

MINISTÈRE DE L'INDUSTRIE, DU COMMERCE ET DE L'ARTISANAT

BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

B.P. 6009 - 45018 Orléans Cédex - Tél.: (38) 63.80.01

NOUVELLE ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DE L'EAU POUR L'IRRIGATION

par

A. LANDREAU et L. MONITION



Département hydrogéologie

B.P. 6009 - 45018 Orléans Cédex - Tél.: (38) 63.80.01

77 SGN 628 HYD

Septembre 1977

Résumé

L'effet de la qualité de l'eau d'irrigation sur les cultures est une préoccupation des agronomes et des économistes chargés de la mise en valeur des territoires des zones arides et semi-arides.

Il y a 20 ans, le Laboratoire américain de Riverside en Californie mettait au point des méthodes d'interprétation des données de l'analyse chimique non seulement sous l'aspect des concentrations supportées par les plantes et les arbres fruitiers, mais également sous l'aspect des modifications de la perméabilité des sols. Ainsi le sodium absorption ratio (taux d'absorption du sodium) ou SAR a permis une meilleure maîtrise de l'irrigation avec des eaux de différentes qualités.

A l'occasion d'une réunion scientifique ⁽¹⁾ tenue à l'Université d'Utah en 1975 sous le patronage de la Section irrigation et drainage de la Société américaine des ingénieurs civils, le Water Science and Engineering Department de l'Université de Californie a fait connaître la mise à jour de ses connaissances et les nouvelles interprétations de la composition des eaux pour l'irrigation.

Le présent rapport présente ces nouvelles données et propose un programme de traitement pour le calcul du SAR en fonction des modifications nouvelles apportées dans le calcul de celui-ci.

Ce rapport a été établi par le Département d'hydrogéologie sur crédits d'études du Ministère de l'industrie, du commerce et de l'artisanat.

(1) irrigation and drainage in an age of competition for resources.

S O M M A I R E

1. ANALYSE CHIMIQUE DE L'EAU ET EVALUATION DES IMPACTS SUR L'AGRICULTURE
 - 1.1. Problèmes de salinité
 - 1.2. Problèmes de perméabilité
 - 1.3. Toxicité
 - 1.4. Problèmes divers

2. EVALUATION PRATIQUE DE LA QUALITE DE L'EAU D'IRRIGATION

3. CONCEPT DE SALINITE

4. QUALITE DE L'EAU D'IRRIGATION ET PROBLEMES DE PERMEABILITE.
LE SAR AJUSTE

5. MOYENS DE PREVENTION ET DE CORRECTION DES EFFETS NUISIBLES DE
L'EAU D'IRRIGATION
 - 5.1. Effets imperméabilisants
 - 5.2. Effets toxiques

INDEX BIBLIOGRAPHIQUE

ANNEXE 1 : Calcul du S.A.R. ajusté

ANNEXE 2 : Mode d'emploi du sous-programme SARADJ

ANNEXE 3 : Listing du sous-programme SARADJ

L'eau d'irrigation, qu'elle provienne de rivières ou de sources ou qu'elle soit pompée dans les nappes, n'est jamais pure ; elle contient des sels dissous qui suivant leur concentration, peuvent affecter les sols et les cultures. Il importe alors d'adapter les pratiques agricoles à l'eau dont on dispose, sachant que les comportements seront différents suivant la nature des sels en cause.

La composition chimique d'une eau doit donc être examinée en fonction de son impact sur les terres et les plantes.

1. ANALYSE CHIMIQUE DE L'EAU ET EVALUATION DES IMPACTS SUR L'AGRICULTURE

L'analyse faite en partie sur place (pH, résistivité, CO_2) et complétée au laboratoire portera sur Na, Ca, Mg, Cl, SC_4 , HCO_3 . Des dosages spécifiques sur le bore, l'azote, les nitrates et l'ammoniaque, le lithium, le potassium, le fer, le manganèse peuvent également être effectués.

Pour déterminer le degré d'aptitude de l'eau à l'irrigation, il y a lieu de considérer les problèmes liés à sa teneur en sels, à son action sur la perméabilité des sols, à la présence d'ions toxiques pour la croissance de végétaux et à des effets secondaires sur l'aspect de la plante.

1.1. Problèmes de salinité

Ils sont fonction de la concentration totale en sels dissous et des effets sur la croissance des plantes. La salinité est habituellement mesurée par pesée du résidu sec à 180°C ou par la résistivité en ohm/cm (ou conductivité en siemens ou microsiemens ou micromohs), cette unité étant toutefois abusivement désignée par mho et ses sous-multiples mmhos ou micromhos.

1.2. Problèmes de perméabilité

Certains constituants peuvent réduire la perméabilité du sol et la plante ne reçoit plus, alors, la quantité d'eau dont elle a besoin pour sa croissance. Cet effet péjorant est évalué en comparant la teneur en Na à celle de Ca + Mg. Dans certains cas, les carbonates et les bicarbonates affectent la perméabilité du sol et il convient de les prendre en considération.

1.3. Toxicité

Certains ions comme B, Cl, et Na, à un certain niveau de concentration, ont un effet nocif sur la croissance des plantes.

1.4. Problèmes divers

L'apparence des fruits et légumes est quelquefois marquée par l'azote qui entraîne une croissance excessive (mais dans ce cas les engrais mal répartis peuvent aussi être mis en cause). La betterave, la vigne, les abricotiers, les agrumes sont sensibles à l'excès d'azote. L'irrigation par aspersion, à partir d'eau bicarbonatée, provoque des dépôts blanchâtres. D'autres inconvénients, forte acidité ou forte alcalinité des produits, doivent être imputés au pH de l'eau.

2. EVALUATION PRATIQUE DE LA QUALITE DE L'EAU D'IRRIGATION

Un comité de consultants de l'Université de Californie vient d'élaborer des orientations pour interpréter la qualité de l'eau d'irrigation en fonction des conséquences énumérées précédemment.

Ces recommandations présentent une certaine souplesse et tentent d'évaluer le risque à long terme sur la production agricole. Elles devraient être rajustées en fonction des expériences acquises sur les sols, les espèces cultivées et les méthodes d'irrigation. Les limites d'utilisation doivent être considérées à 10 ou 20 % près étant donné les nombreuses variables qui entrent en jeu dans la production végétale.

On suppose que l'eau est utilisée dans des conditions moyennes de texture de sol, de drainage, de climat, de quantité épandue, et de tolérance aux sels des cultures.

La classification proposée en "sans problème", "problèmes croissants", "sérieux problèmes" est plus ou moins arbitraire, mais elle repose sur un grand nombre d'observations, d'études de terrain, de stations pilotes, réalisées sur plus de 40 ans.

"Sans problèmes" signifie que pour une eau ayant une teneur inférieure à celle indiquée, l'irrigant ne devrait pas avoir de difficultés aussi bien pour le sol que pour les cultures.

Au contraire, "sérieux problèmes" implique pour l'irrigant une péjoration à plus ou moins long terme des sols et des plantes.

Entre les deux classes ("problèmes croissants"), l'utilisateur devrait suivre graduellement l'évolution des problèmes. Des actions d'accompagnement doivent être préconisées pour compenser toute dégradation due à la qualité de l'eau dans la façon d'irriguer notamment.

Les recommandations concernent les types d'irrigation, à la raie, submersion, aspersion, que l'application soit régulière ou à la demande.

Les nouveaux concepts de relations entre le sol, la plante et l'eau ont été pris en compte. L'absorption de l'eau se fait principalement dans les 2/3 supérieurs de la racine. Chaque irrigation lessive habituellement la partie supérieure du sol et la maintient à un taux de salure relativement bas. La concentration des sels, dans les cas d'irrigations bien conduites, se fait dans la partie active du système racinaire à raison de 3 fois celle de l'eau d'irrigation. Ce qui permet de définir le niveau de réponse de la plante. La salure de la partie inférieure des racines est de moindre importance tant que les plantes sont suffisamment humidifiées à la partie supérieure.

3. CONCEPT DE SALINITE

Les problèmes de la salinité sont liés à la teneur en sels dissous de l'eau d'irrigation, mais il y a lieu de distinguer la concentration de l'eau et son effet direct et rapide sur la plante et la salinité qui va se développer plus lentement au niveau des racines, par accumulation. Dans ce dernier cas, la maîtrise de la salification peut être assurée par un lessivage des terres à partir d'une eau de meilleure qualité, l'efficacité du remède étant fonction de la qualité de l'eau utilisée dans cette opération et du type de drainage pratiqué.

Pour prévenir ou réduire la salure, il existe plusieurs alternatives : en premier lieu, le choix de l'espèce cultivée supportant la concentration de l'eau d'irrigation est primordial. Certaines normes permettent de trouver la

plante qui s'adaptera à la qualité de l'eau disponible.

Le tableau 1 indique pour plusieurs espèces végétales les tolérances à la salure de l'eau EC_w et du sol EC_e (grandeurs exprimées en mhos/cm).

La réduction probable de la production agricole est indiquée en fonction de EC_w , de EC_e et de la quantité maximum de sels dissous que peut supporter la plante en considérant la conductivité de l'eau de drainage EC_{dw} à l'extrémité du système racinaire.

EC_{dw} est utilisé dans le calcul de la quantité d'eau requise pour le lessivage L.R. (Leaching Requirement) :

$$LR = \frac{EC_w}{EC_{dw}} \quad (1)$$

pour la conservation de la valeur de EC_e au niveau requis dans la zone active des racines.

Pour 100 % d'efficacité la quantité d'eau appliquée pour compenser l'évapotranspiration (ET) et satisfaire au lessivage est :

$$\frac{ET}{1 - LR} \quad (2)$$

Le passage de EC_w à EC_e suppose que la teneur en sels de l'eau d'irrigation soit triplée en passant dans le sol (EC_{sw}). C'est ce qui se passe dans la partie la plus active de la zone des racines pour :

$$EC_{sw} = EC_w \times 3 \quad (3)$$

$$EC_e = \frac{EC_{sw}}{2} \quad (4)$$

En considérant :

. la composition chimique de l'eau d'irrigation et en l'interprétant suivant le tableau 2

. la tolérance des plantes aux sels - tableau 1 - ,

l'irrigant pourra savoir si l'eau est bonne ou mauvaise ou s'il doit s'attendre à rencontrer des difficultés, c'est-à-dire à prendre les mesures de compensation qui s'imposent.

Le recours à une eau différente pour le lessivage est fréquent chez les agriculteurs expérimentés dans la maîtrise de la salinisation. La quantité minimum d'eau de lessivage LR nécessaire à la prévention d'une accumula-

tion excessive du sel au niveau radicaire est le leaching requirement et est défini en pourcentage de la quantité d'eau d'irrigation nécessaire à la plante, elle sera appliquée en excédent. En certaines zones, la pluie peut assurer le lessivage, mais pour être efficace, l'eau doit percoler jusqu'à l'extrémité des racines.

L'opération est difficile à conduire lorsque les nappes sont proches du sol, et où de fait une remise en solution des sels est possible ; il importe dans ce cas de mettre en place un bon réseau de drainage.

4. QUALITE DE L'EAU D'IRRIGATION ET PROBLEMES DE PERMEABILITE

Habituellement, l'effet sur la perméabilité est lié à une pauvreté en Ca et Mg ou à un excès de Na. Des problèmes de perméabilité peuvent se poser avec des eaux très pures, peu concentrées pour EC_w inférieur à 0,5 mmho/cm.

De telles eaux sont corrosives et entraînent les sels solubles de la surface du sol. Les matériaux carbonatés sont décomposés, dispersés et créent des obstacles à la circulation de l'eau. L'application de gypse constitue en ce cas un palliatif souvent efficace.

Les problèmes de perméabilité dus à une carence en Ca ou à un excès de Na peuvent être évalués par un concept relativement nouveau, le "SAR ajusté", d'abord défini à partir du taux d'adsorption du sodium et du résidu sodo-carbonaté.

Ce nouveau concept prend en compte l'effet des carbonates/bicarbonates au travers d'une formule théorique pH_c qui vient compléter l'ancien SAR* (L. MONITION, 1969).

Cette valeur calculée pH_c évalue la tendance de l'eau d'irrigation à dissoudre le calcaire du sol (tableau 3)

$$pH_c = (pK'_2 - pK'_c) + p(Ca + Mg) + pAl_k \quad (5)$$

La présence de carbonate ou bicarbonate peut fortement marquer la disponibilité en Ca. L'effet sur le SAR est évalué à partir d'une nouvelle formule du SAR "ajusté", mise au point récemment par le U.S. Salinity Laboratory ainsi qu'il suit :

* L'étude plus détaillée de l'ajustement de la valeur du SAR, la signification des différentes variables utilisées ainsi qu'un programme de calcul sont fournis en annexes 1, 2 et 3.

$$\text{SAR aj.} = \frac{\text{Na}}{\sqrt{\frac{\text{Ca} + \text{Mg}}{2}}} \left[1 + 8,4 - \text{pH}_c \right]$$

valeurs en meq/l.

Exemple : Na = 3,5 me/l Ca + Mg = 1 me/l

$$\text{Ca} + \text{Mg} + \text{Na} = 4,5 \text{ me/l}$$

$$\text{CO}_3 + \text{HCC}_3 = 3 \text{ me/l}$$

soit en se référant au tableau 3

$$\text{pH}_c = 2,21 + 3,30 + 2,5 = 8,01$$

et

$$\text{SAR aj.} = \frac{3,5}{\sqrt{\frac{1}{2}}} \left[1 + (8,4 - 8,01) \right]$$

$$= 4,95 (1 + 0,39) = 6,88$$

ce qui, dans le cas examiné, laisse supposer des problèmes de perméabilité à plus ou moins long terme. Cette donnée du SAR ajusté est applicable dans 70 % de zones irriguées suivant la fourchette donnée dans le tableau 2.

La modification de la perméabilité des sols peut être, indépendamment des eaux agressives ou du SAR, due à la texture du sol, aux techniques de labour, aux propriétés physiques et chimiques du sol.

5. MOYENS DE PREVENTION ET DE CORRECTION DES EFFETS NUISIBLES DE L'EAU D'IRRIGATION

5.1. Effets imperméabilisants de l'eau d'irrigation

- Les moyens palliatifs peuvent être de nature physique et/ou chimique :
- . nivellement des terrains pour une meilleure répartition des eaux et pour éviter le ruissellement
 - . maintenir l'eau plus longtemps sur le champ (à condition que les effets de la température, c'est-à-dire l'évaporation, n'accroissent pas la salure par concentration
 - . récupération des eaux de ruissellement

- . utilisation de l'aspersion
- . maintenir le niveau des nappes suffisamment bas pour éviter les effets thermiques extérieurs (remontées capillaires)
- . diversification des origines des eaux d'irrigation
- . amendements, comme le gypse, ajoutés à l'eau (1 à 5 kg par m³ d'eau) ou répandus sur le sol (5 à 100 tonnes à l'hectare).

De telles applications ne peuvent être décidées sans analyses préalables.

5.2. Effets toxiques

Les effets toxiques de l'eau sont très variables d'une espèce à l'autre et suivant l'ion nocif. L'ingestion se fait soit au niveau des racines soit, lorsqu'il s'agit d'aspersion, à celui des feuilles.

Le bore peut également se trouver dans le sol et être lessivé en petites quantités.

Les expériences américaines permettent d'établir pour le bore les mesures suivantes de l'eau d'irrigation (tableau 4) :

inférieur à 0,5 mg/l	satisfaisant pour toutes les espèces
0,5 à 1 mg/l	satisfaisant pour la plupart des cultures (les plantes sensibles toutefois peuvent voir leurs feuilles affectées)
1 à 2 mg/l	convient encore à certaines espèces ; la production des espèces sensibles est réduite
2 à 10 mg/l	seules les plantes tolérantes donnent des productions satisfaisantes

Il n'existe pas de technologie économique pour éliminer le bore de l'eau d'irrigation ni d'amendement capable d'annihiler son effet toxique.

INDEX BIBLIOGRAPHIQUE

MONITION L. (1969) - Données sur l'utilisation des eaux selon leur qualité chimique. Rapport BRGM inédit 69 SGL 122 HYD

AYERS R.S. (1975) - Quality of water for irrigation in irrigation and drainage in an age of competition for resources. Conf. UTAH St. Un., August, publ. Am. Soc. Civ. Eng.

LOUVRIER M. (1976) - Acquisition et traitement des données hydrogéo-chimiques, exemples d'application. Thèse 3ème cycle, Sciences de la Terre, Paris VI.

LOUVRIER M. (1976) - Acquisition et traitement des données hydrogéo-chimiques, exemples d'application. Rapport BRGM 76 SGN 093 AME.

o
o o

TABLEAUX ANNEXES

TABLEAU 1 : suite

0 %

10 %

50 % (1)

	EC _e	EC _w	LR	EC _e	EC _w	LR	EC _e	EC _w	LR	EC _{dw}
<i>Palmier</i>	5 300	3 500	7 %	8 000	5 300	11 %	16 000	10 000	21 %	48 000
<i>figuier</i>	} 2 700 à 4 000	} 1 800 à 2 700	} 6 à 10%	4 000	2 700	} 10 à 14%	} 9 000	} 6 000	} 21 %	} 28 000
<i>olivier</i>				à	à					
<i>grenadier</i>				à	à					
<i>raisin</i>	2 700	1 800	7,5%	4 000	2 700	11 %	8 000	5 300	22 %	24 000
<i>pamplemousse</i>	1 700	1 100	7 %	2 500	1 700	11 %	5 000	3 300	33 %	16 000
<i>oranger</i>	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
<i>citronnier</i>	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
<i>pommier</i>	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
<i>poirier</i>	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
<i>amandier</i>	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
<i>abricotier</i>	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
<i>pêcher</i>	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
<i>prunier (pruneaux)</i>	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
<i>noyer</i>	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
<i>murier</i>	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
<i>framboisier</i>	1 000 à 1700	700 à 1 100	5 à 8%	1500 à 2500	1 000 à 1700	7 - 12 %	4 000	2 700	19 %	14 000
<i>avocatier</i>	1 300	900	7,5%	2 000	1 300	11 %	4 000	2 700	22,5%	12 000
<i>fraisier</i>	1 000	700	7 %	1 500	1 000	10 %	3 000	2 000	20 %	10 000

13

(1) Pour les arbres fruitiers on a admis qu'une réduction de 50 % dans la production correspond à 2 fois la salure pour 10 % de diminution de production.

EC_e et EC_w : conductivités du sol et de l'eau exprimées en mhos/cm.

Tableau 2

Orientations pour l'interprétation de la qualité de l'eau d'irrigation

	sans problème	problèmes	problèmes sérieux
<u>salure</u> en supposant appliquée les quantités d'irrigation habituelles et les quantités nécessaires au lessivage (cf. tableau 1) EC _w de l'eau d'irrigation (mhos/cm)	inf. à 750 μmhos/cm (soit env. 480 mg/l)	750 - 3000 μmhos/cm (480 - 1820 mg/l)	sup. à 3000 μmhos/cm (1820 mg/l)
<u>perméabilité des sols</u> EC _w de l'eau d'irrigation (mhos/cm)	sup. à 500 μmhos/cm (soit env. 320 mg/l)	inf. à 500 μmhos/cm	inf. à 200 μmhos/cm (130 mg/l)
SAR ajusté	inf. à 6	6 à 9	sup. à 9
<u>toxicité spécifique</u> absorption par les racines			
. sodium en mg/l	inf. à 70	70 à 200	sup. à 200
. chlorure en mg/l	inf. à 150	150 à 350	sup. à 350
. bore en mg/l	inf. à 0,5	0,5 à 2	2 à 10
absorption par les feuilles (aspersion)			
. sodium en mg/l	inf. à 70	sup. à 70	
. chlorure en mg/l	inf. à 100	sup. à 100	
<u>autres nuisances</u> azote			
. NH ₄ -N) . NO ₃ -N) pour plantes sensibles en mg/l	inf. à 5	5 à 30	sup. à 30
. HCC ₃ (irrigation par aspersion) en mg/l	inf. à 90	90 à 250	sup. à 250
pH	sup. à 6,5/inf. à 8,4	inf. à 6,5/sup. à 8,4	inf. à 6,5/sup. à 8,4

Tableau 3

Calcul de pH_c

Ca+Mg+Na (meq/l)	$p(K'_2 - K'_c)$	Ca + Mg (meq/l)	$p(Ca + Mg)$	$CO_3 + HCO_3$ (meq/l)	p Alk
.5	→ 2.11	.05	→ 4.60	.05	→ 4.30
.7	2.12	.10	4.30	.10	4.00
.9	2.13	.15	4.12	.15	3.82
1.2	2.14	.2	4.00	.20	3.70
1.6	2.15	.25	3.90	.25	3.60
1.9	2.16	.32	3.80	.31	3.51
2.4	2.17	.39	3.70	.40	3.40
2.8	2.18	.50	3.60	.50	3.30
3.3	2.19	.63	3.50	.63	3.20
3.9	2.20	.79	3.40	.79	3.10
4.5	2.21	1.00	3.30	.99	3.00
5.1	2.22	1.25	3.20	1.25	2.90
5.8	2.23	1.58	3.10	1.57	2.80
6.6	2.24	1.98	3.00	1.98	2.70
7.4	2.25	2.49	2.90	2.49	2.60
8.3	2.26	3.14	2.80	3.13	2.50
9.2	2.27	3.90	2.70	4.0	2.40
11	2.28	4.97	2.60	5.0	2.30
13	2.30	6.30	2.50	6.3	2.20
15	2.32	7.90	2.40	7.9	2.10
18	2.34	10.00	2.30	9.9	2.00
22	2.36	12.50	2.20	12.5	1.90
25	2.38	15.80	2.10	15.7	1.80
29	2.40	19.80	2.00	19.8	1.70
34	2.42				
39	2.44				
45	2.46				
51	2.48				
59	2.50				
67	2.52				
76	2.54				

Des valeurs de pH_c supérieures à 8,4 indiquent une tendance à la dissolution du calcaire du sol c alors qu'en dessous de 8,4 il y a précipitation du calcaire.

Tableau 4

Tolérance des plantes au bore
(classement par degré de tolérance)

sensible 0,5 mg/l	semi tolérant 1 mg/l	tolérant 2 mg/l
citronnier pamplemoussier avocatier oranger murier abricotier pêcher cerisier persimmon (kaki) vigne pommier poirier prunier artichaut noyer noyer de pacan	patate douce tomate citrouille avoine mil maïs blé orge olivier petit pois radis coton pomme de terre tournesol	carotte laitue choux navet oignon luzerne betterave betterave fourragère betterave à sucre palmier dattier asperge tamaris
1 mg/l	2 mg/l	10 mg/l

RECAPITULATION

	sans problèmes	problèmes	sérieux problèmes
EC _w tolérance culture en mhos/cm	inférieur à 750	entre 750 et 3 000	supérieur à 3 000
EC _e (conductivité du sol) en mhos/cm	supérieur à 500	inférieur à 500	inférieur à 200
SAR ajusté (lié à la perméabilité du sol)	inférieur à 6	entre 6 et 9	supérieur à 9
Na racines en mg/l	inférieur à 70	entre 70 et 200	supérieur à 200
Na feuilles en mg/l	inférieur à 70	supérieur à 70	/
Cl racines en mg/l	inférieur à 150	entre 150 et 350	supérieur à 350
Cl feuilles en mg/l	inférieur à 100	supérieur à 100	/
B racines en mg/l	inférieur à 0,5	entre 0,5 et 2	entre 2 et 10
pH	entre 6,5 et 8,4	entre 6,5 et 8,4	inf. à 6,5/sup.à 8,4
azote (nitrates) en mg/l pour plantes sensibles	inférieur à 5	entre 5 et 30	supérieur à 30
HCO ₃ en mg/l cas de l'aspersion	inférieur à 90	entre 90 et 250	supérieur à 250

ANNEXE 1 : CALCUL DU SAR AJUSTE1. Définition du SAR non ajusté

$$\text{S.A.R.} = \frac{\text{Na}}{\sqrt{\frac{\text{Ca} + \text{Mg}}{2}}}$$

où Na, Ca et Mg correspondent respectivement aux teneurs en sodium, calcium et magnésium exprimées en meq/l.

2. Rappel sur les équilibres chimiques

Soit les espèces A, B et C en équilibre dans une solution aqueuse. Les concentrations de chacune d'entre elles sont régies par une loi dite d'action des masses. A l'équilibre, l'on a pour la réaction suivante :



$$K \text{ (cste)} = \frac{[B] [C]}{[A]}$$

[A], [B] et [C] correspondent aux activités de chacune des espèces.

Ces activités sont reliées à la concentration de chacune des espèces par la relation suivante

$$[A] = \gamma_A (A)$$

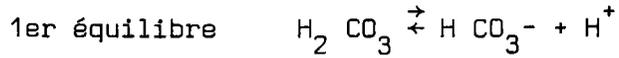
$$[B] = \gamma_B (B)$$

$$[C] = \gamma_C (C)$$

γ représente le coefficient d'activité pour l'espèce considérée.

3. Définition de pk'_2

pk'_2 est une constante qui caractérise le 2ème équilibre du gaz carbonique dissous dans l'eau.



$$k'_2 = \frac{[\text{H}^+][\text{CO}_3^{2-}]}{[\text{HCO}_3^-]}$$

$$k'_2 = \frac{(\text{H}^+)(\text{CO}_3^{2-})}{(\text{HCO}_3^-)} \times \frac{\gamma_{\text{H}} \gamma_{\text{CO}_3}}{\gamma_{\text{HCO}_3}}$$

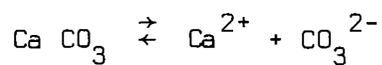
$$k'_2 = \underbrace{\quad}_{k_2} \times \frac{\gamma_{\text{H}} \cdot \gamma_{\text{CO}_3}}{\gamma_{\text{HCO}_3}}$$

$$p k'_2 = - \log k'_2$$

$$\text{pH} = - \log (\text{H}^+)$$

4. Définition de $p k'_c$

Il concerne l'équilibre de dissolution du carbonate de calcium.



solide

$$k'_c = [\text{Ca}^{2+}] [\text{CO}_3^{2-}]$$

$$[\text{solide}] = 1$$

$$k'_c = k_c \times \gamma_{\text{Ca}} \cdot \gamma_{\text{CO}_3}$$

$$\text{avec } k_c = (\text{Ca}^{2+}) (\text{CO}_3^{2-})$$

$$p k'_c = - \log k'_c$$

5. Signification de pH_c

pH_c correspond à la valeur du pH que devrait avoir l'eau (avec sa composition minérale qui lui est propre) pour être en équilibre avec le carbonate de calcium.

Dans la formule proposée, il n'est pas seulement tenu compte du calcium, mais également du magnésium ce qui entraîne une approximation de la formule employée. Le terme $(8.4 - pH_c)$ rend compte en quelque sorte de l'agressivité ou de la non-agressivité de l'eau vis à vis de $CaCO_3$.

6. Valeur du S.A.R. ajusté

$$S.A.R. \text{ aj.} = S.A.R. (1 + 8.4 - pH_c)$$

7. Programme de calcul

La valeur de S.A.R. ajusté nécessite le calcul de pH_c et par là-même de calculer la force ionique de l'eau (μ) et les valeurs des coefficients d'activités.

Dans de l'eau à 20°C, le coefficient d'activité γ pour une espèce ionique donnée peut être défini de la manière suivante (formule de Debye-Mückel):

$$\log \gamma = - 0.504 \frac{z^2 \sqrt{\mu}}{1 + 0.327 \cdot 10^8 \cdot a \sqrt{\mu}}$$

μ : force ionique de la solution

z : charge ionique de l'espèce considérée

a : rayon ionique en solution de l'espèce considérée.

Les calculs sont simplifiés dans le cas qui nous concerne en faisant apparaître le terme ϵ .

$$\epsilon = \frac{\sqrt{\mu}}{1 + 1.4\sqrt{\mu}}$$

Les valeurs de pk'_2 et pk'_c sont alors calculées de la façon suivante :

$$pk'_2 = pk_2 - 2 \epsilon$$

$$pk'_c = pk_c - 4 \epsilon$$

Dans le cas où les calculs ne portent que sur quelques analyses, ceux-ci peuvent être faits à la main. Par contre, lorsqu'ils portent sur des séries plus importantes d'analyses chimiques, ces calculs répétitifs apparaissent vite comme fastidieux. C'est la raison pour laquelle nous avons mis au point un programme automatique de calcul programmé en langage FORTRAN (annexe 2)

8. Exemple d'application

L'exemple que nous avons choisi (exemple réel) montre l'importance du terme correctif sur la valeur de S.A.R. et par la même, la répercussion qui s'en suit quant à l'appréciation sur l'aptitude de cette eau, à l'irrigation.

Conductivité de l'eau : 2 000 μ mhos \times cm⁻¹

Teneurs en mg/l : Calcium 288.0 , Magnésium 18.60 ,
sodium 323.0 , potassium 29.9 , chlorures 458.0 ,
sulfates 450.0 , bicarbonates 515.0 , Nitrates 76.0

$$\text{S.A.R.} = \frac{\text{Na}}{\sqrt{\frac{\text{Ca} + \text{Mg}}{2}}} = 4.97 \text{ (Na, Ca et Mg sont exprimés en meq/l)}$$

$$\mu = 0.044$$

$$\text{pk}_2 \text{ à } 20^\circ\text{C} = 10.377$$

$$\text{pk}_c \text{ à } 20^\circ\text{C} = 8.342$$

$$\text{pH}_c = 6.52$$

Dans le calcul du pH_c , les concentrations en calcium, magnésium, bicarbonates et carbonates doivent être exprimées en moles/l.

$$\text{S.A.R. ajusté} = 14.3$$

En se référant à la grille de classification des eaux (classement de Riverside), l'eau appartient au groupe C3-S1 si l'on tient compte de la valeur 4.97 pour le S.A.R. et à C3-S3 si l'on considère la valeur 14.3.

C3-S1 = eau de qualité "admissible" pour l'irrigation

C3-S3 = eau de qualité "médiocre" pouvant convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes au sel et sur des sols bien drainés et lessivés.

ANNEXE 2 : MODE D'EMPLOI DU SOUS-PROGRAMME SARADJ

```
CALL SARADJ (J,IDENT,CA,MG,NA,K,Cl,SO4,CO3,MCO3, NO3, MU,SAR)
```

Arguments d'entrée :

```
J,IDENT,CA,MG,NA,K,Cl,SO4,CO3,MCO3,NO3
```

Arguments de sortie :

MU : force ionique de l'eau
SAR: valeur du SAR ajusté

J : n° d'ordre de l'analyse chimique dans le paquet de données (cartes perforées)

IDENT : numéro d'identification de l'analyse
(tableau)

CA,MG,NA ...,NO₃ : valeurs des paramètres chimiques exprimés en mg/l et correspondant à l'analyse IDENT

Exemple d'utilisation (programme d'appel)

```
// JØB
```

```
// OPTION LINK
```

```
// EXEC FFORTRAN
```

```
DIMENSION
```

```
NUM = nombre d'analyses à lire
```

```
DØ 1 J = 1,NUM
```

↕
Lecture de IDENT et des valeurs chimiques correspondantes

```
CALL SARADJ (.....)
```

```
1 CØNTINUE
```

```
STØP
```

```
END
```

↕
SUBRØUTINE SARADJ

```
/ *
```

```
// EXEC LNKEDT
```

```
// EXEC
```



```
↓ paquet de données chimiques
```

```
/ *
```

```
/ &
```

ORDINATEUR IBM 370

SARADJ

```

0001      SUBROUTINE SARADJ (J, IDENT, CA, MG, NA, K, CL, SO4, CO3, HCO3, NO3, MU, SAR)
0002      DIMENSION IDENT(100)
0003      REAL MG, NA, K, NO3, MU
          C      .....
          C      IDENT: NUMERO D'IDENTIFICATION DE L'ANALYSE (FORMAT A, 4 CARACTERES MAXIMUM)
          C      MU: FORCE IONIQUE
          C      .....
          C      CALCUL DES MEQ
          C      .....
0004      CA=CA/20.
0005      MG=MG/12.15
0006      NA=NA/23.
0007      K=K/39.
0008      CL=CL/35.5
0009      SO4=SO4/48.
0010      CO3=CO3/30.
0011      HCO3=HCO3/61.
0012      HCO=CO3+HCO3
0013      NO3=NO3/62.
0014      MU=0.5E-3 *(CA*2+MG*2+NA+K+CL+SO4*2+HCO+NO3)
0015      EPSI=SQRT(MU)/(1+1.4*SQRT(MU))
          C      .....
          C      PK2=10.377 ET PK3=8.342 A 20 DEGRES
          C      .....
0016      SAR1=NA/SQRT((CA+MG)*0.5)
0017      PHC=2.04+2*EPSI-ALOG10(0.001*0.5*(CA+MG))-ALOG10(0.001*HCO)
0018      SAR=SAR1*(1+(8.4-PHC))
0019      PRINT 1, (IDENT(J), MU, SAR)
0020      I FORMAT (1H0, 36X, 'ANALYSE NUMERO=', A4, 5X, 'FORCE IONIQUE=', F6.4, 5X, '
          I SAR:', F7.3)
0021      RETURN
0022      END

```