

Zeitschrift: Tracés : bulletin technique de la Suisse romande
Herausgeber: Société suisse des ingénieurs et des architectes
Band: 132 (2006)
Heft: 05: Espace souterrain

Artikel: Les eaux souterraines de la mer d'Aral
Autor: Gascoin, Simon / Renard, Philippe
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-99452>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 30.06.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Les eaux souterraines de la mer d'Aral

La mer d'Aral est en train de rapetisser: elle a déjà perdu 90 % de son volume, et des calculs théoriques indiquent qu'elle aura disparu en grande partie d'ici quinze ans. Toutefois, les analyses hydrologiques ont souvent négligé le rôle des eaux souterraines: des données fournies par satellites, combinées avec un modèle hydrologique, permettent de mieux cerner cette composante.

Située à la frontière entre le Kazakhstan et l'Ouzbékistan, la mer d'Aral est une mer intérieure qui était encore en 1960 le quatrième plus grand lac du monde : 68 000 km², soit plus du double de la Suisse. Depuis 1989, elle est séparée en deux lacs distincts et, en 2004, sa superficie était divisée par quatre alors que 90 % de son volume avait disparu.

La Grande Mer (Bolchoïé) et la Petite Mer (Maloïé) - noms donnés aux deux lacs salés reliques - se situent en bordure ouest d'un bassin versant de près de 1 300 000 km² (fig. 1 et 2). La Petite Mer est alimentée par le Syr-Daria, la Grande Mer par l'Amou-Daria¹. La quantité d'eau réellement reçue par la Grande Mer est aujourd'hui quasiment nulle: une partie des eaux de l'Amou-Daria sert à irriguer les cultures de son delta situé en Ouzbékistan, alors qu'une autre partie est détournée vers le Turkménistan, via le canal du Kara-Koum. L'eau du Syr-Daria est également déviée à des fins agricoles, mais son débit est aujourd'hui contrôlé pour préserver la Petite Mer à son niveau actuel.

Les précipitations représentant moins de 10 % de l'eau autrefois déversée par les fleuves, la mer d'Aral n'a cessé de

¹ Daria signifie « fleuve » en ancien persan

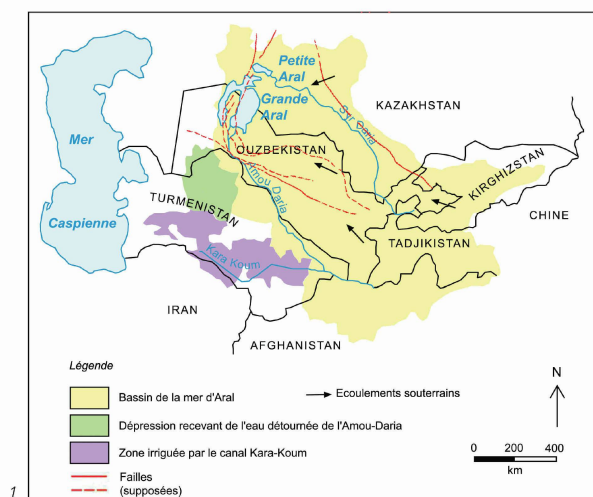


Fig. 1 : La mer d'Aral et son bassin versant

Fig. 2 : Photographie de la Mer d'Aral prise le 19 Aout 2001 par le satellite MODIS. On distingue nettement la Petite Mer au nord-est, la Grande Mer au sud qui est en train de se séparer en deux bassins est et ouest, avec au centre l'ancienne île Vozrozhdeniya. Cette image montre aussi très clairement l'environnement désertique autour de la mer d'Aral et l'étendue de la zone irriguée au sud dans le delta de l'Amou Daria.



s'évaporer et ses côtes ont reculé de plus de 100 km par endroits. La construction d'une digue entre les deux lacs a permis une remontée de la Petite Mer au détriment de la Grande Mer, qui est en train de se séparer en deux bassins depuis que l'île centrale Vozrozhdeniya² a rejoint le continent. On considère aujourd'hui le retrait de la mer d'Aral comme l'une des plus grandes catastrophes écologiques du XX^e siècle.

Bilan d'eau et données utilisées

Pour l'hydrologue, la mer d'Aral est un lac salé situé dans un bassin endoréique. Elle ne possède pas d'exutoire de surface et constitue une zone privilégiée pour l'évaporation. Avant 1960, le niveau du lac était stable car les débits de l'Amou-Daria et du Syr-Daria étaient du même ordre de grandeur que le flux de vapeur d'eau.

Pour comprendre l'assèchement progressif de la Grande Mer et tenter de prévoir son évolution, une méthode classique consiste à faire le bilan des flux entrants et sortants, puis à comparer les variations du niveau ainsi calculées aux variations réelles. En partant de l'hypothèse que le lac est un système isolé d'un éventuel flux souterrain, l'équation simplifiée du bilan en eau est :

$$\Delta V = Q + [P - E] \times S$$

Cette équation exprime que la variation de volume ΔV (m³/jour) pendant un laps de temps donné (ici un jour) est égale au bilan des flux : avec Q (m³/jour) le débit l'Amou-Daria, P les précipitations par unité de surface (m/jour), E

l'évaporation (m/jour) et S la surface du lac (m²). Les variations de niveau du lac sont déduites des variations de volume à l'aide d'un modèle numérique de la topographie du fond de la mer. Si le principe de cette méthode est simple, le modèle utilisé est plus sophistiqué [2]³, puisqu'il tient compte du bilan de masse des principales espèces chimiques en solution dans la mer et de leur précipitation sous forme minérale lorsque la salinité devient trop forte. Le bilan de masse des espèces chimiques est couplé au bilan d'eau via le taux d'évaporation (E) qui dépend de la salinité de l'eau.

La difficulté principale réside ici dans le manque de données pour estimer les termes du bilan. Après la chute de l'URSS, de nombreuses stations de mesures ont été abandonnées et l'on ne dispose plus, par exemple, de mesures régulières directes du niveau de la mer ou de relevés météorologiques. Depuis 1993, le satellite franco-américain TOPEX/Poseidon réalise des mesures altimétriques fournissant entre autres la hauteur d'eau de la Grande Aral tous les dix jours avec une précision de 6 cm. Il est en outre maintenant

² Les Soviétiques avaient installé sur cette île un laboratoire secret de développement d'armes microbiologiques, consacré notamment à la production du bacille du charbon (« anthrax »). Depuis 1991 le site a été abandonné. Maintenant que l'île est devenue une péninsule, on redoute que des spores survivantes puissent être transportés par des animaux et contaminer le continent. En 2002, le Pentagone a envoyé 113 personnes pour détruire entre 100 et 200 tonnes d'anthrax.

³ Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article

⁴ European Centre for Medium Range Weather Forecasts

⁵ National Oceanic and Atmospheric Administration



possible d'obtenir des données météorologiques journalières sur l'ensemble de la planète, auprès des centres de recherches sur le climat ECMWF⁴ et NOAA⁵. Ces diverses sources ont permis de reconstituer un jeu de données pour modéliser les variations du niveau de la Grande Mer, et confronter ces calculs à des mesures précises.

Un flux d'eau souterraine

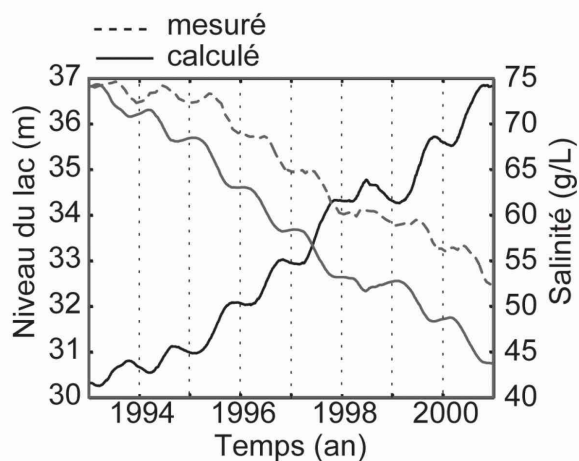
La figure 4 montre que le modèle reproduit correctement la tendance générale à la baisse du niveau pour la période simulée (1993-2001). En huit ans, le niveau de la Grande Aral a baissé de 4,4 m, ce qui correspond à une réduction de sa surface de 35 %. Toutefois, on note que le niveau calculé baisse systématiquement plus vite que le niveau mesuré. Cela peut signifier qu'un terme du bilan est mal estimé ou qu'un flux est négligé à tort. En faisant abstraction de la décroissance, on observe en outre que la hauteur d'eau oscille annuellement, ce qui s'explique par une évaporation plus intense en été qu'en hiver. Les oscillations de notre modèle, qui résultent des conditions météorologiques imposées, sont systématiquement en avance de quatre à cinq mois par rapport aux mesures du satellite.

Les écarts entre modèle et mesures doivent selon nous être interprétés comme une conséquence de l'interaction d'eaux souterraines avec les eaux de la mer d'Aral. Notre hypothèse de départ stipulait que le fond du lac était imperméable : en relaxant cette hypothèse, il est possible de modifier le modèle initial pour déterminer l'apport d'eau souterraine nécessaire pour que les mesures coïncident avec les calculs.

On obtient un apport annuel moyen d'eau supplémentaire de 4 km³/an. De plus, une solution analytique simple montre que la connexion d'un lac avec un aquifère entraîne un décalage des oscillations du niveau du lac par rapport à un lac isolé soumis aux mêmes conditions climatiques. Cela tend à confirmer l'existence d'un échange d'eau entre l'Aral et le sous-sol.

Par ailleurs, cette hypothèse apparaît réaliste d'un point de vue hydrogéologique. Le bassin de l'Aral est constitué de sédiments datant du Crétacé et du Jurassique et sa base se situe à des profondeurs supérieures à 2000 mètres. Ces sédiments présentent un pendage sub-horizontal vers l'ouest. Parmi les formations du Crétacé, certaines sont des aquifères régionaux alimentés en eau de surface à environ 1000 km à l'Est de l'Aral, dans les Massifs du Tien-Shan et du Pamir⁶ (fig. 7). L'eau souterraine confinée dans ces couches perméables circule vers l'ouest, en suivant le gradient de charges hydrauliques. A proximité de l'Aral, les forages profonds recoupant ces aquifères montrent que de nombreux puits sont artésiens. L'eau souterraine peut donc s'écouler naturellement depuis ces terrains Crétacés vers la mer. Ce flux est certainement localisé dans les grandes failles qui traversent la mer du nord au sud (fig. 1) et qui constituent une zone potentielle de forte perméabilité recoupant le couvercle marneux constitué de terrains éocènes.

⁶ Ces hautes chaînes de montagnes, autrefois traversées par la Route de la soie, sont les contreforts ouest de l'Himalaya.

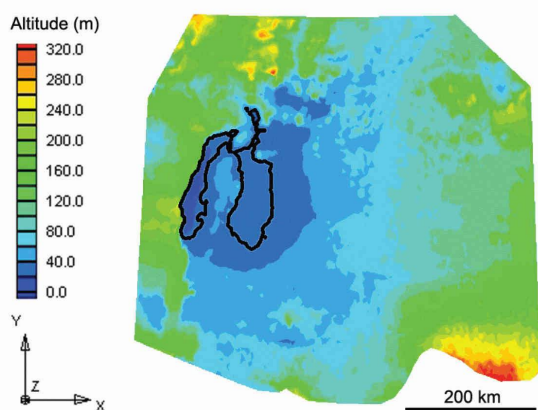


4

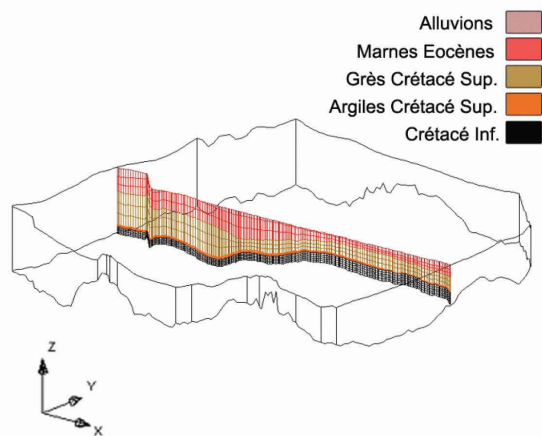
L'évolution du flux

Il est fascinant de constater que l'Aral s'assèche apparemment moins vite que prévu, en raison d'un apport souterrain. Toutefois, les calculs ne permettent pas de décrire la dynamique du réservoir souterrain, car sa physique ne peut être décrite à partir de simples bilans. Une question cruciale est donc de savoir comment ce flux souterrain va évoluer alors que les conditions hydrauliques changent. Il est en effet connu que la réponse des aquifères à une variation des termes de forçage (ici le niveau de l'Aral) porte souvent sur plusieurs dizaines d'années. On doit donc s'attendre à ce que le débit souterrain - estimé par nos calculs à $4 \text{ km}^3/\text{an}$ - diminue dans le futur.

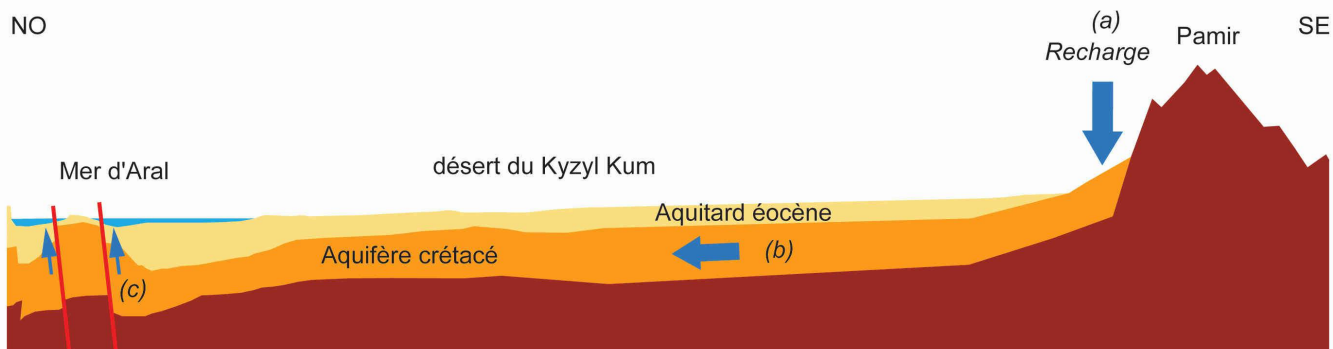
Cette question de l'évolution du flux souterrain a été abordée avec le logiciel *HydroSphere* récemment développé par les chercheurs de l'Université Laval et de Waterloo [3]. Cet outil numérique permet de résoudre les équations couplées



5



6



7

Fig. 4 : Niveau de la mer d'Aral calculé par le modèle et mesuré par TOPEX/Poseidon ;
salinité totale calculée par le modèle

Fig. 5 et 6 : Topographie et géométrie du modèle 3D HydroSphère

Fig. 7 : Coupe géologique illustrant l'hypothèse de la remontée d'eau souterraine.
Recharge de l'aquifère crétacé : l'eau provient des précipitations et de la fonte des
neiges accumulées sur les versants montagneux du Pamir (a). Circulation souterraine
dans l'aquifère éocène confiné sous les terrains éocène imperméables sous-jacents (b).
La remontée de l'eau souterraine se fait à la faveur des failles traversants les
formations éocènes et crétacées (c).

(Sauf mention, tous les documents illustrant cet article ont été fournis par les auteurs)

des écoulements souterrains et de surface. Pour ce faire, il a de nouveau fallu faire appel à des données satellitaires caractérisant la topographie de la région (fig. 5 et 6). La géométrie et les propriétés du sous-sol sont intégrées dans le modèle à partir des cartes géologiques. Les premiers tests avec ce modèle 3D ont confirmé l'ordre de grandeur du débit souterrain. Mais de futures recherches devront caractériser la dynamique des échanges de manière plus précise.

Au-delà de ces résultats, le cas de la mer d'Aral nous enseigne la nécessité de considérer les questions relatives aux ressources en eau dans l'espace continu du sous-sol, de la surface et de l'atmosphère. Cela pose un défi passionnant aux hydrologues et aux hydrogéologues, qui ont trop souvent tendance à découpler ces systèmes. Par ailleurs, la solution de ce défi revêt également une importance capitale pour la préservation des autres grands lacs menacés, comme le lac Tchad.

Simon Gascoin, dipl. sc. de la terre ENS-Lyon
UMR Sisyphe - UPMC Paris VI
Boite 123, 4 place Jussieu
F - 75252 PARIS Cedex 05

Philippe Renard, prof. SNF, dr hydrogéologie (ENSMP),
ing. géologue (ENSG)
Centre d'Hydrogéologie, Université de Neuchâtel
Rue Emile-Argand 11, CP 158
CH - 2009 Neuchâtel

- [1] LÉTOLLE, R. ET M. MAINGUET : « Aral », Springer-Verlag France, Paris, 1993, 367 pp.
- [2] GASCOIN, S. ET PH. RENARD : « Modélisation du bilan hydrologique de la partie sud de la mer d'Aral entre 1993 et 2001 », *Hydrological Sciences Journal*, 50(6), 2005, pp. 1119-1135
- [3] THERRIEN, R., R.G. MCLAREN, E.A. SUDICKY ET S.M. PANDAY : « Hydro-Sphere 2005, A Three-dimensional Numerical Model Describing Fully-integrated Subsurface and Surface Flow and Solute Transport », Groundwater Simulations Group, draft edition, 2005

**Il existe plusieurs manières de faire avancer ses affaires.
Voici l'une des plus économiques.**



Super leasing à 3,9%*

Opel. Des idées fraîches pour de meilleures voitures.

Les véhicules utilitaires Opel proposent pour tous les problèmes de transport une solution sur mesure, personnalisée et, surtout, très économique. Les Vivaro et Movano bénéficient en outre de l'ensemble de prestations «all-in», une exclusivité Opel. Et sont, suivant la motorisation, disponibles sur demande avec la nouvelle boîte automatisée MTA Tecshift. Faites de bonnes affaires. Infoline 0848 810 820.

all-in 3 ans ou 100 000 km service gratuit* et réparations gratuites. *sauf huile moteur

Leasing Opel **Garantie de mobilité Opel** www.opel.ch

*Exemple: Opel Combo Van 66 kW/90 ch, 1364 cm³, 3 portes, prix catalogue Fr. 15'500.- (excl. 7,6% TVA), mensualités de leasing Fr. 202.55/mois (incl. 7,6% TVA), taux annuel effectif 3,97%, durée 36 mois, 10000 km/an, acompte Fr. 3'335.60 (incl. 7,6% TVA), casco complète obligatoire non comprise. GMAC Suisse SA ne signe pas de contrats de leasing avec les consommateurs qui pourraient se retrouver en situation de surendettement. L'offre de leasing à 3,9% est valable jusqu'au 30 juin 2006 pour tous les véhicules Opel.