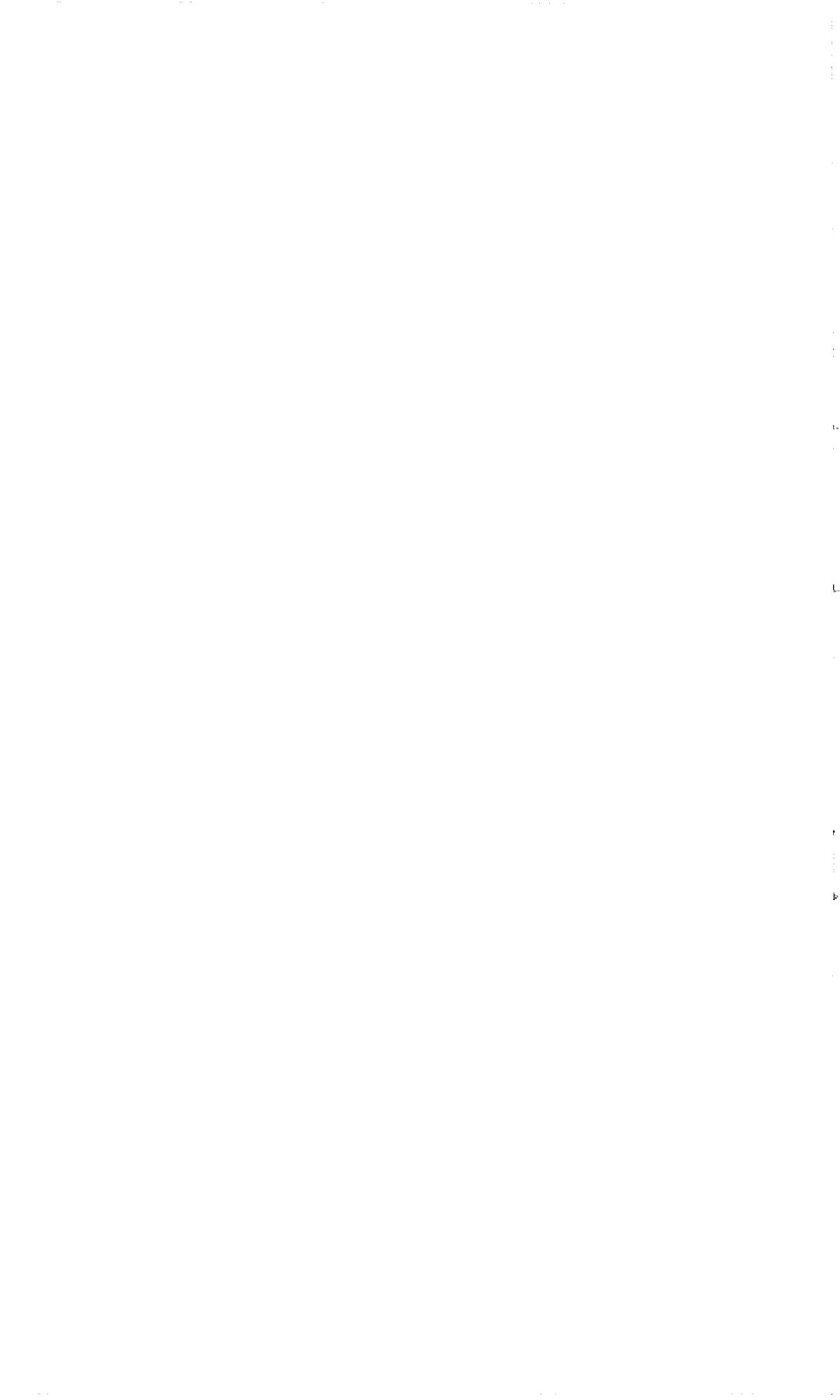


**CRITERES DE QUALITE DES EAUX POUR UN USAGE
EN IRRIGATION**

Par

A. LARAQUE



CRITERES DE QUALITE DES EAUX POUR UN USAGE EN IRRIGATION

(évolutions et prévisions dans les açudes du Nordeste brésilien semi-aride)

A.LARAQUE

RESUME

L'intérieur du Nordeste brésilien est une vaste région semi-aride déséquilibrée.

Une valorisation de ses terres peut être réalisée par irrigation, à partir de milliers de retenues collinaires : les "açudes", déjà existantes.

La productivité et la pérennité d'un périmètre irrigué dépendent étroitement de la qualité des eaux utilisées, et en particulier de son risque de salinisation (apprécié d'après sa conductivité électrique : CE), et de son risque d'alcalisation (SAR).

C'est donc dans la finalité d'une meilleure gestion des eaux, que nous étudions :

- les caractéristiques hydrochimiques de ces açudes et leurs évolutions en saison sèche;
- les méthodes de prévision (par un modèle tenant compte de la thermodynamique des solutions) de l'évolution de la CE et du SAR dans les açudes en phase évaporatoire.

RESUMO

O interior do Nordeste brasileiro é uma vasta região semi-árida e sub-desenvolvida.

Uma valorização destas terras pode ser obtida através da irrigação com a utilização dos milhares de açudes já existentes.

A produtividade e a perinidade de um perímetro irrigado depende essencialmente da qualidade das águas utilizadas, e em particular de seu risco de salinização (avaliação através de sua condutividade elétrica : CE) e de seu risco de alcalização (SAR).

Portanto com objetivo de melhorar o manejo das águas é que nos estudamos :

- as características hidroquímicas dos açudes e suas variações em épocas de seca.
- os métodos de previsão (modelo que leva em conta a hidrodinâmica das soluções) da evolução da CE e do SAR dentro dos açudes em fase de evaporação.

INTRODUCTION

Depuis une quinzaine d'années l'ORSTOM⁽¹⁾ et la SUDENE⁽²⁾ étudient au travers d'accords de coopération, les comportements hydrologiques de petits bassins versants du Nordeste brésilien semi-aride. On prend conscience de l'utilité de ces travaux quand on sait que des dizaines de milliers de retenues collinaires : "les açudes", existent dans le Nordeste et continuent à être construites pour résister aux sécheresses périodiques qui affectent cette région, qui fait partie d'ailleurs du fameux "Polygone des sécheresses".

La concrétisation pratique de si longues recherches, pour le développement, voit le jour dans la volonté de plus en plus affirmée ces dernières années de favoriser l'irrigation à partir de ces réservoirs jusqu'ici largement sous utilisés. Les modèles hydrologiques et de gestion des petits açudes mis au point rendent dès lors possible l'optimisation de l'utilisation de leurs ressources.

Si l'aspect quantitatif de cette ressource en eau était bien évalué, il n'en était pas de même pour l'aspect qualitatif, dont l'importance en irrigation n'est plus à démontrer.

C'est pour cette raison, que dès 1987, ont été engagés des travaux dans ce domaine.

Après avoir rappelé les principaux critères d'interprétation des eaux d'irrigation, nous nous limiterons dans cet article à présenter les caractéristiques hydrochimiques générales des açudes nordestins, ainsi que la prévision de l'évolution de ces critères, durant la saison sèche, grâce à l'utilisation d'un modèle basé sur la thermodynamique des solutions et adapté à l'étude des açudes en phase évaporatoire.

I QUALITE DES EAUX ET RENDEMENT DES CULTURES

Dans les cultures irriguées, c'est la solution du sol qui est prélevée par la plante, et ce sont ses caractéristiques physico-chimiques qui agiront sur elle et sur la structure du sol. Quelles sont-elles et quelle est leur action ?

1.1 Principaux critères de qualité des eaux d'irrigation et leur importance

1.1.1 Paramètres clés de la solution du sol :

Pour l'agronome et le pédologue, les paramètres clés de définition de la solution du sol sont sa conductivité électrique (CEe), sa concentration en chlore (Cle) et son taux de saturation par rapport au sodium ($Na/T^{(3)}$), mesurés sur l'extrait de pâte saturée du sol.

1 ORSTOM = Institut de Recherche Scientifique pour Le Développement en Coopération.

2 SUDENE = Surintendance pour Le développement du Nordeste.

3 T (meq/100gr de sol) = $Na^+ + K^+ + Ca^{++} + Mg^{++} + H^+ + Al^{+++}$

Des valeurs limites de ces paramètres ont été établies expérimentalement pour éviter des problèmes de salinité, toxicité, perméabilité, qui pourraient affecter plantes et périmètres irrigués et se traduire par des baisses de rendement des cultures et des risques de perte des périmètres à plus ou moins long terme.

- la conductivité électrique ⁽⁴⁾ : représente les teneurs en sels dissous des solutions aqueuses. Leurs concentrations conditionnent la pression osmotique ⁽⁵⁾, qui peut, lorsqu'elle est trop élevée, rendre difficile l'absorption de l'eau par le végétal. Le rendement des cultures en sera alors affecté.

- la concentration en chlore : cet élément est choisi pour représenter les risques de toxicité ionique vis à vis du végétal. Il n'est pas le seul nocif, d'autres sont aussi incriminés comme par exemple le sodium, et le bore. Leur accumulation exagérée dans les tissus végétaux se traduit par des dommages à la plante (brûlures des extrémités foliaires, etc...) et parfois par des baisses de rendement.

Nous signalons que le chlore, élément très soluble n'intervient dans les précipitations salines qu'à de très fortes concentrations des eaux et n'est pas adsorbé par les sols. C'est donc lui qui a tendance à se concentrer le plus dans les eaux soumises à évaporation. Pour ces raisons, il est souvent choisi comme traceur pour mesurer les degrés de concentration des eaux par évaporation.

C'est pendant la phase de croissance succédant à la germination que la plante est la plus sensible à ces deux paramètres.

- le rapport "Na/T" :

Les pédologues évaluent le degré d'alcalisation du sol à partir de ce rapport exprimé en pourcentage où T représente la capacité totale d'échange cationique.

C'est en particulier l'ion sodium qui entraînera une perte de la structure du sol, en s'échangeant avec des anions du complexe adsorbant ⁽⁶⁾ des argiles. Il s'ensuit une défloculation des argiles qui rendra la circulation de l'eau plus lente au sein du sol. Cela entraînera un risque d'asphyxie des racines dont les effets seront là encore une baisse de rendement des cultures. Une perte souvent définitive du périmètre irrigué est également à craindre suite à son imperméabilisation.

4 CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$ à 25°C) = Résidu sec (mg/l) / (0,64 à 0,72)

5 pression osmotique : $P_o = 0,36 \times \text{CEe}$ ($\mu\text{S}/\text{cm}$ à 25°C)

6 Complexe adsorbant d'un sol = ensemble des colloïdes (composés humiques et argiles) dotés de charges négatives susceptibles de retenir les cations sous la forme échangeable, c'est à dire pouvant être remplacés par d'autres cations dans certaines conditions. Les ions de ce complexe sont en équilibre avec les solutions du sol par échange.

1.1.2 Paramètres clés des eaux d'irrigation :

- Ces paramètres de la solution du sol sont contrôlés par leurs homologues des eaux d'irrigation, soit : CE_{ir}, SAR_{ir}⁽⁷⁾, Cl_{ir}.

- Différentes relations et tables, que l'on peut rencontrer dans la littérature spécialisée, ont été mises au point pour relier les paramètres de la solution du sol à ceux des eaux d'irrigation.

La figure 1 par exemple, présente la tolérance des cultures à la salinité et les chutes de rendement consécutives à une augmentation de la salinité des eaux d'irrigation et donc de la solution du sol.

- L'intérêt du calcul du SAR des eaux d'irrigation, après avoir été durant longtemps sujet à discussion, peut, d'après le dernier bulletin d'irrigation et de drainage de la FAO n°29 revu (1985), suite aux évaluations menées par plusieurs chercheurs, être définitivement conseillé pour représenter le degré d'alkalinité des eaux d'irrigation et le risque qu'elles peuvent apporter quant à la baisse de perméabilité des sols qu'elles irrigueront. D'après cette même source, la notion de "SAR ajusté" restée longtemps en vigueur, devrait être abandonnée en raison de sa tendance à surestimer les rapports de sodium.

1.2 Notion de fraction lessivante

Pour s'affranchir des problèmes de salinité, toxicité, perméabilité qui peuvent résulter de l'utilisation d'eau de mauvaise qualité, il faut adopter quelques précautions comme : un drainage approprié au niveau du périmètre irrigué, et la prise en compte dans la dose d'irrigation d'une fraction de lessivage : FL pour l'élimination des sels. Son calcul se fait en fonction des seuils de productivité des cultures que l'on se fixe (on accepte en général 10% de baisse du rendement optimum) et des degrés tolérés des risques au niveau du sol.

On détermine, grâce aux différentes tables et abaques existantes, quelles sont les valeurs critiques à ne pas dépasser pour les paramètres clés de la solution du sol : (CE_e, Na/T, et Cl_e).

La connaissance des paramètres correspondants des eaux d'irrigation (CE_{ir}, SAR_{ir}, et Cl_{ir}), permet le calcul de la FL pour chaque contrainte. On retient la FL limitante, c'est à dire la plus grande.

A contrario, si en raison d'une faible disponibilité des ressources, on doit se fixer une FL donnée, on déterminera alors les seuils des paramètres clés des eaux d'irrigation à ne pas dépasser.

1.1.3 Conclusion

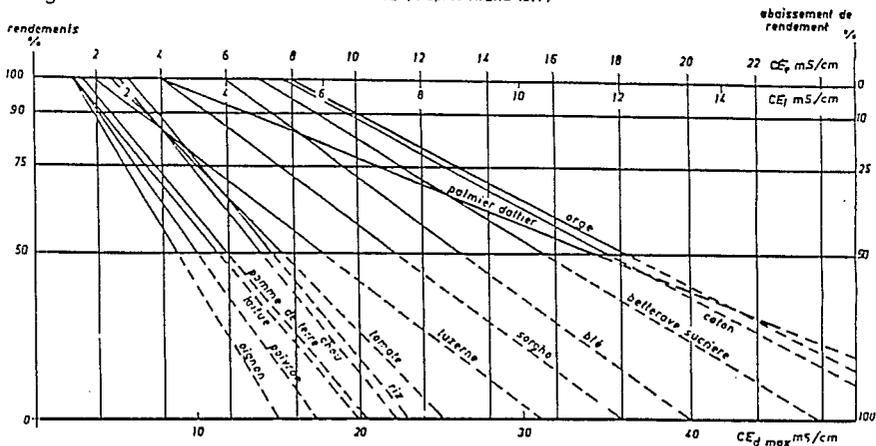
En irrigation on doit toujours tenir compte des caractéristiques de chaque terme du système "eau-sol-plante", qui sont étroitement liées, et dont la connaissance permettra le calcul de la dose de lessivage.

⁷ SAR = Na / ((Ca+Mg)/2)^{0,5}

Sans entrer dans le détail de ce calcul, qui ne fait d'ailleurs pas l'objet de cet article, nous rappelons qu'il existe à cet effet, d'une part une méthode classique à base de formules et d'abaques établies empiriquement à partir d'expérimentations et d'autre part une méthode dite géochimique tenant compte des phénomènes physico-chimiques qui se réalisent à l'interface eau-sol.

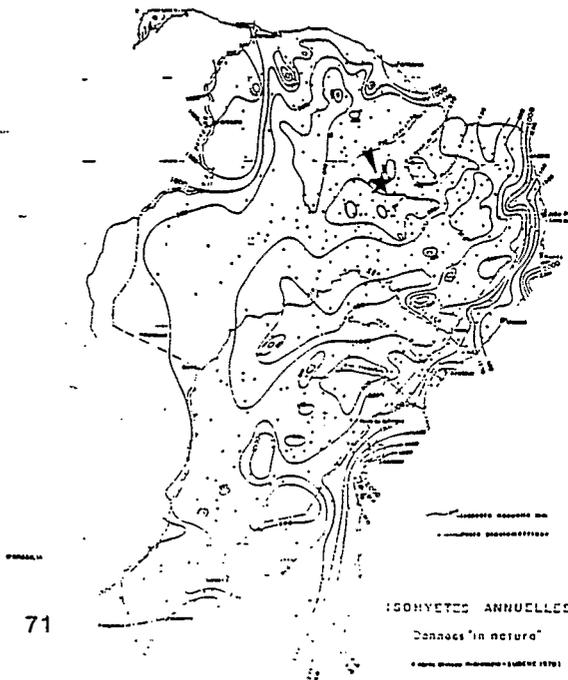
Ces deux approches nécessitent une bonne connaissance des caractéristiques des eaux d'irrigation, afin de calculer avec précision les doses de lessivage pour obtenir les meilleurs rendements culturaux tout en préservant les sols et en économisant l'eau.

Fig 1 - TOLÉRANCE DES CULTURES A LA SALINITÉ (d'après AYERS 1977)



- CEs = Conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée du sol
- CEi = Conductivité électrique de l'eau d'irrigation
- CEd = Conductivité électrique de l'eau de drainage à la base de la zone des racines

Fig 2 - Carte des isohyètes annuelles du Nordeste du Brésil et situation de l'açude Moquem (*)



II UTILISATION POUR L'IRRIGATION DES AÇUDES DU NORDESTE BRESILIEN SEMI-ARIDE

2.1 Présentation du climat nordestin et des açudes

* Le climat : L'intérieur du Nordeste brésilien appelé également "Sertao" a un climat qualifié de semi-aride en raison de sa faible pluviométrie annuelle (moyenne de 400 à 800 mm suivant les endroits), et de l'alternance d'une saison sèche et humide, avec un retour quasi périodique de sécheresses pluriannuelles tous les dix-treize ans. La principale caractéristique climatique reste sans aucun doute la très grande irrégularité des pluies tant en ce qui concerne leur répartition spatiale que leur distribution à l'échelle interannuelle et saisonnière. Ces pluies sont souvent très localisées, violentes et intenses.

L'évaporation très forte peut atteindre un centimètre par jour durant la saison sèche.

La région affectée par ce climat, couvre 950 000 km² et se situe entre les parallèles 3°S et 15°S et les méridiens 36°W et 44°W (Cf carte des isohyètes : fig.2).

* La géologie : plus de la moitié du Nordeste est constitué de roches cristallines (à dominance granitique) plus ou moins métamorphisées, du socle précambrien. Ces zones peu perméables favorisent l'écoulement de surface et sont donc propices à la construction de retenues collinaires. Le reste du Nordeste est composé de formations sédimentaires du phanérozoïque, plus perméables, souvent exploitées sur le plan hydrogéologique.

* Les açudes : pour résister aux sécheresses, l'homme a construit depuis le début du siècle des dizaines de milliers de retenues collinaires, en général sur les régions cristallines afin d'emmagasiner les eaux de ruissellement, pour l'alimentation du bétail et les besoins domestiques.

Ces réservoirs sont généralement sous utilisés et la majeure partie de l'eau stockée se perd par évaporation ce qui provoque des modifications hydrochimiques importantes de cette ressource.

Depuis quelques années, des programmes de développement rural visent à utiliser ces açudes pour favoriser l'irrigation. Il devenait alors urgent de connaître la qualité générale de ces eaux et leurs comportements hydrochimiques lors des saisons sèches pendant lesquelles ces ressources seront le plus sollicitées.

Les retenues concernées par cette étude, ont des volumes variant entre 10 000 et 1 000 000 m³ pour des profondeurs allant de 2 à 10 mètres. Ce sont ces types d'açudes que l'on rencontre d'ailleurs le plus fréquemment dans le Nordeste.

2.2 Caractéristiques physico-chimiques générales des eaux d'açudes

Sur une soixantaine d'açudes caractéristiques des diverses tailles, formes et degré de salinité existant dans la partie cristalline du Sertao, ont été effectuées des analyses physico-chimiques des eaux, avec suivant les cas, des fréquences mensuelles à semestrielles, du début 1987 à la mi 1990.

455 analyses représentatives des différents stades évaporatoires de ces açudes ont pu ainsi être réalisées.

2.2.1 Répartition des analyses et typologie

La plage des conductivités rencontrées s'étale entre 50 et 45 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 25°C.

L'histogramme de la figure 3 montre en fonction des différentes classes de conductivité du tableau de l'USSL⁽⁸⁾, qui est la méthode de classification des eaux d'irrigation la plus répandue, la répartition de cet échantillonnage.

Près de 80% des analyses appartiennent aux classes C1, C2, C3 et environ 20% aux autres classes, (C4, C5, C6). Quant aux SAR, le nombre d'analyses par classe est le suivant :

- pour S1 : 361 soit 79,16% des analyses;
- pour S2 : 53 soit 11,62%;
- pour S3 : 18 soit 3,95%;
- pour S4 : 24 soit 5,26%.

C'est la classe C2 des conductivités et la classe S1 pour les SAR qui sont les plus représentées. D'une manière générale, la classe C2S1 est caractéristique des eaux des açudes étudiés.

Nous avons délimité dans le tableau de l'USSL (fig 4) un faisceau dans lequel se situent tous nos échantillons. Les limites supérieure et inférieure correspondent aux valeurs extrêmes de la CE et du SAR pour chaque classe du tableau. La courbe centrale passe par les échantillons moyens de chaque classe.

Nous constatons donc, que les eaux des açudes situés sur terrains cristallins (tous açudes et toutes saisons confondus) sont marquées par un risque de salinisation plus important que le risque d'alcalisation. Ceci est confirmé par le fait que dans chaque case du diagramme USSL, la classe de conductivité est supérieure à celle du SAR. LEPRUN (1988) à fait la même observation à partir de l'étude statistique d'environ 350 analyses d'eau d'açudes.

⁸ USSL = United States Salinity Laboratory situé à Riverside (Utah)

Il s'agit là d'un point très positif pour l'irrigation, car les problèmes liés à l'alcalisation des sols sont bien plus graves et plus difficiles à éviter que ceux liés à la salinisation. La récupération de sols salés est par contre possible et relativement simple par lavage avec des eaux de bonne qualité, ce qui n'est pas le cas pour les sols sodiques.

Les eaux dont la conductivité dépasse $5\ 000\ \mu\text{S}/\text{cm}$ à 25°C étant absolument impropres à tout usage en irrigation, nous étudierons ici plus particulièrement les eaux de conductivités inférieures à cette limite, qui représentent près de 90% de l'échantillonnage total, soit 404 analyses.

2.2.2 Variations tridimensionnelles

Les transects verticaux et horizontaux (mesures de température, pH, conductivité électrique, analyses chimiques) effectués montrent que les eaux des aqüdes sont en général bien homogénéisées, sans présence de stratifications verticales (LARAQUE, 1988).

2.2.3 Hydrochimie générale

La composition chimique moyenne des eaux étudiées (tout aqüde ayant une CE $< 5\ 000\ \mu\text{S}/\text{cm}$ à 25°C , et toute saison confondue) visualisée sur le diagramme de STABLER (tab.1), enseigne que ces eaux sont très pauvres en sulfates et potassium et met en évidence leur faciès chloro bicarbonaté-mixte dominant.

2.2.4 Etats de saturation :

Une cinquantaine de mesures in situ du pH et de l'alcalinité, menée sur différents aqüdes à diverses époques de l'année ont permis de calculer la pression partielle en gaz carbonique dissous ($p\text{CO}_2$), et montrent que les eaux sont pratiquement toutes sursaturées en CO_2 dissous (fig.5).

La pression partielle en gaz carbonique dissous moyenne dans ces milieux est de $10^{-2,296}$, soit seize fois supérieure à la $p\text{CO}_2$ atmosphérique moyenne ($10^{-3,5}$), qu'ils devraient avoir s'il y avait équilibre.

Des constatations similaires, s'adressent à d'autres milieux lacustres tel le lac Tchad (CARMOUZE, 1976), le lac de Guiers au Sénégal (CARN, 1985), etc..., et pourraient s'expliquer par exemple par une activité biologique, qui dégagerait du gaz carbonique dans des eaux stagnantes.

La calcite peut présenter de légères sursaturations, son produit d'activité ionique pouvant être quatre fois supérieur à son produit de solubilité.

La figure 5 montre que les états de saturation des eaux par rapport à la $p\text{CO}_2$ sont indépendants de leur force ionique, celle-ci représentant les degrés de salinité des eaux. Par contre, l'état de saturation par rapport à la calcite a tendance à augmenter avec cette dernière. Il en est de même pour la magnésite et la dolomite.

Fig 3 - Répartition des échantillons étudiés dans les classes de conductivité de l'USSL.

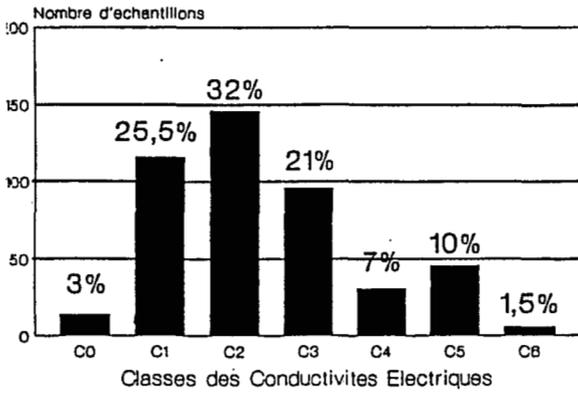


Fig 5 - Etats de saturation des eaux par rapport à la pCO2 et à la calcite.

Saturations / pCO2, et / calcite
 • IS pCO2
 • IS calcite

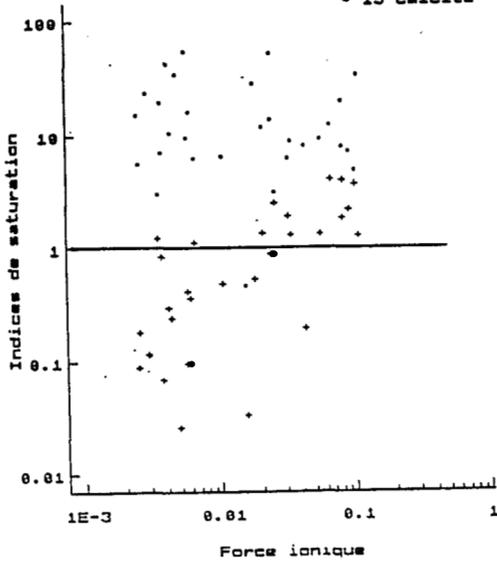
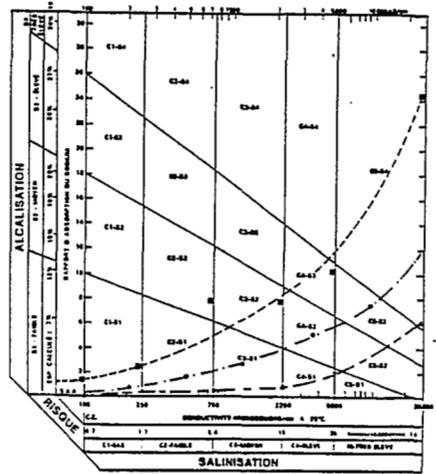


Fig 4 - Représentation des eaux étudiées dans le diagramme de l'USSL.



CLASSIFICATION DES EAUX D'IRRIGATION (FAO/IRRI - 1988)

tableau 1 - Composition moyenne des eaux des acides étudiées suivant la méthode de STABLER (pour des conductivités allant de 50 à 5000 uS/cm à 25°C, soit 404 analyses)

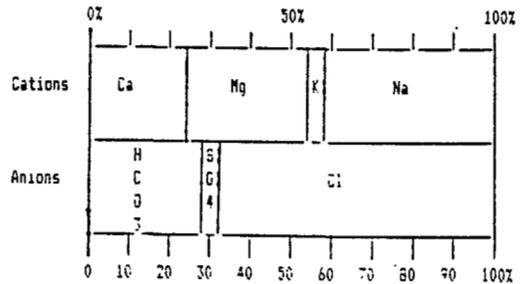


Fig 6 - Evolution moyenne des eaux des açudes en phase évaporatoire dans les diagrammes de PIPER.

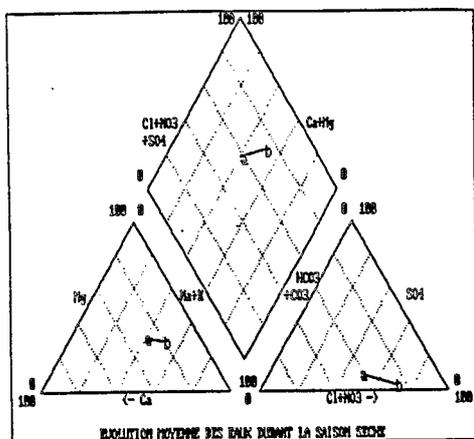


Fig 7 - Situation moyenne des eaux des açudes sur le diagramme de SCHOELLER en début et fin de saison sèche.

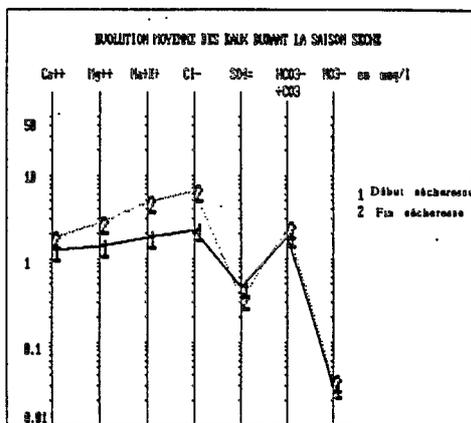


Tableau 2 - Classification des eaux étudiées en fonction des problèmes qu'elles peuvent apporter en irrigation

Critères d'interprétation et unités	Valeurs limites	Intensité des problèmes	lot A nombre:	lot A %	lot B nombre:	lot B %	lot C nombre:	lot C %
Conductivité électrique (aS/cm à 25°C)	< 0,7	pas de problème	264	65,55	27	79,41	23	67,65
	0,7 à 3	problème croissant	121	30,02	6	17,65	7	20,60
	> 3,0	problème grave	18	4,47	1	2,94	4	11,75
Cl (meq/l)	< 4	pas de problème	274	68,00	26	76,47	23	67,65
	4 à 10	problème croissant	58	14,39	4	11,76	4	11,75
	> 10	problème grave	72	17,87	3	8,82	7	20,60
SAR	< 3	pas de problème	309	76,67	32	94,12	24	70,59
	3 à 9	problème croissant	94	23,32	2	5,88	8	23,53
	> 9	problème grave	0		0		2	5,88
HCO3 (meq/l) (2)	< 1,5	pas de problème	115	28,53	14	41,18	6	17,65
	1,5 à 8,5	problème croissant	288	71,46	20	58,82	28	82,35
	> 8,5	problème grave	0		0		0	
pH	6,5 à 8,3	pas de problème	385	95,53	37	100,00	26	76,47
	< 6,5 et > 8,4	problème	18	4,46	0		8	23,53

(1) = valeurs tirées de FAD n°29 (1976) et FAD n°29 revu (1985)

(2) = uniquement dans le cas d'irrigation par aspersion

remarques : lot A = totalité des 403 analyses dont la CE < 5 aS/cm à 25°C

lot B = données de 34 açudes en début de saison sèche

lot C = données de 34 açudes en fin de saison sèche

2.3 Conséquences de l'évaporation sur la qualité des eaux des açudes

Une étude précise a été menée sur 34 açudes durant le processus évaporatoire amorcé à la saison sèche, pour décrire les principales caractéristiques de leurs évolutions hydrochimiques.

On a reporté sur le diagramme de PIPER de la figure 6 l'évolution moyenne des eaux pendant la saison sèche. Celle-ci se dirige nettement vers la voie saline neutre, avec augmentation relative du chlore et des alcalins consécutive à une diminution simultanée des alcalino-terreux et des bicarbonates ne pouvant provenir que de précipitations carbonatées.

Le diagramme de SCHOELLER de la figure 7 montre que le chlore en valeur absolue, est l'élément qui se concentre le plus. Les autres éléments dissous étant soustraits de la solution par précipitations salines ou par des phénomènes d'adsorption avec les argiles des sédiments.

Des analyses aux rayons X des argiles des sédiments ont d'ailleurs mis en évidence la présence dominante de calcite.

2.4 Facteurs physico-chimiques limitants pour l'irrigation

Nous pouvons grâce aux données du tableau 2, classer par ordre d'importance les paramètres limitants en irrigation définis d'après les directives de la FAO (1976, 1985).

Les valeurs limites pour l'ion HCO_3 ne concernent que l'irrigation par aspersion. Dans ce dernier cas il constitue alors le facteur limitant le plus fréquemment rencontré.

Pour les autres types d'irrigation on a par ordre d'importance dégressif : Cl , CE > SAR > pH .

Ceci étant vrai tant en début qu'en fin de saison sèche, avec cependant dans ce dernier cas une augmentation nette du pourcentage des eaux présentant des problèmes de chlore.

La première colonne présentant la totalité de l'échantillonnage étudié (tous açudes et toutes saisons confondus) a la même ordonnance des facteurs limitants.

Tableau 3 : Caractéristiques physico-chimiques moyennes des eaux d'açudes entre début et fin de saison sèche (provenant de l'étude de 34 açudes)

	CE	SAR	classe	pH	Ca	Mg	Na	K	Cl	SD4	HCO3	NO3
	µS/cm		USSL		←----- meq/l ----->							
	à 25°C											
début saison												
sèche	416,60	1,15	C2S1	7,49	1,263	1,402	1,614	0,157	2,141	0,350	1,820	0,028
fin saison												
sèche	958,18	2,18	C3S1	7,31	2,425	3,225	4,374	0,390	6,765	0,600	2,967	0,033
facteur de												
concentration:	2,30	1,89			1,92	2,30	2,71	2,49	3,16	1,71	1,63	1,18

Le tableau 3 enseigne que pour un facteur de concentration moyen de 3,16 calculé à partir des concentrations en chlore de début et de fin de saison sèche, la conductivité électrique moyenne des eaux étudiées passe de la classe USSL C2 à C3 alors que le SAR reste dans la classe S1.

Il est donc surtout à craindre pour l'irrigation à partir des aqüdes, des problèmes de salinité et de toxicité dus au chlore, problèmes d'autant plus importants que la saison sèche est avancée.

D'après les constatations précédentes et l'ordre d'importance des facteurs de concentration ioniques (tab.3): $FN_{a} > FK > FMg > FCa$ et $FCI > FSO_{4} > FHCO_{3}$, nous pouvons considérer que l'évolution hydrochimique des eaux en phase évaporatoire est essentiellement contrôlée par la précipitation de la calcite.

2.5 Dynamique hydro-saline des aqüdes en saison sèche

La salinité des eaux d'aqüdes dépend à la fois de la quantité et de la qualité des flux d'entrée (pluies, ruissellements, apports souterrains) et de sorties (évaporation, infiltration, prélèvements divers).

Les quelques considérations théoriques suivantes nous aideront à mieux comprendre les comportements hydro-salins des aqüdes en saison sèche, où nous considérerons que les flux entrants sont négligeables par rapport aux flux sortants (fig.8). Nous décrirons ces derniers ainsi :

- les pertes par évaporation de charge ionique nulle.
- les pertes par infiltrations et prélèvements, de charge dissoute à tout moment identique à celle des eaux de la retenue. Plusieurs dynamiques peuvent avoir lieu :

cas 1 :

Le réservoir n'est pas alimenté et subit uniquement des pertes par évaporation. Le volume diminue et la concentration saline augmente, la masse saline reste constante puisque l'exportation de sels par évaporation est négligeable.

En fonction de l'importance des pertes volumiques V_0 - V_1 uniquement dues à l'évaporation, la concentration résultante des eaux variera entre les droites CC_0 et CC_1 , puisque la masse saline reste constante. C'est le cas de l'exportation hydrique, sans exportation saline.

cas 2 :

Le réservoir perd de l'eau par infiltrations et prélèvements (pour l'irrigation, par exemple). Il en résulte une diminution proportionnelle du volume et de la masse saline, la concentration saline reste par conséquent identique. Les pertes par infiltrations et prélèvements peuvent être du point de vue qualitatif assimilées lorsque les eaux du réservoir sont bien homogénéisées, ce qui, nous le savons maintenant, est le cas de la grande majorité des petits et moyens aqüdes.

Il y a ici exportations hydrique et saline simultanées car les eaux soustraites sont de même charge ionique que celles de l'açude. La diminution de la masse saline ($M_0 - M_1$), consécutive à la perte de volume ($V_0 - V_1$) respectera toujours l'égalité : $V_0 \times M_0 = V_1 \times M_1$.

cas 3 :

Les pertes ont lieu par évaporation, infiltration, et prélèvements. La masse et le volume diminuent avec le temps, ainsi que la concentration.

C'est à ce dernier cas que nous avons à faire dans les conditions naturelles; chacune de ces pertes étant d'une importance variable en fonction bien sûr de l'évaporation régionale, de la géométrie de l'açude (qui impliquera un volume évaporé plus ou moins important par rapport au volume restant) et des caractéristiques du fond de l'açude et de construction de la digue qui joueront sur les quantités infiltrées. Il est évident que plus les volumes infiltrés et prélevés seront importants, plus l'augmentation des facteurs de concentrations salines sera atténuée.

Dans l'optique de notre travail, la saison sèche est la période sensible à suivre de très près. En effet, c'est pendant cette période que les besoins en eau se font sentir le plus crûment et que les risques de salinisation des açudes, surtout par évaporation, sont les plus exacerbés.

Ce schéma met en évidence l'intérêt d'une utilisation rapide des eaux des açudes à la fin de la saison des pluies pour éviter d'une part une perte de cette ressource par évaporation et d'autre part une salinisation de l'açude. Une telle gestion permettrait d'irriguer de plus grandes surfaces avec un meilleur rendement sans risque pour le périmètre irrigué.

Fig 8 - EVOLUTIONS DE LA CONCENTRATION SALINE D'UNE RETENUE EN SAISON SECHE

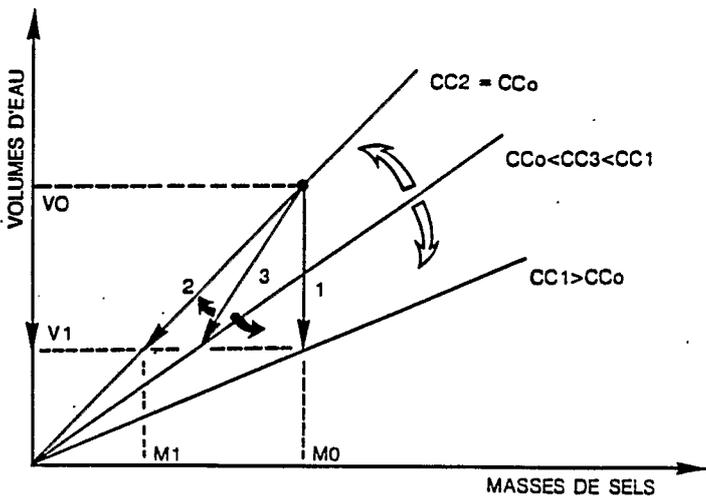
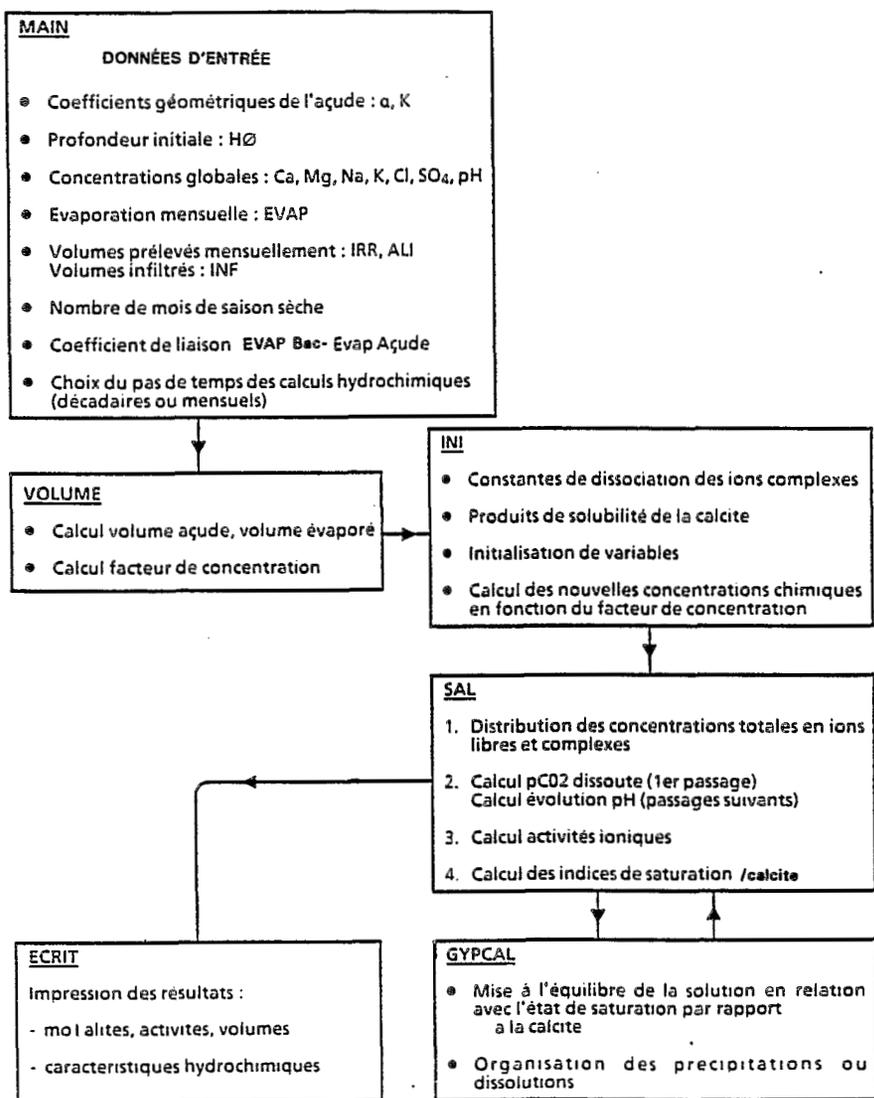


Fig 9 - ORGANIGRAMME SIMSAL simplifié



III SIMULATION DE L'EVOLUTION DANS LES AÇUDES EN PHASE EVAPORATOIRE, DES PARAMETRES LIMITANTS EN IRRIGATION

- Lorsque l'eau s'évapore, elle se concentre en sels, et à partir de certains facteurs de concentration dépendant de la composition chimique de la solution initiale, surviennent des précipitations salines. Les éléments dissous qui entrent dans leurs compositions seront donc soustraits à la solution. Les premiers sels formés sont en général les moins solubles et ceux qui ont leur indice de saturation les premiers atteints. C'est souvent le cas des alcalino-terreux qui consomment ainsi une partie des ions Ca et Mg dissous. Cela aura pour effet d'accroître d'autant plus les valeurs du SAR.

- L'évolution de la CE et du SAR ne sera par conséquent pas proportionnelle au facteur de concentration volumique dû à l'évaporation, comme le considère la méthode classique. Si l'on ne tient pas compte de ces précipitations, les doses de lessivage calculées à partir de la CE seront surestimées (conduisant à des gaspillages d'eau) et celles calculées à partir du SAR seront sous-estimées (ce qui pourra entraîner un risque d'alcalisation des sols).

- Ce chapitre présente une méthode permettant d'évaluer avec plus de précision l'évolution des trois principaux paramètres de classification des eaux d'irrigation, lorsque celles-ci sont en phase évaporatoire. Cela permettra de déterminer les différentes valeurs du facteur de concentration des eaux d'irrigation à ne pas dépasser pour pouvoir s'affranchir des trois grands préjudices menaçant les projets d'irrigation. Seule la méthode géochimique permet de se rapprocher de la réalité des faits.

3.1 Principes et présentation du modèle SIMSAL

Il s'agit d'un modèle déterministe permettant de simuler l'évolution de la conductivité électrique, du SAR et des concentrations en chlore des eaux des açudes en phase évaporatoire (LARAQUE, 1989).

Le programme (écrit en FORTRAN IV) à partir de ce modèle, tient sur une disquette pour micro-ordinateur, et est ainsi facilement "transportable".

Il est composé de trois sous-routines (voir l'organigramme simplifié de la figure 9) permettant le calcul de l'évolution hydro-saline des açudes.

3.1.1 Le module volumétrique :

La sous-routine "VOLUME" calcule quotidiennement l'évolution du volume d'un açude sous l'influence de l'évaporation et des pertes d'eau par infiltrations et prélèvements (irrigation, alimentation du bétail, etc,...).

On obtient avec une bonne précision le volume de l'açude (VA), grâce à la formule suivante : $VA = K \times H^\alpha$ (MOLLE, 1985), où H est le niveau de l'eau dans l'açude, et α et K sont des coefficients de forme et d'ouverture calculés à partir d'un relevé bathymétrique préliminaire.

Le facteur de concentration volumétrique FCvol est uniquement dû aux volumes évaporés (VEV), et l'on a $FCvol = VAD / (VAD - VEV)$ où VAD représente le volume initial de l'açude.

Lorsqu'il se produit des pertes par infiltrations ou prélèvements, nous avons vu (P.2.5) que l'accroissement des concentrations salines sera d'autant plus atténué que ces pertes seront importantes.

Il est tenu compte de ces deux types de pertes volumétriques pour le calcul du facteur de concentration de la solution, ce facteur étant uniquement dû à l'évaporation.

A des intervalles de temps décennaires ou mensuels, choisis par l'opérateur, la partie géochimique calcule l'évolution des caractéristiques hydrochimiques de l'eau.

3.1.2 Le module chimique :

Il est constitué de deux sous-routines : SAL et GYPCAL. Cette partie provient de l'association de deux programmes développés par RIEU (la sous-routine GYPCAL vient du programme SIMUL en FORTRAN IV (1983), et SAL correspond au programme ACTIVE, en GWBASIC (1988)), établis à partir des algorithmes de DUFÉY et al (1979) utilisés dans le sous-programme EQU SOL du programme SOPREC (en FORTRAN IV).

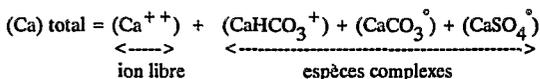
Ce module nécessite comme données d'entrée, les résultats globaux des dosages des ions principaux (Ca, Mg, Na, K, Cl, SO₄) effectués sur un prélèvement d'eau, retiré à la fin de la saison des pluies. C'est à ce moment que le degré de remplissage de l'açude est le plus élevé et que les concentrations salines sont les plus faibles.

Le pH pris autant que possible in situ au moment de la collecte est également indispensable.

La sous-routine "SAL" distribue les concentrations ioniques totales données par le laboratoire d'analyses d'eau en ions simples et complexes et calcule leurs activités ioniques. Cela permettra de vérifier leurs états de saturation par rapport à différents sels dont notamment la calcite qui nous l'avons vu est le principal minéral à précipiter.

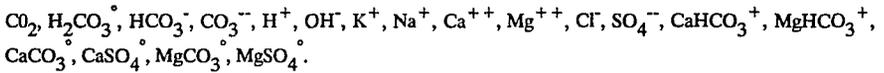
En effet, l'état de saturation par rapport à un sel se vérifie en comparant son produit de solubilité au produit des activités ioniques de ses composants pris à l'état libre (ou simple). Or, nous savons que les résultats des analyses de laboratoire donnent les concentrations totales de chaque espèce ionique, c'est à dire la somme de ses diverses formes : simple ou complexe.

Par exemple pour le calcium on a :



Comme le précise RIEU (1987), on ne cherche pas ici à obtenir une distribution exhaustive de toutes les espèces en solution, mais d'établir simplement et avec une bonne précision l'activité des principaux ions libres quelle contient.

A cette fin on cherche à déterminer la molalité et l'activité des 18 espèces suivantes :



On sait d'après les lois de la thermodynamique que l'activité et la molalité d'un ion ainsi que la force ionique de la solution peuvent être reliées par les trois formules suivantes :

$$\log \gamma_i = \frac{-A \times Z_i^2 \times \sqrt{I}}{1 + c_i \times B \times \sqrt{I}} \quad \text{loi de DEBYE-HUCKEL (1)}$$

$$a_i = \gamma_i \times m_i \quad (2)$$

$$I = 0,5 \times \sum m_i \times Z_i^2 \quad (3)$$

avec,

γ_i = coefficient d'activité de l'espèce i

Z_i = valence de l'ion i considéré

a_i = activité de " " "

m_i = molalité de " " "

c_i = coefficient tenant compte du diamètre de l'ion hydraté i et dépendant de la température

A, B = constantes dépendant de la température

I = force ionique

Les molalités " m_i " de toutes les espèces ne peuvent être déterminées qu'après le calcul de la distribution des espèces totales en ions simples et complexes (eq.2). Mais le calcul de cette distribution suppose connu les coefficients d'activité, qui dépendent de la force ionique de la solution (eq.1). Et cette dernière nécessite la connaissance de la distribution ionique (eq.3) !

Un tel problème peut alors se résoudre par itérations convergentes à partir d'une valeur initiale arbitraire de la force ionique. Un système d'incrémentations positives ou négatives portant sur les valeurs calculées devra vérifier les équilibres thermodynamiques suivants :

* *Equilibres de dissociation (A)*

$$[\text{H}_2\text{CO}_3^{\circ}] / \text{pCO}_2 = K_0 = 10^{-1.46}$$

HELGESON (1969)

$$[\text{H}_3\text{O}^+] \cdot [\text{HCO}_3^-] / [\text{H}_2\text{CO}_3] = 10^{-6.35} = K_1$$

Calculé à partir de HELGESON (1969) et de

LANGMUIR (1969)

$$[\text{H}_3\text{O}^+] \cdot [\text{CO}_3^{--}] / [\text{HCO}_3^-] = 10^{-10.32} = K_2$$

LANGMUIR (1969)

$$[\text{H}_3\text{O}^+] \cdot [\text{OH}^-] = K_w = 10^{-14}$$

LATIMER (1952)

$$[\text{Ca}^{++}] \cdot [\text{CO}_3^{--}] / [\text{CaCO}_3^{\circ}] = 10^{-3.20} = K_4$$

HELGESON (1969)

$$[\text{Ca}^{++}] \cdot [\text{SO}_4^{--}] / [\text{CaSO}_4^{\circ}] = 10^{-2.31} = K_5$$

HELGESON (1969)

$$[\text{Ca}^{++}] \cdot [\text{HCO}_3^-] / [\text{CaHCO}_3^+] = 10^{-1.27} = K_8$$

Calculé à partir de LANGMUIR (1969) et

BERNER (1971)

$$[\text{Mg}^{++}] \cdot [\text{CO}_3^{--}] / [\text{MgCO}_3^{\circ}] = 10^{-3.40} = K_6$$

KHARAKA et BARNES (1973)

$$[\text{Mg}^{++}] \cdot [\text{SO}_4^{--}] / [\text{MgSO}_4^{\circ}] = 10^{-2.25} = K_7$$

HELGESON (1969)

$$[\text{Mg}^{++}] \cdot [\text{HCO}_3^-] / [\text{MgHCO}_3^+] = 10^{-0.9} = K_9$$

KHARAKA et BARNES (1973)

(les valeurs et références des constantes thermodynamiques proviennent de FRITZ, 1975).

* *Conservation de masse (B)*

$$K_t = K^+$$

$$\text{Na}_t = \text{Na}^+$$

$$\text{Cl}_t = \text{Cl}^-$$

$$\text{Ca}_t = \text{Ca}^{++} + \text{CaCO}_3^{\circ} + \text{CaSO}_4^{\circ} + \text{CaHCO}_3^+$$

$$\text{Mg}_t = \text{Mg}^{++} + \text{MgCO}_3^{\circ} + \text{MgSO}_4^{\circ} + \text{MgHCO}_3^+$$

$$\text{SO}_{4t} = \text{SO}_4^{--} + \text{CaSO}_4^{\circ} + \text{MgSO}_4^{\circ}$$

* *Electroneutralité (C)*

$$2x(\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++} \cdot \text{SO}_4^{--} \cdot \text{CO}_3^{--}) + \text{K}^+ + \text{Na}^+ + \text{H}^+ + \text{CaHCO}_3^+ + \text{MgHCO}_3^+ - \text{HCO}_3^- - \text{OH}^- - \text{Cl}^- = 0.$$

Le pH étant connu, on a à résoudre un système de 17 équations à 17 inconnus.

Aucune donnée initiale sur l'alcalinité n'étant introduite et la pCO₂ n'étant pas déterminée, les équilibres carbonatés (les trois premières équations de dissociation du groupe "A") ne peuvent être résolus.

Le calcul est initialisé avec une pCO₂ arbitraire (10⁻³). La méthode utilisée ici consiste à répéter le calcul de distribution par incrémentation successive de la pCO₂, en déterminant à chaque fois la charge électrique résiduelle (éq. C). Lorsque cette dernière devient inférieure à une valeur déterminée (par ex. 10⁻⁵ équiv./litre), le calcul est interrompu.

. La subroutine "GYPCAL" provoque les précipitations ou dissolutions nécessaires en fonction de l'état de saturation par rapport à la calcite, afin d'équilibrer la phase liquide et la phase solide, tout en respectant les équilibres thermodynamiques modifiés par ces opérations. En effet, à chacune de ces opérations, une interaction permanente avec la subroutine "SAL" permet le calcul de la redistribution ionique afin de respecter les équilibres de dissociation.

Les équations de conservation des masses et celle de l'équilibre de l'électroneutralité sont constamment vérifiées à la fin des calculs. L'exactitude de ce contrôle est une garantie de leur bon déroulement.

- Calcul de la conductivité électrique de la solution :

Celle-ci est déduite de sa force ionique grâce à la régression suivante :

$$CE \text{ (mS/cm à } 25^{\circ}\text{C)} = 76,92 \times I - 0,011 ; r = 0,986 ,$$

obtenue à partir de l'étude de près de 400 analyses d'eau d'açudes provenant du Nordeste brésilien semi-aride en zones cristallines.

3.1.3 Hypothèses initiales et considérations diverses

. La relation (1) de DEBYE-HUCKEL permet de calculer des coefficients d'activité avec une précision convenable pour des solutions dont la force ionique ne dépasse pas 0,1.

. Pour des forces ioniques < 0,1, on admet que les ions Na, K, Cl, restent sous la forme simple : $\text{Na}^+, \text{K}^+, \text{Cl}^-$.

. On néglige les paires d'ions formés avec OH^- .

. On considère que la prise en compte des paires d'ions principales : $\text{H}_2\text{CO}_3^{\circ}$, CaHCO_3^+ , MgHCO_3^+ , CaCO_3° , MgCO_3° , CaSO_4° , MgSO_4° , implique une correction suffisante sur les concentrations totales de Ca, Mg, SO_4 , HCO_3 et CO_3 pour déterminer avec une bonne précision les concentrations des ions libres correspondants. On fait l'approximation que les paires d'ions non chargées ont un coefficient d'activité égal à 1 et que les paires d'ions monovalentes ont un coefficient d'activité sensiblement égal à celui de HCO_3^- (HELGESON, 1969).

. Les activités des espèces neutres sont assimilées à leurs concentrations.

. Dans nos cas d'étude ce modèle ne tient pas compte de l'équilibre avec une phase solide initiale, puisqu'en fin de saison des pluies les eaux sont diluées et les stocks salins supposés dissous sont donc nuls au départ des simulations. Seules des précipitations pourront être provoquées pour conserver la solution à l'état d'équilibre, lorsqu'elle se concentrera.

- La question de la pCO₂ :

Les calculs de la pCO₂ dissoute effectués sur plusieurs açudes, à partir de mesures in situ du pH et de l'alcalinité, ont montré la sursaturation de ces milieux.

Par rapport à un équilibre entre la phase liquide et la phase gazeuse (l'atmosphère), cette sursaturation a tendance à diminuer le pH et l'activité de CO₃. En conséquence, les indices de saturation des espèces carbonatées seront atteints plus tardivement et les précipitations carbonatées se réaliseront pour des facteurs de concentration plus élevés.

Les études de terrains révèlent que la pCO₂ fluctue légèrement dans le temps. Ces variations peuvent dépendre de nombreux facteurs (action organique, brassage des eaux par le vent, température, insolation, etc...). Dans l'impossibilité de quantifier ces facteurs pour pouvoir prédire les fluctuations de la pCO₂, on calcule celle-ci à partir du pH mesuré in situ de la première analyse d'eau (début saison sèche), puis on la considère comme stable durant le reste du processus évaporatoire. Seul le pH sera alors modifié par la suite. Cette approximation est tout de même préférable à celle considérant la pCO₂ des eaux de surface en équilibre systématique avec l'atmosphère.

3.2 Etude d'un exemple : l'açude Moquem

3.2.1 Présentation :

Cet açude fait partie du bassin hydrologique de Taua suivi par la SUDENE à proximité de la localité du même nom dans l'Etat du Ceara (représenté par une étoile sur la figure 2). Son volume maximum avoisine un million de m³ pour une profondeur de 10,6 mètres. Lors de la période d'étude (saison sèche 1987), son volume maximum atteint en fin de saison des pluies était de 443 000 m³ pour une profondeur de 8,5 mètres. Cette retenue n'est pas utilisée par l'homme et ses infiltrations sont considérées comme négligeables par rapport au volume qu'elle contient. Les seules pertes d'eau durant la saison sèche proviennent ainsi uniquement de l'évaporation.

La saison sèche de l'année hydrologique 1987-88 a duré dix mois, commençant le 10 avril 1987 pour s'achever le 14 février 1988.

Le tableau 4 montre les données du poste météorologique de Taua (équipé d'un bac "A" du Weather bureau) relatives à cette saison sèche.

Tableau 4 - Evaporations (EVAP) et pluies enregistrées au poste de Taua durant la saison sèche 1987-88.

Mois	AVR	Mai	JUI	JUIL	AGU	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV**	TOTAL
EVAP	130	245	215	211	245	228	283	273	250	255	91	2426 mm
PLUIES	30,2	16,4	47,5	0,6	0	0	0	0	0	7	0	111 mm

note : * = à partir du 10 du mois ** = jusqu'au 14 du mois

3.2.2 Evolution hydrochimique durant la saison sèche :

Le tableau 5 montre l'évolution hydrochimique de l'açude pendant cette période et le tableau 6 présente le résultat de la simulation de l'évaporation sur les caractéristiques hydrochimiques.

Le tableau 7 enfin, résume la bonne correspondance entre la conductivité électrique et le SAR calculés d'après les observations et ceux obtenus par simulation, entre le début et la fin de la saison sèche.

C'est donc la conductivité électrique et la concentration en chlore qui seront les paramètres à prendre en compte pour le calcul des doses de lessivage. En effet leurs valeurs respectives en fin de saison sèche (770 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 25°C et 3,7 meq/l) sont proches des limites (Cf tab 2) définies par la FAO (1985) à partir desquelles des problèmes de salinité et toxicité peuvent se faire sentir.

Mais nous ne devons pas oublier que le jugement final que l'on peut apporter à une eau d'irrigation doit prendre en compte les caractéristiques des plantes cultivées comme celles des sols qui seront irrigués.

3.2.3 Comparaison des résultats des simulations et de ceux obtenus par la méthode classique :

. La méthode classique consiste à multiplier purement et simplement la conductivité et le SAR de début de saison sèche (au moment où les eaux sont les plus diluées) par les facteurs de concentration de la solution dus à l'évaporation.

Les figures 10 et 11 montrent que pour l'açude étudié, la méthode classique surestime la salinisation de l'eau de 25% pour un facteur de concentration de 2,90 et donne une conductivité de l'eau pour la fin de la saison sèche égale à 963 au lieu de 769 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 25°C, ce qui peut inciter à surestimer les doses de lessivage.

Cependant cette même méthode sous-estime le SAR de l'eau de 12%, et prévoit 1,6 au lieu de 1,82, ce qui tend à sous estimer les problèmes d'alcalisation et ainsi les doses de lessivage.

. Les prévisions de la méthode géochimique tenant compte des phénomènes de précipitation saline sont plus proches de la réalité observée, que celles de la méthode classique. Cela permet de calculer avec une meilleure adéquation les doses de lessivage et donc celles d'irrigation nécessaires pour conserver un bon rendement des cultures tout en préservant les sols irrigués et en économisant l'eau.

Tableau 5 - Caractéristiques physico-chimiques de l'acide Moquea durant la saison sèche 1987-88.

DATE	Volume (x1000 m ³ /us à 25C)	C.E	S.A.R	pH	Alcali -nité	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO ₄	Résidu sec	FCCI (%)
09/04/87	443.09	333.33	0.94	7.40	2.25	22.40	14.60	23.40	7.20	45.00	0.01	242	1
15/05/87	414.29	364.26	1.01	7.80	2.16	22.40	17.01	26.00	8.00	60.00	0.10	255	1.33
15/06/87	376.06	397.14	1.14	7.70	2.24	25.20	14.60	25.20	6.00	51.50	6.21	276	1.14
15/07/87	352.49	405.71	0.95	6.24	2.48	24.40	19.92	26.00	6.30	56.00	5.82	264	1.24
16/08/87	311.19	436.57	1.25	7.19	2.48	27.20	16.52	33.40	6.50	61.00	6.98	307	1.35
15/09/87	279.13	530.00	1.38	8.00	2.56	30.40	16.50	38.00	9.20	68.00	6.69	371	1.51
13/12/87	182.71	595.71	1.60	8.61	3.47	36.80	24.30	51.00	12.75	100.00	4.50	417	2.22
17/01/88	154.76	675.71	1.76	8.56	4.06	36.40	26.24	57.00	14.20	115.00	4.50	473	2.55
14/02/88	139.92	769.23	1.82	8.45	3.84	36.00	33.04	63.00	14.30	130.00	5.80	484	2.89

Tableau 6 - Simulation par le modèle SIMSAL de l'évolution hydro-chimique de l'acide Moquea durant la saison sèche 1987-88.

DATE	Volume (x1000 m ³ /us à 25C)	C.E	S.A.R	pH	Alcali -nité	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO ₄	Résidu sec	FCCI (%)
09/04/87	443.09	330.00	0.96	7.40	2.19	22.40	14.60	23.40	7.20	45.00	0.01	261	1
18/05/87	398.47	367.00	1.01	7.44	2.43	24.91	16.23	26.02	8.00	30.04	0.11	289	1.11
17/06/87	364.65	401.00	1.06	7.48	2.65	27.22	17.74	28.43	8.75	54.68	0.12	314	1.21
15/07/87	335.20	436.00	1.10	7.51	2.88	29.61	19.30	30.93	9.52	59.48	0.13	341	1.32
16/08/87	306.14	477.00	1.16	7.55	3.14	32.42	21.13	33.97	10.42	65.13	0.14	372	1.45
15/09/87	277.53	526.00	1.22	7.59	3.45	35.76	23.31	37.36	11.49	71.84	0.16	409	1.60
14/12/87	195.68	654.00	1.59	7.65	4.03	33.01	33.06	52.99	16.30	101.90	0.23	504	2.26
13/01/88	174.28	713.00	1.73	7.68	4.31	32.82	37.12	59.49	18.30	114.41	0.25	547	2.54
12/02/88	152.79	764.00	1.93	7.70	4.47	28.10	42.34	67.86	20.88	130.50	0.29	584	2.89

Tableau 7 - Comparaison des principales caractéristiques physico-chimiques pour l'irrigation mesurées au laboratoire avec celles de la simulation par SIMSAL et de la méthode classique entre le début et la fin de la saison sèche 1987-88 pour l'acide Moquea.

	ANALYSES DE LABORATOIRE	SIMULATIONS (SIMSAL)	Méthode CLASSIQUE
facteurs de concentration (%)	1 → 2,89	1 → 2,89	1 → 2,89
Conductivité électrique (uS à 25°C)	333 → 769	330 → 764	333 → 963
S.A.R	0,94 → 1,82	0,96 → 1,93	0,94 → 1,60
Résidu sec (mg/l)	242 → 484	261 → 473	242 → 699,38
Na (mg/l)	23,4 → 63	23,4 → 67,86	23,4 → 67,63
Cl (mg/l)	45 → 130	45 → 130,50	45 → 130,05

(%) FCCI = facteur de concentration basé sur le chlore

3.3 Critique du modèle SIMSAL

Ce modèle se limite à l'étude des solutions aqueuses dont les forces ioniques ne dépassent pas 0,1, ce qui correspond à des conductivités électriques inférieures à 8 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 25°C.

De toute façon des eaux aussi chargées sont totalement impropres à tout usage en irrigation (classe C5 du diagramme de l'USSL). L'étude de leurs évolutions hydrochimiques en phase évaporatoire n'entre pas dans le contexte de ce travail orienté sur celle d'eaux initialement propices à l'irrigation.

Les imprécisions du modèle sont liées :

- pour la partie volumétrique :

. à la qualité de la bathymétrie de l'açude de laquelle dépend le calcul des coefficients géométriques α et k , qui permettent d'obtenir les volumes de l'açude en fonction de ses niveaux d'eau lus sur une échelle limnimétrique.

. à l'existence proche d'un bac évaporatoire suivi pendant de nombreuses années pour obtenir une série d'évaporations mensuelles moyennes la plus précise possible.

. à l'approximation apportée pour chaque açude par le coefficient moyen de liaison entre l'évaporation du bac "A" et l'évaporation des açudes.

. à la connaissance plus ou moins précise des volumes d'eau retirés par l'homme (irrigation, etc...).

. aux incertitudes quant aux volumes infiltrés.

La précision de toutes ces données conditionnera l'exactitude du calcul du facteur de concentration durant la saison sèche.

- pour la partie chimique :

. au fait de ne pas prendre en compte d'éventuelles variations de la pCO_2 dissoute. On considère qu'elle reste fixe durant tout le processus évaporatoire.

. au maintien de l'équilibre de la solution uniquement par rapport à la calcite. Cependant d'autres sels, notamment de magnésium (calcite magnésienne, magnésite, dolomite, ...) doivent également précipiter.

Cela explique que, dans le contexte de l'exemple précédemment traité, les teneurs en magnésium obtenues par simulation soient plus élevées que celles observées. En ne considérant pas les précipitations magnésiennes, le modèle a tendance à donner plus de poids aux précipitations de la calcite (les teneurs en Ca simulées baissent plus rapidement que celles observées (tab 5 et 6).

Cependant, l'excès de précipitation de calcite compense en partie le manque de précipitations magnésiennes, et permet l'obtention d'un SAR plus proche de la réalité observée.

. au choix des constantes thermodynamiques : leurs valeurs varient quelque peu d'un auteur à l'autre.

. au choix d'une température stable de 25°C pour les eaux de l'açude et par conséquent pour les constantes thermodynamiques basées sur cette température (la température des açudes varie surtout entre le jour et la nuit entre 22 et 32°C).

. à l'absence de prise en compte de la cinétique chimique, qui peut provoquer des états de sursaturation par rapport à un minéral sans qu'il y ait obligatoirement précipitation de ce sel.

. à la méconnaissance des interactions chimiques à l'interface "eau - sédiment" (adsorption ou désorption d'ions par les argiles des sédiments).

Figure 10 - CE observée et prévue par la méthode classique et par SIMSAL

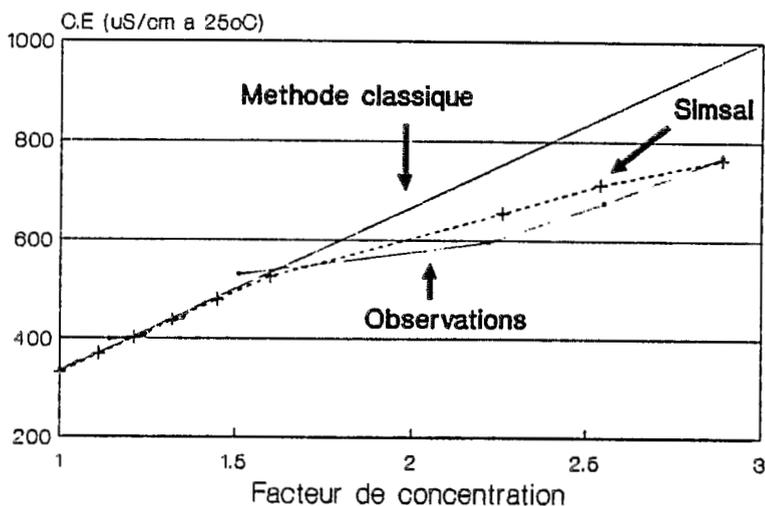
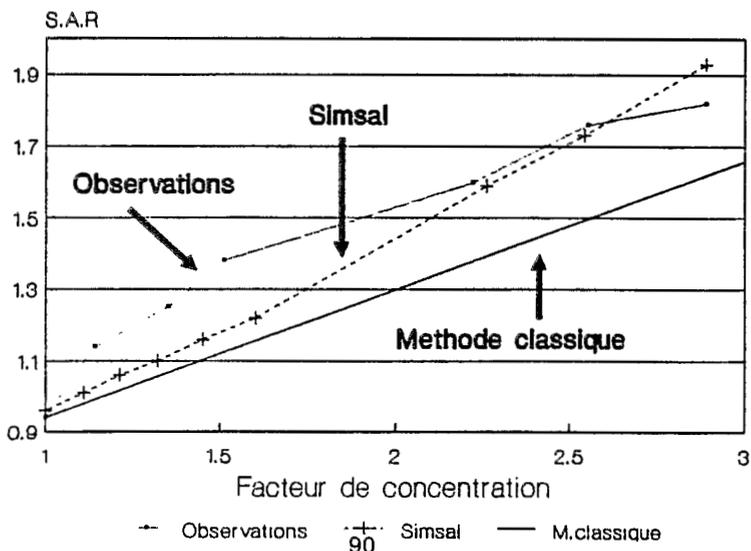


Figure 11. SAR observé et prévu par la méthode classique et par SIMSAL



3.4 Application du modèle SIMSAL à la gestion d'un açude pour l'irrigation

Nous illustrons ici à l'aide du modèle SIMSAL l'influence de l'irrigation sur la qualité des eaux d'açudes et en particulier sur le comportement des paramètres limitants pour l'irrigation (CE, SAR, Cl).

En faisant tourner le modèle toujours sur le même açude avec des doses d'irrigation mensuelles de 0, 5, 10, 20 et 50 000 m³/mois, durant toute la saison sèche, nous mettons en évidence, comme il a été déjà mentionné dans le paragraphe 2.5, l'intérêt d'utiliser l'eau pour éviter à la fois d'importantes pertes volumétriques uniquement par évaporation et une salinisation de l'açude (Cf les graphiques 12(a,b,c,d)).

Pour un même volume restant dans l'açude les courbes "12a" montrent que les facteurs de concentration sont d'autant plus petits que les volumes d'irrigation sont élevés, ce qui a pour effet de diminuer la reprise par évaporation.

- exemple : pour 150 000 m³ restant dans l'açude la concentration des eaux aura varié du simple au double (de 2,8 à 1,3) pour des volumes d'irrigation allant de 0 à 50 000 m³ par mois.

En fait, les eaux de cet açude ne présentent pas de véritables problèmes de qualité pour l'irrigation et le calcul de doses de lessivage est ici inutile. Celui-ci est d'ailleurs largement assuré par les pertes d'eau dues à l'efficacité de l'irrigation (on considère en général que cette dernière est de 50%). Aussi nous chercherons plutôt à titre d'exemple à définir en fonction des différentes politiques d'irrigation présentées, qu'elle sera celle souhaitable pour irriguer en continu durant toute la saison sèche, sans dépasser pour le principal facteur limitant (en l'occurrence, la conductivité électrique) sa première valeur seuil, soit 700 µS/cm à 25°C. Cela permettra de conserver un rendement cultural optimum de 100 à 90% (Cf fig.1).

D'après les résultats du tableau 8 et les courbes 12b, c'est en fonction de l'utilisation de 44, 88 et 156 000 m³, correspondant respectivement aux politiques d'irrigation de 5, 10, 20 000 m³/mois, que ce premier seuil sera atteint.

Sans utilisation d'eau, ce seuil est atteint alors que l'açude contient encore 180 000 m³, suite à la perte par évaporation de 262 000 m³ d'eau n'ayant servi à rien.

Pour une irrigation de 50 000 m³/mois, l'açude se serait vidé au bout de six mois avant la fin de la saison sèche, sans atteindre le seuil des 700 µS/cm à 25°C.

Il est donc conseillé d'irriguer avec 20 000 m³/mois pour traverser l'intégralité de cette longue saison sèche (10 mois) en conservant un rendement optimum à la production agricole et en évitant une salinisation de l'açude. Il restera à la fin de la saison sèche (mi février 1988) environ 20 000 m³ dans l'açude avec une conductivité électrique de 850 µS/cm à 25°C.

Les graphiques 12c et 12d montrent que les premières valeurs seuils des autres facteurs limitants (SAR, Cl) sont à peine dépassées.

SIMSAL permet donc de mieux gérer une retenue en fournissant aux agronomes à tout moment de la saison sèche les volumes d'eau disponibles et leur qualité en fonction de l'ampleur des prélèvements et des taux d'évaporation régionaux, des caractéristiques géométriques des retenues et du faciès initial des eaux au début de cette saison.

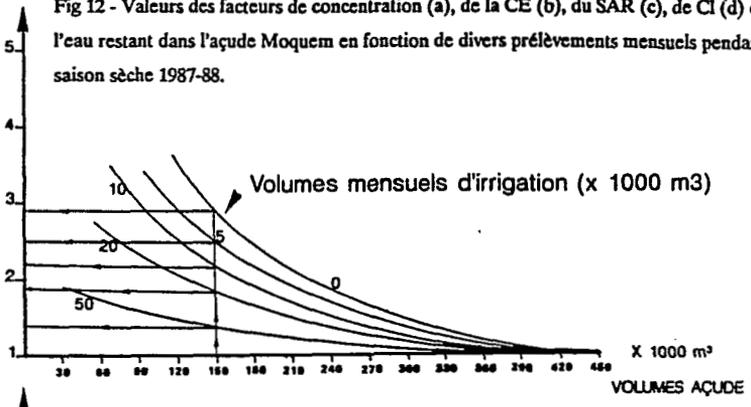
L'utilisation de ce modèle se justifie surtout pour des eaux initiales à la limite avec les eaux dites "à problèmes" définies par la FAO (CE = 700 µS/cm à 25°C, SAR = 3, Cl = 4 meq/l).

Tableau B - Valeurs des facteurs de concentration, des volumes restant dans l'acode mouée et évaporés en fonction de divers prélèvements mensuels durant la saison sèche 1987-88.

DATE	NJ	FC	VA			VEVc			VIRc		
			(VIR _m = 0 m ³)			(VIR _m = 10 000 m ³)			(VIR _m = 10 000 m ³)		
9 4 87	1	1.000	443089.7	.0	.0	1.000	443089.7	.0	.0	.0	
8 5 87	30	1.079	410827.9	32261.7	.0	1.079	401514.1	31986.8	9591.4	.0	
7 6 87	60	1.181	375194.1	67895.5	.0	1.182	357062.1	66699.8	15333.3	.0	
7 7 87	90	1.286	344558.7	98530.9	.0	1.289	317915.6	95914.3	29268.8	.0	
6 8 87	120	1.401	316324.5	126765.1	.0	1.407	281966.5	122189.6	38946.3	.0	
5 9 87	150	1.546	286643.2	156446.5	.0	1.559	245367.2	149072.8	48666.7	.0	
5 10 87	180	1.709	259266.6	183823.0	.0	1.732	211429.7	173058.8	58623.7	.0	
4 11 87	210	1.929	229755.5	213334.1	.0	1.969	176843.4	197941.3	68333.4	.0	
4 12 87	240	2.181	203165.2	239924.4	.0	2.249	145501.8	219322.9	78301.2	.0	
3 1 88	270	2.445	181239.1	261850.5	.0	2.551	119195.9	235960.0	87978.6	.0	
2 2 88	300	2.770	159941.0	283148.9	.0	2.939	94432.4	251022.5	97690.5	.0	
4 3 88	330	3.211	138008.3	305081.5	.0	3.493	69740.2	265121.1	108301.0	.0	
(VIR _m = 5 000 m ³)						(VIR _m = 20 000 m ³)					
9 4 87	1	1.000	443089.7	.0	.0	1.000	443089.7	.0	.0	.0	
8 5 87	30	1.079	406170.1	32124.3	4795.7	1.079	392207.4	31711.0	19182.8	.0	
7 6 87	60	1.182	366125.2	67298.9	9666.7	1.184	338952.9	65495.1	38666.7	.0	
7 7 87	90	1.288	331231.2	97226.1	14634.4	1.293	291326.6	93265.8	58537.7	.0	
6 8 87	120	1.404	299133.2	124486.6	19473.1	1.415	247720.7	117534.0	77892.6	.0	
5 9 87	150	1.552	265980.5	152779.9	24333.4	1.574	204311.6	141522.9	97333.5	.0	
5 10 87	180	1.720	235304.5	178478.6	29311.9	1.759	163986.0	161960.9	117247.4	.0	
4 11 87	210	1.948	203224.4	205705.3	34166.7	2.021	124624.2	181935.6	136666.8	.0	
4 12 87	240	2.213	174214.7	229732.8	39150.6	2.344	88971.8	197698.8	156602.4	.0	
3 1 88	270	2.493	150044.0	249066.6	43989.3	2.716	58883.3	208495.5	175957.1	.0	
2 2 88	300	2.845	126934.6	267322.0	48845.2	3.246	31619.2	216441.3	195380.9	.0	
4 3 88	330	3.332	103500.1	285454.3	54150.5	4.226	6141.2	221048.1	218602.0	.0	
Légende :						DATE NJ (VIR _m = 50 000 m ³)					
NJ	=	durée en jours	9 4 87	1	1.000	443089.7	.0	.0	.0	.0	
FC	=	facteur de concentration du à l'évaporation	8 5 87	30	1.080	364327.0	30877.8	47957.0	.0	.0	
VA	=	volumes de l'acode	7 6 87	60	1.188	284765.0	61820.5	96666.7	.0	.0	
VEVc	=	volumes évaporés cumulés	7 7 87	90	1.305	211936.0	85094.8	146344.1	.0	.0	
VIRc	=	volumes d'irrigation cumulés	6 8 87	120	1.443	145837.9	102967.9	194731.3	.0	.0	
VIR _m	=	volumes d'irrigation mensuels (les volumes sont exprimés en m ³)	5 9 87	150	1.640	83023.7	117439.4	243333.5	.0	.0	
			5 10 87	180	1.919	25741.1	125549.4	293118.4	.0	.0	

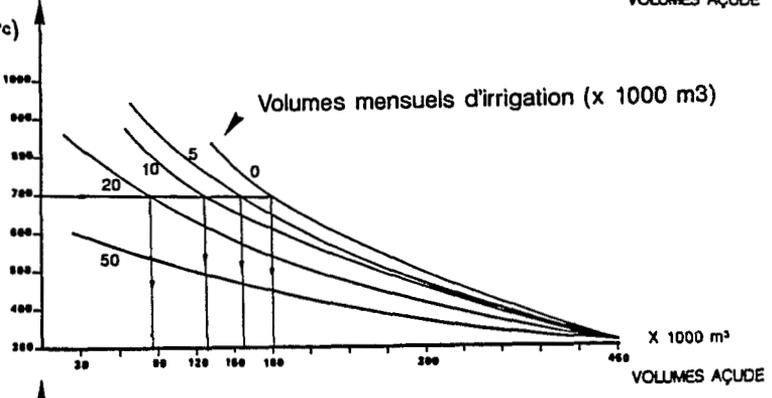
Fig 12 - Valeurs des facteurs de concentration (a), de la CE (b), du SAR (c), de Cl (d) dans l'eau restant dans l'aqûde Moquem en fonction de divers prélèvements mensuels pendant la saison sèche 1987-88.

a) Facteur de concentration

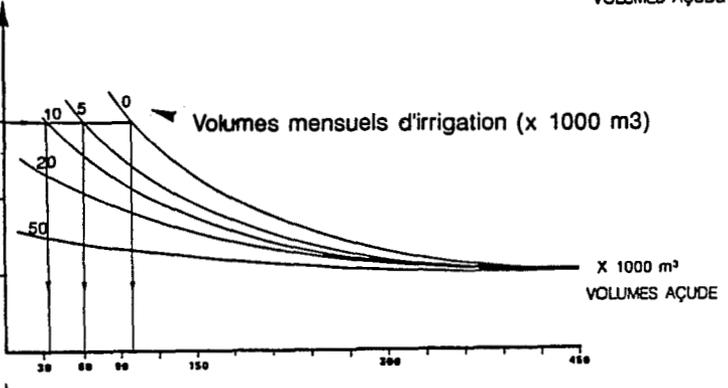


b) Conductivité électrique

($\mu\text{S} / \text{cm}$ à 25°C)

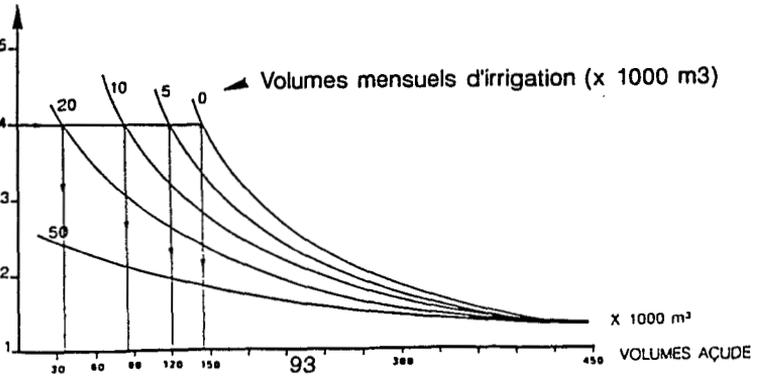


c) SAR



d) Concentration en chlore

(meq/l)



CONCLUSIONS

La qualité des eaux des açudes évolue durant la saison sèche sous l'influence de l'évaporation, principalement en régions semi-arides, où celle-ci est particulièrement forte.

Cet article a permis d'identifier les principales caractéristiques hydrochimiques des açudes et leurs évolutions durant la saison sèche.

Nous avons ainsi mis en évidence que ces eaux toujours sursaturées en gaz carbonique dissous et aux faciès moyens "chloro bicarbonaté - mixte" évoluent vers la voie saline neutre en phase évaporatoire et que les facteurs limitants à prendre en considération pour l'irrigation sont les risques de salinité et de toxicité, ce dernier étant essentiellement dû au chlore; le SAR quant à lui, atteint rarement des valeurs préoccupantes.

La méthode traditionnelle de prévision de l'évolution de la salinité des eaux en phase évaporatoire surestime les concentrations ioniques et par conséquent les doses de lessivage. Cela implique un gaspillage des ressources hydriques d'autant plus mal venu qu'il s'agit de régions où l'eau est rare.

C'est le contraire pour le SAR qui en général est sous-estimé.

Une meilleure précision dans l'évaluation de l'évolution de ces deux paramètres indispensables pour la classification des eaux d'irrigation, peut s'obtenir uniquement par la méthode géochimique qui tient compte de l'état de saturation des eaux par rapport à différents sels et provoque leurs précipitations, à partir d'un certain facteur de concentration dépendant du type d'eau initial, pour conserver à la solution son état d'équilibre.

Malgré de nombreuses hypothèses simplificatrices et des facteurs divers d'imprécisions, l'emploi de modèles géochimiques simples comme le modèle SIMSAL qui fournit des simulations convenables, car adapté aux particularités hydrochimiques des milieux étudiés, est à préconiser pour améliorer la gestion des eaux d'açudes pour l'irrigation et pouvoir prévoir avec plus d'exactitude les rendements cultureaux.

L'utilisation des eaux dès le début de la saison sèche est à préconiser pour éviter des pertes importantes par évaporation et une salinisation excessive de l'açude.

BIBLIOGRAPHIE SUCCINCTE

- CARMOUZE J.P., 1976. "La régulation hydrogéochimique du Lac Tchad". Travaux et documents de l'ORSTOM n°58. Paris. 418 p.
- CARN M., 1985. "Etude expérimentale de l'évolution chimique des eaux du lac de Guiers (Sénégal) concentrées par évaporation". Mémoire DEA, Université de Dakar. 79 p.
- DUFFEY J.E., PETIT C.M., GOBLET Y. et all., 1979. "Modélisation des équilibres physico-chimiques d'échange et de précipitation dans les systèmes sol-eau électrolyte". Annales Agronomiques, 30 (1). Université de Louvain, Belgique. p. 53-62.
- FAO, 1976 (June). "La qualité de l'eau en agriculture". Bull. Irrigation et Drainage n°29. Rome. 81p.
- FAO, 1985. "Water quality for agriculture". Bull. Irrigation and Drainage paper n°29 rev 1. Rome. 173p.
- FRITZ B., 1975. "Etude thermodynamique et simulation des réactions entre minéraux et solutions. Application à la géochimie des altérations des eaux continentales". Thèse Doct. Ing. Strasbourg et Mémoire Sci. Géol., 41, 152 p.
- GARRELS R.M., CHRIST G.L., 1968. "Equilibres des minéraux et de leurs solutions aqueuses". Ed. Gauthiers Villars. Paris. 335 p.
- HELGESON H.C., 1969. "Thermodynamics of hydrothermal systems at elevated temperatures and pressures. American Journal of Science, vol. 267, Department of Geology, Northwestern University, Evanston, Illinois 60201, USA. p. 720-801.
- LARAQUE A., 1988 (sept.). "Evolutions hydrochimiques de retenues collinaires dans le Nordeste semi-aride du Brésil". Colloques et Séminaires de l'ORSTOM, Quatrième Journées Hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier 14-15 septembre 1988. p. 47-79.
- LARAQUE A., 1989 (nov.). SIMSAL : "Um modelo de previsao da salinização dos açudes do Nordeste brasileiro". Anais do VIII Simposio Brasileiro de Recursos Hidricos, Foz do Iguaçu PR. Recife, Brésil. 13 p.
- LEPRUN J.C., 1988. "Manejo e conservação de solos do Nordeste brasileiro. Primeira avaliação da qualidade das águas superficiais no Nordeste". Convênio SUDENE/ORSTOM, SUDENE/DPG/PRN/HME. Recife, Brésil. p. 88-144.
- MOLLE F., 1985. "Potentialités des Açudes du Nordeste brésilien pour un usage en irrigation". Mémoire ENGREF-USTL, Montpellier. 150 p.
- MONTOROI J.P., RIEU M., 1987. "Calcul des activités ioniques dans une solution aqueuse". Programme ACTIVE pour IBM-PC et compatibles. Cah. ORSTOM, série Pédol., vol. XXIII, n°2. Paris. p. 133-150.
- RIEU M., 1983. "Simulation numérique des flux hydriques et prédiction de la salinité des sols". ORSTOM, Paris. 161 p.
- United States Salinity Laboratory Staff, 1954. "Diagnosis and improvement of saline and alkali soils". Agriculture Handbook n°60. L.A. Richards, édit. Washington. 159 p.

LISTE DES FIGURES

- Fig 1 - Tolérance des cultures à la salinité (d'après AYERS, 1977).
- Fig 2 - Carte des isohyètes du Nordeste (SUDENE, 1970).
- Fig 3 - Répartition des échantillons étudiés dans les classes de conductivité de l'USSL.
- Fig 4 - Représentation des eaux étudiées dans le diagramme de l'USSL.
- Fig 5 - Etats de saturation des eaux par rapport à la pCO_2 et à la calcite.
- Fig 6 - Evolution moyenne des eaux des açudes en phase évaporatoire dans les diagrammes de PIPER.
- Fig 7 - Situation moyenne des eaux des açudes sur le diagramme de SCHOELLER en début et fin de saison sèche.
- Fig 8 - Dynamique hydro-saline d'un açude en saison sèche.
- Fig 9 - Organigramme simplifié du modèle SIMSAL
- Fig 10 - Conductivité électrique observée et prévue par la méthode classique et par le modèle SIMSAL durant le processus évaporatoire.
- Fig 11 - SAR observé et prévu par la méthode classique et par le modèle SIMSAL durant le processus évaporatoire.
- Fig 12 - Valeurs des facteurs de concentration (a), de la CE (b), du SAR (c), de CI (d) dans l'eau restant dans l'açude Moquem en fonction de divers prélèvements mensuels pendant la saison sèche 1987-88.

LISTE DES TABLEAUX

- Tab 1 - Faciès hydrochimique moyen des eaux étudiées dans le diagramme de STABLER.
- Tab 2 - Classification des eaux étudiées en fonction des problèmes qu'elles peuvent apporter en irrigation.
- Tab 3 - Variations physico-chimiques moyennes des eaux d'açudes entre début et fin de saison sèche.
- Tab 4 - Evaporations et pluies mesurées au poste de Taua durant la saison sèche 1987-88;
- Tab 5 - Caractéristiques physico-chimiques de l'açude Moquem durant la saison sèche 1987-88.
- Tab 6 - Simulation par le modèle SIMSAL de l'évolution hydro-chimique de l'açude Moquem durant la saison sèche 1987-88.
- Tab 7 - Comparaison des principales caractéristiques physico-chimiques pour l'irrigation mesurées au laboratoire avec celles de la simulation SIMSAL et de la méthode classique entre le début et la fin de la saison sèche 1987-88 pour l'açude Moquem.
- Tab 8 - Valeurs des facteurs de concentration, des volumes restant dans l'açude Moquem et évaporés, en fonction de divers prélèvements mensuels pendant la saison sèche 1987-88.

SOMMAIRE

INTRODUCTION

- I **QUALITE DES EAUX ET RENDEMENT DES CULTURES**
 - 1.1 **Principaux critères de qualité des eaux d'irrigation et leur importance**
 - 1.1.1 Paramètres clés de la solution du sol
 - 1.1.2 Paramètres clés des eaux d'irrigation
 - 1.2 **Notion de fraction lessivante**

- II **UTILISATION POUR L'IRRIGATION DES AÇUDES DU NORDESTE BRÉSILIEN SEMI-ARIDE**
 - 2.1 **Présentation du climat nordestin et des açudes**
 - 2.2 **Caractéristiques hydro-chimiques générales des eaux des açudes**
 - 2.3 **Conséquences de l'évaporation sur la qualité des eaux des açudes**
 - 2.4 **Facteurs physico-chimiques limitants pour l'irrigation**
 - 2.5 **Dynamique hydro-saline des açudes en saison sèche**

- III **SIMULATION DE L'ÉVOLUTION DANS LES AÇUDES EN PHASE ÉVAPORATOIRE, DES PARAMÈTRES LIMITANTS EN IRRIGATION**
 - 3.1 **Principes et présentation du modèle SIMSAL**
 - 3.1.1 Le module volumétrique
 - 3.1.2 Le module chimique
 - 3.1.3 Hypothèses initiales et considérations diverses
 - 3.2 **Étude d'un exemple : l'açude Moquem**
 - 3.2.1 Présentation
 - 3.2.2 Évolution hydrochimique durant la saison sèche
 - 3.2.3 Comparaison des résultats des simulations et de ceux obtenus par la méthode classique
 - 3.3 **Critique du modèle SIMSAL**
 - 3.4 **Application du modèle SIMSAL à la gestion d'un açude pour l'irrigation**

CONCLUSIONS