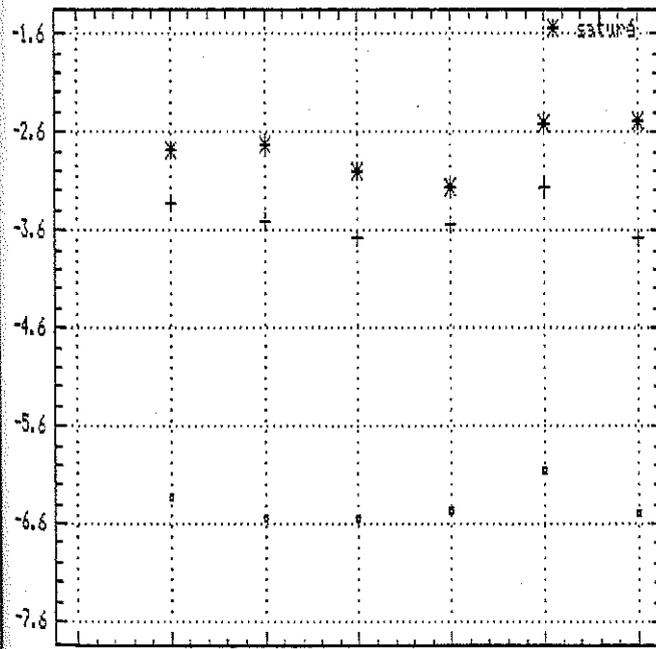
Numéro du cycle

b

Capteur 3 : Pente T / inv(sqrt t)

6 cycles

▪ sec
+ humide



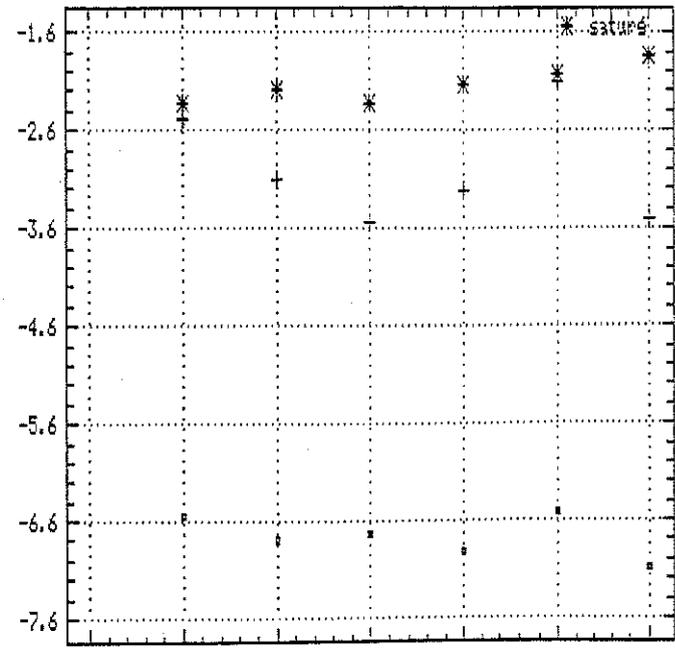
Numéro du cycle

c

Capteur 4 : Pente T / inv(sqrt t)

6 cycles

▪ sec
+ humide



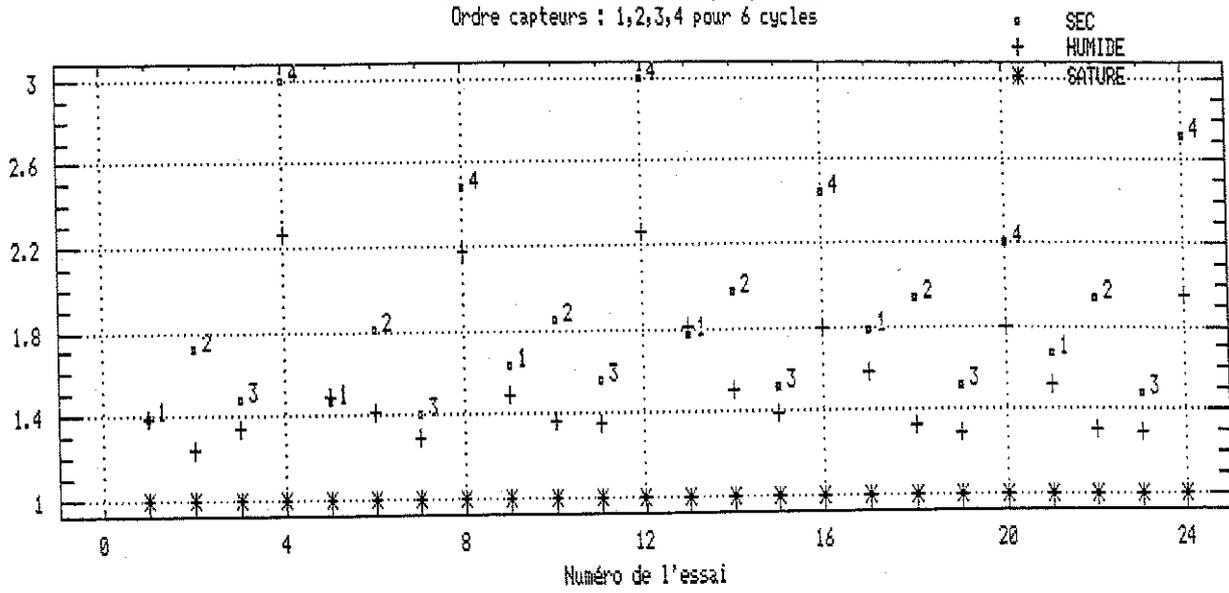
Numéro du cycle

d

Figure 22

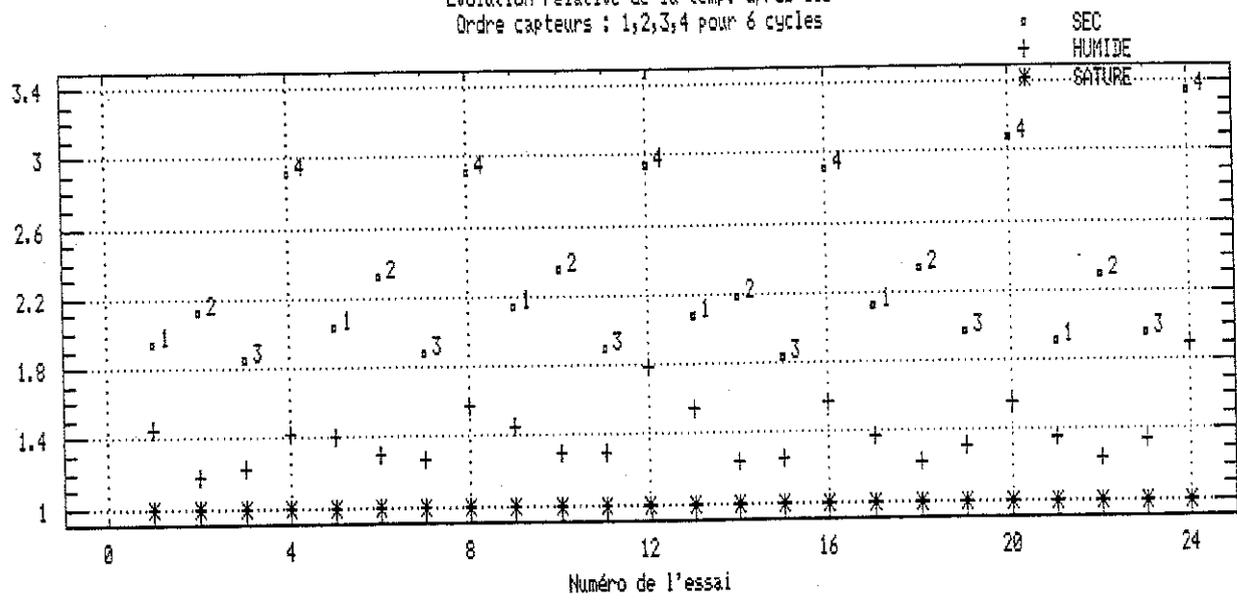
Evolution relative de la temp. après 10s
Ordre capteurs : 1,2,3,4 pour 6 cycles

T10 - T10 mature



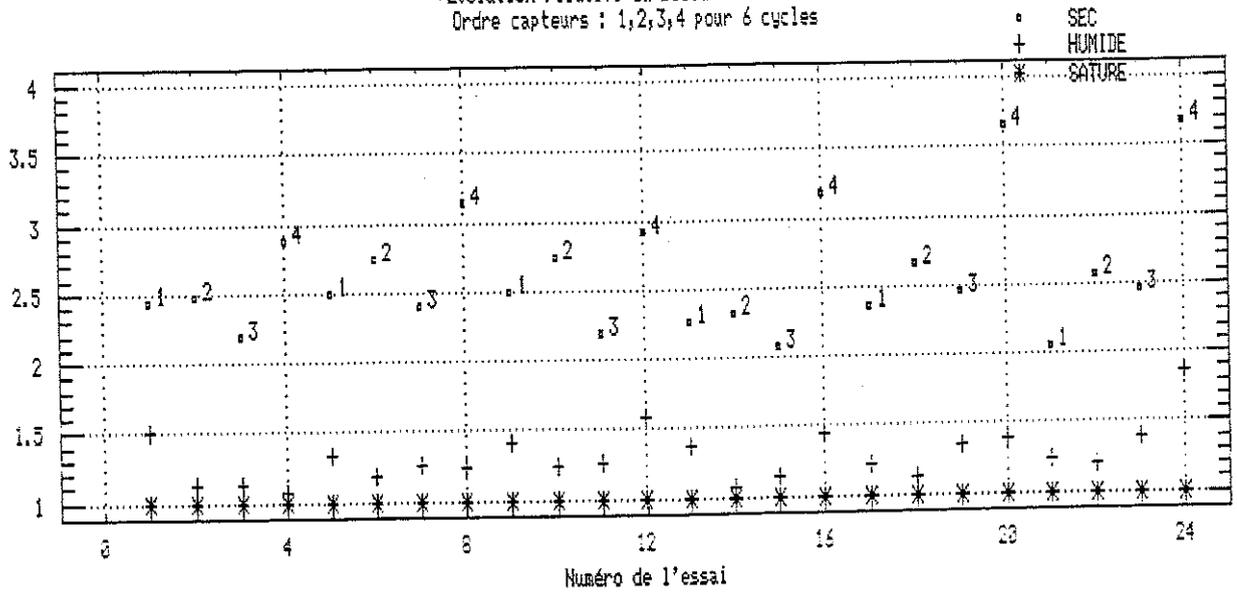
Evolution relative de la temp. après 60s
Ordre capteurs : 1,2,3,4 pour 6 cycles

T60 - T60 mature



Evolution relative du Delta T 60 - 10 s
Ordre capteurs : 1,2,3,4 pour 6 cycles

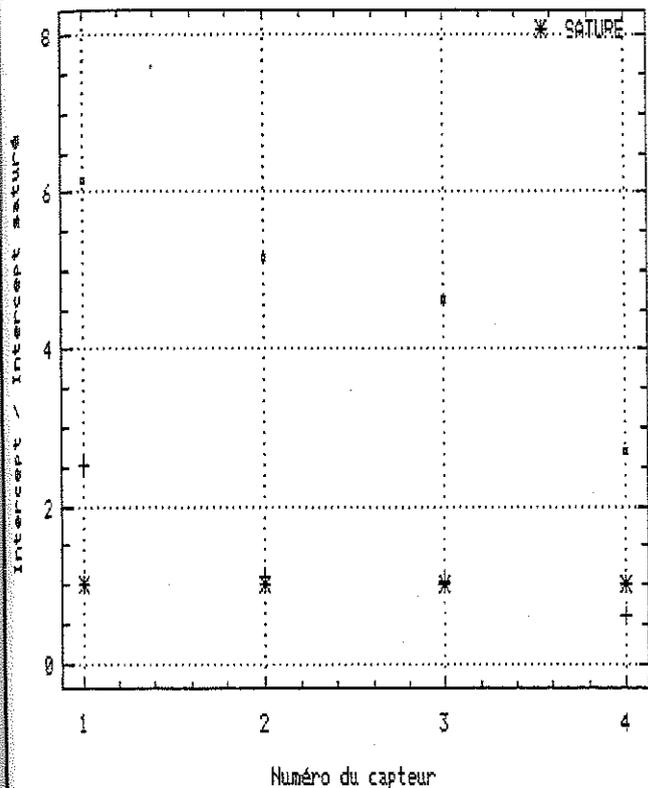
Delta T 50 - Delta T 10 mature



Evolution relative de l'intercept LOG

Premier cycles

▪ SEC
+ HUMIDE
* SATURE

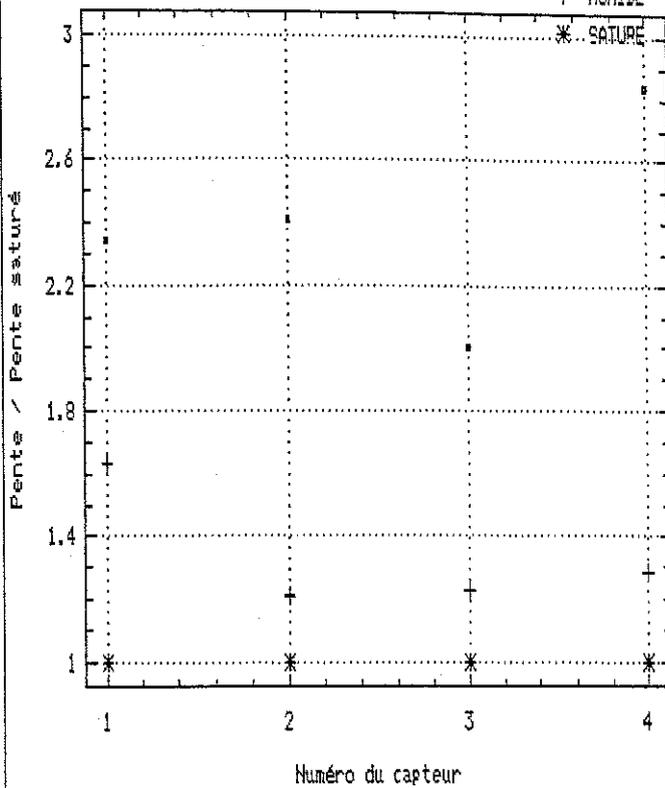


a

Evolution relative de la pente LOG

Premier cycle

▪ SEC
+ HUMIDE
* SATURE

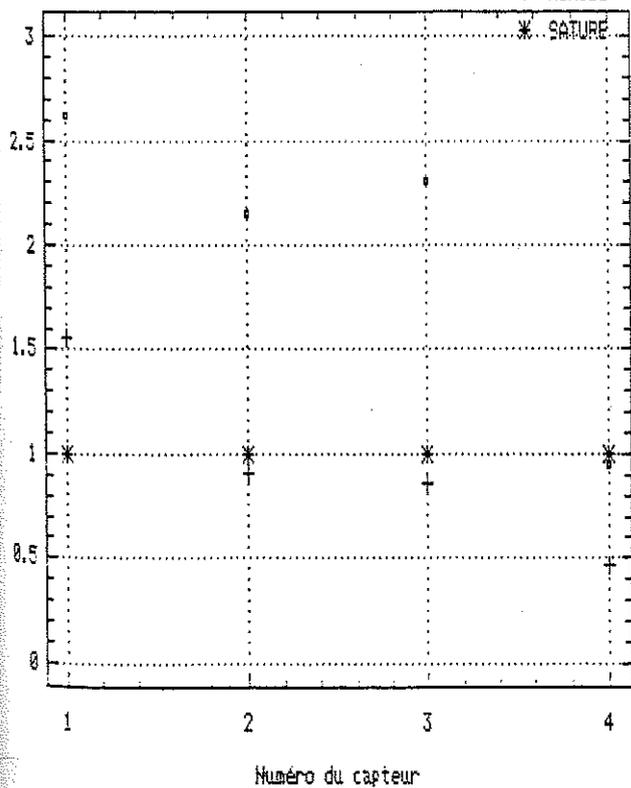


b

Evolution relative du rapport i/p LOG

Premier cycle

▪ SEC
+ HUMIDE
* SATURE

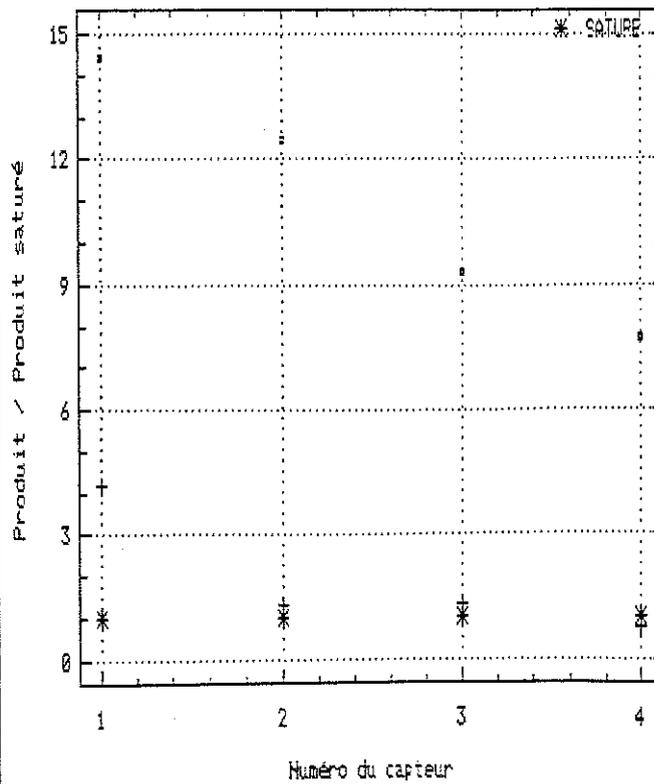


c

Evolution relative du produit i x p

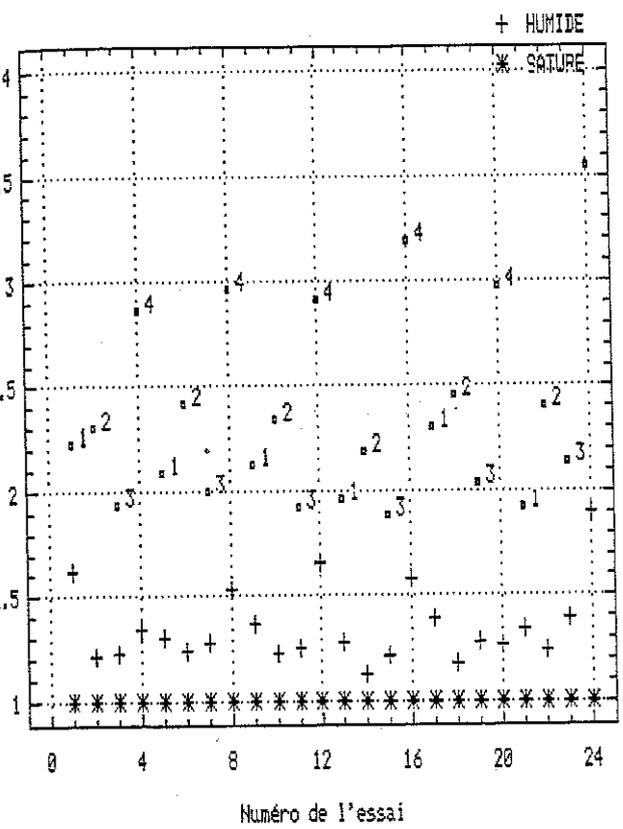
Premier cycle

▪ SEC
+ HUMIDE
* SATURE



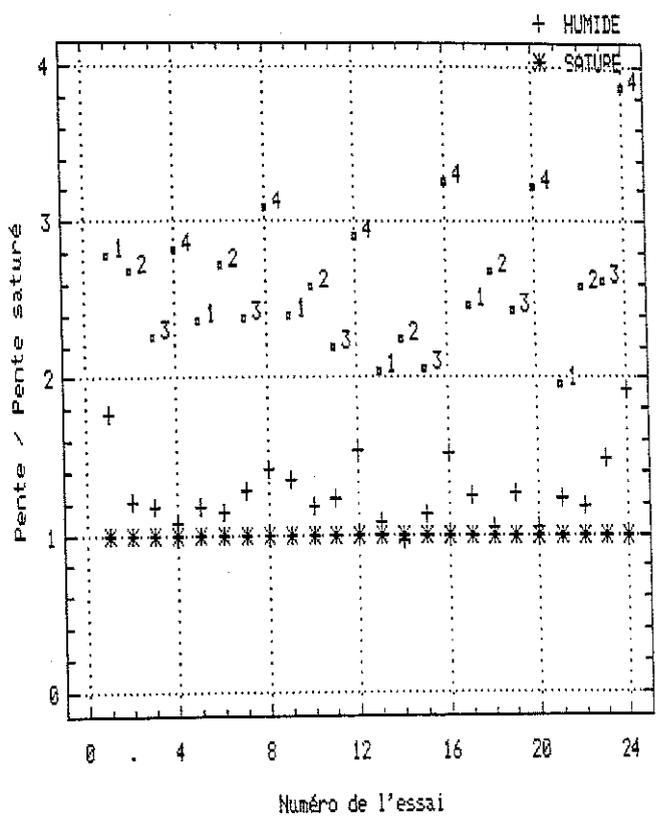
d

Evolution relative de l'intercept
Ordre capteurs : 1,2,3,4 pour 6 cycles = SEC



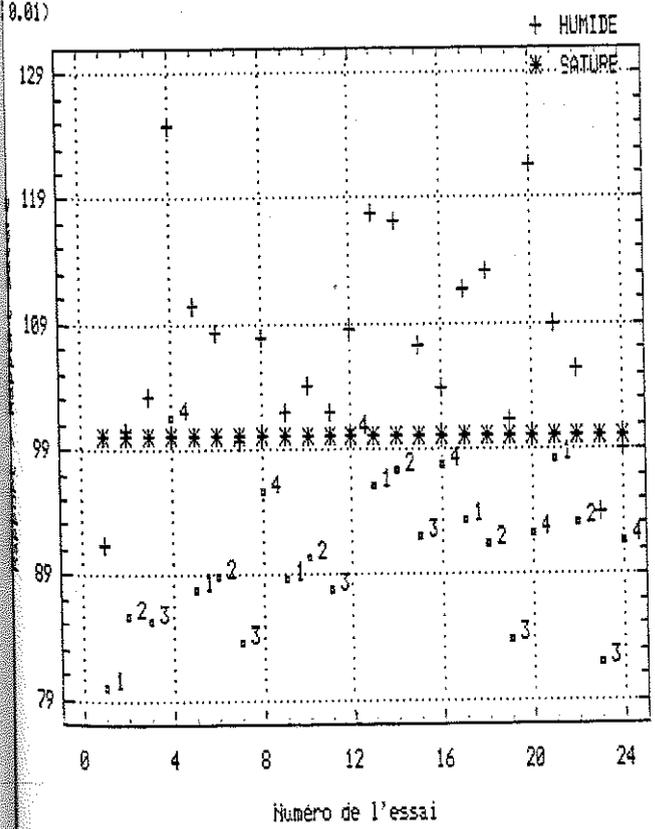
a

Evolution relative de la pente
Ordre capteurs : 1,2,3,4 pour 6 cycles = SEC



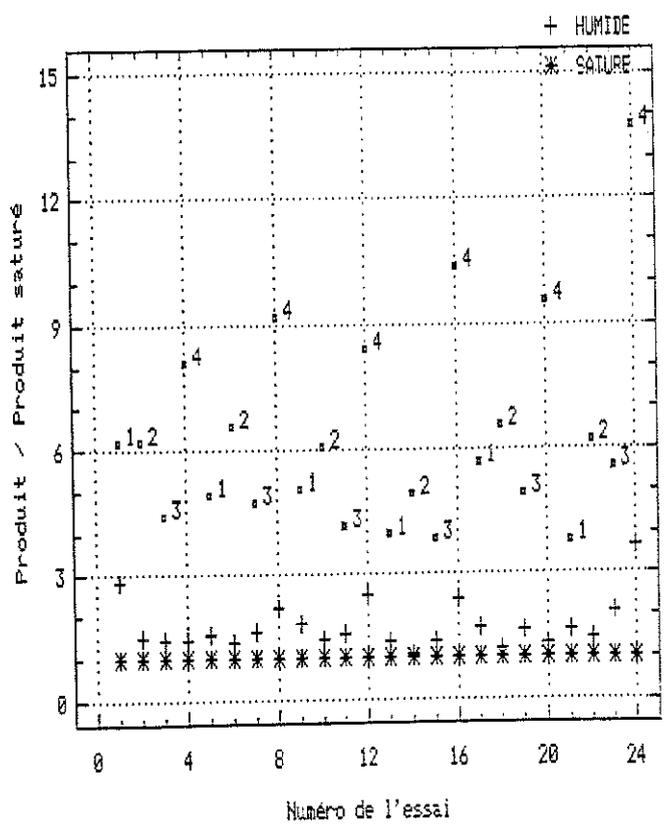
b

Evolution relative du rapport int/pente
Ordre capteurs : 1,2,3,4 pour 6 cycles = SEC



c

Evolution relative du produit int*pente
Ordre capteurs : 1,2,3,4 pour 6 cycles = SEC



d

Figure 25

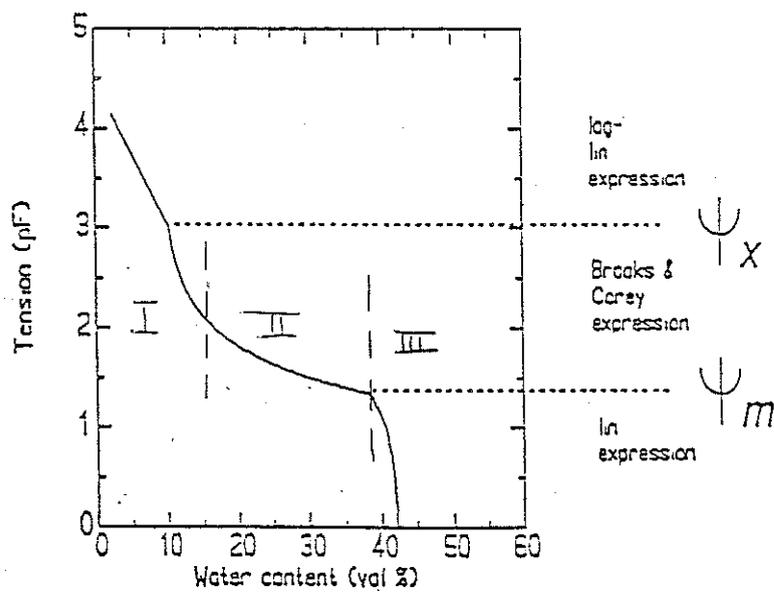


Figure 26 La courbe de rétention en eau ou courbe caractéristique d'humidité du sol (d'après Jansson)

ANNEXE VII
"COLLABORATION ENTRE FUL ET BTW SA DANS
LE CADRE D'UN PROJET FIRST"
E. WETZEL

COLLOQUE "LES PARTICULARITES DE
TRANSFERT DE TECHNOLOGUE AU NIVEAU
REGIONAL", LONGWY 01/04/1993

LES POTENTIALITES DE TRANSFERT DE TECHNOLOGIE AU NIVEAU REGIONAL

**Colloque du 01/04 - Maison de la Formation à Longwy
organisé par le Collège Européen de Technologie**

Collaboration entre FUL et BTW S.A. dans le cadre d'un projet FIRST

Texte présenté par Edgar WETZEL, Inf. grad., Product Manager

**BTW S.A. - Bureau Technique Wintgens S.A.
Neustrasse 7-9
B-4700 Eupen
BELGIUM
Tel.: 32(0)87/74.01.21
Fax.: 32(0)87/74.37.21**

TABLE DES MATIERES

1. Présentation de l'entreprise	3
2. Déroulement du projet et de la collaboration	4
3. Transfert de technologie	6
4. Conclusions	7

Mesdames, Messieurs,

suite à l'aimable invitation du Collège Européen de Technologie, j'ai l'honneur de vous présenter notre collaboration avec la Fondation Universitaire Luxembourgeoise (FUL) dans le cadre d'un projet de recherche FIRST, financé par la Région Wallonne.

1. Présentation de l'entreprise

Le Bureau Technique Wintgens S.A. est une société spécialisée depuis plus de 40 ans dans la distribution de technologie de pointe pour les applications en **sciences de l'environnement**. Elle a accumulé une grande expérience d'une part dans la **commercialisation de capteurs, d'instruments et de systèmes de mesures**, et d'autre part dans leurs **installations, intégrations et maintenances techniques**. La **conception de systèmes "clé sur porte" intégrant des capteurs et instruments avec des systèmes d'acquisition de données programmables, des ordinateurs et leurs logiciels est devenue une activité importante**. Une telle activité demande des **collaborateurs polyvalents formés en électronique, en informatique, en mécanique** et ayant des connaissances

- * en **technologies de capteurs**,
- * en **méthodes et principes de mesures**,
- * en **contraintes technologiques et de l'environnement**,
- * en **systèmes d'acquisition de données**,
- * en **télé-transmission et en traitement des données**,
- * et du **marché**.

2. Déroulement du projet et de la collaboration

Cette **combinaison d'expériences techniques, commerciales** et la **spécialisation dans le secteur environnement** répondait parfaitement aux exigences de la FUL, qui, fin 90, cherchait un nouveau partenaire industriel dans le cadre de son **projet de développement de capteurs de qualité de l'eau et du sol**. Après une étude des pistes possibles, l'idée de réaliser un capteur à base d'une **cellule céramique poreuse**, intégrant une résistance chauffante et un capteur de température, a été poursuivie. Le principe de mesure est la **mesure de la conductivité thermique du sol par sonde à choc**. Le capteur placé en équilibre avec le sol permet alors la mesure simultanée de la température du sol, de sa teneur en eau et de la conductivité électrique de cette eau. Le capteur devait répondre aux exigences suivantes :

- * principe de mesure **fiable**,
- * capteurs **interchangeables**,
- * **stabilité à long terme** (capteur placé dans le sol),
- * **coûts** de production **raisonnables**.

L'accord de collaboration et ensuite l'acceptation du projet par la Région Wallonne se fit en 1991. Cette même année encore, un premier stage en entreprise s'est déroulé. Mr. Alain HANSON, géologue et chargé du projet de recherche, a été initié à **l'utilisation d'un système d'acquisition de données programmable ENVILOG**. A l'issue du stage il s'est avéré que **l'équipement en question se prêtait de manière idéale au projet**. En fait, le système d'acquisition de données ENVILOG a permis de bien suivre le comportement des capteurs en développement exposés à des sols de types différents. Il est surprenant de constater que le stage a fournis **d'autres résultats utilisables**, tel que le développement d'un filtre numérique pour certains types de signaux et parasites.

La deuxième année a été caractérisée par des études réalisées principalement à la FUL. Des rencontres régulières ont permis aux partenaires de discuter de l'avancement des travaux.

La troisième année du projet devrait, si tout se passe comme prévu, aboutir à des capteurs opérationnels et commercialisables. Un autre stage en entreprise se déroulera au cours de l'année 93 et servira à initier une deuxième personne à l'utilisation du système d'acquisition de données programmable ENVILOG et à initier nos collaborateurs à l'utilisation du capteur.

3. Transfert de technologie

Le transfert de technologie est **bi-directionnel** et se concrétise par des **prêts de matériel**, par la possibilité **d'utilisation de l'infrastructure existante**, et par **l'échange d'informations**.

Au niveau matériel, le Bureau Technique Wintgens S.A. a équipé la FUL avec **2 systèmes d'acquisition de données programmables ENVILOG**. La FUL est considérée comme étant un **utilisateur privilégié** qui reçoit régulièrement et gratuitement les mises à jour du logiciel PC accompagnant l'ENVILOG. En échange, la FUL effectue une fonction de testeur "beta". Du côté informations, nous **apportons notre savoir-faire en matière de mesure des paramètres de l'environnement et en acquisition et traitement de données**.

Le Bureau Technique Wintgens S.A. a su profiter à de nombreuses occasions des **vastes connaissances en sciences de l'environnement accumulées** à la FUL. L'exemple suivant prouve que notre collaboration avec la FUL a permis de **dépasser la relation fournisseur-client** : Des informations techniques et scientifiques recherchées par la FUL et mises à notre disposition, nous ont permis d'approcher rapidement un nouveau marché, en occurrence celui des modèles de dispersion. En outre, il nous sera possible de **profiter de l'infrastructure technique de la FUL à Arlon**.

4. Conclusions

C'est la **première collaboration de recherche** entre le Bureau Technique Wintgens S.A. et un institut scientifique, et elle est **jugée positive**.

Depuis le premier stage, de nombreux contacts entre les deux partenaires ont eu lieu. L'échange d'informations est excellent, et les **deux partenaires sont satisfaits de la collaboration au point d'avoir prévu une suite même au-delà du projet en cours**. Les arguments suivants justifient ce jugement :

1) Suite aux besoins exigeants d'un marché en constante évolution qui demande des produits très sophistiqués, le **niveau de formation du personnel technico-commercial doit être actualisé à des échéances de plus en plus courtes**. Afin de satisfaire cette demande en information, une **collaboration étroite avec le monde universitaire est indispensable**.

2) Il est **très difficile d'évaluer le gain en argent** d'une telle collaboration. Néanmoins, outre l'aspect financier, **l'aspect échange importe particulièrement**. Nous vivons dans un **monde hautement interactif** et ni les instituts de recherche, ni l'industrie ne peuvent se permettre de se renfermer dans leur tour d'ivoire.

3) Le fait d'avoir suivi de près le développement d'un capteur représente un **avantage commercial**, puisque la recherche initiale, le développement et les tests des prototypes ne sont pas trop onéreux, ni pour l'entreprise, ni pour l'institut. Si la recherche aboutit à **un nouveau produit commercialisable qui s'intègre facilement au programme de vente**, l'entreprise ne peut que gagner.

4) Avoir participé à un ou des projets de recherche avec des partenaires compétents **contribue à l'image de marque de l'entreprise.**

Comme seul **point négatif** nous avons constaté la difficulté et la lenteur de communication avec l'administration; qui aurait pu nuire à l'aboutissement du projet.

Pour terminer mon exposé, je voudrais insister sur le **côté positif d'une collaboration étroite entre les instituts de recherche et l'industrie.** Néanmoins, il faudrait assurer que la recherche reste libre et ne soit **pas commandée uniquement par des intérêts commerciaux.**

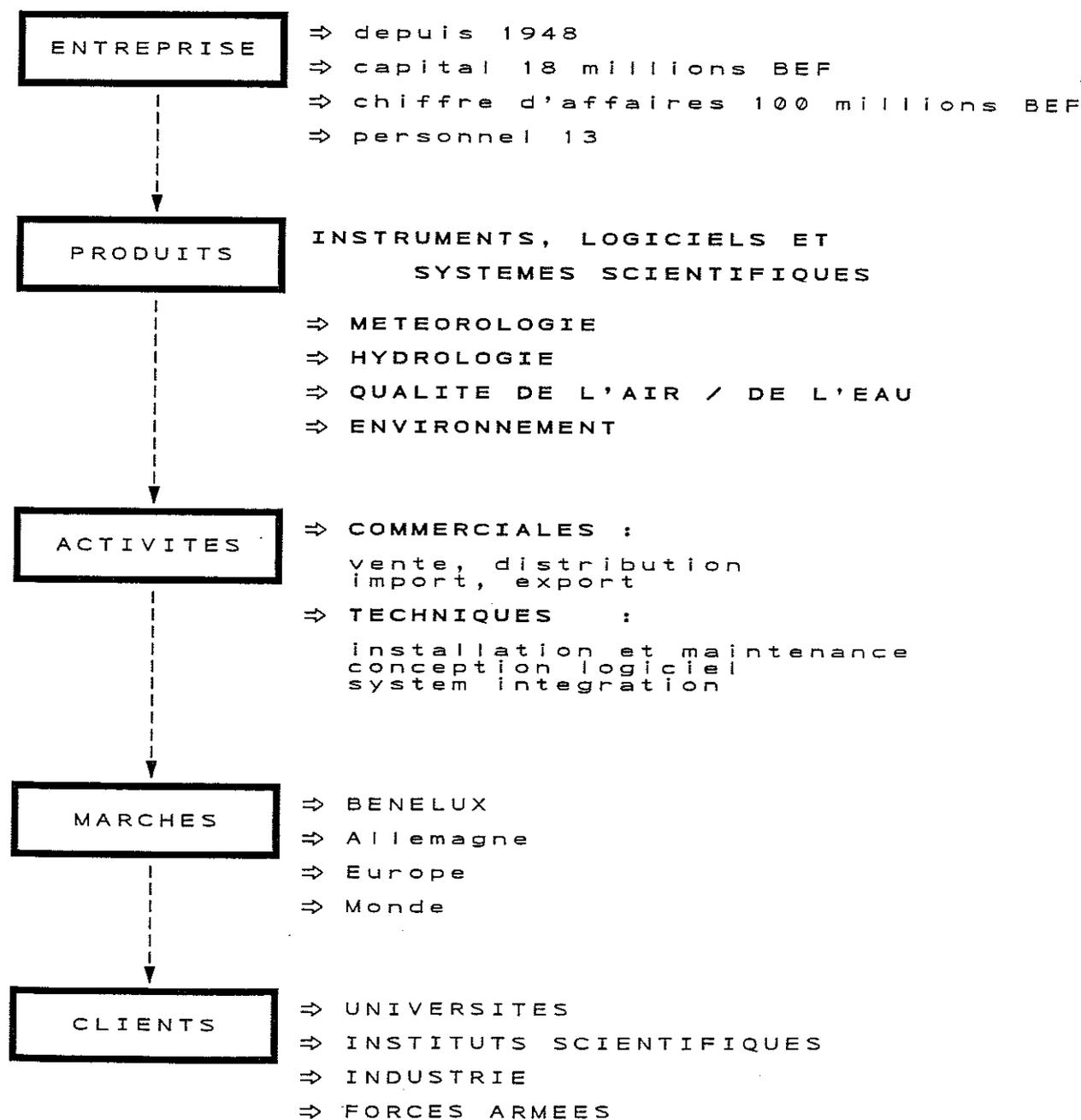
Je vous remercie de votre attention.

1. PRESENTATION DE L'ENTREPRISE

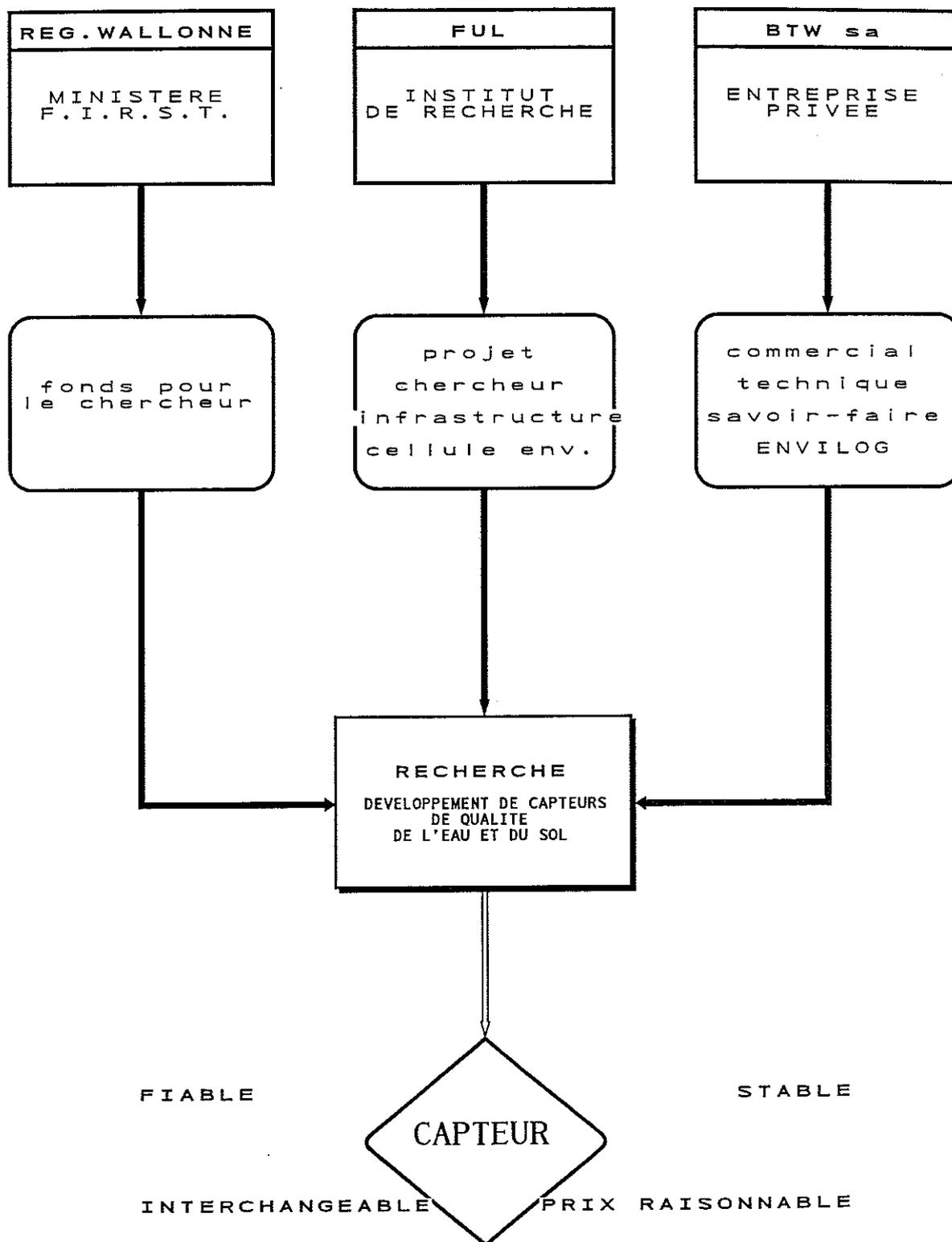
BTW sa - Bureau Technique Wintgens S.A.
Neustrasse 7-9
B-4700 Eupen
BELGIUM

Tel.: 32 (0) 87 / 74.01.21

Fax.: 32 (0) 87 / 74.37.21



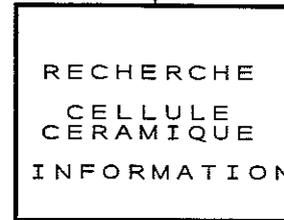
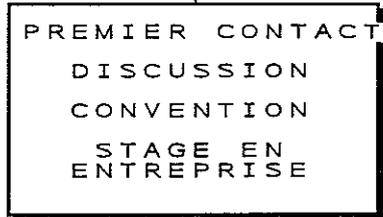
2. DEROULEMENT DU PROJET ET DE LA COLLABORATION (1)



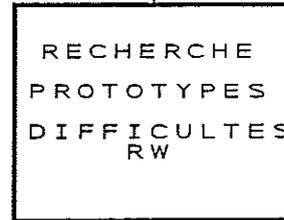
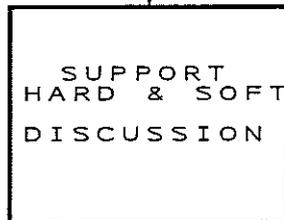
BTW sa

FUL

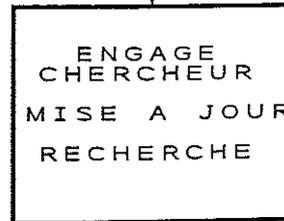
1990 -
1991



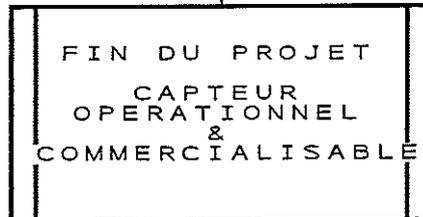
1992



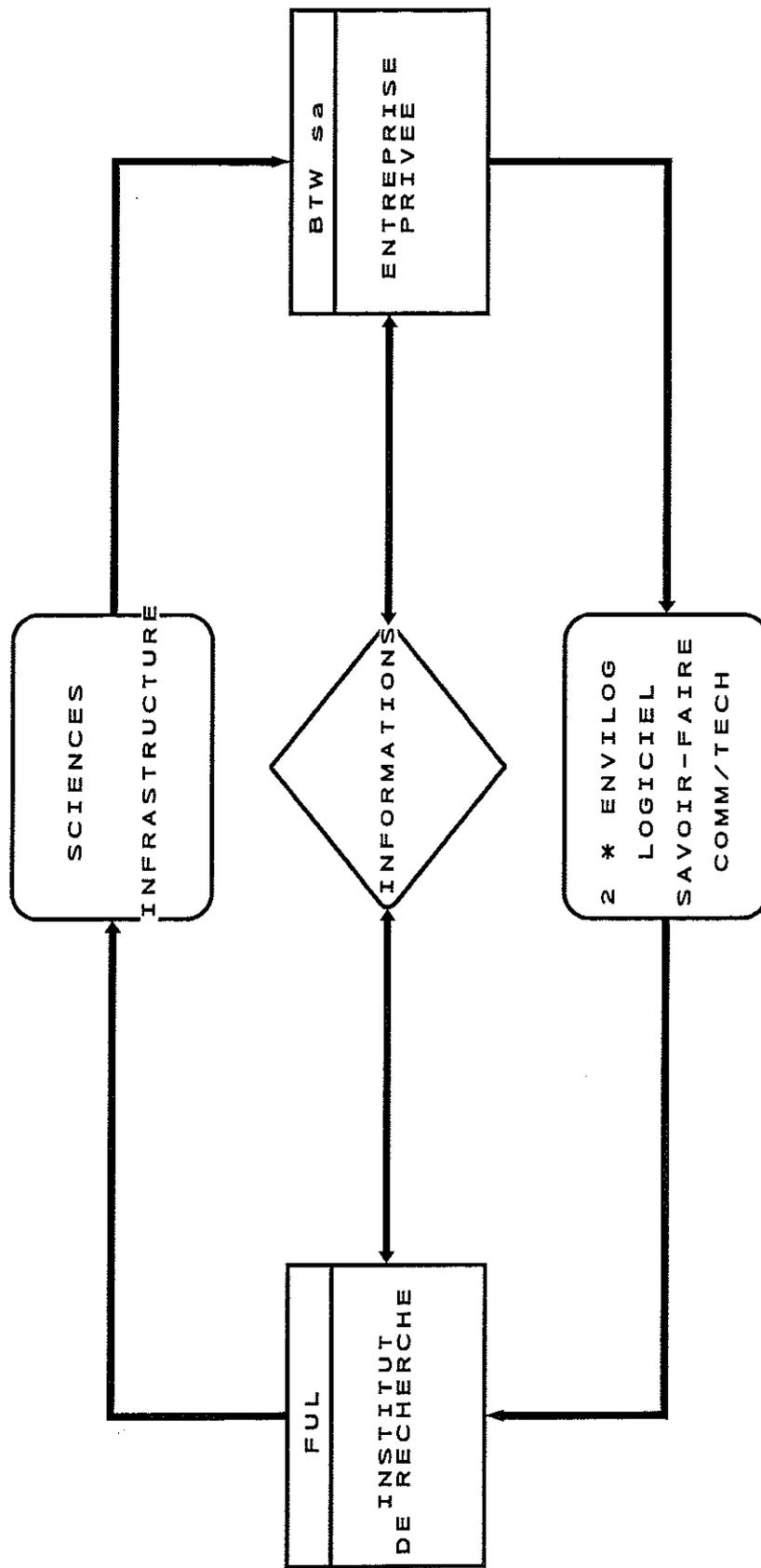
1993



1994



3. TRANSFERT DE TECHNOLOGIE



4. CONCLUSIONS

POSITIF

PREMIERE COLLABORATION DE RECHERCHE POUR BTW sa

DEUX PARTENAIRES SONT SATISFAITS

- 1) COLLABORATION AVEC MONDE UNIVERSITAIRE INDISPENSABLE
- 2) OUTRE L'ASPECT FINANCIER, L'ASPECT ECHANGE IMPORTE
- 3) AVANTAGE COMMERCIAL
- 4) MARKETING : CONTRIBUE A L'IMAGE DE MARQUE

NEGATIF

COMMUNICATION AVEC L'ADMINISTRATION

ASSURER LA LIBERTE DE LA RECHERCHE