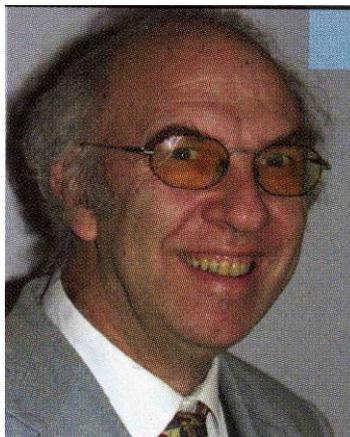


Conférence Parmenides IX – GID-CIHEAM – Bari – octobre 2021
Gestion durable des bassins versants méditerranéens face aux impacts des changements sociétaux et climatiques

Guilhem Bourrié

Qualité des eaux, remontées salines, alcalinisation, surexploitation des nappes :
L'apport de la géochimie des sols et des eaux

Guilhem Bourrié est pédologue et géochimiste. Il a étudié la qualité des eaux dans les sols acides, les sols hydromorphes et les sols salés et a travaillé en Bretagne, en Provence, en Algérie, Tunisie et au Chili. La qualité des eaux résulte des processus biogéochimiques de dissolution / précipitation / absorption par les plantes suivant les conditions climatiques et hydrologiques et l'usage des sols.



Résumé

Dans le bassin méditerranéen, le changement climatique accentue l'irrégularité des pluies, ce qui amène à irriguer, mais irriguer sans drainer conduit à saliniser les sols. Le concept d'alcalinité résiduelle permet de prédire les grandes tendances d'évolution de la qualité des eaux, les risques de salinisation et d'alcalinisation des sols. Le système sol / eau évolue par des bifurcations. Il faut éviter qu'il s'engage dans la voie alcaline avec augmentation du pH et de la concentration en sodium. Un des leviers est l'apport de fertilisants acidifiants via l'effet rhizosphère. Bien conduite, l'irrigation protège les sols. Quant au risque de sodisation, le concept de Sodium Adsorption Ratio



apparaît inadapté pratiquement et non fondé théoriquement du fait des phénomènes de démixtion de Na et Ca sur les argiles. Les modèles géochimique, qui incluent également les conditions de transfert, permettent de ne pas surexploiter les nappes profondes peu renouvelables et de protéger sols et eaux.

Mots-clés : irrigation – géochimie – alcalinité – salinisation – sols salés

Communication

« Le premier des biens est l'eau... »

Pindare, 1re Olympique, 1

Introduction

Dans le bassin méditerranéen, le changement climatique se traduit par l'augmentation de l'évaporation, la remontée du niveau marin et du niveau de base des fleuves et l'accentuation des phénomènes extrêmes. Le risque existe de voir dégradées les ressources en sols et en eau, avec pénétration du biseau salin dans les plaines littorales fertiles, et extension des zones hydromorphes. L'irrégularité des pluies conduit à irriguer, mais l'irrigation sans drainage conduit à la salinisation des sols. La réhabilitation des sols salés est possible mais coûteuse. D'un autre côté, les populations méditerranéennes sont accoutumées à des climats très variables et ont mis au point des techniques adaptées. En climat plus aride, l'agriculture oasienne est une des réponses, mais elle est aujourd'hui en péril. L'irrigation est essentiellement raisonnée pour satisfaire aux besoins quantitatifs des cultures. Or, l'étude de la qualité de l'eau a permis de développer des concepts géochimiques, fondés sur la thermodynamique d'équilibre ou hors d'équilibre et les bilans de protons, tels que l'alcalinité résiduelle et les fonctions analogues. Ils permettent de montrer que le système sol / eau évolue par une suite de bifurcations. Une bonne gestion de l'irrigation et du système de culture doit éviter que le système sol / eau s'engage dans la voie alcaline, qui mène à l'augmentation du pH et de la concentration en sodium. Un des leviers est l'acidification via l'effet rhizosphère et l'emploi d'engrais azotés acidifiants. La prise en compte des nutriments apportés par l'eau d'irrigation permet des économies d'intrants et, bien conduite, l'irrigation protège les sols et évite la surexploitation des nappes profondes, à condition que l'utilisation locale soit remplacée dans le contexte régional hydrogéologique, ce à quoi contribuent également les concepts et outils de la géochimie, notamment isotopique.



L'alcalinité et l'évolution du système sol / eau comme une suite de bifurcations

Lorsque les eaux se concentrent par évaporation, elles arrivent à saturation avec une suite de minéraux qui précipitent successivement et toujours dans le même ordre : calcite, gypse, argile magnésienne ou carbonate de magnésium, puis les sels proprement dits, chlorures, sulfates ou carbonates de sodium, potassium et magnésium. Chaque fois que la solution arrive à saturation, par exemple le gypse (sulfate de calcium), le produit des concentrations en calcium et sulfate est limité par la solubilité : la concentration en calcium augmente et la concentration en sulfate diminue, ou l'inverse. Le système va alors bifurquer selon l'état de départ : s'il y a plus de calcium au départ, le calcium domine, sinon c'est le sulfate. Dans le cas de la calcite, la concentration en carbonate est liée au pH et c'est l'alcalinité qu'il faut considérer. L'alcalinité, à la différence du sulfate, n'est pas une concentration, essentiellement positive, mais une différence algébrique entre somme des concentrations de bases faibles et concentration en protons. Elle peut donc être positive, négative ou nulle. Une solution de base diluée a une alcalinité positive, en se concentrant, elle devient une solution de base concentrée et le pH augmente. Une solution d'acide dilué devient de même une solution d'acide concentrée et son pH diminue. Une solution de sels neutres (gypse, halite) a une alcalinité nulle et son pH ne change pas. L'alcalinité se mesure facilement par titration avec un acide fort. Dans les eaux naturelles, l'alcalinité est en général positive. On trouve des eaux d'alcalinité négative dans le cas particulier d'eaux issues de l'oxydation des sulfures, tels que la pyrite, qui produit de l'acide sulfurique, par exemple dans la réoxydation des mangroves. A chaque bifurcation, on peut définir une grandeur déduite de l'alcalinité en soustrayant la concentration de l'élément contrôlé, par exemple le calcium, dite alcalinité résiduelle calcite, et qui a les mêmes propriétés pour prédire le sens de variation du pH. On retrouve ainsi les trois voies d'évolution géochimique : voie sulfatée acide si l'alcalinité est négative, voie saline neutre si l'alcalinité est positive, mais l'alcalinité résiduelle calcite négative, voie alcaline si l'alcalinité et l'alcalinité résiduelle calcite sont toutes les deux positives. Il faut éviter que le système sol / eau s'engage dans la voie alcaline, qui conduit à des pH très élevés et des concentrations en sodium élevées, d'où une attaque alcaline des argiles, une dégradation des propriétés physiques des sols et une stérilisation des sols. Le levier disponible repose sur l'effet acidifiant du gaz carbonique produit par l'oxydation de la matière organique des sols et sur l'effet rhizosphère. Lorsque la tendance à l'acidification l'emporte, ce qui est le cas en climat pluvieux au nord de la Méditerranée, l'alcalinité apportée par l'eau d'irrigation tamponne le pH et limite la décarbonatation. Lorsque l'évaporation favorise l'augmentation du pH, ce qui est le cas au sud de la Méditerranée, on peut jouer sur l'effet rhizosphère : la pompe à protons racinaire acidifie son environnement lorsqu'elle absorbe plus de cations que d'anions, ce qui est le cas général et est accentué lorsque l'azote est apporté sous forme ammoniacale.

L'eau d'irrigation apporte des nutriments qu'il faut prendre en compte

C'est le cas du sulfate et du magnésium et d'une grande part du phosphore et du potassium. L'apport d'azote, en revanche, est en général négligeable. En conditions salées, les plantes peuvent souffrir de la concentration en sodium ou de la baisse de l'activité de l'eau (effet osmotique). L'irrigation bien conduite tamponne les sols contre les variations de pH, maintient la fertilité, empêche le phosphore de contribuer à l'eutrophisation en le rétrogradant sous forme de phosphate de calcium, qui peut se redissoudre ultérieurement.

- o Le Sodium Adsorption Ratio (SAR) n'est pas une bonne clé pour estimer le risque de dégradation des propriétés physiques des sols

L'échange du calcium et du sodium sur les argiles gonflantes n'obéit pas à un simple équilibre d'échange d'ions, du fait de phénomènes de séparation des ions (démixtion des phases solides) connu depuis longtemps. Le SAR n'est donc pas un bon estimateur du pourcentage de sodium échangeable. De ce fait une concentration en calcium modérée suffit à prévenir le risque. D'où l'inutilité d'apports massifs de gypse. L'essentiel est d'éviter que le système sol / eau s'engage dans la voie alcaline comme expliqué ci-dessus.

- o Les eaux de compositions différentes réagissent quand (et seulement quand) elles se mélangent ou entrent en contact avec des terrains différents

C'est le cas des eaux de nappes profondes qui remontent par artésianisme ou drainance verticale, du Continental Terminal ou du Continental Intercalaire. En traversant de nouveaux terrains, elles les dissolvent en partie et de nouveaux minéraux précipitent. La géochimie isotopique combinée avec la géochimie minérale permet d'identifier les réactions qualitativement et quantitativement. Ceci permet d'évaluer les risques de surexploitation des nappes peu renouvelables.

Pour en savoir plus :

Bourrié Guilhem, Salhi Nassira, Slimani Rabia, Douaoui Abdelkader, Hamdi-Aïssa Baelhadj Mohamed Gihan et Trolard Fabienne (2018) L'irrigation, la qualité de l'eau et des sols. In : Bourrié G. (Coord.) Les sols au cœur de la zone critique 4. Qualité de l'eau, ISTE Editions, Londres, p. 81-133.

Bourrié Guilhem (2022) Les sels dans les déserts. In : Joly Fernand et Bourrié Guilhem (coord.) L'Homme et les déserts 2, ISTE Editions, p. 155-173, sous presse.

Qualité des eaux, remontées salines, alcalinisation, surexploitation des nappes

L'apport de la géochimie des sols et des eaux

Guilhem Bourrié

Académie d'Agriculture de France



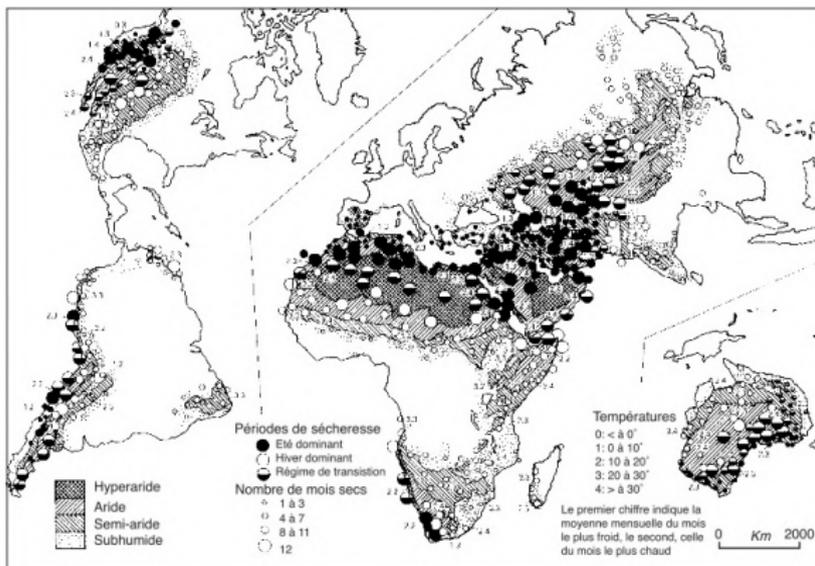
Bari, 19-21 octobre 2021



Outline

- 1 Les paysages arides
- 2 La salinisation secondaire à l'irrigation
- 3 L'évolution du pH et du potentiel d'oxydoréduction
 - Les bifurcations géochimiques
 - Le contrôle du pH
 - Les sols sulfatés acides
- 4 Abandonner le Sodium Adsorption Ratio ?
- 5 La géochimie des nappes

La « diagonale aride »



Le désert de Palmyre



Les paysages arides

La salinisation secondaire à l'irrigation

L'évolution du pH et du potentiel d'oxydoréduction

Abandonner le Sodium Adsorption Ratio ?

La géochimie des nappes

L'érosion éolienne visualisée par un rebdou



Les paysages arides

La salinisation secondaire à l'irrigation

L'évolution du pH et du potentiel d'oxydoréduction

Abandonner le Sodium Adsorption Ratio ?

La géochimie des nappes

Le don de l'Euphrate



Les paysages arides

La salinisation secondaire à l'irrigation

L'évolution du pH et du potentiel d'oxydoréduction

Abandonner le Sodium Adsorption Ratio ?

La géochimie des nappes

L'irrigation sans drainage. . .



Les paysages arides

La salinisation secondaire à l'irrigation

L'évolution du pH et du potentiel d'oxydoréduction

Abandonner le Sodium Adsorption Ratio ?

La géochimie des nappes

conduit à accumuler les sels



Les paysages arides

La salinisation secondaire à l'irrigation

L'évolution du pH et du potentiel d'oxydoréduction

Abandonner le Sodium Adsorption Ratio ?

La géochimie des nappes

La salinisation stérilise les sols



Les paysages arides

La salinisation secondaire à l'irrigation

L'évolution du pH et du potentiel d'oxydoréduction

Abandonner le Sodium Adsorption Ratio ?

La géochimie des nappes

La dégradation de la structure du sol



Les paysages arides

La salinisation secondaire à l'irrigation

L'évolution du pH et du potentiel d'oxydoréduction

Abandonner le Sodium Adsorption Ratio ?

La géochimie des nappes

conduit à la fermeture du sol et la perte de portance



Les paysages arides

La salinisation secondaire à l'irrigation

L'évolution du pH et du potentiel d'oxydoréduction

Abandonner le Sodium Adsorption Ratio ?

La géochimie des nappes

mais très chère



Les paysages arides

La salinisation secondaire à l'irrigation

L'évolution du pH et du potentiel d'oxydoréduction

Abandonner le Sodium Adsorption Ratio ?

La géochimie des nappes

L'agriculture oasisienne cultive l'amont



Les paysages arides

La salinisation secondaire à l'irrigation

L'évolution du pH et du potentiel d'oxydoréduction

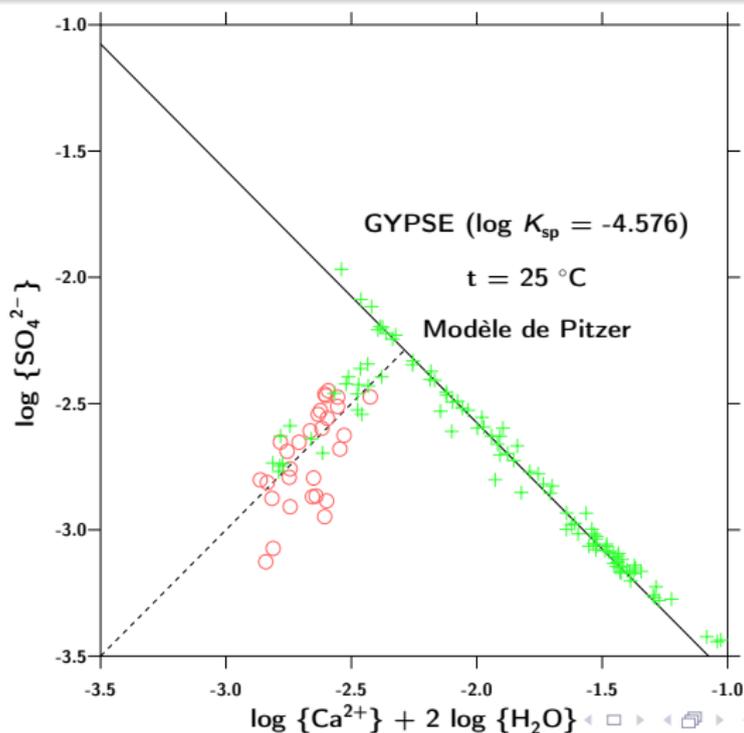
Abandonner le Sodium Adsorption Ratio ?

La géochimie des nappes

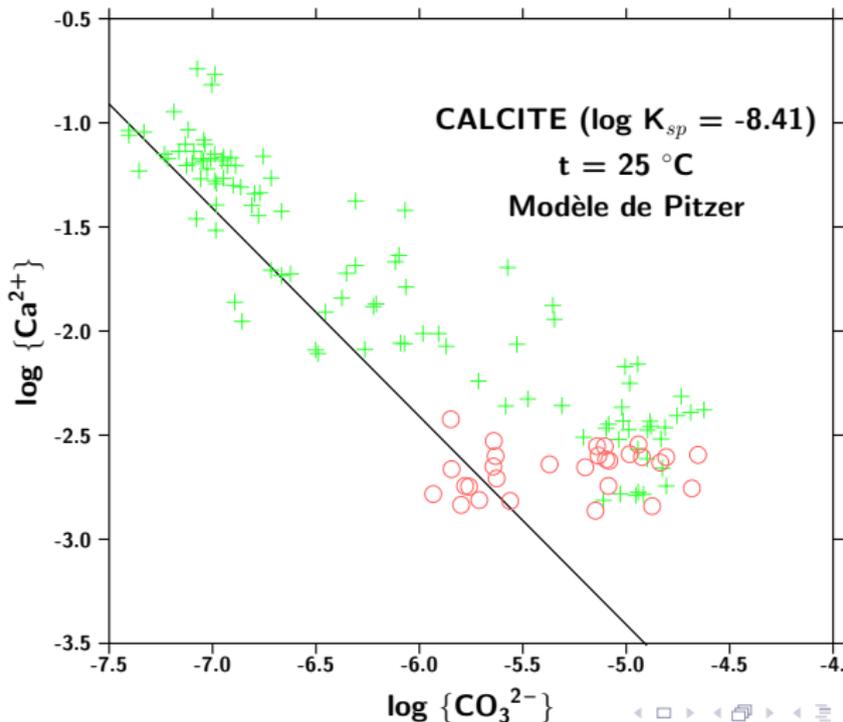
et abandonne la dépression aux sels



Le gypse et la loi du « T » : bifurcation à l'équilibre



La calcite : bifurcation hors d'équilibre



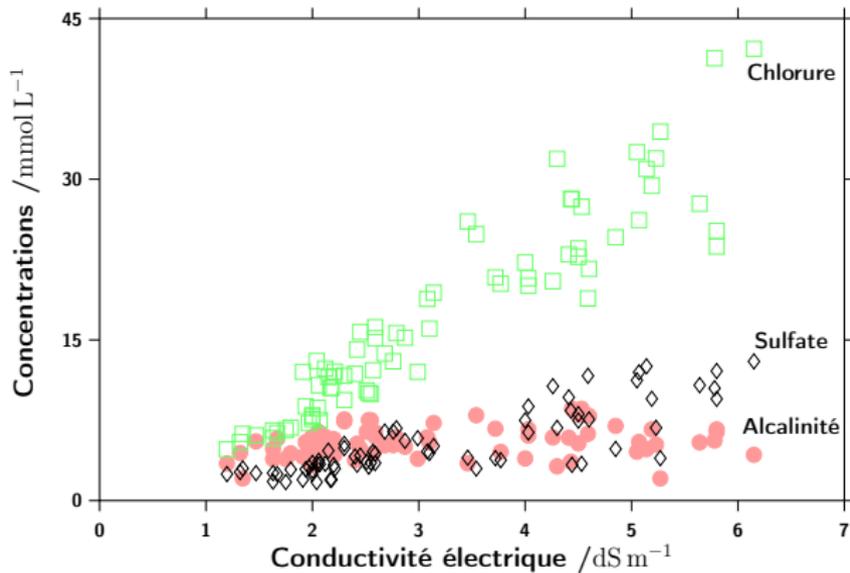
Le concept-clé, l'alcalinité

$$\text{Alc.} = [\text{HCO}_3^-] + 2[\text{CO}_3^{2-}] + [\text{OH}^-] - [\text{H}^+] \quad (1)$$

C'est toujours une fonction monotone croissante du pH. Par conséquent, lorsqu'une solution se concentre par évaporation, le sens de variation du pH est donné par le signe de l'alcalinité :

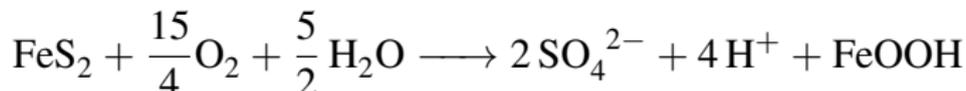
$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Si Alc.} < 0, \text{ le pH diminue.} \\ \text{Si Alc.} = 0, \text{ le pH reste constant.} \\ \text{Si Alc.} > 0, \text{ le pH augmente.} \end{array} \right.$$

La régulation de la qualité de l'eau



La faible solubilité de la calcite maintient le pH dans la voie neutre, compatible avec la fertilité des sols.

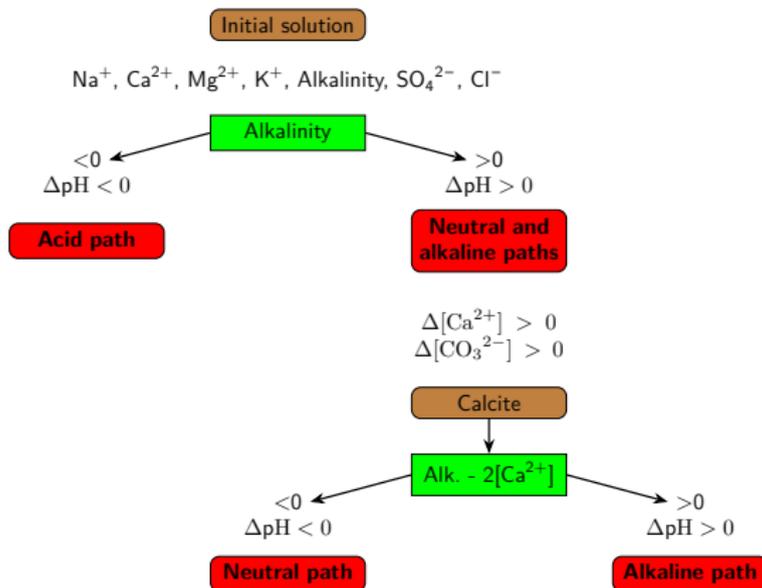
La réoxydation des sulfures



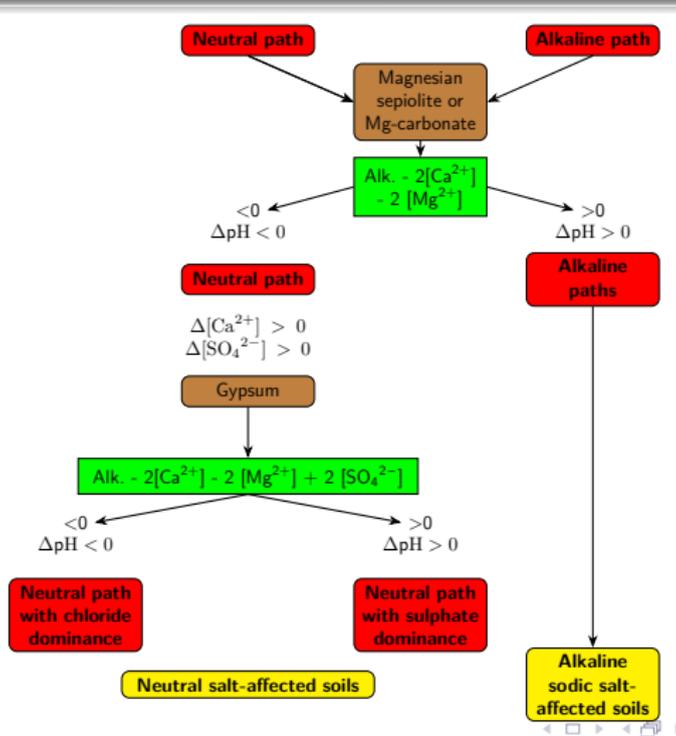
Cela se produit dans deux cas de figure :

- l'oxydation des résidus miniers de l'exploitation des sulfures métalliques ou des résidus de l'exploitation du lignite ;
- la réoxydation des sulfures précipités dans les mangroves par réduction du sulfate de l'eau de mer.

La bifurcation Voie acide / Voie saline

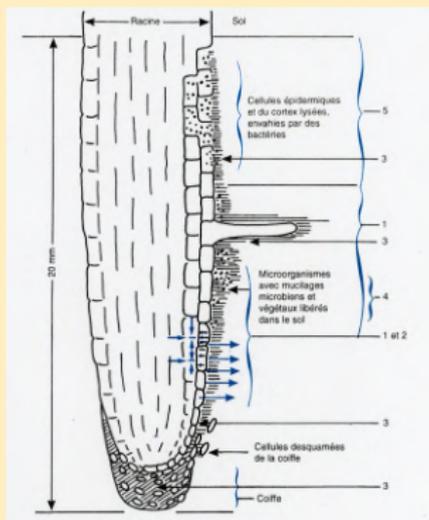


La bifurcation Voie saline / Voie alcaline



Les sources d'acide utilisables

La pompe à protons racinaire et la nitrification



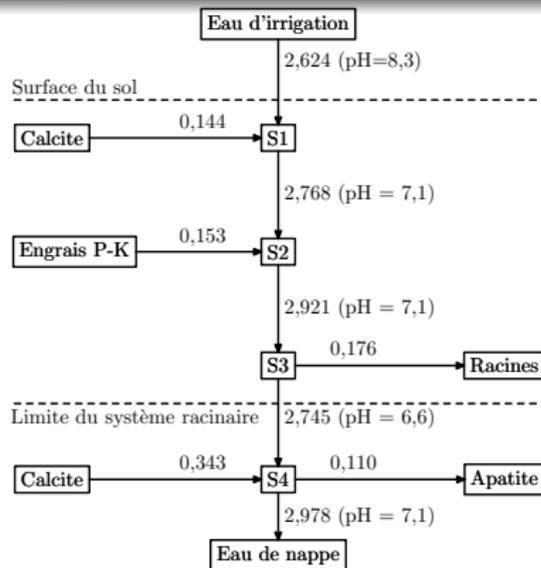
Pour chaque cation absorbé, un proton est libéré :



Pour chaque NH_4^+ oxydé, deux protons sont libérés :



La simulation des échanges sol / solution



Un modeste apport d'engrais phosphopotassique suffit à compenser les exportations. L'eutrophisation de la nappe est bloquée par la précipitation d'apatite (phosphate de calcium).

L'approche classique de l'US Salinity à Riverside

SAR

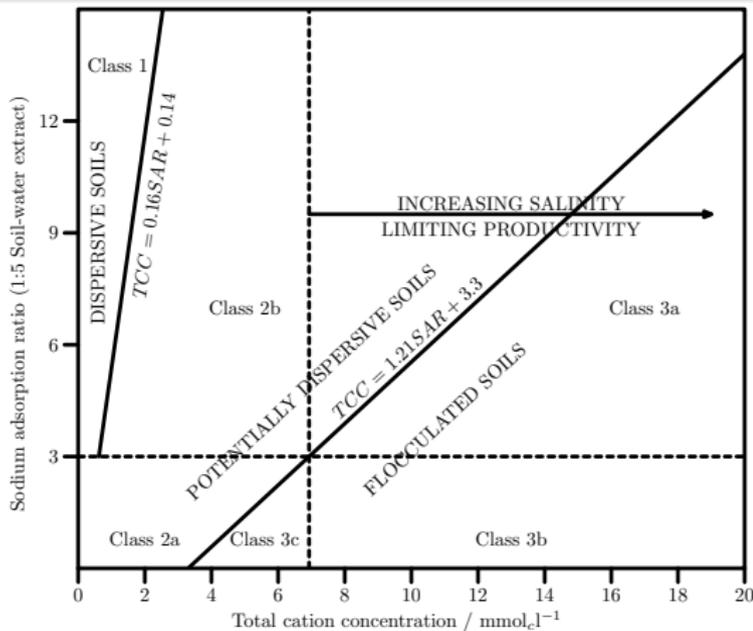
Suivant U.S. SALINITY LABORATORY STAFF 1954, l'effet de la qualité de l'eau d'irrigation sur le risque de sodisation peut être estimé en considérant le *sodium adsorption ratio* ;

$$SAR \equiv \frac{[Na^+]}{\sqrt{\frac{[Ca^{2+}] + [Mg^{2+}]}{2}}}, \quad (2)$$

où les crochets désignent les concentrations en $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$;

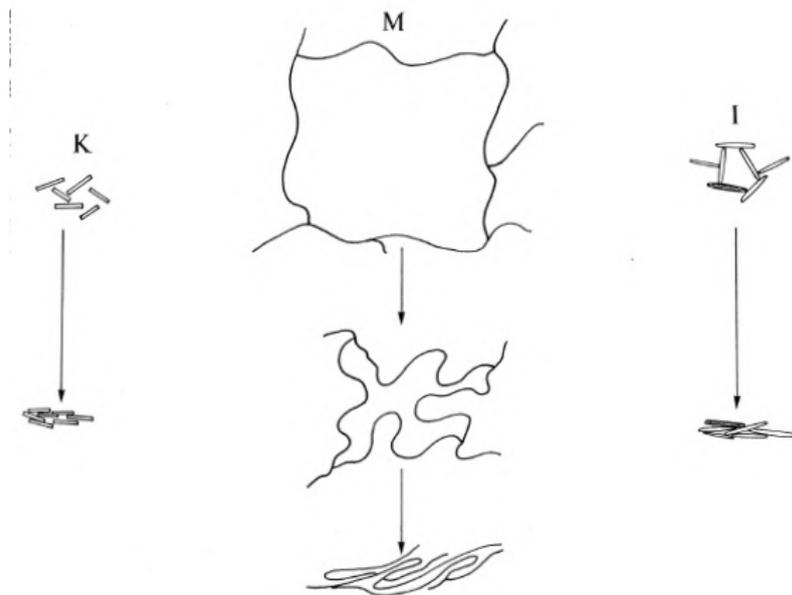
Le SAR est un (mauvais) estimateur du pourcentage de sodium échangeable, mais il est directement mesurable à partir de l'analyse de l'eau d'irrigation, alors que l'analyse des ions échangeables est compliquée.

La dégradation de la structure des sols est liée à la dispersion des argiles

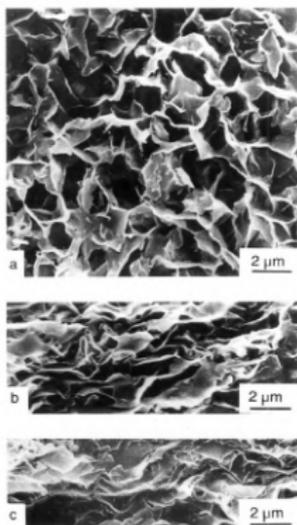


En abscisse, la concentration totale en cations; en ordonnée, le Sodium Adsorption Ratio (SAR), d'après RENGASAMY et al. 1984.

Seules certaines argiles sont gonflantes, les smectites



Retrait des argiles lors de la dessiccation



Diminution de volume d'une argile gonflante (Montmorillonite-Ca), d'après TESSIER (1984).

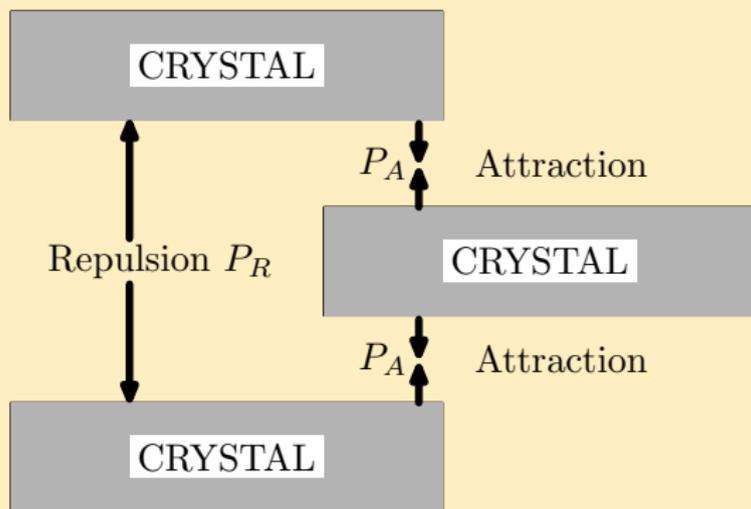
La concentration de Ca comme paramètre essentiel

L'effet de Ca^{2+} domine

QUIRK et SCHOFIELD (1955) ont montré que tant que la concentration de calcium en solution reste supérieure à environ 3×10^{-4} M la perméabilité ne diminue pas significativement.

Explication physique

Retour à la géométrie des pores

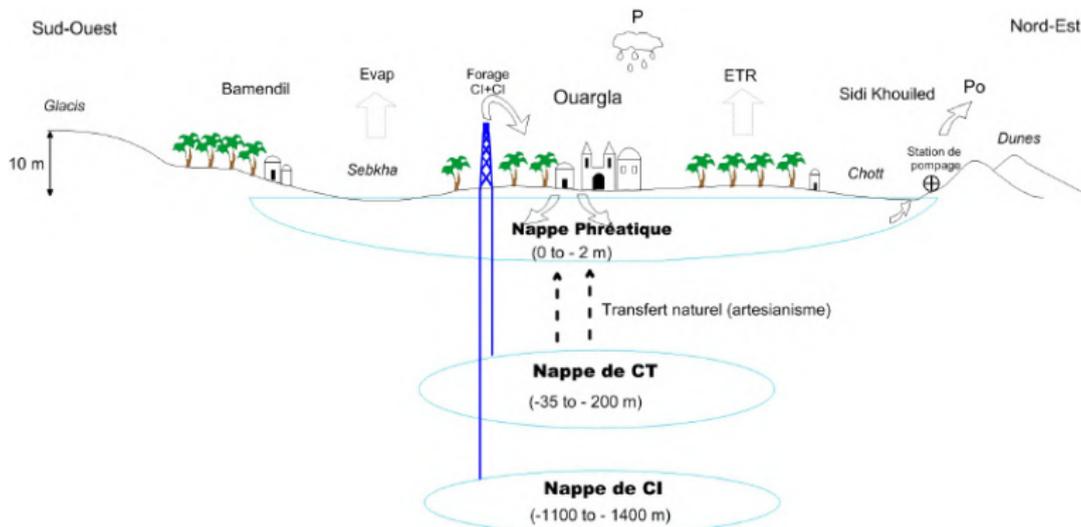


Un modèle à trois particules représentant l'arrangement d'un domaine argileux, d'après QUIRK (2003), redessiné.

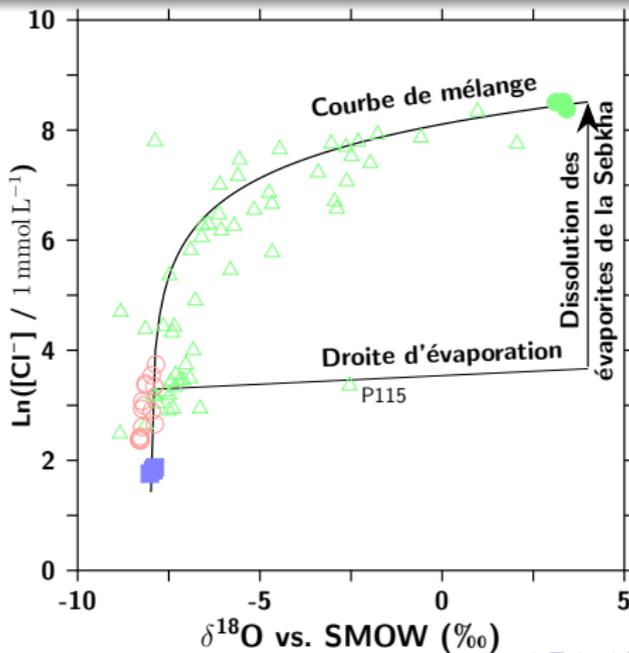
Les bonnes clefs : calcium et alcalinité

- Le *SAR* n'a pas de base théorique, du fait de la démixtion ;
- ces phénomènes sont connus depuis longtemps (GLAESER 1953 ; GLAESER et MERING 1954) et ont été confirmés par de nombreux auteurs ;
- il est peu utile pratiquement (QUIRK et SCHOFIELD 1955) ;
- il n'y a pas de base rationnelle à continuer à utiliser le *SAR* comme l'alpha et l'omega du gonflement des sols et de leur dispersion (si ce n'est **la force de l'habitude**) ;
- il faut maintenir les sols dans la voie saline neutre sur la base du concept d'alcalinité (**algébrique**) ;
- il faut que la concentration en calcium soit supérieure au seuil et que la différence $[\text{Alc.}] - 2[\text{Ca}^{2+}]$ soit faible.

La surexploitation des nappes profondes



Remontée artésienne, dissolution des roches et mélange



Conclusions

La géochimie fournit :

- les concepts clefs pour gérer les risques de salinisation et alcalinisation à partir d'analyses simples de la solution du sol ou des nappes phréatiques ou profondes ;
- les analyses isotopiques permettent de distinguer la part de l'évaporation et des mélanges ;
- des modèles géochimiques open source permettent de simuler les échanges de matière entre solution, sol, minéraux et plantes.

Conclusions

Les leviers agronomiques

Les praticiens peuvent agir sur :

- la qualité de l'eau d'irrigation ;
- la technique d'irrigation (goutte à goutte. . .) ;
- la fréquence de l'apport d'eau (tours d'eau) ;
- l'apport d'engrais azoté acidifiant ou non ;
- le système de culture (enracinement, cultures associées, agroforesterie, agriculture de conservation des sols. . .) suivant les méthodes de l'agroécologie.

Les paysages arides

La salinisation secondaire à l'irrigation

L'évolution du pH et du potentiel d'oxydoréduction

Abandonner le Sodium Adsorption Ratio ?

La géochimie des nappes

Grazie por la sua attenzione

Le sel est aussi une richesse

