

# Modélisation hydrogéologique de la mer d'Aral

Simon Gascoin

31 août 2005

# Remerciements

Je tiens d'abord à remercier René Therrien pour avoir cru en mon projet et m'avoir accueilli à l'Université Laval, ce qui m'a donné l'opportunité d'apprendre à utiliser différents outils numériques dont HydroSphere. Je lui suis reconnaissant de m'avoir permis d'assister à ses cours de modélisation. Je remercie chaleureusement Jean-Michel Lemieux qui m'a fourni une aide précieuse ainsi que Philippe Renard qui est l'initiateur éclairé de ce travail. Merci également à Pierre Ribstein pour ses conseils et son hospitalité! Enfin, je salue la rare gentillesse et disponibilité de Coly Waya Diouf et Léonard Coffy Agassanou sans qui mon expérience à l'université Laval eût été bien décevante.

... Il est peu et de réussites faciles, et d'échecs définitifs.  
*A la recherche du temps perdu*, Marcel Proust

# Table des matières

<b>Introduction</b>	<b>5</b>
<b>1 Mise en évidence de l'importance de l'eau souterraine</b>	<b>8</b>
1.1 Le bassin de la mer d'Aral . . . . .	8
1.1.1 Contexte géographique . . . . .	8
1.1.2 Aperçu géologique . . . . .	10
1.1.3 Hydrogéologie régionale . . . . .	10
1.2 Analyse des variations du niveau de la Grande Aral . . . . .	11
1.3 Explications envisagées au déphasage entre le forçage climatique et le niveau du lac . . . . .	13
1.3.1 Les erreurs de mesure . . . . .	13
1.3.2 La dilatation thermique . . . . .	15
1.3.3 La gestion des eaux d'irrigation dans le delta de l'Amou- Daria . . . . .	15
1.3.4 Le flux d'eau souterraine . . . . .	16
<b>2 Approche unidimensionnelle</b>	<b>18</b>
2.1 Définition du modèle . . . . .	18
2.2 Simulation en régime transitoire . . . . .	19
2.3 Discussion . . . . .	21
<b>3 Approche tridimensionnelle et simulation couplée</b>	<b>23</b>
3.1 Présentation d'HydroSphere . . . . .	23
3.2 Préparation des fichiers d'entrées . . . . .	23
3.3 Résultats des simulations . . . . .	24
3.3.1 Simulation des écoulements de surface . . . . .	24
3.3.2 Simulation des écoulements souterrains . . . . .	25
3.3.3 Simulation couplée . . . . .	25
3.4 Limites et discussion . . . . .	29
<b>Conclusion</b>	<b>30</b>
<b>Références</b>	<b>30</b>
<b>A Création du maillage</b>	<b>33</b>
<b>B Fichiers d'entrées</b>	<b>36</b>

# Table des figures

1	Carte de localisation générale . . . . .	6
2	Photographies satellites 1993 et 2003 . . . . .	7
1.1	Bassin de la mer d’Aral . . . . .	9
1.2	Carte géologique . . . . .	12
1.3	Variations du volume de la Grande Aral et des différents termes du bilan hydrologique . . . . .	13
1.4	Variations calculées et mesurées du niveau de la Grande Aral . .	14
1.5	Niveaux de la Grande Aral mesurés par TOPEX/Poseidon entre 1993 et 2001 avec l’enveloppe des erreurs de mesures . . . . .	14
1.6	Image satellite du delta de l’Amou-Daria . . . . .	16
2.1	Schéma du modèle unidimensionnel envisagé . . . . .	18
2.2	Répartition des charges après une simulation en régime permanent	20
2.3	Mise en évidence du déphasage entre débit et niveau du lac modèle	22
2.4	Influence de la taille de l’aquifère . . . . .	22
3.1	Résultat de la simulation des écoulements de surface seulement .	26
3.2	Résultat de la simulation des écoulements souterrains seulement	27
3.3	Contours piézométriques du Priaralye dans l’aquifère 2 . . . . .	27
3.4	État de saturation des éléments de surface après un an . . . . .	28
3.5	Résultat en surface d’une simulation couplée sur 10 ans . . . . .	28
A.1	Étapes principales pour créer le maillage . . . . .	35

# Introduction

Située en Asie Centrale, à la frontière entre le Kazakhstan et l'Ouzbékistan (figure 1), la mer d'Aral était en 1960 le quatrième plus grand lac du monde avec une superficie de 67,499 km<sup>2</sup>. Afin de développer l'agriculture dans cette zone aride, les planificateurs soviétiques ont décidé de détourner massivement l'eau des deux grands fleuves alimentant la mer d'Aral, le Syr-Daria et l'Amou-Daria. Ainsi, entre 1960 et 1990 les surfaces irriguées ont été doublées et la région est devenue le quatrième producteur mondial de coton. Mais, privée de son principal apport en eau, la mer d'Aral n'a cessé de s'évaporer [1]. En 2004 sa superficie est réduite à 17,158 km<sup>2</sup> et son niveau a baissé de plus de 20 m. Depuis 1989, la mer d'Aral est même séparée en deux lacs distincts comme le montrent les images satellites de la figure 2. La partie Sud, la plus grande, n'a reçu de l'Amou-Daria ces dix dernières années, qu'entre 0 et 20 km<sup>3</sup> d'eau par an. La partie Nord est isolée de la partie Sud par une digue. Le vent disperse sur des milliers d'hectares le sel, le sable et la pollution des fonds marins mis à nus. Au vue des conséquences environnementales et sanitaires qui touchent aujourd'hui près de cinq millions de personnes, on considère le retrait de la mer d'Aral comme l'une des plus grandes catastrophes écologiques du 20<sup>e</sup> siècle<sup>1</sup>.

En juillet 2004, j'ai réalisé mon stage de maîtrise au Centre d'Hydrogéologie de Neuchâtel (CHYN) sous la direction de Philippe Renard. Nous avons tenté de modéliser les variations du niveau de la Grande Aral à l'aide de la méthode du bilan en eau [2]. Ce travail nous a conduit à montrer l'insuffisance d'un modèle qui ne tient pas compte des interactions entre le lac et les eaux souterraines. C'est pourquoi il a été envisagé d'utiliser le logiciel HydroSphere pour prolonger cette étude. En effet, cet outil permet notamment de résoudre les équations des écoulements de surface en couplage avec celles des écoulements souterrains [3]. Le code est actuellement développé au Canada, à l'Université de Waterloo et à l'Université Laval, où s'est déroulé mon stage de deuxième année de master entre février et juillet 2005.

Dans le chapitre 1 nous expliquons pourquoi il est pleinement justifié de s'intéresser au rôle de l'eau souterraine. L'étude de la composante phréatique est d'abord menée à partir d'un modèle simple unidimensionnel et fait l'objet du chapitre 2. Enfin, dans le chapitre 3, il est question de modéliser en trois dimensions à l'échelle régionale les interactions entre la mer d'Aral et les aquifères environnants.

---

<sup>1</sup>Avant la chute du régime soviétique, cette expression est déjà employée par E. Yusopov dans le journal *Pravda Vostoka* du 10 Septembre 1987.



FIG. 1 – Carte de localisation générale; la mer d'Aral étant représentée à son niveau de l'an 2000

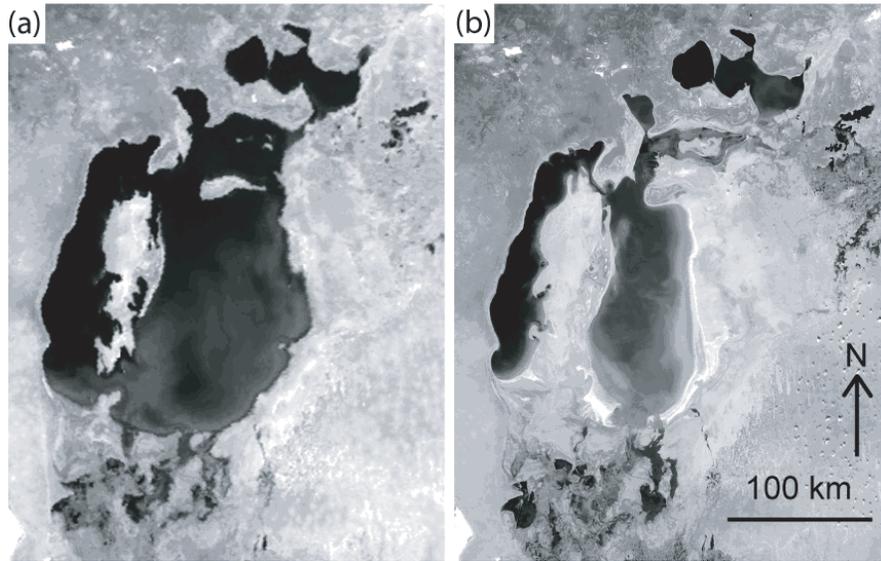


FIG. 2 – Photographies satellites montrant la baisse du niveau et la division de la mer en deux lacs entre 1993 et 2003. La grande Aral (lac Sud) est aujourd’hui elle-même séparée en deux bassins Est et Ouest. (a) Image NOAA-AVHR du 2 août 1993. (b) Image MODIS du 12 août 2003.

# Chapitre 1

## Mise en évidence de l'importance de l'eau souterraine

### 1.1 Le bassin de la mer d'Aral

#### 1.1.1 Contexte géographique

Reliques de l'ancienne mer d'Aral, la Petite Aral et la Grande Aral sont deux lacs salés séparés par une digue<sup>1</sup>. Ils se situent en bordure Ouest d'un vaste bassin de 1 200 000 km<sup>2</sup> à 1 300 000 km<sup>2</sup> qui s'étend en partie sur les territoires du Kirghizstan, du Tadjikistan, du Turkménistan et de l'Afghanistan (figure 1.1). La Petite Aral est alimentée par le Syr-Daria, et la Grande Aral par l'Amou-Daria<sup>2</sup>. La quantité d'eau reçue à l'embouchure de la Grande Aral est aujourd'hui quasiment réduite à néant pour irriguer les cultures dans le delta de l'Amou-Daria en Ouzbékistan. Une partie du débit de l'Amou-Daria est également détourné *via* le canal du Kara-Koum vers le Turkménistan. L'eau du Syr-Daria est déviée à des fins agricoles, mais son débit est actuellement contrôlé pour préserver la Petite Aral à son niveau actuel. Aujourd'hui l'Ouzbékistan possède la plus grande surface irriguée d'ex-URSS après la Russie et 94% de l'eau d'irrigation provient des eaux de surface.

L'irrigation à partir des eaux du fleuve n'est pas une pratique nouvelle. Dans le delta de l'Amou-Daria, les vestiges d'anciens canaux montrent que cette technique est utilisée dans la région depuis le 2<sup>e</sup> millénaire av. J-C. En effet, le climat semi-aride autour de la mer d'Aral fait de l'irrigation une condition nécessaire au développement de l'agriculture. Les précipitations annuelles se situent entre 100 mm et 200 mm, et l'évaporation potentielle varie de 2 m/an dans le Sud de la Touranie à moins de 1 m/an au niveau de l'Aral en raison du haut degré de saturation de l'air. Par ailleurs, le climat est marqué par une forte composante continentale, qui augmente à mesure que l'on s'éloigne du lac vers l'Est. L'écart moyen de température entre janvier et juillet atteint 40°C [4].

---

<sup>1</sup>Désormais, pour simplifier la lecture, on utilisera le terme « mer d'Aral » comme l'entité hydrographique composée des deux nouveaux lacs

<sup>2</sup>*daria* : de l'ancien persan pour *fleuve*



FIG. 1.1 – Bassin de la mer d’Aral (Source : )

L’irrigation massive a débutée en 1960 surtout au profit de la culture du coton. Autrefois traditionnelle, la culture du coton est devenue une production à grande échelle destinée à assurer l’indépendance textile du bloc communiste. Maintenant l’exportation du coton constitue la source principale de devises pour l’Ouzbékistan. Mais l’irrigation est aussi indispensable à la production agricole alimentaire et la pression exercée sur les ressources en eau est exacerbée par l’explosion démographique en Asie Centrale. Cette région — qui correspond approximativement au bassin de la mer d’Aral — compte 54 millions d’habitants en 1997 contre 7 à 8 millions au début du 20<sup>e</sup> siècle [5].

### 1.1.2 Aperçu géologique

Le bassin de la mer d’Aral est situé au Sud-Est de la dépression du Turgai qui est une structure active de graben. L’effondrement du socle au mésozoïque a donné naissance au bassin touranien, constitué de sédiments datant surtout du Crétacé et du Jurassique et sa base peut atteindre 2000 mètres de profondeur. Ces sédiments ont subi un léger plissement et présentent un pendage sub-horizontale dirigé vers la mer d’Aral. En surface, les couches mésozoïques sont recouvertes par les sédiments lacustres de la mer d’Aral, ainsi que les déserts Oust-Ourt, Kara-Koum, Kyzil-Koum et Barzouki [6]. Les mouvements tectoniques cénozoïques ont façonné le paysage actuel, et les plus récents datant du pliocène ont donné naissance aux cuvettes de la Mer d’Aral, essentiellement la cuvette Ouest dont une partie est située sous le niveau de la mer.

On observe plusieurs failles normales de direction sub-méridionale qui recoupent les roches mésozoïques en bordure Est du bassin et à l’Ouest du plateau Oust-Ourt (figure 1.2). Elles auraient été actives au Néogène [7]. D’un point de vue géomorphologique on les associe à cette structure à pente raide de 200 m de dénivelé, « le mur Tschink », le long de la côte Ouest du lac ainsi qu’au haut structural de l’île de Vozrozhdeniya [6].

### 1.1.3 Hydrogéologie régionale

L’objectif de cette étude bibliographique est de présenter une vision synthétique des unités hydrogéologiques du bassin de la mer d’Aral, afin de disposer d’informations simples pour la modélisation du chapitre 3. Avec le terme « bassin » on fait référence au bassin versant souterrain de premier ordre tel qu’il a été défini par Semina en 1981 [8] à partir d’observations géologiques, géophysiques et satellites (figure 1.2). On peut légitimement émettre des doutes quant à la fiabilité d’un tel tracé sur un domaine aussi vaste. Précisons toutefois que les données à ce sujet sont assez rares (ou difficiles à obtenir...) et qu’il est délicat de décrire avec précision l’aspect hydrogéologique de la région [6, 4, 9].

**Aquifère 1** Les alluvions de la mer d’Aral ainsi que des deltas de l’Amou-Daria et du Syr-Daria constituent l’essentiel des aquifères de surface, caractérisés par une perméabilité élevée et une faible capacité. La surface libre se rapproche de la surface (jusqu’à 5 m) à proximité de la mer d’Aral.

**Aquitard 1** Une unité régionale confinante est située en dessous de la mer d’Aral et de l’aquifère de surface. Elle est composée d’argiles éocènes d’épaisseur allant jusqu’à 50 m.

**Aquifère 2** Le réservoir souterrain majeur est situé dans les sédiments marins et continentaux du Turonien Supérieur - Sénonien (Crétacée Sup.). Son épaisseur maximale est 200 m. L’eau circule principalement dans des grès, à grains fins, avec une composante calcaire ou argileuse. Par la suite on néglige cette variabilité. Contrairement à l’aquifère 1, cette nappe caractérisée par une circulation à l’échelle régionale. Les zones de recharge se situent dans les zones montagneuses à l’Est, où les formations affleurent. Le niveau piézométrique est généralement supérieur à la surface, et par conséquent il est possible que les failles jouent le rôle de conduit à des remontées artésiennes. Notamment il a été proposé que cet aquifère *alimente en eau profonde la mer d’Aral*. Cette question est approfondie dans le paragraphe 1.3.4.

Nom	Formation géologique	Nature
aquifère 1	Néogène sup. Quaternaire	alluvions
aquitard 1	Éocène	argiles
aquifère 2	Turonien sup. Sénonien	grès
aquitard 2	Turonien inf.	argiles
aquifère 3	Albien sup. Cénomanién	grès argileux

TAB. 1.1 – Tableau récapitulatif des unités hydrogéologiques dans le bassin de la mer d’Aral, dans l’ordre chronostratigraphique

**Aquitard 2** Les argiles du Turonien inférieur (Crétacé Sup.) séparent les deux aquifères régionaux.

**Aquifère 3** Les formations Albien Sup. - Cénomanién (fin du Crétacé Inf. - début du Crétacé Sup.) composent l’aquifère le plus profond, de nature gréseuses interstratifié avec des couches argileuses, ou des aleurolites. La porosité est élevée dans ces roches qui sont connues pour être un réservoir majeur de gaz naturel en Sibérie. Les charges atteignent ou dépassent celles de l’aquifère 2.

## 1.2 Analyse des variations du niveau de la Grande Aral

Les mesures altimétriques du satellite TOPEX/Poseidon (T/P) permettent de connaître avec précision ( $\pm 4$  cm au pas de temps décadaire) les variations du niveau de la mer d’Aral. Par ailleurs, il est maintenant possible d’obtenir des données climatiques à haute résolution temporelle fournies par les serveurs du *European Centre for Medium Range Weather Forecasts* (<http://www.ecmwf.int/>) et du NOAA-CIRES *Climate Diagnostics Center*, (<http://www.cdc.noaa.gov/>). Ces nouvelles données offrent l’opportunité d’étudier le fonctionnement hydrologique de la mer d’Aral, surtout depuis que de nombreuses stations de mesures *in situ* ont été abandonnées avec l’éclatement de l’URSS. Nous avons utilisé ces informations pour modéliser les variations du niveau de la Grande Aral entre 1993 et 2001 [2]. Pour cela nous avons réécrit le code de Benduhn et Renard [10] qui simule à chaque pas de temps le bilan en eau et en sels du lac, dans l’hypothèse que le fond du lac est imperméable. Les différents termes du bilan en eau sont représentés dans la figure 1.3. L’évaporation est calculée à partir d’une formule de Penman modifiée par Calder et Neal [11] qui dépend de paramètres climatiques et de la salinité de l’eau. Durant l’année le flux de vapeur d’eau atteint entre juin et juillet un maximum à 9.4 mm/jour en moyenne et un minimum proche de zéro (positif ou négatif) en décembre et janvier. La figure 1.4 montre que la Grande Aral atteint une hauteur maximale chaque année entre mi-mai et juin. Ceci est surprenant compte tenu du fait qu’à cette période de l’année des températures élevées et un fort ensoleillement produisent une évaporation intense. Le modèle du bilan qui intègre les principaux flux de surface (pluie, évaporation et runoff) produit quant à lui des oscillations qui sont en phase avec l’évaporation, puisque ce terme domine les autres termes du bilan. Ces observations nous conduisent à rechercher des

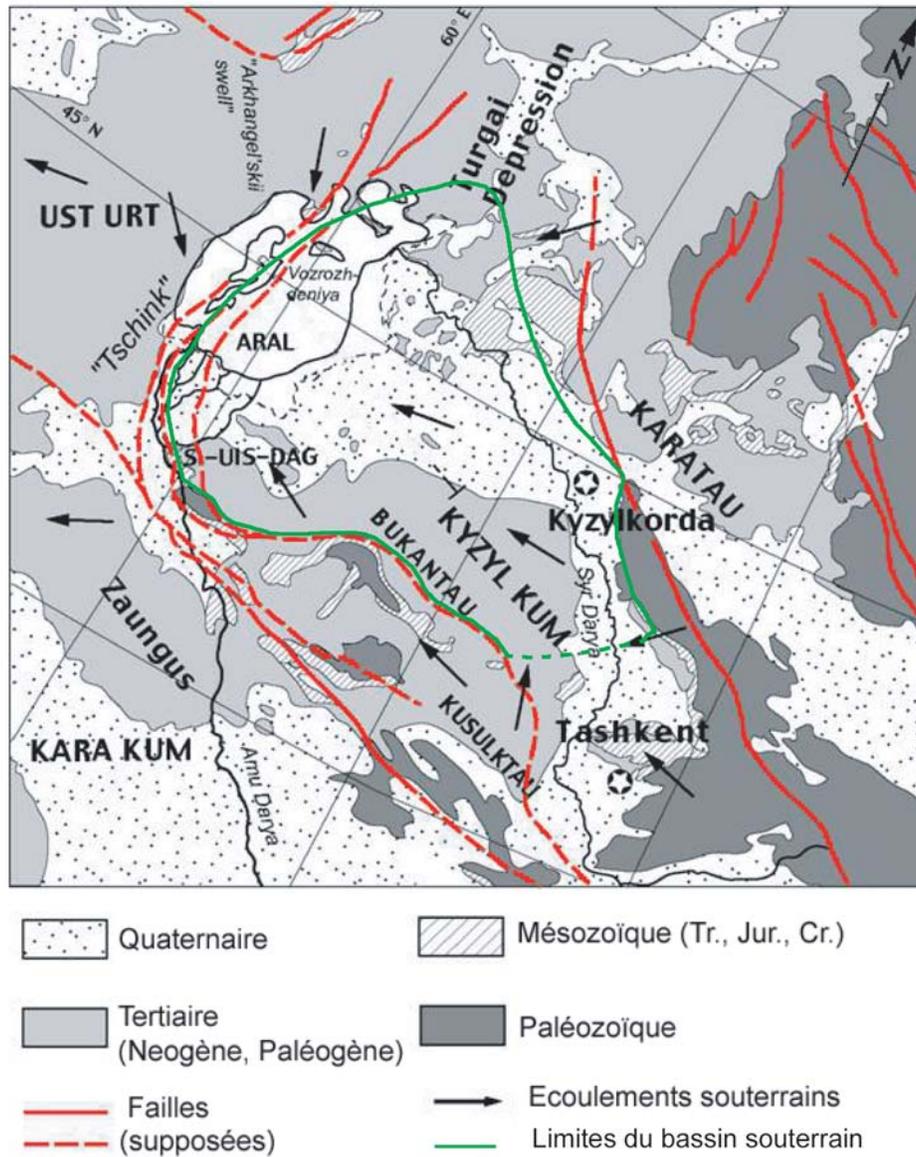


FIG. 1.2 – Carte géologique montrant les failles majeures dans le bassin de la mer d’Aral. Les limites du bassin sont les limites proposées par N. S. Semina pour le bassin hydrogéologique de premier ordre du Syr-Daria (modifié d’après [9, 8]).

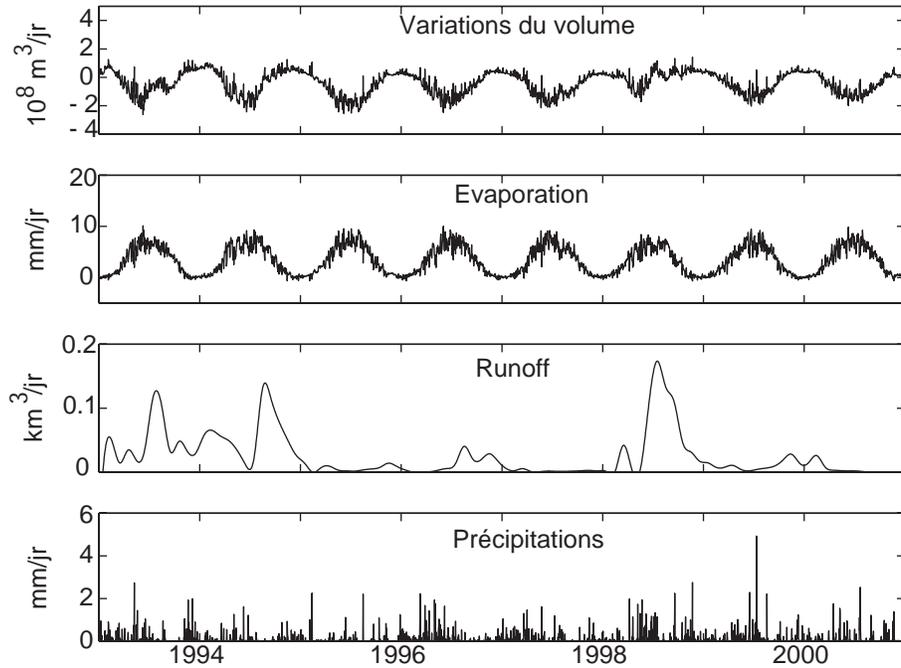


FIG. 1.3 – Variations du volume de la Grande Aral (déduites des mesures T/P) et variations des différents termes du bilan hydrologique [2]

explications qui sont exposées dans la partie suivante. Finalement il est envisagé de remettre en cause l'hypothèse de départ et donc d'envisager le rôle de l'eau souterraine.

### 1.3 Explications envisagées au déphasage entre le forçage climatique et le niveau du lac

Pour résoudre la question du déphasage on propose quatre explications.

#### 1.3.1 Les erreurs de mesure

Les niveaux de la Grande Aral mesurés par altimétrie sont données avec une erreur de  $\pm 4$  cm, ce qui est insuffisant pour effacer les oscillations annuelles comme le montre la figure 1.5. L'autre erreur de mesure pourrait être liée à la trajectoire orbitale de T/P. En effet, si les mesures du satellite sont excentrées au-dessus du lac on ne peut écarter une explication liée à l'influence des vents ou des différences de pression entre la partie Est et la partie Ouest (seiches). Toutefois les tracés du satellite passent bien au milieu du lac, on peut donc raisonnablement penser que les données altimétriques sont représentatives du niveau moyen du lac.

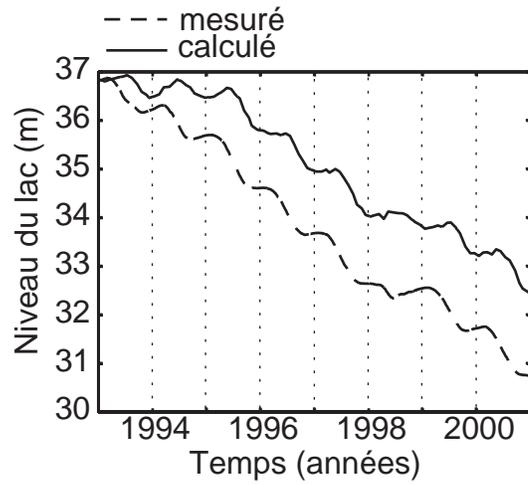


FIG. 1.4 – Variations mesurées (TOPEX/Poseidon) et calculées du niveau de la Grande Aral [2]

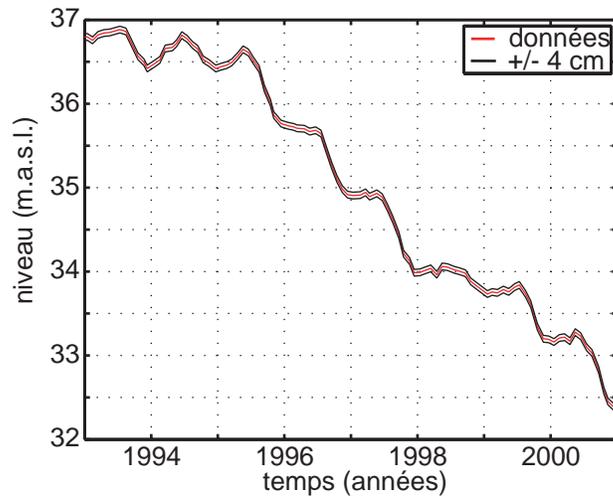


FIG. 1.5 – Niveaux de la Grande Aral mesurés par TOPEX/Poseidon entre 1993 et 2001 avec l'enveloppe des erreurs de mesures

### 1.3.2 La dilatation thermique

La remontée du niveau du lac en été peut être interprété comme l'effet de la dilatation thermique de l'eau du lac avec la chaleur estivale. Cette hypothèse peut être testée par un calcul d'ordre de grandeur : si l'on considère que seule la couche située au-dessus de la thermocline — ou épilimnion subit des variations thermiques saisonnières alors on obtient une variation de volume  $dV$  :

$$dV \simeq \delta \times S \times d\alpha(s, T, p) \times dT \quad (1.1)$$

où  $S$  est la surface du lac,  $\delta$  la profondeur de la thermocline,  $\alpha$  le coefficient de dilatation thermique de l'eau salée ( $s$  étant la salinité,  $T$  la température,  $p$  la pression) et  $dT$  l'écart de température sur une période donnée en supposant l'équilibre thermique atteint. On fait l'approximation que  $\delta$  est constant sur l'ensemble de la surface du lac et vaut 5 m [12]. Pour les gammes de salinité et de température étudiées, le coefficient  $\alpha$  vaut  $2.8 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  [13]. Alors, si la température de l'épilimnion varie de  $20^\circ\text{C}$  on obtient une dilatation inférieure à  $1 \text{ km}^3$ , ce qui est trop faible pour expliquer des écarts d'amplitude  $10 \text{ km}^3$ .

### 1.3.3 La gestion des eaux d'irrigation dans le delta de l'Amou-Daria

Une piste de recherche envisagée est de s'intéresser à la gestion des eaux issue de l'Amou-Daria dans le delta. Les images satellites disponibles sur Internet offrent l'opportunité d'observer des lacs dans le delta. Sur les images de l'année 2002 on remarque que certains de ces réservoirs apparaissent vers juin-juillet. Effectivement, en été, les deltas de l'Amou-Daria et du Syr-Daria sont irrigués et une partie est évacuée dans les « kollektors ». Ces collecteurs de drainage acheminent vers la mer d'Aral l'eau des réseaux d'irrigation qui n'est pas perdue par évapotranspiration ou infiltration dans le delta. Paradoxalement, le débit dans les collecteurs est donc maximal *pendant* la période d'irrigation, dès la fin du printemps. Nous allons essayer d'estimer si une partie de l'eau d'irrigation est susceptible de faire varier significativement le niveau la Grande Aral.

La FAO (Food and Agriculture Organization) estime qu'en Ouzbékistan la quantité d'eau qui retourne dans le bassin de l'Amou-Daria après avoir été détournée à des fins agricoles ou domestiques est de  $21.5 \text{ km}^3$  [14]. On se doute que cette eau provient très majoritairement des canaux de drainage après irrigation. Les chiffres pour le delta de l'Amou-Daria ne sont pas précisés mais à l'échelle du territoire de l'Ouzbékistan, la publication indique que le flux de retour est à 95% issu du drainage après irrigation. Cela donnerait  $20.5 \text{ km}^3$  d'eau potentiellement réinjectés dans le système du delta. Une partie n'atteint pas la Grande Aral, car elle est réutilisée pour l'agriculture, ou bien s'accumule dans des collecteurs (où l'eau s'évapore entièrement selon la FAO). Il reste  $9.5 \text{ km}^3$  qui peuvent alimenter la Grande Aral. Si cette eau s'ajoute au débit de surface elle échappe aux mesures des stations qui sont situées sur le fleuve en amont. Elle peut aussi transiter par voie souterraine dans les alluvions très perméables du delta. Finalement, si on fait l'hypothèse extrême que les  $9.5 \text{ km}^3$  s'ajoutent au  $133.3 \text{ km}^3$  de la Grande Aral à la fin de l'année 2001, alors cela produirait une hausse du niveau de 40.8 cm. Par conséquent il n'est pas exclu que ce flux participe à la remontée du niveau de la Grande Aral en période estivale. Néan-

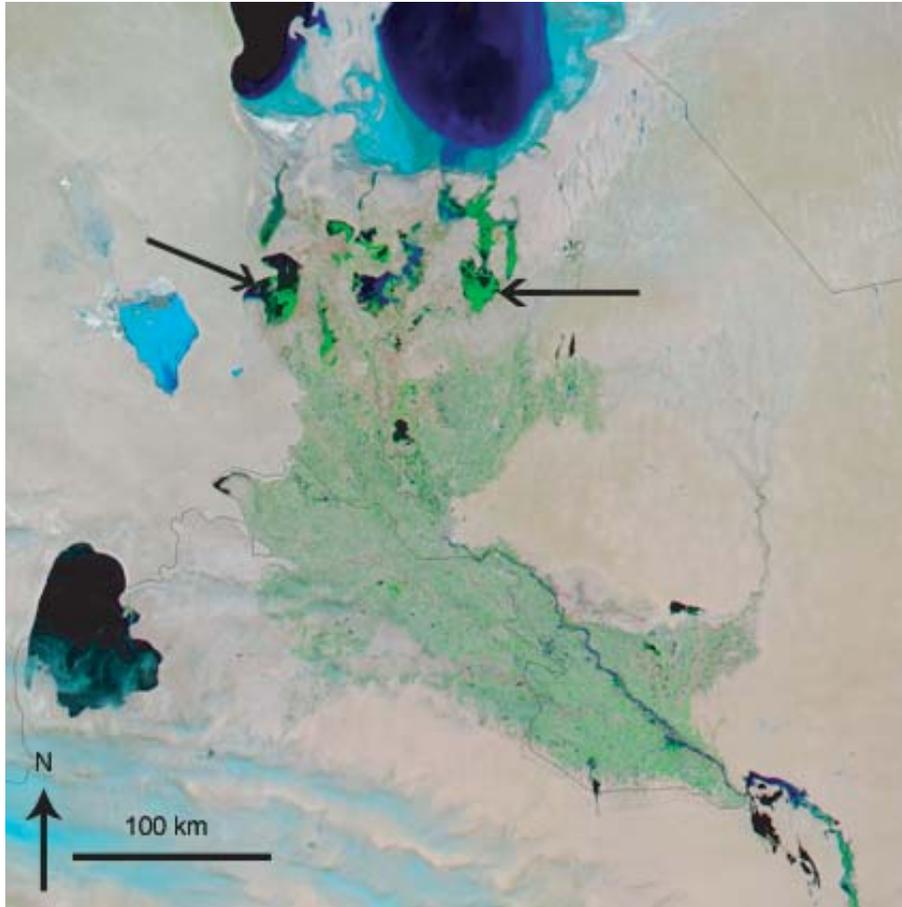


FIG. 1.6 – Image satellite (Rapidfire) du delta de l'Amou-Daria en fausses couleurs. Le cliché date du 28/05/2003. Noter les réservoirs temporaires (indiqués par des flèches noires) situés entre les cultures et la Grande Aral. Source : NASA disponible sur <http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov>

moins nous manquons d'informations continues sur la gestion de l'eau dans le delta pour conclure davantage.

### 1.3.4 Le flux d'eau souterraine

Selon les auteurs les débits des couches profondes au niveau de l'Aral sont de 0.07 à 0.4 km<sup>3</sup>/an, l'alimentation phréatique globale étant estimée à entre 3 et 5.5 kilomètres cubes par année [10, 15, 16] (tableau 1.2). On peut même penser que la baisse de la mer d'Aral entraîne une augmentation du flux souterrain car le gradient hydraulique dans la devient plus élevé [16]. Les résultats de notre simulation (figure 1.4) montrent que le niveau calculé baisse plus vite que la réalité. Cela a été interprété comme l'indice qu'un flux est négligé. Ce flux a été estimé à 4 km<sup>3</sup>/an. On a vu notamment que des failles normales traversant la mer d'Aral peuvent faciliter l'interaction avec l'aquifère artésien crétaqué. Cette

Auteur	Débit (km <sup>3</sup> /an)
Tchernenko (1965)	5.5
Zwonkov (dans Chodsibajev, 1968)	4.4
Chodsibajev (1968)	3
Tchernenko (1983)	3.2
Benduhn et Renard (2004)	1 - 15
Jarsjö et Destouni (2004)	0 - 30
Créaux et al. (soumis)	0 - 8

TAB. 1.2 – Quelques estimations des apports d'eau souterraine à l'Aral

piste doit être explorée : l'eau souterraine peut-elle modifier les variations du niveau de la mer d'Aral ?

## Chapitre 2

# Approche unidimensionnelle

### 2.1 Définition du modèle

L'aquifère connecté à la mer d'Aral peut-il agir comme un tampon amortissant le forçage climatique imposé sur le lac ? Pour tester cette hypothèse on peut imaginer un modèle hydrogéologique simplifié représenté par la figure 2.1. Le lac est connecté à un aquifère homogène, de perméabilité  $K$  et d'emmagasinement spécifique  $S_S$ , par une surface perméable rectangulaire de profondeur  $L$  et d'épaisseur  $e$ . L'aquifère est infini, confiné, homogène et unidimensionnel. Le modèle est dit « unidimensionnel » puisque la charge hydraulique ne varie dans l'espace que selon la coordonnée  $y$ , mais en réalité notre étude se situe dans un espace à deux dimensions en comptant la coordonnée temporelle.

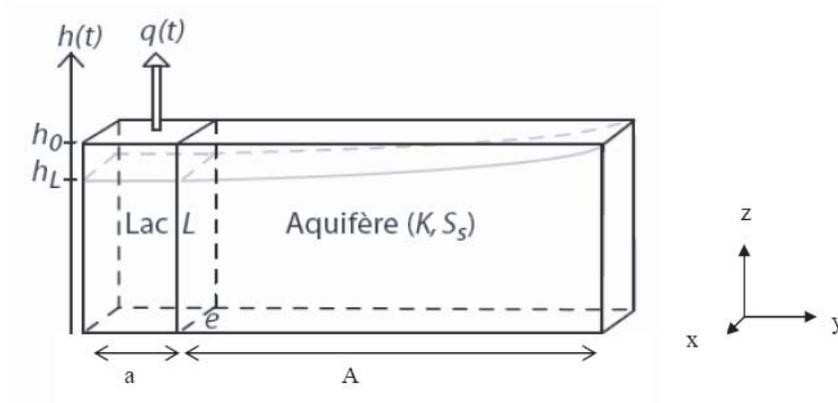


FIG. 2.1 – Schéma du modèle unidimensionnel envisagé

En vue d'utiliser d'HydroSphere, on définit :

1. Le maillage :

selon x : 1 maille de 100 m  
selon y : 15 mailles de 100 m  
selon z : 1 maille de 100 m  
c'est-à-dire, en mètres :  $e = 100$  ;  $a = 500$  ;  $A = 1000$  ;  $L = 100$ .

2. Les propriétés du milieu : le lac est modélisé par un aquifère de très grande perméabilité devant celle de l'aquifère adjacent. Dans ce cas l'emmagasinement spécifique  $S_S$  est fixé par la géométrie. En effet,  $S_S$  est défini comme :

$$S_S = \frac{S}{L} \quad (2.1)$$

Où  $L$  est l'épaisseur de l'aquifère et  $S$  est l'emmagasinement, c'est-à-dire le rapport du volume d'eau  $\Delta V$  libéré ou emmagasiné par unité de surface d'un aquifère à la variation de charge hydraulique  $\Delta h$  correspondante [17]. Si  $\Sigma$  est la surface de l'aquifère :

$$S = \frac{\Delta V}{\Delta h \cdot \Sigma} \quad (2.2)$$

Pour un lac,  $\Delta h$  est simplement égal à la variation de la hauteur d'eau. De plus,  $\Sigma$  est constante sur toute la hauteur dans le cas choisi, donc :

$$S = 1 \quad (2.3)$$

Il vient :

$$S_S = \frac{1}{L} = 0.01m^{-1} \quad (2.4)$$

3. Les conditions limites : en  $y = 1500$  m, la charge est imposée à 50 m.
4. Les conditions initiales : la charge initiale est 50 m pour tous les noeuds.

Afin de simuler l'évaporation, on place dans le lac un puits de pompage qui impose un flux sortant  $q(t)$ . La figure 2.2 représente la répartition stationnaire des charges à la suite d'une simulation en régime permanent (c'est-à-dire à  $q$  constant). En utilisant le mode transitoire de HydroSphere on montre que le système se stabilise après 10 000 jours. Le régime stationnaire est définitivement atteint en 100 000 jours.

## 2.2 Simulation en régime transitoire

Le débit sortant  $q(t)$  [ $m^3/j$ ] est défini comme une fonction sinusoïdale de période 365 jours, atteignant son maximum en milieu d'année, afin de représenter l'évaporation au dessus du lac.

$$q(t) = A \sin\left(\frac{2\pi}{365}t - \frac{\pi}{2}\right) + b \quad (2.5)$$

où  $t$  varie de 0 à 3650 jours, ce qui revient à faire une simulation sur 10 ans.  $b$  et  $A$  sont des constantes déterminées grossièrement de façon à respecter le changement d'échelle :

- le volume de la mer d'Aral était de l'ordre de 1000  $km^3$  en 1960 et de 300  $km^3$  en 1990, la baisse de volume est donc de 700  $km^3 \div 30$  ans  $\simeq$  0.06  $km^3/j$ , ce qui signifie que la mer d'Aral a perdu approximativement 0.01% de son volume par jour.

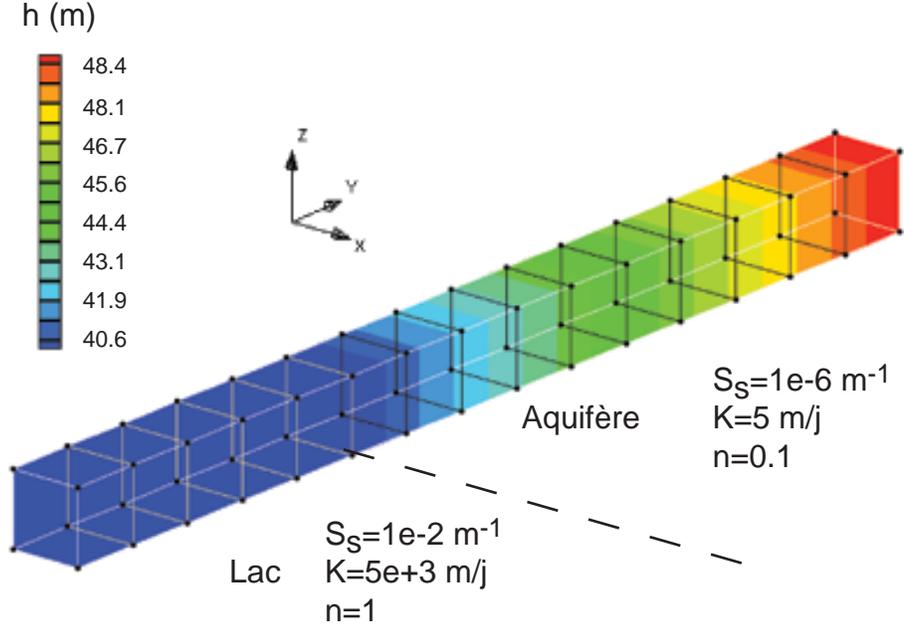


FIG. 2.2 – Répartition des charges après une simulation en régime permanent.  $q=500\text{m}^3/\text{j}$  : débit sortant du lac,  $S_S$  : emmagasinement spécifique,  $K$  : conductivité hydraulique isotrope,  $n$  : porosité,  $h$  : charge hydraulique

- le volume du lac modèle est  $100 \times 100 \times 500 = 0.005 \text{ km}^3$ , donc le débit moyen doit être de  $0.01\% \times 0.005 \text{ km}^3 = -500 \text{ m}^3/\text{j}$ . Ainsi, on doit avoir  $b = 500 \text{ m}^3/\text{j}$
- les pertes maximales de volume sont de l'ordre de  $0.1 \text{ km}^3/\text{jour}$  en été [10], c'est-à-dire pratiquement le double de la variation moyenne. Par conséquent on doit avoir l'amplitude  $A = 500 \text{ m}^3/\text{j}$  pour respecter notre changement d'échelle.

On obtient finalement :

$$q(t) = 500 \sin\left(\frac{2\pi}{365}t - \frac{\pi}{2}\right) + 500 \quad (2.6)$$

La figure 2.3 montre les résultats obtenus à la suite d'une simulation réalisée sous HydroSphere. La charge est enregistrée dans la partie « lac » du maillage par un puits d'observation au pas de temps journalier. On constate que le niveau du lac baisse de plus de 6 m en 10 ans (pour la Grande Aral le rythme est proche de 50 cm/an). À l'échelle annuelle, le niveau oscille bien en réponse aux oscillations du débit, mais ces oscillations sont déphasées. La hauteur d'eau est annuellement maximale à la mi-mars alors que le débit augmente depuis le mois de janvier. Les oscillations du niveau sont en avance de quatre mois sur celles du débit pendant toute la période de simulation. C'est l'aquifère qui est responsable de ce décalage. Dans le cas sans aquifère le niveau est maximum lorsque le débit est minimum (figure 2.4), autrement dit débit et hauteur d'eau sont en opposition de phase. Dans ce cas il n'y a pas de condition limite de premier type, ce qui

explique pourquoi l'amplitude des oscillations est plus forte. De plus la figure 2.4 montre que l'aquifère induit un déphasage d'autant plus important qu'il est petit, ce qui implique que la condition limite de charge imposée est plus proche du lac.

## 2.3 Discussion

Les résultats obtenus sont encourageants : ils confirment le fait qu'un aquifère confiné connecté à un lac peut induire un décalage temporel entre les flux qui sont imposés au plan d'eau et sa réponse en terme de hauteur d'eau. Le déphasage par rapport à la solution sans aquifère est d'autant plus important que la condition limite de premier type est proche du lac.

Dans le cas de la mer d'Aral, il a été vu au paragraphe 1.1.3 qu'un écoulement souterrain régional existait dans les aquifères confinés du Crétacé. De plus, on a remarqué à la lumière de la carte géologique (figure ??) que des failles majeures recoupent ces réservoirs au niveau du bassin Ouest. Il est possible que ces structures tectoniques facilitent l'interaction entre l'eau du lac et l'eau souterraine. Par ailleurs, les formations crétacées affleurent sur l'île de Vozrozhdeniya.

L'approche unidimensionnelle souffre cependant d'une différence conceptuelle majeure avec le cas réel : dans le cas de la mer d'Aral, les pertes annuelles par évaporation diminuent à mesure que la surface du lac diminue. Ceci est particulièrement vrai pour la Grande Aral dont la bathymétrie du bassin oriental est marqué par une faible pente. Dans notre modèle, la surface du lac ne varie pas lorsque son niveau change. C'est pourquoi il n'y pas lieu de faire baisser le débit volumique annuel au cours du temps.

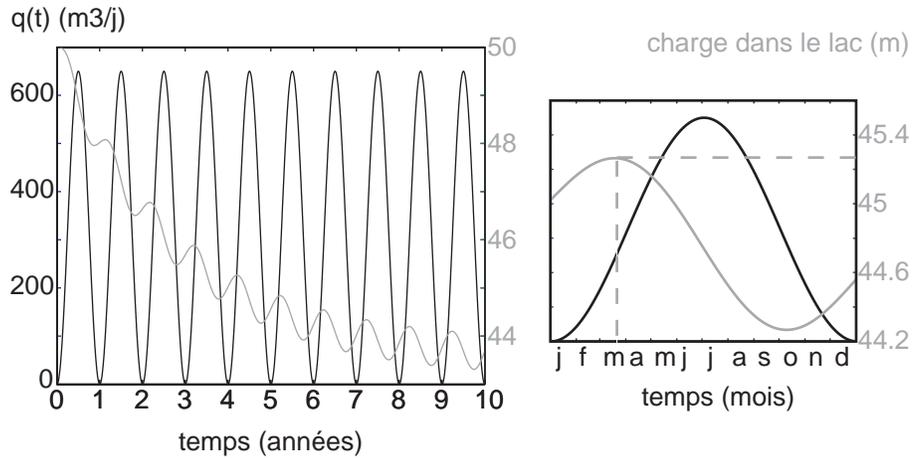


FIG. 2.3 – Mise en évidence du déphasage entre débit sortant (en noir) et niveau du lac modèle (en gris) : à gauche, débit et niveau du lac sur les dix années de simulation ; à droite, détail sur la quatrième année de simulation. On constate que le niveau atteint un maximum relatif en mars.

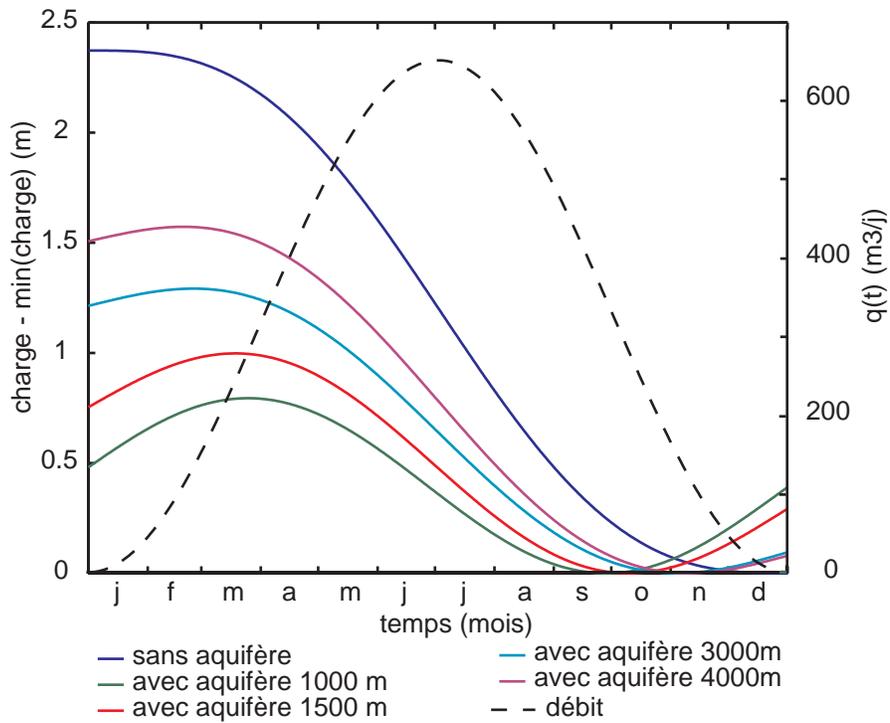


FIG. 2.4 – Influence de la taille de l’aquifère sur le déphasage. La simulation a été répétée en faisant varier le paramètre  $A$ . On a ensuite représenté les valeurs de la charge dans le lac durant la quatrième année auxquelles on a soustrait le minimum annuel.

## Chapitre 3

# Approche tridimensionnelle et simulation couplée

### 3.1 Présentation d’HydroSphere

HydroSphere a été construit à partir de FRAC3DVS, un modèle numérique destiné à traiter les écoulements en milieu fracturé. Ce premier outil est devenu un logiciel qui décrit en trois dimensions les écoulements de surface et souterrains, ainsi que le transport de solutés [18]. HydroSphere utilise le principe des éléments finis. Les extensions actuellement en développement concernent les fluides à densités variables, le transport de chaleur et de solutions avec réactions chimiques. Pour notre travail, l’intérêt du logiciel réside dans cette capacité unique à résoudre simultanément les équations des écoulements de surface avec celles des écoulements souterrains. Par exemple, une entrée d’eau sous forme de pluie peut ruisseler, rejoindre le réseau hydrographique, s’infiltrer, recharger les nappes et participer à l’écoulement souterrain, selon une méthode entièrement à base physique.

Pour réaliser le couplage nous avons utilisé le mode « `dual nodes for surface flow` ». Cette méthode utilise un terme d’échange  $\Gamma_o$  [ $T^{-1}$ ] entre les nœuds du milieu poreux (3-D) et les nœuds de la surface (2-D) qui est calculé à partir d’une relation de type Darcy [18].

$$d_o \Gamma_o = k_{ro} K_{so} (h - h_o) \quad (3.1)$$

Où  $h_o$  est la charge de l’eau de surface,  $h$  la charge de l’eau de subsurface et  $d_o$  la hauteur d’eau en surface. La connexion entre les deux domaines est déterminée par  $K_{so}$ , le facteur de fuite [ $T^{-1}$ ] à travers la surface, défini comme l’épaisseur du sol divisée par sa conductivité. Ce facteur est pondéré par le terme  $k_{ro}$  [-] en anglais *rill storage effect*, qui intègre la capacité de stockage en surface et varie avec la microtopographie. Ce terme est nul pour un sol sec.

### 3.2 Préparation des fichiers d’entrées

La figure A.1 et le texte en annexe A décrit les principales étapes par lesquelles il a fallu passer pour générer le maillage à trois dimensions.

mois	pluie [mm]	évaporation [mm]
janvier	14	5.7
février	15	25.1
mars	17	72.3
avril	13	158.0
mai	9	181.7
juin	8	206.7
juillet	8	201.9
août	8	174.1
septembre	6	102.6
octobre	17	34.2
novembre	16	-0.3
décembre	16	10.8

TAB. 3.1 – Conditions limites de second type : précipitations mensuelles imposées sur le domaine (données issues des réanalyses de l’ECMWF) et flux sortant de vapeur d’eau en 2000 (d’après [2]).

**Les contours du domaine** sont choisis de façon à pouvoir intégrer les **conditions limites** connues. En bordure Est, la charge hydraulique est fixée à 130 m d’après Reinhardt [9]. Pour les bordures Nord et Sud on fait l’hypothèse que le flux souterrain est nul (condition de type Neumann), puisque l’écoulement régional se fait dans la direction Est-Ouest. On fixe également une condition de flux nul pour la bordure Ouest, car cette ligne marque la divergence des écoulements souterrains entre la mer Caspienne et la mer d’Aral [6]. Les autres conditions limites envisagées sont des flux imposés : précipitations efficaces sur l’ensemble du domaine (tableau 3.1), et évaporation au-dessus du lac. Pour simuler l’évaporation on utilise un flux sortant imposé sur les éléments de la surface seulement à régime oscillant (tableau 3.1).

**Les propriétés du sous-sol** sont résumées dans le tableau 3.2. On ne tient pas compte de la variabilité latérale : les propriétés hydrogéologiques sont définis par couche.

**Les propriétés de la surface** sont écrites dans le tableau 3.3.

**Les conditions initiales.** Pour obtenir les meilleures conditions initiales possibles en vue d’une simulation couplée surface-souterrain, le principe employé est le suivant : on simule d’abord uniquement l’écoulement de surface. Puis les charges résultantes en surface sont utilisées comme conditions initiales pour une simulation à l’état stationnaire en mode souterrain seulement. Les charges ainsi calculées sont définies comme conditions initiales de la simulation couplée.

## 3.3 Résultats des simulations

### 3.3.1 Simulation des écoulements de surface

Ici on impose une surface imperméable (facteur de fuite nul) et tous les nœuds du milieu poreux ont une charge imposée égale à l’altitude. Le seul flux

Matériel	$T$ [m <sup>2</sup> /j]	porosité [-]	$K$ [m/s]	$S_S$ [m <sup>-1</sup> ]
aqf 1		0.3	<i>3.5E-05</i>	1.0E-3
aqf 2	<i>50 - 8000</i>	0.3	1.0E+05	1.0E-6
aqf 3	<i>100 - 500</i>	0.3	1.0E+05	1.0E-6

TAB. 3.2 – Propriétés des couches souterraines du modèle.  $T$  : transmissivité,  $K$  : Perméabilité isotrope,  $S_S$  : emmagasinement spécifique. Seuls les chiffres en italique sont issus de la littérature, les autres ayant été estimés à partir de la description des matériaux (voir paragraphe 1.1.3).

Paramètre	valeur
X friction [-]	0.5
Y friction [-]	0.5
Bottom leakage [s <sup>-1</sup> ]	?
Rill storage height [m]	0.1

TAB. 3.3 – Paramètres utilisés pour la modélisation des écoulements de surface

entrant est la pluie (tableau 3.1). Le calcul est lancé en régime transitoire. Après dix années de simulation, on voit apparaître la mer d’Aral à un niveau proche de son état en 1989, juste avant que l’île Vozrozhdeniya ne soit reliée au continent. Cette étape n’a pas vocation à modéliser la réalité puisque l’évaporation n’est pas incluse, ni l’interaction avec les nappes. Tout se passe comme si la totalité des précipitations ruisselait dans les creux topographiques sans fuir dans le sous-sol. Nous choisissons cet état comme la condition initiale de la simulation couplée.

### 3.3.2 Simulation des écoulements souterrains

Pour cette simulation on a fixé le niveau piézométrique des nœuds situés à l’emplacement du lac à 30 m, ce qui correspond approximativement à son niveau en 2000. Le flux sortant d’eau de surface par évaporation n’est pas utilisé. La simulation de l’état stationnaire a donné une répartition des charges cohérente avec la piézométrie régionale telle qu’elle est présentée par l’institut kazakh d’hydrogéologie et d’hydrophysique du ministère de l’éducation et des sciences (figure 3.3 [19]). Le gradient hydraulique est décroissant vers la mer d’Aral. Les écoulements convergent vers la mer d’Aral. Le flux total annuel à travers les éléments correspondant au lac (dont la charge est imposée), nécessaire à maintenir cet équilibre est estimé par HydroSphere à 4 km<sup>3</sup>. Ce chiffre est située dans la gamme des valeurs publiées (voir le tableau 1.2). Il serait toutefois hâtif de considérer ce résultat - certes encourageant - comme la preuve que le modèle est bien calibré. En effet il est délicat de s’assurer que les charges sont correctement distribuées puisque la seule carte dont nous disposons pour comparer date de 1960.

### 3.3.3 Simulation couplée

Cette étape a demandé un effort particulier dans la gestion des paramètres numériques. En effet, il nous est apparu extrêmement difficile de réussir à faire

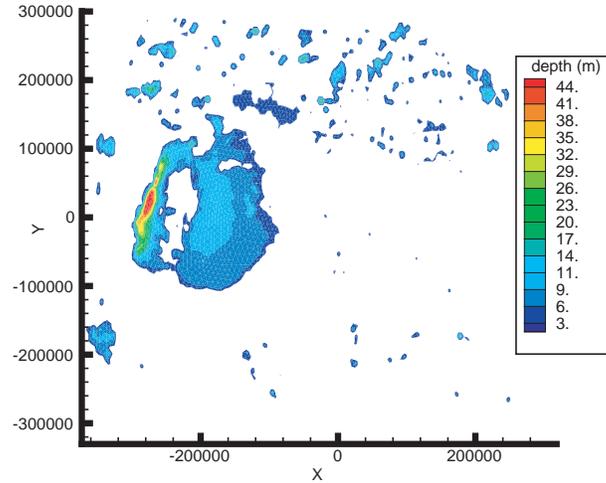


FIG. 3.1 – Résultat de la simulation des écoulements de surface seulement après 10 ans de précipitations sur une surface imperméable

converger les calculs en mode *dual nodes for surface flow* sans un contrôle rigoureux des critères de convergence pour les itérations Newton et du pas de temps. Il est nécessaire d'utiliser un contrôle du pas de temps assez souple pour qu'il soit automatiquement ajusté de sorte que le changement de charge ne dépasse pas 1 m et la hauteur d'eau en surface 50 cm à chaque itérations. De plus le facteur résiduel ne doit pas être trop petit pour que les calculs puissent aboutir (il a été fixé à 3), même si cela se fait au dépend de la qualité du bilan de masse. Le pas de temps initial aussi doit être soigneusement choisi pour chaque simulation, faute de quoi il se peut que la simulation échoue.

Pour notre maillage tel qu'il a été conçu il s'est avéré par ailleurs que le temps de calcul était un obstacle majeur à la progression. Il a donc été nécessaire de réduire radicalement le nombre d'éléments. Pour cela toutes les couches ont été supprimées à l'exception de la couche superficielle (aquifère 1), ce qui donne une seule couche constituées 17330 nœuds assemblés en prismes.

Nous avons cherché à obtenir des paramètre adaptés dans l'objectif de faire tourner une simulation transitoire pendant un an. Un première simulation a permis de tester ces paramètres : initialement, la charge des nœuds de la surface est 30 m uniquement au dessus de la Grande et de la Petite Aral, ce qui revient à les remplir d'eau jusqu'à un niveau fictif proche de l'actuel. Pour le reste des nœuds de la surface, les conditions initiales sont une hauteur d'eau égale au « *rill storage height* ». La charge initiale des nœuds du milieu poreux est égale à l'élévation. Aucune condition limite n'est spécifiée à l'exception de celle par défaut (impermeabilité des faces du domaines). Au bout d'un an de simulation en régime transitoire on observe que les lacs sont toujours présents, la surface total ayant très légèrement réduit (moins de 1%). La saturation de la surface a évolué vers un état satisfaisant (figure 3.4) : on voit que les zones correspondant aux deltas de l'Amou-Daria et du Syr-Daria sont proche de la saturation, conformément à la réalité. En fait, le modèle respecte globalement le gradient d'aridité vers l'Est et les montagnes Pamir.

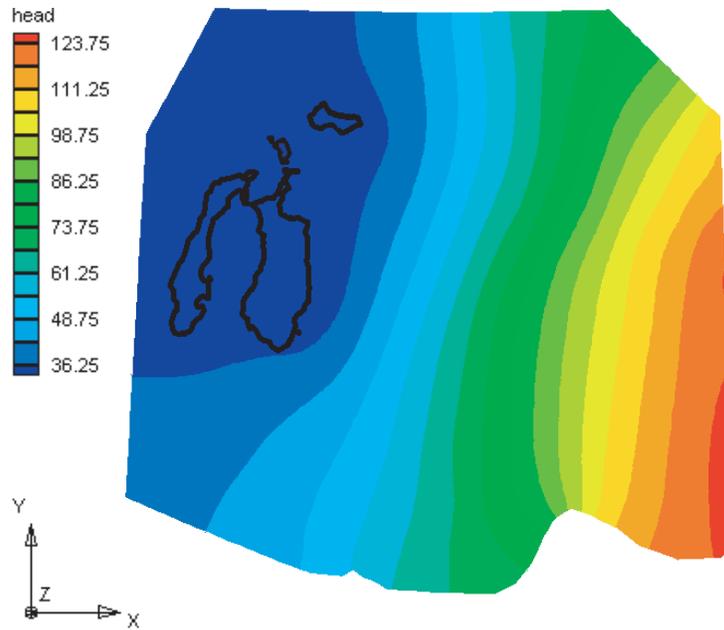


FIG. 3.2 – Résultat de la simulation des écoulements souterrains seulement

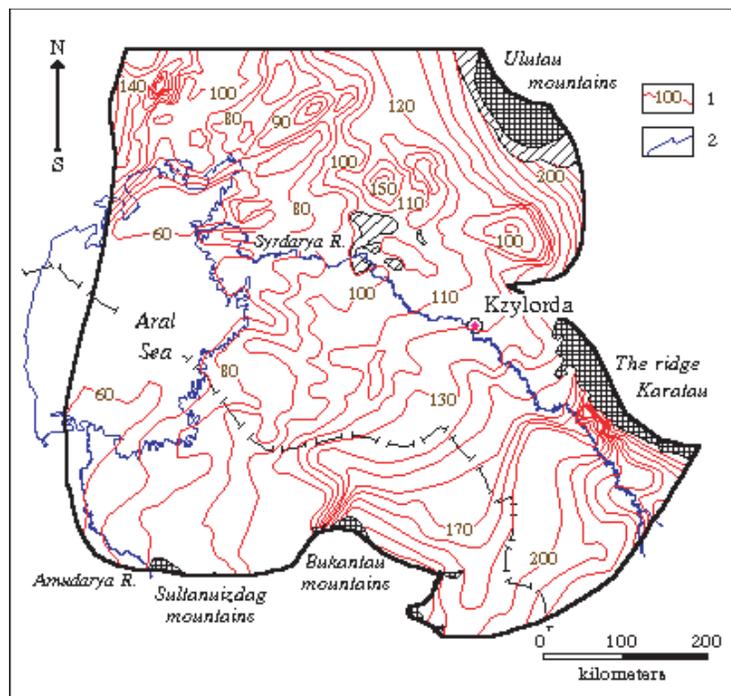


FIG. 3.3 – Contours piézométriques du Priaralye mesurés dans l'aquifère 2 entre 1960 et 1965 (disponible sur [http://www.aralmodel.unesco.kz/main\\_e.htm](http://www.aralmodel.unesco.kz/main_e.htm))  
1 : contours piézométriques, 2 : contours de la mer d'Aral en 1961.

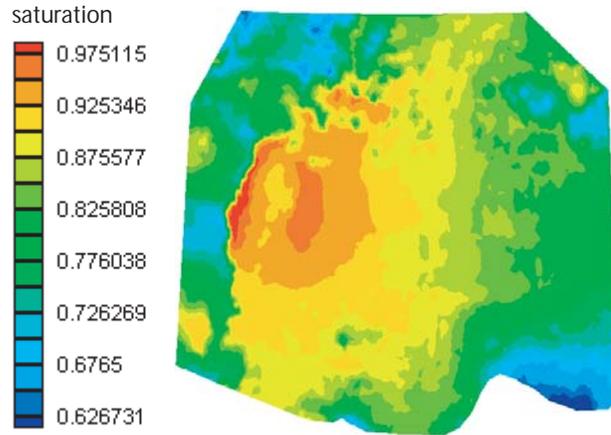


FIG. 3.4 – État de saturation des éléments de surface après un an en l'absence de tout flux

La figure 3.5 montre le résultat d'une simulation ayant pour objectif de tester l'évaporation dans les mêmes conditions restreintes, à part que l'ensemble des nœuds de la surface sont soumis à un flux égal à l'évaporation (tableau ??). D'après le bilan de masse final, il apparaît que la disparition de la mer est ralentie par la connexion avec l'aquifère. La répartition résultante des charges dans le milieu poreux est pratiquement uniforme autour de 0 m. Nous ne sommes pas parvenu à obtenir des résultats cohérents à la fois pour la surface et pour le souterrain. Il semble que cela soit dû à l'écart important entre l'échelle de temps des processus superficiels (quelques jours) par rapport au temps de mise à l'équilibre du régime phréatique.

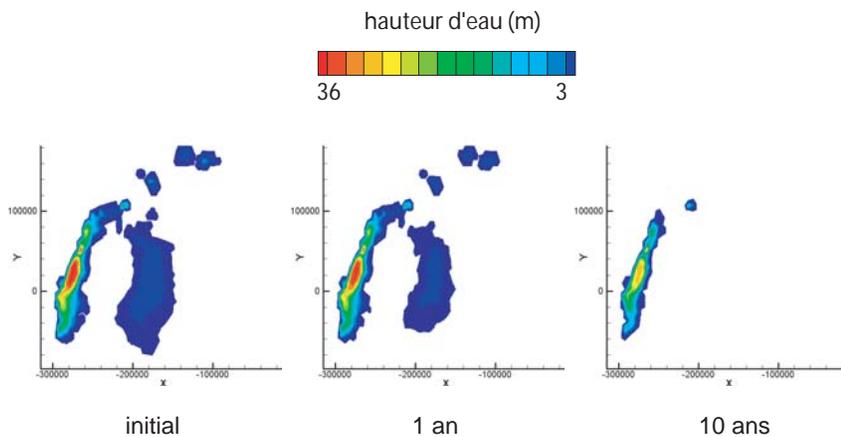


FIG. 3.5 – Résultat en surface d'une simulation couplée sur 10 ans.

### 3.4 Limites et discussion

Il est vrai que l'absence de données précises concernant les propriétés des aquifères constitue une faiblesse du modèle. Toutefois ce modèle n'a pas vocation à décrire précisément la réalité hydrogéologique autour de la mer d'Aral, mais plutôt de tester l'hypothèse formulée à la fin du chapitre 1.3.4. Les difficultés rencontrées ne nous ont pas permis de valider cette idée. Le problème est lié à la robustesse du modèle en régime transitoire. Il faudrait pouvoir calibrer un flux entrant dans l'aquifère à travers la face Est du domaine de sorte que le régime souterrain ne soit pas excessivement perturbé par le flux sortant au niveau du lac. Dans une seconde étape on pourra vérifier que la baisse du niveau de l'Aral entraîne effectivement une baisse du niveau piézométrique autour de la mer d'Aral. Ce phénomène a été constaté récemment [16] et pose des questions importantes concernant la durabilité des ressources. Par ailleurs, une fonction évaporation pourrait être implantée dans HydroSphere. Cette fonction s'appliquerait sur les éléments donnés d'une surface, choisis par l'utilisateur. Pour l'instant la fonction qui nous a permis de simuler l'évaporation « *specified flux* » s'applique forcément sur la totalité des nœuds de la surface choisie. Cela pose problème dans le cas où un lac est soumis à une évaporation différente de celle appliquée sur le reste de la surface. Nous avons essayé d'utiliser un puits de pompage installé dans le lac, mais cette fonction a pour effet primaire de faire baisser la charge dans l'aquifère et non à la surface.

# Conclusion

Le rôle de l'eau souterraine dans le comportement de la Grande Aral a pu être éclairci : il est probable que les apports aquifères influencent les variations du niveau. Cependant les *voies* de ce transfert doivent encore être étudiées, puisque nous avons vu que le flux d'eau souterraine peut provenir de l'aquifère superficiel ou de l'aquifère régional confiné. L'étude des bilans d'eau utilisée pour l'irrigation dans le delta Le modèle simple à une dimension prouve que la connexion entre un lac soumis à évaporation et un aquifère entraîne un décalage des variations du niveau par rapport aux variations sans aquifère. Le modèle à trois dimensions n'a pas apporté de réponses supplémentaires pour l'instant, essentiellement pour des raisons d'ordre numérique. Il pourra facilement être amélioré à l'aide de données supplémentaires concernant la surface du domaine et les propriétés hydrauliques des aquifères. Enfin, des réponses claires proviendraient certainement d'une étude de terrain.

J'en viens à une conclusion plus personnelle. Au cours du stage j'ai pu sentir que la modélisation numérique comme outil unique de recherche est vouée à l'échec. Des réponses pertinentes peuvent être obtenues par des raisonnements scientifiques simples basés sur des faits, comme on a pu le constater en analysant les méthodes d'irrigation. La puissance de calcul d'un ordinateur - aussi séduisante soit elle - ne doit pas occulter la réflexion sur le modèle et ses limites. Le piège dans lequel je suis sans doute tombé est d'avoir consacré trop d'efforts à surmonter des obstacles purement techniques avant même de savoir dans quel but. Au delà de l'amertume, force est de constater que cette expérience fut enrichissante à de nombreux égards. Je reviendrai à... Québec.

# Bibliographie

- [1] P. P. Micklin. Desiccation of the Aral Sea : a water management disaster in the Soviet Union. *Science*, 241 :1170–1176, 2005.
- [2] S. Gascoin. Modélisation du bilan hydrologique de la partie sud de la mer d’Aral entre 1993 et 2001. Master’s thesis, École Normale Supérieure de Lyon, 2004.
- [3] R. Therrien and E. A. Sudicky. Three-dimensional analysis of variably-saturated flow and solute transport in discretely-fractured porous media. *Journal of Contaminant Hydrology*, 23(1-2) :1–44, 1996.
- [4] F. Benduhn. Simulation des bilans d’eau et de sels de la mer d’Aral. Master’s thesis, Centre d’Hydrogéologie de Neuchâtel, 2002.
- [5] <http://enrin.grida.no/arak/aralsea>.
- [6] R. Létolle and M. Mainguet. *Der Aralsee, eine ökologische Katastrophe*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1996.
- [7] I. Boomer. The palaeolimnology of the Aral Sea : a review. *Quaternary Science Reviews*, 19 :1259–1278, 2000.
- [8] N. S. Semina. The dynamics of regional groundwater runoff in the Aral Sea basin studied with the use of space imagery. *Sovietic Journal of Remote Sensing*, 6 :908–916, 1981.
- [9] S. Reinhardt. Numerische Modellierung von stehenden Wasserkörpern — Fallbeispiel Aralsee. Master’s thesis, Centre d’Hydrogéologie de Neuchâtel, 2003.
- [10] F. Benduhn and P. Renard. A dynamic model of the aral sea water and salt balance. *Journal of Marine Systems*, 47(1-4) :35–50, 2004.
- [11] I.R. Calder and C. Neal. Evaporation from saline lakes : a combination equation approach. *Hydrological Sciences Journal - Journal des Sciences Hydrologiques*, 29 :89–97, 1984.
- [12] J. Friedrich and H. Oberhänsli. Hydrochemical properties of the Aral Sea water in summer 2002. *Journal of Marine Systems*, 47(1-4), 2004.
- [13] N. Bindoff. Seawater library version 2.0.1. CSIRO, 1993.
- [14] Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/documents/>, 1997.
- [15] I. M. Chernenko. The water-salt balance and the utilization of the drying Aral Sea. *Problemy Osvoeniya Pustyn*, 3 :18–25, 1983.
- [16] J. Jarsjö and G. Destouni. Groundwater discharge into the aral sea after 1960. *Journal of Marine Systems*, 47(1-4) :109–120, 2004.

- [17] UNESCO-OMM. Glossaire international d'hydrologie, 1992.
- [18] R. Therrien, R.G. McLaren, E.A. Sudicky, and S.M. Panday. *HydroSphere - A Three-dimensional Numerical Model Describing Fully-integrated Sub-surface and Surface Flow and Solute Transport*. Groundwater Simulations Group, draft edition, march 2005.
- [19] Institute of Hydrogeology, Hydrophysics of the Ministry of Education, and Science of Kazakhstan. [http://www.aralmodel.unesco.kz/main\\_e.htm](http://www.aralmodel.unesco.kz/main_e.htm).

# Annexe A

## Création du maillage

Comment utiliser des informations issues d'un SIG (Système d'Information Géographique) pour fabriquer un modèle numérique lisible par HydroSphere ?

Le maillage peut être créé de plusieurs façons :

**Avec le pré-processeur grok** directement avec la commande `generate rectangles interactive`. Cela produit un maillage rectangulaire, en latitude/longitude. Mais les éléments rectangulaires sont moins performants que les triangles qui déforment moins la réalité.

**Avec GMS**, cela permet de géoréférencer directement un domaine importé (par ex. une image *bitmap*) qui sera discrétisée en éléments triangulaires.

**Avec Gridbuilder** les étapes sont :

1. digitaliser le domaine à l'aide d'un logiciel de dessin (Adobe Illustrator, Corel Draw, Autocad)
2. exporter le trait sélectionné en *drawing exchange format (\*.dxf)*
3. utiliser l'exécutable `dxf2gb.exe` qui crée un fichier *overlay (\*.ovr)*
4. changer l'extension *.ovr* en *.dig*
5. Importer la couche *\*.dig* en mode `irregular` dans Gridbuilder, ce qui permet de raffiner des limites. On peut aussi raffiner aussi d'autres contours que ceux qui délimitent le domaine, comme les rivières.

Une fois le maillage créé :

1. utiliser la commandes `read gb 2d grid` ou `read gms 2d grid` pour lire la grille si elle n'est pas créée directement par grok
2. projeter la grille selon la méthode d'Albers<sup>1</sup>. Dans le cas de la mer d'Aral les commandes appropriées sont :

---

<sup>1</sup>projection équivalente conique d'Albers (à deux parallèles fondamentaux). C'est une forme simple de la projection conique, vulgarisée par Ptolémée, astronome et géographe d'Alexandrie (90 -168 après J.-C.). La carte est obtenue en projetant la planète sur un cône. Les méridiens sont des droites concourantes, les parallèles sont des arcs de cercle concentriques et équidistants. La projection est équidistante. Le pôle est représenté sous la forme d'un petit arc de cercle, car il n'est pas le centre de la projection. On peut l'améliorer en encadrant la région à cartographier par deux parallèles de contact appelés fondamentaux ou standards. Ce type de projection est très utilisé parce qu'il déforme très peu les détails situés près du centre de la carte et parce qu'il conserve les aires.

```
project 2d grid
albers equal-area
62 45! projection origin
43 47! standard parallels
1! 1=sphere, 2=ellipsoid
```

3. il reste à affilier à chaque nœud les altitudes contenues dans le fichier *raster* (\*.asc) contenant les informations sous forme ascii).

Le fichier raster global de la topographie a été créé à partir de deux fichiers ESRI *shapefiles* [9] contenant sous formes de polygones la bathymétrie de la mer, et la topographie de la région. La bathymétrie provient de la numérisation de la carte bathymétrique au 1/500.000 de la mer d'Aral, établie par l'institut soviétique des problèmes d'eau (1986), digitalisée et interpolée sur une grille régulière. Avec le logiciel ArcGIS il a été possible de fusionner ces deux cartes afin d'avoir un unique fichier décrivant les élévations du domaine. Après simulation des écoulements de surface il s'est avéré que les données topographiques étaient de mauvaise qualité : de nombreux artifacts de dépressions donnaient naissance à des accumulations d'eau irréalistes. Le fichier de la topographie a donc été remplacé par des données à haute-résolution de l'*United States Geological Survey* (USGS) issues de la mission *Shuttle Radar Topography* (SRTM) disponibles sur <http://srtm.usgs.gov/> au format 1 seconde d'arc (30 m). Il a fallu encore une fois surimprimer la bathymétrie de la mer.

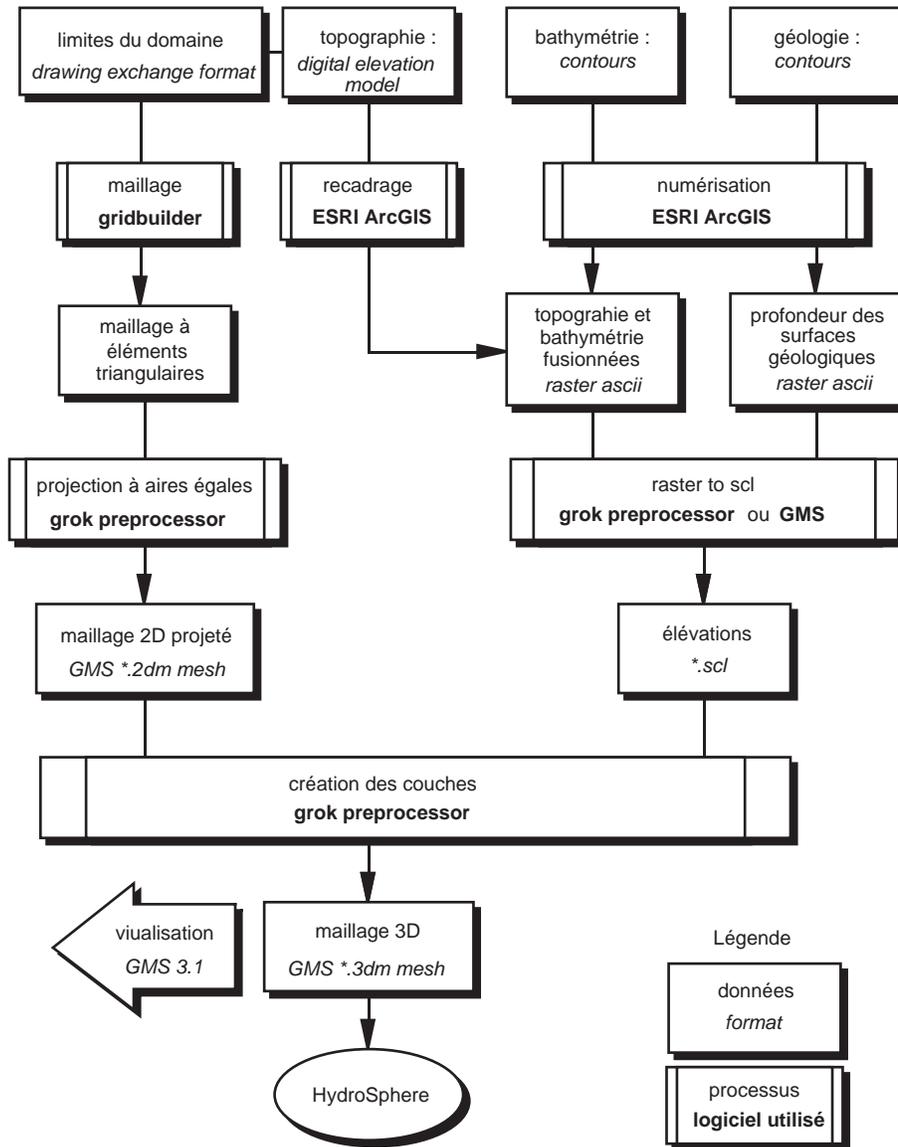


FIG. A.1 – Étapes principales pour créer le maillage lu par HydroSphere. GMS : Groundwater Modeling Software

# Annexe B

## Fichiers d'entrées

### Fichier grok

```
!=====Grok Input File=====

Aral sea problem
END TITLE

!=====Grid parameter information=====

!lecture du 2D mesh de GMS
READ GMS 2D GRID
./maps/framed.2dm

!projection du maillage
PROJECT 2D GRID
  albers equal-area
  62 45          ! projection origin
  43 47          ! standard parallels
  1              ! 1=sphere, 2=ellipsoid

SKIP ON
!creation des couches
GENERATE LAYERS FROM GMS 2D GRID
.true.          ! zone by layer
.false.         ! constant base
./maps/aqt3_int_c.scl
5               ! number of material

aqf3            ! layer name
!5             ! nsublayers
1
.false.        ! constant top
./maps/aqf3_int_c.scl

aqt2            ! layer name
!3
1              ! nsublayers
.false.        ! constant top
```

```

./maps/aqt2_int_c.scl

aqf2          ! layer name
!10           ! nsublayers
1
.false.      ! constant top
./maps/aqf2_int_c.scl

aqt1          ! layer name
!7           ! nsublayers
1
.false.      ! constant top
./maps/aqt1_int_c.scl

aqf1          ! layer name
!4           ! nsublayers
1
.false.      ! constant top
./maps/TOBACLIP.scl

END GRID GENERATION
SKIP OFF

GENERATE LAYERS FROM GMS 2D GRID
.true.        ! zone by layer
.true.        ! constant base
-500
1             ! number of material
aqf1         ! layer name
1           ! nsublayers
.false.     ! constant top
./maps/TOBACLIP.scl
END GRID GENERATION

!MESH TO GMS
!aral_of.3dm

!MESH TO TECPLOT
!aral.dat

!=====general simulation parameters=====

UNITS: KILOGRAM-METRE-SECOND
!UNSATURATED
TRANSIENT FLOW
DUAL NODES FOR SURFACE FLOW
!IMPERMEABLE MATRIX
!REMOVE NEGATIVE COEFFICIENTS

!=====porous media properties=====

USE ZONE TYPE
POROUS MEDIA

```

PROPERTIES FILE  
aral.mprops

SKIP ON  
CLEAR CHOSEN ZONES  
CHOOSE ZONE NUMBER  
1  
READ PROPERTIES  
aqf3

CLEAR CHOSEN ZONES  
CHOOSE ZONE NUMBER  
2  
READ PROPERTIES  
aqt2

CLEAR CHOSEN ZONES  
CHOOSE ZONE NUMBER  
3  
READ PROPERTIES  
aqf2

CLEAR CHOSEN ZONES  
CHOOSE ZONE NUMBER  
4  
READ PROPERTIES  
aqt1

CLEAR CHOSEN ZONES  
CHOOSE ZONE NUMBER  
5  
READ PROPERTIES  
aqf1

SKIP OFF

CLEAR CHOSEN ZONES  
CHOOSE ZONE NUMBER  
1  
READ PROPERTIES  
aqf1

!=====Overland flow properties=====

USE ZONE TYPE  
surface

PROPERTIES FILE  
aral.oprops

CLEAR CHOSEN FACES  
CHOOSE FACES TOP

NEW ZONE

```

1

CLEAR CHOSEN ZONES
CHOOSE ZONE NUMBER
1

READ PROPERTIES
overland flow

skip on

!=====fracture properties=====

USE ZONE TYPE
FRACTURE

PROPERTIES FILE
FAILLE.FPROPS

!=====fracture location=====

CLEAR CHOSEN FACES
CHOOSE FACES 3PT PLANE
-291465.63 -261251.18 -117.72
-291465.63 -261251.18 -32.246
-281418.73 -212142.8 73.793
7e2

NEW ZONE
1
CLEAR CHOSEN ZONES
CHOOSE ZONE NUMBER
1
READ PROPERTIES
faille

FRACTURES TO GMS
faille.2dm
skip off

!=====Initial flow conditions =====

USE ZONE TYPE
POROUS MEDIA

SKIP ON
INITIAL HEAD FROM OUTPUT FILE
INITIALaralo.head.001
skip off

USE ZONE TYPE
SURFACE
INITIAL HEAD FROM OUTPUT FILE
INITIAL30m_aralo.head_overland.001

```

INITIAL HEAD SURFACE ELEVATION

USE ZONE TYPE  
surface

!CHOOSE NODES TOP  
!INITIAL WATER DEPTH  
!!1.0d-1  
!1

!=====Boundary Conditions=====

USE ZONE TYPE  
SURFACE

CLEAR CHOSEN NODES  
CRITICAL DEPTH BOUNDARY ALL AROUND

!READ GMS FLOW BOUNDARY CONDITIONS  
!./gms/aral.3bc

!CLEAR CHOSEN NODES  
!SPECIFIED HEAD FROM SURFACE SOLUTION  
!001

USE ZONE TYPE  
POROUS MEDIA

CLEAR CHOSEN NODES  
CHOOSE NODES ALL

!SPECIFIED HEAD EQUALS ELEVATION

USE ZONE TYPE  
SURFACE

SKIP ON

CLEAR CHOSEN NODES  
include ./data/xyz\_lac.txt

SPECIFIED HEAD  
1  
0.0 30.0

CLEAR CHOSEN NODES  
include ./data/xyz\_lim.txt

SPECIFIED HEAD  
1  
0.0 130.0  
SKIP OFF

```

SKIP ON
!=====Flux=====

SPECIFIED RAINFALL
include ./data/rain.txt

MAKE WELL
!simulate the evaporation

pumping_well
-182253.53 13037.046 26.
-172445.43 47753.109 0.

include ./data/pump.txt

-182253.53 13037.046 26.
0.5
0.5

SKIP OFF

USE ZONE TYPE
SURFACE
CHOOSE FACES TOP

!UNIFORM FLUX
!-3e-9 !0.1m par an d'évaporation

SPECIFIED FLUX
!simulate the evaporation
12
0.000000    2.15E-09
2764800.    1.04E-08
5184000.    2.70E-08
7862400.    6.10E-08
10454400    6.78E-08
13132800    7.97E-08
15724800    7.54E-08
18403200    6.50E-08
21081600    3.96E-08
23673600    1.28E-08
26352000    -1.09E-10
28944000    4.02E-09

!Amu Darya discharge
!CLEAR CHOSEN NODES
!CHOOSE NODE NUMBER
!11881
!SPECIFIED VOLUMETRIC FLOWRATE
!include ./data/amudarya.txt

!=====NEWTON ITERATION PARAMETERS=====

!SKIP ON

```

```

NEWTON ITERATION CONTROL
  10
INITIAL TIMESTEP
864000
!86400
!3750
!HEAD CONTROL
! 1
WATER DEPTH CONTROL
  0.5
MAXIMUM TIMESTEP
  2.0e06
MAXIMUM TIMESTEP MULTIPLIER
  2.0
MINIMUM TIMESTEP MULTIPLIER
  0.5
NEWTON MAXIMUM ITERATIONS
  10
!JACOBIAN EPSILON
! 1.0d-10
NEWTON ABSOLUTE CONVERGENCE CRITERIA
!1.0d-2 1.0d-1
  2.0
NEWTON RESIDUAL CONVERGENCE CRITERIA
  3.0 1.0d-4 1.0d-2
COMPUTE UNDERRELAXATION FACTOR

!SKIP OFF

!=====Simulation time information=====

OUTPUT TIMES
12
!0.1
2764800      !1er février
5184000      !1er mars
7862400      !etc..
10454400
13132800
15724800
18403200      !1er août
21081600
23673600
26352000
28944000
31622400      !1er janvier (1 an)
!63244800      !2 ans
!316224000      !10 ans

!=====Observation parameters=====

ECHO OFF
MAKE OBSERVATION POINT

```

observation\_du\_lac  
-201278.08 -40009.124 18.454

### Fichier oprops

OVERLAND FLOW

X FRICTION

0.5 !If 0.5, Channels not maintained, weeds and brush uncut  
!National Soil Erosion Research Laboratory  
!http://topsoil.nserl.purdue.edu/

Y FRICTION

0.5

BOTTOM LEAKANCE

1e-9

RILL STORAGE HEIGHT

1.0D-1

END MATERIAL

### Fichier mprops

! Material Properties

!-----

aqf3

K ISOTROPIC

1E-5

SPECIFIC STORAGE

1E-6

POROSITY

0.3

END MATERIAL

!-----

aqt2

K ISOTROPIC

1E-9

SPECIFIC STORAGE

3E-7

POROSITY

0.5

END MATERIAL

!-----

aqf2

K ISOTROPIC

1E-5

SPECIFIC STORAGE

1E-6

POROSITY  
0.3  
END MATERIAL

!-----  
aqt1

K ISOTROPIC  
1E-9  
SPECIFIC STORAGE  
3E-7  
POROSITY  
0.5  
END MATERIAL

!-----  
aqf1

K ISOTROPIC  
3.5E-5  
SPECIFIC STORAGE  
1E-3  
POROSITY  
0.3  
END MATERIAL