

# Transpiration de la nappe libre en zone semi-aride et de roches cristallines : le facteur responsable de la salinisation des eaux souterraines ?

KREIS Marjorie Beate <sup>(1)(2)(3)(\*)</sup>, TAUPIN Jean-Denis<sup>(1)</sup>, PATRIS Nicolas<sup>(1)</sup>, LACHASSAGNE Patrick<sup>(1)</sup>,  
MARTINS Eduardo Sávio Passos Rodrigues<sup>(3)</sup>

(1) HSM, Univ Montpellier, CNRS, IRD, Montpellier, France

(2) Département de Génie Hydraulique et Environnemental, Univ Fédérale du Ceará, Fortaleza, Brésil

(3) Fondation Cearense de Météorologie et de Ressource en Eau (FUNCEME), Fortaleza, Brésil

(\*) marjorie.kreis@hotmail.fr

**Mots-clés** : Roches cristallines, Aquifère, Salinisation, Modélisation, Bilan de chlorures

## Introduction

L'origine de la forte salinité qui peut être rencontrée dans les aquifères de socle cristallin des régions arides ou semi-arides constitue une question scientifique à laquelle cette présentation apporte des éléments de réponses à partir de l'étude des aquifères cristallins de l'état du Ceará dans le Nord-Est Brésilien (NEB). Dans cette région semi-aride ( $P \approx 700$  mm/an,  $ETP \approx 1770$  mm/an), les ressources en eau contenues dans les aquifères du socle précambrien sont caractérisées par des eaux saumâtres ou salines, de faciès principalement chloruré-mixte ou chloruré-sodique, avec des conductivités électriques (CE) et des concentrations en chlorures qui peuvent respectivement dépasser 19000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  ou 5 g/L (Kreis, 2021) sans que les processus à l'origine de cette salinité ne soient encore clairement compris à ce jour. L'hétérogénéité spatio-temporelle de la CE et de la composition géochimique des eaux souterraines (ESO) reflète la forte compartimentation latérale des aquifères et la complexité de l'acquisition de la salinité de l'eau. Des études antérieures menées dans cette région ont montré que la salinité est essentiellement représentée par les ions chlorures et que la recharge des ESO est récente (quelques dizaines à centaines d'années) et composée d'une proportion importante d'eau de surface évaporée (infiltration indirecte à partir des nombreuses mares ou retenues présentes dans la région). La forte salinité des ESO des aquifères de socle dans les régions semi-arides est généralement attribuée à la dissolution et au lessivage des sels qui ont été précipités dans le sol, la zone non saturée (ZNS) et/ou les sédiments, en raison des forts taux d'évapotranspiration des précipitations et des eaux de surface (Nkotagu, 1996, Rabemanana et al., 2005, Subba Rao, 2008). Cependant, ce processus n'est jamais réellement quantifié. Cette étude tend à montrer que la réalisation d'un modèle numérique hydrogéologique simple, basé sur l'utilisation d'une approche multidisciplinaire de terrain pour caler les paramètres physiques du modèle, permet de mettre en évidence comment un changement d'occupation du sol peut impacter la qualité de l'eau.

## Méthologie

Un modèle numérique a été créé selon un principe de mélange parfait au sein de l'aquifère pour simuler le bilan hydrologique et de salinité dans le temps. Ce modèle repose sur l'hypothèse selon laquelle la salinité des ESO (dont le chlorure est le meilleur traceur pour ne pas être impliqué dans des réactions biogéochimiques) provient des apports atmosphériques, qui vont progressivement s'évapoconcentrer dans les différents compartiments du cycle de l'eau avant d'être lixiviés en profondeur vers l'aquifère, où les eaux peuvent également se saliniser en raison de la transpiration de la nappe due aux strates arbustive et arborée de la végétation. Dans un premier temps, les simulations de bilan d'eau et de chlorures ont été réalisées pour évaluer les paramètres du modèle qui conduisent à une forte salinisation de la nappe libre et dans quelles proportions, mais aussi pour calculer le nombre d'années nécessaires pour atteindre des concentrations en chlorures supérieures à 5 g/L, comme observé dans la région d'étude (Kreis, 2021). Dans un second temps, les simulations

ont cherché à expliquer comment des changements dans l'occupation du sol peuvent avoir un impact sur la qualité de l'eau et déterminer quelle est la dynamique actuelle de la salinité à long terme des eaux souterraines.

Le modèle conceptuel présenté en Figure 1 considère que tous les apports en eau et en chlorures dans le bassin versant (BV) proviennent des précipitations annuelles ( $P_{tot}$ ; étape « 1 »), tandis que les sorties en eau du BV sont constituées par la rivière (Riv; étape « 5 »), le débit de base de la nappe ( $B_{flow}$ ; étape « 11 »), l'évapotranspiration des précipitations tombées au sol (ET; étape « 2 »), l'évaporation des surfaces d'eau libre (E; étape « 6 ») et la transpiration de la nappe libre par les racines profondes de la végétation (T; étape « 10 »). De plus, le modèle estime que les sels laissés par l'évapotranspiration (ET) de la précipitation annuelle restent à la surface du sol, ou dans la ZNS, et que la quantité de chlorures contenue dans la précipitation efficace résultante ( $P_{ef}$ ; étape « 3 ») correspond à la quantité de chlorures provenant de  $P_{tot}$ . Une partie de l'eau et des chlorures de la précipitation efficace est lessivée vers l'aquifère par infiltration directe ( $I_d$ ; étape « 8 »), tandis que l'autre partie est emportée par le ruissellement de surface ( $Run_{off}$ ; étape « 4 »). Ce ruissellement s'écoule et s'accumule dans les zones topographiques basses du BV (thalwegs, mares et barrages). Le modèle considère alors que ces volumes d'eau et teneurs en chlorures des eaux de ruissellement accumulées sont répartis selon des proportions fixes (considérant la difficulté pour évaluer ces termes) entre les écoulements de la rivière (Riv; étape « 5 »), l'évaporation des eaux de surface (E; étape « 6 ») et l'infiltration indirecte ( $I_{ind}$ ; étape « 7 »). Ainsi, la recharge de l'aquifère ( $R_{tot}$ ; étape « 9 ») est constituée par l'infiltration directe et indirecte, tandis que la sortie de l'aquifère est constituée par l'écoulement de base ( $B_{flow}$ ; étape « 11 ») et la transpiration d'eau de la nappe par la végétation (T; étape « 10 »). Les différents paramètres du modèle peuvent être simulés avec des proportions  $x$ ,  $y$  et  $z$  variables, ce qui permet d'évaluer leur influence sur la salinité de l'aquifère.

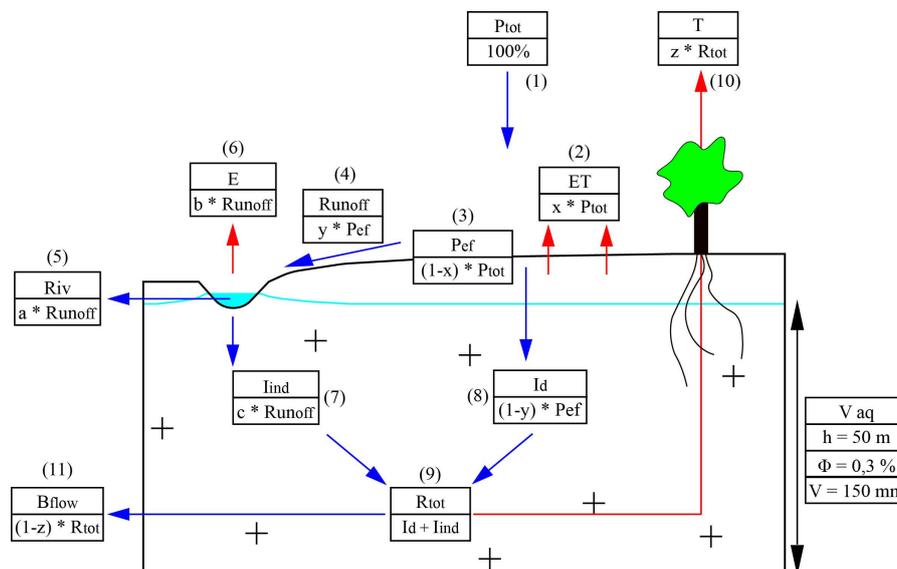


Figure 1 : Modèle conceptuel du modèle numérique utilisé pour la simulation des bilans d'eau et de chlorures. Les flèches bleues et rouges symbolisent respectivement les flux d'eau et d'évapotranspiration. Les lettres  $x$ ,  $y$  et  $z$  sont exprimées en pourcentage et sont variables en fonction des simulations réalisées. Les lettres  $a$ ,  $b$  et  $c$  sont exprimées en pourcentage et sont définies par  $a=3\% P_{ef}$ ,  $b=80\% *(Run_{off}-Riv)$ ,  $c=20\% *(Run_{off}-Riv)$ . Les volumes sont exprimés en hauteur d'eau (mm).

## Résultats et discussions

### Paramètres conditionnant la forte salinité des eaux souterraines

Les simulations ont révélé que, dans le cas où il n'y a pas de phénomène de transpiration de la nappe par les racines de la végétation (c'est-à-dire que le volume qui rentre annuellement dans l'aquifère

sort du système via le débit de base), la concentration en chlorures dans l'aquifère évolue en moins de 50 ans pour atteindre une asymptote de l'ordre de quelques dizaines de mg/L, qui correspond à la concentration de l'eau rechargeant la nappe. Ainsi, la salinité des eaux de l'aquifère se trouve dans un état d'équilibre en quelques dizaines d'années, et la quantité de chlorures apportée annuellement par la recharge correspond à la quantité annuelle de chlorures qui quitte l'aquifère via le débit de base. Même lorsque l'on considère que plus de 97% de la précipitation annuelle est évapotranspirée (ce qui correspond à une recharge annuelle de 2,3% de  $P_{tot}$ ), la concentration en chlorures de la recharge ne dépasse pas la (les) centaine(s) de mg/L. Cela signifie que l'aridité n'est pas un facteur qui provoque une forte salinisation des ESO. Ainsi, même si l'évapotranspiration des eaux de pluies, l'augmentation des ruissellements de surface et l'évaporation des eaux de surface entraînent une augmentation de la concentration de la recharge, ces paramètres ne suffisent pas, à eux seuls, à expliquer les fortes salinités observées dans la réalité (plusieurs grammes par litre).

Dans le cas où tout ou partie du volume de la recharge sort du système via la transpiration végétale, une partie des chlorures s'accumule dans l'aquifère malgré le renouvellement d'une partie du stock d'eau (la végétation exclut généralement les sels lors de l'absorption d'eau ; Fass et al., 2007). Dans la suite des simulations, les paramètres suivants sont fixés :  $ET = 80\% * P_{tot}$  et  $Run_{off} = 85\% * P_{ef}$ , ce qui correspond à une recharge de 6,3 % de  $P_{tot}$  avec une concentration  $[Cl]_{R_{tot}}$  de 30,89 mg/L. Dans ces conditions, les simulations ont montré que, pour un taux de transpiration  $T < 100\% * R_{tot}$ , les concentrations en chlorures augmentent jusqu'à atteindre une asymptote, qui dans le cas de  $T = 99\% * R_{tot}$ , est d'environ 3100 mg/L ou, dans le cas de  $T = 99,99\% * R_{tot}$ , est d'environ 54000 mg/L. Dans le cas où  $T = 100\% * R_{tot}$  (il n'y a plus de débit de base et des conditions endoréiques totales sont créées), les concentrations en chlorures augmentent indéfiniment. Dans cette configuration, les concentrations en chlorures de l'aquifère peuvent atteindre 5 g/L en moins de 550 ans. En conséquence, les simulations ont mis en évidence que seuls des taux de transpiration similaires aux taux de recharge conduisent à une forte salinisation des aquifères.

### **Dynamique actuelle de salinité à long terme**

Afin de modéliser la dynamique à long terme de la salinité des ESO, il a été décidé de prendre en compte les changements majeurs du paysage et, en particulier, de la végétation. En effet, le climat semi-aride est considéré comme relativement stable depuis  $\approx 13$  Ma dans cette région (Peulvast et al., 2008) tandis que la végétation naturelle native, la Caatinga, s'est établie dans le NEB depuis la fin du Tertiaire, il y a environ 2,6 Ma (Leal et al., 2003). Cependant, suite à la colonisation du Brésil en 1500, la Caatinga a été progressivement détruite en raison des pratiques agricoles. Les simulations réalisées avec notre modèle dans les conditions de végétation qui prévalaient avant l'arrivée des colons (Caatinga) considèrent que l'évapotranspiration (ET) est maximale, tandis que le ruissellement de surface ( $Run_{off}$ ) est très limité par rapport à l'infiltration directe diffuse ( $I_d$ ), du fait de sols moins dégradés et non encore soumis à la désertification. Par ailleurs, la forte résilience de la Caatinga aux périodes de sécheresse est favorisée par le prélèvement d'eau dans la nappe libre par les racines avec un taux équivalent à la recharge ( $T = 100\% * R_{tot}$ ). Le volume d'eau dans l'aquifère est supposé constant dans le temps, ce qui implique qu'il n'y a pas de débit de base de l'aquifère et que des conditions endoréiques sont créées. Les résultats de ces hypothèses avant la colonisation du Brésil révèlent une salinisation progressive et continue de l'aquifère due à la transpiration de la nappe par la végétation. L'eau de l'aquifère atteint une concentration en chlorures d'environ 10000 mg/L en 1000 ans (la vraie teneur maximale étant alors sûrement la limite physiobiologique des plantes).

Suite à la colonisation du Brésil, la Caatinga est détruite. Les simulations considèrent alors que l'évapotranspiration (ET) a diminué et que le ruissellement de surface ( $Run_{off}$ ) est largement dominant par rapport à l'infiltration directe ( $I_d$ ) en raison de la dégradation des sols. Il n'y a plus d'absorption d'eau de la nappe par la végétation ( $B_{flow} = 100\% * R_{tot}$ ), la strate herbacée et arbustive ne disposant pas d'un enracinement lui permettant d'atteindre la nappe. Dans ces conditions, les simulations révèlent un dessalement très rapide des eaux de l'aquifère. Ainsi, si l'aquifère était salé dans le passé, il ne faudrait qu'environ 30 ans pour le dessaler dans le cas où  $T = 0\% * R_{tot}$ , et 300 ans si

$T = 90\% * R_{tot}$ . Ainsi, parmi les principaux éléments clés, la seule évolution récente qui permette de réduire la salinité des ESO est la déforestation qui a débuté lors de la colonisation. L'élimination presque totale de la Caatinga a réduit la transpiration d'eau de la nappe libre par la végétation arborée, ce qui a permis l'élévation du niveau piézométrique, l'interruption des conditions endoréiques et, par conséquent, la réduction de la salinité des ESO. En effet, la déforestation et les activités agricoles extensives ont commencé il y a quelques centaines d'années (Ledru et al., 2020), théoriquement après l'arrivée des colons il y a 500 ans, et probablement plus intensivement après le XVII<sup>e</sup> siècle (il y a 200 ans), ce qui est un ordre de grandeur proche de celui de la baisse théorique de la salinité de l'aquifère qui se produit en quelques décennies (environ 30 ans) avec le modèle utilisé. Ainsi, les simulations suggèrent que la dynamique actuelle à long terme des aquifères tendrait vers une désalinisation des ESO due à la destruction de la Caatinga.

## Conclusion

Les simulations de bilan salin et hydrique réalisées dans cette étude ont montré que le degré d'aridité et les taux d'évapotranspiration et d'évaporation des eaux de surface et des précipitations ne peuvent pas conduire à eux seuls à une forte salinité de l'aquifère telle qu'observée, mais à des concentrations en chlorures de l'ordre de quelques dizaines de mg/L, 100 à 200 mg/L maximum. Parmi les principaux éléments clés du changement climatique et d'occupation des terres, le seul élément pouvant générer une forte salinité des ESO correspond à la transpiration de la nappe libre par la Caatinga arboricole, avec un taux de près de 100% de la recharge annuelle. Ainsi, les simulations réalisées suggèrent que seules des conditions d'endoréisme souterrain permettent d'atteindre des concentrations élevées en chlorures, de quelques g/L à plusieurs dizaines de g/L (la limite dépendant des limites physio-biologiques de la végétation). Cette étude ne veut pas laisser entendre que la déforestation est bénéfique pour l'environnement, mais que l'impact de la transpiration des arbres est un paramètre non négligeable qui doit être pris en compte lors de la réalisation de bilans hydriques ou salins dans les régions semi-arides.

## Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier l'IRD, la FUNCEME et la FUNCAP pour leur soutien financier.

## Références

- Fass, T., Cook, P. G., Stieglitz, T., & Herczeg, A. L. (2007). Development of saline ground water through transpiration of sea water. *Groundwater*, 45(6), 703-710.
- Kreis, M. (2021). *Origine et dynamique de salinité des aquifères fracturés cristallins de la région semi-aride du Ceará, Brésil (Doctoral dissertation, Montpellier)*.
- Leal I.R., Tabarelli M., da Silva J.M.C. (2003) *Ecologia e conservação da caatinga*. Recife: Universitária da UFPE. 822p.
- Ledru, M. P., Jeske-Pieruschka, V., Bremond, L., Deville, A. L., Sabatier, P., Martins, E. S. P. R., ... & Araújo, F. S. (2020). When archives are missing, deciphering the effects of public policies and climate variability on the Brazilian semi-arid region using sediment core studies. *Science of the Total Environment*, 723, 137989.
- Nkotagu, H. (1996). Application of environmental isotopes to groundwater recharge studies in a semi-arid fractured crystalline basement area of Dodoma, Tanzania. *Journal of African Earth Sciences*, 22(4), 443-457.
- Peulvast, J. P., Sales, V. C., Bétard, F., & Gunnell, Y. (2008). Low post-Cenomanian denudation depths across the Brazilian Northeast: implications for long-term landscape evolution at a transform continental margin. *Global and Planetary Change*, 62(1-2), 39-60.
- Rabemanana, V., Violette, S., De Marsily, G., Robain, H., Deffontaines, B., Andrieux, P., ... & Parriaux, A. (2005). Origin of the high variability of water mineral content in the bedrock aquifers of Southern Madagascar. *Journal of Hydrology*, 310(1-4), 143-156.
- Subba Rao, N. (2008). Factors controlling the salinity in groundwater in parts of Guntur district, Andhra Pradesh, India. *Environmental monitoring and assessment*, 138(1), 327-341.