

MODELISATION SYSTEMIQUE

APPLICATION AUX DYNAMIQUES

HYDROLOGIQUES DU LAC DE GUIERS

TABLE DES MATIERES

I. Introduction.....	5
II. Modélisation systémique.....	6
II.1 Système.....	7
II.2 Modélisation.....	9
II.3 Modélisation systémique.....	9
II.3.1 les relations entre les éléments.....	10
II.3.2 Le principe de totalité.....	10
II.3.3 L'organisation hiérarchique des systèmes.....	11
II.3.4 La complexité des systèmes.....	11
II.3.5 Les régulations des systèmes.....	11
II.4 Approches systémique et analytique.....	12
II.5 Méthodes de modélisation des écosystèmes.....	14
II.5.1 Les méthodes analytiques.....	14
II.5.2 Les méthodes par simulation.....	15
II.6 Simulation de Monte Carlo.....	16
III. Le lac de Guiers.....	18
III.1 Situation géographique.....	19
III.2 Description.....	19
III.3 modèles de la gestion des eaux du lac.....	20
IV. Le modèle hydrologique du Guiers.....	22
IV.1 Objectif.....	23
IV.2 Bilan hydrologique.....	23
IV.3 Volume moyen annuel.....	26
IV.3.1 Les apports.....	26
IV.3.1.1 Le fleuve Sénégal.....	26
IV.3.1.2 Les précipitations.....	26
IV.3.1.3 Les rejets de la CSS.....	27
IV.3.1.4 Les transferts Ferlo Lac.....	27
IV.3.2 Les pertes.....	27
IV.3.2.1 L'évaporation.....	27
IV.3.2.2 L'irrigation.....	27
IV.3.2.3 Les prélèvements de la SDE.....	28
IV.3.2.4 Les transferts Lac Ferlo.....	28
IV.3.3 Surface moyenne.....	29
IV.3.4 Niveau d'élévation du lac.....	29

V. GoldSim.....	30
V.1 Le logiciel GoldSim.....	31
V.2 Concepts de base de GoldSim.....	31
V.3 Les éléments de GoldSim.....	32
V.3.1 Les éléments d'entrées.....	32
V.3.2 Les éléments de fonction.....	33
V.3.3 Les éléments de stock.....	35
V.3.4 Les éléments de retard.....	36
V.3.5 Les éléments d'événement.....	36
V.3.6 Les éléments de liaison.....	37
V.3.7 Les éléments de résultats.....	38
V.3.8 Les conteneurs.....	39
VI. Présentation du modèle.....	40
VI.1 Le Dashboard.....	41
VI.2 Le bilan hydrologique.....	42
VI.3 Les apports.....	43
VI.4 Les pertes.....	43
VI.5 Les des apports du fleuve.....	44
VI.6 Les précipitations.....	44
VI.7 L'irrigation.....	45
VI.8 Les exploitations.....	45
VI.9 Le calcul des résultats.....	46
VII Résultats de simulation.....	47
VII.1. Simulation 1.....	48
VII.2. Simulation 2.....	51
VII.3. Simulation 3.....	52
VIII. Conclusion.....	53
VIII. Bibliographie.....	55

I. INTRODUCTION

Introduction

La région du lac de Guiers est un important foyer économique à vocation agricole et industrielle. Des activités d'intérêt socio-économiques se développent tout autour du lac qui est la principale réserve d'eau douce de surface du Senegal.

Sa situation géographique dans une zone subdésertique en fait un écosystème lacustre fragilisé par : une très forte évaporation, les sollicitations des populations riveraines, mais surtout, les prélèvements des agro-industriels installés dans la zone et l'alimentation en eau douce de la capitale sénégalaise.

Ce travail consiste à faire l'état de la situation hydrologique, notamment de manière systémique pour expliquer les dynamiques de cet écosystème. Il formalise les connaissances actuelles sur le lac sous forme d'un modèle mathématique à compartiments et propose une implémentation avec le logiciel GoldSim.

II. MODELISATION SYSTEMIQUE

II.1. Système

Tout phénomène, structurel ou fonctionnel ayant au moins deux éléments et des interactions entre ses éléments peut être appelé système. La notion de système embrasse une grande variété d'objets : système d'équations, système naturel, système mécanique.

Voici quelques autres définitions d'un système

- ✓ "Un ensemble d'éléments liés par un ensemble de relations". [Lesourne]
- ✓ "Un système est un ensemble d'éléments en interaction dynamique, organisés en fonction d'un but". [Rosnay]
- ✓ "Unité globale organisée d'interrelations entre éléments, actions ou individus" [E. Morin]

Un système est identifié par un certain nombre de repère dont les principaux sont la frontière qui le distingue du milieu environnant, des éléments qu'il contient et des relations qui lient ces éléments entre eux. Lorsque ces éléments sont en relation avec l'extérieur, on parle de système ouvert.

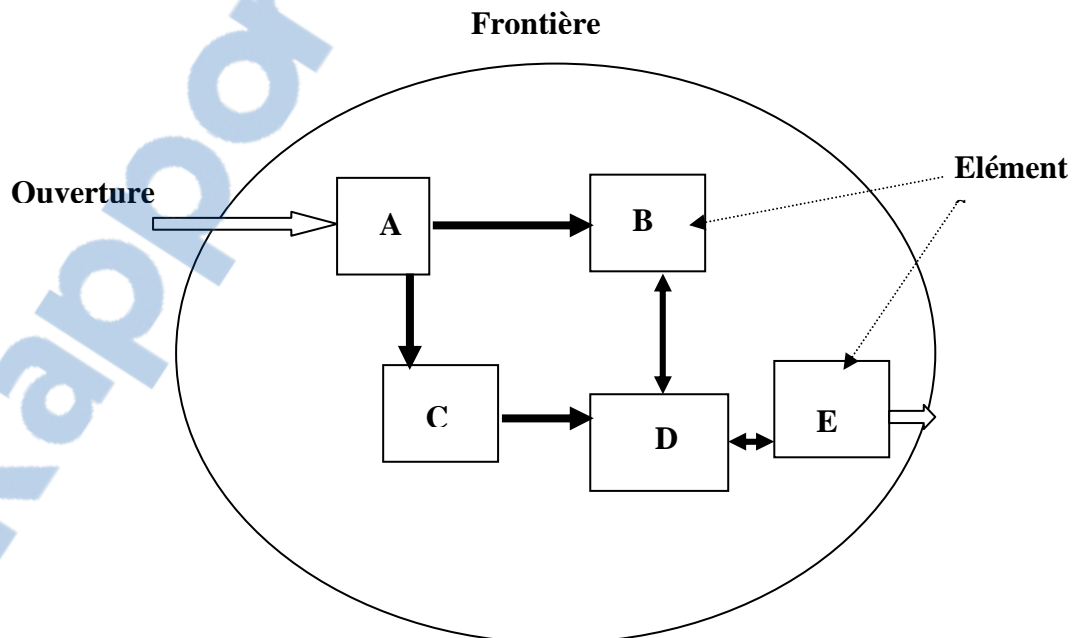


Fig1 : Système ouvert

Un système peut comporter des sous systèmes c'est-à-dire des entités qui, au sein du système naturel, fonctionnent de façon apparemment autonome mais en entretenant des relations avec le reste du système naturel. Ceci conduit naturellement à considérer un système et son environnement.

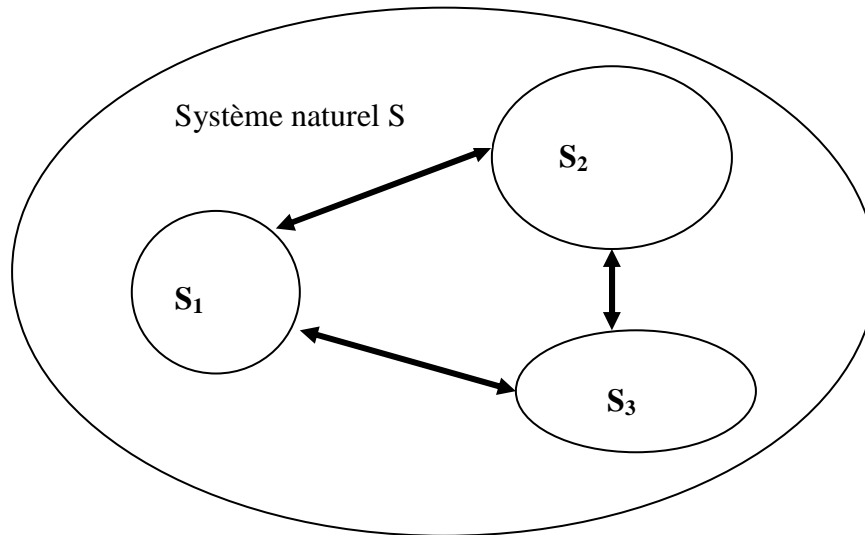


Fig. 2 : Système naturel S et ses sous systèmes S₁, S₂, S₃

La notion de système englobe des propriétés telles que l'émergence, l'interaction, l'interdépendance, la finalité, l'identité et l'évolution. Cependant, nous pouvons observer une multiplicité d'entités concrètes existant dans la nature et illustrant la notion de système présentée précédemment. La nature elle-même constitue une immense totalité (système) englobant des sous-ensembles (sous-systèmes) comme l'homme qui lui-même est formé de sous-sous-systèmes.

Un système est constitué d'un ensemble d'objets interagissant, constituants autant d'entités du système, caractérisées par des attributs et des activités. Une activité est un processus susceptible de changer l'état du système.

On appelle état d'un système la description de l'ensemble des entités qui le composent à un instant donné.

On distinguera :

- ✓ les systèmes statiques, c'est-à-dire que les interactions au sein du système ne modifient en rien l'état de celui-ci.
- ✓ Les systèmes dynamiques dans lesquels les interactions provoquent continuellement des changements d'état.

Les activités de l'environnement qui peuvent affecter l'état du système sont dites exogènes par opposition aux activités endogènes c'est-à-dire internes au système.

Lorsque l'activité du système est déterminée majoritairement par les entrées du système on parle de système déterministe. Mais dans bien des cas l'activité d'un système résulte majoritairement de beaucoup de processus aléatoires. Un tel système est dit stochastique ou aléatoire.

Cependant, il est important de distinguer les systèmes continus des systèmes discrets. Les premiers étant ceux dont l'activité est un processus continu, comme la croissance d'un arbre, et les seconds étant ceux dont l'activité est un processus qui se produit à certaines dates, de manière discrète. Par exemple la reproduction au sein d'un système population est une activité discrète puisqu'elle intervient à date fixe et fournit un nombre entier d'individus. Néanmoins l'activité reproduction pourra, à la rigueur, être considérée comme continue lorsque le temps de génération est très court, comme c'est le cas au niveau des bactéries.

II.2. Modélisation

On appelle modèle toute abstraction ou simplification d'un système.

La modélisation est la démarche, la stratégie qui permet l'élaboration, la construction et la mise en œuvre d'un modèle. Elle prend en compte l'objet ou le phénomène à représenter, le système symbolique choisi, l'utilisation qu'on souhaite faire du modèle et enfin les données et connaissances disponibles ou accessibles par l'expérience ou par l'observation. Elle intervient dans les trois grandes fonctions de la recherche scientifique : détection, énoncé des questions et mise en évidence des problèmes ; résolution des problèmes et acquisition des connaissances ; définition des actions et étude de leurs conséquences.

Le modèle permet de comprendre, mesurer et prévoir, et ainsi de passer de l'idée à la décision et à l'action.

Cependant il est important de noter que la nature d'un système peut différer de la nature de son modèle. Ainsi un système peut être continu et déterministe alors que son modèle est discret et stochastique.

II.3. Modélisation systémique

La modélisation systémique est basée sur une analyse selon laquelle on divise un système en un nombre de sous composants appelés éléments distincts pouvant être reliés par des flux ou échanges de matières d'énergie ou



d'information. Donc l'approche systémique peut s'appliquer lorsqu'il est possible de diviser le système en éléments et de déterminer, mesurer ou estimer la nature et l'importance des interactions entre ces éléments.

Les méthodes de modélisation systémique ont commencé à se développer en 1945 au sein des sciences de l'ingénierie. Ces méthodes requièrent un changement de "registre" pour qui pratique déjà la modélisation analytique, afin de disposer de concepts plus adaptés à la modélisation systémique.

La systémique est liée à cinq principaux concepts. Il s'agit des relations entre les éléments, de la totalité, de l'organisation, de la complexité et des régulations [DS].

II.3.1. Les relations entre les éléments

Les éléments d'un système sont liés par un réseau à travers lequel transitent des flux de matière, spécifiques du système considéré, et/ou des flux informationnels. Les relations de transfert de matières entre deux éléments ou peuvent être déterminées par l'élément donneur (loi d'action de masse ou relation linéaire ou relation du premier ordre), ou bien peuvent être contrôlées d'une façon « partagée » par les deux éléments (relation non linéaire). Les systèmes basés sur des relations linéaires présentent des comportements prévisibles. Au contraire, l'existence de relations non linéaires peut induire des comportements imprévisibles et inexplicables (chaos), même dans le cas de systèmes simples à 2 ou 3 éléments. Ces deux types de relations se rencontrent fréquemment lorsque l'on cherche à modéliser des systèmes.

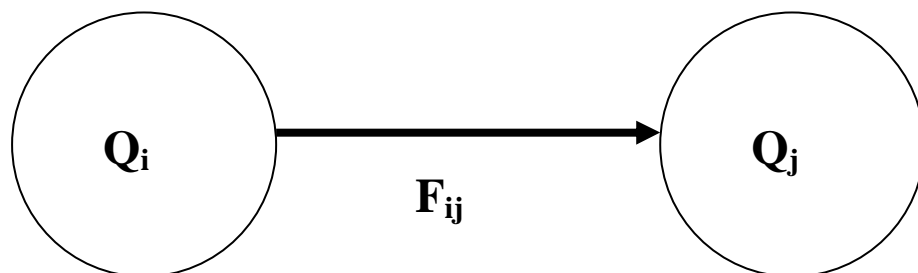


Figure : relation entre éléments d'un système

$$F_{ij} = \alpha Q_i Q_j$$

F_{ij} représente le flux de transfert de i à j

Q_i, Q_j représentent les quantités de substance dans les éléments i et j .

II.3.2. Le principe de totalité

Ce principe stipule qu'un système ne peut pas être réductible en ses parties. Concrètement, cela veut dire qu'il est indispensable, pour connaître les

propriétés de considérer les relations liant ses éléments. Sur la base de ce principe, on distingue les propriétés sommatives et constitutives des systèmes. Les propriétés sommatives d'un système correspondent à la somme des propriétés des différents éléments qui le constituent. Les propriétés constitutives intègrent les propriétés sommatives mais également celles qui résultent des relations liant les éléments. La différence entre les propriétés constitutives et sommatives d'un système correspond à ce qu'on appelle parfois « l'effet système » ou bien le concept d'émergence. Ce concept se retrouve souvent comme un élément clé des études et du progrès dans de nombreux domaines (recherche en biologie, pédagogie, psychologie, sociologie, sport...).

II.3.3. L'organisation hiérarchique des systèmes

L'organisation concerne l'agencement des relations entre les éléments d'un système. Celle-ci peut être considérée sous deux angles complémentaires : structurel, qui s'exprime à travers un diagramme, et fonctionnel qui est traduit à travers un programme. D'autre part, l'organisation s'appuie sur deux principales composantes : spatiale et temporelle.

L'organisation hiérarchique spatiale traduit le fait que tout système peut être vu comme un, ou plusieurs, niveaux au sein d'un « empilement » de niveaux d'organisation. Le niveau retenu comme objet d'étude est souvent appelé le niveau descriptif du système qui est vu comme une « boîte noire ». Lorsque l'on considère des niveaux organisationnels sous jacents, ou inférieurs, on se place à priori dans une attitude explicative ou analytique. Au contraire, lorsqu'on se place à des niveaux plus élevés, c'est à dire plus englobants, on se situe dans une attitude synthétique ou intégrée.

II.3.4. La complexité des systèmes

Il est important de bien faire la distinction entre les attributs compliqués et complexes. Un système compliqué peut ne pas être compris par celui qui le considère, cependant on sait qu'on peut en avoir l'entièreté de la connaissance (cf. moteur de voiture...). Par contre, un système complexe ne peut pas être, à un instant donné, connu de façon exhaustive (cf. organisme vivant). Ce qui signifie qu'une large partie des propriétés et de la connaissance du système échappe à celui qui le considère.

La systémique se présente souvent comme la science du complexe dans la mesure où elle permettrait de mieux organiser la démarche face à un système largement inconnu de la part de celui qui le considère. On assiste actuellement à une certaine inflation de l'usage du mot complexe. Une des raisons est vraisemblablement la résultante du fait que la progression des connaissances sur

un système permet de mieux prendre conscience du poids de la partie inconnue. Progrès des connaissances va donc de paire avec prise de conscience du complexe.

Le degré de complexité d'un système dépend principalement :

- du nombre de niveaux d'organisation, d'éléments par niveaux, de relations entre niveaux et de relations entre éléments par niveaux
- de la nature ou de la complication des relations entre niveaux et des relations entre éléments

II.3.5. Les régulations des systèmes

Les régulations des systèmes doivent également être considérées à travers une organisation hiérarchique, avec un certain degré de spécificité ou de finalité à chaque niveau considéré. Les organismes vivants constituent une excellente illustration de ce fait puisqu'ils portent en eux des régulations finalisées par leur espèce ou bien par leur existence individuelle propre.

On peut considérer l'organisme comme un système à éléments possédant de nombreux niveaux d'organisation hiérarchique. En première approximation, il importe de distinguer deux sous-systèmes majeurs : les sous systèmes opérant et régulateur

Le sous-système opérant est constitué par l'ensemble des tissus, des «réservoirs» et des compartiments métaboliques de l'organisme qui sont reliés par des « tuyaux », des systèmes circulatoires ou des voies métaboliques... Le sous-système régulateur est relié au sous-système opérant par un réseau informationnel. Il représente le pilote du système opérant. Cette structuration en sous-systèmes opérant et régulateur s'applique à tout système contrôlé ou régulé

II.4. Approches systémique et analytique

Un large débat s'est développé au cours des dernières décennies sur ce qui différencie la démarche classique, appelée cartésienne en raison du rôle pris par les pensées de Descartes, et la démarche systémique.

De façon résumée, la démarche cartésienne est d'abord «descendante», elle va ainsi rechercher l'explication d'un système à des niveaux d'organisation sous-jacents, elle traverse ainsi différents niveaux jusqu'à trouver celui auquel elle peut avoir une connaissance exhaustive des propriétés des éléments qui le constituent. Ensuite, l'approche cartésienne adopte un sens ascendant en élaborant la connaissance du système par additivité des propriétés mesurées au

niveau des éléments et des niveaux d'organisation sous-jacents. Pour cette raison, cette démarche est également qualifiée de sommative.

En contraste, l'approche systémique cherche à privilégier la connaissance des relations entre les éléments qui constituent le premier niveau sous-jacent du système considéré. En outre, ces relations entre éléments sont systématiquement resituées quant à leur signification par rapport au comportement de l'ensemble du système considéré. Cette approche focalise donc plus l'attention sur les propriétés constitutives et les facteurs émergents du système considéré.

Un autre aspect différencie les approches cartésienne et systémique, il s'agit du principe de pertinence. Avec la démarche cartésienne, la connaissance d'un système s'appuie uniquement sur le principe d'évidence, c'est à dire qu'elle n'intègre que des résultats dûment observés et validés. Par contre, l'approche systémique intègre non seulement le principe d'évidence, mais également des relations et des informations non dûment vérifiées mais qui se relèvent suite à un certain nombre de « recouplements » de « l'intime conviction » de l'acteur.

D'autres aspects distinguent encore les deux approches, en particulier vis-à-vis de l'évolution future des systèmes, l'approche cartésienne s'appuie principalement sur des principes de prévision (prolongation quantitative du passé) alors que la systémique concerne plutôt la prospective qui a l'ambition de ne pas être que quantitative et « d'anticiper l'imprévisible ». L'approche systémique présente également l'intérêt d'apporter souvent plus de nuances et de recul dans les façons de voir les choses. Ainsi, le principe de dialogique permet de ne pas opposer en face à face des logiques contraires mais de les associer au sein d'une approche qui les intègre en pondérant leur rôle

Le tableau ci dessus résume quelques concepts analytiques et leurs répondants en systémique [LT 2000]

Approche analytique	Approche systémique
Isole: se concentre sur les éléments	Relie: se concentre sur les interactions entre les éléments
Considère la nature des interactions	Considère les effets des interactions
S'appuie sur la précision des détails	S'appuie sur la perception globale
Modifie une variable à la fois	Modifie des groupes de variables simultanément
Indépendante de la durée : les phénomènes considérés sont réversibles	Intègre la durée et l'irréversibilité

La validation des faits se réalise par la preuve expérimentale dans le cadre d'une théorie	La validation des faits se réalise par comparaison du fonctionnement du modèle avec la réalité
Modèles précis et détaillés, mais difficilement utilisables dans l'action (exemple: modèles économétriques)	Modèles insuffisamment rigoureux pour servir de base de connaissances, mais utilisables dans la décision et l'action
Approche efficace lorsque les interactions sont linéaires et faibles	Approche efficace lorsque les interactions sont non linéaires et fortes
Conduit à une action programmée dans son détail	Conduit à une action par objectifs
Connaissance des détails, buts mal définis	Connaissance des buts, détails flous

II.5. Méthodes de modélisation des écosystèmes

Il existe deux types de méthodes de modélisation des écosystèmes, que l'on peut classer par convenance de modélisation analytique et de modélisation par simulation, bien que leurs limites ne soient pas antithétiques [HD 1993].

Bien que les deux approches, dans la théorie, soient dirigées à augmenter notre compréhension et prévision des systèmes écologiques et de leurs composants, dans la pratique les deux types de méthodes sont généralement employées pour des questions complètement différentes, et elles emploient des approches mathématiques complètement différentes. Les modélisations analytiques sont normalement caractérisées par l'utilisation du crayon, du papier, et des mathématiques relativement compliquées tandis que les modélisations par simulation tend à être caractérisée par l'utilisation des mathématiques plus simples et des ordinateurs.

II.5.1 Les méthodes analytiques

Les méthodes analytiques utilisent un formalisme mathématique pur. Elles se rapportent à un ensemble mathématique de procédures pour trouver les solutions exactes aux équations, différentielles ou autres. Tant que les comportements des équations mathématiques sont bien connus, les méthodes analytiques ont une grande puissance si un certain aspect de nature peut être bien décrit par une ou plusieurs de ces équations. Les méthodes analytiques ont été employées considérablement dans quelques aspects de l'écologie, particulièrement, dans la biologie et dans la génétique. Les méthodes analytiques ont également été utiles dans le développement des modèles théoriques qui servent de base à beaucoup de développements dans la théorie écologique. Dans certain cas les modèles analytiques ont été utiles dans le

développement des programmes de gestion de population. Malheureusement ils ont été moins utiles dans l'étude des écosystèmes entiers. La raison est que les équations analytiques sont utiles seulement dans certaines conditions plutôt restreintes, c.-à-d., seulement quand les équations décrivant des processus biotiques sont linéaires et/ou quand il y a relativement peu d'équations à résoudre en même temps. Un modèle d'écosystème inclut normalement un très grand nombre d'équations dont certaines sont non linéaires. Ainsi l'approche analytique n'est pas normalement très utile dans la construction des modèles d'écosystèmes en raison de la nécessité de résoudre simultanément des douzaines, voire centaines d'équations, dont beaucoup peuvent être non-linéaires.

II.5.2 Les méthodes par simulation

La simulation se rapporte réellement au processus à mettre n'importe quelle équation réglée sur un ordinateur et d'explorer des conséquences. Techniquement "numérique" pourrait être l'antonyme préféré à analytique, mais la simulation est généralement employée.

La simulation permet de résoudre un grand nombre d'équations simultanément, en intégrant la non-linéarité de certaines de ces équations.

Les méthodes de modélisation par simulation se subdivisent en deux groupes : les simulations à composantes analytiques (discrétisées ou non) et les méthodes purement discrètes.

Une variante très importante du premier groupe, appelée modèles à compartiments, repose sur des équations différentielles décrivant un système à l'équilibre. Les systèmes dynamiques s'intéressent aux systèmes comportant des autorégulations dites feedback. Les simulations par modèle théorique mettent en jeu plusieurs méthodes analytiques.

Le deuxième groupe comporte de nombreuses variantes et de loin est le plus complexe à réaliser. Elles sont les plus puissantes. Ce sont en fait un ensemble de méthodes pouvant se combiner à des degrés divers. A la différence des modèles de simulation continue, le temps y est discrétisé. Les événements d'un écosystème (reproduction, capture d'une proie, dissémination, prélèvement d'eau, précipitations, etc...), retenus dans le modèle, ne sont susceptibles d'intervenir qu'à des intervalles de temps d'une fréquence soit variable (fonction d'une loi de distribution), soit fixée par avance pour la simulation (heure, journée, semaine, mois, année,..., au choix de l'expert écologue et en accord avec les possibilités informatiques). [HD 1993].

La simulation peut être purement déterministe, le calcul de la réalisation quantitative d'un événement reposant sur des équations, ou stochastiques, ce même calcul reposant sur une variable aléatoire obéissant à une loi, de distribution par exemple. Elle peut être même hybride, une partie des événements reposant sur des sous modèles de types déterministes, d'autres sur des sous modèles de types stochastiques. Ces méthodes permettent la prise en compte de l'espace que l'on peut discrétiser ou non.

On peut noter trois grands types de méthodes de simulation avec prise en compte des effets spatiaux :

- La simulation aléatoire, ou méthode de Monte Carlo.
- La simulation à événements discrets.
- Les méthodes dites de vie artificielle.

II.6. Simulation de Monte Carlo

La simulation de Monte-Carlo est une technique qui tire son nom de la roulette de Monaco, considérée comme un mécanisme propre à sortir des nombres au hasard. Cette simulation est utilisée depuis longtemps dans d'autres domaines scientifiques. Les incertitudes affectant le succès d'un projet sont quantifiées par la distribution des probabilités. On crée un grand nombre de scénarios pendant la simulation à partir d'échantillons de ces probabilités, puis on évalue l'issue du projet en fonction de chacun des scénarios. Grâce à cette analyse, on obtient une distribution de la probabilité du résultat. Celle-ci nous fournit ainsi des informations sur la valeur anticipée, l'éventail des résultats possibles et les risques négatifs du projet. Par extension, tous les modèles de simulation discrète stochastique peuvent être considérés comme des simulations dites de Monte Carlo.

On utilise fréquemment les méthodes de Monte Carlo pour le calcul d'intégrales.

Exemple : Examinons un problème simple.

Supposons un rectangle dont nous connaissons la longueur x unités et la largeur y unités. Il est coupé en 2 sections par une courbe. Nous voulons déterminer l'aire A de la portion du rectangle en dessous de la courbe. Des points sont tirés au hasard avec un générateur de nombres pseudo aléatoires. Si n points sont sous la courbe alors qu'on a tiré N points au total alors :

On a : $A = \frac{n}{N} XY$ XY étant l'aire totale du rectangle

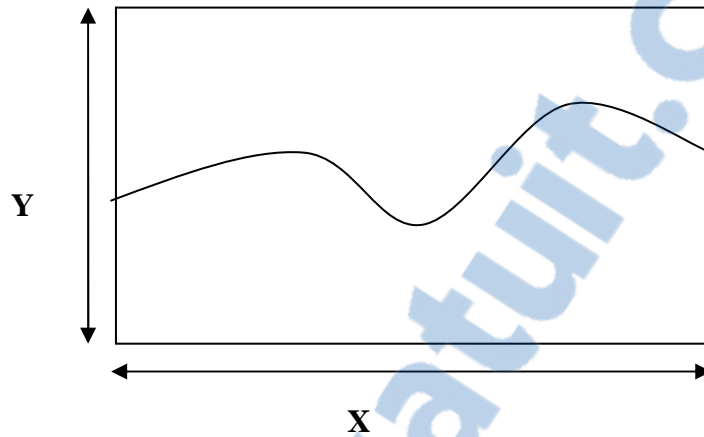


Figure3 : calcul d'aire

La précision de cette méthode ne s'améliore qu'avec le carré du nombre de points tirés au hasard.

Cependant de nombreuses estimations sont nécessaires pour obtenir un intervalle de confiance pour le résultat.

III. LE LAC DE GUIERS

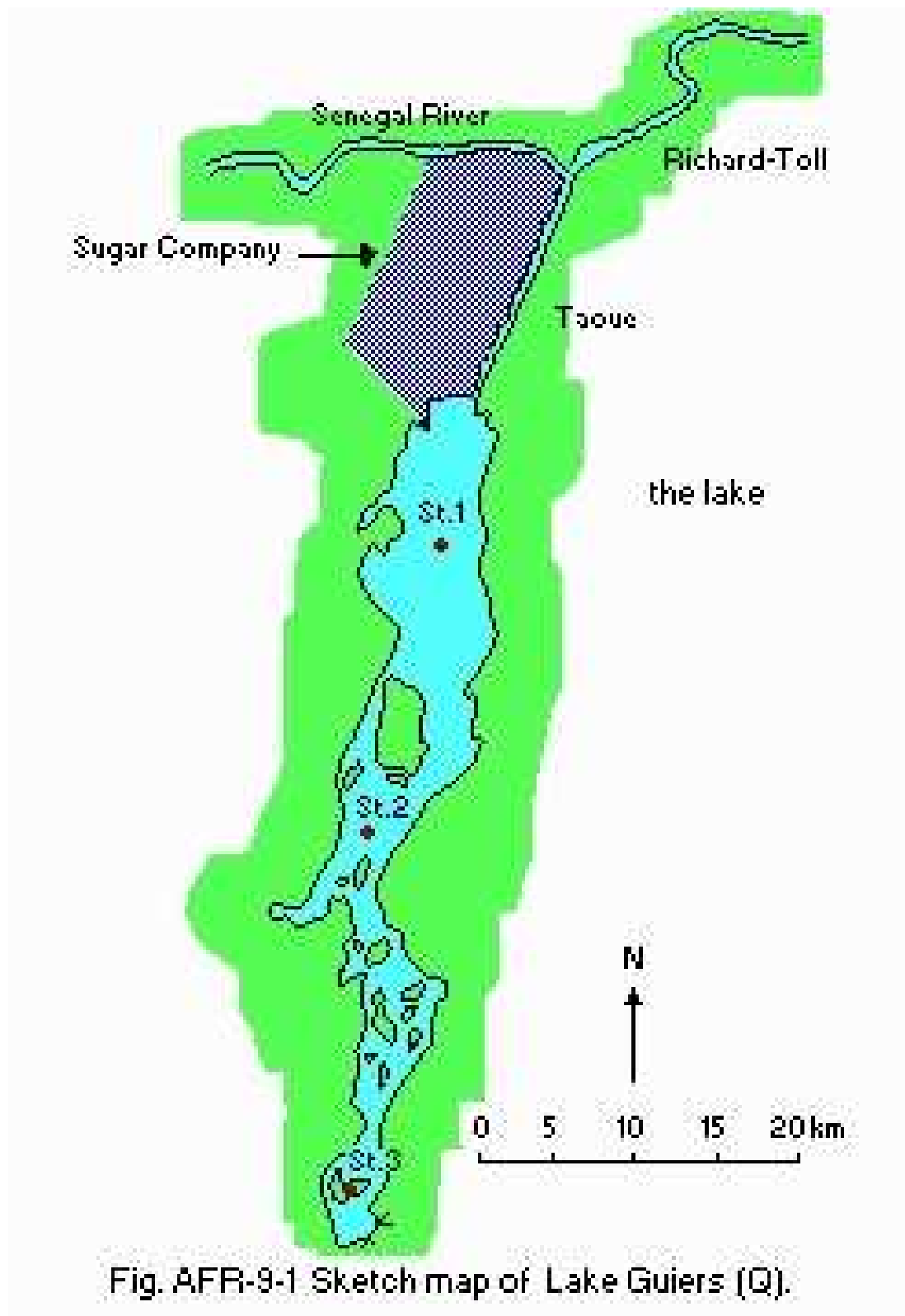


Figure 7 : Le lac de Guiers
Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES 

III.1 Situation géographique

Le lac de Guiers est situé en rive gauche de la vallée du Sénégal à 50 km environ de l'océan atlantique à la latitude 14°09 N et la longitude 16°08 W. Il communique avec le fleuve par l'intermédiaire d'un canal artificiel de 17 km, la Taoué, ancien nom du défluent sinueux qui le reliait à celui-ci.

III.2 Description du lac

Le lac de Guiers est l'unique réserve importante d'eau douce de surface du Sénégal. Il occupe une dépression SW-NE. Il s'étire sur une trentaine de kilomètres dans sa partie nord et sa plus grande largeur est d'environ 7 km. La partie sud, longue de 20 km, est morcelée et parsemée d'îlots suivant le niveau du lac. La plus importante île (Diokor) qui devient une presqu'île aux basses eaux, se trouve dans cette partie au nord-est du village de Ngnith. Sa superficie est tributaire du niveau du lac.

A l'extrémité sud, une digue en terre munie d'un ouvrage vanne isole le lac de l'ancienne vallée du Ferlo. En zone nord, les rives sont généralement plus franches et le volume d'eau plus important : 85% du volume total du lac COGELS et Al [IS 1993]. Des digues ceinturent le lac dans cette partie septentrionale. Elles l'isolent des casiers de canne à sucre de la Compagnie Sucrière du Sénégalaise (CSS) et des exploitations maraîchères individuelles.

III.3 modèles de la gestion des eaux du lac

Dans les archives de la Compagnie Générale des Eaux du Sénégal (CGE), compagnie concessionnaire des services des eaux du Senegal qui fut remplacée par la SONEES, puis la SDE, se trouvait une abondante documentation sur le lac de Guiers puisée un peu partout et notamment à la Mission d'Aménagement du Senegal) remplacé à ce jour par l'OMVS. [IS 1983]
Figuraient notamment :

- Les relevés des cotes du fleuve depuis 1900 jusqu'en 1970.
- Un graphique donnant en fonction de la hauteur d'eau du lac :
 - ✓ Le volume d'eau emmagasiné
 - ✓ La surface du lac (intéressant pour le calcul de l'eau perdue par évaporation)
 - ✓ Les différences de cotes entre l'eau du lac et celle du fleuve Senegal au droit de la Taoué dues aux pertes de charge dans les

méandres de cette rivière, que les travaux de rectification effectués après 1970 ont d'ailleurs considérablement réduites.

Avant de lancer les travaux d'adduction d'eaux de Dakar à partir du lac de Guiers, deux simulations furent faites par IBM vers les années 1965 :

- ✓ La première visait, connaissant les crues du lac depuis plus de 60 ans, à savoir si le lac n'aurait jamais été asséché en supposant que l'on y pompe quotidiennement et depuis l'origine 100000m^3 par jour pour l'alimentation de Dakar, tenant compte bien sur de l'évaporation, et du prélèvement du casier de Richard Toll comme on le nommait à l'époque aujourd'hui la CSS. La réponse fut positive. Il y'aurait toujours de l'eau dans le lac.
- ✓ La seconde avait pour but d'aggraver la situation en supposant toutes choses égales par ailleurs, que les 5 plus mauvaises années de remplissage soient consécutives, ce qui constituait un cas limite peu probable. Le verdict d'IBM fut qu'il manquerait d'eau 2 mois à la fin de la 5^e année

En outre, Cogels et Al en 1994 ont développé un modèle prévisionnel de la salinité des eaux. Ce modèle quantifie l'effet respectif de chacun des paramètres du bilan hydrologique sur le stock de sel dissous présent dans le lac et calcule la salinité moyenne du lac sur la base du bilan quotidien des entrées et sorties

Alors, pourquoi l'utilité d'un outil de gestion hydraulique du lac ?

La raison principale est que le lac s'assèche vu l'importance de l'évaporation et des prélèvements qui y sont effectués. Outre la SDE et les communautés rurales riveraines, la SAED et la CSS y effectuent des prélèvements industriels importants, si bien que le lac ne pourra pas tenir si on ne gère pas rationnellement ses échanges en améliorant ses conditions d'utilisation.

IV. MODÈLE HYDROLOGIQUE DU GUIERS

IV.1 Objectif du modèle

Ce modèle a pour objectif de faire le bilan hydrologique annuel du lac de Guiers sur une longue période. Il se propose de déterminer les moyennes annuelles :

- du volume d'eau du lac
- du niveau d'élévation du lac (hauteur)
- de l'aire du lac

En tenant compte des apports et des pertes dont certains seront ajustables par l'utilisateur du modèle et d'autres considérés comme stochastiques.

Il est important de noter que les données qui ont servies à implémenter ce model doivent être actualisées pour une bonne utilisation de cet outil.

IV.2 Bilan hydrologique annuel

Initialement, l'alimentation du lac était essentiellement assurée par la crue du fleuve et les apports météoriques. Le régime hydrologique connaîtra plus tard des changements notables. Ces changements sont liés à la réalisation de nombreux aménagements dont :

- L'installation à Richard Toll de la Compagnie Sucrière Sénégalaise (CSS)
- L'aménagement de la Taoué, cordon ombilical entre le fleuve et le lac.
- La réalisation des digues de Keur Momar Sarr, de Ndombo et du pont barrage de Richard Toll
- L'implantation à Ngnith de l'usine de prélèvement de la Société des Eaux du Sénégal (SDE)
- La construction des barrages de Diama et de Manantali sur le fleuve Sénégal.

L'alimentation du lac est essentiellement assurée par la crue du Sénégal, les apports météoriques, et les eaux de drainage des zones exploitées par la CSS.

Les pertes en eau proviennent en majeure partie de l'intense évaporation, des transferts vers le Ferlo, des prélèvements conjugués de la CSS, de l'usine des eaux de SDE et des usagers constitués par les exploitations agricoles (SAED, les petites exploitations maraîchères de décrue, les populations riveraines et le cheptel qui s'approvisionnent en eau de boisson).

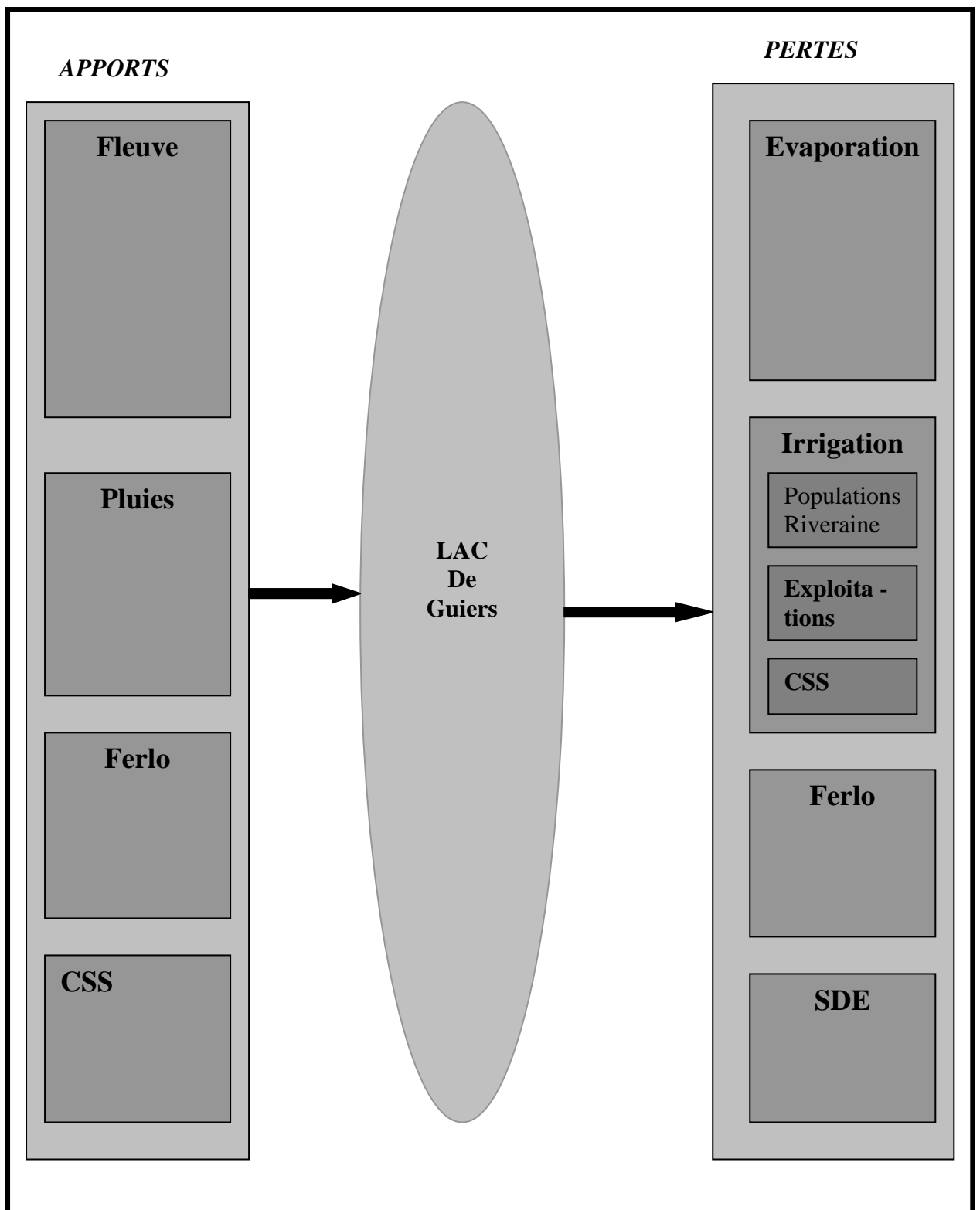


Figure6: le système lac de Guiers et ses sous systèmes

IV.3 Le volume moyen annuel

IV.3.1 Les Apports

IV.3.1.1 Le fleuve Sénégal

Tous les ans, de fin juillet à mi-octobre, la crue du fleuve du Sénégal réalimente le lac par l'intermédiaire du chenal de la Taoué. La présence des deux barrages assure le remplissage du lac en fonction de l'importance de la crue du fleuve.

On estime à 700 millions m³ le volume moyen d'eau provenant du fleuve par an.

Le remplissage du lac se fait pendant un nombre de jours déterminé (Fin juillet à mi octobre), ajustable avec le modèle et avec un taux journalier ajustable aussi avec le modèle à l'aide de contrôles.

Le volume d'eau provenant du lac est égal au taux journalier de remplissage multiplié par le nombre de jours de remplissage.

IV.3.1.2 Les précipitations

Le lac de Guiers est situé dans la partie septentrionale du domaine sahélien caractérisé par deux cycles saisonniers très contrastés : une saison sèche d'octobre à juin et une saison des pluies de juillet à septembre (soit 2 à 3 mois). On observe depuis une vingtaine d'année une pluviométrie déficitaire.

D'un point de vue pluviométrique, le domaine sahélien se définit par l'irrégularité et la variabilité spatio-temporelle fort marquée des précipitations. Cependant l'étude de quelques stations permet de donner une vue générale de la station pluviométrique au niveau de la partie sahélienne. Les stations de Matam au centre et St louis sur la cote atlantique ont été retenues pour illustrer les variations de la pluviométrie dans le domaine sahélien.

Saint Louis reçoit une moyenne de 330 mm, alors que Matam reçoit 440 mm en moyenne (1892-1994) [AC 1996].

Nous avons choisi de représenter la pluie par une donnée P stochastique suivant une loi triangulaire de paramètres :

- valeur habituelle la moyenne arithmétique des deux stations qui encadrent le lac de Guiers c'est-à-dire 385 mm
- valeur minimum : 330 mm
- valeur maximum : 440 mm

Ainsi le volume d'eau annuel moyen des précipitations sera : $P \cdot \text{Surface}$
(Surface du bassin versant du lac qui correspond a une hauteur de 3m50) .

IV.3.1.3 Les rejets de la CSS

Les plantations de canne à sucre de la CSS. Ces eaux sont toxiques et sont estimées à 44 millions de m^3 par an [EB 2000].

IV.3.1.4 Les transferts Ferlo lac

La tradition orale veut qu'une rivière baptisée Ferlo, jadis de surface, maintenant souterraine rejoigne le fleuve Sénégal au lac en passant approximativement par Ranerou, Linguère, Yang yang pour rejoindre le sud est du lac. Pour la première fois, le cours de cette rivière Ferlo fut mis en évidence par un stellite de la NASA, mettant en valeur par un procédé spécial les ressources hydrauliques des pays survolés. L'on y voit le fleuve Sénégal, le lac de Guiers et le tracé complet du Ferlo. On a ainsi mis en évidence par d'autres procédés l'alimentation du lac par le Ferlo [IS 1983].

Ces transferts difficilement quantifiables sont estimés à 11% du volume du lac.

Ils sont définis dans le modèle de façon stochastique à l'aide d'une loi normale de moyenne 10millions de m^3 et d'écart type 3 millions.

IV.3.2 Les Pertes

IV.3.2.1 L'évaporation

L'estimation de l'évaporation a toujours posé problème pour les plans d'eau du domaine sahélien. Plusieurs paramètres interviennent en effet (température de l'eau, profondeur du plan d'eau, vent, demande évaporative de l'air....)

Elle est minimale entre novembre et février et maximale entre mars et mai ; elle est estimée à 79% du volume du lac [IS 1983].

IV.3.2.2 L'irrigation

La Compagnie Sucrière Sénégalaise utilise l'eau du lac pour l'irrigation des plantations de canne à sucre. On estime en moyenne à 11 millions de m^3 par an le volume d'eau utilisée par la CSS [EB 2000].

Au niveau du modèle les prélèvements de la CSS sont ajustables par un contrôle.

A coté de la CSS on note des prélèvements principalement pour l'irrigation d'autres usagers constitués par :

- ✓ Les exploitants agricoles :
 - La Société d'Aménagement et d'Exploitation du Delta (SAED). Ces prélèvements d'eau varient avec la variété culturale et le calendrier agricole.
 - Les utilisateurs moyens. On dénombre autour du lac des exploitations de taille moyenne. Les prélèvements varient en fonction des spéculations et du calendrier cultural.
 - Les petites exploitations maraîchères de décrue.

Les prélèvements des exploitants sont déterminés de la manière suivante :

Les exploitations n'étant pas de même taille, une exploitation agricole grande ou petite sera quantifiée en unité d'exploitation. Une unité d'exploitation (UE) sera une exploitation qui prélève 50000 m^3 par an. Ainsi si le nombre d'unité d'exploitation est Nombr_UE et le prélèvement unitaire Prelev_UE alors le prélèvement total des exploitations sera : $\text{Nombr_UE} * \text{Prelev_UE}$.

Par ailleurs on pourra ajuster le nombre d'unité d'exploitation par un contrôle du modèle.

- ✓ Les riverains :
 - Les populations riveraines du lac
 - Le cheptel qui s'approvisionne en eau de boisson

Les prélèvements des populations riveraines sont stochastiques suivant une loi normale de moyenne $10 \text{ millions de m}^3$ par an et d'écart type 2 millions .

IV.3. 2.3 Les prélèvements de la SDE

La Société Des Eaux du Senegal à travers son usine installée à Ngnith pompe environ $15 \text{ millions de m}^3$ pour l'alimentation en eau potable de Dakar [EB 2000].

Ces prélèvements sont ajustables à l'aide d'un contrôle du modèle.

IV.3.2.4 Les transferts Ferlo lac

Les transferts au Ferlo représentent quelques $156 \text{ millions de m}^3$ par an. Ils sont indispensables à la régulation de la salinité du lac [EB 2000] .

Ces transferts difficiles à quantifier sont stochastiques et régis par une loi normale de moyenne annuelle $140 \text{ millions de m}^3$ et d'écart type 10 millions

IV.4 Surface moyenne annuelle du lac

La hauteur d'eau, la surface du plan d'eau et le volume sont des éléments de base du calcul du bilan hydrologique du lac

La relation Surface - Hauteur est donnée par l'équation suivante :

$$\text{Surface} = -1,1913x^4 + 7,4873x^3 - 5,8879x^2 + 60,183x + 155 \text{ en km}^2$$

Où x représente la hauteur d'eau en m. [EB 2000]

IV.5 Niveau d'élévation moyen du lac

$$\text{Volume} = 0,9821x^3 + 34,211x^2 + 149,06x + 148,85$$

Volume en millions de m³, où x représente la hauteur d'eau en m
[EB 2000]

V. GOLDSIM

V.1 Le logiciel GoldSim

GoldSim est un logiciel hautement graphique de simulation conçu par GoldSim Technology Group [www.goldsim.com], qui s'exécute sur des PC utilisant les systèmes d'exploitation Windows. Bien qu'il ait été spécifiquement conçu pour la mise en œuvre des simulations dynamiques et probabilistes des systèmes complexes, il peut également être aisément appliqué à des simulations statiques et/ou déterministes plus simples.

Puisque la simulation peut être un outil puissant pour comprendre et gérer les systèmes complexes, une variété d'outils graphiques existe actuellement. Cependant la combinaison des dispositifs suivants rend unique l'approche de GoldSim.

V.2 Concepts de base de GoldSim

L'environnement de simulation de GoldSim est hautement graphique et complètement orienté objet. Ainsi vous créez, documentez, et présentez des modèles en créant et en manœuvrant les objets graphiques représentant les composants du système, des données et des rapports entre les données.

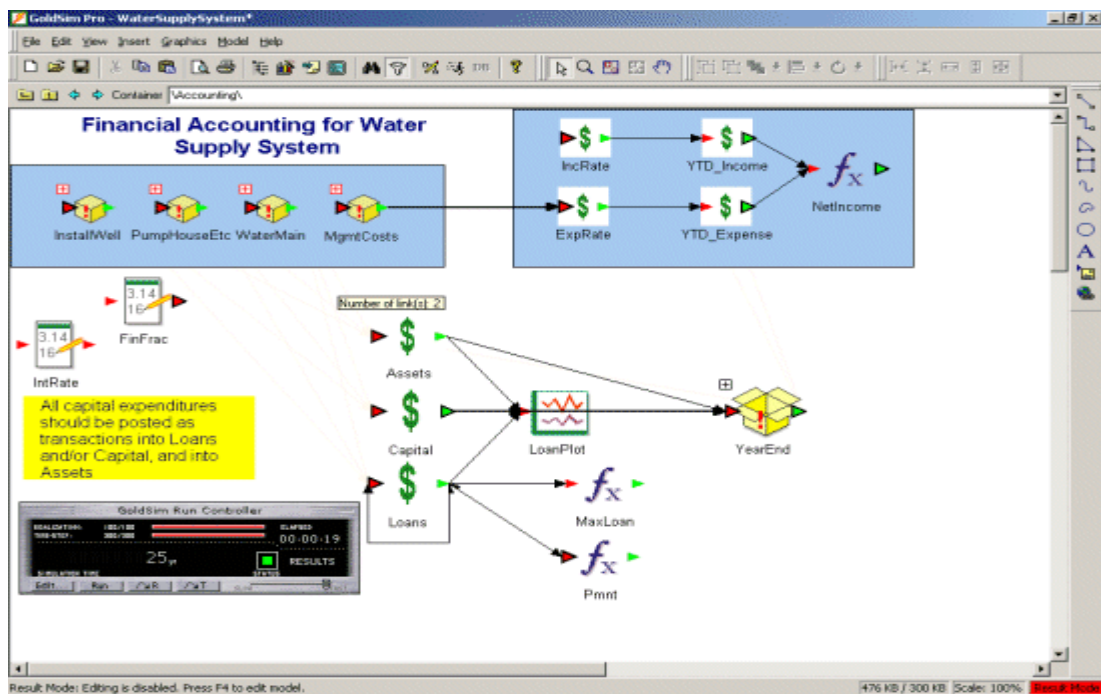


Figure 7 : écran de GoldSim

Dans un sens, GoldSim est comme "un bilan visuel" vous permettant visuellement de créer et de manœuvrer des données et des équations. Comme

on peut le voir dans l'exemple simple montré ci-dessus, GoldSim se base sur la façon dont les divers objets de votre modèle sont connectés, pour indiquer automatiquement leurs influences et interdépendances en les reliant visuellement d'une façon appropriée. Également, GoldSim pose et résout les équations représentées par les objets et leurs interdépendances.

Les éléments sont les modules fondamentaux d'un modèle de GoldSim. Chaque type d'élément a un symbole particulier ou une image graphique (que vous pouvez plus tard adapter aux besoins du client) par lequel il est représenté sur l'écran. Typiquement, vous donnez à chaque élément un nom unique par lequel il est mis en référence (par exemple, X, volume, précipitations, taux de remplissage). La plupart des éléments acceptent des entrées, et alternativement des sorties de produit.

GoldSim fournit une grande variété d'éléments. Certains de ces éléments fournissent un mécanisme à l'utilisateur pour saisir des données d'entrée dans le modèle. D'autres éléments représentent les fonctions qui opèrent entre une ou plusieurs entrées (qui pourrait être un nombre, équation, ou une référence à un autre élément) et produisent une ou plusieurs sorties. Une classe spéciale d'éléments est désignée pour produire de la dynamique dans les modèles.

V.3 Les éléments de GoldSim

Les éléments de GoldSim permettent de modéliser les principaux concepts liés à la systémique à savoir les relations entre les éléments, la totalité, l'organisation hiérarchique, la complexité et les régulations

V.3.1 les éléments d'entrées

Les éléments d'entrée (**Input élément**) définissent les entrées de base pour un modèle. GoldSim a trois types d'éléments d'entrée :

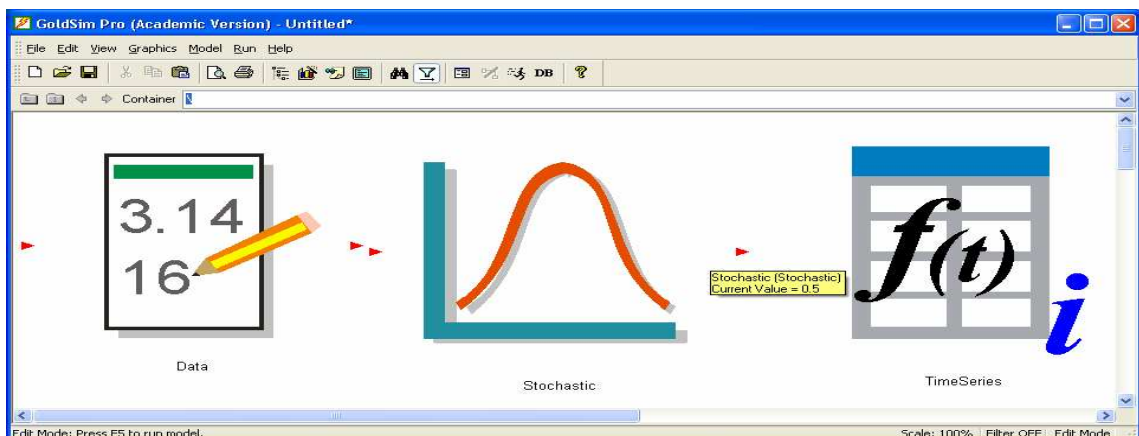


Figure8 : éléments d'entrée

- ✓ *Data* (éléments de données) : ils permettent d'indiquer une valeur scalaire simple (par exemple, le taux de prélèvement) ou un choix de valeurs relatives (par exemple, les salaires de chacun des individus d'un groupe).

Les éléments de données *Data* ont été utilisés dans le modèle pour représenter :

- Le taux journalier de remplissage du lac
- Le nombre de jours de remplissage du lac
- Le taux annuel de rejet de la CSS
- Le taux annuel de prélèvement de la CSS
- Le taux annuel de prélèvement de la SDE
- Le taux annuel de prélèvement d'une unité d'exploitation
- Le nombre d'unité d'exploitation

- ✓ *Time séries* (séries chronologiques) : Les éléments de série chronologique permettent d'indiquer une série chronologique de valeurs (par exemple, les taux de précipitations mensuelles ou les consommations journalières)

- ✓ *Stochastics* (éléments stochastiques) : Les éléments stochastiques permettent d'indiquer qu'une entrée particulière est incertaine en la définissant comme distribution de probabilité.

Les éléments de données *Stochastics* ont été utilisés dans le modèle pour représenter :

- Le taux annuel de transfert Ferlo lac
- Le taux annuel de l'apport des pluies
- Le taux annuel de prélèvement de la population riveraine
- Le taux annuel de transfert Lac Ferlo

V.3.2 Les éléments de fonction

Les éléments de fonction (**Function élément**) calculent des sorties en fonction d'une ou de plusieurs entrées indiquées. Chaque type d'élément de fonction effectue un genre différent de calcul.

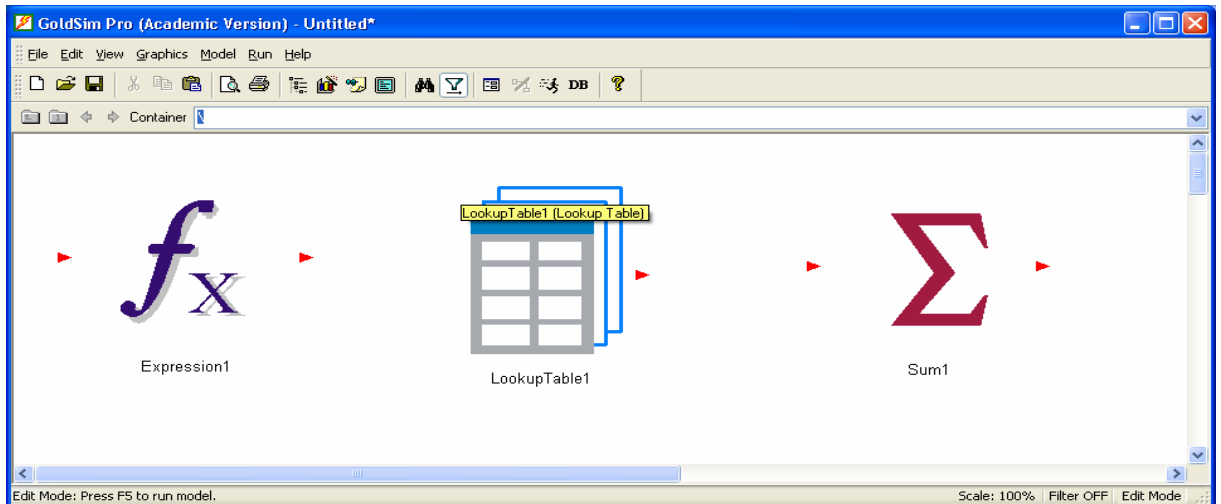


Figure9 : éléments de fonctions

- ✓ *Expression* : L'élément de fonction le plus général est une expression. Les expressions produisent un résultat simple en calculant les formules personnalisées par l'utilisateur, telles que $2 + 3$, $A*B$, ou $\text{sqrt}(55)$. Semblable à une cellule dans un bilan, en définissant une expression, vous pouvez employer une grande variété d'opérateurs mathématiques et de fonctions. Vous pouvez même employer les opérateurs conditionnels (par exemple, $<$, $>$, $=$) ou « if ...then » pour définir les expressions

Les éléments de fonctions *Expression* ont été utilisés dans le modèle pour calculer :

- Les apports du fleuve
- Les apports des précipitations
- L'évaporation
- Le taux de prélèvements des exploitants.

- ✓ *LookupTable* (Tableau de consultation) : Il définit une réponse extérieure indiquant comment un résultat change en fonction de un à trois entrées (c.-à-d., la surface de réponse peut être 1, 2, ou trois dimensions). La surface de réponse est définie par un nombre discret de points, et GoldSim interpole dans la table pour calculer le rendement pour n'importe quelle combinaison des valeurs d'entrée.

Les éléments de fonctions *LookupTable* ont été utilisés dans le modèle pour calculer :

- Le niveau d'élévation du Lac
- La surface du Lac

- ✓ D'autres éléments de fonction ont des fonctionnalités prédéfinies comme les éléments *Sum*.

Les éléments de fonctions *Sum* ont été utilisés dans le modèle pour calculer :

- La somme des apports au Lac
- La somme des prélèvements pour l'irrigation
- La somme des pertes du fleuve.

V.3.3 Les éléments de stock

Ces éléments (**Stock element**) sont des éléments spécialisés de fonction avec la propriété unique que leurs sorties sont influencées par ce qui s'est produit dans le passé. C'est-à-dire, à la différence des éléments standard de fonction, dont les sorties à n'importe quelle heure donnée sont calculées sur la base seulement des valeurs (instantanées) courantes de leurs entrées, les sorties de ces éléments sont déterminés par les valeurs précédentes de leurs entrées. De tels éléments s'accumulent après des événements et fournissent à des systèmes l'inertie et la mémoire, et par conséquent sont responsables de produire intérieurement le comportement dynamique d'un système.

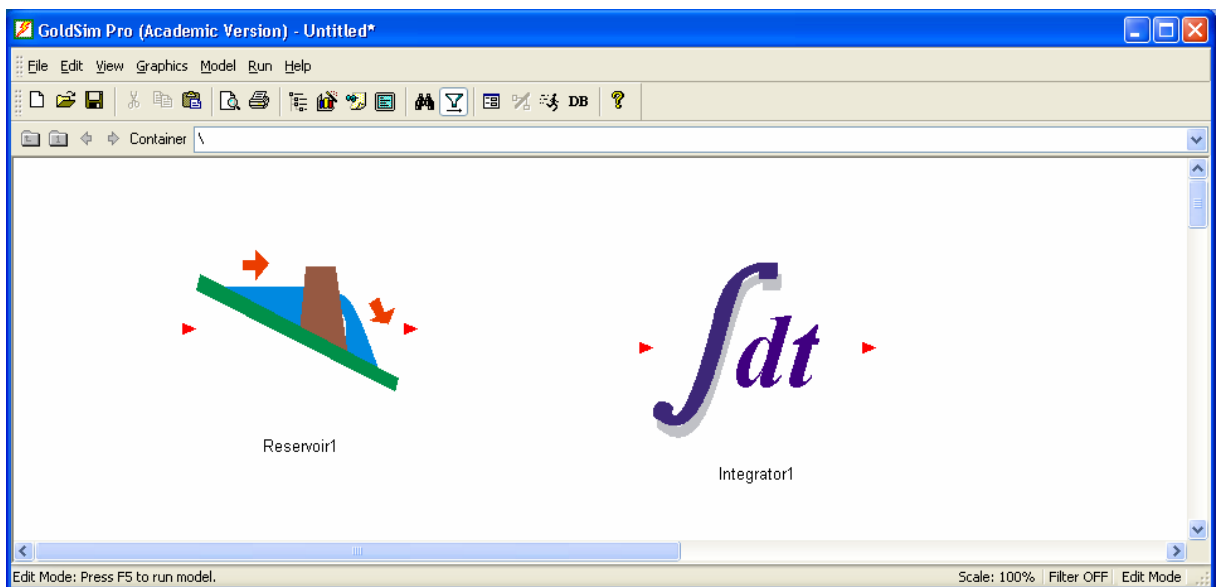


Figure10 : stock éléments

- ✓ *Stock* : Un exemple de stock élément est le *Reservoir*. Un réservoir accumule des matériaux, et est utile pour représenter des choses comme des volumes d'eau, comptes bancaires ou des quantités de matériaux ou d'articles (par exemple : sol, saumons). Sous sa forme la plus simple, un réservoir exige comme entrée une valeur initiale, un taux d'addition et un taux de retrait, et produit une valeur courante en utilisant l'équation suivante :

Valeur courante = valeur initiale + \int (taux d'addition - taux de retrait)dt

L'élément *Réservoir* est utilisé pour représenter le lac.

- ✓ *Integrator* : Les éléments d'intégration sont des éléments qui intègrent des taux. Vous les employez pour intégrer de l'information de voie, telle la distance parcouru par une voiture, des taux d'intérêt, des cours de matières premières, la température, des totaux de précipitations, confiance du consommateur, ou l'état (fiabilité, force) d'une machine ou d'un matériel. Leur symbole par défaut est un signe d'intégration parce que, mathématiquement, ils représentent des intégrales. Un intégrateur exige une valeur initiale et un taux de changement, et calcule un résultat simple (c'est la valeur) comme suit : Le taux de changement peut, naturellement, être une fonction de temps.

V.3.4 Les éléments de retard (Delay element)

- ✓ *Material Delay* : Il permet de représenter les processus dans lesquels le rendement « traîne » l'entrée. *Material Delay* accepte comme entrée un flot de matériel (par exemple : m³/yr, jouets/hr), l'achemine à l'aide d'un "convoyeur" ou "pipeline" et puis produit le flot. Un tel élément peut être employé pour représenter des processus tels que le mouvement de l'eau dans le sol ou le mouvement des parties dans un convoyeur.

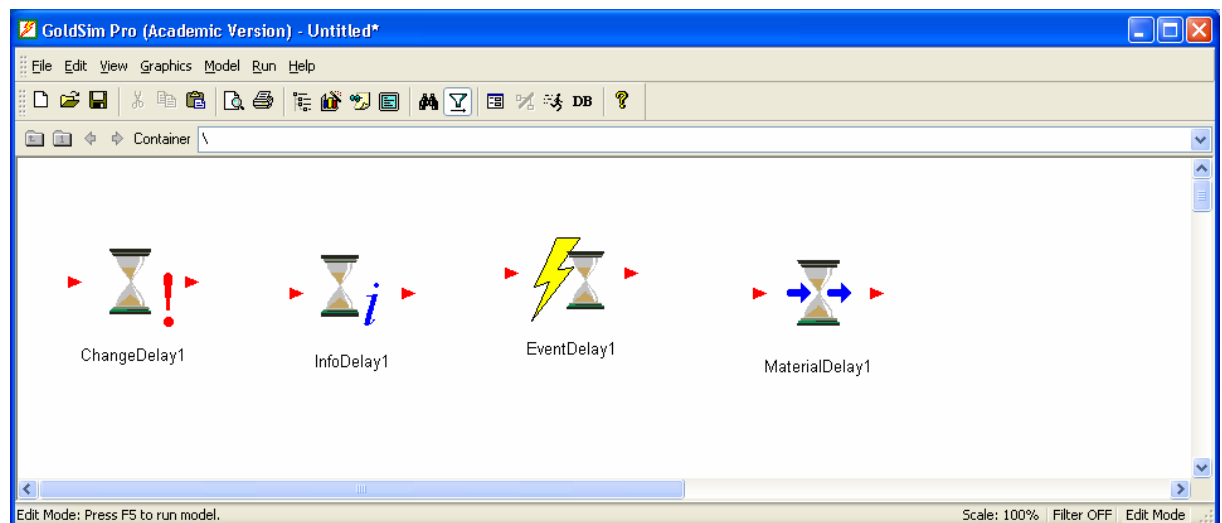


Figure 11 : delay elements

V.3.5 Les éléments d'événement (Event element)

Certains processus se produisent instantanément ou discrètement, plutôt que sans interruption. GoldSim fournit une variété d'éléments spécialisés

d'événement pour simuler l'occurrence et les conséquences des événements discrets. Des événements peuvent être produits régulièrement ("se produit exactement une fois par an au 1^e juillet"), aléatoirement ("se produit en moyenne, une fois par an"), ou être basés sur certain ensemble de conditions ("quand A est plus grand que B et que la valeur de C a changé"). Un événement peut déclencher une ou plusieurs conséquences, telles que changer le statut de quelque chose dans le modèle ("cette tâche est maintenant complète"), réalisant une étape importante indiquée, ou faisant un changement discret à une certaine quantité dans votre modèle ("ajoutez 1000 m³ au volume").

Ces éléments facilitent la simulation réaliste des événements discrets tels que les transactions financières, les accidents, les échecs de système, donnent l'assaut à, des grèves de main-d'œuvre, et des procès. Les événements de ce type peuvent avoir des effets importants sur l'exécution de beaucoup de systèmes, et il est donc important de les représenter d'une façon réaliste.

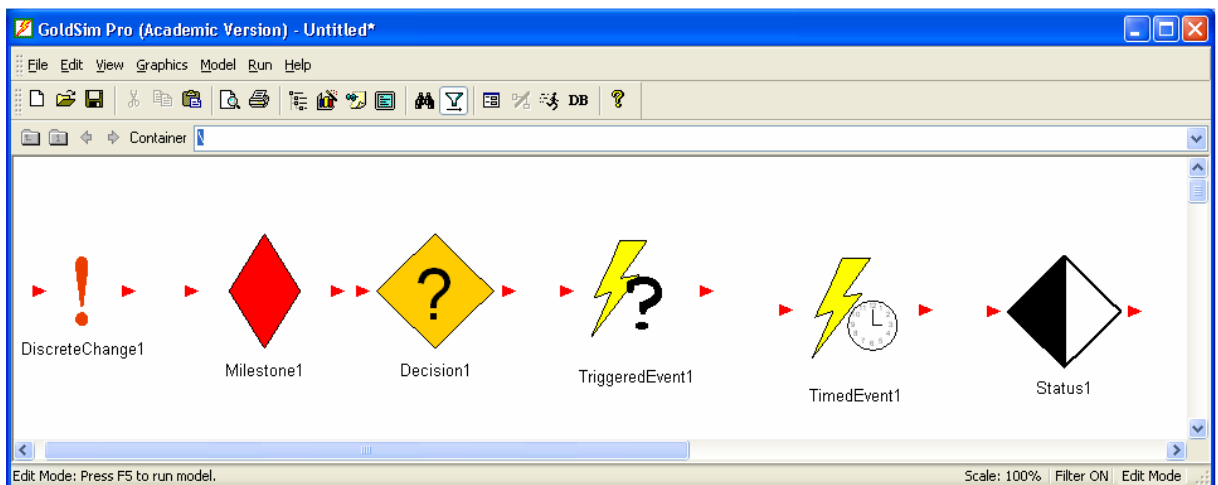


Figure12: éléments d'événements

V.3.5 les éléments de liaisons (Linking element)

Les modèles de GoldSim sont établis en liant les sorties des éléments aux entrées d'autres éléments. Quand on lie un élément à un autre (par exemple, en écrivant une équation dans une expression qui met en référence le nom d'un autre élément), GoldSim dessine automatiquement une flèche (désignée sous le nom d'une influence) entre les éléments.

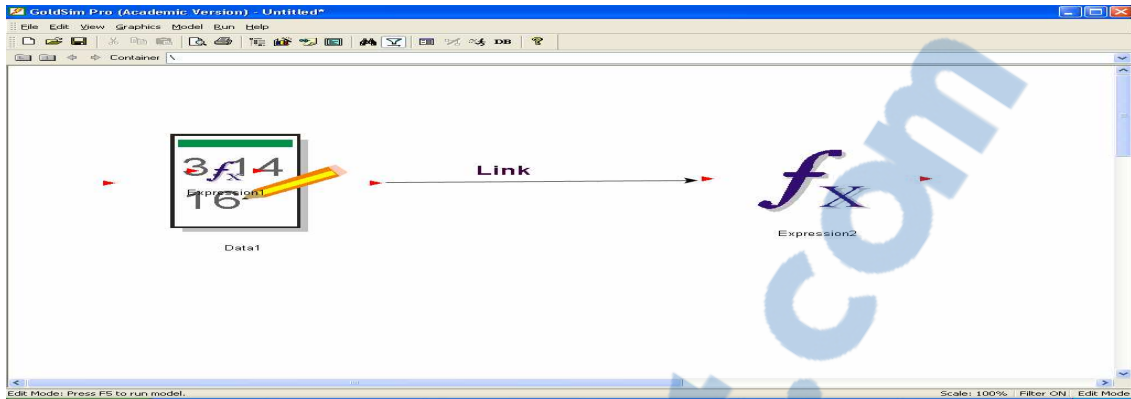


Figure13 : Linking element

Les éléments de liaison ont été utilisés pour traduire les relations dans le modèle.

V.3.5 Les éléments de résultats (Result element)

Ces éléments rassemblent, analysent et montrent des résultats.

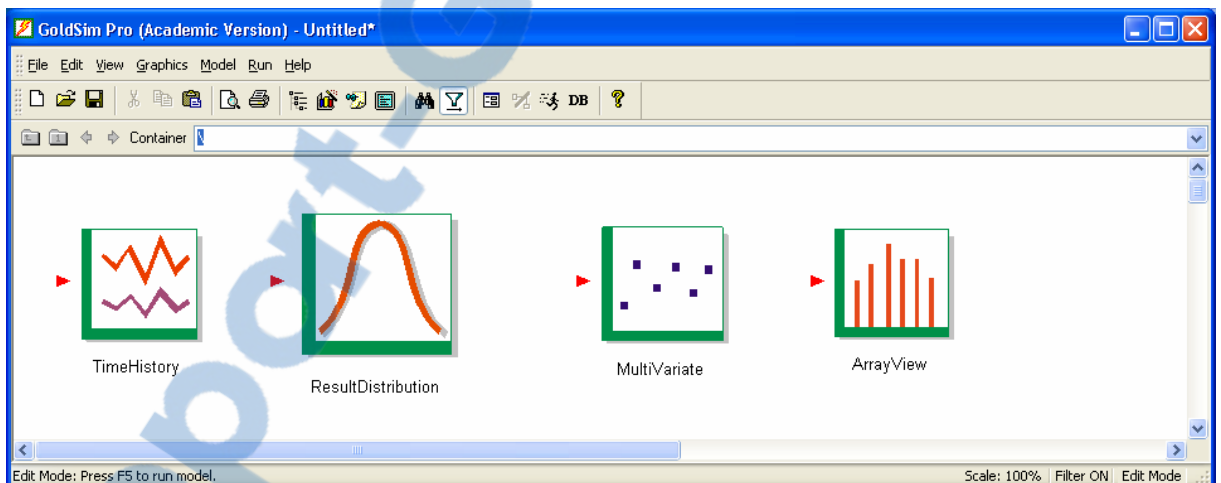


Figure14 : éléments de Résultats

✓ *Time History* : Les résultats d'histoire de temps montrent « l'historique » d'un résultat particulier en fonction du temps, et sont probablement la forme la plus commune d'affichage de résultat utilisée.

Les résultats sont présentés sous forme de tableaux de nombres, de graphiques

Les éléments de résultats *Time History* sont utilisés pour donner :

- Le niveau d'élévation du Lac
- Le volume du Lac
- L'aire du lac

- ✓ *Distribution result* : Les résultats de distribution fournissent une manière de visualiser les valeurs finales des sorties probabilistes. En tant que tels, ils sont seulement disponibles si des réalisations multiples ont été exécutées.

V.3.6 Les conteneurs

Les conteneurs sont des éléments très importants, parce qu'ils permettent de traduire l'organisation hiérarchique du système à modéliser.

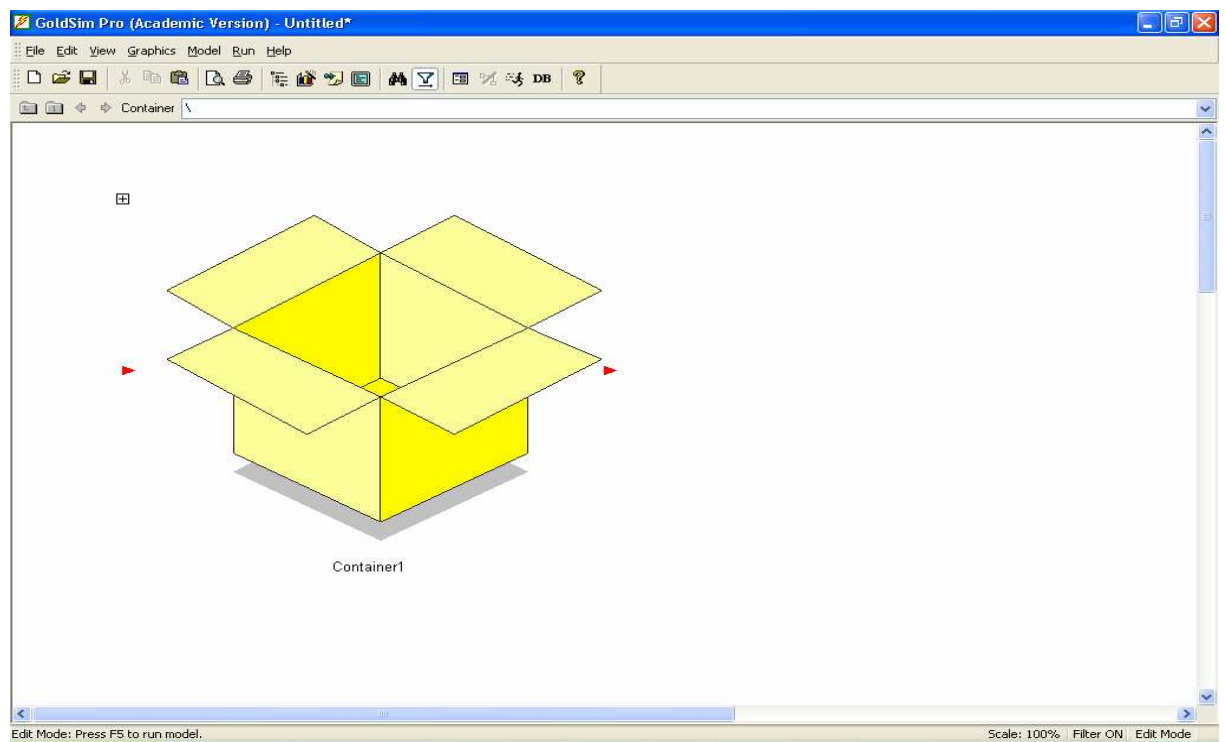


Figure15 : Conteneur

Les conteneurs sont utilisés pour les sous systèmes du modèle.

VI. Présentation du modèle

VI.1 Le Dashboard (tableau de bord)

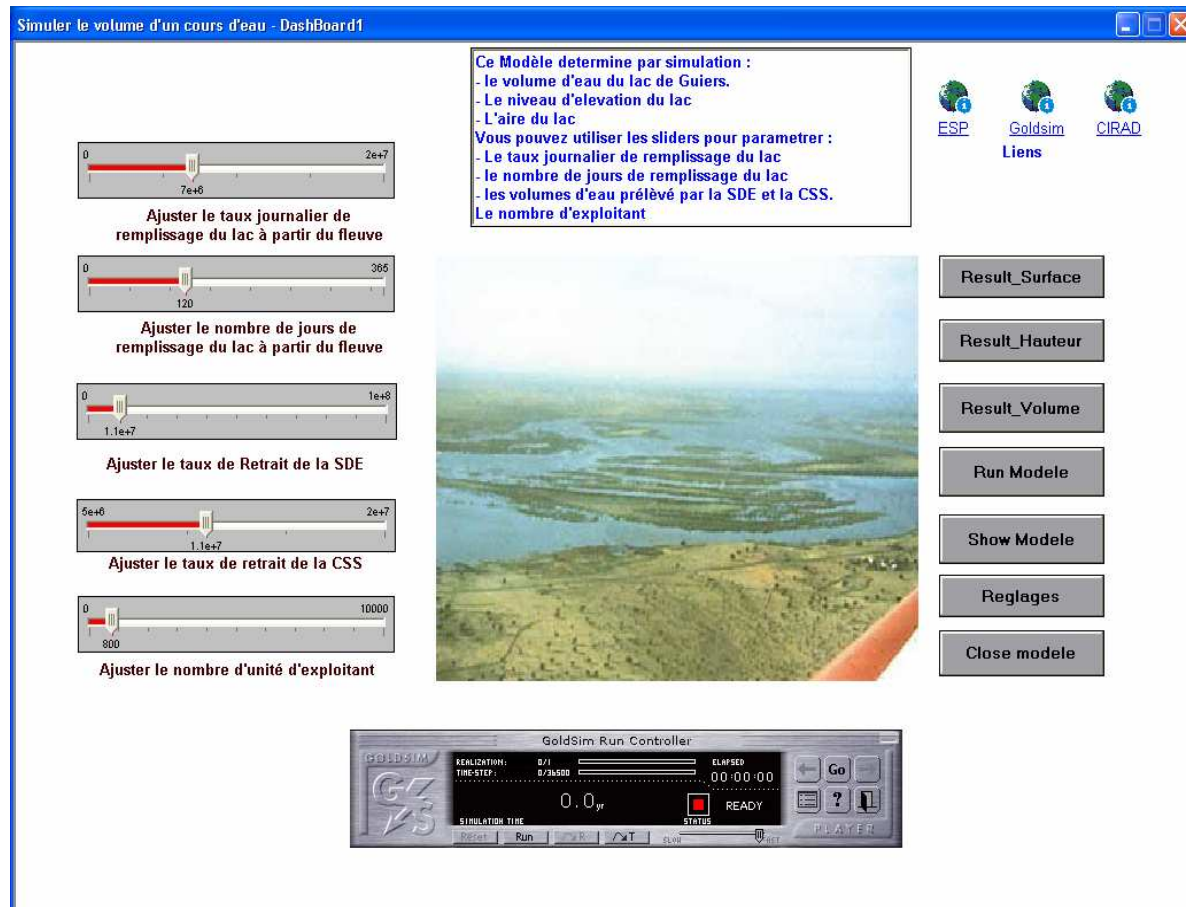


Figure 16 : tableau de bord de l'application

Le Dashboard (tableau de bord) permet à un utilisateur d'utiliser le modèle à l'aide du logiciel Player de GoldSim.

On peut utiliser les sliders pour ajuster les taux de prélèvement de la CSS et de la SDE.

Les boutons permettent à l'utilisateur de visualiser et de parcourir les différents composants du modèle sans pouvoir les modifier.

Run modèle : permet d'exécuter le modèle

Résult : montre les résultats de la simulation sous forme de graphiques et de tableau d'enregistrements.

Show modèle : permet d'explorer le modèle

Close : permet de fermer l'application

Réglages : permet de définir les réglages de la simulation **pas, durée, début...**

VI.2 Le bilan hydrologique du lac

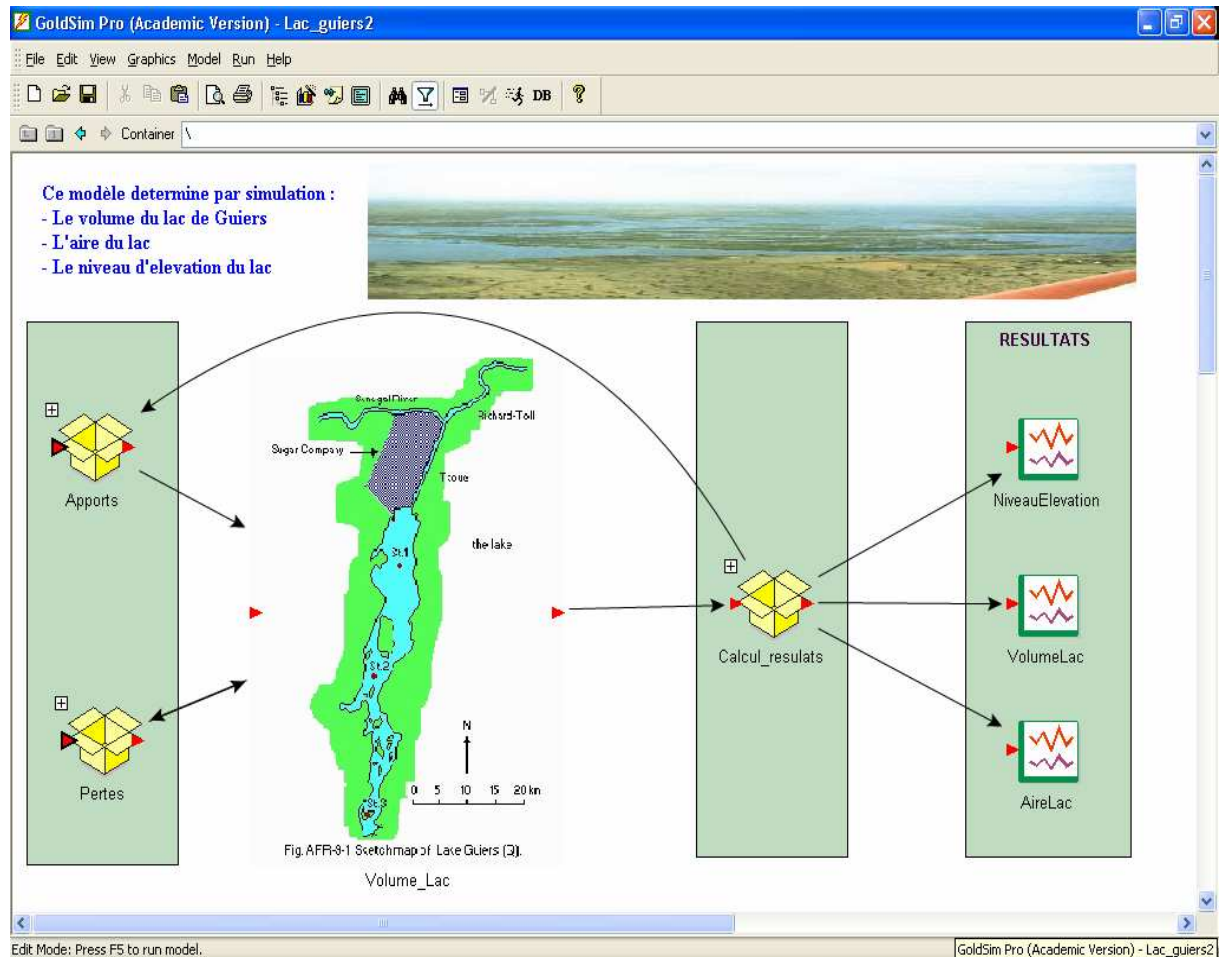
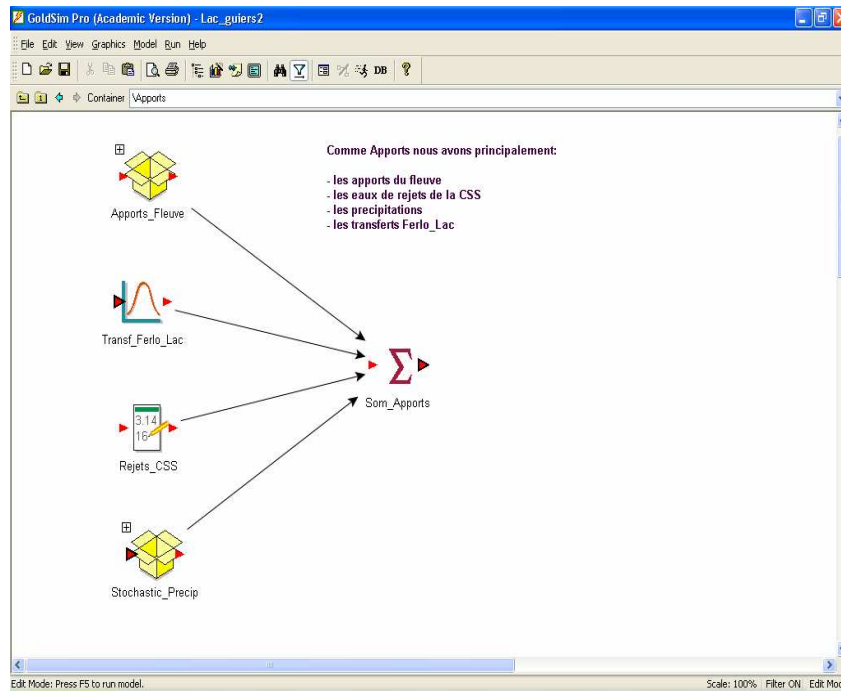


Figure 17 : écran principal de l'application

Le volume du lac est donné par la différence entre la somme des apports et des pertes.

$$V = \sum \text{apports} - \sum \text{pertes}$$

VI.3 Les apports

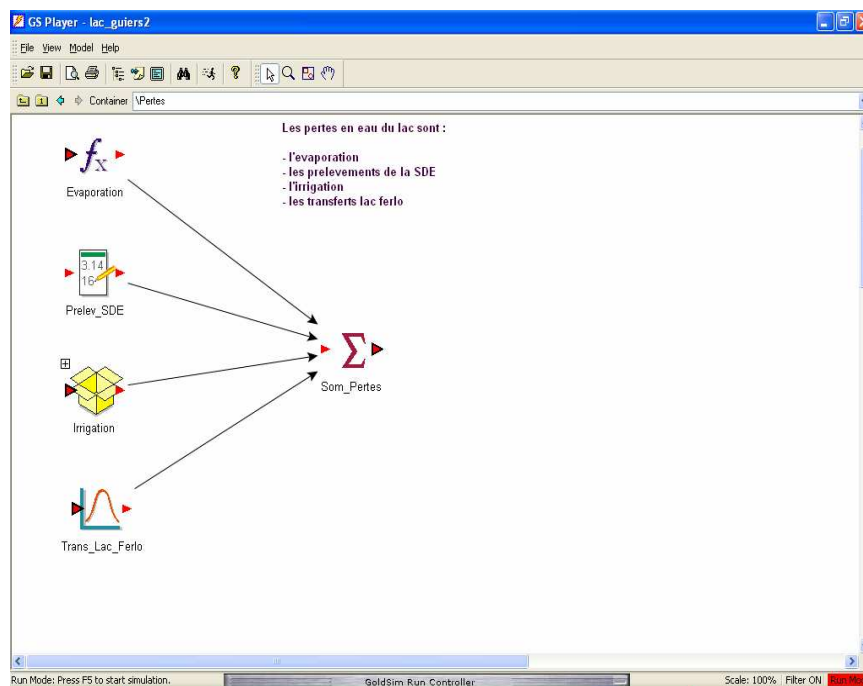


Le taux annuel des apports est la somme des taux de :

- ✓ Apports du fleuve
- ✓ Transfert Ferlo-lac
- ✓ Rejets CSS
- ✓ Précipitations

Figure 18 : écran des apports

VI.4 Les pertes

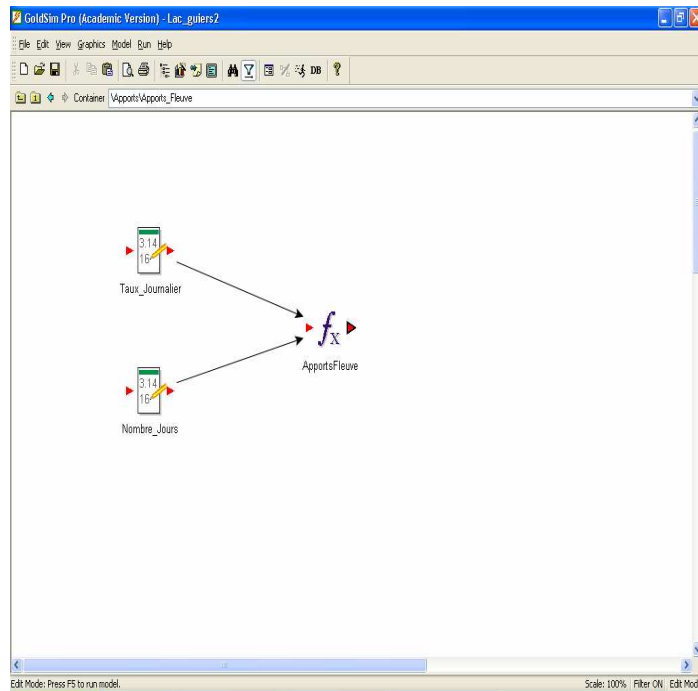


Le taux annuel des pertes est la somme des taux de :

- ✓ L'évaporation
- ✓ Transfert Lac-Ferlo
- ✓ Prélèvements SDE
- ✓ L'irrigation

Figure 19 : écran des pertes

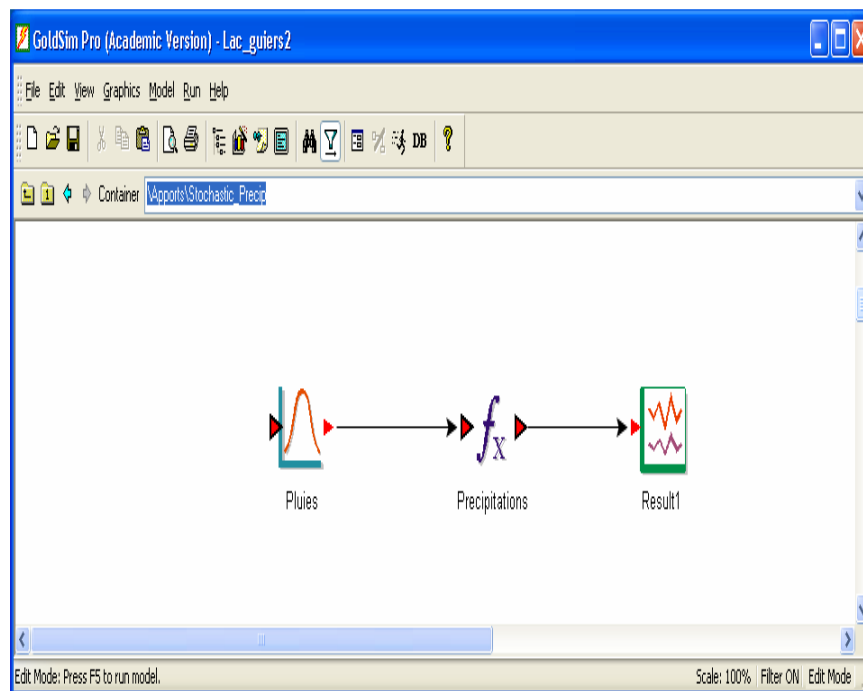
VI.5 les apports du fleuve



Le taux de remplissage du fleuve est obtenu par le produit du taux journalier de remplissage par le nombre de jours de remplissage

Figure 20 : écran des apports du fleuve

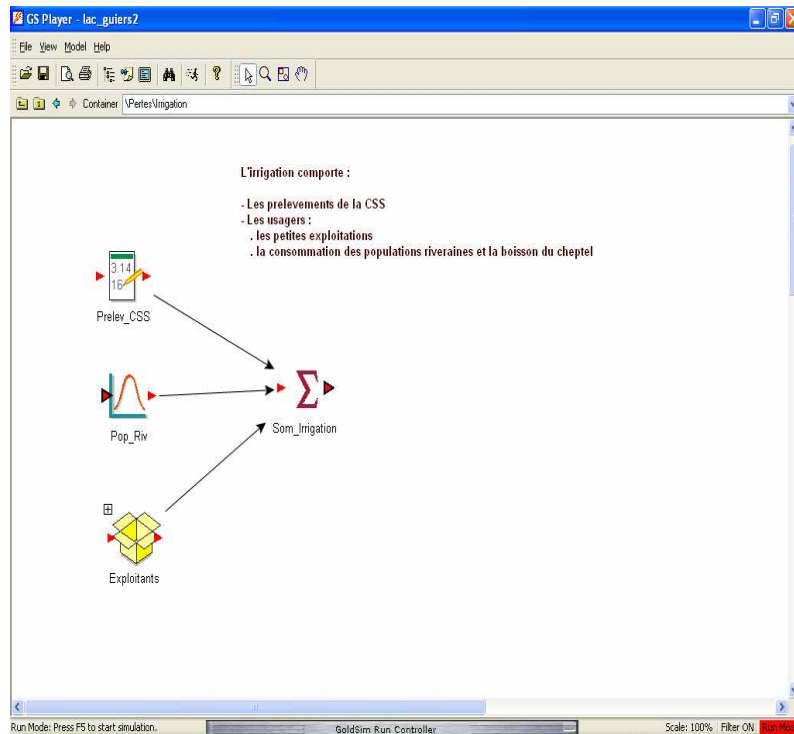
VI.6 Les précipitations



Le taux des précipitations est donné par le produit de la moyenne annuelle des pluies par la surface

Figure 21 : écran des précipitations

VI.7 L'irrigation

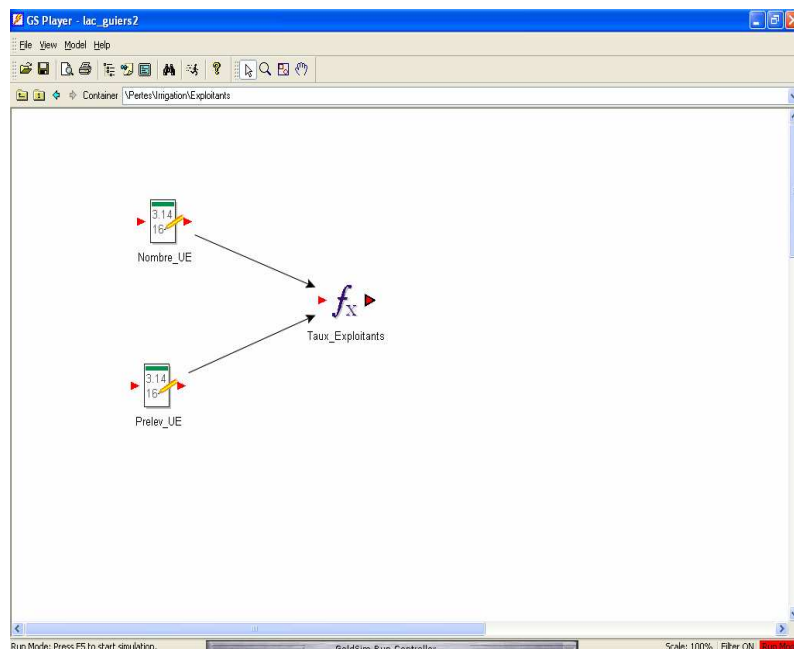


Le taux des prélèvements pour l'irrigation est la somme des taux :

- ✓ Des prélèvements de la CSS
- ✓ Des prélèvements des populations riveraines
- ✓ Des prélèvements des exploitants

Figure 22 : écran de l'irrigation

VII. Les exploitations



Le taux de prélèvements des exploitants est égal au produit du nombre d'exploitants par le taux de prélèvement d'une exploitation

Figure 23 : écran des prélèvements des exploitations

VI.5 Le calcul des résultats

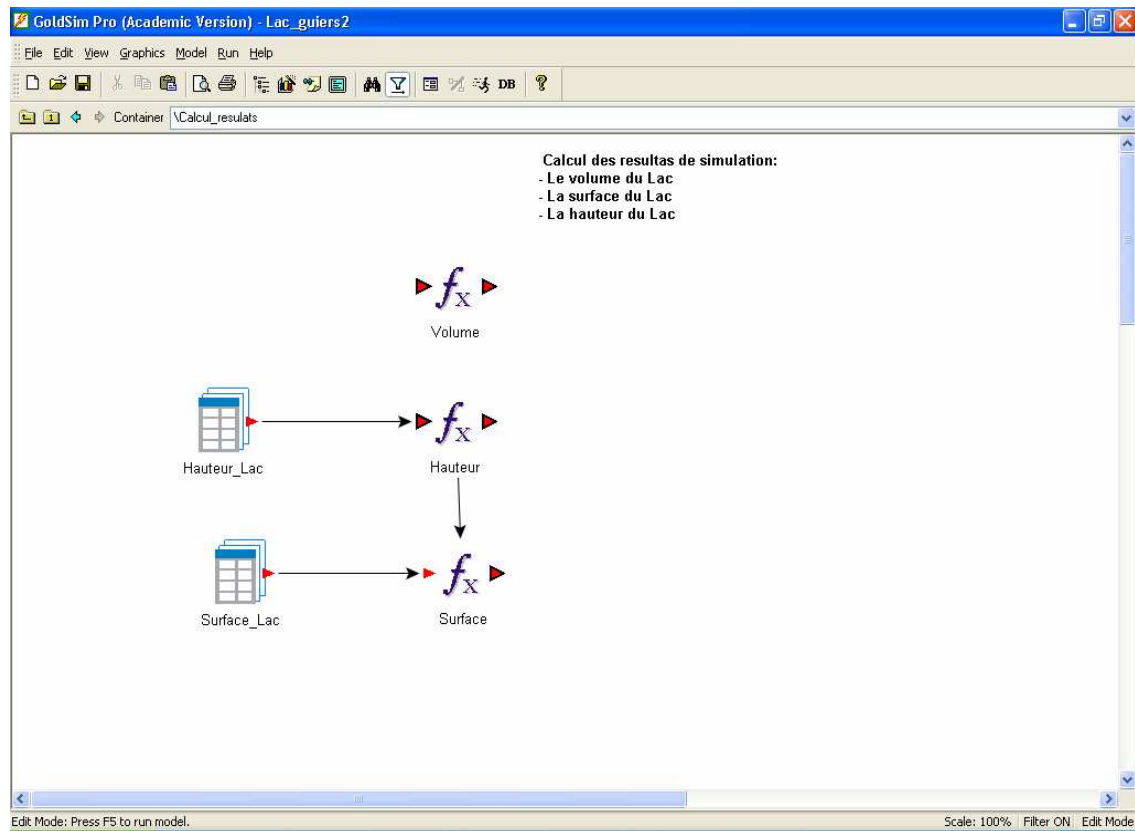


Figure 24 : écran de calcul des résultats

- ✓ Le volume est obtenu par : $V = \sum \text{apports} - \sum \text{pertes}$
- ✓ La hauteur est obtenue par interpolation ou extrapolation à l'aide d'une table comportant une série de valeurs de volume et hauteur correspondantes d'après la formule

$$\text{Volume} = 0,9821x^3 + 34,211x^2 + 149,06x + 148,85$$

Volume en millions de m³, où x représente la hauteur d'eau

- ✓ La surface est obtenue par interpolation ou extrapolation à l'aide d'une table comportant une série de valeurs de surface et hauteur correspondantes d'après la formule :

$$\text{Surface} = -1,1913x^4 + 7,4873x^3 - 5,8879x^2 + 60,183x + 155 \text{ en km}^2$$

Où x représente la hauteur d'eau en m.

VII. Résultats de simulation

Simulation 1

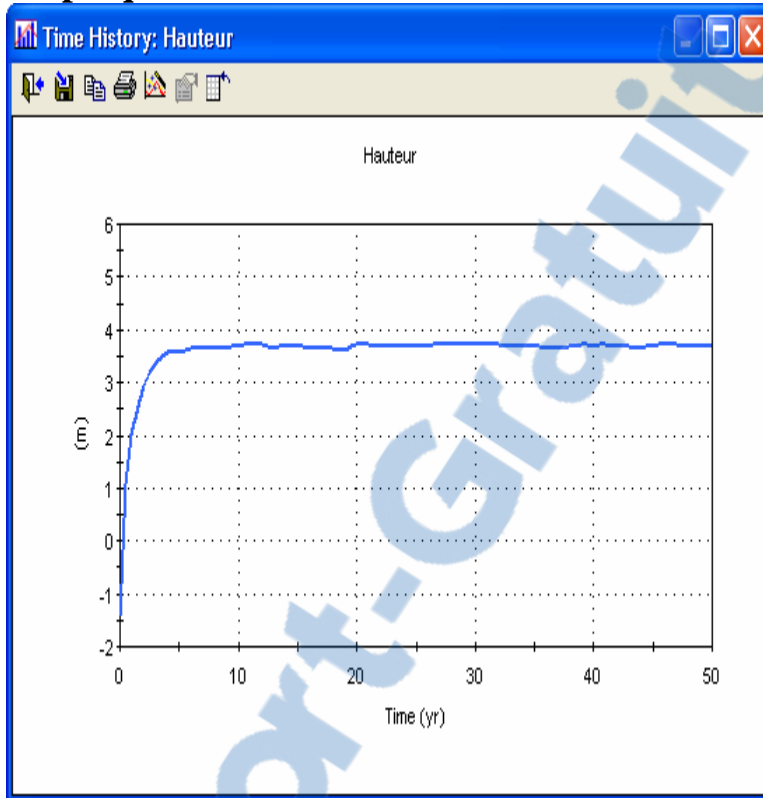
Réglages de simulation

Unité de temps : année Durée : 100 ans step : 100

Réalisation de Monte Carlo : 1

Résultat hauteur

Graphique



Réglages de simulation

Unité de temps : année

Durée : 50 ans step : 100

Réalisation de Monte Carlo : 1

Données de la simulation :

Taux de remplissage journalier du lac à partir du fleuve : 7 millions de m³/an
Nombre de jours de remplissage du lac : 120 jours

Taux de retrait de la SDE : 11 millions de m³/an

Taux de prélèvement de la CSS : 11 millions de m³/an

Le nombre d'unité d'exploitant : 800

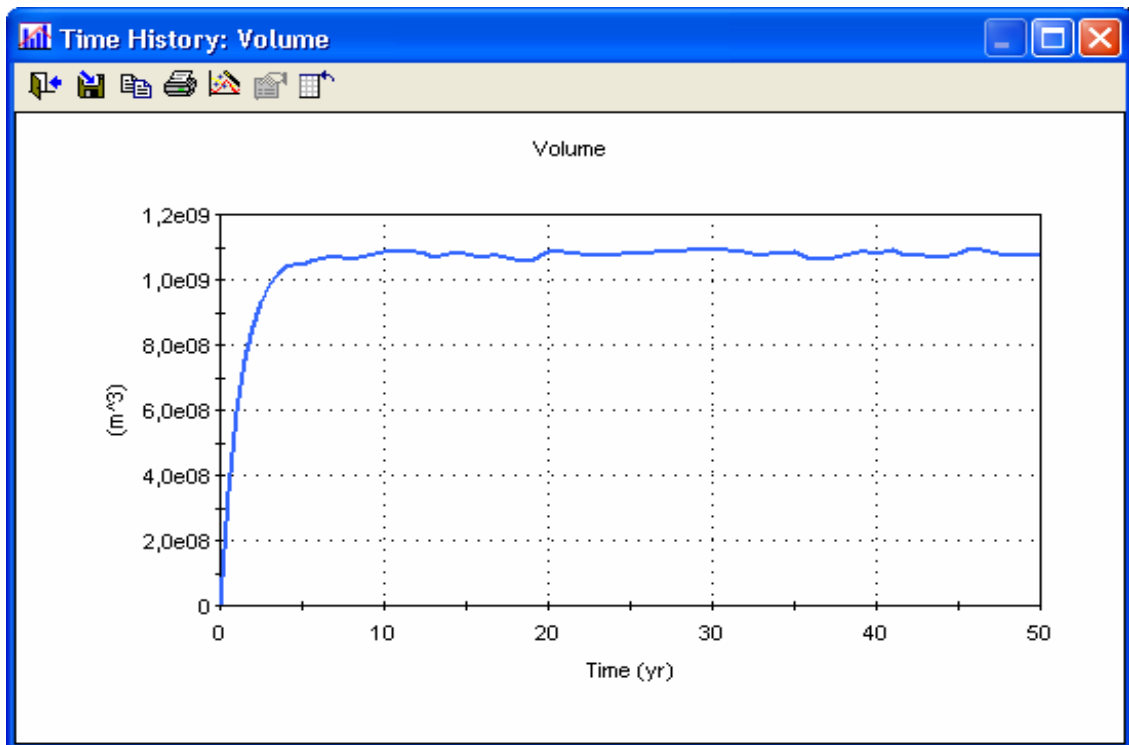
Tableau des valeurs

Time History: Hauteur

Time (yr)	Hauteur [m]
0	-1.4349
0.5	1.0647
1	2.0068
1.5	2.5563
2	2.9227
2.5	3.1865
3	3.3639
3.5	3.4807
4	3.5596
4.5	3.5721
5	3.5804
5.5	3.6145
6	3.6374
6.5	3.6516
7	3.661
7.5	3.6508
8	3.6439
8.5	3.6581
9	3.6675

Résultat Volume

Graphique



Réglages de simulation

Unité de temps : année Durée : 50 ans step : 100

Réalisation de Monte Carlo : 1

Données de la simulation :

Taux de remplissage journalier du lac a partir du fleuve : 7 millions de m³/an

Nombre de jours de remplissage du lac : 120 jours

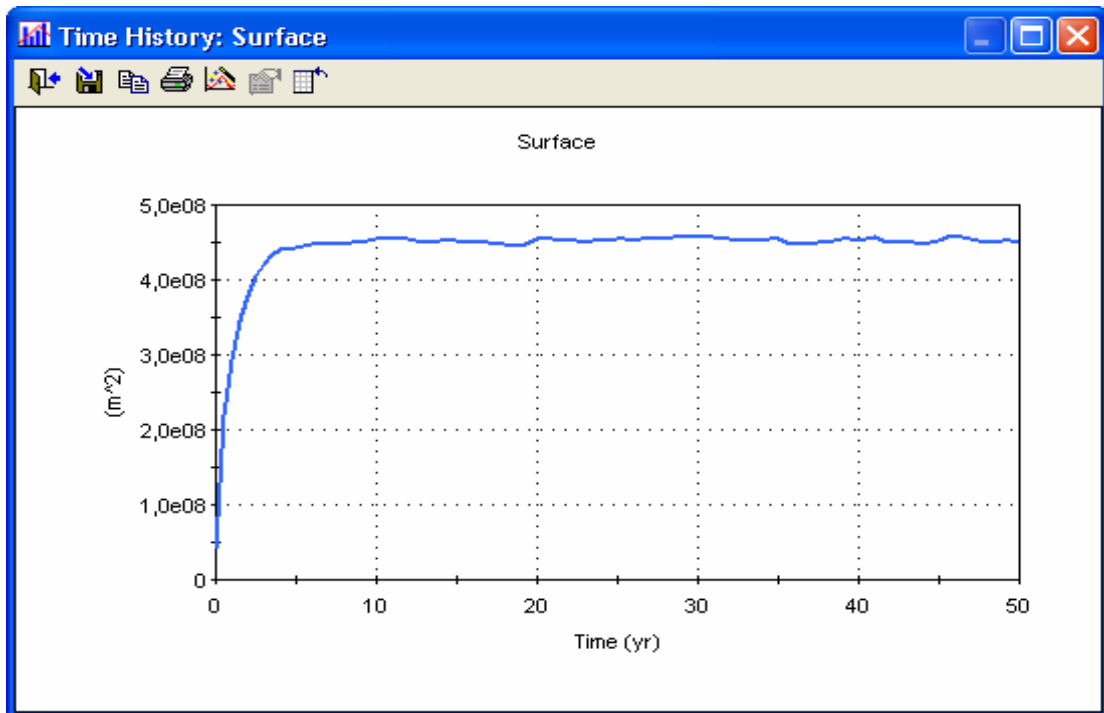
Taux de retrait de la SDE :

11 millions de m³/an

Taux de prélèvement de la CSS : 11 millions de m³/an

Le nombre d'unité d'exploitant : 800

Résultat surface



Réglages de simulation

Unité de temps : année Durée : 50 ans step : 100

Réalisation de Monte Carlo : 1

Données de la simulation :

Taux de remplissage journalier du lac a partir du fleuve : 7 millions de m³/an

Nombre de jours de remplissage du lac : 120 jours

Taux de retrait de la SDE :

11 millions de m³/an

Taux de prélèvement de la CSS : 11 millions de m³/an

Le nombre d'unité d'exploitant : 800

Simulation 2

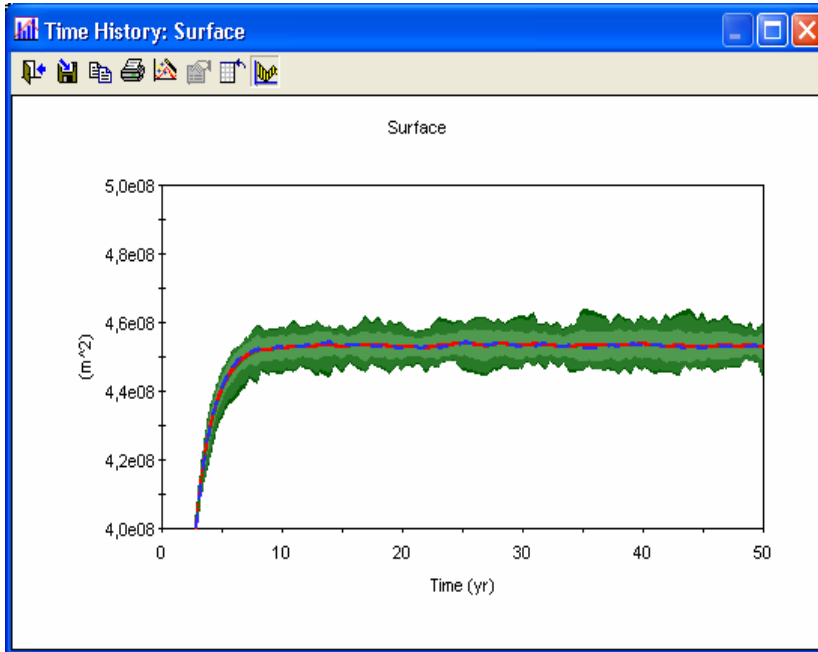
Réglages de simulation

Unité de temps : année Durée : 50 ans step : 100

Réalisation de Monte Carlo : 100

Résultat Surface

Graphique



Réglages de simulation

Unité de temps : année

Durée : 50 ans

step : 100

Réalisation de Monte Carlo : 100

Données de la simulation :

Taux de remplissage journalier du lac à partir du fleuve : 7 millions de m³/an
 Nombre de jours de remplissage du lac : 120 jours

Taux de retrait de la SDE :

11 millions de m³/an
 Taux de prélèvement de la CSS : 11 millions de m³/an

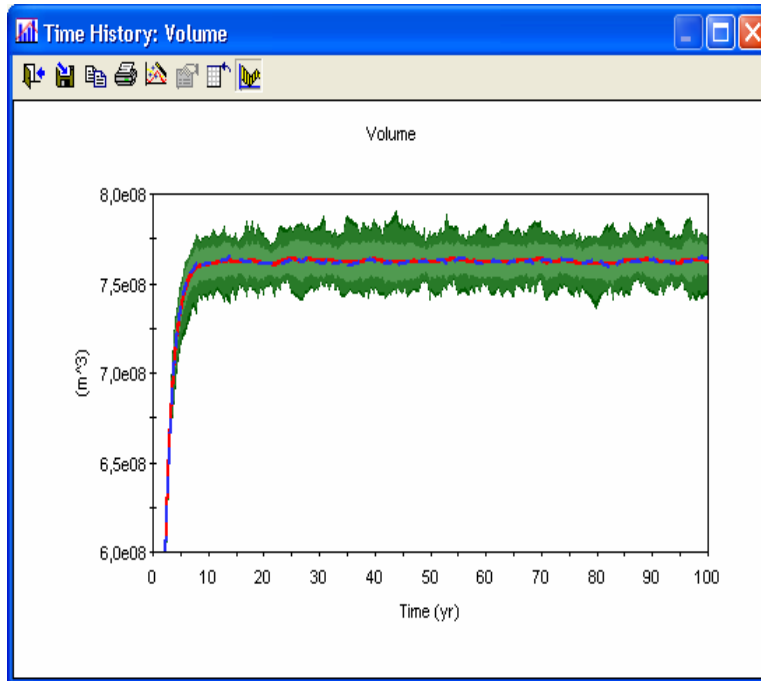
Le nombre d'unité d'exploitant : 800

Tableau de valeurs

Time (yr)	Mean	S.D.	Lower Bound	5%	25%	Median	75%
0	4.0652e+07	4.0652e+07	4.0652e+07	4.0652e+07	4.0652e+07	4.0652e+07	4.0652e+07
0.05	8.1585e+07	8.1586e+07	8.0919e+07	8.0973e+07	8.1237e+07	8.159e+07	8.190e+07
0.1	1.1121e+08	1.1121e+08	1.1016e+08	1.1023e+08	1.1063e+08	1.112e+08	1.117e+08
0.15	1.3169e+08	1.3169e+08	1.3076e+08	1.3082e+08	1.3116e+08	1.3166e+08	1.321e+08
0.2	1.4759e+08	1.476e+08	1.4643e+08	1.465e+08	1.469e+08	1.4754e+08	1.480e+08
0.25	1.6109e+08	1.6109e+08	1.6004e+08	1.6009e+08	1.6045e+08	1.6103e+08	1.616e+08
0.3	1.7217e+08	1.7217e+08	1.7105e+08	1.711e+08	1.7148e+08	1.721e+08	1.727e+08
0.35	1.8206e+08	1.8206e+08	1.8077e+08	1.8083e+08	1.8126e+08	1.8198e+08	1.827e+08
0.4	1.9113e+08	1.9113e+08	1.8977e+08	1.8984e+08	1.9029e+08	1.9104e+08	1.917e+08
0.45	1.9973e+08	1.9973e+08	1.9823e+08	1.9831e+08	1.9882e+08	1.9964e+08	2.004e+08
0.5	2.0777e+08	2.0777e+08	2.0618e+08	2.0625e+08	2.0679e+08	2.0767e+08	2.085e+08
0.55	2.1554e+08	2.1554e+08	2.138e+08	2.1389e+08	2.1447e+08	2.1543e+08	2.164e+08
0.6	2.2295e+08	2.2295e+08	2.2106e+08	2.2116e+08	2.218e+08	2.2283e+08	2.239e+08
0.65	2.301e+08	2.3011e+08	2.2805e+08	2.2816e+08	2.2886e+08	2.2999e+08	2.312e+08
0.7	2.3701e+08	2.3701e+08	2.348e+08	2.3492e+08	2.3568e+08	2.369e+08	2.382e+08
0.75	2.4368e+08	2.4368e+08	2.413e+08	2.4143e+08	2.4226e+08	2.4357e+08	2.450e+08
0.8	2.5012e+08	2.5013e+08	2.4758e+08	2.4772e+08	2.4862e+08	2.5001e+08	2.515e+08
0.85	2.5636e+08	2.5636e+08	2.5365e+08	2.538e+08	2.5476e+08	2.5625e+08	2.578e+08
0.9	2.6238e+08	2.6238e+08	2.5951e+08	2.5968e+08	2.607e+08	2.6227e+08	2.639e+08

Simulation3

Graphique volume



Réglages de simulation

Unité de temps : année

Durée : 50 ans

steps : 36500

Réalisation de Monte

Carlo : 100

Données de la

simulation :

Taux de remplissage journalier du lac à partir du fleuve : 7 millions de m^3 /an

Nombre de jours de remplissage du lac : 120 jours

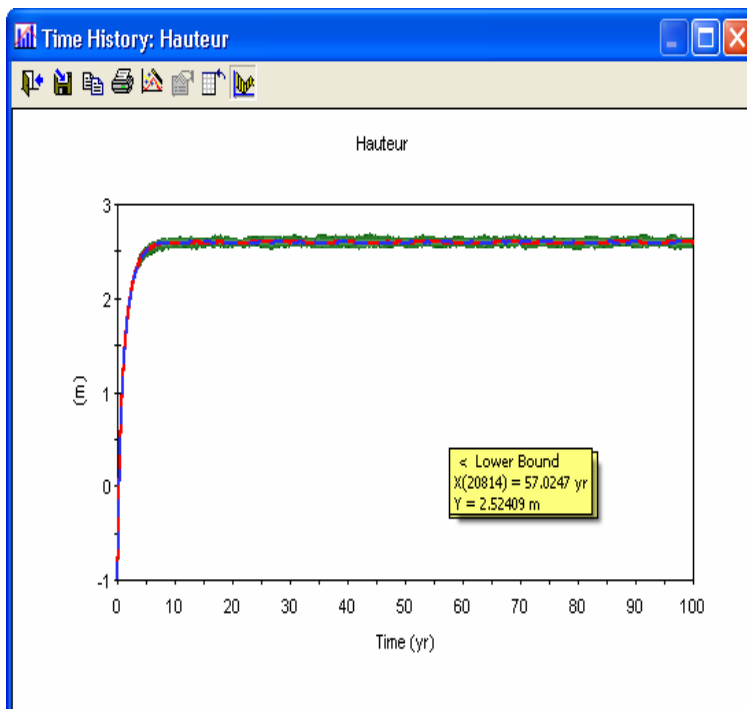
Taux de retrait de la SDE :

11 millions de m^3 /an

Taux de prélèvement de la CSS : 11 millions de m^3 /an

Le nombre d'unité d'exploitant : 5000

Graphique hauteur



VII. CONCLUSION

Conclusion

La condition pour la bonne modélisation du lac de Guiers est d'obtenir des mesures fiables des apports et des pertes. Pour améliorer les estimations, il est important d'avoir de bonnes données concernant les précipitations, l'évaporation et les transferts Ferlo-Lac.

Les conditions hydrologiques actuelles assurent au lac de Guiers de bons remplissages et une meilleure stabilité de son niveau. Cependant, si la dynamique réalisation des projets se poursuit (construction du canal du Cayor et mise en eau des vallées fossiles) ; une gestion concertée est alors indispensable entre les différents grands utilisateurs d'une part et les petits utilisateurs (périmètres maraîchers et cultures de décrue, population voisine...) installés sur les deux rives du lac, afin d'éviter les gaspillages de la ressource et l'exposition d'une importante surface d'eau à l'évaporation.

Comme perspectives pour la suite de ce travail, il s'agira :

D'une part, à l'aide d'experts (écologues, géographes, hydrologues, ...), de faire des études plus poussées pour fiabiliser les données et de mieux comprendre la nature des éléments supposés stochastiques dans ce modèle.

D'autre part de chercher à intégrer les autres dynamiques environnementales (pollution, usage des terres, etc....) du lac de Guiers.

VIII. BIBLIOGRAPHIE

- [HD 1990] ECOSYSTEM MODELING in Theory and Practice: An introduction with Case Histories: Edited by Charles A.S. HALL and John W DAY, JR (1990)
- [FA 1999] MODELING THE ENVIRONNEMENT: An Introduction to System Dynamics Modelling of Environmental Systems, Andrew FORD (1999)
- [HC 1997] MODELISATION ET SIMULATION D'ECOSYSTEMES : Des modèles déterministes aux simulations à événements. Patrick COQUILLARD, David R.C HILL (Masson 1997)
- [HJ 2000] Résumé de Joseph NONGA HONGA de : LA MODÉLISATION DES SYSTÈMES COMPLEXES : Jean-Louis LE MOIGNE (1999-2000)
- [DN] POUR UNE PEDAGOGIE OPERATIONNELE DE L'APPROCHE SYSTEMIQUE : Présentation Daniel DURAND et Emmanuel NUNEZ.
- [DS] PRINCIPES GENERAUX DE MODELISATION SYSTEMIQUE : Cours D. SAUVAT, département des sciences animales de l'institut national agronomique Paris Grignon
- [LT 2000] MANAGEMENT ET PENSEE SYSTÉMIQUE : Compilation et adaptation des textes suivants :
- *L'approche systémique et la technologie de l'éducation*, Jacques Lapointe, Université Laval
 - *Management et complexité : concepts et théorie*, R.-A.Thietart, 2000
- [LP] MODELISATION SYSTEMIQUE : Lael PARROTT, Département de Géographie, Université de Montréal.
- [OT 1994] ETUDES DES ECHANGES HYDROGEOLOGIQUES ENTRE LES EAUX DU LAC DE GUIERS ET LA NAPPE ALLUVIALE SUPERFICIELLE SOUS JACENTE (SENEGAL) : Mémoire de DEA en sciences de l'environnement soutenu par Oumar TRAORE a l'ISE en Octobre 1994

- [IS 1983] LE LAC DE GUIERS : Problématique d'environnement et de développement. ISE, colloque Faculté des sciences de l'UCAD (mai 1983)
- [EB 2000] ETUDE BARTHOMETRIQUE ET LIMNOLOGIQUE DU LAC DE GUIERS : Ministère de l'Hydraulique du Sénégal ; Rapport de synthèse. Carl Bro International (2000)
- [AC 1996] LE SYSTEME FLUVIO LACUSTRE DU GUIERS : thèse soutenue par COLY Adrien 1996

Sites Web

- GoldSim.com
- iseesystems.com
- wsu.edu
- google.com