

**NEUVIEME REUNION DU GROUPE DE REFLEXION
SUR L'ETUDE DE LA SOLUTION DU SOL
EN RELATION AVEC L'ALIMENTATION DES PLANTES
(GRESSAP)**

ORSTOM Montpellier - 10 septembre 1996

**Compte rendu de la 9^{ème} réunion du
Groupe de Réflexion sur l'Etude de la Solution du Sol
en relation avec l'Alimentation des Plantes**

Mardi 10 Septembre 1996 - Montpellier

La 9^{ème} réunion du GRESSAP s'est déroulée comme l'année dernière dans la salle du Conseil d'Agropolis International. Cette réunion a rassemblé près de 30 chercheurs du CIRAD, du CNRS, de l'INRA et de l'ORSTOM venus de différentes régions de France, voire d'au-delà nos frontières. Nous avons ainsi eu le grand plaisir de compter parmi nous le Professeur LAUDELOUT dont les travaux sur la modélisation des processus physico-chimiques font autorité.

La séance a été ouverte par Roland POSS. Ce dernier a tenu à rappeler l'importance du rôle que Jean-François VIZIER, qui a pris sa retraite en 1995, a joué dans la construction et l'animation du GRESSAP. Puis il annonçait que Roland MOREAU s'était joint au groupe d'animation. Une discussion sur les différents rôles que pouvait jouer le GRESSAP s'est engagée, en particulier en ce qui concerne l'initiation de projets nouveaux et l'incitation à participer activement aux symposiums consacrés en tout ou partie aux problèmes liés à la solution du sol dans le cadre du prochain Congrès International de Science du Sol de Montpellier. La majorité des participants a souhaité que la réunion annuelle du GRESSAP conserve son caractère informel et continue à jouer son rôle de structure d'échange entre spécialistes.

La matinée a été consacrée à la session *Modélisation des processus physico-chimiques dans le sol : méthodes, intérêts et limites*, sous la présidence de Benoît JAILLARD. Elle a compris les exposés suivants :

- *Modélisation de l'acidification des sols : intérêts et limites*, exposé introductif d'Etienne DAMBRINE.

- *Apports de la modélisation thermodynamique dans l'étude des propriétés chimiques des eaux acides*, de Mirla CORNIELES, Vincent VALLES, Luis AUQUE, Alain AVENTURIER et Bernard REYNIER, présenté par Mirla CORNIELES.

- *AQUA, logiciel de géochimie appliqué aux problèmes environnementaux*, de Vincent VALLES, Olivier RIBOLZI, Anne-Marie de COCKBORNE et Mirla CORNIELES, présenté par Vincent VALLES.

- *GEOCHEM/SOILCHEM, logiciel de référence*, présenté par Alain AVENTURIER.

Les exposés de cette matinée ont donc été consacrés à deux types principaux de modèles. Les *modèles empiriques*, qui ont constitué le coeur de l'exposé d'Etienne DAMBRINE, présentent l'avantage de bien rendre compte de la plupart des observations de terrain, puisqu'ils sont construits directement à l'échelle où se déroulent les phénomènes observés. En contrepartie, chacune de leur application nécessite un étalonnage effectué sur le terrain où on les utilise. Les *modèles déterministes*, qui constituent l'objet des logiciels géochimiques présentés au cours de cette session, reposent sur l'application des lois de la thermodynamique. L'expérience montre que, s'ils constituent de remarquables outils d'analyse lorsque les conditions sont bien définies, leur utilisation est assez décevante dès qu'il s'agit d'appréhender le fonctionnement de systèmes complexes tels que des écosystèmes. Le Professeur LAUDELOUT soulignait d'ailleurs

que ces modèles supposent la réversibilité et l'équilibre des processus, deux conditions qui sont pour notre malheur rarement vérifiées dans les systèmes naturels.

Enfin, l'importance de la dynamique des gaz, du CO₂ en particulier, dans la détermination du fonctionnement physico-chimique des sols a été soulignée à plusieurs reprises. Plusieurs d'entre nous ont insisté sur l'intérêt d'un couplage entre dynamique du CO₂ du sol et dynamique de l'eau, en particulier dans les systèmes salins carbonatés, ou à l'inverse dans les systèmes acides où l'alcalinité totale des solutions est faible (régions tropicales) (cf. la communication introductive de Vincent VALLES en 1995 sur les notions de pH et d'alcalinité). Ce thème pourrait être traité lors de notre prochaine réunion.

L'après-midi a été consacré à des aspects plus méthodologiques. Cette session, présidée par Roland POSS, a compris 3 exposés :

- *Effet des solutés minéraux de la solution de sol sur les nématodes phytoparasites : cas du cycle dessiccation-réhydratation du sol*, de Georges REVERSAT, Christiane SANNIER, Anne PANDO-BAHUON et Marie-José GONZALES, présenté par Georges REVERSAT.

- *Modélisation de l'absorption de l'eau par gonflement des agrégats primaires du sol*, de Erik BRAUDEAU.

- *Simulation des variations de la conductivité électrique d'un torrent par le couplage d'un modèle d'hydrologie de surface avec la distribution spatiale de la conductivité sur le Bassin versant de Roujan*, de Mirla CORNIELES, Roger MOUSSA, Olivier RIBOLZI et Vincent VALLES, qui l'a présenté.

Remarquons que l'exposé de Georges REVERSAT, qui montrait l'extrême sensibilité des populations de nématodes à la pression osmotique et à la teneur en Ca de la solution, est le premier au GRESSAP qui traite des relations entre la faune du sol et la composition de la solution du sol. Il a montré l'intérêt d'ouvrir ce groupe à d'autres disciplines, en particulier aux biologistes du sol.

La réunion s'est terminée sur une discussion sur le thème de la prochaine réunion de 1997. Deux thèmes ont émergés :

- le rôle joué par les êtres vivants et la matière organique sur la solution du sol.
- les relations entre dynamique des gaz et fonctionnement physico-chimique des sols.

Afin de nous aider, n'hésitez pas à nous faire part de vos suggestions!

Benoît JAILLARD
Laboratoire de Science du Sol
INRA
9 place Viala
34060 Montpellier Cedex
Téléphone : 04 67 61 23 82
Télécopie : 04 67 63 26 14
E. Mail : jaillard@ensam.inra.fr

Roland MOREAU
ORSTOM - LCSC
911 avenue Agropolis
BP 5045
34032 Montpellier Cedex 1
04 67 41 62 66
04 67 41 62 94
moreaur@orstom.rio.net

Roland POSS
Dpt of Land Development
Division of Soil Analysis
Paholyothin Road
Chatuchak, Bangkok 10900
tel/fax: (66 2) 579 5523
fax (home): (66 2) 940 0625
poss@ksc15.th.com

Montpellier et Bangkok, Novembre 1996

APPORTS DE LA MODELISATION THERMODYNAMIQUE DANS L'ETUDE DES
TERRES RARES DANS LES EAUX ACIDES

Mirla CORNIELES*, Vincent VALLES**, Luis AUQUE***, Alain AVENTURIER**** et
Bernard REYNIER*****

* MARNR Edificio y esquina Camejo, Caracas Vénézuéla et INRA Science du Sol
Avignon et Université d'Avignon

** INRA Science du Sol Domaine St Paul, Site Agroparc, 84914 Avignon Cedex 9

*** Lab. Petrologia y geoquímica, Universidad de Zaragoza, 50009 Zaragoza,
España

**** CIRAD-URA BP 5035, 34032 Montpellier Cedex 1

***** CNRS-URA067 Laboratoire de Géochimie 38 rue des 36 Ponts 31400 Toulouse

Résumé

Les solutions de sols se développant sur les lutites charbonneuses présentent une acidité élevée (pH 2 à 3) et d'importants phénomènes de toxicité aluminique (Cornieles *et al.* 1995).

Des analyses fines des propriétés chimiques ont été réalisées sur une vingtaine d'échantillons de solutions et sur la roche mère. L'acidité extrême conduit à une solubilisation de l'aluminium dont la concentration s'exprime en millimoles par litre. Les teneurs en Fer, Manganèse, Zinc, Cobalt et Nickel sont élevées. Des traces importantes d'Uranium ont été détectées. Dans l'ensemble, ces eaux sont très toxiques.

La modélisation thermodynamique de l'oxydation de la pyrite a permis de montrer que l'acidité provient de cette réaction bio-géochimique. La réserve acide ainsi produite augmente de façon monotone lorsque le potentiel d'oxydoréduction augmente, c'est à dire lorsque le milieu devient plus oxydant. La simulation de l'oxydation de la pyrite en présence de silicates d'aluminium montre l'attaque acide de ces derniers et indique des teneurs en aluminium comparables aux valeurs observées.

Après normalisation à partir des teneurs de la roche mère locale ou standard (NASC standard pour les lutites charbonneuses), les eaux présentent un enrichissement des terres rares lourdes (HREE) par rapport aux terres rares légères (LREE) et une répartition convexe marquée par un enrichissement des terres rares intermédiaires (IREE): Eu, Gd, Tb, enrichissement plus marqué par rapport aux (LREE) qu'aux (HREE).

La spéciation conduite avec divers modèles thermodynamiques montre l'importance des complexes sulfatés aussi bien pour l'aluminium que pour les terres rares. Pour toutes les terres rares, ces complexes sulfatés sont plus abondants que les formes libres. Cependant, cette complexation ne peut expliquer le fractionnement observé dans le faciès chimique des lanthanides pour ces solutions acides. Cette distribution convexe semble plus liée à des processus spécifiques d'interaction eau/roche.

Mots clef: Acidité, modélisation, métaux, toxicité, terres rares.

Tableau: Analyse chimique des éléments majeurs et des terres rares après fusion alcaline d'un morceau de lutites pyriteux prélevé dans la région de Niquitao

(les échantillons V1 et D-V1 proviennent du Venezuela, les autres échantillons proviennent d'une roche pyriteuse espagnole et figurent ici à titre de comparaison)

	V1	D-V1				
Be (ppb)	1.0	1.0				
Na (%)	0.03	0.03				
Mg (%)	0.12	0.13				
Al (%)	0.62	0.13				
P (%)	0.06	0.06				
K (%)	0.13	0.13				
Ca (%)	1.64	1.64				
Sc (ppm)	2.0	2.0				
Ti (%)	<0.01	<0.01				
V (ppm)	7	7				
Cr (ppm)	19	19				
Mn (ppm)	82	83	259	140	22	26
Fe (%)	1.52	1.53	16.1	0.33	1.04	3.03
Co (ppm)	3	4				
Ni (ppm)	9	9				
Cu (ppm)	15.6	16.1				
Zn (ppm)	63.4	60.6				
As (ppm)	6	6				
Sr (ppm)	14.1	14.3				
Y (ppm)	48		75	39	12	40
Zr (ppm)	0.8	0.9				
Mo (ppm)	2	2				
Ag (ppm)	0.2	0.3				
Cd (ppm)	<1	<1				
Sn (ppm)	<10	<10				
Sb (ppm)	<5	<5				

Tableau (suite) : Analyse chimique des éléments majeurs et des terres rares après fusion alcaline d'un morceau de schiste pyriteux prélevé dans la région de Niquitao

(les échantillons V1 et D-V1 proviennent du Venezuela, les autres échantillons proviennent d'une roche pyriteuse espagnole et figurent ici à titre de comparaison)

	V1	D-V1				
Ba (ppm)	35	36				
La (ppm)	78.9		67.5	15.9	12.0	100
Ce (ppm)	160		134	34.9	27.1	261
Pr (ppm)	18.7		15.9	7.1	4.1	32.3
Nd (ppm)	65.9		59.8	37.1	18.9	119
Sm (ppm)	11.0		12.3	11.0	5.2	26.4
Eu (ppm)	1.42		2.58	3.1	12.8	4.37
Gd (ppm)	8.1		13.2	15.5	5.7	15.1
Tb (ppm)	1.3		2.3	1.9	0.7	1.9
Dy (ppm)	8.4		13.6	8.8	3.4	11.3
Ho (ppm)	1.72		2.60	1.44	0.54	2.50
Er (ppm)	5.2		7.2	3.2	1.4	8.6
Tm (ppm)	0.8		1.0	0.4	0.1	1.6
Yb (ppm)	5.8		6.4	2.1	1.0	11.9
Lu (ppm)	0.88		90.0	0.28	0.12	2.00
W (ppm)	<10	<10				
Pb (ppm)	36	40				
Bi (ppm)	<5	<5				
Th (ppm)	45.0		25.4	<0.1	15.9	91.8
U (ppm)	8.4		6.7	4.6	4.0	41.6

Tableau: Analyse chimique des éléments majeurs et des terres rares d'eaux prélevées dans la région de Niquitao

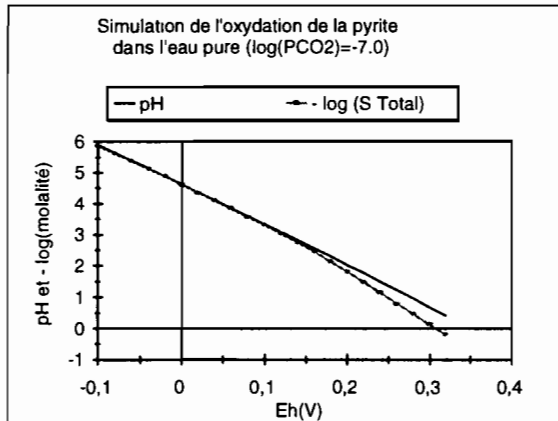
(les échantillons C1,C5,C10 et C13 proviennent du Venezuela, les échantillons A,2 et 4 proviennent d'une région sur roche pyriteuse espagnole et figurent ici à titre de comparaison)

	C1	C5	C10	C13	A	2	4
Be (ppb)	34.6	124	20.7	111	21.0	33.1	44.9
Na (ppm)	3.02	0.58	7.00	3.80	47.2	14.6	19.4
Mg (ppm)	40.8	172	23.0	119	464	378	503
Al (ppm)	70.6	441	47.5	227	43.0	104	192
P (ppb)	<50	9110	86	121	112	128	199
K (ppm)	1.7	0.1	1.4	0.1	0.3	6.2	7.4
Ca (ppm)	131	395	23.5	206	308	186	332
Sc (ppb)	9.8	134	5.3	17.4	11.2	16.7	22.0
Ti (ppb)	<10	17	<10	13	<10	<10	12
V (ppb)	0.4	0.6	0.2	0.7	0.2	0.2	0.3
Cr (ppb)	25.5	119	7.4	20.2	1.7	6.3	10.5
Mn (ppb)	5 270	10 700	847	6790	10 000	16 700	19 700
Fe (ppm)	1.68	522	4.28	27.0	6.21	1.37	1.08
Co (ppb)	207	723	50.4	234	395	591	791
Ni (ppb)	339	1 220	151	877	520	1 140	1 470
Cu (ppb)	37.1	1 330	13.4	119	42.1	76.9	101
Zn (ppb)	3 320	9 620	1 410	4 210	935	1 930	2 790
Ga (ppb)	0.36	4.98	0.24	0.62	0.08	0.13	0.16
As (ppb)	0.4	23.3	0.3	1.0	0.7	0.6	1.3
Se (ppb)	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Rb (ppb)	5.0	2.1	3.2	1.6	15.2	9.0	6.5
Sr (ppb)	528	149	72.2	1 100	660	286	521
I (ppb)	124	366	43.5	313	150	166	351
Zr (ppb)	<0.1	0.2	<0.1	<0.1	<0.1	0.3	1.3
Nb (ppb)	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Mo (ppb)	<1	1	<1	<1	<1	<1	<1
Ag (ppb)	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Cd (ppb)	21.1	89.9	8.96	52.7	1.86	4.37	5.55
In (ppb)	<0.04	2.63	<0.04	0.07	<0.04	<0.04	<0.04
Sn (ppb)	0.69	0.74	0.36	0.30	0.53	1.43	0.49
Sb (ppb)	0.9	<0.1	0.4	0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Te (ppb)	<1.5	<1.5	<1.5	<1.5	<1.5	<1.5	<1.5
Cs (ppb)	0.38	1.18	0.27	0.22	0.97	0.23	0.53

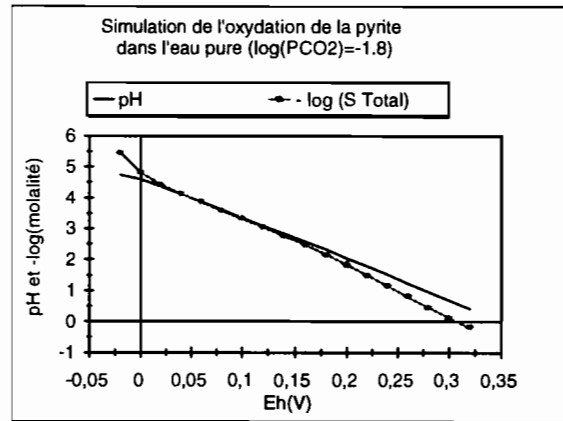
Tableau : (suite)
Analyse chimique des éléments majeurs et des terres rares d'eaux prélevées dans
la région de Niquitao

(les échantillons C1,C5,C10 et C13 proviennent du Venezuela, les échantillons A,2
et 4 proviennent d'une région sur roche pyriteuse espagnole et figurent ici à titre de
comparaison)

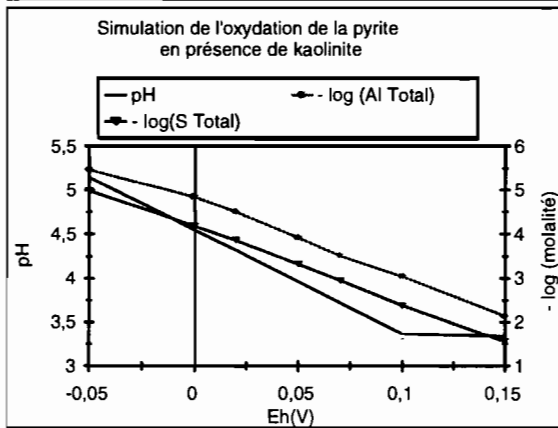
	C1	C5	C10	C13	A	2	4
Ba (ppb)	13.7	1.49	9.40	3.07	6.07	8.19	9.42
La (ppb)	6.61	20.7	2.50	21.2	40.8	17.2	43.0
Ce (ppb)	22.2	104	7.14	93.6	162	66.9	169
Pr (ppb)	4.26	21.4	1.57	18.4	27.6	13.4	33.1
Nd (ppb)	29.1	149	11.7	117	149	88.7	212
Sm (ppb)	18.0	112	7.65	66.7	45.3	45.5	102
Eu (ppb)	4.74	31.6	1.95	17.5	11.7	14.2	30.9
Gd (ppb)	34.1	181	13.9	109	63.2	80.7	173
Tb (ppb)	5.11	27.4	2.13	16.5	9.06	11.8	24.9
Dy (ppb)	25.7	126	11.1	81.3	42.8	54.7	115
Ho (ppb)	4.25	19.4	1.82	13.7	7.00	8.52	17.8
Er (ppb)	9.52	43.8	4.22	32.4	15.6	17.8	37.9
Tm (ppb)	0.56	2.63	0.24	1.96	0.85	0.96	2.11
Yb (ppb)	5.82	28.2	2.58	20.9	9.25	10.4	22.2
Lu (ppb)	0.77	3.56	0.37	2.77	1.29	1.49	3.17
Hf (ppb)	0.16	0.59	0.08	0.37	0.18	0.21	0.50
Ta (ppb)	<0.01	0.22	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
W (ppb)	0.16	0.36	0.05	0.21	0.15	0.15	0.21
Os (ppb)	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Hg (ppb)	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2
Tl (ppb)	0.11	0.01	0.06	0.04	0.13	0.28	0.46
Pb (ppb)	4.26	3.99	1.91	2.49	2.86	10.3	5.76
Bi (ppb)	<0.01	0.17	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Th (ppb)	0.85	851	1.91	21.1	0.9	1.75	2.67
U (ppb)	4.27	153	1.83	23.6	2.45	4.70	8.74



(a)

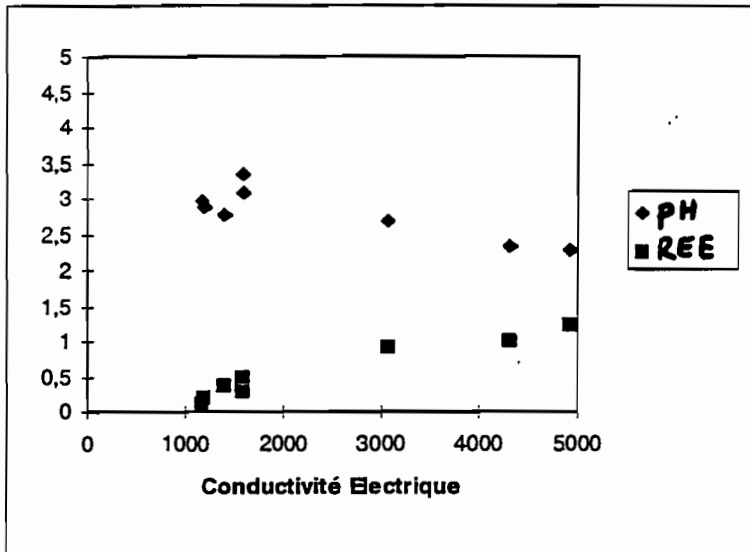


(b)

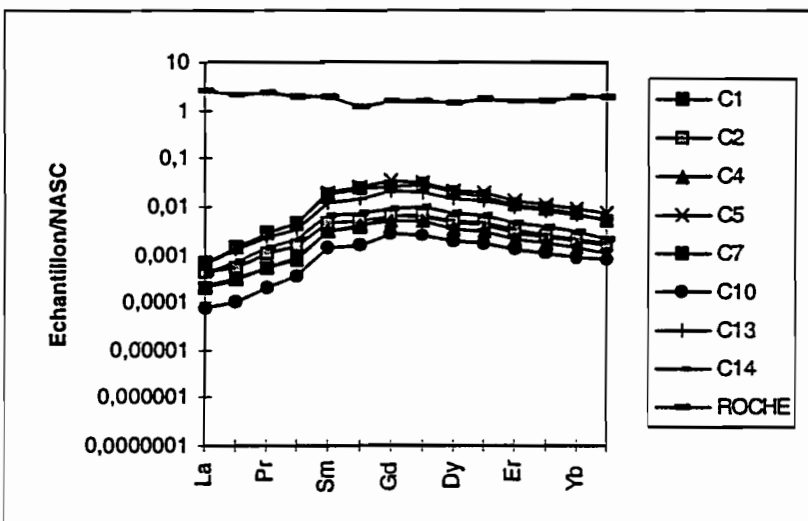


(c)

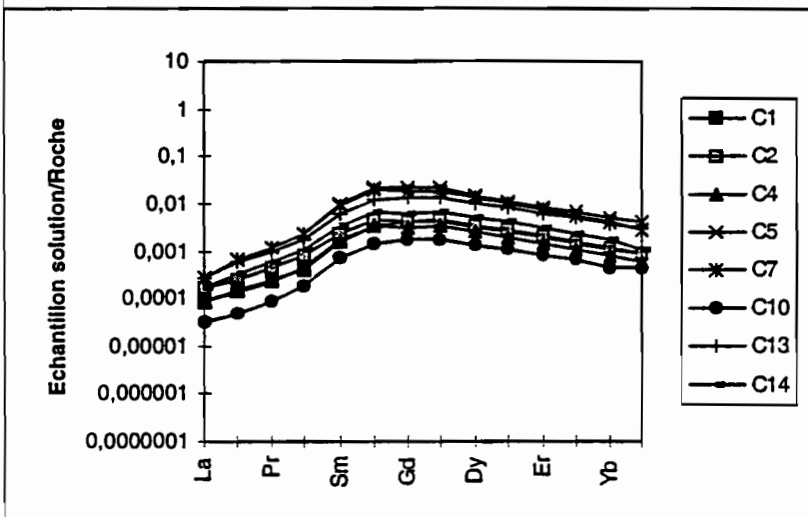
Résultats de simulation de l'altération de la pyrite dans divers environnements minéralogiques et pressions partielles en CO_2 . Eau pure (a) et (b), eau + kaolinite (c). Les valeurs d'éléments dissous (c) pour $\text{Eh}=0.15\text{v}$, valeur de terrain sont comparables aux résultats d'analyse (tableau I).



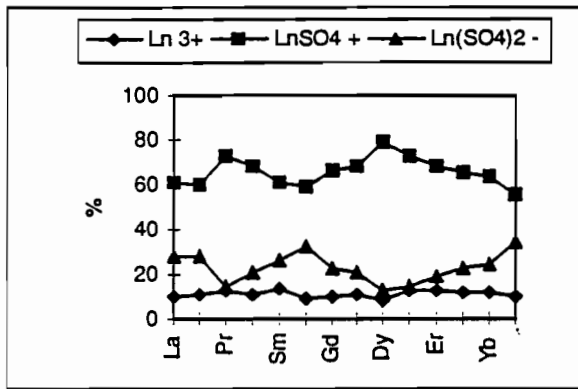
Variations du pH et de la teneur en terres rares en fonction de la conductivité électrique des solutions



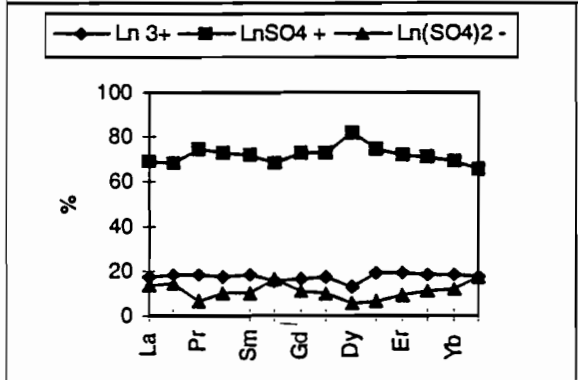
Comparaison des teneurs de la roche mère (lutite pyriteuse) et des solutions avec l'échantillon de référence (NASC)



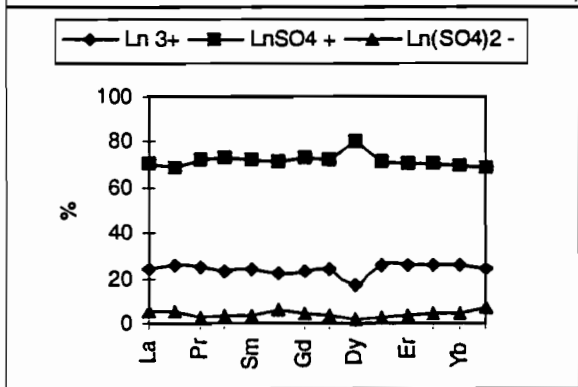
Variations des teneurs normalisées en terres rares des solutions en fonction du numéro atomique (normalisation par rapport à la roche mère)



SO_4 concentré



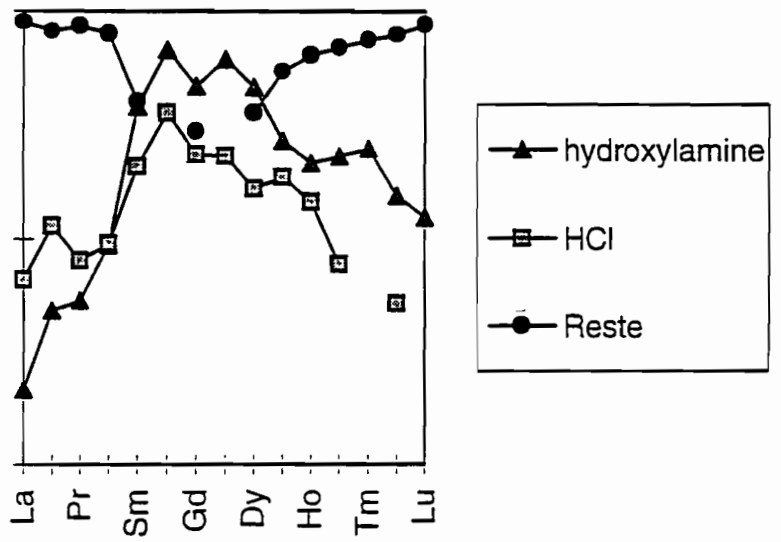
SO_4 moyen



SO_4 peu concentré

Variation des taux de complexation (en ordonnée) en fonction du numéro atomique, pour trois teneurs en sulfate

ordonnée) en fonction du numéro



PRESENTATION DE AQUA, LOGICIEL DE GEOCHIMIE APPLIQUE AUX
PROBLEMES ENVIRONNEMENTAUX

Vincent VALLES*, Olivier RIBOLZI*, Anne-Marie de COCKBORNE* et Mirla
CORNIELES**

* INRA Science du Sol Domaine St Paul, Site Agroparc, 84914 Avignon Cedex 9

** MARNR Edificio y esquina Camejo, Caracas, Vénézuéla et Université d'Avignon.

Résumé

AQUA (Valles et de Cockborne, 1992) est un logiciel de géochimie appliqué aux questions environnementales et plus particulièrement à l'étude de la qualité des eaux.

Il est composé de divers modules de calcul de l'activité des espèces aqueuses qui constituent sa partie centrale. AQUA comporte à ce niveau une originalité par rapport aux autres modèles, ce qui lui permet de travailler avec une bonne précision dans les eaux naturelles très concentrées, jusqu'à des forces ioniques de 6, soit 10 fois la salinité de l'eau de mer. Sa structure modulaire, adaptée à différents niveaux de complexité de l'étude de la solution, constitue une seconde originalité qui permet une étude progressive mais plus rapide des processus.

Les calculs de spéciation supportent des applications graphiques, ce qui facilite la compréhension des mécanismes responsables de la qualité des eaux observée. Dans une seconde étape de l'analyse, plusieurs modules de prévision permettent de simuler l'évolution de la composition lors d'interactions eau/minéraux/gaz et prévoir les résultats d'évènements tels que la concentration par évaporation, la modification des équilibres gazeux (O₂ et CO₂) liés par exemple à l'activité biologique ou bien la précipitation de minéraux dans une solution nutritive.

Enfin, des outils annexes permettent de réaliser l'étude statistique ou géostatistique des informations. Un module d'hydrologie permet de coupler les calculs thermodynamiques avec un hydrogramme.

Les graphiques peuvent être sauvegardés sous divers standards et être ainsi directement intégrés dans des fichiers de traitements de texte.

Mots-clef: thermodynamique, modélisation, statistique, géostatistique.

AQUA
Logiciel de Géochimie appliquée
à l'étude de la qualité des eaux

- 1) Composé d'outils de calculs thermodynamiques
 - Spéciations (étude des mécanismes responsables des caractéristiques chimiques observés)
 - Simulation des interactions eau/jeu de minéraux sous diverses conditions ($p\text{CO}_2$, Eh, $t^\circ\text{C}$,.....).

- 2) et d'outils d'aide à l'étude des solutions aqueuses
 - Diagrammes de représentation du faciès chimique des solutions (Piper, Riverside, Stabler)
 - Calcul et visualisation des diagrammes de concentration
 - Statistique (divers modules)
 - Géostatistique
 - Petit module d'hydrologie
 - Outils graphiques (sauvegarde compatible avec divers logiciels traitement de texte)

Conclusion: Un outil limité mais utile, en constant développement pour les besoins de la recherche

**Effet des solutés minéraux de la solution de sol sur les nématodes phytoparasites:
cas du cycle dessiccation-réhydratation du sol.**

Georges REVERSAT, Christianne SANNIER, Anne PANDO-BAHUON et Marie-José GONZALES

Laboratoire d'Ecologie des Sols Tropicaux (LEST), Centre ORSTOM d'Ile de France, 32, avenue Henri
Varagnat, 93143 Bondy Cedex, France.

Introduction

La solution de sol constitue pour un certain nombre d'animaux du sol le milieu vital permanent, dont ils ne peuvent s'affranchir, parce qu'ils sont incapables de vaincre les forces de capillarité qui les y retiennent. Il s'agit des nématodes, libres ou phytoparasites, des protozoaires, des rotifères et des enchytréides. D'autres groupes sont plus indépendants de cette solution, ce sont principalement les acariens, les collembolés, les termites et les vers de terre.

Dans un sol humide, à la capacité au champ, les nématodes du sol, libres ou phytoparasites, baignent en permanence dans le film de solution de sol qui recouvre les particules de sol. Le déplacement de ces animaux dans le sol se fait grâce à la continuité de ce film par le biais de la porosité. Les substances dissoutes dans cette solution, minérales ou organiques, sont donc en mesure par leurs qualités et leurs quantités d'affecter directement le comportement de ces animaux. Dans le cas des nématodes phytoparasites, un effet indirect par le biais de la nutrition minérale de la plante hôte est également observé, mais cela relève de l'étude des relations hôte parasite et le sujet ne sera pas abordé ici.

Ces substances dissoutes, ionisées ou non ionisées, en contact permanent avec le tégument des nématodes peuvent avoir plusieurs effets :

- un effet physique dû à la pression osmotique développée par ces solutés. Si la solution de sol à la capacité au champ est relativement diluée, elle peut être plus concentrée à l'occasion de l'apport d'un engrais minéral ou lors de la dessiccation progressive du sol après l'interruption des précipitations. C'est maintenant un résultat bien acquis que les nématodes du sol perdent de l'eau au profit de la solution qui les entoure dès que la concentration dépasse l'équivalent de 0,05 M NaCl. Cela se traduit par une diminution du volume du corps et par un ralentissement de l'activité. Pour des concentrations plus élevées, par l'inhibition de mécanismes essentiels : à partir de l'équivalent de 0,3 M NaCl, par exemple l'éclosion des oeufs est complètement inhibée pour toutes les espèces. Les concentrations léthales sont plus élevées, de l'ordre de 1 M de NaCl. En général l'effet physiologique est proportionnel à la concentration, et on a pu montrer, dans un certain nombre de cas, que la relation n'est pas linéaire mais sigmoïdale.
- un effet chimique, spécifique de l'ion (y compris les ions H⁺ ou OH⁻, par l'effet du pH) ou de la substance, inhibiteur ou au contraire activateur d'un phénomène biologique essentiel comme

IONS	Adiopo doumé μM	Korhogo μM	Hoagland 1/100 μM
Potassium K+	68	75	60
Calcium Ca++	92	68	50
Magnésium Mg++	75	37	34
Sodium Na+	113	19	0
Sulfate SO4--	53	43	20
Chlorure Cl-	124	70	0
Nitrate NO3-	12	4	150
Phosphate H ₂ PO ₄ -	7	6	10

Tableau 1. Concentrations de la solution de sol en éléments principaux comparées à la solution nutritive minérale d'Hoagland. Références : sols de Côte d'Ivoire: Adiopodoumé et Korhogo (Lelong & Roose, 1986); solution d'Hoagland (Hoagland & Arnon, 1950).

Date jours	Glycérol % poids/poids	HR %	pF
0	7,5	98,7	4,25
7	9	98,4	4,34
8	12	97,7	4,50
9	15	97,0	4,60
10	18	96,0	4,75
11	25	93,0	5,00
12	39	87,9	5,25
13	51	79,5	5,50

Tableau 2. Calendrier d'ajustement des concentrations de glycérol dans les cellules de dessiccation, avec les valeurs des humidités relatives de l'air (HR) atteintes et des pF correspondants

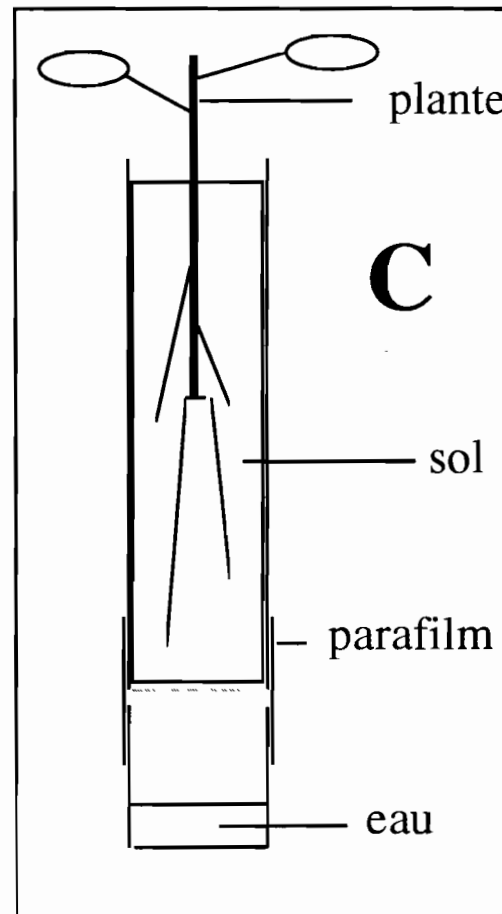
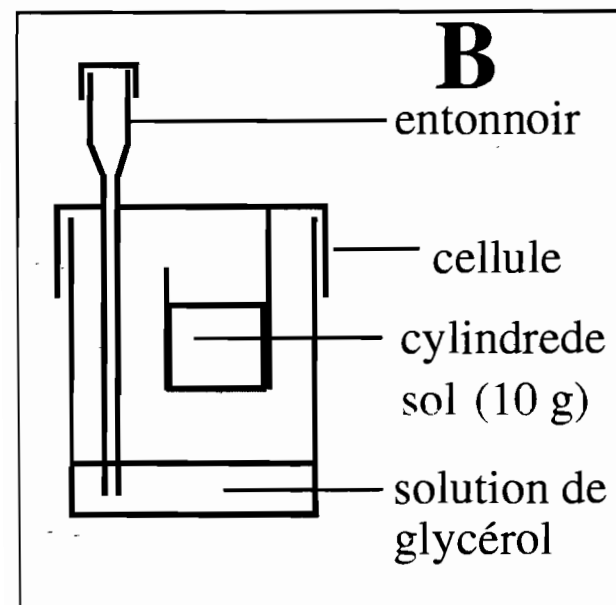
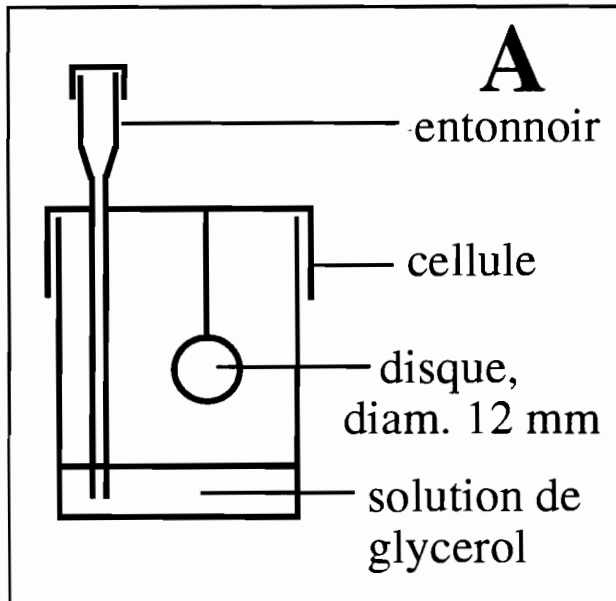


Figure 1 . - Matériel :
A : cellule de dessiccation à disques (de papier filtre).
B : cellule de dessiccation à cylindre de sol.
C : tube d'élevage monté pour dessiccation "sur nappe".

l'activité ou l'éclosion. D'autres effets plus difficiles à cerner semblent dûs aux proportions des différents ions par exemple.

Dans le cadre des travaux actuellement poursuivis au LEST sur les nématodes phytoparasites, on s'intéresse aux effets des solutés minéraux de la solution de sol (pour l'instant, ces essais sont limités à un modèle de solution de sol) sur ces animaux au cours du phénomène de l'éclosion des oeufs et au cours des deux phases successives du cycle dessiccation- rehydratation d'un sol :

- la phase de dessiccation au cours de laquelle la concentration de la solution de sol augmente.
- la phase de rehydratation lors de laquelle le brusque afflux d'eau, dû à la première précipitation utile, permet aux animaux de se trouver au contact des quantités d'eau nécessaires à une reviviscence complète et immédiate.

L'effet de différents minéraux présents dans des solutions de sol reconstituées a été étudié in vitro au cours de ces deux phases. Les résultats, concernant la survie et le comportement des nématodes, sont décrits et discutés.

Matériel et méthodes

Le nématode *Heterodera sacchari* est un endoparasite tropical des racines du riz et de la canne à sucre, rencontré dans la plupart des pays de l'Afrique subsaharienne, sur le continent indien et en Asie du Sud-Est. On l'éleve sur riz au laboratoire à Bondy et on travaille sur les juvéniles du second stade, infestants, issus de l'éclosion des oeufs. L'autre espèce, *Xiphinema attorodorum*, tropicale également mais ectoparasite sur des hôtes multiples et uniquement africaine, est élevée au laboratoire sur *Vigna radiata*. On utilise les populations extraites du sol, tous stades confondus.

Comme solution de sol modèle, par opposition aux observations standard, qui sont réalisées avec de l'eau distillée, on a utilisé de la solution minérale nutritive d'Hoagland diluée au 1/100. La comparaison avec des solutions de sol de sols africains typiques (tableau 1) montre que les concentrations d'éléments majeurs sont du même ordre de grandeur, sauf pour les nitrates.

Pour étudier l'éclosion des oeufs, de la première espèce seulement, des suspensions d'oeufs dans l'eau distillée sont préparées par écrasement de kystes, puis mélangées aux solutions appropriées. On compte les oeufs éclos, des juvéniles par rapport au nombre initial d'oeufs.

Pour la dessiccation on utilise des cellules spéciales hermétiques, dans lesquelles des nombres connus de nématodes sont inoculés soit sur des disques de papier filtre (fig. 1A) soit sur du sol (fig. 1B). L'atmosphère des cellules est contrôlée, au point de vue humidité relative, par une solution de glycérol déposée au fond (fig 1 A & B). Par une addition progressive de glycérol, étalée sur plusieurs jours (tableau 2), l'humidité relative de l'air de la cellule peut être diminuée jusqu'à des pF correspondant à des sols au point de flétrissement (pF 4,2) et même plus intensément (pF 5,5). Après dessiccation, les disques ou le sol est réhumidifié soit dans de l'eau distillée, soit dans une solution de sol modèle, et le nombre de survivants est évalué.

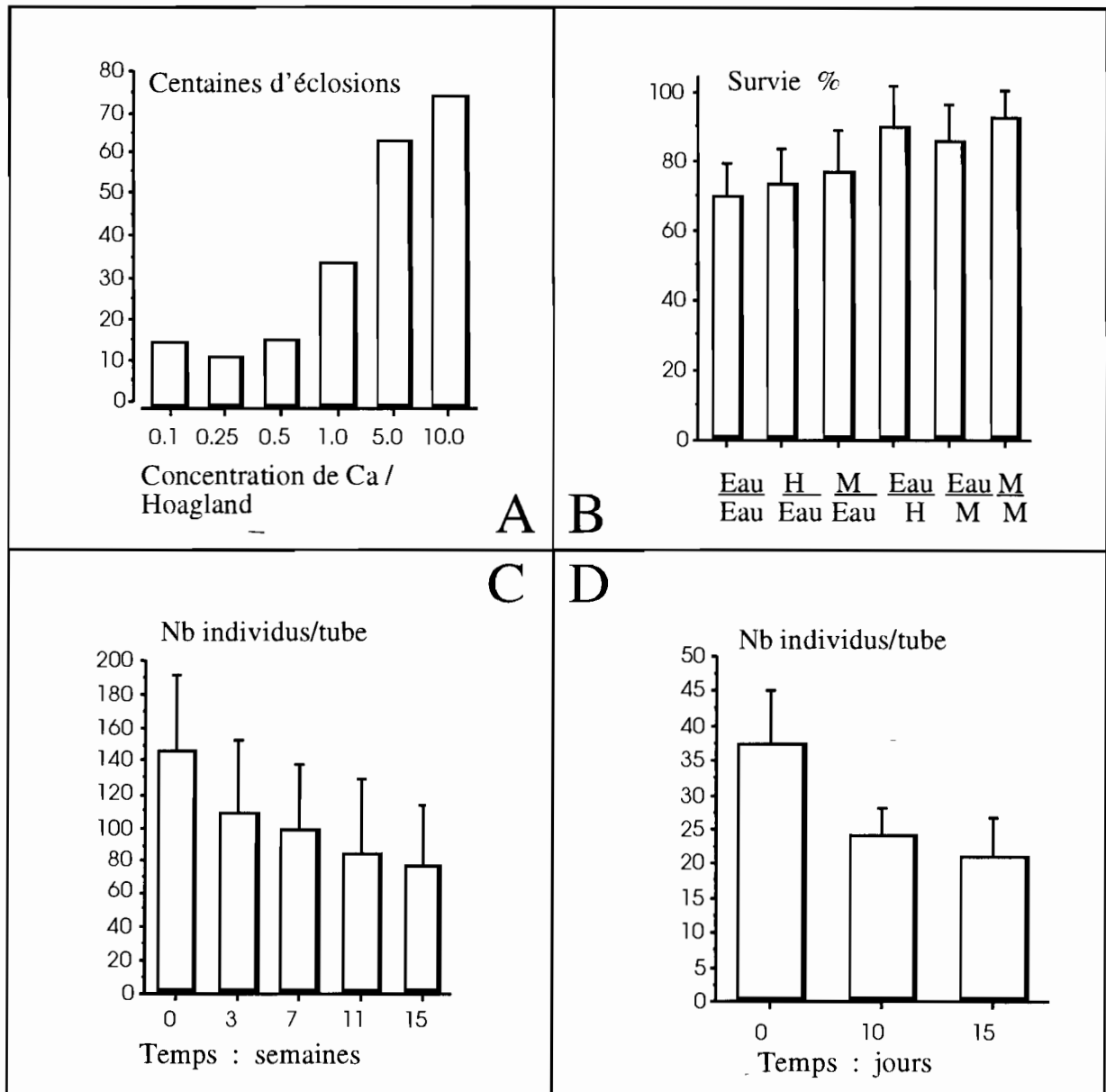


Figure 2 : Résultats :

A : *Heterodera sacchari* éclosion des oeufs dans une solution d'Hoagland avec la teneur en calcium à 0,1-0,25-0,5-1-5 et 10 fois la dose normale.

B : *Heterodera sacchari* survie à la dessiccation à pF 4,2 en fonction de 6 combinaisons de milieu d'inoculation (haut) et de milieu de reviviscence (bas) : eau, H: Hoagland; M : éléments majeurs de l'Hoagland.

C : *Xiphinema attorodorum*: survie à la dessiccation des animaux de tubes d'élevage après différentes durées de dessiccation "sur nappe" (Cf fig. 1C).

D : *Xiphinema attorodorum*: survie à la dessiccation à pF 4,2 des animaux inoculés dans des cylindres de sol (Cf fig. 1B).

Résultats et discussion

Eclosion des oeufs d'*H. sacchari* (fig. 2A): L'éclosion a été mesurée pendant une semaine dans une solution d'Hoagland au 1/25, en remplaçant la dose normale de nitrate de calcium par six doses, plus faibles (au 1/10, 1/4 et 1/2), témoin (1/1) et plus élevées (5/1 et 10/1). Par rapport à la dose témoin (1/1), les doses plus faibles inhibent l'éclosion, tandis que les doses plus élevées la stimulent (fig 2A). Ceci a déjà été observé pour d'autres espèces de nématodes phytoparasites, mais pas pour toutes.

Dessiccation des juvéniles d'*H. sacchari* (fig. 2B): Des dessiccations de juvéniles dans des cellules à disques ont été réalisées en faisant varier les combinaisons du milieu d'inoculation et de la solution de reviviscence : eau distillée, Hoagland 1/100 : H, éléments majeurs de l'Hoagland 1/100 : M. Seules six combinaisons ont été testées : eau/eau, Hoagland/eau, majeurs/eau, eau/Hoagland, eau/majeurs et majeurs/majeurs. Les résultats montrent que la survie est significativement meilleure pour les trois combinaisons eau>Hoagland, eau>majeurs et majeurs>majeurs (5 répétitions de 120 juvéniles par traitement)

Par contre si on remplace les disques de papier filtre par des nacelles de plastique, qui permettent de déposer l'inoculum sur un plan horizontal sans qu'il tombe, on constate à la date 7 jours que le nombre de survivants est le même que sur disques lorsque l'inoculum est dans l'eau et qu'il n'y a aucun survivant lorsque l'inoculum est dans une des deux solutions, Hoagland ou éléments majeurs de l'Hoagland au 1/100 .

Dessiccation de *X. attorodorum* (fig. 2C et 2D): Lorsqu'on fait dessécher des tubes d'élevage, avec la plante encore vivante, à l'air libre dans l'ambiance du laboratoire, en cessant l'arrosage, la plante meurt 10 jours après (pF 4,2) et, 3 semaines après on ne trouve aucun nématode survivant. Si on munit chaque tube d'élevage d'un récipient d'eau, adapté de façon étanche à son extrémité inférieure, et qu'on traite les tubes de la même façon, on constate que la plante meurt dans les mêmes délais, ce qui prouve que c'est la consommation de la plante qui est le facteur essentiel. Par contre dans ce cas, il y a des survivants à 3 semaines en nombre appréciable par rapport à l'effectif présent lors de la cessation de l'arrosage. Si l'inoculum en suspension dans l'eau distillée est déposé en nacelles plastique ou sur disques de papier filtre, on n'a aucun survivant au terme de la première étape de dessiccation, à 7 jours. Par contre lorsque l'inoculum est déposé dans un cylindre de sol il y a des survivants (fig. 2D).

Discussion

Concernant l'effet du calcium sur l'éclosion (fig. 2A), nos résultats confirment que cette espèce fait partie du groupe des espèces sensibles à ce facteur. Il faudrait maintenant préciser si cet effet ne se fait sentir que dans le contexte d'une solution contenant d'autres ions comme c'est le cas ici, ou bien si ce résultat se confirme avec des solutions d'un sel de calcium pur.

La présence de minéraux dans la solution de reviviscence améliore la survie à la dessiccation chez *H. sacchari* par rapport à l'eau distillée, mais la différence n'est pas très conséquente (fig. 2B). Par contre les autres résultats, que l'on peut résumer par les trois propositions suivantes :

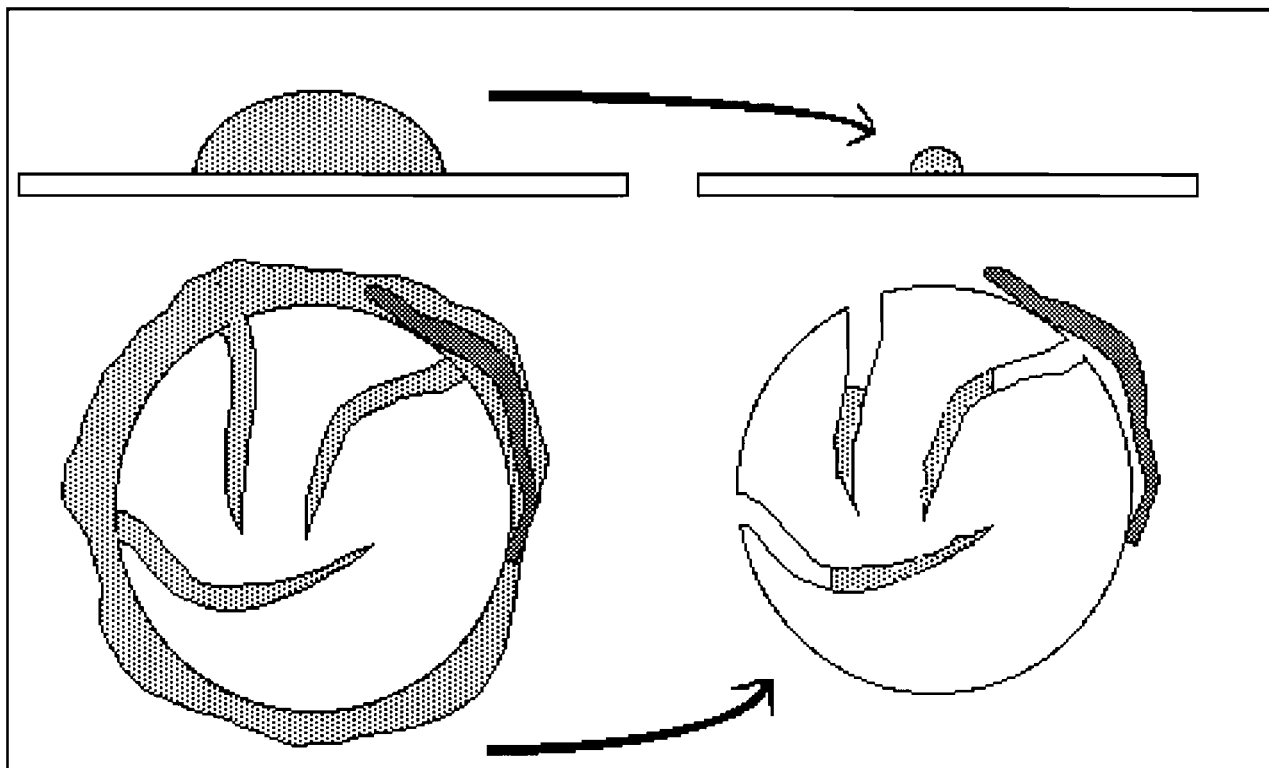


Figure 3. Dessiccation in vitro (en haut) et in situ (en bas) : positions relatives de la solution de sol concentrée (à une concentration toxique) et du nématode.

- inoculum eau / nacelle plastique ---> survivants
- inoculum solution (Hoagland) / nacelle plastique ---> aucun survivant
- inoculum eau ou solution (Hoagland) / disque papier filtre ---> survivants

peuvent s'expliquer de la façon suivante (fig. 3) :

- lorsque l'inoculum est déposé sur une surface non absorbante, comme ces coupelles plastique ou sur une lame de verre, le comportement est différent s'il y a ou non des sels dissous dans le liquide d'inoculation. Si c'est de l'eau pure, elle disparaît entièrement et les animaux se dessèchent et survivent. S'il y a des sels dissous, la solution se concentre par évaporation jusqu'à une concentration toxique et tous les animaux sont tués. A la fin de la première étape de dessiccation d'ailleurs, toute l'eau disparaît et il y a cristallisation des sels (fig. 3 en haut).
- lorsque l'inoculum est déposé sur une surface absorbante (papier filtre ou sol), lorsque la solution d'inoculation contient des sels, la solution se concentre et se retire peu à peu, au fur et à mesure de la diminution de son volume, dans la microporosité. Comme les nématodes ont des dimensions conséquentes par rapport à cette microporosité (leur diamètre est de 15 microns et leur longueur de 500 microns), la solution de sol n'est plus au contact des nématodes lorsque celle-ci a atteint la concentration toxique (fig. 3 en bas).

Dans le cas de *X. attorodorum*, on a montré que cette espèce est capable de supporter la dessiccation soit in situ soit dans des tubes d'élevage à condition qu'ils soient pourvus d'un équivalent de la nappe phréatique qui ravitaille le tube de substrat en vapeur d'eau. Donc l'air ambiant (50 ou 60 % HR) tue ces animaux, mais la présence d'une simulation de nappe qui doit maintenir l'HR vers 95-97 %, leur permet de survivre. Donc ils ne supportent pas une très forte dessiccation et in situ ils sont dépendants de la nappe pour que la dessiccation ne soit pas trop forte en saison sèche.

On observe également qu'ils ne supportent pas la dessiccation sur disque de papier filtre alors qu'ils la supportent sur sol. On n'en est qu'au début dans cette investigation et on peut conclure provisoirement qu'il existe dans le sol un composant qui permet à la dessiccation du nématode d'aboutir favorablement. Il est vraisemblable que ce composé possède des propriétés réactives, soit vis à vis de la cuticule soit de la solution de sol et on peut donc penser qu'il appartient à la fraction organo-minérale.

Cinétique de pénétration de l'eau dans le sol par gonflement des agrégats primaires

E. BRAUDEAU

(présenté à Kearney Foundation 1995 Conference « Vadose zone hydrology; cutting across disciplines ».
University of California, Davis)

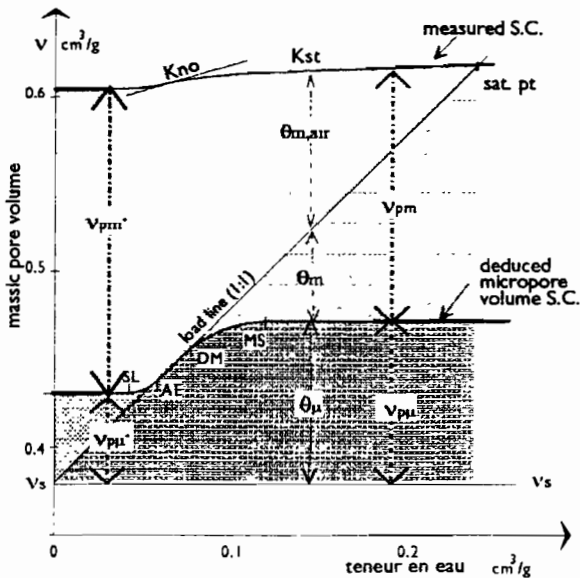
INTRODUCTION

Les modèles fonctionnels de la structure du sol qui sont généralement utilisés en science du sol, notamment pour les études de transfert d'eau, donnent plus d'importance à la géométrie de l'espace porel, (le rayon du pore), qu'aux propriétés physico-chimiques du plasma argileux composant les peds primaires, les supposant négligeables. Pourtant, comme cela a pu être montré dans un travail récent (1), une partie de la réserve en eau est constituée de l'eau retenue par gonflement du plasma argileux, occupant par conséquent une porosité nouvellement créée.

Dans cette note, nous étudions la cinétique d'absorption de l'eau par gonflement du plasma argileux au sein de la structure du sol (cas des oxysols).

CONSIDERATIONS THEORIQUES ET NOMENCLATURE:

On considère la biporosité classique d'un agrégat (100 CM³)de sol; dans lequel la microporosité correspond exactement à celle du plasma argileux des peds primaires (Brewer 1964), et la macroporosité à l'espace poral complémentaire c.a.d. entre les peds primaires. Cette partition de la porosité en deux classes fonctionnelles a été adoptée auparavant par Yong and Warkentin (1975) et Braudeau (1988); elle s'accorde avec le modèle de description morphologique de la structure du sol faite par Brewer (1964), et a donné lieu à la représentation schématique du modèle fonctionnel de la structure du sol (2,3) à la fig. 1.



MS maximum swelling of the micropore volume
DM dry macropore volume point
AE air entry in micropore volume
SL shrinkage limit

- v specific volume of whole soil sample (cm³ g⁻¹)
- θ gravimetric water content (cm³ g⁻¹)
- θ_μ " of micropore region (cm³ g⁻¹ whole soil)
- θ_m " of macropore region (cm³ g⁻¹ whole soil)
- v_{pm} massic micropore volume of soil (cm³ g⁻¹ whole soil)
- v_{pm} massic macropore volume of soil ((cm³ g⁻¹ whole soil)
- v_s gravimetric solid content (cm³ g⁻¹)
- K_{no}, K_{st} slopes of the linear shrinkage zones of the curve

fig. 1: Modèle de retrait structural (MRS).

Les points particuliers MS, DM, AE et SL sont déterminés sur la courbe par optimisation de l'ajustement des équations du modèle MRS à la courbe de retrait mesurée (1). La modélisation de la courbe de retrait entraîne celle de toutes les variables présentées sur le diagramme en fonction de θ grâce à l'hypothèse:

$$dV = K_{no}.dV_{p\mu} + K_{st}.d\theta_m \quad (1)$$

MATERIALS AND METHODS

L'analyse de la cinétique du retrait-gonflement du sol a porté sur des échantillons de sol remaniés en terre fine (agrégats <2mm) et placés dans la cellule de l'appareil présenté à la figure 2. La cellule est placée dans un bécher, sous le capteur de déplacement. Le becher est ensuite rempli d'eau jusqu'au niveau du verre fritté supérieur et maintenu à ce niveau. Une mesure est effectuée toutes les 100 secondes, puis toutes les 5 minutes après deux heures de gonflement.

Après le gonflement, la cellule est sortie du bécher et laissée égoutter et sécher une dizaine de minutes. La cellule est ensuite placée sur la balance, et sous le capteur de déplacement. Les supports en dessous de la cellule permettent à l'eau de s'évaporer des deux côtés. Une mesure du poids et de la hauteur de l'échantillon est effectuée toutes les 5 minutes jusqu'à la fin du retrait qui dure de huit à dix jours.

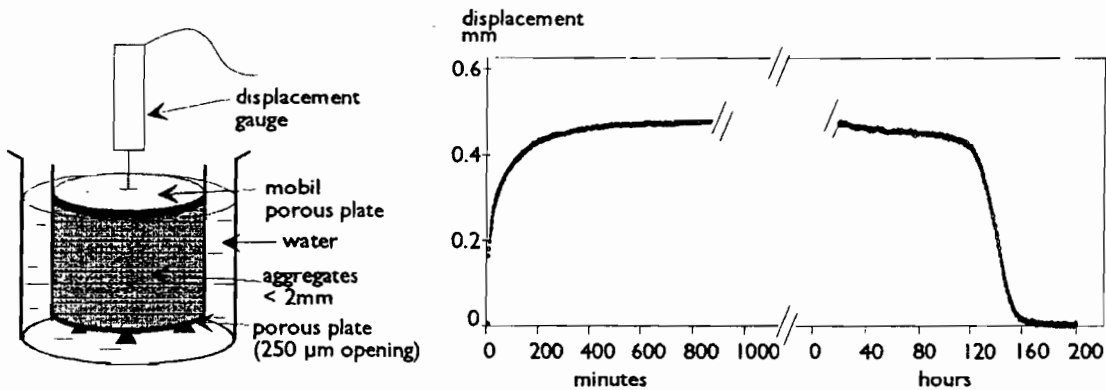


fig. 2: Dispositif de mesure du cycle gonflement-retrait d'un massif d'agrégats

Results

Les cycles de gonflement-retrait (fig1) sont reproductibles, et le remaniement de l'échantillon n'a pas d'influence notable sur les caractéristiques de la microporosité (tableau I), contrairement à celles de la macroporosité.

nom	argile %	θ_{SL}	θ_{AE}	θ_{MD}	θ_{MS}	θ_{sat}	VSL	VMS	Vsat	Vp μ MS	Vp μ SL	$\theta_{\mu no}^{max}$	Kno
							cm ³ g ⁻¹						
T1	46.1	0.117	0.142	0.153	0.194	0.334	0.677	0.704	0.705	0.170	0.132	0.038	0.672
R1T1		0.120	0.148	0.162	0.203	0.401	0.752	0.770	0.773	0.179	0.136	0.043	0.404
R2T1		0.112	0.136	0.157	0.190	0.398	0.752	0.768	0.770	0.171	0.126	0.045	0.356
T7	22.9	0.053	0.086	0.099	0.157	0.280	0.629	0.650	0.656	0.123	0.072	0.051	0.384
R1T7		0.048	0.081	0.100	0.135	0.291	0.648	0.662	0.667	0.115	0.067	0.047	0.319
R2T7		0.064	0.071	0.094	0.135	0.285	0.648	0.659	0.661	0.111	0.068	0.043	0.268
T9	10.4	0.016	0.036	0.060	0.101	0.267	0.637	0.645	0.646	0.077	0.028	0.050	0.160
R1T9		0.024	0.044	0.061	0.087	0.229	0.600	0.605	0.608	0.072	0.036	0.036	0.127
R2T9		0.036	0.044	0.068	0.099	0.223	0.600	0.601	0.602	0.081	0.041	0.040	0.049

Tableau I: Résultats d'analyse de la courbe de retrait d'échantillons témoins non remaniés (Ti) et remaniés correspondants, lors de deux cycles de gonflement retrait (RITi et R2Ti)

MODELISATION DU GONFLEMENT DES AGREGATS

On suppose que les agrégats sont le siège d'une pression de gonflement d'origine osmotique et d'expression:

$$P_s = E/(\theta_{\mu} - v_{p\mu}) = E/\theta_{\mu no} \quad (1)$$

où E est « the potential energy of the solid phase resulting from the surface charge of the soil in joules/kg »

(6); $\theta_{\mu no}$ la teneur en eau plasmique absorbée par gonflement des agrégats.

La vitesse d'absorption de l'eau par les agrégats s'écrit:

$$d\theta_{\mu no}/dt = -K(P_s - P_s^*) \text{ où } P_s^* = E/\theta_{\mu no}^{max} \quad (2)$$

En reprenant les hypothèses du modèle RS: $dv/dt = K'_{no} \cdot d\theta_{\mu no}/dt \quad (3),$

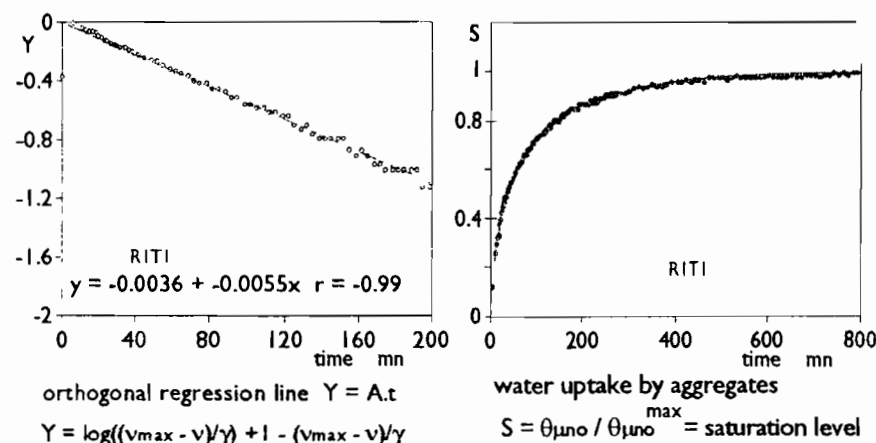
l'intégration de l'équation (3) conduit à une expression linéaire de $v^{max} - v$ en fonction de t:

$$\log((v^{max} - v)/\gamma) + 1 - (v^{max} - v)/\gamma = A \cdot t \quad (4).$$

L'optimisation de l'ajustement de (4) aux données observées (fig 3) détermine A et γ (tableau 2). Tenant

compte de (3), (4) s'écrit sous la forme: $(1-S) \cdot \exp(S) = \exp(At)$

où S est le taux de saturation des agrégats (fig 4): $S = \theta_{\mu no} / \theta_{\mu no}^{max} = 1 + (v^{max} - v)/\gamma$



	$K_{no} \cdot \theta_{\mu no}^{max}$ cm ³ g ⁻¹	γ cm ³ g ⁻¹	$A \cdot 10^2$ mn ⁻¹	t/2 mn
RIT1	0.017	0.016	0.545	35
RIT7	0.015	0.011	0.528	36
RIT9	0.005	0.009	1.286	15
		r correl.	s.c.e.m. x 10 ⁶	
RIT1		0.998	0.017	
RIT7		0.998	0.004	
RIT9		0.99	0.012	

fig.3: a) exemple d'optimisation de l'ajustement de (4) à une droite; b) taux de saturation des agrégats en fonction du temps, courbes calculée (points tillés) et observée (gros points).

CONCLUSION

Trois faits importants ont été mis en évidence dans cette étude, concernant l'absorption de l'eau par gonflement du plasma argileux dans les sols peu gonflants:

<> L'eau absorbée par gonflement est loin d'être négligeable et représente pour ces sols puisque $\theta_{\mu no}^{max}$ varie approximativement de 1/3 à 1/1 du volume microporal des agrégats secs $V_{p\mu}^o$ et à moitié environ de leur réserve en eau: $\# (\theta_{MS} - \theta_{AE})/2$.

<> La cinétique d'absorption par gonflement est beaucoup plus lente ($t_{1/2} \sim 45mn$) que celle de la pénétration de l'eau dans une microporosité plasmique rigide ($t < 1mn$) telle celle étudiée récemment par Yongs et al. (7).

<> Le potentiel de l'eau, dans le plasma argileux, est de caractère osmotique en $1/V$ plutôt que $1/r$.

Il semble que tenir compte de ces propriétés internes à la structure du sol permettra d'une part d'établir une meilleure correspondance entre modèles fonctionnels et modèles morphologiques, et d'autre part de mieux décrire les équilibres thermodynamiques dans le sol.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) BRAUDEAU E., BRUAND A., 1993. Détermination de la courbe de retrait de la phase argileuse à partir de la courbe de retrait établie sur échantillon de sol non remanié. Application à une séquence de sols de Côte d'Ivoire. C. R. Acad. Sci. Paris, t. 316, série II: 685-692.
- (2) BRAUDEAU E., 1988 a. Equation généralisée des courbes de retrait d'échantillons de sols structurés. C. R. Acad. Sci. Paris, 307, série II: 1731-1734.
- (3) COLLEUILLE H. et E. BRAUDEAU, 1996. A soil fractionation related to the soil structural behaviour. Aust. J. Soil Res. (à paraître)
- (4) YONG R. N., WARKENTIN B. P., 1975. Soil properties and behaviour. Elsevier, New York. 449 p.
- (5) BREWER R., 1964. Fabric and mineral analysis. WILEY J. & SONS. New York.
- (6) VORONIN A.D. 1983. An energetic approach to the quantitative evaluation of soil structure. Soviet soil science. 103-109.
- (7) YONGS E. G., P. B. LEEDS-HARRISON, R.S. GARNETT 1994. Water uptake by aggregates. European Journal of Soil Science, 45, 127-134.

SIMULATION DES VARIATIONS DE LA CONDUCTIVITE ELECTRIQUE D'UN TORRENT PAR LE COUPLAGE D'UN MODELE D'HYDROLOGIE DE SURFACE AVEC LA DISTRIBUTION SPATIALE DE LA CONDUCTIVITE SUR LE BASSIN VERSANT DU RIO BURATE (ANDES VENEZUELIENNES)

Mirla CORNIELES*, Roger MOUSSA**, Olivier RIBOLZI*** et Vincent VALLES***

* MARNR Edificio y esquina Camejo, Caracas Vénézuéla et INRA Science du Sol Avignon et Université d'Avignon

** INRA Science du Sol, 2 Place Viala 34000 Montpellier

*** INRA Science du Sol Domaine St Paul, Site Agroparc, 84914 Avignon Cedex 9

Résumé

Le couplage entre un modèle chimique et un modèle de transfert d'eau peut être entrepris à diverses échelles. La plus fréquente est celle du profil (Rieu 1978, Marlet, 1996). Il permet de prévoir la distribution verticale des éléments chimiques dans un sol. A l'échelle du bassin versant, le couplage entre un modèle d'hydrologie de surface qui simule la propagation d'une onde dans un réseau hydrographique (Moussa, 1994) et la connaissance de la distribution spatiale des paramètres chimiques permet simuler les variations temporelles de la chimie des eaux à l'exutoire.

Cette approche a été appliquée au bassin versant du Rio Burate dans les Andes vénézuéliennes (Cornieles *et al.*, 1994). Ce dernier présente une forte variabilité spatiale de ses caractéristiques chimiques, depuis des eaux très concentrées acides jusqu'à des eaux diluées alcalines susceptibles de les neutraliser. Le modèle de base (Moussa, 1994) prévoit la propagation de l'onde dans un bief à partir de la célérité C de l'onde et du coefficient de diffusion D:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = -C \frac{\partial Q}{\partial x} + D \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2}$$

Q débit, t temps, x distance

L'équation est discrétisée selon le schémas numérique implicite de Crank-Nicholson (Richtmeyer et Mourton, 1969).

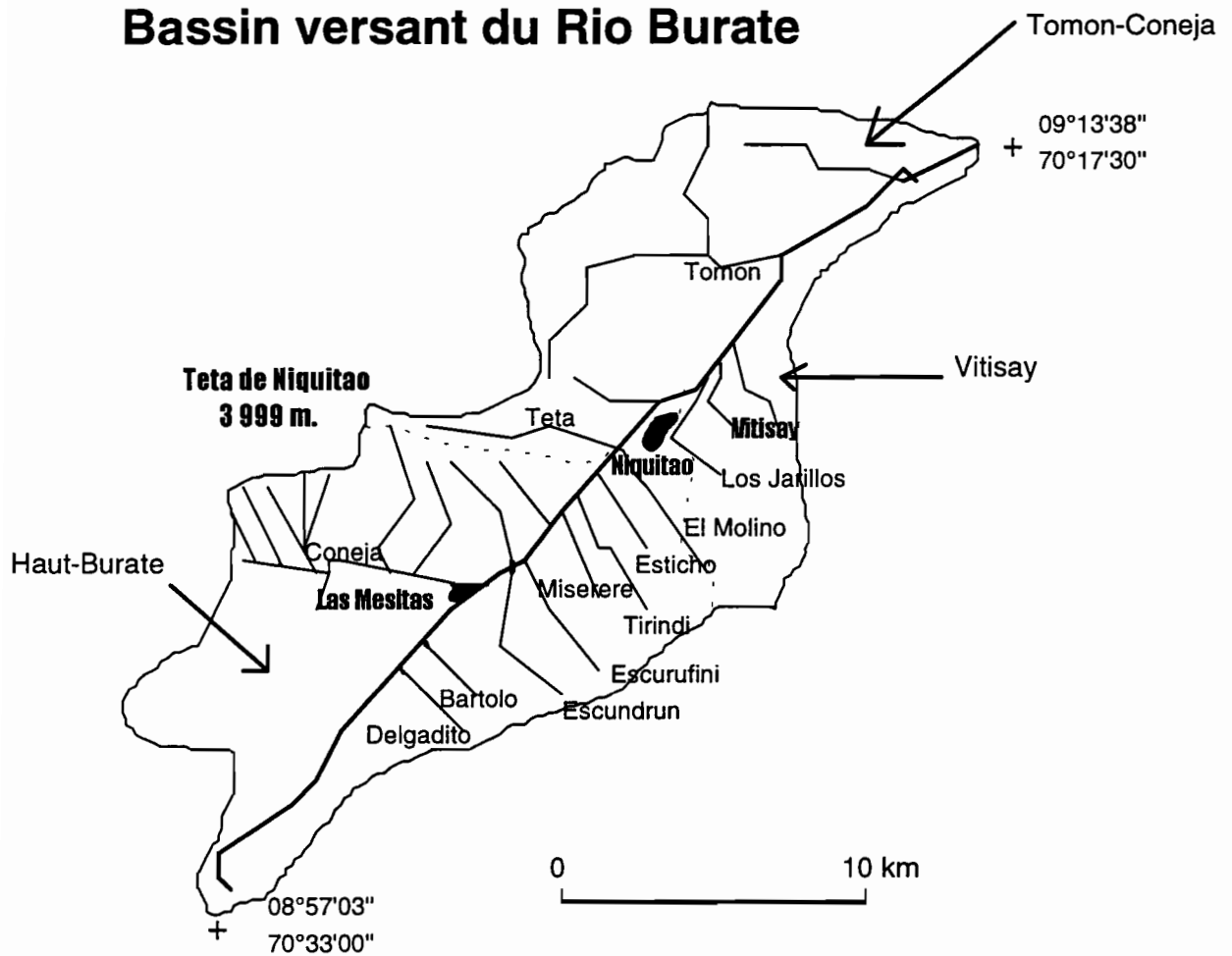
Le bassin versant a été découpé en trois sous-bassin versant principaux dont la signature chimique a été bien caractérisée par une étude de distribution spatiale.

L'épisode simulé survenu en période humide s'étale sur 30 heures et fut très violent. Le débit de pointe de $300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, pour une surface de 364 km^2 est atteint après une montée des eaux d'environ une minute. La conductivité mesurée présente des variations d'un facteur 2 entre le débit de base et le débit de pointe.

La simulation, réalisée à partir d'un pas de mesures de 5 mn, donne de bons résultats. L'hydrogramme simulé reflète l'essentiel des caractéristiques de l'hydrogramme observé. Les variations de conductivité sont également bien rendues. Les écarts entre simulation et observation sont faibles et peuvent être attribués à un effet de chasse de l'eau présente dans le réseau hydrographique avant la pluie.

Mots-clef: conductivité électrique, modélisation, couplage, bassin versant, hydrologie

Bassin versant du Rio Burate



VARIABLES D'ENTREE NECESSAIRES A L'UTILISATION DU MODELE

- * Le signal d'entrée dans le Burate
(Hydrogramme de sortie d'un bassin versant élémentaire)
- * La distance de propagation de l'onde dans le Burate
- * La célérité et la dispersion

- * Les trois signatures (une par sous-bassin versant)

PROPAGATION DE L'ONDE ISSUE D'UN BASSIN VERSANT ELEMENTAIRE DANS LE RESEAU HYDROGRAPHIQUE:

L'onde issue du bassin versant élémentaire se propage dans le réseau hydrographique avec une certaine célérité et une atténuation D:

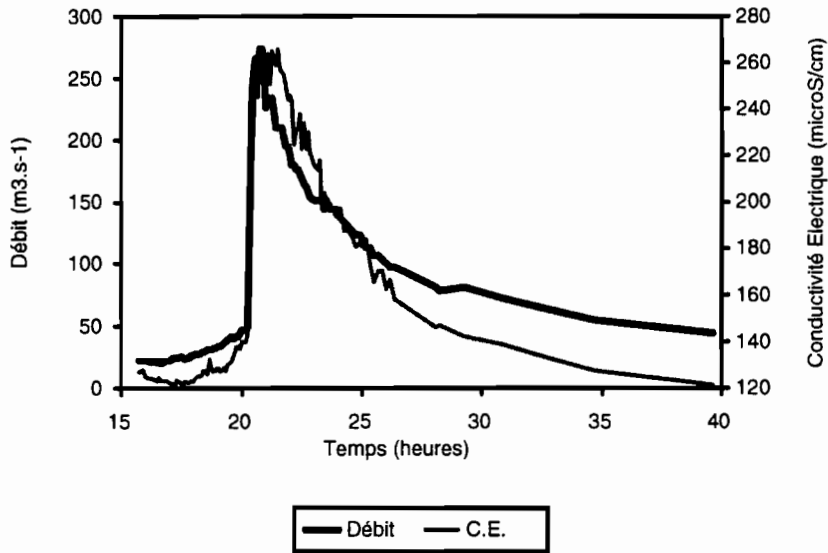
$$\frac{\partial Q}{\partial t} = -C \frac{\partial Q}{\partial x} + D \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} \quad (4)$$

Q débit, t temps, x distance, C célérité, D atténuation

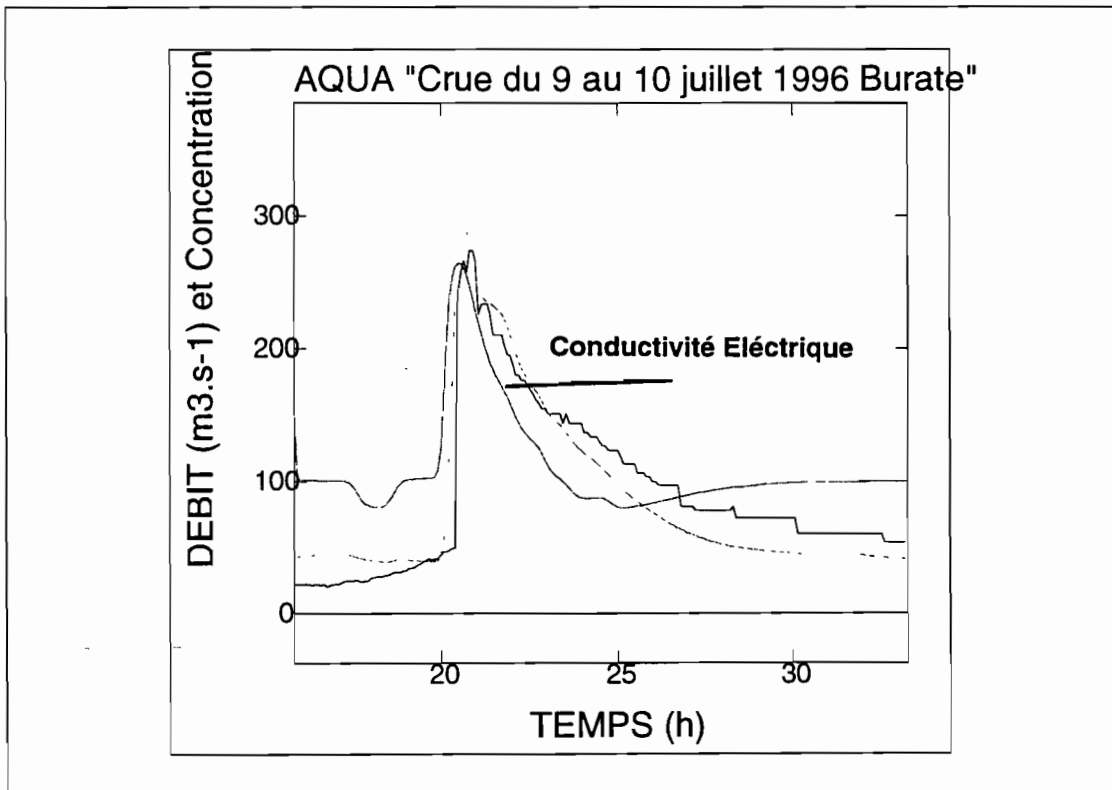
La discrétisation est réalisée selon le schémas numérique implicite de Cranck-Nicholson (Richtmeyer et Mourton, 1969).

BURATE

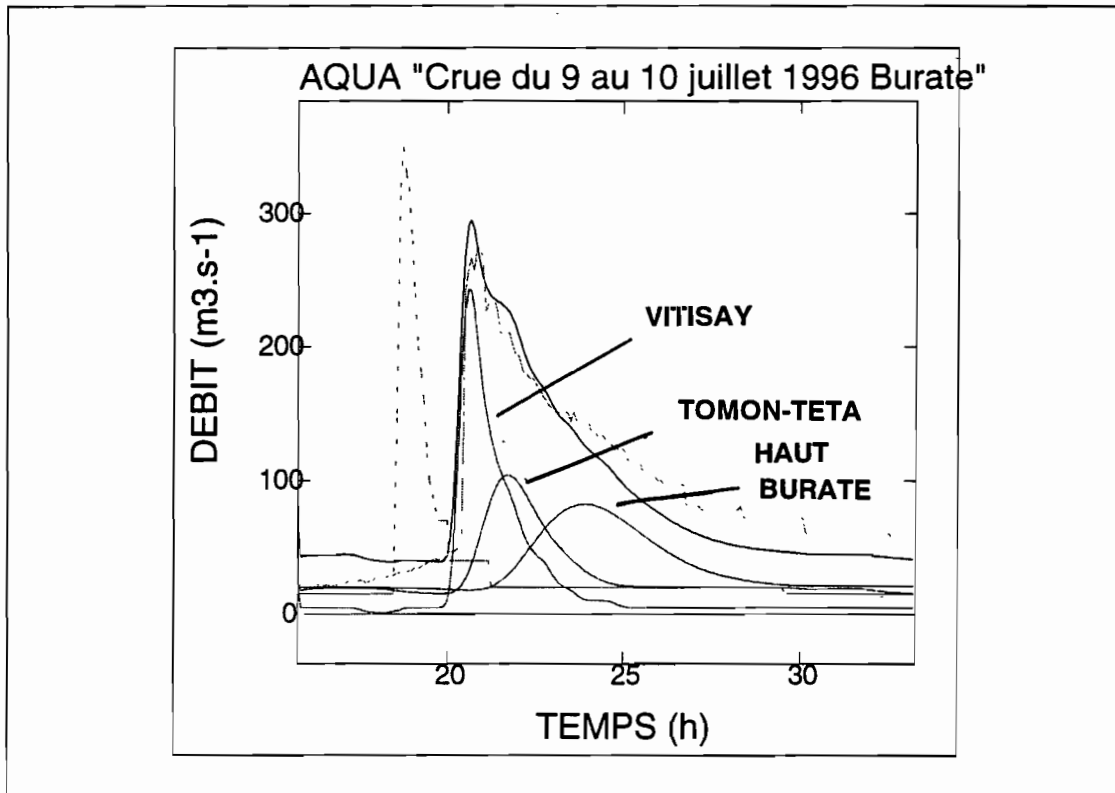
Conductivité Electrique (laboratoire)



Hydrogramme et conductivité électrique mesurés à l'exutoire du rio Burate les 9 et 10 juillet 1995



Conductivité électrique et hydrogramme simulés par le modèle. Comparaison avec l'hydrogramme mesuré



Variations temporelles du signal d'entrée dans le réseau des hydrogrammes mesurés et calculés et des contributions des trois sous-bassins principaux.