

Suivi de l'eau dans les sols et à l'interface sol/atmosphère : de la physique des sols à l'hydrogéophysique

Jean-Paul Laurent, Chercheur CNRS
LTHE-Grenoble UMR5564 CNRS-INPG-IRD-UJF
<http://www.lthe.hmg.inpg.fr/~laurent/>

Séminaire EOST-Strasbourg, 13 Avril 2006

Plan

- Introduction : les outils de mesure « classiques » en physique des sols
 - Sonde à neutrons, tensiométrie
- Méthodes diélectriques de mesure de la teneur en eau
 - TDR, sondes capacitives
- Développement récents :
 - Scintillométrie, radiométrie μ -ondes , spectroscopie d'impédance
- L'hydrogéophysique au LTHE :
 - Implication dans les observatoires, la nouvelle équipe HGP, projets, sites & chantiers, Envirhonalp...

1. Introduction :

les outils de mesure « classiques » en
physique des sols

Musy, A. and Soutter, M., 1991. Physique du sol. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 335 pp.

Dirksen, C., 1999. Soil Physics Measurements. Catena Verlag, Reiskirchen, 154 pp.

Le suivi hydrique dans les sols

■ Objectifs :

- Quantifier la ressource en eau
- La localiser :
 - Profils, répartition à l'échelle de la parcelle
- Suivre son évolution pour (ré)agir
 - Déclenchement d'alarmes, pilotage de systèmes d'irrigation, synchronisation des pratiques culturales...

■ Moyens :

- Mesurer la **teneur en eau**
- Mesurer le potentiel de l'eau (**succion**)

Techniques « traditionnelles » de suivi

- Prélèvements, gravimétrie
- Sonde à neutrons
- Tensiométrie

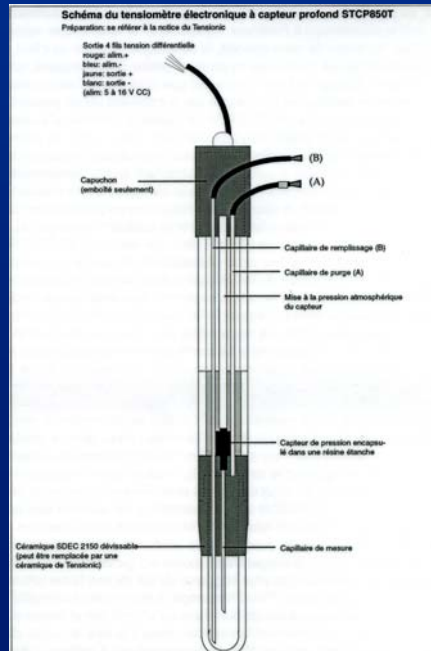
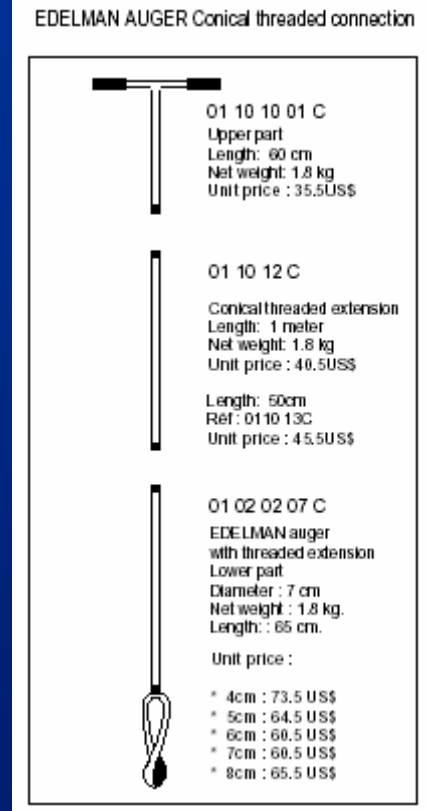


Illustration SDEC-France



Site de Warloy-Baillon, Avril 2005



Tarière Eijkelkamp

Bacchi & al. 2003. *Les sondes à neutrons et à rayons gamma : leurs applications en agronomie.* AIEA, Vienne, 71 pp.

Tron, G., Isbérie, C. and Chol, P., 2000. *La tensiométrie pour piloter les irrigations.* Educagri Editions, Dijon, 247 pp.

Techniques « traditionnelles » de suivi :

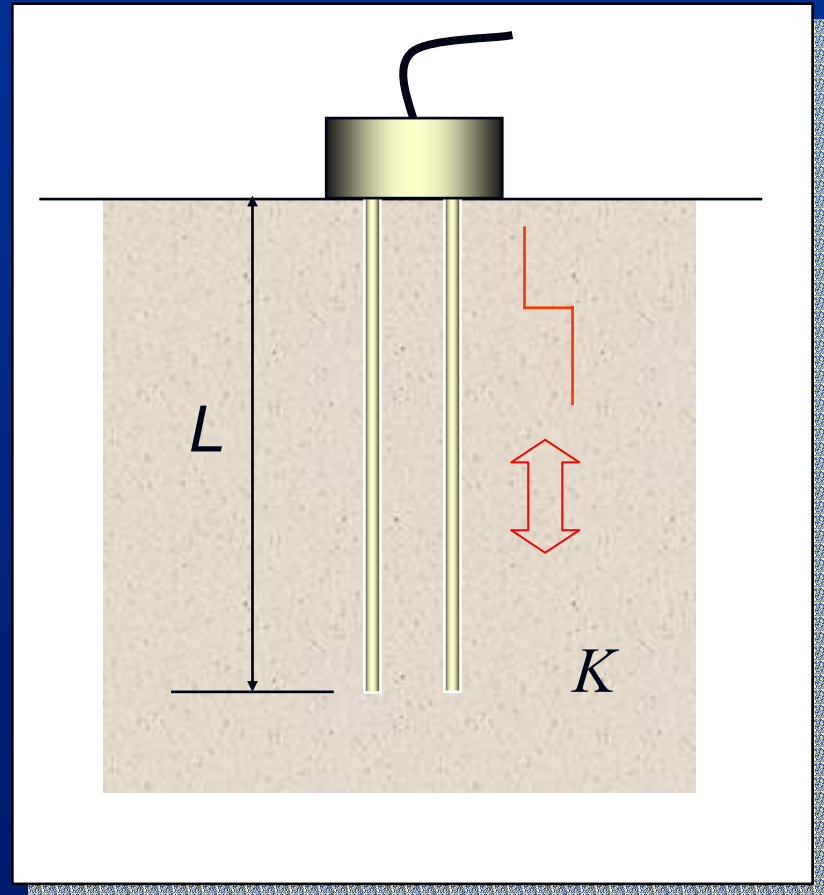
- Des avantages qui restent appréciables :
 - Généralement bien maîtrisées, matériel relativement peu coûteux
 - Protocoles d'installation et de mesure faciles à mettre en œuvre.
 - Éléments de volume de mesure importants
 - Peuvent être très précises
- Des inconvénients majeurs :
 - Prise de donnée **discontinue** dans le temps et l'espace, la gravimétrie est une méthode **destructive**.
 - La tensiométrie classique est **limitée en gamme** et en conditions opérationnelles, risque de pollution par le mercure.
 - Usage de la sonde à neutrons très réglementé, risque par rapport à la radioactivité.
 - Temps, délais, pénibilité, main d'œuvre...

2. Méthodes diélectriques de mesure de la teneur en eau

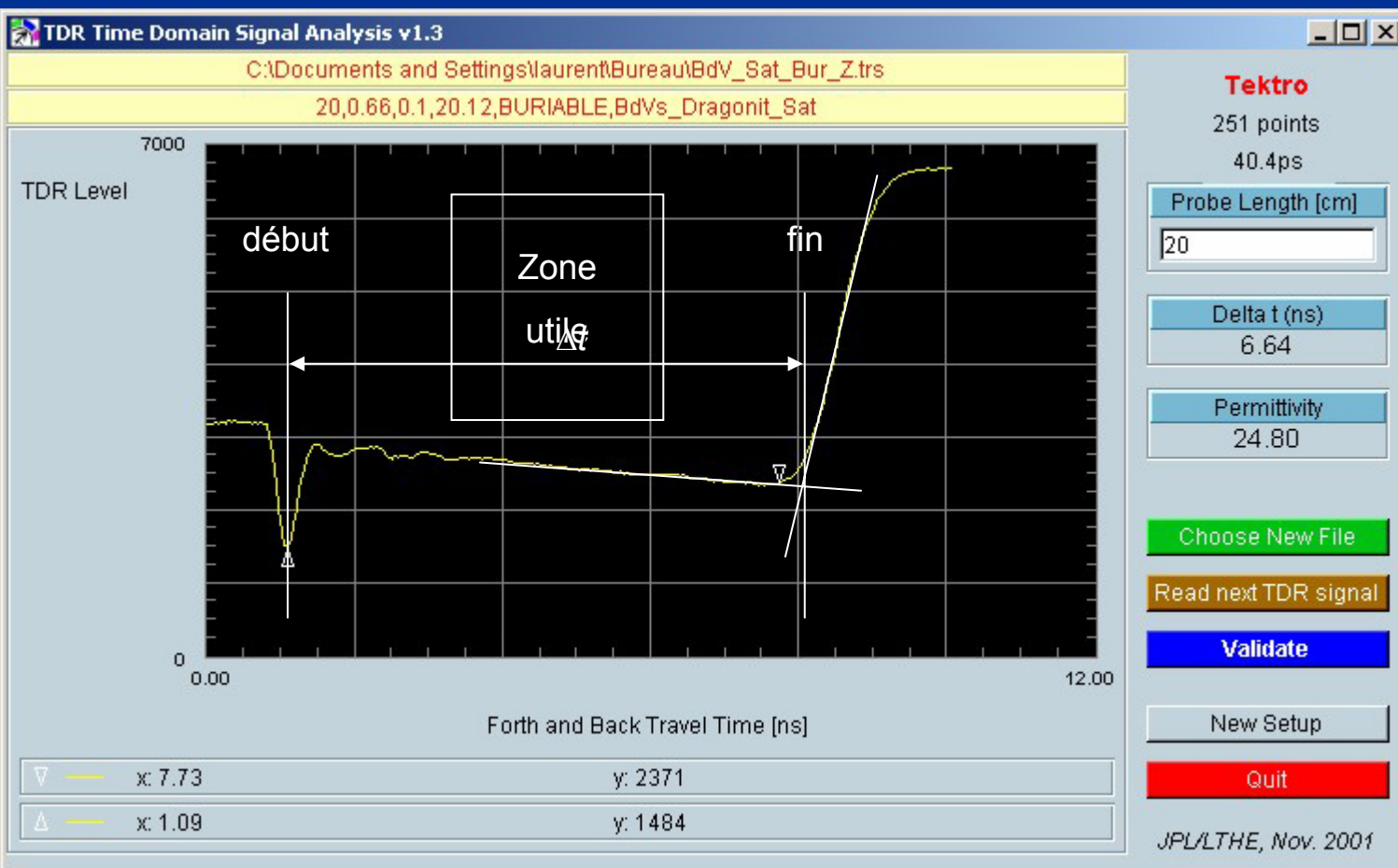
TDR, sondes capacitives

Principe de la TDR

- Introduction d'un guide d'ondes dans le sol : la « sonde »
- Envoi d'un échelon de faible temps de montée
- Enregistrement de la tension réfléchie
- Traitement du signal



Analyse temporelle d'un signal TDR



$$v = \frac{2L}{\Delta t}$$

$$K = \left(\frac{c}{v} \right)^2$$

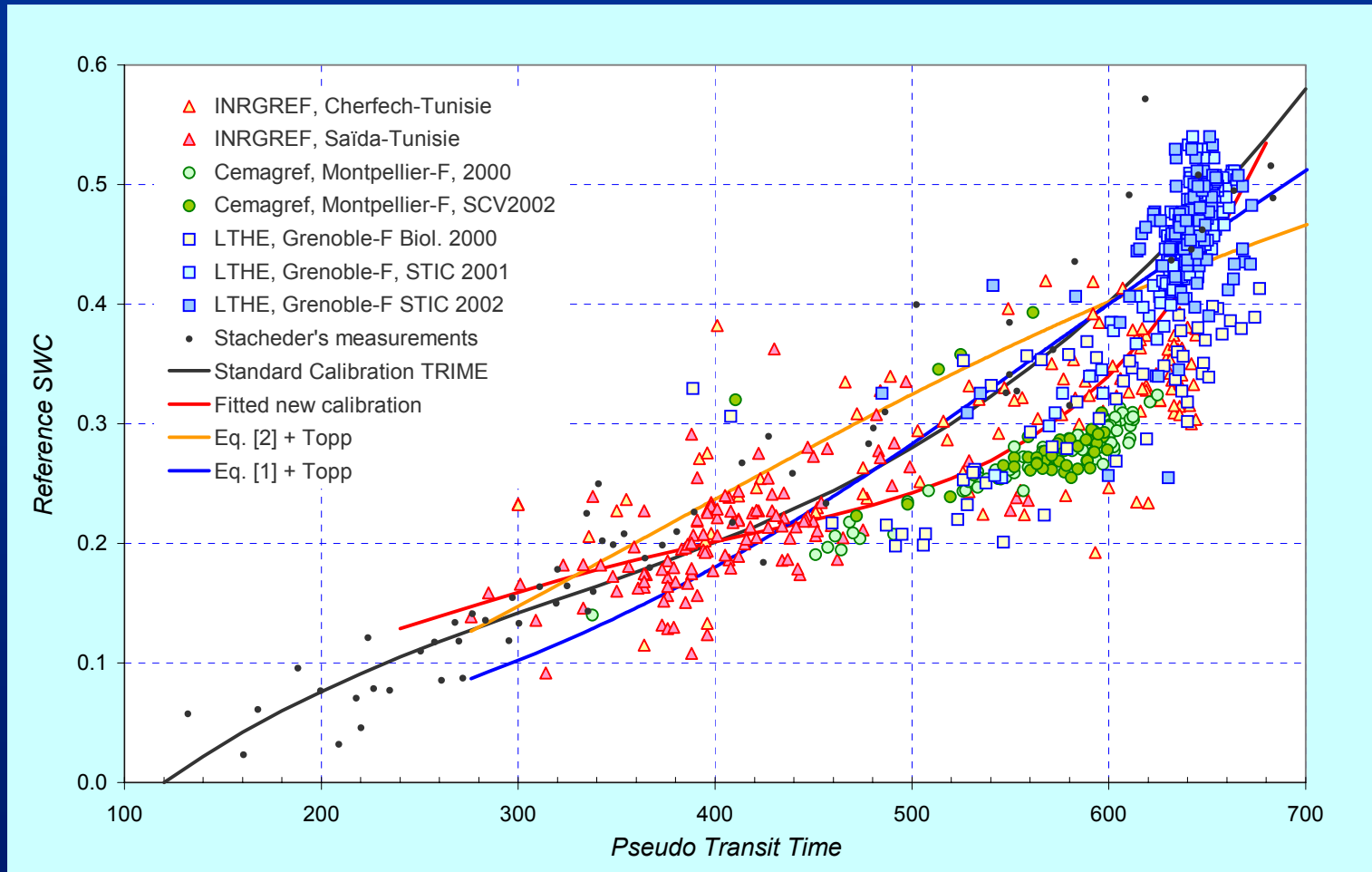
$$\theta = f(K)$$

Transformation de l'échelle de la quantité d'étalonnage $\theta(K)$

Systemes TDR disponibles

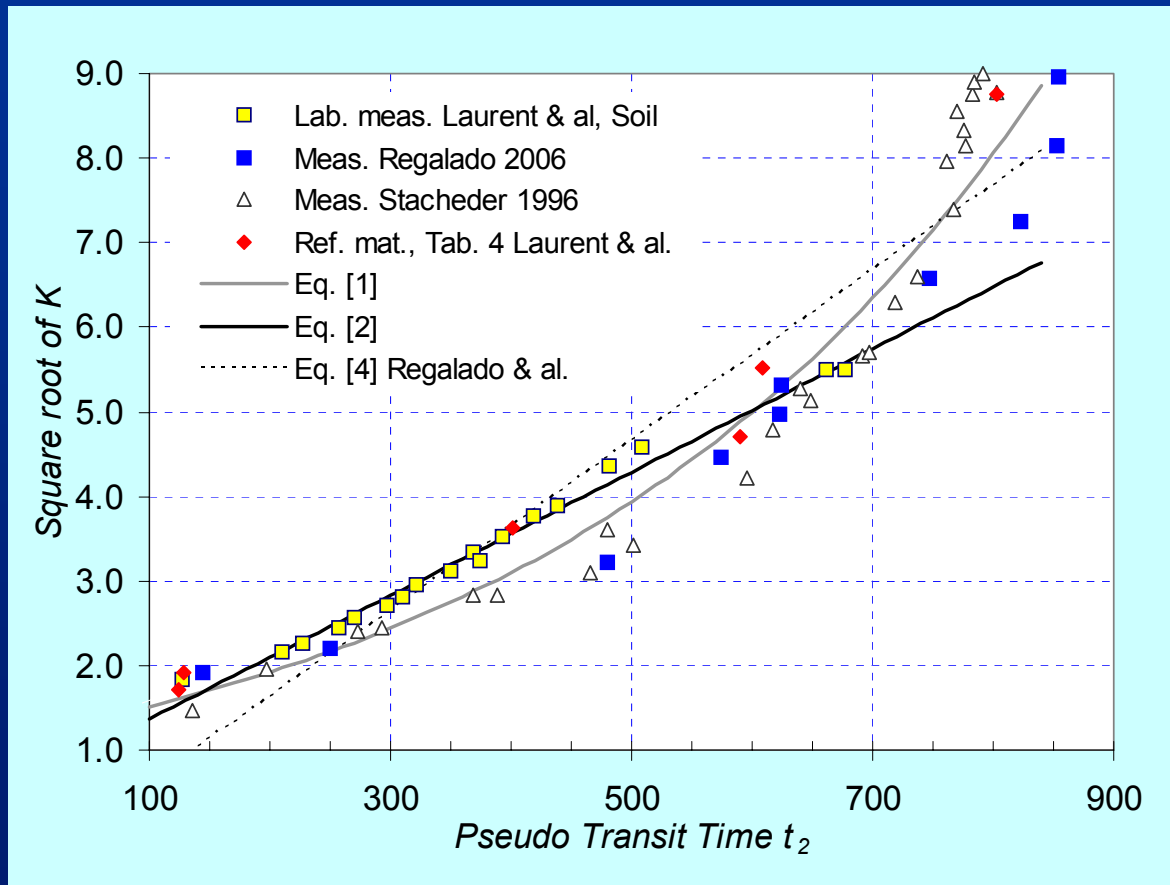
Fabricant	Systeme	Particularites
Streat Instruments (NZ)	<u>Aquaflex</u>	Sonde « type ruban » 3 m, TDT
Campbell Scientific (USA)	<u>TDR100</u>	Utilisation autonome ou couplage à un ensemble centrale/multiplexeur
ESI (Canada)	<u>Moisture Point</u>	Sondes à diodes commutées multi-segments & bitiges
IMKO Gmbh (Allemagne)	<u>TRIME</u>	T3 : Systeme « tube » ; P2x, P3x : Bitige, Tritige ; IT : Capteur autonome
Soil Moisture Eq. Corp. (USA)	<u>TRASE</u>	S1 : Systeme autonome de terrain BE : acquisition automatique MiniTRASE : S1 miniaturisé

Test d'un système TDR du commerce : le « TRIME » : terrain



Laurent, J.-P. et al., 2005. Monitoring soil water content profiles with a TDR commercial system: Comparative field tests and laboratory calibration. Vadose Zone Journal, 4: 1030-1036.

Test d'un système TDR du commerce : le « TRIME » : laboratoire

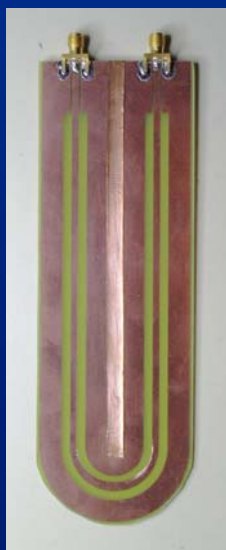


Laurent, J.-P. et al., 2005. Monitoring soil water content profiles with a TDR commercial system: Comparative field tests and laboratory calibration. Vadose Zone Journal, 4: 1030-1036.

Sondes TDR optimisées



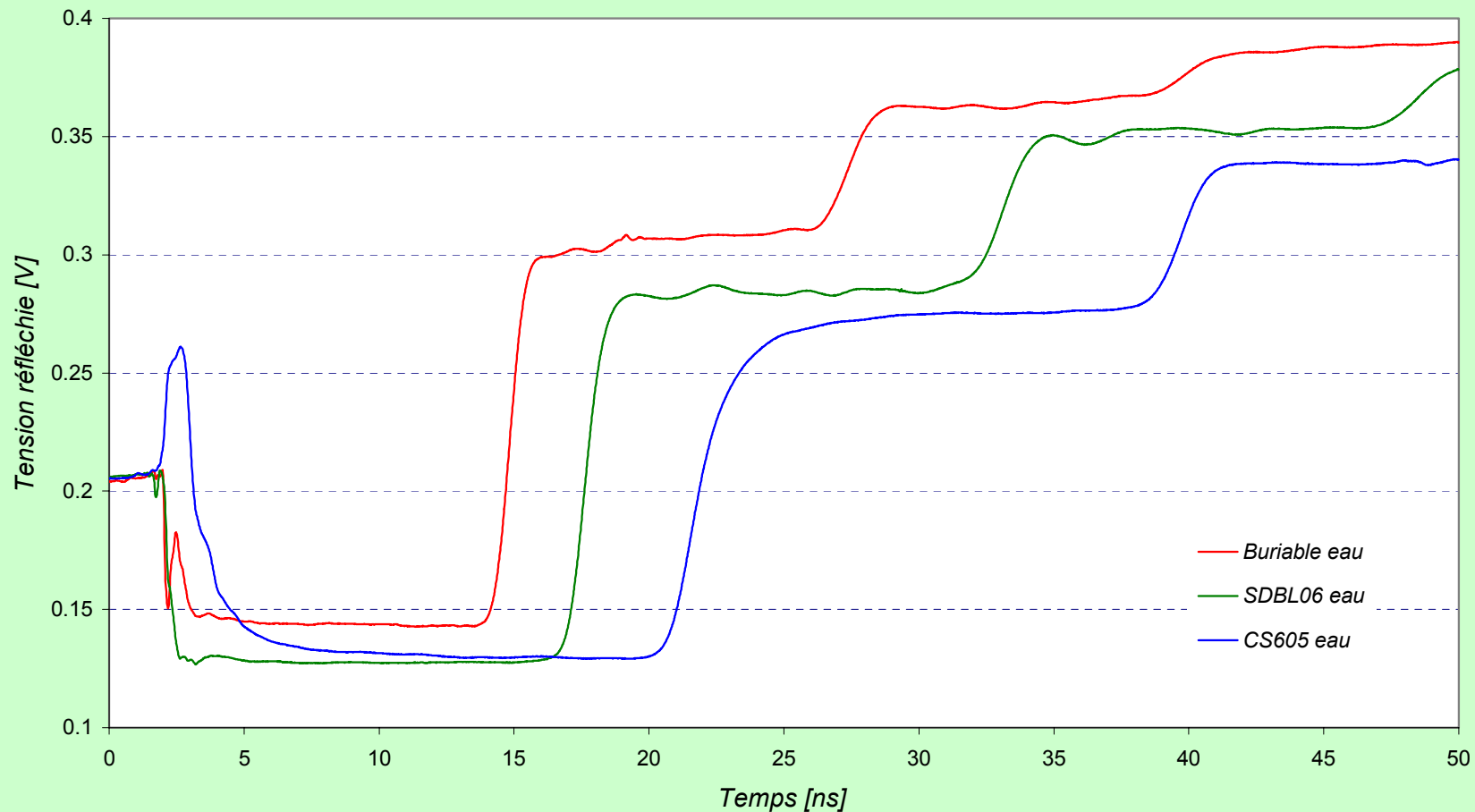
Transition coplanaire 50Ω



Laurent, J.-P. and Ferrari, P., 2004. Design of optimized TDR probes, TDR Conference, Lublin-Poland, February 1-4th 2004. Institute of Agrophysics, Polish Academy of Sciences.

Comparaison par rapport à l'existant

Comparaison sondes dans l'eau



Principe d'une sonde capacitive

- Former une **capacité** C avec le sol comme diélectrique

$$C = \varepsilon \frac{S}{e} = A.K$$

- K : permittivité relative du sol.
- A : constante ne dépendant que de la géométrie de la sonde utilisée.
- Mesurer cette capacité autour d'une fréquence donnée :
 - Circuit résonnant de type RLC

Instrumentes & capteurs disponibles :

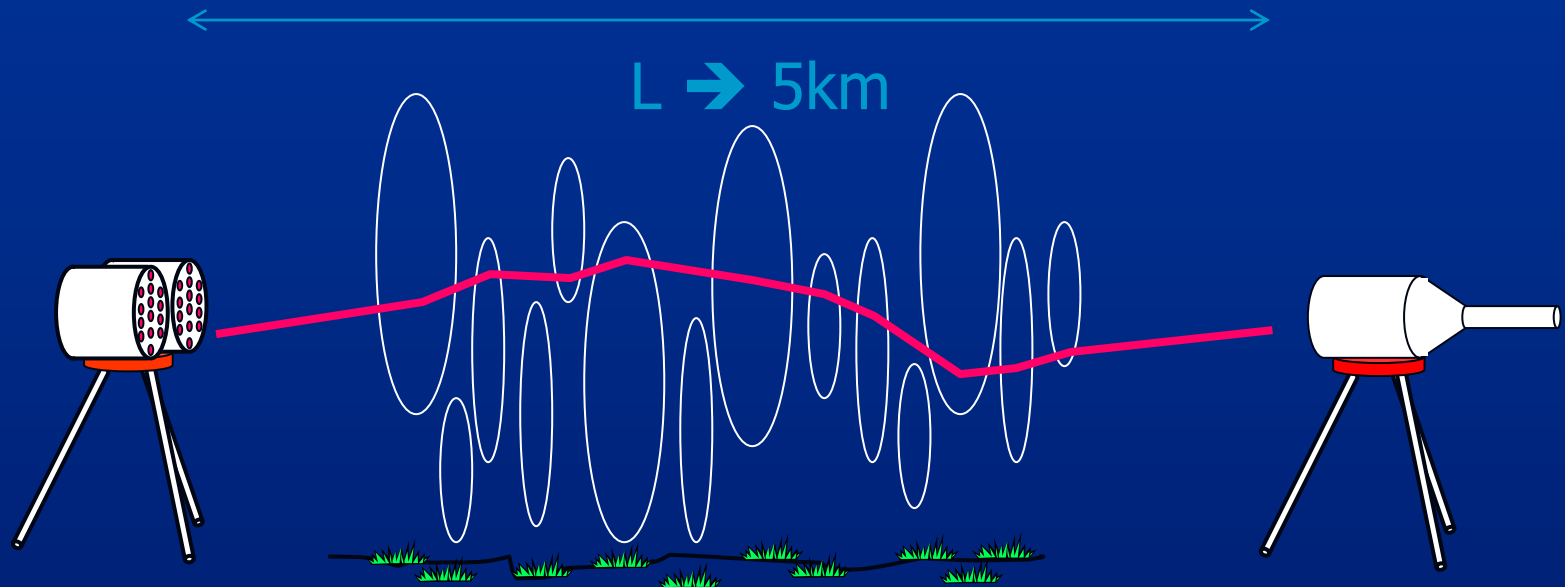
2. Sondes capacitives

Fabricant	Système	Particularités
Campbell Scientific (USA)	<u>CS616</u>	Technologie "mixte" capacitive / propagation ligne
Decagon (USA)	<u>ECH2O</u>	Capteur sur circuit imprimé plat
Delta T (UK)	<u>ThetaProbe</u> Profile Probe <u>Wet Sensor</u>	Sonde multi-pointes 5cm Sonde multi-segments
Sentek (Australie)	<u>Enviroscan/smart</u> <u>Diviner 2000</u> <u>EasyAG</u>	Sonde multi-segments à poste fixe Système de profilage manuel Mesure multipoints itinérante
SDEC (France)	<u>HMS9000</u>	Pointe unique. Mise en place comme un tensiomètre
Stevens Water Monitoring Systems Inc. (USA)	<u>Hydra Probe</u>	Sonde multi-pointes

3. Développement récents :

Scintillométrie, radiométrie μ -ondes,
spectroscopie d'impédance

La scintillométrie : principe



En IR : Fluctuations du signal sont fonction des fluctuations de température

→ évaluation du **flux de chaleur sensible**

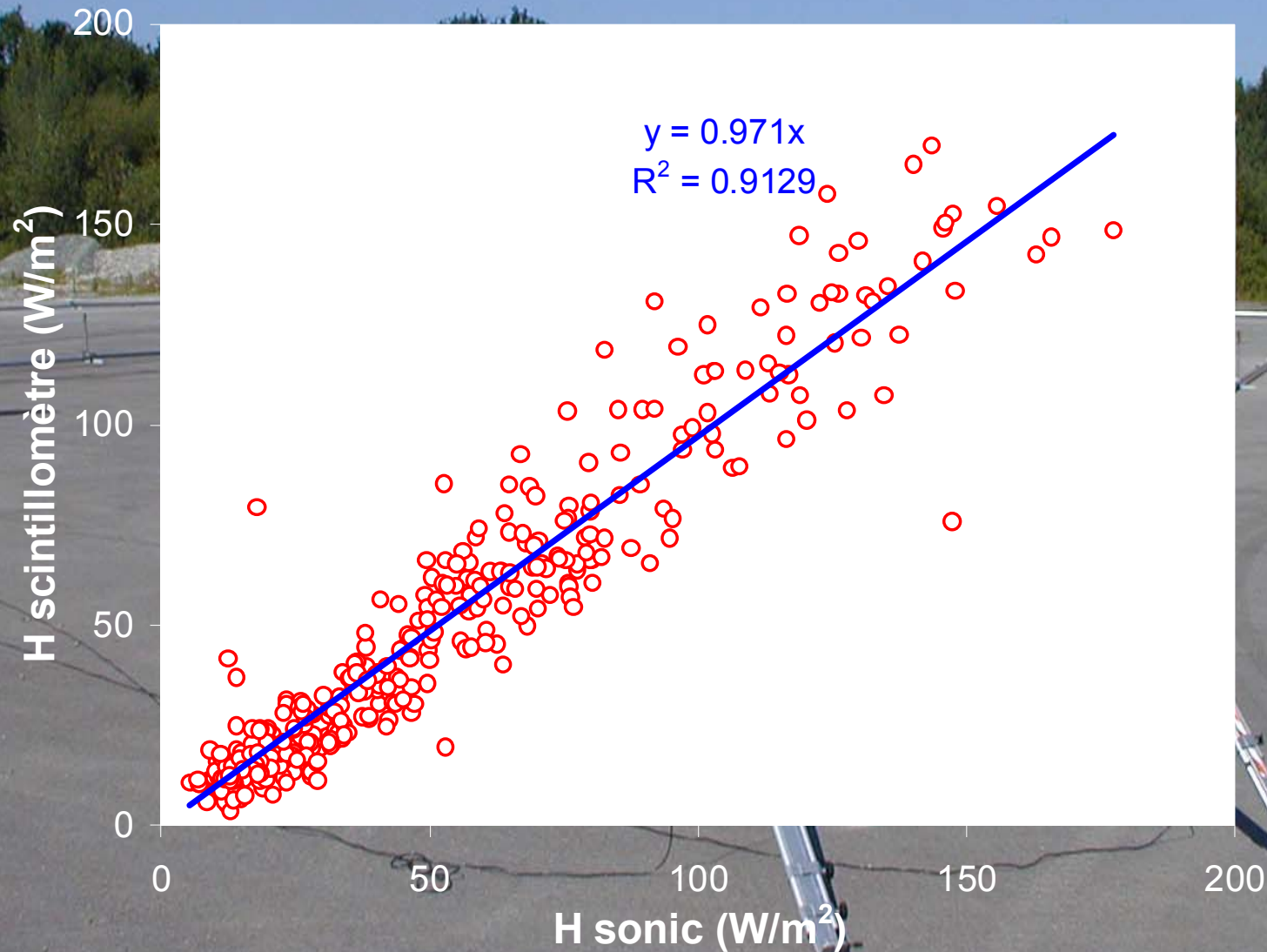
En μ -ondes : fonction des fluctuations de température et humidité

→ évaluation des **flux de chaleur sensible et latente**

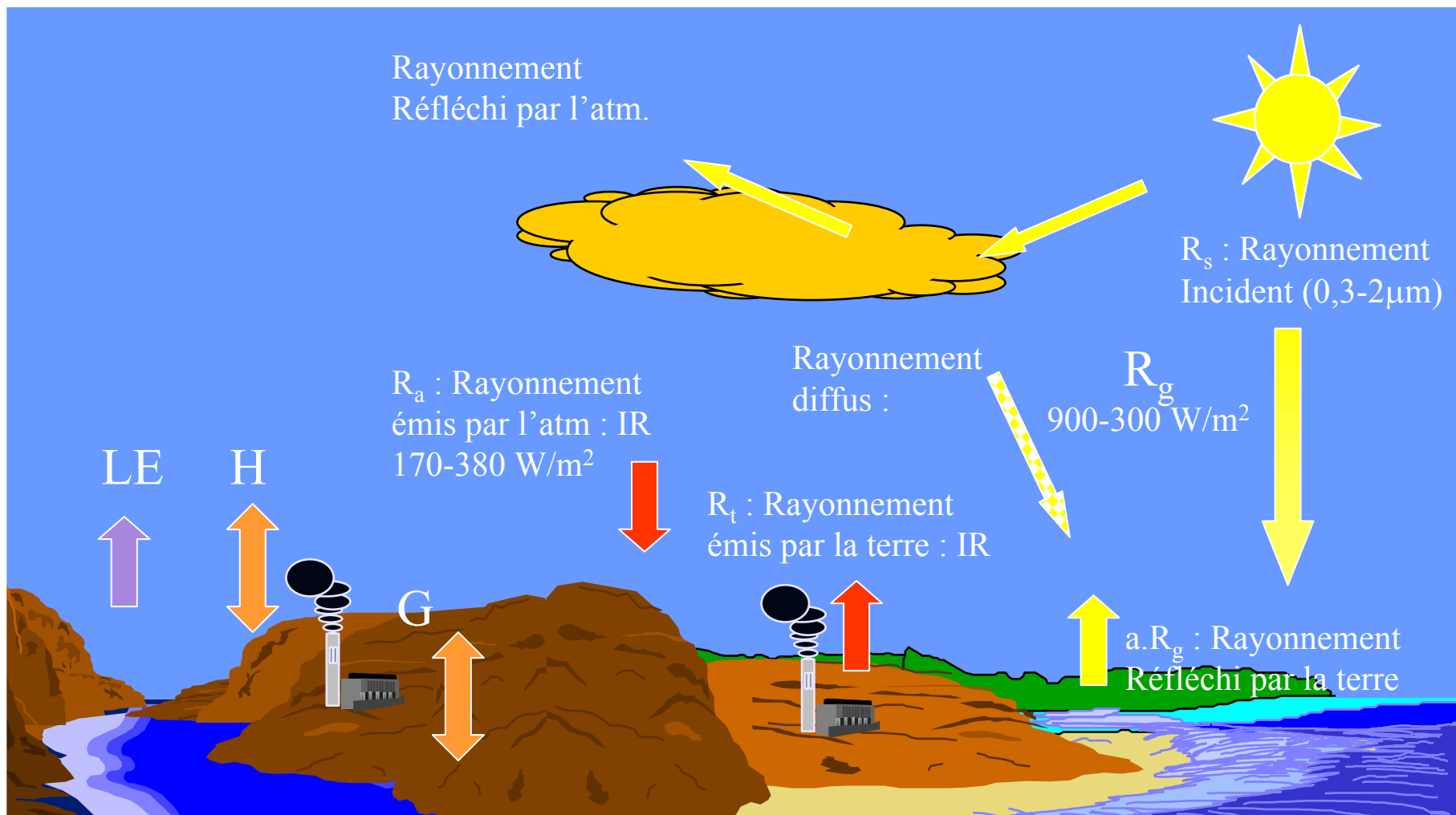
La scintillométrie au LTHE

- Recrutement MC en 2002 :
 - Jean-Martial Cohard
- Financement OSUG pour un scintillomètre Scintec BLS900 (2004)
- Collaborations nationales et internationales
 - J-P. Lagouarde, INRA Bordeaux
 - participation à Capitoul (2004)
 - Rolland Vogt, Université de Bale
 - prêt d'instrument pour le projet Hydroville, ...





Bilan énergétique à l'interface sol/atmosphère



$$R_g (1-a) + R_a - R_t = H + LE + G$$

Principe de la radiométrie μ -ondes passive

- Mesurer la puissance naturellement émise (rayonnement du corps noir) dans une certaine bande de fréquences choisie entre 1 et 10 GHz.
- Equivalence avec une température de brillance attribuée au milieu observé : approximation de Rayleigh.
- Problèmes :
 - Très faibles niveaux de puissance : < 100 dBm, typiquement.
 - Encombrement des bandes μ -ondes !
 - Sensibilité aux paramètres physiques que l'on cherche à mesurer, effets parasites d'autres facteurs : rugosité de surface, par exemple

Ulaby, F.T., 1981. Microwave Remote Sensing Fundamentals and Radiometry. Microwave Remote Sensing. Active and Passive, Volume 1 : Microwave Remote Sensing. Active and Passive. Addison-Wesley, 456 pp.

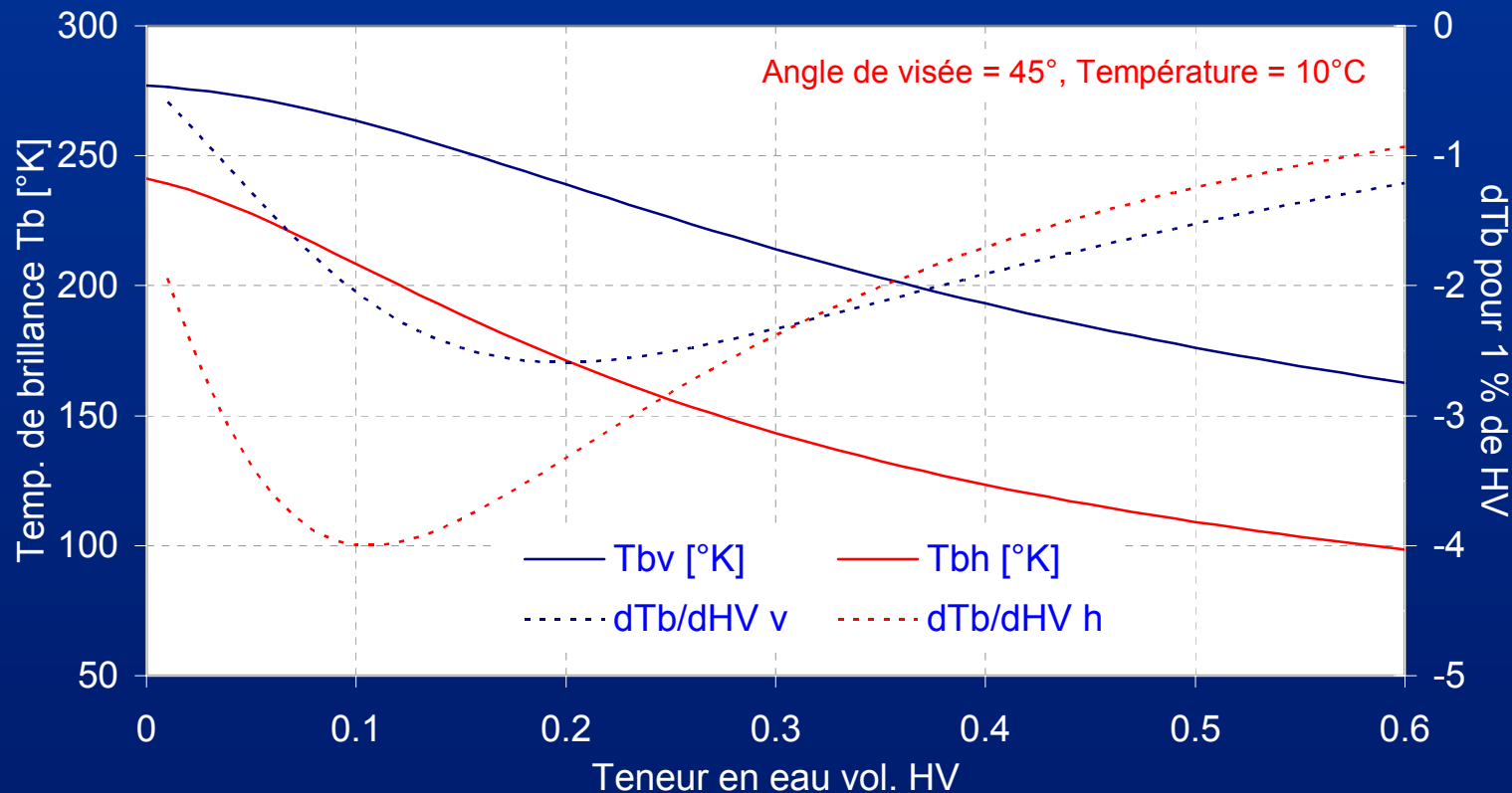
Radiométrie et teneur en eau des sols

- Un sol n'est pas un corps noir :
 - $T_b = e.T$, e : **émissivité** < 1
- Son émissivité e est reliée via les relations de Fresnel (1788-1827) à sa **permittivité électrique** ε :

$$r_V = \left| \frac{\varepsilon \cos \theta - \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta}}{\varepsilon \cos \theta + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta}} \right|^2 \quad r_H = \left| \frac{\cos \theta - \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta}} \right|^2$$

$r = 1 - e$, réflectivité ; θ : angle d'incidence

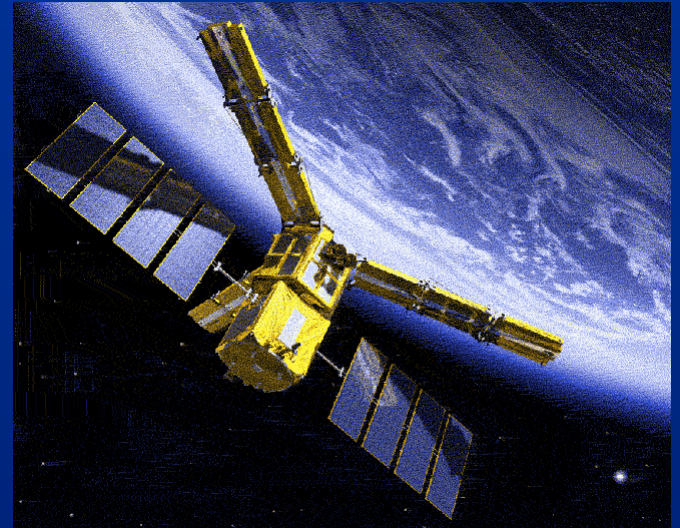
Relation teneur en eau / température de brillance pour un sol, sensibilité



*Polynôme de Topp
Permittivité réelle*

Le projet SMOS

- 1.4 GHz (bande L)
- Synthèse d'ouverture
- Coordonné depuis 1998 par Y. Kerr du CESBIO à Toulouse
- Prototype LEWIS conçu et réalisé par F. Lemaître à l'ONERA
- Projet SMOSREX

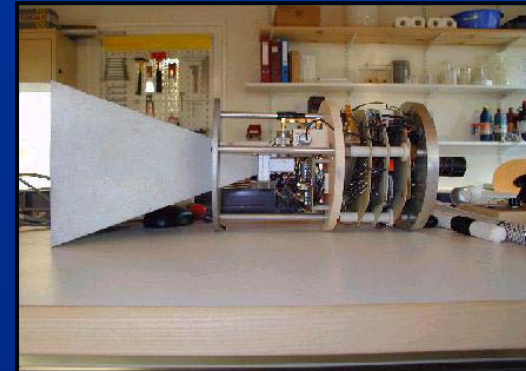


<http://www.cesbio.ups-tlse.fr/us/indexsmos.html>

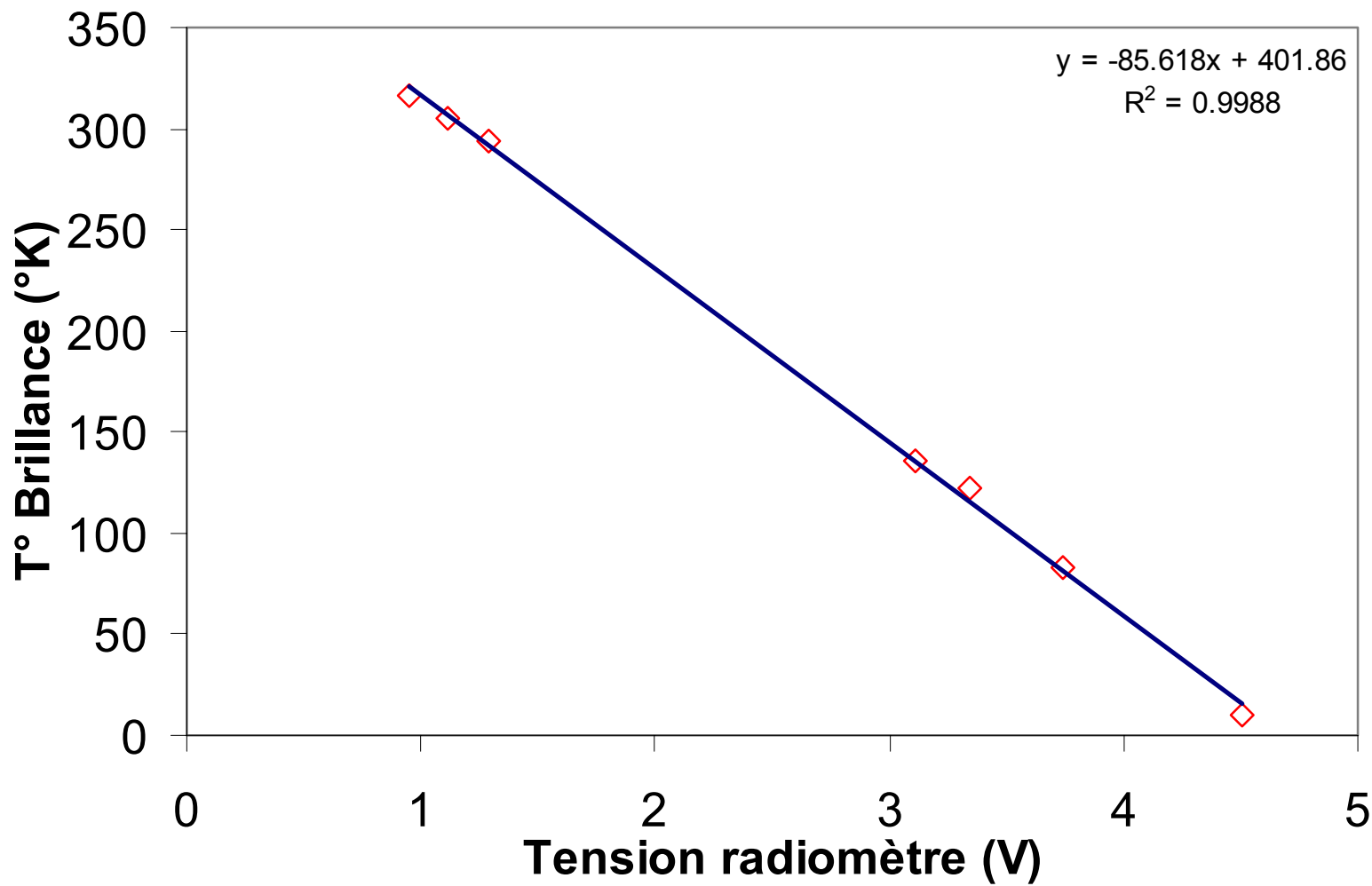
http://www.cesbio.ups-tlse.fr/us/SMOS-doc/smosrex_poster.pdf

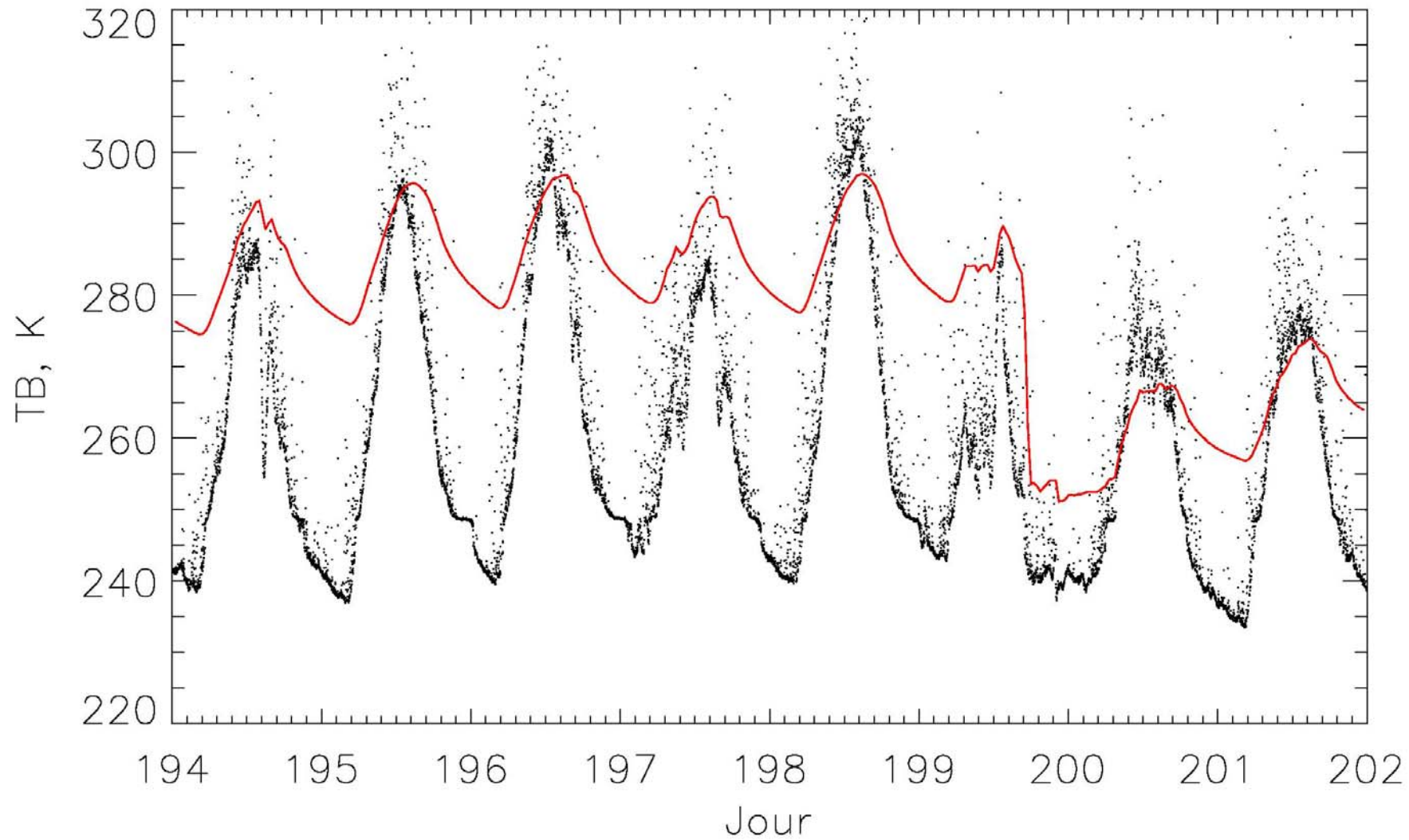
La radiométrie μ -ondes au LTHE

- 2001:
 - Récupération du radiomètre à 4.3 GHz « MaRMOTte » développé par le Cesbio, l'INRA, et l'IEMN :
 - Étalonnage (à l'INRA)
 - Hors service (2002)
- 2004:
 - Lancement d'un nouveau projet de radiomètre portable (2,6 GHz) : projet NCHS de ECCO
- 2005:
 - Remise en état de MaRMOTte : MaRMOT4.3



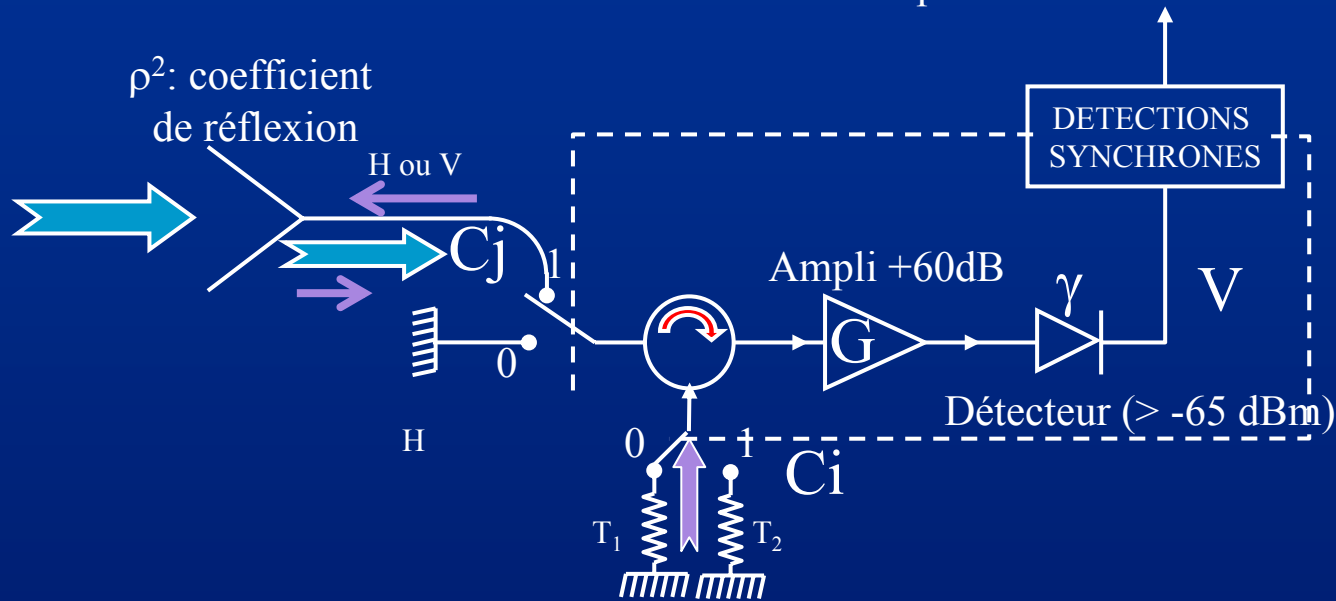
Cohard, J.-M. et al., 2005. Développement de radiomètres microondes pour la mesure des teneurs en eau de surface : mise au point et premiers tests d'un radiomètre à 4.3 GHz (bande C), 1er colloque de restitution scientifique du Programme National coordonné ANR/ECCO, Toulouse, 5-7 Décembre 2005.





NCCHS/MaRMOT2.6 : Architecture

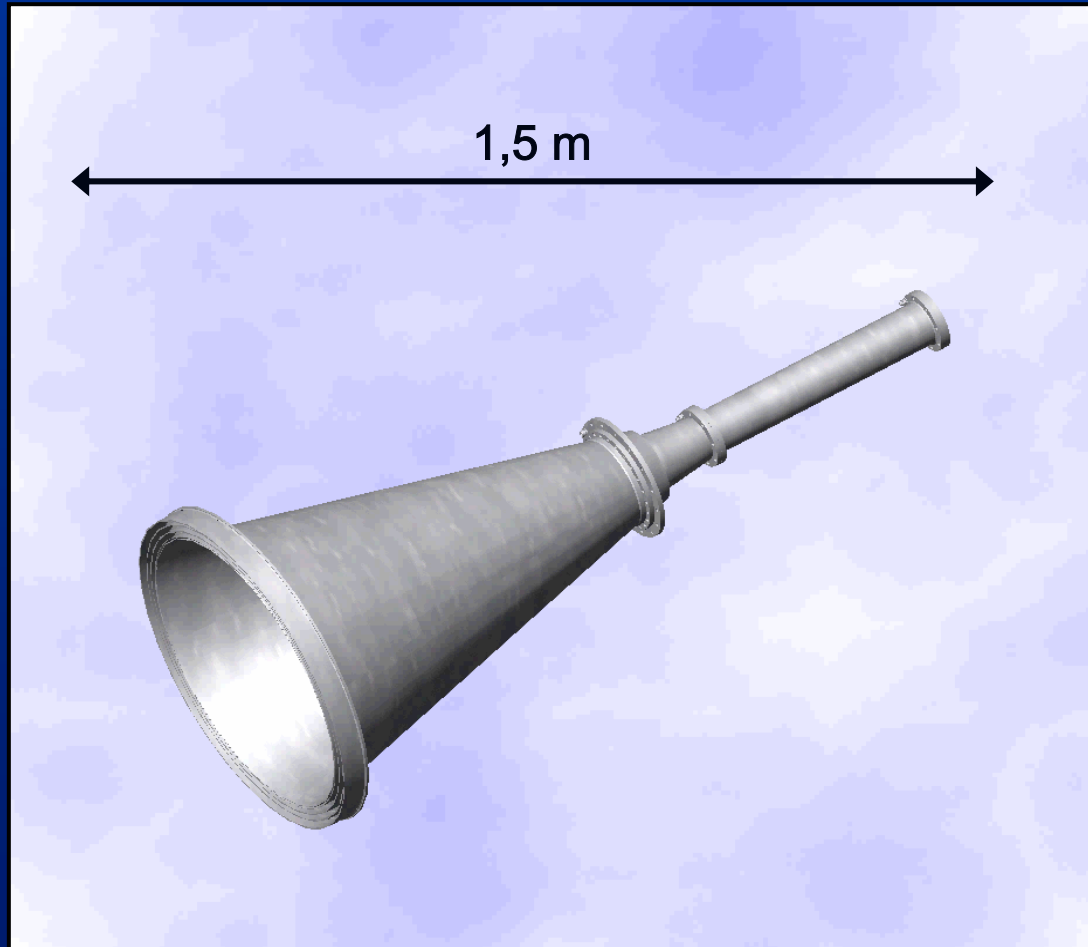
Radiomètre de Hach ou
Radiomètre à double pesée



$$\begin{aligned}
 C_i = 0, C_j = 0 &\rightarrow V_{00} = k \cdot \Delta f \cdot G \cdot \gamma \cdot T_1 \\
 C_i = 0, C_j = 1 &\rightarrow V_{01} = k \cdot \Delta f \cdot G \cdot \gamma \cdot ((1 - \rho^2) T_B + \rho^2 T_1) \\
 C_i = 0, C_j = 1 &\rightarrow V_{10} = k \cdot \Delta f \cdot G \cdot \gamma \cdot T_2 \\
 C_i = 1, C_j = 1 &\rightarrow V_{11} = k \cdot \Delta f \cdot G \cdot \gamma \cdot ((1 - \rho^2) T_B + \rho^2 T_2)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_{01} - V_{00} &= k \cdot \Delta f \cdot G \cdot \gamma \cdot ((1 - \rho^2) (T_B - T_1)) \\
 V_{11} - V_{10} &= k \cdot \Delta f \cdot G \cdot \gamma \cdot ((1 - \rho^2) (T_B - T_2))
 \end{aligned}$$

MaRMOT2.6 : l'antenne



Spectroscopie diélectrique

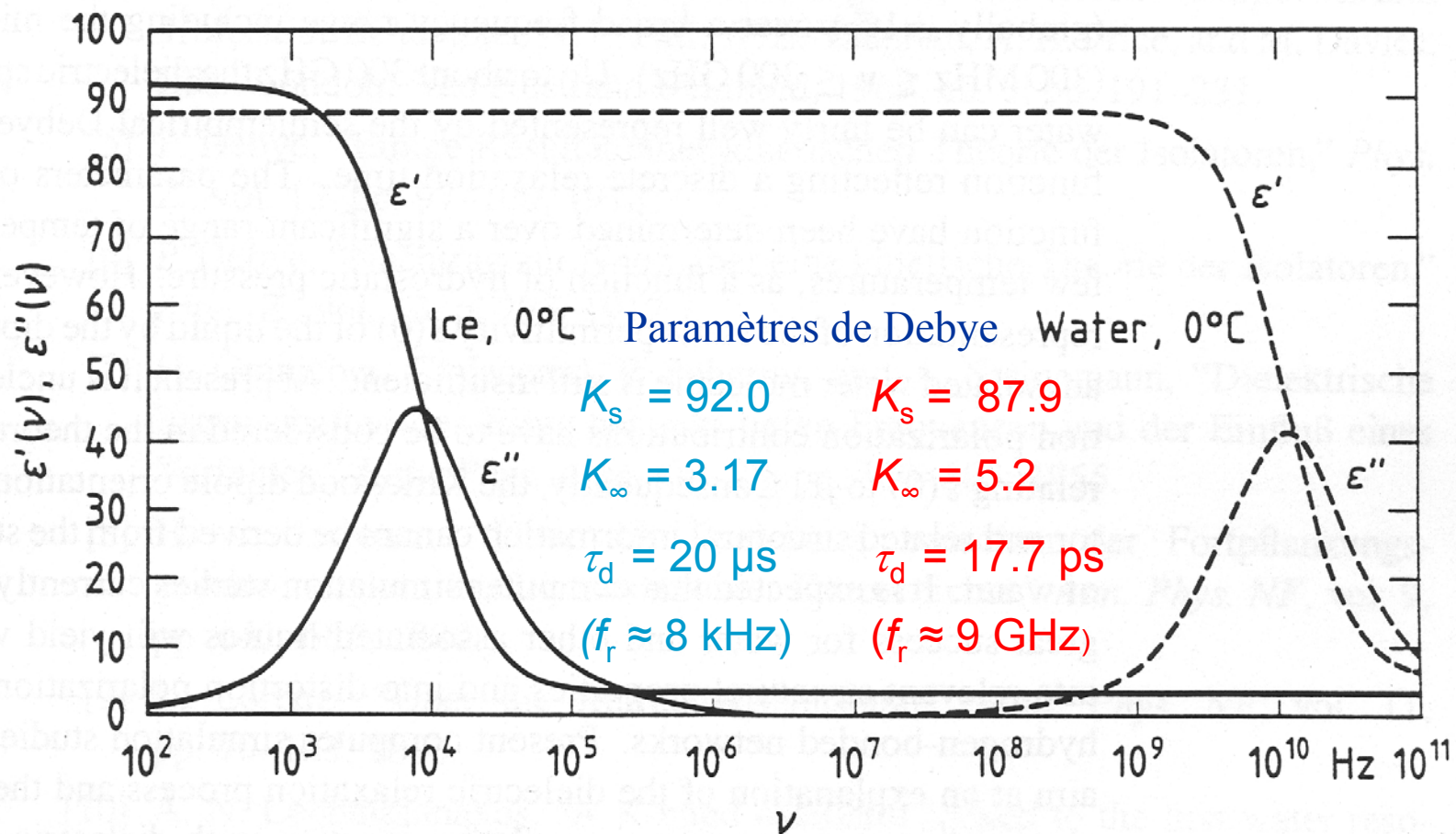
- Principe :

- Mesurer parties réelle et imaginaire de la permittivité électrique en fonction de la fréquence

- Intérêt :

- Accéder à une caractérisation de l'état de liaison de l'eau dans un milieu poreux

Permittivité de l'eau liquide et de la glace



U. Kaatz in « Microwave aquametry », A. Kraszewski Ed., IEEE Press, 1996.

Principe de la spectroscopie diélectrique appliquée à partir de signaux TDR (TDS)

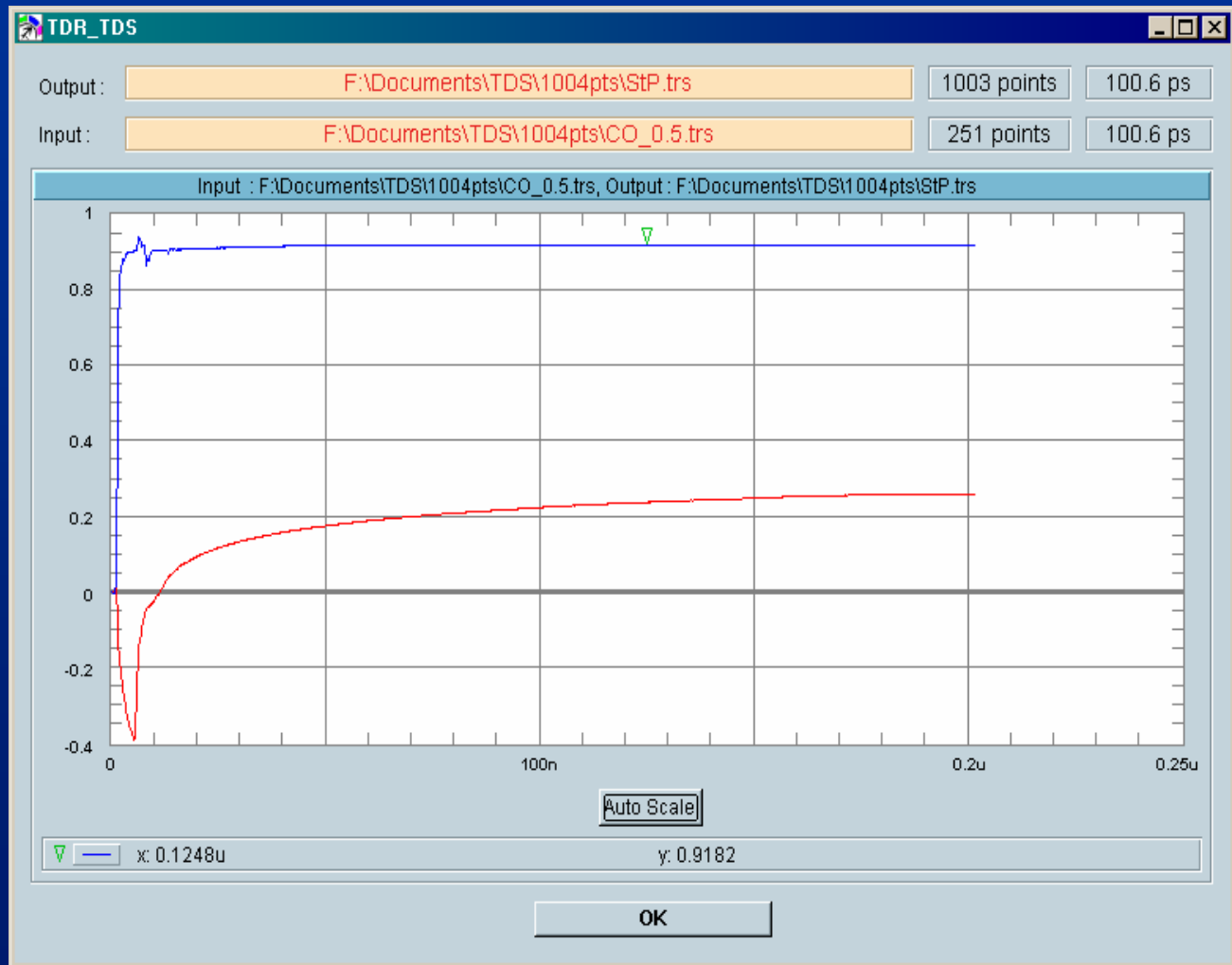
- Signal TDR $V(t) = e(t) + s(t)$
Entrée Sortie

- Calcul du “paramètre S” S_{11} :

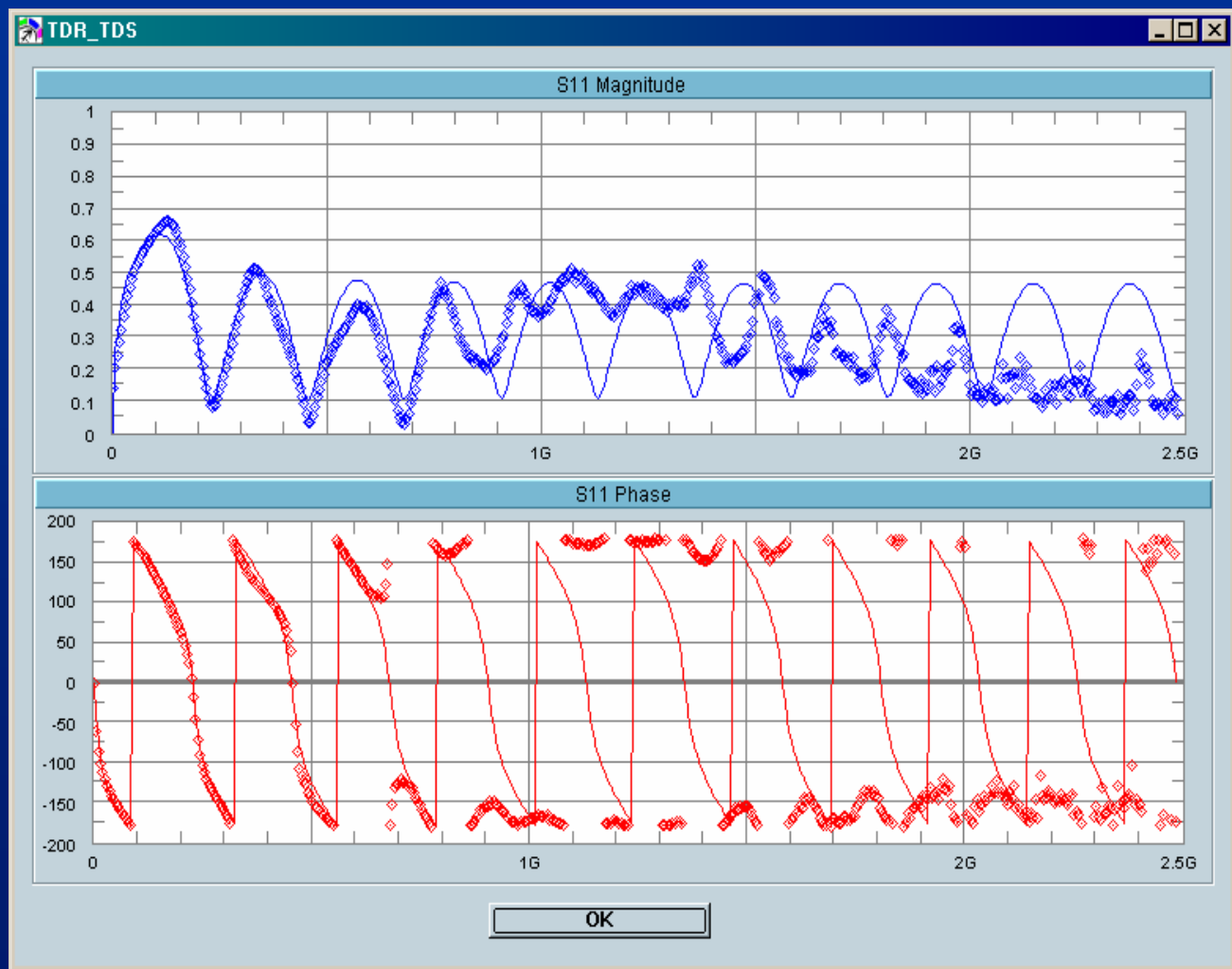
$$S_{11}(f) = \frac{\text{TF}[s(t)]}{\text{TF}[e(t)]}$$

- Identification des paramètres K_s , K_∞ , f_r , σ d'un modèle de Debye en utilisant une fonction $\underline{S}_{11}(f, K_s, K_\infty, f_r, \sigma)$ adaptée.

Exemple : Sol "B", $\theta = 29.2\%$, signaux TDR



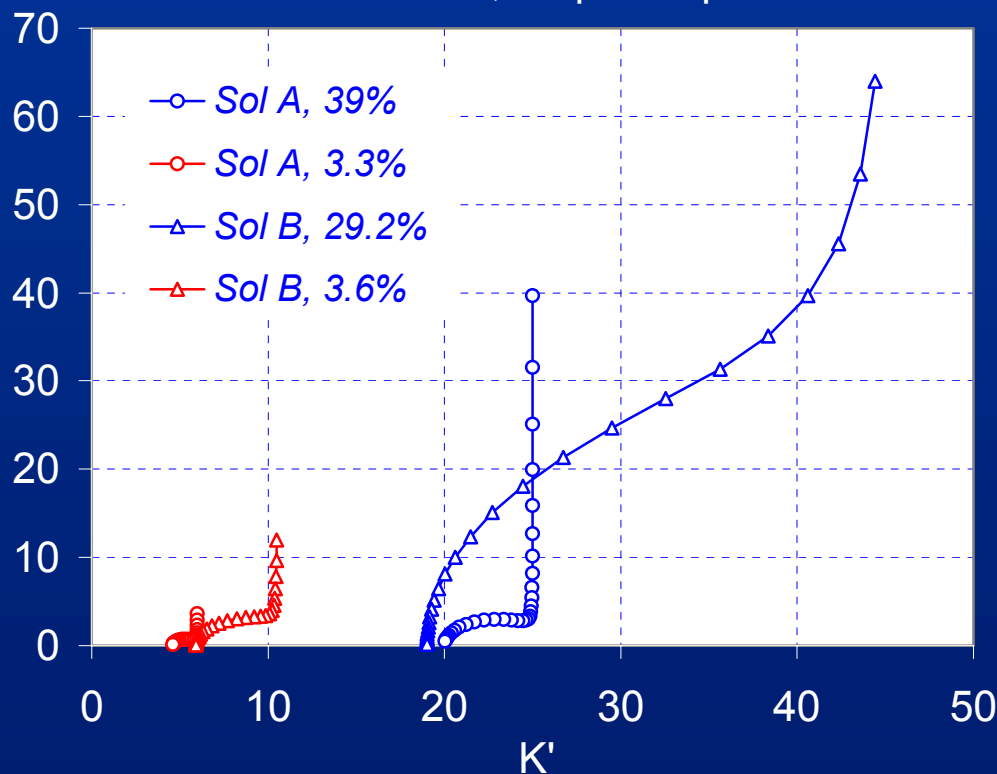
Exemple : Sol "B", $\theta = 29.2\%$, paramètre S_{11}



$$K_0 = 46, K_\infty = 19, f_r = 40 \text{ MHz}, \beta = 0, \sigma = 32 \text{ mS/m}, L_s = 15.2 \text{ cm}, Z_{sa} = 147 \Omega$$

Exemple d'interprétation de résultats de TDS sur des sols

10 MHz -> 10 GHz, 10 points par décade



Modèle de Debye avec conduction
+ résultats de TDS :

	θ %	K_0	K_∞	f_r MHz	σ mS/m
A	39	25	20	900	22
	3.3	6	4.6	950	2
B	29.2	46	19	40	32
	3.6	10.5	2.9	160	6.5

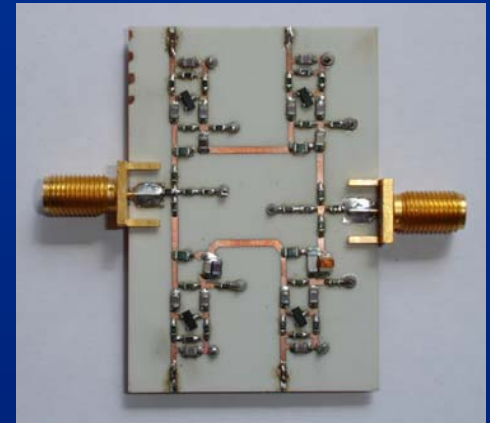
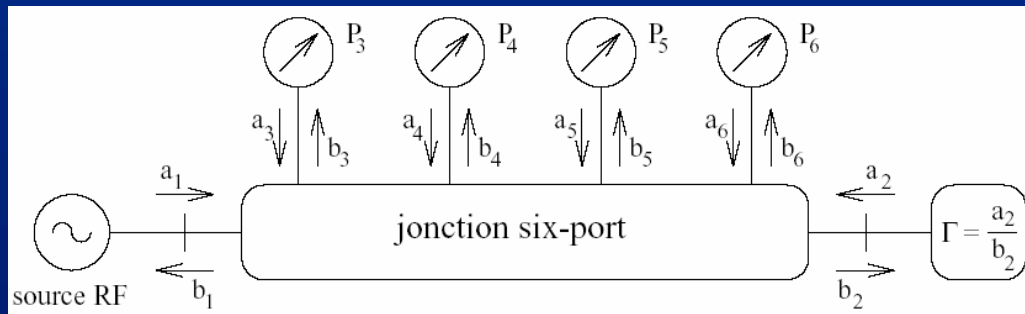
J.P. Laurent, P. Ferrari., 4th Int. Conf. on Electromagnetic Wave Interaction with water and moist substances, Weimar, 13-16 Mai.2001

Avantages et inconvénients de la TDS

- Utilisable in-situ
- Matériel TDR largement répandu
- Spectre de fréquence mal adapté
- Effets perturbateurs des différents éléments de la ligne
- Interprétation délicate en termes de modèle de relaxation
- Une solution :
 - Revenir à des mesures fréquentielles du coefficient de réflexion complexe : analyseur vectoriel (VNA)

Une alternative pour la mesure du coefficient de réflexion : le « six-ports »

- Principe :
 - Disposer 4 détecteurs sur une ligne de transmission



Hesselbarth, J., Wiedmann, F. and Huyart, B., 1997. Two new six-port reflectometers covering very large bandwidths. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 46: 966-969.

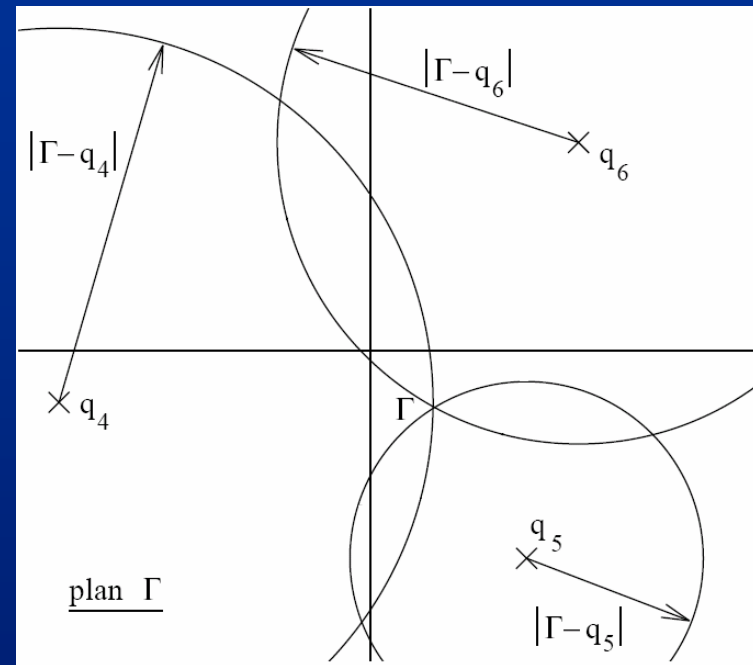
Wiedmann, F., 1997. *Développements pour des applications grand public du réflectomètre six-ports : algorithme de calibration robuste, réflectomètre à très large bande et réflectomètre intégré MMIC*, Thèse ENS Telecom-Paris.

Le six-port

- Méthode de mesure :

$$|\Gamma - q_i|^2 = K_i \frac{P_i}{P_3}; i = 4, 5, 6$$

- Intersection de 3 cercles
- Les K_i et q_i sont déterminées par calibrage

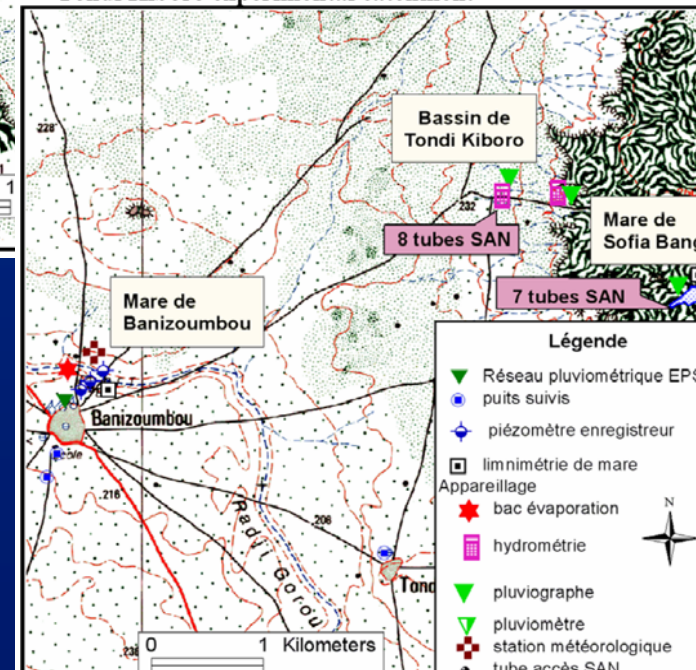
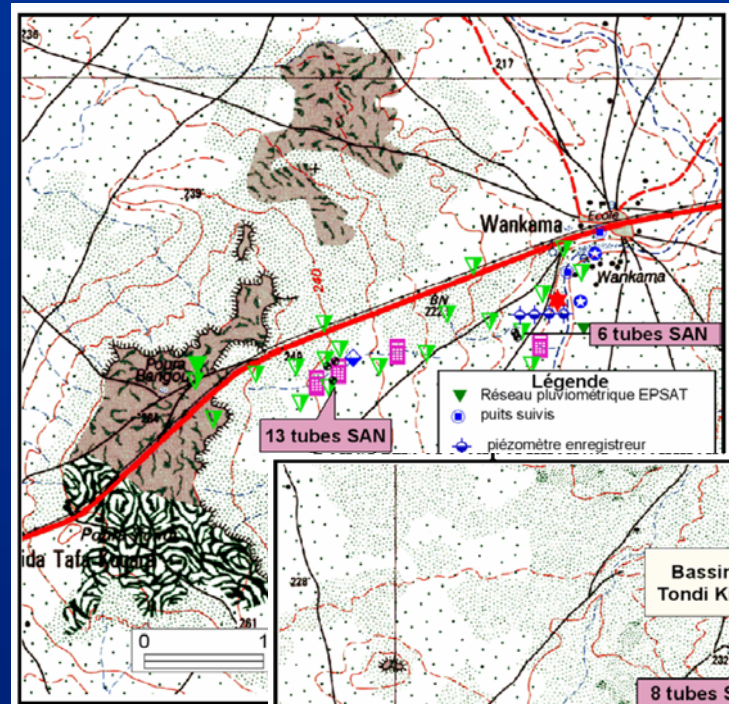
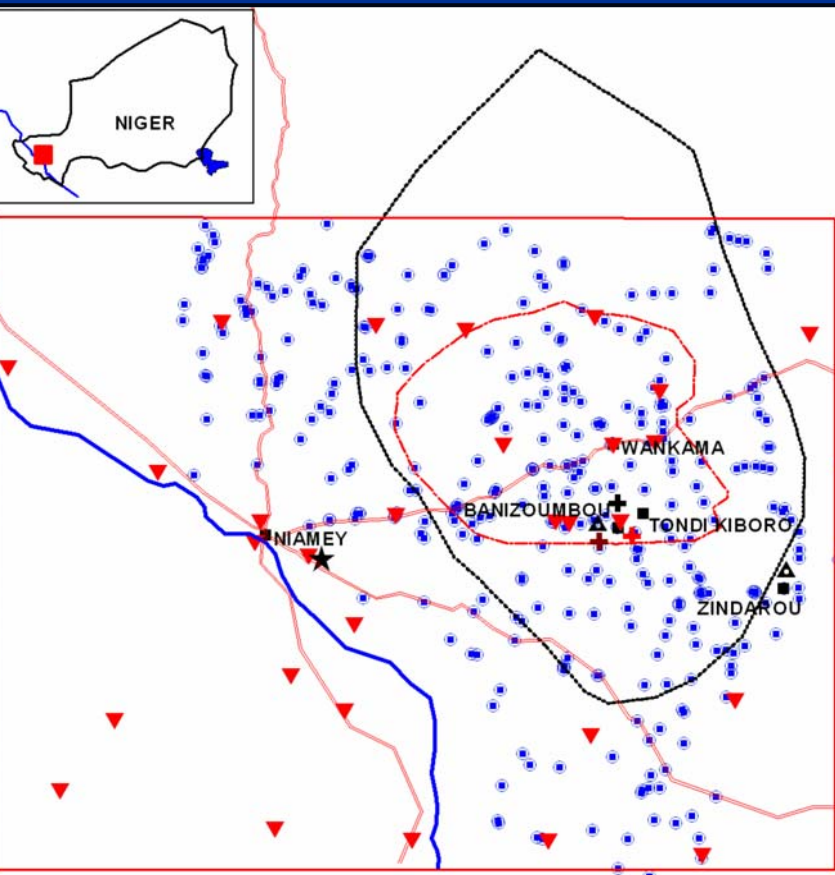


4. L'hydrogéophysique au LTHE :

Implication dans les observatoires, la nouvelle équipe HGP, projets, sites & chantiers, Envirhonalp...

L'hydrogéophysique LTHE dans AMMA

Niger



<http://amma.mediasfrance.org/>



*Station de suivi des flux d'eau dans les sols, Wankama (Niger)
Laurent, J.-P., Descroix, L., Boubkraoui, S. and Allassane, H., 2006
Stratégies de suivi des transferts d'eau dans les sols mises en œuvre sur le site de méso-échelle de Niamey*



Station de suivi des flux d'eau dans les sols, J.P. Laurent, S. Galle, Nalohou (Bénin)

Galle, S. et al., 2005. Bilan hydrique stationnel sur le bassin versant de la Donga (Bénin). Premiers résultats sur les stations de jachère et de forêt claire., African Monsoon Multidisciplinary Analysis 1. Int. Conference, Dakar, 28th nov.-4 th dec. 2005



Estimation des flux turbulents à l'échelle d'un petit bassin versant. Bassin d'ARA (Béni

L'hydrogéophysique au LTHE : perspectives et projets pour la période 2006-2007

- Structuration d'une équipe **HydroGéoPhysique** :
 - Deux recrutements, arrivée de trois chercheurs IRD
 - Importants développements métrologiques :
 - Radiométrie, Spectroscopie diélectrique, **RMP**
- De nouveaux thèmes de recherche :
 - Caractérisation des aquifères
 - RMP : nouveaux instruments (ZNS), inversion
- Des nouveaux chantiers :
 - Lac Luitel (pôle grenoblois « biodiversité ») ...
 - Inde, Sri-Lanka : projet « Post-Tsunami » avec AcF
 - Ouzbekistan, Alhambra de Grenade (Unesco, CRA Terre)
- Recherche d'un site pilote de proximité:
 - Vercors, Ardèche (Pradel) ...
- Projets fédérateurs :
 - AMMA, OHMCV
 - Plateau « PS2E » de Envirhonalp



Lac Luitel



Sri Lanka



Vercors



Alhambra

Merci de votre attention !

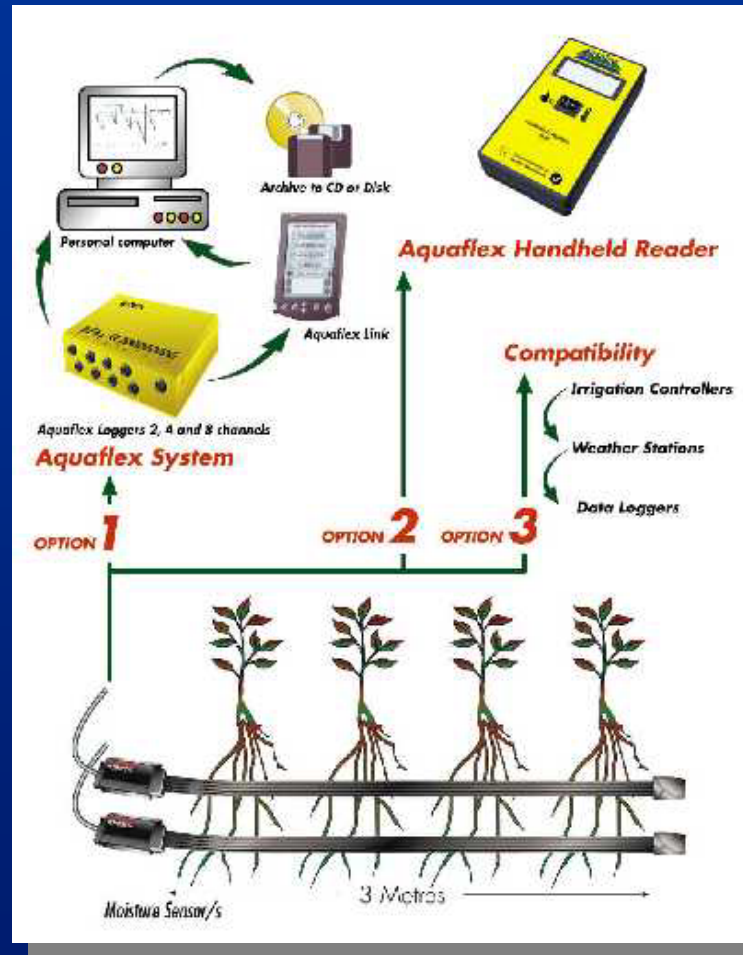


Diapositives complémentaires

- Systèmes TDR
- Sondes capacitives

Appareils TDR

Streat Instruments - Aquaflex



<http://www.streatsahead.com/Pages/Aquaflex%20Menu.html>



Campbell Scientific -TDR100

Logiciel de traitement PCTDR

CR10X + TDR100 + multiplexeur SDM50

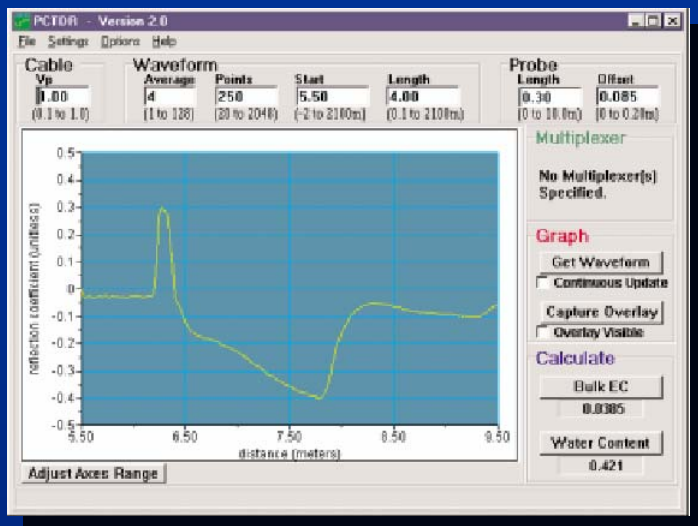


Illustration Campbell Scientific

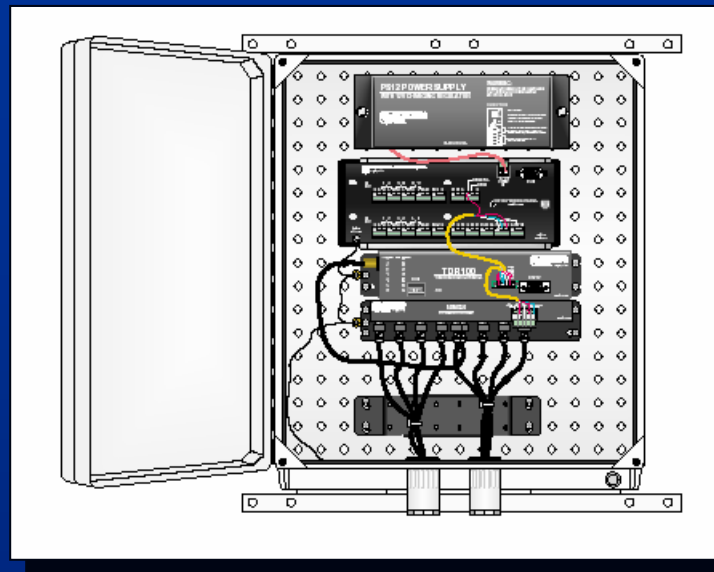


Illustration Campbell Scientific

Illustration Campbell Scientific



environ 500 €
 + 600 € : SMX50
 + 100 € / sonde CS605/10

<http://www.campbellsci.com/tdr.html#tdr100>



ESI - Moisture-Point

Illustration E.S.I

- **Système TDR :**
 - Sondes à diodes commutées
 - Autonome.
 - Traitement intégré (différentiel)
 - ≈ 4.5 k€+ sondes.
 - Sondes type « canne » jusqu'à 1.5 m

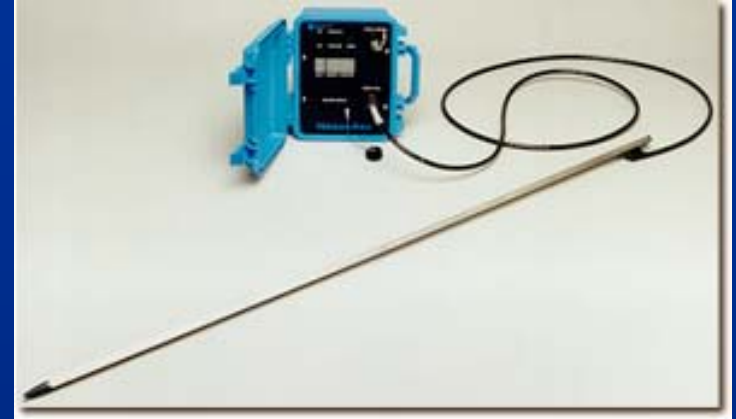
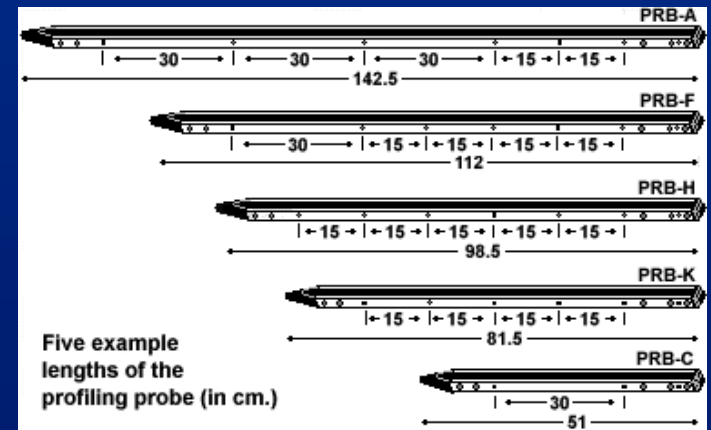


Illustration E.S.I



<http://www.esica.com/products/moisture/index.html>



Imko -TRIME

- Appareil TDR :
 - Presse-bouton.
 - Autonome.
 - Traitement intégré
 - TRIME FM-3 : 3500 € (23 kF) + sonde T3 : 1200 € (8 kF)
 - Sondes bitiges tritiges et tube, gainées.
 - Système distribué en France par SDEC-France

<http://www.imko.de/>



TRIME-FM + sonde T3



Soilmoisture Equipment Corp. - TRASE

Illustration SEC

- Appareil TDR :
 - Echelon 75 ps, 1.5 V
 - 12 bits, 1200 pts sur 12 à 96 ns
 - Autonome
 - Traitement intégré
 - ≈ 14 k€ (90 kF)
 - Sondes bitiges (Connector : 917 €), tritiges (Burable : 80 €), gainées ou non
 - Distribué en France par Sols Mesures



TRASE S1 + sonde « burable »

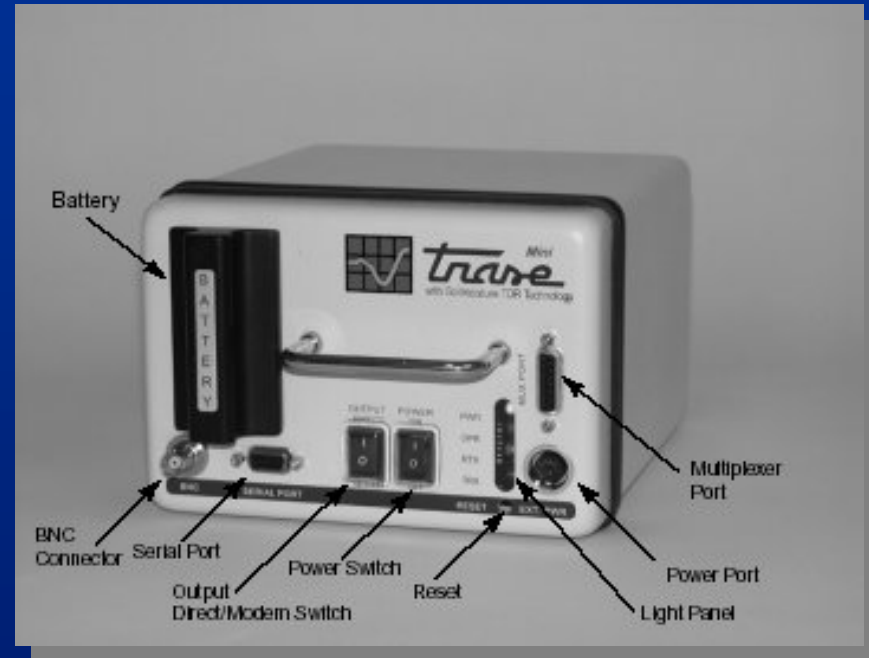
<http://www.soilmoisture.com>



Soilmoisture Equipment Corp. - miniTRASE

Illustration SEC

- Appareil TDR :
 - Identique « TRASE system 1 »
 - Commande avec un PDA de type Palm
 - ≈ 10 k€
 - Distribué en France par Sols Mesures



<http://www.soilmoisture.com>



Sondes TDR

Buriable de SoilMoisture Eq. Corp

20 cm : 81 €

8 cm : 121 €

Trase S1 ≈ 14000 €



Connector de SoilMoisture Eq. Corp

Tête seule : 917 €



<http://www.soilmoisture.com>



CS605 de Campbell Scientific

CS605 : 88 €

Systeme TDR 100 : 4552 €

CS616 (active) : 218 €

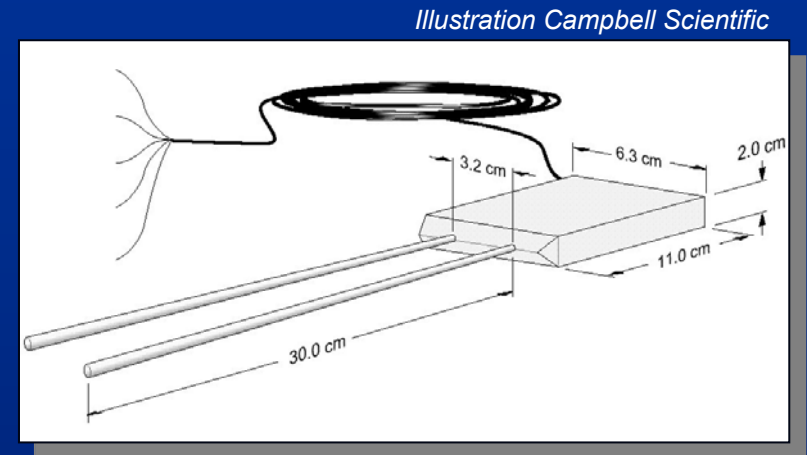
<http://www.campbellsci.com/tdr.html#tdr100>



Sondes capacitives

Campbell Scientific - CS616

- Sonde TDR :
 - Electronique intégrée
 - Sortie : impulsions
 - 30 cm
 - ≈ 200 €



<http://www.campbellsci.com/soilvol.html#cs616>



Decagon - Ech2o

Illustration Decagon



Illustration Decagon

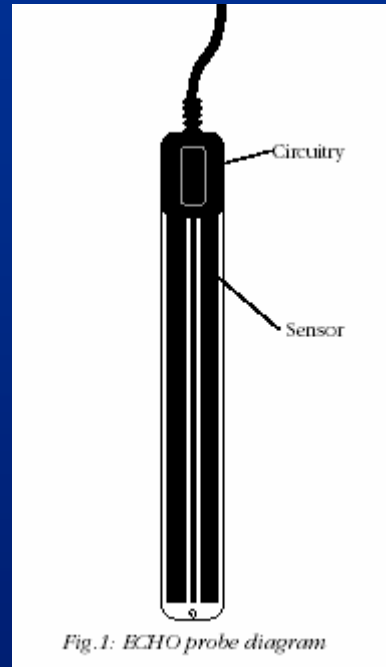


Illustration Decagon



Distribué en France par
Sols Mesures (≈ 250 €)

<http://www.ech2o.com/>



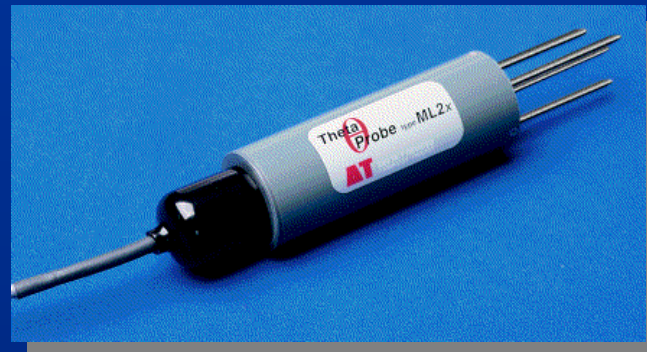
Delta-T Devices – Profile & Theta Probes

Illustration Delta-T



Profile-Probe

Illustration Delta-T



Theta-Probe

Illustration Delta-T



Equitensiometer

www.delta-t.co.uk



Delta-T Devices – WET Sensor

Illustration Delta-T

- Distribué en France par Sols Mesures

Illustration Delta-T



http://www.delta-t.co.uk/frame/submenu/wet_sensor.html



Sentek – Diviner 2000



Illustration Sentek

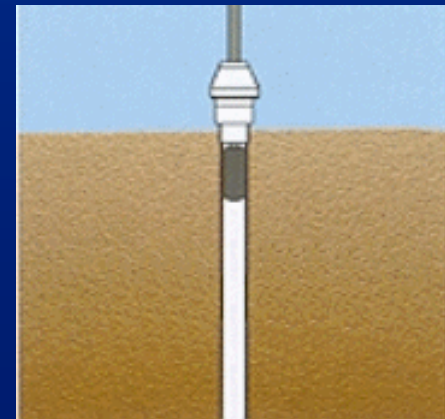


Illustration Sentek

<http://www.sentek.com.au/products/diviner.asp?lang=en>



Sentek – Enviroscan & Envirosmart

- Mise en œuvre dans des tubes d'accès PVC Ø 2" intérieur.
- Distribué en France par Campbell Scientific.
- Environ 1500 € par profil.

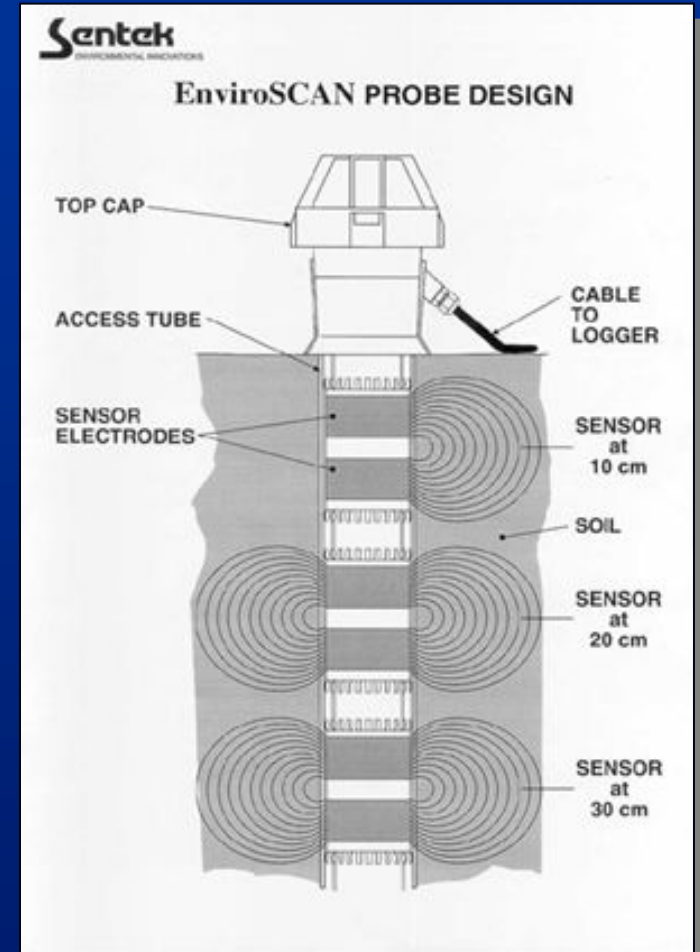


Illustration Sentek

<http://www.sentek.com.au/products/easyag.asp?lang=en>
http://www.campbellsci.com/soil_profile.html



Sentek – EasyAG

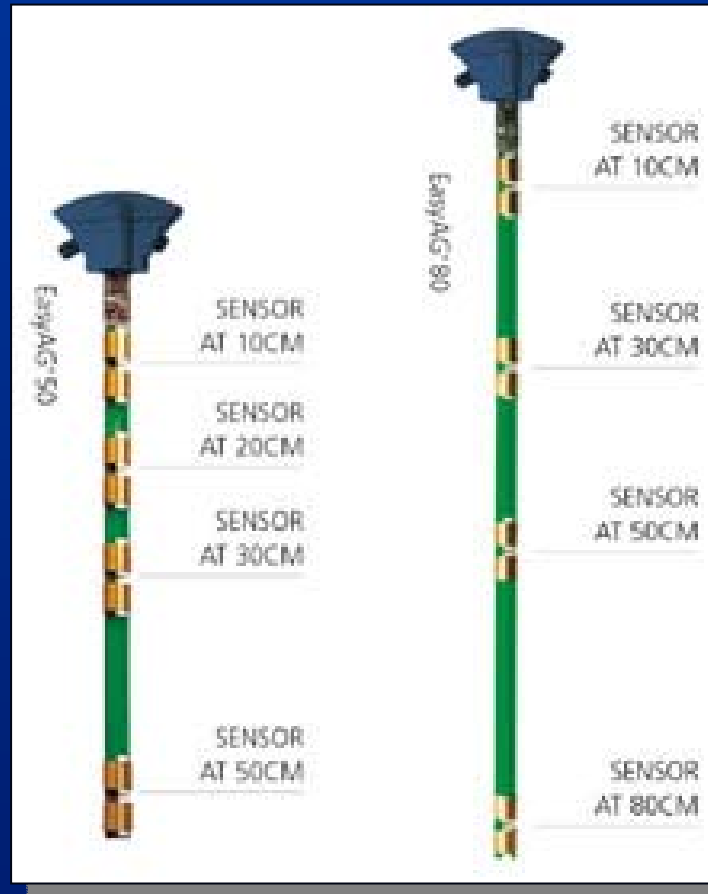


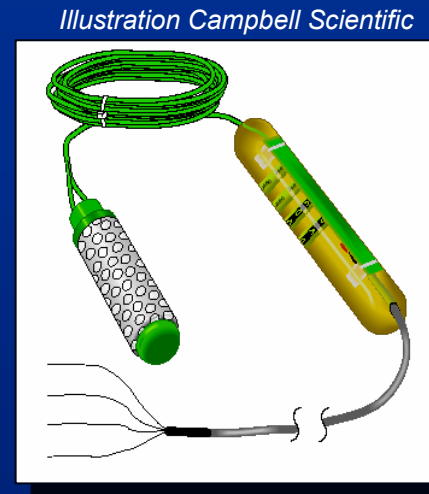
Illustration Sentek

<http://www.sentek.com.au/products/enviroscan.asp?lang=en>
http://www.campbellsci.com/soil_profile.html

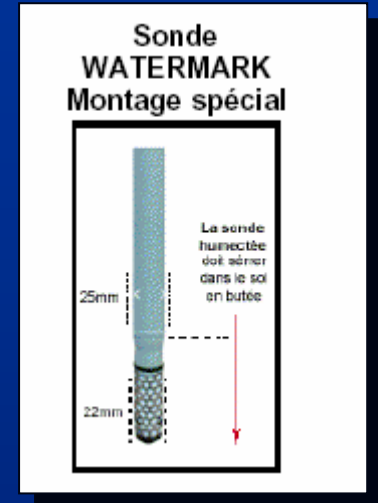


Irrrometer - Watermark

- Fabriquée aux USA par Irrrometer
- Distribué par Campbell Scientific et, en France par Challenge Agriculture



Ref. 257 vendue par
Campbell Scientific
(≈ 120 €)



Système
commercialisé par
Challenge Agriculture
(≈ 30 €)

<http://www.irrometer.com/agcat.htm>
<http://www.campbellsci.com/soilwatr.html>
<http://sites.terre-net.net/cha/watermark.htm>



SDEC-France - HMS9000

Illustration SDEC-France

- Sonde capacitive :
 - $f \approx 60$ MHz
 - Sortie analogique 4-20 mA.
 - Sortie numérique RS232
 - Compensation en température
 - ≈ 450 €



<http://www.sdec-france.com/produits.php?lg=fr&numprod=117>



Stevens Water Monitoring Systems Inc. Hydra-Probe



http://www.stevenswater.com/soil_moisture_sensors/index.aspx



Modèle de relaxation de Debye

$$K(f) = K_{\infty} + \frac{K_s - K_{\infty}}{1 + \left[i \frac{f}{f_r} \right]^{1-\beta}} - i \frac{\sigma}{2f\pi\epsilon_0}$$

- f : fréquence
- K_s : permittivité relative statique
- K_{∞} : permittivité relative à haute fréquence
- f_r : fréquence de relaxation
- β : coefficient de dispersion sur f_r
- σ : conductivité électrique



S_{11} model

$$H(f) = \frac{Z^*(f) - Z_c}{Z^*(f) + Z_c} = S_{11}(f)$$

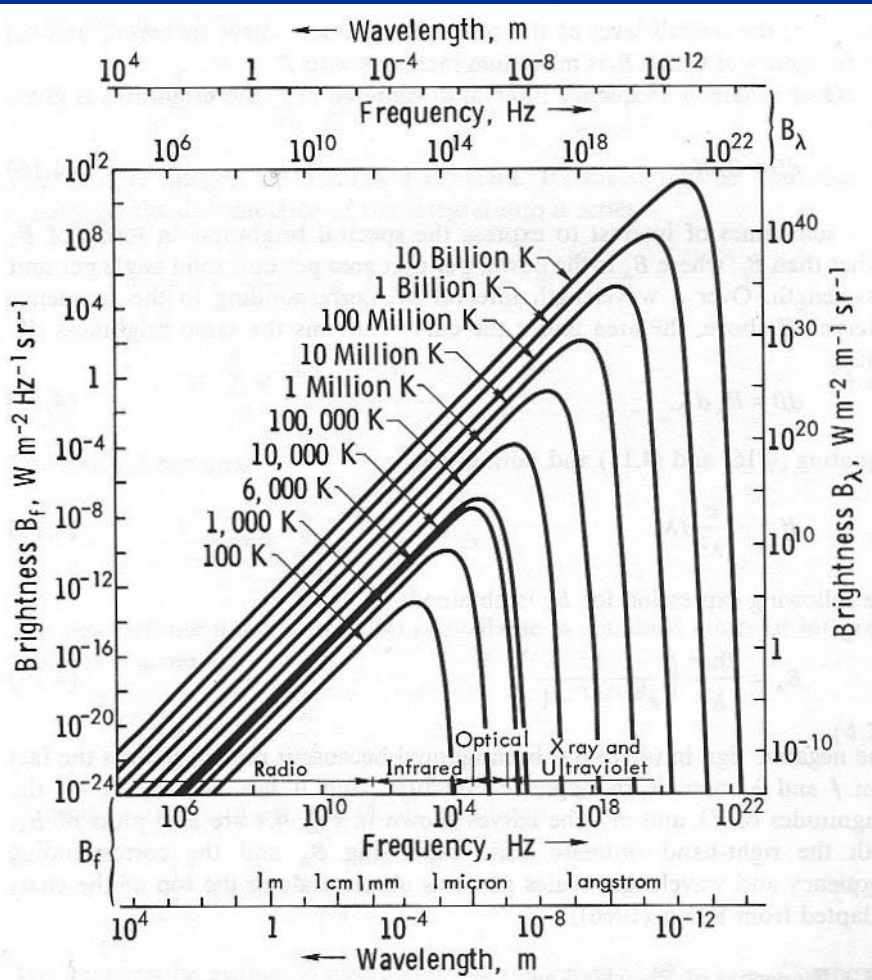
$$Z^*(f) = \frac{Z_p}{\sqrt{K}} \frac{1}{\text{th}(\gamma L)} = \frac{Z_p}{\sqrt{K}} \frac{1 + e^{-2\gamma L}}{1 - e^{-2\gamma L}} \quad : \text{open end}$$

$$\gamma = i \frac{2\pi f \sqrt{K}}{c} \quad : \text{propagation constant}$$

$$\text{Coaxial probe : } Z_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \ln \left[\frac{d}{D} \right] \approx 60 \ln \left[\frac{d}{D} \right]$$



Rayonnement du corps noir :



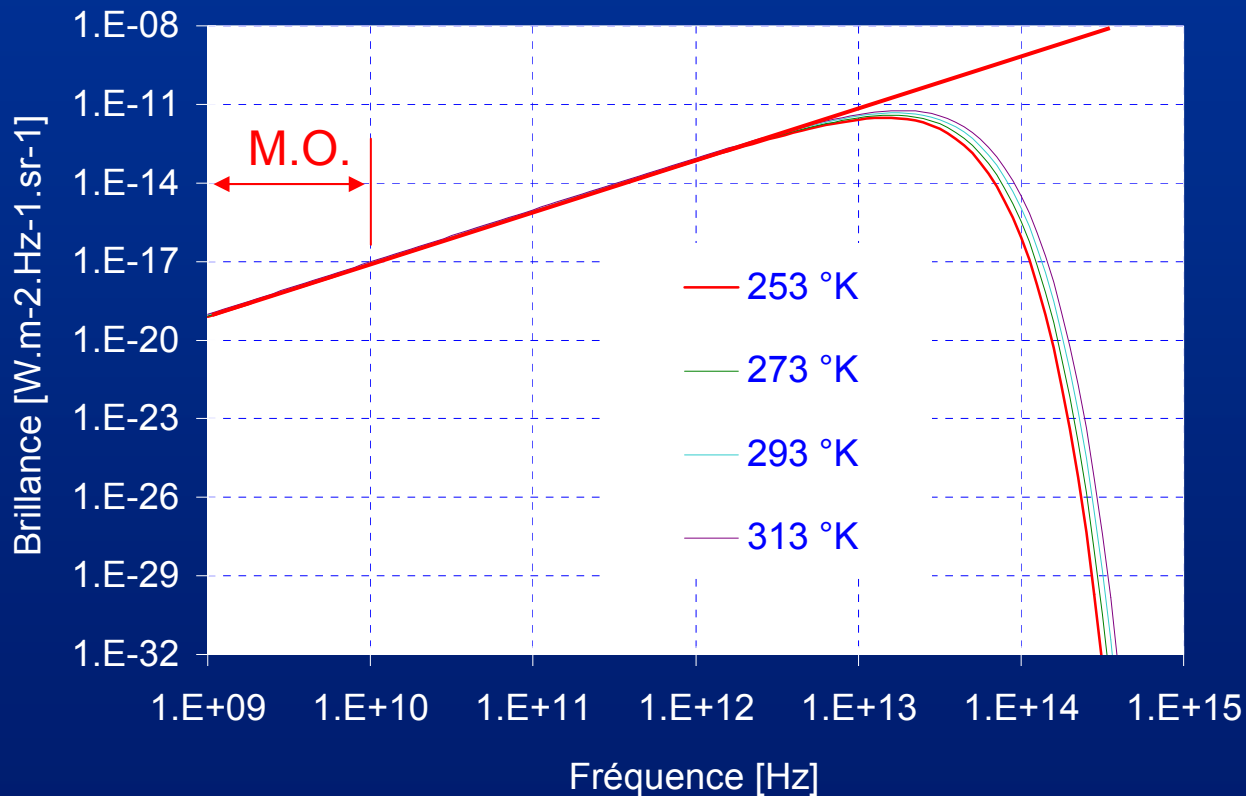
Loi de Planck (1858-1947) :

$$B_f = \frac{2hf^3}{c^2} \frac{1}{\exp\left(\frac{hf}{kT}\right) - 1}$$

Fig. 4.4, Ulaby, page 193



Approximation de Rayleigh-Jeans



$$B_f = \frac{2kT}{\lambda^2}$$

$$P = k.T_b.\Delta f$$

T_b : température de
brillance mesurée
en radiométrie
microondes



